

Marcio Fernandes Leão

COMPORTAMENTO GEOMECÂNICO DE FRENTE DE
INTEMPERISMO EM FILITO DA REGIÃO DO QUADRILÁTERO
FERRÍFERO

Tese de Doutorado (Geologia)

UFRJ
Rio de Janeiro
2017



UFRJ

COMPORTAMENTO GEOMECÂNICO DE FRENTE DE INTEMPERISMO EM FILITO DA REGIÃO DO QUADRILÁTERO FERRÍFERO

Marcio Fernandes Leão

Tese de Doutorado submetida ao Programa de Pós-graduação em Geologia, Instituto de Geociências, da Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, como requisito necessário à obtenção do grau de Doutor em Ciências (Geologia).

Área de concentração: Geologia de Engenharia e Ambiental

Orientador(es):

Eurípedes do Amaral Vargas Jr. - UFRJ

Emílio Velloso Barroso – UFRJ

Eduardo Antônio Gomes Marques - UFV

Rio de Janeiro

Junho de 2017

Marcio Fernandes Leão

COMPORTAMENTO GEOMECÂNICO DE FRENTE DE INTEMPERISMO EM
FILITO DA REGIÃO DO QUADRILÁTERO FERRÍFERO

Tese de doutorado submetida ao
Programa de Pós-graduação em
Geologia, Instituto de Geociências, da
Universidade Federal do Rio de Janeiro –
UFRJ, como requisito necessário à
obtenção do grau de Doutor em Ciências
(Geologia).

Área de concentração:

Geologia de Engenharia e Ambiental

Orientador(es):

Eurípedes do Amaral Vargas Jr. – UFRJ

Emílio Velloso Barroso – UFRJ

Eduardo Antônio Gomes Marques – UFV

Aprovada em: 05/06/17

Por:



Presidente: Helena Polivanov, UFRJ



Andrea Ferreira Borges, UFRJ



Euzébio José Gil, UFRJ



Armando Prestes de Menezes Filho, UERJ



Sérgio Augusto Barreto da Fontoura, PUC-RIO

UFRJ
Rio de Janeiro
2017

CIP - Catalogação na Publicação

L433c Leão, Marcio Fernandes
Comportamento Geomecânico de Frente de
Intemperismo em Filito da Região do Quadrilátero
Ferrífero / Marcio Fernandes Leão. -- Rio de
Janeiro, 2017.
186 f.

Orientador: Eurípedes do Amaral Vargas Jr..
Coorientadores: Emílio Velloso Barroso.
Eduardo Antônio Gomes Marques
Tese (doutorado) - Universidade Federal do Rio
de Janeiro, Instituto de Geociências, Departamento de
Geologia, Programa de Pós-Graduação em Geologia,
2017.

1. Perfis de Intemperismo. 2. Filitos. 3.
Quadrilátero Ferrífero. 4. Alteração. 5. Mecânica
das Rochas. I. Vargas Jr., Eurípedes do Amaral ,
orient. II. Barroso, Emílio Velloso; Marques,
Eduardo Antônio Gomes, coorient. III. Título.

A minha esposa Caroline, por mais um desafio vencido, dentre muitos que ainda virão e vencerei.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Prof. Dr. Eurípedes do Amaral Vargas Jr. pelo aceite neste tema desafiador, permitindo que a Tese faça parte de suas pesquisas desenvolvidas, por anos, acerca dos efeitos do intemperismo nas rochas.

Ao meu orientador e amigo, Prof. Eduardo Antônio Gomes Marques, principalmente nas fases iniciais do trabalho, quanto à busca pela área de pesquisa. Agradeço imensamente por mostrar o caminho da docência, enfrentando doutores de igual para igual, quando eu ainda trilhava esse caminho, no concurso de Viçosa.

Em especial ao meu mentor e orientador Prof. Dr. Emílio Velloso Barroso pela grande amizade, ou como ele mesmo gosta de dizer... "camaradagem", nascida desde meu mestrado. Sem você esta Tese não teria se concretizado! Obrigado por cativar em todos nós o desejo a busca pelo conhecimento!

À Prof. Dra. Helena Polivanov pelas grandes contribuições a esta pesquisa, não apenas pelo seu grande conhecimento, quanto a caracterização mineralógica, química e por DRX, mas pela suas sugestões e grande amizade.

À Prof. Dra. Andrea Ferreira Borges pelas importantes orientações e confiança depositada na execução dos ensaios de cisalhamento direto, fundamentais para a conclusão do trabalho.

Aos grandes amigos que compartilharam do meu esforço (LEMETRO e PEDOLAB) ao longo desses anos e que da mesma forma busquei apoiar, para que amanhã cheguem até aqui e possamos juntos comemorar as vossas vitórias. Não haveria espaço para listar os nomes.

Ao Programa de Pós-Graduação em Geologia por confiar no meu compromisso de encerrar esta etapa, mesmo considerando às grandes dificuldades ocorridas.

A CAPES pelo apoio à realização dessa pesquisa.

Aos membros da banca que aceitaram dividir seu conhecimento na contribuição do presente trabalho.

“Paga-se mal a um mestre, quando se continua sempre a ser o aluno.”
Friedrich Nietzsche (1844 – 1900).

Resumo

LEÃO, Marcio Fernandes. Comportamento geomecânico de frente de intemperismo em filito da região do quadrilátero ferrífero. Rio de Janeiro, 2017. 188 f. Tese (Doutorado em Geologia) – Programa de Pós-graduação em Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.

Rochas de baixo grau metamórfico são conhecidas pela sua baixa resistência mecânica e também por sua alterabilidade eventualmente elevada. No Quadrilátero Ferrífero, região sudeste do Brasil, este conjunto de características resulta em frequentes problemas de instabilidade de taludes de mineração e rodoviários associados com filitos, principalmente. Apesar da expressiva produção de minério de ferro, pouco se conhece das propriedades geotécnicas dos materiais que compõem a frente de intemperismo. O objetivo desta Tese é discutir a variação de propriedades mineralógicas, físicas, químicas e mecânicas de filitos em quatro estágios de alteração. O método de trabalho incluiu a classificação de campo dos quatro estágios de alteração e mapeamento da distribuição espacial destes estágios em um talude rodoviário para amostragem e caracterização geológica. A mineralogia foi definida por petrografia e difração de raios-X (DRX). Avaliações químicas utilizaram fluorescência de raios-X (FRX) e índices químicos. Propriedades físicas foram definidas com base em índices físicos, porosimetria de mercúrio, colorimetria, e alterabilidade (*"slake durability test"*, cliclagem água-estufa e lixiviação em rocha). Dados de resistência foram obtidos com martelo de Schmidt, em campo e laboratório, compressão puntiforme (*"point load test"* - PLT) e cisalhamento direto (condição natural e saturada). Os resultados mostram que feições estruturais como descontinuidades e foliações metamórficas são relevantes papel na distribuição de rochas com diferentes intensidades de alteração no talude. As variações das propriedades físicas e mecânicas definem melhor quando comparadas às mineralógicas. Apesar das condições tropicais da região, quimicamente a frente é pouco desenvolvida, havendo um predomínio do intemperismo físico sobre o químico. Cabe ressaltar que níveis cimentados, identificados nos planos de foliação, influenciam diretamente as propriedades geomecânicas da frente de intemperismo. As supracitadas características geram maciços rochosos heterogêneos e anisotrópicos. Consequentemente, as definições de modelos geomecânicos tornam-se complexos, dificultando na previsão do comportamento de estruturas de engenharia sobre ou no interior do maciço rochoso.

Palavras-chave: Intemperismo, Filito, Quadrilátero Ferrífero

Abstract

LEÃO, Marcio Fernandes. Comportamento geomecânico de frente de intemperismo em filito da região do Quadrilátero Ferrífero [*Geomechanical behavior of phyllite weathering front in the region of Quadrilátero Ferrífero*] Rio de Janeiro, 2017. 188 f. Tese (Doutorado em Geologia) – Programa de Pós-graduação em Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.

Low-grade metamorphic rocks are known for their low mechanical strength and also for their possibly elevated alterability. In the Quadrilátero Ferrífero, southeast region of Brazil, this set of characteristics results in frequent problems of instability of mining and road slopes associated with phyllites, mainly. Despite the significant production of iron ore, little is known about the geotechnical properties of the materials that compose the weathering front. The aim of this thesis is to discuss the variation of mineralogical, physical, chemical and mechanical properties in four phyllites weathering grades. The methodology included the field classification of the four weathering grades and mapping of the spatial distribution of these grades in a road slope for sampling and geological characterization. The mineralogy was defined by petrography and X-ray diffraction (XRD). Chemical evaluations utilized X-ray fluorescence (XRF) and chemical indexes. Physical properties were defined based on physical indexes, mercury porosimetry, colorimetry, and alterability (slake durability tests, wetting and drying cycle, and rock leaching. Resistance data were obtained with Schmidt hammer, field and laboratory, point load test (PLT) and direct shear (natural and saturated condition). The results show that structural features such as discontinuities and metamorphic foliations are relevant role in the distribution of rocks with different slope change intensities. The variations of physical and mechanical properties define better when compared to mineralogical ones. Despite the tropical conditions of the region, chemically the front is poorly developed, with a predominance of physical weathering over the chemical. It should be emphasized that cemented levels, identified in the foliation planes, directly influence the geomechanical properties of the weathering front. The aforementioned characteristics generate heterogeneous and anisotropic rock massifs. Consequently, the definitions of geomechanical models become complex, making it difficult to predict the behavior of engineering structures on or inside the rock mass.

Key-Words: Weathering, Phyllite, Quadrilátero Ferrífero

Lista de figuras

Figura 1 Critérios para preparação de amostras para o ensaio de compressão pontual (PLT)	32
Figura 2 Coluna estratigráfica simplificada do QF (ALKMIM e MARSHAK, 1998). ...	35
Figura 3 Mapa das principais estruturas do QF. Dobras: 1 - Sinclinal Piedade, 2 - Homoclinal Serra do Curral, 3 - Anticlinal da Serra do Curral, 4 - Sinclinal Moeda, 5 - Sinclinal Dom Bosco, 6 - Anticlinal de Mariana, 7 - Sinclinal Santa Rita, 8 - Anticlinal Conceição, 9 - Sinclinal Gandarela, 10 - Sinclinal Vargem do Lima, 11 - Sinclinal dos Andaimes. Complexos granito-gnáissicos: 12 - Belo Horizonte, 13 - Bonfim, 14 - Bação, 15 - Santa Bárbara, 16 - Caeté. Falhas: 17 - Bem-Te-Vi, 18 - São Vicente, 19 - Raposos, 20 - Caeté, 21 - Cambotas, 22 - Fundão, 23 - Água Quente, 24 - Congonhas, 25 - Engenho. Cidades: BH - Belo Horizonte, CC - Cachoeira do Campo, IT - Itabirito, NL - Nova Lima, CA - Caeté, CG - Congonhas, OP - Ouro Preto (BALTAZAR e ZUCHETTI, 2007 modificado de CHEMALE Jr. et al, 1994).	38
Figura 4 Mapa Geológico 1:50.000 da área de estudo (BALTAZAR et al, 2005 Adaptado).	40
Figura 5 Blocos rochosos de filito coletados para ensaios de laboratório. À esquerda nível W1 e a direita nível W4.....	43
Figura 6 Detalhes de amostras e cortes para lâminas petrográficas em função da foliação.	44
Figura 7 Lâminas delgadas para os níveis W1 a W4. Em (a) sentido paralelo à foliação e em.....	44
Figura 8 Em (a) moinho utilizado para moagem das amostras. Em (b) acessórios utilizados no processo de moagem. Em (c) níveis de alteração, W1 a W4, já reduzidos a pó de rocha.....	45
Figura 9 Detalhe de aparelho DRX, modelo D8 Advance.....	46
Figura 10 Amostras W1 a W4, da esquerda para a direita, após o processo final de sifonamento das provetas para obtenção da fração argila e armazenamento da mesma em garrafas pet.	47
Figura 11 Lâminas delgadas de fração argila prontas para análise em DRX. Da esquerda para a direita os níveis de alteração W1 a W4. Notar a diferença de tonalidade entre as lâminas.	48
Figura 12 Lâminas delgadas com fração silte em processo de secagem após preparo.	49
Figura 13 Amostrador com pó de rocha a ser analisado por DRX.....	49
Figura 14 Amostras utilizadas para obtenção dos índices físicos.....	50
Figura 15 Detalhe do porosímetro Micromeritics PoreSizer 9320, USP – São Carlos.	51
Figura 16 Sistema de coordenadas L*, a*, b* (CIELAB, 1976).	51
Figura 17 Detalhes do colorímetro durante o teste da cor na matriz da rocha.....	52
Figura 18 Amostras dos graus de alteração W1 a W4 para o ensaio de durabilidade (“ <i>slake durability test</i> ”).	53
Figura 19 Equipamento utilizado para a realização do ensaio de durabilidade.	53
Figura 20 Fragmentos dos níveis W1 a W4 para ensaios de ciclagem água-estufa.	55

Figura 21 Frações retidas na peneira de 12,5 mm dos níveis W1 a W4 para ensaios de lixiviação em rocha.....	56
Figura 22 Detalhe de amostras em cartucho feito com papel filtro no interior do extrator Soxhlet.	56
Figura 23 Esquema de montagem do extrator Soxhlet. (1) representa a alimentação contínua de água ao condensador, entrando em (2) e saindo em (3). A água aquecida no balão volumétrico produz vapor (A) que percorre o canalículo (B1 a B2) até o extrator Soxhlet. O vapor sofre condensação e umedece o cartucho de papel filtro com as amostras. Quando a água atinge o sifão em (C1) é finalizado um ciclo, onde o fluido retorna por (C2) para o início do ciclo seguinte.	57
Figura 24 Esclerômetros tipo L, utilizados para obtenção de R.	58
Figura 25 Esquema de carregamento de corpo de prova cilíndrico no ensaio de compressão puntiforme (ISRM, 1981) (adaptado).	59
Figura 26 Relação das dimensões proposta pela ISRM (1981) (adaptado) para corpos de prova irregulares.	59
Figura 27 Corpos de prova irregulares dos níveis de alteração W1 (a), W2 (b), W2 foliação (c), W3 (d) e W4 (e). Em (f) é mostrada seção ortogonal à foliação dos níveis máficos e silicosos no nível W2 Foliação.	60
Figura 28 Detalhe de prensa de solos para cisalhamento direto (a) e caixa de cisalhamento. Em (c) corpo de prova de amostra W1 moldado nas dimensões para a caixa de cisalhamento (5 x 5 x 2 cm).	61
Figura 29 Relação da variação da altura pela raiz do tempo, para as condições não-saturada (a) e saturada (b), em amostra W1.	61
Figura 30 Resultado da amostra após processo de britagem e peneiramento.	63
Figura 31 Em (a) bloco de rocha W3 após tentativa de extração de corpos-de-prova. Em (b) amostras dos graus de alteração W1 a W4 confeccionadas manualmente para ensaios mecânicos.	64
Figura 32 Imagem panorâmica do talude rodoviário estudado (km 140 da BR-356).	65
Figura 33 Em (a), destaque de quartzito, que ocorre em porções da frente de intemperismo, de forma intercalada com o filito na parte oeste do talude. Em (b), afloramento de filito W1/W2, micáceo, de granulometria fina, riscado facilmente pelo martelo geológico, sendo medianamente resistente ao golpe do mesmo. São notados níveis oxidados entre as foliações.	66
Figura 34 Em (a), detalhe de famílias de fraturas ortogonais entre si, induzindo a formação de blocos e posterior queda do perfil de intemperismo. Em (b), detalhe de abertura entre as fraturas, com média de 0,5 mm (W2).	66
Figura 35 Em (a), evidência de W1 que ocorre entre níveis W3. Apesar da rocha ser considerada sã, ela apresenta forte deslocamento nos planos de foliação. Em (b), trecho de contato entre as classes W4 e W3 com forte alteração entre os planos de foliação.	66
Figura 36 Em (a) contato brusco entre os níveis W6 e W4 (trecho mais acima do talude). Blocos de rocha filito (W3 e em menor quantidade W1/W2), estão dispostos na encosta. Em (b) detalhe de seixos de quartzo centimétricos, que ocorrem dispersos na superfície do perfil de alteração.	67
Figura 37 Veios de quartzo que ocorrem em trechos do perfil de alteração, intercalados com a rocha filito. Sua evidência é mais proeminente em níveis W3 e principalmente W4.	67
Figura 38 Distribuição dos níveis de alteração com base nas interpretações de campo.	68

Figura 39 Planos de foliação observados no sentido ortogonal (à esquerda) e paralelo (à direita) dos graus de alteração W1 (a) e (b), W2 Foliação (c) e (d), W2 (e) e (f), W3 (g) e (h) e W4 (i) e (j), respectivamente.	70
Figura 40 Contagem modal para os níveis de alteração W1 a W4.	72
Figura 41 Principais características observadas em W1. Legenda: M – muscovita, Q – quartzo e Op - opacos.	73
Figura 42 Principais características observadas em W2. Legenda: M/S – alteração de muscovita para sericita, Q – quartzo e Op - opacos.	74
Figura 43 Principais características observadas em W3. Legenda: M/S – alteração de muscovita para sericita, Q – quartzo e Op - opacos.	75
Figura 44 Principais características observadas em W4. Legenda: M/S – alteração de muscovita para sericita, S – sericita, Q – quartzo e Op - opacos.	75
Figura 45 Elementos maiores (Al_2O_3 , SiO_2 e Fe_2O_3) em porcentagem para W1 a W4.	77
Figura 46 Elementos maiores (K_2O , CaO , MgO , Na_2O e TiO_2) em porcentagem para W1 a W4.	78
Figura 47 Índice químico relação mobilizável/imobilizável (ba, ba1, ba2 e ba3 – HARRASSOWITZ, 1926; Bases R_2O_3 e Al – COLMAN, 1982 e WR – CHITTLEBOROUGH, 1991).	79
Figura 48 Índice químico relação mobilizável/imobilizável (b1 – ROCHA FILHO et al, 1985; WI-1/WI-2 – DARMODY et al, 2005).	80
Figura 49 Conteúdos de sílica (SF e Sílica/ R_2O_3 – JENNY, 1941; PI – REICHE, 1943; R – RUXTON, 1986; STI – JAYAWARDENA E IAZAMA, 1994).	80
Figura 50 Índices baseados na alteração química (CIA – NESBITT e YOUNG, 1982; CIW – HARNOIS, 1988; ALKRatio – HARNOIS e MOORE, 1988; PIA – FEDO et al, 1995; V – VOGT, 1972).	81
Figura 51 Índices normalizados (B – HARRASSOWITZ, 1926; LchFactor – JENNY, 1941; WI – SHORT, 1961).	82
Figura 52 Índices normalizados (K – ROCHA FILHO et al., 1985).	82
Figura 53 DRX executado pelo método do pó para os níveis de alteração.	83
Figura 54 DRX da fração argila dos graus de alteração (Legenda: preto - amostra natural; vermelho - amostra glicolada e azul – amostra aquecida).	85
Figura 55 Semiquantificação da fração argila realizada por área de pico.	86
Figura 56 DRX da fração silte dos graus de alteração estudados.	87
Figura 57 Semiquantificação da fração silte realizada por área de pico.	87
Figura 58 Valores de porosidade (%) para os graus de alteração. Em destaque o valor correspondente a média das medidas.	88
Figura 59 Valores da capacidade de absorção de água (%) para os graus de alteração. Em destaque o valor correspondente a média das medidas.	89
Figura 60 Valores de massa específica seca (g/cm^3) para os graus de alteração. Em destaque o valor correspondente a média das medidas.	89
Figura 61 Valores de massa específica saturada (g/cm^3) para os graus de alteração. Em destaque o valor correspondente a média das medidas.	90
Figura 62 Variação da porosidade com o intemperismo (W1 à W4), determinada no processo de injeção de mercúrio.	92
Figura 63 Variação da porosidade com o intemperismo (W1 à W4), determinada no processo de drenagem de mercúrio.	93
Figura 64 Valores da luminosidade L^* para os graus de alteração dos filitos (W1 a W4 e, W2 Foliação – cor laranja). Em destaque o valor correspondente a média das medidas.	93

Figura 65 Valores da intensidade de cor vermelho/verde a^* para os graus de alteração dos filitos (W1 a W4 e, W2 Foliação – cor laranja). Em destaque o valor correspondente à média das medidas.	94
Figura 66 Valores da intensidade de cor amarelo/azul b^* para os graus de alteração dos filitos (W1 a W4 e, W2 Foliação – cor laranja). Em destaque o valor correspondente a média das medidas.	95
Figura 67 Valores da variação total da cor ΔE^* para os graus de alteração dos filitos (W1 a W4 e, W2 Foliação – cor laranja). Em destaque o valor correspondente a média das medidas.	96
Figura 68 Resultado das amostras de W1 a W4 após dois ciclos do ensaio de “slake”	97
Figura 69 Índices de “slake” (I_{d1} e I_{d2}) apresentados para W1 a W4.	97
Figura 70 Evolução dos índices de “slake” (I_{d1} a I_{d10}) ao longo de dez ciclos para os níveis de alteração.	98
Figura 71 Evolução dos índices de “slake” (I_{d1} a I_{d10}) para amostras W1.	99
Figura 72 Evolução dos índices de “slake” (I_{d1} a I_{d10}) para amostras W2.	100
Figura 73 Evolução dos índices de “slake” (I_{d1} a I_{d10}) para amostras W3.	101
Figura 74 Evolução dos índices de “slake” (I_{d1} a I_{d10}) para amostras W4.	102
Figura 75 Índices de “slake” (I_d) para os graus de alteração com base na repetibilidade do ensaio.	104
Figura 76 Valores médios de I_d para os graus de alteração com base na repetibilidade do ensaio.	104
Figura 77 Amostras após o I_{d2} para os quatro graus de alteração.	105
Figura 78 Detalhe de fragmentos após I_{d2} evidenciando os materiais minerais que ocorrem entre as foliações.	106
Figura 79 Frações do nível W1 após 10, 20, 30 e 36 ciclagens água-estufa.	107
Figura 80 Frações do nível W2 após 10, 20, 30 e 42 ciclagens água-estufa.	108
Figura 81 Frações do nível W3 após 10, 20, 30 e 36 ciclagens água-estufa.	108
Figura 82 Frações do nível W4 após 3 ciclagens água-estufa.	109
Figura 83 Frações dos níveis de alteração conforme execução da ciclagem água-estufa.	109
Figura 84 Frações dos níveis de alteração após períodos determinados de ensaio ciclagem água-estufa.	110
Figura 85 Curvas granulométricas para amostras W1 em ensaio de ciclagem água-estufa.	111
Figura 86 Curvas granulométricas para amostras W2 em ensaio de ciclagem água-estufa.	112
Figura 87 Curvas granulométricas para amostras W3 em ensaio de ciclagem água-estufa.	112
Figura 88 Curvas granulométricas para amostras W4 em ensaio de ciclagem água-estufa.	112
Figura 89 Amostras W1 após 30, 60, 90 e 100 ciclos por extrator Soxhlet.	113
Figura 90 Amostras W2 após 30, 60, 90 e 100 ciclos por extrator Soxhlet.	114
Figura 91 Amostras W3 após 30, 60, 90 e 100 ciclos por extrator Soxhlet.	114
Figura 92 Amostras W4 após 30, 60, 90 e 100 ciclos por extrator Soxhlet.	115
Figura 93 Variação do número de fragmentos ao longo do ensaio de lixiviação em rocha para W1 a W4.	115
Figura 94 Evolução da massa dos quatro níveis de alteração ao longo de 100 ciclos.	116

Figura 95 Curvas granulométricas de amostras W1 a cada 10 ciclos do ensaio de lixiviação em rocha.....	117
Figura 96 Curvas granulométricas de amostras W2 a cada 10 ciclos de ensaio de lixiviação em rocha.....	117
Figura 97 Curvas granulométricas de amostras W3 a cada 10 ciclos do ensaio de lixiviação em rocha.....	117
Figura 98 Curvas granulométricas de amostras W4 a cada 10 ciclos do ensaio de lixiviação em rocha.....	118
Figura 99 Esclerometria executada in situ, ortogonalmente à foliação, para os níveis de alteração.	119
Figura 100 Esclerometria executada em laboratório, ortogonalmente à foliação, para os níveis de alteração.	119
Figura 101 Valores de $I_{s(50)}$ determinados para os níveis de alteração existentes no filito.	121
Figura 102 (a) Execução de PLT em classe W2 (Foliação); notar elevada penetração do cone na amostra. (b) Amostra de W2 Foliação após ensaio.	122
Figura 103 Resultados para condição natural, relacionando $\tau \times \sigma'_n$ e δ_h para W1. ...	123
Figura 104 Resultados para condição natural, relacionando $\tau \times \sigma'_n$ e δ_h para W2. ...	125
Figura 105 Resultados para condição natural, relacionando $\tau \times \sigma'_n$ e δ_h para W2 Foliação.	126
Figura 106 Resultados para condição natural, relacionando a $\tau \times \sigma'_n$ e δ_h para W3. 128	
Figura 107 Resultados para condição natural, relacionando a $\tau \times \sigma'_n$ e δ_h para W4. 129	
Figura 108 Aspectos das superfícies de cisalhamento, condição natural, para W1 (a e b), W2 (c e d), W2 Foliação (e e f), W3 (g e h) e W4 (i e j). A seta vermelha indica o sentido do cisalhamento.	130
Figura 109 Relações linear (a) e não linear (b) para W1 na condição natural.	132
Figura 110 Relações linear (a) e não linear (b) para W2 (vermelho) e W2 Foliação (laranja) na condição natural.	133
Figura 111 Relações linear (a) e não linear (b) para W3 na condição natural.	134
Figura 112 Relações linear (a) e não linear (b) para W4 na condição natural.	135
Figura 113 Limites de intervalos de confiança (95% de significância) para os graus de alteração na condição natural.	136
Figura 114 Resultados para condição saturada, relacionando a $\tau \times \sigma'_n$ e δ_h para W1.	138
Figura 115 Resultados para condição saturada, relacionando a $\tau \times \sigma'_n$ e δ_h para W2.	139
Figura 116 Resultados para condição saturada, relacionando a $\tau \times \sigma'_n$ e δ_h para W2 Foliação.	140
Figura 117 Resultados para condição saturada, relacionando a $\tau \times \sigma'_n$ e δ_h para W3.	141
Figura 118 Resultados para condição saturada, relacionando a $\tau \times \sigma'_n$ e δ_h para W4.	142
Figura 119 Aspectos das superfícies de cisalhamento, condição saturada, para W1 (a e b), W2 (c e d), W2 Foliação (e e f), W3 (g e h) e W4 (i e j). A seta vermelha indica o sentido do cisalhamento.	144
Figura 120 Relações linear (a) e não linear (b) para W1 na condição saturada.	145
Figura 121 Relações linear (a) e não linear (b) para W2 (vermelho) e W2 Foliação (laranja) na condição saturada.	146
Figura 122 Relações linear (a) e não linear (b) para W3 na condição saturada.	147
Figura 123 Relações linear (a) e não linear (b) para W4 na condição saturada.	148

Figura 124 Limites de Intervalos de confiança, 95% de significância para W4 Foliação, condição saturada.	150
Figura 125 Comparação entre os valores de c' para a condição natural e saturada.	150
Figura 126 Comparação entre os valores de ϕ' para a condição natural e saturada.	151
Figura 127 Relação entre os valores de porosidade com resultados de R para os graus de alteração.	152
Figura 128 Relação entre os valores de porosidade com resultados de $I_{s(50)}$ para os graus de alteração.	152
Figura 129 Relação entre os valores de porosidade com resultados de índices químicos normatizados K e WI para os graus de alteração.	153
Figura 130 Relação entre os valores de porosidade com resultados de c' para os graus de alteração.	154

Lista de tabelas

Tabela 1 Contagem modal semiquantitativa para os graus de alteração	73
Tabela 2 Elementos maiores (%) e menores (ppm) para os graus de alteração W1 a W4.	76
Tabela 3 Análise semiquantitativa para a fração argila	86
Tabela 4 Análise semiquantitativa para a fração silte.....	87
Tabela 5 Valores de porosidade (%) encontrados para os graus de alteração.....	90
Tabela 6 Valores de capacidade de absorção de água (%) para os graus de alteração.	90
Tabela 7 Valores de massa específica seca (g/cm^3) para os graus de alteração.	90
Tabela 8 Valores de massa específica saturada (g/cm^3) para os graus de alteração.	90
Tabela 9 Valores da luminosidade L^* para os graus de alteração.	94
Tabela 10 Valores da intensidade cor vermelho/verde a^* para os graus de alteração.	94
Tabela 11 Valores da intensidade cor amarelo/azul b^* para os graus de alteração.	95
Tabela 12 Valores da variação total da cor ΔE^* para os graus de alteração.	96
Tabela 13 Valores de I_d (%) para os níveis de alteração W1 a W4.	97
Tabela 14 Valores de I_d (%) para os níveis de alteração W1 a W4.	98
Tabela 15 Valores de I_d (%) para W1 a W4 considerando a repetibilidade.	103
Tabela 16 Massas retidas nas peneiras após ensaio de ciclagem água-estufa.....	111
Tabela 17 Valores de R obtidos em afloramento rochoso.	119
Tabela 18 Valores de R obtidos em blocos rochosos.....	120
Tabela 19 Valores de $I_{s(50)}$ (MPa) para os níveis de alteração.....	121
Tabela 20 Dados de resistência na ruptura obtidos para W1 a partir de 18 Cps	124
Tabela 21 Dados de resistência na ruptura obtidos para W2 a partir de 12 Cps	125
Tabela 22 Dados de resistência na ruptura obtidos para W2 Foliação a partir de 6 Cps	127
Tabela 23 Dados de resistência obtidos para W3 a partir de 18 Cps	128
Tabela 24 Dados de resistência na ruptura obtidos para W4 a partir de 18 Cps	129
Tabela 25 Parâmetros de resistência para os graus de alteração na condição natural	136
Tabela 26 Dados de resistência obtidos para W1 a partir de 18 CPs	138
Tabela 27 Dados de resistência obtidos para W2 Foliação a partir de 11 CPs	139
Tabela 28 Dados de resistência obtidos para W2 Foliação a partir de 7 CPs	140
Tabela 29 Dados de resistência obtidos para W3 Foliação a partir de 18 CPs	141
Tabela 30 Dados de resistência obtidos para W4 Foliação a partir de 18 CPs	143
Tabela 31 Parâmetros de resistência para os graus de alteração na condição saturada.....	149

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	11
1.1 Objetivos	12
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
2.1 Maciços de Baixa Resistência Mecânica	13
2.2 Perfis de Intemperismo	16
2.3 Caracterização de Rochas Brandas e o Efeito do Intemperismo	20
2.3.1 Caracterização Mineralógica	22
2.3.2 Caracterização Física	23
2.3.3 Caracterização Química	27
2.3.4 Caracterização Mecânica	31
3. CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL	34
3.1 Geologia Regional	34
3.2 Contexto Estrutural Regional	37
3.3 Geologia Local	39
4. METODOLOGIA	42
4.1 Compartimentação do Perfil de Intemperismo	42
4.2 Caracterização Mineralógica e Química do Perfil de Intemperismo	44
4.2.1 Análise de Lâminas Petrográficas	44
4.2.2 Fluorescência de raios – X (FRX)	45
4.2.3 Difração de raios – X (DRX)	46
4.3 Caracterização Física do Perfil de Intemperismo	49
4.3.1 Índices Físicos	49
4.3.2 Porosimetria de Mercúrio	50
4.3.3 Testes da Cor – Colorímetro	51
4.3.4 Ensaio de Durabilidade – “ <i>Slake Durabilty Test</i> ”	52
4.3.5 Ciclagem Água-Estufa	54
4.3.6 Ensaio de Lixiviação em Rocha por Extrator Soxhlet	55
4.4 Caracterização Mecânica do Perfil de Intemperismo	58
4.4.1 Esclerometria – Martelo de Schmidt	58

4.4.2 “Point Load Test” - PLT	59
4.4.3 Ensaio de Cisalhamento Direto	60
4.5 Preparação de Amostras e Corpos de Prova.....	62
4.5.1 Britagem.....	62
4.5.2 Obtenção de Corpos-de Prova	63
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	65
5.1 Caracterização do Perfil de Intemperismo.....	65
5.2 Análise Petrográfica	72
5.3 Fluorescência de raios – X (FRX)	76
5.4 Índices de Alteração	78
5.5 Difração de raios – X (DRX)	83
5.6 Índices Físicos.....	88
5.7 Porosimetria de Mercúrio.....	91
5.8 Avaliação da cor por colorímetro	93
5.9 “Slake Durability Test”	96
5.10 Ciclagem Água-Estufa	107
5.11 Ensaio de Lixiviação em Rocha por Extrator Soxhlet.....	113
5.12 Esclerometria de Schmidt.....	118
5.13 “Point Load Test” – PLT.....	121
5.14 Ensaio de Cisalhamento Direto	123
5.14.1 Condição Natural.....	123
5.14.2 Condição Saturada.....	137
5.15 Relações Entre os Parâmetros Obtidos	151
CONCLUSÕES.....	156
Sugestões Para Pesquisas Futuras	157
REFERENCIAS	159
APÊNDICE	178
Weathering of metapelites from the Quadrilátero Ferrífero mineral province, southeastern Brazil.	178

1. INTRODUÇÃO

É bem conhecido o fato de que o intemperismo impõe modificações de natureza química e física às rochas, com significativo efeito sobre as propriedades e o comportamento geomecânico das mesmas. O intemperismo promove também uma reorganização do padrão de distribuição espacial das rochas com diferentes intensidades de alteração intempérica e comportamentos geomecânicos na escala do maciço rochoso. Pelas razões expostas, há muitos anos, o processo de intemperismo e seus produtos derivados têm despertado interesse para as investigações geotécnicas, análises de estabilidade e projetos de engenharia em maciços rochosos.

As consequências do intemperismo são muito distintas para diferentes tipos de rocha e, portanto, não é exequível a proposição de uma classificação única adequada para todos os tipos de rochas, estilos de intemperismo e escalas de observação e que sejam úteis para aplicações em Geologia de Engenharia, como preconizado pela “Geological Society Engineering Group”.

Especificamente com relação às morfologias de intemperismo desenvolvidas sobre rochas metamórficas, há na literatura predomínio de informações sobre gnaisses. Neste tipo de rocha há uma clara influência das discontinuidades no desenvolvimento dos perfis, tendo em vista que estas estruturas são condutos para a passagem de água, promovendo a decomposição química em maior ou menor grau, a depender da sua disponibilidade.

Comparados aos gnaisses, são mais raros os estudos sistemáticos sobre os padrões, morfologias e classificação do intemperismo em rochas metamórficas de baixo grau, como ardósias, filitos e xistos, bem como a caracterização das propriedades geomecânicas dos seus produtos de alteração intempérica. Esquemas de classificação gerais têm sido adotados para caracterizar tanto o intemperismo da matriz da rocha quanto do maciço rochoso. Ensaio expedito in situ, como martelo de Schmidt, por exemplo, podem ser utilizados para estimar a resistência à compressão e consequentemente avaliar o efeito do intemperismo nas rochas.

Como mencionado acima, ainda são relativamente insuficientes os estudos sobre o intemperismo de rochas de baixo grau metamórfico, em particular para os filitos do Quadrilátero Ferrífero (QF), a despeito da grande produção de minério de

ferro na região e as instabilidades de seus taludes mineiros e nas estradas de acesso.

1.1 Objetivos

Assim, o presente estudo tem como finalidade apresentar o mapeamento das classes de alteração para um filito e a influência do intemperismo nos aspectos mineralógicos, físicos, químicos e mecânicos da rocha. A área de estudo corresponde a um talude rodoviário entre as cidades históricas de Ouro Preto e Mariana no Brasil. Além disso, é apresentada uma completa caracterização textural e mineralógica dos estágios de alteração intempérica, preliminarmente em classificação de campo e posteriormente, por meio de lâminas delgadas, difração de raios-X (DRX), fluorescência de raios-X (FRX) e índices químicos. A evolução com o intemperismo das propriedades físicas foi determinada com medidas de absorção de água, massa específica seca e saturada, porosidade além de avaliações da cor por (colorimetria). Adicionalmente, foram executados ensaios de porosimetria de mercúrio para caracterizar a evolução da distribuição dos tamanhos de poros em cada estágio de alteração. Ensaios de durabilidade por ciclagem água-estufa, lixiviação em rocha por extrator Soxhlet e pelo “*slake durability test*”, foram utilizados para medir o efeito da alterabilidade. A avaliação da resistência da matriz da rocha em cada estágio de alteração foi obtida por avaliações com o martelo de Schmidt no campo e no laboratório, além de ensaios para caracterizar a resistência à compressão pontual (“*point load test*” - PLT) e resistência ao cisalhamento, na condição seca e saturada, ao longo da foliação, para todos os estágios de alteração.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Maciços de Baixa Resistência Mecânica

O termo rocha branda pode ser atribuído a um material geológico pouco competente, mecanicamente complexo, de alta deformabilidade e baixa resistência, que se situam, em uma escala de propriedades, entre solos e rochas duras. Apesar de inicialmente definida como “*weak*” ou “*soft*”, a ISRM (1981) propôs, em substituição ao termo rocha de baixa resistência (“*weak soft*”) para rocha branda fraturada e alterada (“*low strength rock*”), adotado por alguns autores devido à resistência ser o parâmetro mais utilizado em classificações geomecânicas. Abordagens relativas às rochas originadas por dissoluções cársticas, ou processos genéticos, também podem ser incluídos nesse contexto (PECHORKIN, 1986).

As rochas brandas podem ter origens distintas, ou seja, sedimentar (detrítica ou química) ou a partir de outras rochas (meteorização e tectonismo) (DOBEREINER e FREITAS, 1986; DOBEREINER, 1989). No caso de rochas oriundas de processos evolutivos, como o metamorfismo em filitos, por exemplo, ocorre a deterioração e enfraquecimento dos materiais pela modificação do estado inicial de tensões, associadas a processos tectônicos. A ação meteórica, mais frequente em rochas ígneas e metamórficas do que sedimentares, é mais intensa em clima tropical, gerando perfis de intemperismo espessos de até centenas de metros.

Quando maciços rochosos são constituídos por rochas brandas ou muito brandas, como ardósias e filitos, duas linhas de raciocínio podem ser elaboradas: (i) a rocha intacta possui baixa resistência, ou (ii) o maciço rochoso apresenta baixa resistência devido a presença de descontinuidades. A existência desses materiais, em locais de implantação de obras de engenharia, limita o número de soluções em função de suas características geomecânicas particulares e desfavoráveis (PINHO, 2003).

As rochas são suscetíveis a inúmeras influências intempéricas físico-químicas, que afetam diretamente os parâmetros de tensão, deformação e permeabilidade, gerando impactos em projetos de engenharia, pela perda da resistência ao corte em taludes (MISCEVIC e VLASTELICA, 2014) e grandes deformações, em obras mais

complexas, como em escavações subterrâneas (HE, 2014). Nesse âmbito, a rocha quando muito alterada ou completamente alterada pode ser interpretada, na linha da mecânica dos solos, como um material muito pobre geomecanicamente, sendo negligenciado o fato de que a rocha branda alterada é um material mais descontínuo, mais resistente e mais frágil que um solo. Já na linha da mecânica das rochas, são empregadas classificações para rochas duras, não considerando o fato de que a rocha branda alterada é mais dúctil, menos resistente e as pressões intersticiais têm grande influência em seu comportamento (PINHO, 2003). Essa classificação em ambas as linhas, tendem a fornecer parâmetros errôneos, exigindo que as obras de engenharia adotem medidas construtivas conservadoras (LEÃO, 2011).

Rocha (1977), em numerosos resultados obtidos, para solos e rochas, de origem sedimentar e metamórfica, concluiu que a resistência à compressão uniaxial e a coesão, eram as propriedades mais adequadas para definir os limites entre solo/rocha, de difícil determinação (SPINK e NORBURY, 1993).

As classificações disponíveis para rochas brandas ainda remetem a outro problema; a adoção de termos que sejam representativos de suas características. Em um contexto mais geológico, baseado na gênese da rocha, a baixa resistência da rocha é justificada devido a parâmetros como: (i) fracas ligações entre os constituintes minerais, (ii) processos de meteorização nos constituintes, (iii) processos de cisalhamento devido a dobras e falhas, e (iv) a presença de cavidades cársticas, comuns em maciços solúveis (OLIVEIRA, 1993). Cabe ressaltar, que essas premissas não contemplam características importantes como a resistência, deformação e permeabilidade, além do intemperismo, apesar de serem implícitas ao se classificar uma rocha. Por outro lado, abordagens geotécnicas, como sugeridas por Franklin et al. (1971) e Bieniawski (1974), são baseadas em parâmetros obtidos em observações e ensaios simples, de fácil interpretação, que referem-se às características das rochas e por fim classificá-las. De forma geral, as classificações geotécnicas acabam sendo muito específicas baseadas em experiências em obras de escavações (túneis e fundações), deixando ainda um hiato, quanto a especificações adequadas às rochas brandas, principalmente no âmbito da Mecânica das Rochas (DEERE e MILLER, 1966; VOIGHT, 1970; MÜLLER, 1974).

Em rochas brandas, é muito comum uma classificação utilizando parâmetros mecânicos, todavia sendo limitada no que tange a não abordagem de características

importantes, como a sensibilidade à água de rochas silto-argilosas (PINHO, 2003), por exemplo. Desta forma, muitas classificações para essas rochas, baseadas em propriedades mecânicas e na durabilidade podem ser encontradas na literatura científica (DEERE e MILLER, 1966; GAMBLE, 1971; DEO et al., 1974; MORGENSTERN e EIGENBROD, 1974; LUTTON, 1977; OLIVIER, 1979; FRANKLIN, 1981; GRAINGER, 1984; FELIX, 1987; TAYLOR, 1988; DICK et al., 1994; JEREMIAS, 1997), todavia dependendo do tipo de rocha, como os filitos estudados, fatores como heterogeneidade e anisotropia, acabam restringindo o seu uso e a comparação entre resultados interpretados.

Aspectos como a desagregabilidade, em função da textura da rocha e, a expansibilidade, devido a mineralogia e presença de minerais argilosos, são importantes características para auxiliar as supracitadas classificações, exercendo influência sobre o comportamento desses materiais, devido a variação do teor de umidade e estado de tensões (PINHO, 2003). Taylor (1988) ressalta que os principais condicionantes em processos de desagregação para essas rochas são: (i) a presença de estruturas e descontinuidades, (ii) a desagregabilidade da rocha motivada pela alternância de ciclos de umedecimento e secagem, e (iii) a presença de minerais argilosos expansivos, responsáveis pela fragmentação da rocha após processos de saturação e secagem.

No caso de maciços rochosos brandos foliados, compostos por filitos, as propriedades geotécnicas do maciço acabam sendo mais importantes que as propriedades da própria rocha intacta. Assim, muitas classificações são propostas para avaliação das propriedades da rocha intacta e das descontinuidades, em obras subterrâneas e a céu aberto, dentre elas: “*Rock Mass Rating*”, RMR (BIENIAWSKI, 1973, 1974, 1976, 1978, 1979, 1984), “*Rock Structure Rating*”, RSR (WICKHAM et al., 1972); “*Rock Mass Quality*”, “*Q System*” (BARTON et al., 1974; ROCHA, 1976); “*Slope Mass Rating*”, SMR (ROMANA, 1985); “*Rock Mass Index*”, RMI (PALMSTROM, 1995, 1996); “*Geological Strength Index*”, GSI (HOEK e BROWN, 1997), sendo detalhados em Bieniawski (1989) e Singh e Goel (1999). Pinho (2003) faz uma discussão sobre todos esses métodos de classificação, ficando clara a limitação para termos coerentes aplicados a rochas brandas, havendo ainda uma falta de consenso para terminologias acerca da resistência e generalidades dessas rochas (HAWKINS, 2000).

Gomes (1992) agrupa os maciços de rochas brandas em três grandes grupos: (i) os que já são constituídos por rochas de baixa resistência, (ii) os que possuem horizontes superficiais brandos e horizontes inferiores duros, e (iii) aqueles que originalmente são duros, mas pela ação do intemperismo, originam progressivamente horizontes de baixa resistência. Quando consideramos regiões tectonicamente complexas e rochas originalmente brandas, como filitos e, a esses fatos, acrescentamos a ação do intemperismo, percebemos que esta subdivisão não é aplicável, tendo em vista que estruturas geológicas podem condicionar a ação do intemperismo, favorecendo a circulação de água e gerando frentes de intemperismo complexas.

Sowers (1988) relata que a presença de feições estruturais, associadas à foliação metamórfica, torna a superfície do topo rochoso bastante irregular e de difícil definição, em projetos de engenharia. A abertura e a propagação de microfissuras no contato entre os grãos minerais e no seu interior condicionam o comportamento geotécnico de perfis de intemperismo desenvolvidos sobre gnaisses, em clima temperado (DOBEREINER et al., 1993). A presença de descontinuidades também é responsável pela transição brusca entre materiais, em estados de alteração intempérica completamente distintos (MARQUES et al., 2010), denotando grande anisotropia em suas propriedades, conforme mudança de referencial.

Mesmo que as rochas não possuam uma estrutura descontínua (orientação mineral ou histórico de tensões sofridas) a anisotropia pode ser observada, devido a tensões pretéritas sofridas pela rocha na sua formação. No caso de rochas de origem metamórfica há uma tendência ao comportamento anisotrópico, já que certas características podem ser herdadas dos protólitos, como por exemplo, a foliação, (TSIDZI, 1990), fornecendo respostas mecânicas distintas quando minerais são dispostos em planos paralelos, como micas, cloritas e argilas (SANTIAGO, 2008). A anisotropia pode estar relacionada com fissuras, que quando presentes são condicionados pela abertura (AZEVEDO e MARQUES, 2002). Essas supracitadas particularidades são muito comuns na região conhecida como QF, Brasil.

2.2 Perfis de Intemperismo

O grau de alteração é conhecidamente definido pelo conjunto de processos que levam à modificação das propriedades mecânicas das rochas, no sentido da

diminuição de sua resistência, resultando, em seu desenvolvimento, na formação de solo. Por sua vez, o grau de alteração pode ser definido também pelo conjunto de exemplares do mesmo tipo litológico que apresentam propriedades petrográficas, tecnológicas e mecânicas variando dentro de certos limites (LEÃO, 2011).

Já o índice de alterabilidade pode ser definido como a taxa da variação da alteração de uma determinada rocha em um tempo estipulado. A mineralogia é um grande fator de influência na obtenção desta taxa, já que o aumento da diferença entre as condições de formação de um dado mineral e a condição encontrada na superfície terrestre, maior será a facilidade de alteração, em função da necessidade do mineral buscar a estabilidade físico-química (SANTIAGO, 2008).

Azevedo e Marques (2002) relatam que o grau de intemperismo e a taxa de alteração estão diretamente relacionados, indicando a tendência de desagregação da rocha, oferecendo um índice relativo à durabilidade da rocha.

Perfis de intemperismo representam a uma fina camada considerando contexto macro geológico-geomorfológico. Representam a transição da rocha sã até porções mais alteradas (solos eluviais), onde podem ser preservadas características como a mineralogia e propriedades físico-químicas da rocha mãe, recobertas ainda por materiais transportados (colúvios).

Nesta temática, podem ser elencados trabalhos pioneiros, em rochas de graníticas e granodioríticas (MOYE, 1955; RUXTON e BERRY, 1957; LUMB, 1962; NEWBERY, 1970), na tentativa de se compreender o comportamento geotécnico-geomecânico dos materiais que o compõem, principalmente os chamados transicionais, formados por partes alteradas de rocha e solo.

As diferenças entre as morfologias de perfis de intemperismo desenvolvidos sobre granitos e gnaisses e suas implicações para projetos de engenharia foram inicialmente discutidas por Deere e Patton (1971), que apresentaram propostas de perfis de intemperismo típicos para ambas as rochas e critérios para classificação dos diversos estágios de intemperismo. Neste mesmo contexto, as importantes contribuições de Dearman (1975; 1978a) e Dearman et al. (1978b) mostram que para situações complexas, principalmente pela presença de famílias de descontinuidades, o conceito de zonas de intemperismo, dado razão volumétrica entre solo e blocos de rocha, deveria ser substituído pelo mapeamento dos estágios de alteração intempérica no maciço rochoso. A partir destes estudos, no final dos anos 70 e no início dos anos 80 surgiram recomendações apresentadas por

sociedades internacionais (GEOLOGICAL SOCIETY, 1977; BSI, 1981; ISRM, 1981 e IAEG, 1981) para descrição de maciços rochosos.

Recentemente podem ser citados, acerca de perfis de intemperismo, trabalhos de Barroso, 1993 (Leptinitos), Marques et al, 2010 (gnaisses), Leão e Barroso, 2013 (xistos e mármore), Marques e Williams, 2015 (filitos), Costa et al, 2015 (itabiritos), Marques et al, 2016 (basaltos), Leão e Marques, 2016 (filitos) e Leão et al., 2017 (filitos).

Existem dois grandes grupos de condicionantes para os perfis de intemperismo; aqueles denominados de agentes endógenos, relacionados à gênese da rocha mãe e os movimentos tectônicos e, agentes exógenos, controlados por agentes externos como o clima e a geomorfologia.

Dentre os fatores endógenos a composição mineralógica da rocha é tida como principal fator condicionante, considerando que cada mineral apresenta uma resposta distinta à susceptibilidade da alteração (GOLDICH, 1938). Outro condicionante refere-se à granulometria, que influencia na resistência à alteração da rocha, devido à superfície específica. Aspectos como a textura da rocha mãe, a recristalização de grãos, o grau de faturamento, a presença de estruturas geológicas e texturas direcionais (foliação, clivagem, etc.), também facilitam o intemperismo. Considerando a existência de fluídos percolantes, por esses planos, há possibilidade do aumento dessa degradação (TARDY e NAHON, 1985). Áreas muito tectonizadas tendem a gerar mantos de alteração mais espessos, já que expõem substratos, elevando a taxa de erosão, o que em áreas mais estáveis, esse processo, torna-se dependente do clima (GOODMAN, 1989).

Os fatores exógenos estão relacionados com as mudanças climáticas e a geomorfologia principalmente. Considerando países tropicais, o clima acelera as reações químicas (variações de umidade e calor), gerando mantos de alteração espessos. Já em países de clima temperado esses mantos tendem a espessuras mais rasas, onde a atuação de processos físicos são mais presentes (GOODMAN, 1989). A declividade das encostas (topografia) influencia a ação desses processos, tendo em vista que em taludes mais inclinados, as chuvas são capazes de transportar o material intemperizado para o pé da encosta, expondo continuamente a rocha aos agentes intempéricos, sendo menos pronunciado em taludes de declividades mais suaves (GOODMAN, 1989).

Cabe ressaltar que o tempo de atuação do processo é de suma importância para a decomposição de uma rocha sã, juntamente com o clima a qual está exposta e a composição da rocha. Milhares de anos são necessários para a alteração de rochas em climas frios e secos e algumas dezenas de anos em climas úmidos (GOODMAN, 1989).

Os agentes endógenos e exógenos atuam por dois mecanismos principais, ou seja, pelo intemperismo físico e pelo intemperismo químico.

Representam os processos de intemperismo físico aqueles que fragmentam os materiais, sem a influência de processos químicos, sendo relacionados com a variação do nível de tensões, levando a fadiga e ruptura do material (GOODMAN, 1989). A degradação física, de forma natural ou mesmo por escavações, aumenta a superfície de contato e conseqüentemente facilita a alteração química (TAYLOR e SPEARS, 1970). O alívio de tensões em maciços rochosos tende a gerar descontinuidades aproximadamente paralelas ao relevo. Ciclos de aquecimento e resfriamento relativos às variações térmicas geram expansão e retração dos maciços rochosos, induzindo-o ao faturamento. Ciclos de umedecimento e secagem podem variar as pressões no maciço, devido à expansão de alguns minerais ou ao desenvolvimento de poropressões. A ação da água e do vento podem desencadear processos erosivos que denotam deslocamentos (AZEVEDO E MARQUES, 2002).

O intemperismo químico é governado por reações químicas (dissolução, oxidação, redução, oxirredução, hidratação, lixiviação e troca de íons) que resultam na decomposição da estrutura dos minerais, sendo de grande atuação em regiões de clima tropical. É dependente da facilidade de acesso, grau de agressividade da água e reatividade do maciço à água, do ar presente na rocha e tempo de atuação (AZEVEDO e MARQUES, 2002).

Em rochas metapelíticas sãs, a ação do intemperismo aumenta a anisotropia devida (i) à distinta resposta à variação de temperatura e pressão, seja pela formação de planos de fraqueza, que podem influenciar o contexto geomecânico, seja pela mudança da direção inicial do *fabric* em relação à direção da estrutura da rocha (HENG et al., 2015). Também é motivada (ii) por mudanças mineralógicas, físicas (cor, densidade, porosidade, permeabilidade, friabilidade e resistência) (JEFFCOATE, et al, 2013). Outro motivador do aumento da anisotropia são os fatores químicos (iii), que afetam a resistência da rocha, pela lixiviação de sílica, por exemplo, (FIETZE et al, 2013).

Apesar do esforço de vários pesquisadores sobre o tema, ainda são escassos trabalhos acerca do comportamento geológico-geotécnico de perfis de alteração oriundos de rochas de baixo grau metamórfico. Além disso, um grande número de proposições e terminologias dificulta o entendimento e aplicabilidade de termos, principalmente porque a classificação é dependente do processo intempérico atuante e não apenas das características da rocha de origem e seu contexto geológico e estrutural (LEÃO, 2011).

Em filitos são muito comuns problemas geotécnicos relacionados à elevada alterabilidade, a fragmentação física, alteração química, processos de expansibilidade, elevada deformação com o avanço dos processos intempéricos, além de baixa resistência nos planos paralelos à estratificação (LEÃO e MARQUES, 2016).

Diversos problemas geotécnicos relacionados a filitos e outras rochas foliadas, como xistos, ardósias, podem ser citados em trabalhos na literatura científica (FOOKES, et al., 1985; LONDE, 1987; KONG e KOMOO, 1990; GENIS et al., 2007; SHRESTHA e BROCH, 2008; HOEK e GUEVARA, 2009; POISEL et al., 2009; HE e WANG, 2013; LEÃO, 2011, 2015; BENNETT e NORBERT, 2014; PANDA, 2014; BERHANE et al., 2016) e, em particular na região do QF, no Brasil (SILVA e LANA, 2012; PINHEIRO et al., 2015; LEÃO et al., 2017).

2.3 Caracterização de Rochas Brandas e o Efeito do Intemperismo

Em condições ideais elásticas a obtenção das propriedades dos materiais, sejam eles solos, rochas ou seu estado intermediário (rochas alteradas), por experimentos estáticos (relações tensões-deformações) e dinâmicos (velocidade de ondas elásticas) deveriam chegar a um mesmo resultado. Entretanto, maciços rochosos não são elasticamente ideais, principalmente quando são compostos por rochas heterogêneas e anisotrópicas, como filitos. Este fator pode ser agravado considerando a gênese da rocha mãe, acarretando em diferenças nos valores do módulo de deformabilidade estimados pelos supracitados métodos, influenciados, por propriedades constituintes dos materiais, como a porosidade (PEÑA, 1989).

O estudo do comportamento desses maciços em rochas brandas e a ação do intemperismo sobre os mesmos, ainda é alvo de muitas discussões. Suas porções menos alteradas podem apresentar aspectos remanescentes da rocha-mãe e os

parâmetros geotécnicos-geomecânicos desses materiais são difíceis de serem obtidos in situ (LEÃO, 2015) e em laboratório. Rochas brandas apresentam problemas quanto à amostragem, preparação e escolha de ensaios representativos de suas propriedades (KANJI, 2014), além da representatividade e extrapolação em escala digital (AGLIARDI et al, 2001). Devido a sua típica fragilidade, equipamentos e amostradores para rochas duras são pouco representativos e da mesma forma, essas rochas são resistentes demais quando submetidos a experimentos corriqueiros na mecânica dos solos (KANJI, 2014).

Os ensaios para caracterização e obtenção de propriedades índice podem indicar, de forma preliminar, o comportamento do material rochoso, em termos de durabilidade, possibilitando correlações com propriedades mecânicas, como a resistência e deformabilidade (OLIVEIRA, 1993).

Testes simples e executados in situ com o auxílio de martelo e canivete, sobre a matriz da rocha passaram a ser recomendados para a avaliação da intensidade do intemperismo com o intuito de se estabelecer grupos homogêneos e, então, mapeá-los no maciço rochoso (GCO, 1988; RAJ, 1983; GAMON, 1983).

Diversos métodos para avaliação da durabilidade foram sugeridos para a classificação de rochas argilosas (OLIVIER, 1976, 1979; FRANKLIN, 1983) e, por relações entre parâmetros, como por exemplo, a relação do índice de “*slake*” e o índice de plasticidade (GAMBLE, 1971), relações entre a litologia, à absorção e microfraturas, índice de frequência e o índice de “*slake*” (DICK et al, 1994), ciclos de aquecimento, resfriamento e imersão em água (SANTI, 1998 adaptado de WOOD e DEO, 1975). Entretanto, existe grande dificuldade em correlação com outros ensaios (mecânicos, químicos e físicos) e entendimento claro do efeito da desagregabilidade (AKAI, 1997), bem como avaliação, quase exclusiva, baseada em ciclos de umedecimento e secagem (ERGULER e SHAKOOR, 2009). Além destes testes, Lee e Freitas (1988) propuseram o uso do “*slake durability test*” como marcador da transição da matriz da rocha mais intensamente intemperizada para o estado de solo.

Não existem normas com aceitação, a nível internacional, sobre o acabamento de corpos-de-prova para rochas alteradas. Alguns autores afirmam que as normas existentes para rochas duras, em alguns aspectos são muito rigorosas (PELL e FERRY, 1983; CHIU et al, 1983). Em particular, no que tange a relação altura-diâmetro para ensaios de compressão uniaxial e triaxial, apesar de baseadas em

poucos dados, utiliza-se a razão altura-diâmetro de 2:1 como aceitável para rochas alteradas (CHIU et al, 1983). Já para a compressão uniaxial a ISRM (BROWN, 1981), recomenda uma relação de 2,5:1, sem excetuar rochas brandas. Outro problema é a possibilidade dos materiais conterem propriedades expansivas, comprometendo os corpos-de-prova durante processos de secagem. A ressaturação das amostras pode gerar desagregação e desintegração (PINHO, 2003).

De fato, a realização de ensaios em rochas alteradas, brandas e brandas alteradas, devem seguir determinados cuidados sem desprezar as normas de execução, merecendo cada exceção ser analisada e incluída com sensatez.

A obtenção, transporte e preparação de amostras de rochas alteradas para ensaios de laboratório, exige que os ensaios sejam simples, expeditos e de baixo custo, baseado preferencialmente em equipamentos normatizados (DUSSEAU et al., 1983; MARTIN, 1986; CLERICI, 1992; LASHKARIPOUR e PASSARIS, 1995; CZEREWKO e CRIPPS, 1998).

Uma grande dificuldade na estimativa de propriedades de rochas brandas e quando essas são muito alteradas, está no uso de métodos conhecidos internacionalmente (ISRM, 1981) e pela American Society for Testing and Materials (ASTM), que por vezes não consideram particularidades desses materiais.

2.3.1 Caracterização Mineralógica

A análise petrográfica é um método muito utilizado para avaliar e quantificar, microscopicamente, a presença de (i) microestruturas, a (ii) mineralogia, que influencia a superfície das rugosidades (BARTON, 1973), a (iii) textura e com menos eficiência a estimativa da (iv) porosidade (GOODMAN, 1989) das rochas. Cabe ressaltar que esses três últimos fatores são as principais características controladoras da intensidade do intemperismo (HUDEC, 1998), ocorrendo alteração em ordem inversa a cristalização dos minerais da rocha (GOODMAN, 1993).

A caracterização mineralógica, por petrografia, apresenta a vantagem por ser uma análise direta, com certa precisão na identificação de argilominerais, todavia não detalhando diretamente aspectos importantes da matriz rochosa (PINHO, 2003), amplamente utilizada por diversos autores (RODRIGUES, 1978; RUSSELL, 1982; OJIMA e RODRIGUES, 1983; DICK e SHAKOOR, 1990; BARROSO et al., 1993).

Outro método de avaliação do intemperismo é a técnica de difração por raios-X (DRX), muito útil para avaliação qualitativa e semiquantitativa mineralógica de rochas, onde para último apresenta vantagens em relação à petrografia para rochas de granulometria muito fina. Diversos trabalhos neste sentido podem ser citados (DEO, 1972, 1973; RODRIGUES, 1975, 1976; RUSSEL, 1982; OJIMA e RODRIGUES, 1983; HOPKINS e DEEN, 1984, GRAINGER, 1984; PYE e MILLER, 1990; DICK e SHAKOOR, 1990; CLERICI, 1992; HAWKINS e PINCHES, 1992, BARROSO et al., 1993; MOON e BEATTIE, 1995; JEREMIAS, 1997). Esta técnica é muito válida para estimativa de argilominerais e mineralogia secundária devido ao intemperismo (GIDIGASU, 1971, 1974), que pode influenciar os graus de lixiviação e laterização, troca catiônica e umidade higroscópica, principalmente, em filitos.

A identificação da presença de minerais expansivos de argila, em rochas foliadas anisotrópicas, de baixa resistência, é fundamental, devido aos efeitos de compressão e relaxação, desses planos (BHASIN et al., 1995). Argilominerais associados a descontinuidades nos maciços e variação da umidade são responsáveis por mecanismos de decomposição das rochas (TAYLOR e SMITH, 1986; GÖKÇEOĞLU e AKSOY, 2000).

2.3.2 Caracterização Física

A obtenção das propriedades índice traduzem previamente o comportamento mecânico da rocha, em termos de estrutura, composição, textura, comportamento mecânico (AZEVEDO e MARQUES, 2002), e durabilidade (OLIVEIRA, 1993), caracterizando e quantificando a matriz rochosa permitindo a correlação com propriedades mecânicas.

Não apenas, mas principalmente, em maciços compostos por rochas brandas foliadas, é comum a presença de descontinuidades. Essas interrupções da continuidade das formações minerais, que compõem a matriz rochosa, geram vazios, estando relacionadas à deformação e ruptura das rochas. A quantidade de vazios pode ser avaliada pela porosidade, ou seja, a razão entre o volume de vazios de uma amostra de rocha e o seu volume total, onde os vazios, poros ou fissuras, não necessariamente interligados, podem estar completamente fechados (HAWKES e MELLOR, 1970), dificultando a sua medição. Ainda pode ser definida a porosidade

primária (volume de poros entre os fragmentos das rochas) e a porosidade secundária (fraturamento e alteração posterior da rocha) do maciço.

As propriedades-índice são obtidas em amostras de rocha intacta, o que apesar de não representar as propriedades do maciço rochoso, ajudam a classificá-lo primariamente (AZEVEDO e MARQUES, 2002). Dentre elas, a massa específica juntamente com a porosidade são parâmetros geotécnicos indicadores da geomecânica de rochas alteradas, tendo em vista que o aumento da massa específica e a redução da porosidade correspondem em regra a um aumento da resistência e diminuição da deformabilidade da rocha (PINHO, 2003).

Em gnaisses a porosidade é uma boa propriedade para avaliação dos efeitos do intemperismo (BARROSO et al., 1993). Em rochas ígneas (SAITO, 1981) e sedimentares brandas (HOSHINO, 1981), é verificada a estreita relação da porosidade com a resistência à compressão simples, podendo ser usada como índice para a classificação de rochas brandas (DUFFAUT, 1981; RODRIGUES, 1988).

A estimativa da distribuição de poros pela injeção de mercúrio pode ser um método alternativo em rochas brandas, para analisar o comportamento hidromecânico macroscópico do material, ou seja, retenção de água, permeabilidade, colapso ou resposta ao inchaço por saturação (GARZÓN et al, 2010). Apesar da execução desse ensaio em rochas brandas (BELL et al, 1999; DHAKAL et al, 2002; OLIVEIRA et al, 2004; JAMEI et al, 2011; FUSI e MARTINEZ-MARTINEZ, 2013; FERRARI et al, 2014; BURTON et al, 2015), são escassos os dados para filitos.

Outras propriedades índices importantes, em rochas brandas silto-argilosas (LASHKARIPOUR e PASSARIS, 1995) são a capacidade de absorção de água e o teor de umidade, onde segundo Dobereiner (1984), o aumento desses parâmetros representa a diminuição significativa da resistência para essas rochas.

A absorção de água, obtido pelo “*Quick absorption technique*” (ISRM), possibilita avaliar o índice de vazios e o estado de alteração (MARTIN, 1986). Em rochas de natureza branda, pode haver a desintegração durante o processo de saturação, sendo necessária a utilização do ensaio de durabilidade (PINHO, 2003).

Outro ensaio importante e expedito é a esclerometria pelo martelo ou esclerômetro de Schmidt. Devido à sua simplicidade, permite uma medida in situ sem necessidade de preparação de amostras. A presença de rugosidades nas

superfícies ensaiadas e a proximidade de descontinuidades pode gerar dispersão nos valores, sendo ainda muito sensível em rochas muito brandas (com o valor de R – “*Rebound*” inferior a 10) (PINHO, 2003).

O esclerômetro de Schmidt, segundo Brown (1981), bem como o ensaio de carga pontual (“*point Load Test*” – PLT) tem uma aplicação reduzida para rochas de resistência muito baixa, porém em algumas rochas brandas mais resistentes, podem ser obtidas boas correlações com a resistência à compressão simples. A resistência à compressão simples também pode ser obtida em relação à dureza do material, não havendo uma única correlação genérica para todos os tipos de rocha (XU et al., 1990). Leão e Marques (2016) obtiveram bons resultados para a avaliação do intemperismo em filitos, utilizando esclerometria, todavia a estimativa do RQD (“*Rock Quality Designation*”) pelo índice volumétrico de juntas (J_v), proposto por Palmstrom (2005), não foi tão representativa.

Durante a execução de ensaios em rochas brandas pode ocorrer a desagregabilidade, ou seja, a desintegração da rocha em porções menores, devido à alternância de ciclos de umedecimento e secagem. Neste contexto, vários métodos são sugeridos como ensaio índice, como o “*slake durability test*”, ensaios de ciclagem água-estufa e lixiviação em rocha. Esses ensaios aceleram a desagregabilidade da rocha de forma mais acelerada do que ocorreria na natureza.

O “*slake durability test*” (ISRM, 1981) é bastante recomendado para rochas brandas (RUSSEL, 1982; OJIMA e RODRIGUES, 1983; HOPKINS e DEEN, 1984; LEE e FREITAS, 1988; DICK e SHAKOOR, 1990, 1992; SILVA e LANA, 2012), devido a sua simplicidade e rapidez. O ensaio corresponde em submeter à rocha, primeiramente fragmentada, a ciclos normalizados de secagem, molhagem e ação mecânica. Os fragmentos das rochas são colocados em redes metálicas cilíndricas com uma abertura parcialmente imersa na água, rodando em torno de um eixo horizontal. O choque entre os fragmentos de rocha e o contato com a água, favorecem sua desagregação e alteração. A secagem das amostras é realizada em estufa após o ciclo de molhagem e ação mecânica (ISRM, 1981).

O índice de durabilidade (I_d) é a porcentagem de rocha seca que fica retida nos tambores de rede metálica após 1 ou 2 ciclos completos (I_{d1} ou I_{d2}), onde a rocha pode ser classificada conforme critério proposto por Franklin e Chandra (1972). Cabe ressaltar que GÖKÇEOĞLU e AKSOY, (2000) afirmam que dois ciclos não são suficientes para avaliar a durabilidade de rochas brandas, quando comparados a

outros ensaios de durabilidade, podendo ser necessários três ou mais ciclos (GÖKCEOLU et al, 2000).

Outros ensaios de durabilidade como, os ensaios de ciclagem água-estufa e lixiviação em rocha com o uso do extrator Soxhlet, baseados em ciclos alternados de umedecimento e secagem, buscam reproduzir em laboratório processos que ocorrem naturalmente no campo. Frazão (1993) recomenda o uso de curvas de variação de umidade com o tempo, baseado em ensaios de absorção e de secagem, para avaliar o tempo mínimo necessário, que indicariam os estados saturado e seco das rochas. Lopes (2000) por meio de ciclagem água-estufa em xistos verificou o efeito da piritita existente nas rochas sobre a desagregação das mesmas, notando o desenvolvimento de fraturas principalmente nos planos de foliação. Avaliações qualitativas mais detalhadas, referentes à propagação de fissuras e desintegração, em rochas foliadas podem ser encontradas em trabalhos de Marques et al. (2005), Bell et al. (1997), Cantón et al. (2001).

Apesar das condições *in situ* e em laboratório serem distintas, esses ensaios de durabilidade indicam bons resultados referente a processos de alteração (MAIA, 2001; MINETTE, 1982). A falta de informação para correlação entre os resultados de ensaios de durabilidade e outros ensaios (mecânicos, químicos e físicos), bem como a falta de entendimento claro do fenômeno da desagregabilidade (AKAI, 1997), acabam por limitar a aplicabilidade desses ensaios.

Devido a grande abundância de rochas sedimentares argilosas, na superfície terrestre, inúmeros trabalhos sobre durabilidade podem ser mencionados (TAYLOR e SPEARS, 1970; SPEARS e TAYLOR, 1972; OLIVIER, 1980; SMART et al., 1982; RUSSEL, 1982; TAYLOR e SMITH, 1986; SEEDSMAN, 1986; TAYLOR, 1988; OLIVIER, 1990; VARLEY, 1990; VETZEL e EINSELE, 1991; DICK e SHAKOOR, 1992; MOON e BEATTIE, 1995; BELL et al., 1997, GÖKCEOLU et al, 2000; VALLEJO e STEWART-MURPHY, 2001, PRODAN et al, 2016). Entretanto, para rochas metamórficas argilosas, como filitos, ainda são escassos na literatura científica, trabalhos sobre o assunto (ANDRADE e SARAIVA, 2010; FUENKAJORN, 2011; SILVA e LANA, 2012).

2.3.3 Caracterização Química

Métodos geoquímicos de análise buscam estimar quantitativamente a mobilidade/imobilidade de elementos, pela ação do intemperismo, lixiviação, bem como a perda/ganho de material de origem (CHADWICK, et al, 1990). Entre os principais processos intempéricos, responsáveis pela perda/redistribuição desses elementos, estão: (i) a dissolução de minerais primários, (ii) formação de minerais secundários, (iii) redução, transporte e troca de íons (THANACHIT, et al, 2005).

A determinação por FRX permite uma avaliação qualitativa e quantitativa da concentração de elementos químicos presentes nas amostras. A utilização dessa técnica no entendimento de processos de alteração é bastante válida, tendo em vista que processos intempéricos denotam a mobilidade de certos elementos químicos, principalmente em ambientes supergênicos, (LICHT, 1998). O comportamento dos elementos químicos em condições supergênicas, como no QF, é regido pelo pH, potencial de oxirredução (Eh), granulometria, dissolução diferencial mineral, regime hidrológico e propriedades químicas dos elementos (VAN DER WEIJDEN e VAN DER WEIJDEN, 1995; TABOADA, 2006). Alguns elementos como o Ti e Fe, são de baixa mobilidade e grande possibilidade de reprecipitação (motivados por processos de dissolução de minerais primários). O Al também obedece a este princípio, formando minerais secundários como caulinita e gibbsita (HOLANDA e BUENO, 2010).

É comum o uso de índices mineralógicos para caracterizar estágios de evolução da alteração intempérica, quantificar a intemperização da matriz e para servir como guia ou referência para propriedades geomecânicas das rochas (BRIMHALL e DIETRICH, 1986). Inicialmente foram propostos índices mineralógicos para granitos baseados nas relações entre minerais estáveis e instáveis (LUMB, 1962; DEARMAN e IRFAN, 1978). Recentemente têm sido apresentadas propostas de índices de alteração mineral baseadas em técnicas de laboratório mais sofisticadas, como a microscopia eletrônica (HU et al., 2014).

Tendo em vista as modificações geoquímicas nos protólitos e nos seus produtos do intemperismo, principalmente em climas com excedente hídrico e temperaturas médias anuais elevadas, diversos pesquisadores propuseram índices químicos baseados em relações moleculares dos elementos maiores, muito úteis para discorrer sobre a evolução de um perfil de intemperismo. Cabe ressaltar que a

utilização desses índices difere na tratativa de perfis de intemperismo homogêneos (SUTTON e MAYNARD, 1992) e heterogêneos (CIAMPONE et al, 1992), onde nesse último caso, a presença de descontinuidades pode gerar níveis de composição química e mineralógica, distintos.

Em alguns desses índices são assumidas relações entre elementos imóveis (pouco solúveis) com móveis (concentração reduz conforme o intemperismo e a lixiviação avançam) (quadro 1). Existem índices que se baseiam na de sílica total (quadro 2), todavia muito questionáveis, pois consideram a sílica sob a forma de quartzo. Índices baseados na alteração química consideram certos elementos como imóveis (quadro 3). O alumínio é de baixa mobilidade e permanece constante durante o intemperismo nos casos do “Weathering-Potential Index” (WPI) e do “Product Index” (PI), ambos propostos por Reiche (1943). O “Chemical Index Alteration” (CIA) é atualmente um dos índices químicos mais empregados para avaliação do intemperismo. Proposto por Nesbitt e Young (1982), o CIA utiliza a razão molecular entre elementos maiores móveis e imóveis e funciona como um índice da intensidade do intemperismo. Ainda existem índices que consideram as relações anteriormente comentadas, porém relacionam a concentração dos mesmos quando são e intemperizados (quadro 4). Cabe ressaltar que o alumínio, abundante na composição de muitos minerais, pode ser representativo como elemento avaliador em índices químicos, quando apresenta maior mobilidade, fruto de ambientes com pH abaixo de 4,5 e na presença de ácidos orgânicos (GARDNER, 1980; GARDNER 1992).

Quadro 1 Índices químicos baseados em relações moleculares elementos mobilizáveis/imobilizáveis.

Índice Químico	Autor
$ba = \frac{K_2O + Na_2O + CaO}{Al_2O_3}$ $ba1 = \frac{K_2O + Na_2O}{Al_2O_3}$ $ba2 = \frac{CaO + MgO}{Al_2O_3}$ $ba3 = \frac{K_2O + Na_2O + MgO}{Al_2O_3}$	Harrassowitz, 1926
$Bases: Al = \frac{K_2O + Na_2O + CaO + MgO}{Al_2O_3}$ $Bases: R_2O_3 = \frac{K_2O + Na_2O + CaO + MgO}{Al_2O_3 + Fe_2O_3 + TiO_2}$	Colman, 1982
$b1 = \frac{Al_2O_3}{TiO_2}$	Rocha Filho et al., 1985
$WR = \frac{CaO + MgO + Na_2O}{ZrO_2}$	Chittleborough, 1991

Quadro 2 Índices químicos baseados no conteúdo de silício.

Índice Químico	Autor
$SF = \frac{SiO_2}{Fe_2O_3}$ $\frac{Silício}{R_2O_3} = \frac{SiO_2}{Al_2O_3 + Fe_2O_3 + TiO_2}$	Jenny, 1941
$PI = \frac{SiO_2}{SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3 + FeO + TiO_2}$	Reiche, 1943
$R = \frac{SiO_2}{Al_2O_3}$	Ruxton, 1986
$STI = \frac{\frac{SiO_2}{TiO_2}}{\frac{SiO_2}{TiO_2} + \frac{SiO_2}{Al_2O_3} + \frac{Al_2O_3}{TiO_2}}$	De Jayawardena e Izawa, 1994
$(WI - 1/WI - 2) = \frac{\frac{SiO_2 + CaO}{Fe_2O_3 + TiO_2}}{\frac{SiO_2 + CaO}{Al_2O_3 + Fe_2O_3 + TiO_2}}$	Darmody et al., 2005

Quadro 3 Índices químicos baseados na alteração química.

Índice Químico	Autor
$CIA = \frac{Al_2O_3}{Al_2O_3 + CaO + Na_2O + K_2O} \times 100$	Nesbitt e Young, 1982
$V = \frac{K_2O + Al_2O_3}{MgO + CaO + Na_2O} \times 100$	Vogt, 1972
$CIW = \frac{Al_2O_3}{Al_2O_3 + CaO + Na_2O} \times 100$	Harnois, 1988
$ALKRatio = \frac{K_2O}{K_2O + Na_2O} \times 100$	Harnois e Moore, 1988
$PIA = \frac{Al_2O_3 - K_2O}{Al_2O_3 + CaO + Na_2O - K_2O} \times 100$	Fedo et al., 1995

Quadro 4 Índices químicos normalizados.

Índice Químico	Autor
$B = \frac{b_{alterado}}{b_{são}}$	Harrassowitz, 1926
$LCHFactor = \frac{I_{alterado}}{I_{são}}, \text{ onde } I = \frac{K_2O + Na_2O}{SiO_2}$	Jenny, 1941
$WI = \frac{WPI_{alterado}}{WPI_{são}}, \text{ onde}$ $WPI = \frac{K_2O + Na_2O + CaO - H_2O}{SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3 + TiO_2 + CaO + MgO + Na_2O + K_2O}$	Short, 1961 (WI) Reiche, 1943 (WPI)
$K = \frac{I_{alterado}}{X_{são}}, \text{ onde}$ $I = \frac{SiO_2}{Al_2O_3} \quad X = \frac{K_2O + Na_2O + CaO}{Al_2O_3}$	Rocha Filho et al., 1985
$Imob = \frac{I_{são} - I_{alterado}}{I_{são}}, \text{ onde}$ $I = K_2O + Na_2O + CaO$	Irfan, 1996

2.3.4 Caracterização Mecânica

O ensaio de compressão pontual (*“point load test”*) consiste em provocar rupturas em amostras de rochas pela compressão da mesma, entre duas ponteiros cônicas de metal duro, propagando fraturas por tração paralelas ao eixo da carga. É um ensaio simples, rápido e pouco trabalhoso, onde as amostras podem ter formatos e tamanho quaisquer, além de fácil reprodução devido à portabilidade do equipamento (ISRM, 1981).

Esse ensaio é bastante recomendado para a caracterização das rochas, podendo ser relacionado com a resistência à compressão uniaxial (ISRM, 1981). Em rochas argilosas, como argilitos e siltitos, com resistência inferior a 25 MPa, não é recomendado este ensaio, em função da penetração das ponteiros cônicas na amostra (HAWKINS e PINCHES, 1992), sendo necessária uma correção nos resultados (ISRM, 1981).

Para corpos de prova com diâmetro (D) de 50 mm e carga de aplicação (P), o índice de carga pontual $I_{s(50)}$ (BROCH e FRANKLIN, 1972) pode ser definido pela expressão:

$$I_{s(50)} = \frac{P}{D^2}$$

Para diâmetros diferentes dos supracitados é inserido um fator de correção (F), a fim de se obter o índice de carga pontual normalizado é dado pela expressão:

$$I_{s(50)} = F \frac{P}{D^2} \quad F = \left(\frac{D}{50} \right)^{0,45}$$

Em amostras irregulares (figura 1) é necessário definir um D correspondente a uma seção circular com área igual a da seção transversal do corpo de prova ensaiado, onde $I_{s(50)}$ normalizado pode ser calculado a partir desse valor.

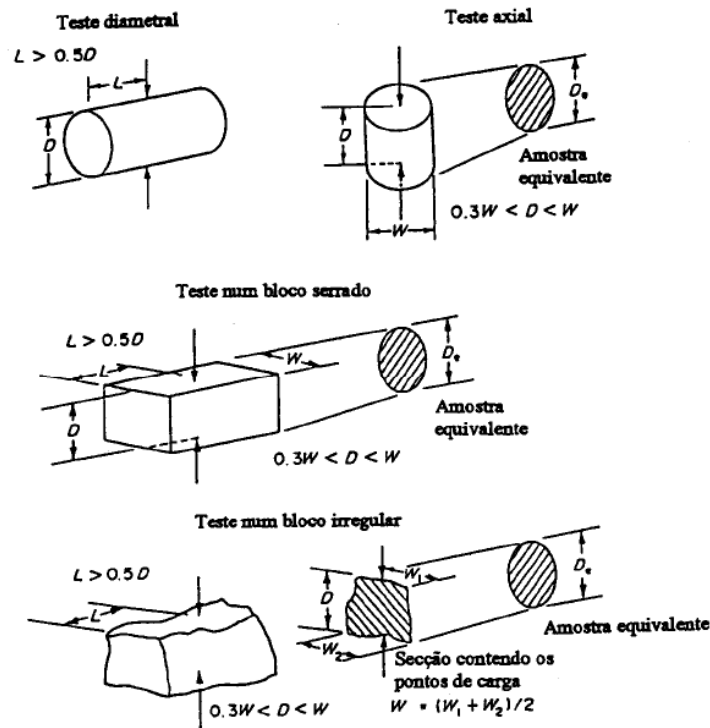


Figura 1 Critérios para preparação de amostras para o ensaio de compressão pontual (PLT) (ISRM, 1981 adaptado).

A resposta devido a tensões e deformações, em rochas como filitos, induz o comportamento anisotrópico devido à presença de planos de fraqueza, inerentes ou induzido na matriz rochosa, bem como a orientação das tensões (RAMAMURTHY et al., 1993).

Nessas rochas, onde a anisotropia provém de planos de foliação, orientações minerais, etc., é previsto o índice de anisotropia $I_{a(50)}$ nesse ensaio, sendo comum à determinação dos índices de carga pontual, quer na direção normal ($I_{s(50)}$ per) e paralela ($I_{s(50)}$ para) a esses planos.

Em rochas muito brandas, como os filitos, a determinação de $I_{a(50)}$ é difícil devido à execução do ensaio na direção paralela à foliação, em função do deslocamento nos planos da foliação, como afirmado por Tsidzi (1990).

Aspectos do comportamento mecânico anisotrópico de filitos foram apresentados por Ramamurthy et al. (1993), bem como os efeitos do intemperismo sobre o índice de anisotropia da resistência (PAPADOPOULOS e MARINOS, 1992). Análises comparativas mostraram que metagrauvacas possuem maior resistência da matriz e menor alterabilidade do que filitos da região central de Portugal (ANDRADE e SARAIVA 2010), por exemplo, condicionada pelos processos intempéricos.

O avanço da alteração sobre as rochas também é capaz de reduzir, gradualmente os valores de coesão e ângulo de atrito, até que na condição de solo, com valores mais reduzidos, há a possibilidade da ruptura (FIORI e CARMIGNARI, 2001) devido a esta condição.

Considerando o efeito da variação da umidade, principalmente em rochas brandas, podem ainda ocorrer fenômenos relacionados à expansão-contracção, redução da resistência e aumento da deformabilidade (MARQUES e VARGAS JR., 1994). Em rochas foliadas, como xistos, a variação da umidade pode ainda desenvolver minerais secundários, fruto da ação intempérica (BELL et al., 1997). A conjunção desses fenômenos denota muitos problemas de estabilidade em maciços brandos e foliados, principalmente, na região do QF.

Dentre os movimentos de massa associados a filitos e xistos (FERREIRA, 2004; PINHEIRO, 2002; FERNANDES, 2000; LANA, 2000, 2014; SCARPELLI, 1994; FIGUEIREDO e AQUINO, 2005), o tipo tombamento flexural e de blocos por flexão, são comuns. Em particular, se a descontinuidade desses maciços mergulha no sentido da face do talude, podem ainda ser verificadas rupturas por flambagem (ADHIKARY et al., 2001).

Neste âmbito o uso de critérios de ruptura são úteis por representarem a resistência ao cisalhamento de pico sob vários estados de tensão. No caso de rochas foliadas, onde as descontinuidades são planares e sem efeito da rugosidade, são adotadas análises pelo critério de Mohr-Coulomb, considerando a coesão e atrito das partículas minerais, representando bem a resistência ao cisalhamento da descontinuidade da rocha (BRADY e BROWN, 1985). Quando nas foliações dessas rochas a superfície apresenta rugosidades recomenda-se a avaliação pelo critério de Paton, havendo dilatação à medida que ocorre o deslocamento entre as superfícies de cisalhamento, em baixos níveis de tensão, já que em níveis mais altos ocorre o cisalhamento das rugosidades (BRADY e BROWN, 1985).

3. CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL

O QF, região localizada na porção centro-sul do estado de Minas Gerais, corresponde a uma área de aspecto quadrangular devido à disposição das suas Serras. Sua geologia e complexo contexto tectônico podem ser encontrados em trabalhos pioneiros de Dorr (1969).

A sua grande importância econômica remete à sua vasta riqueza mineral, principalmente ferro, ouro, gemas, minerais industriais, dentre outros, e grande complexidade geológica.

Geotectonicamente corresponde a porção sul do Cráton do São Francisco, onde a porção sudoeste do Cráton sofreu ação termal e deformação, no evento Transamazônico, sendo assim, inserido no chamado Cinturão Mineiro, cinturão externo ao núcleo arqueano preservado no evento orogenético paleoproterozóico (ALMEIDA, 1977). A Orogênese Brasileira gerou duas faixas móveis neoproterozóicas, delimitando o Cráton do São Francisco, onde na região do QF atuam as faixas Araçuaí e Ribeira (ALKMIM et al. 1993; ENDO e MACHADO, 2002).

3.1 Geologia Regional

A geologia do Quadrilátero Ferrífero foi estabelecida em mapeamentos desenvolvidos pela United States Geological Survey (USGS) e o Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM), entre 1946 a 1962 (HASUI et al, 2012). No presente momento as rochas da região são agrupadas em três unidades geológicas principais: o complexo granito-gnáissico, o Supergrupo Rio das Velhas (de idade Arqueana) e o Supergrupo Minas (Paleoproterozóico) e duas outras unidades mais recentes, representadas pelo Grupo Itacolmi e rochas intrusivas de idades variadas e Bacias sedimentares Terciárias, por exemplo, Gandarela e Fonseca. A figura 2 apresenta uma versão simplificada desse contexto.

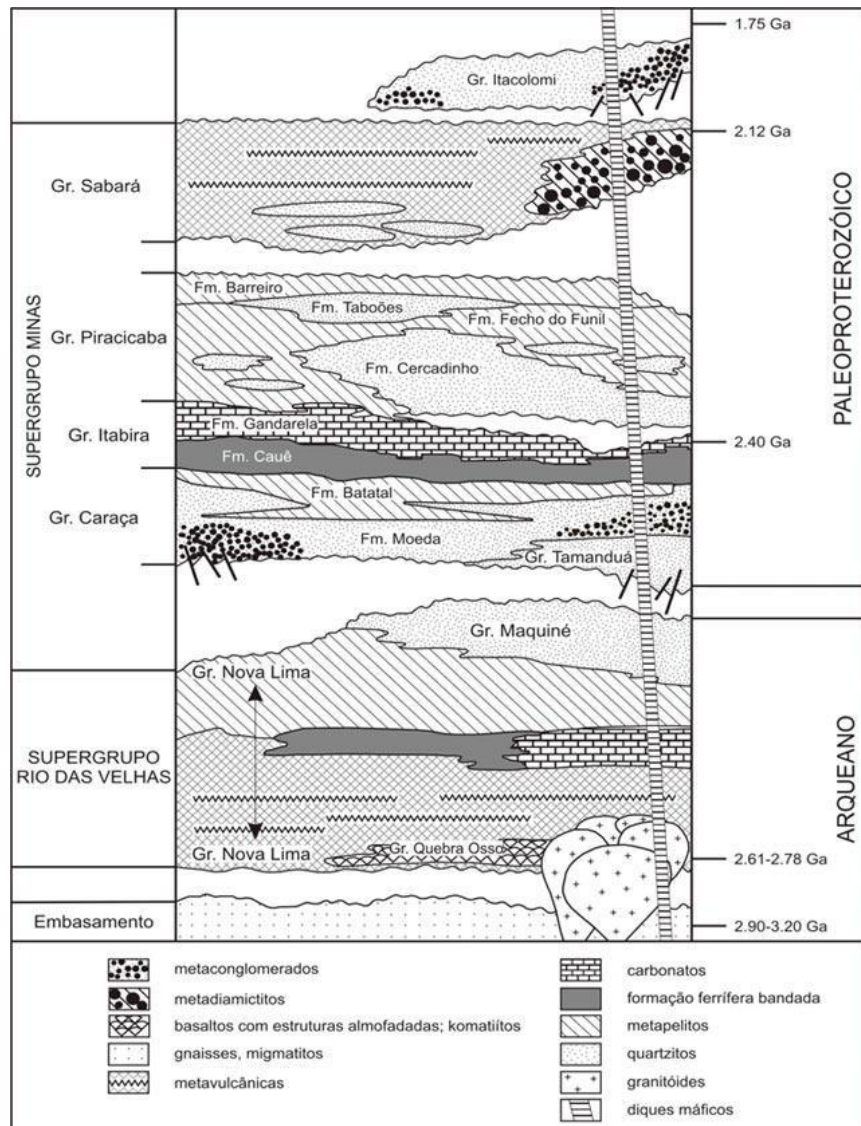


Figura 2 Coluna estratigráfica simplificada do QF (ALKMIM e MARSHAK, 1998).

O complexo granito-gnáissico é representado por gnaisses bandados, de composição tonalítica a granodiorítica, exibindo feições de migmatização. Os gnaisses são rochas constituídas por minerais como quartzo, feldspato e biotita, dispostos em bandas de cores alternadas, desde bandas de cor cinza-claro, ricas em quartzo e feldspatos, até bandas escuras, ricas em biotita, sendo frutos de metamorfismo e deformação de rochas graníticas. Além disso, ocorrem corpos intrusivos de rochas graníticas, faixas de rochas vulcano sedimentares e enxames de diques (gabros e diabásios metamorfizados) (HASUI, 2012).

Já o Supergrupo Rio das Velhas é constituído por rochas vulcânicas e sedimentares, compreendendo uma unidade basal. O Grupo Nova Lima é uma associação de rochas de origem vulcânica e sedimentar, metamorfizadas em baixo grau, destacando-se rochas como metaperidotitos, serpentinitos e enstatitos, além

de basalto e de origem sedimentar, metapelitos, formação ferrífera bandada, sedimentos sílico-carbonáticos e quartzitos. O Grupo Maquiné, ocorre no topo do Supergrupo Rio das Velhas, representada por quartzitos, metaconglomerados e filitos subordinados (HASUI, 2012).

O Supergrupo Minas é dividido em três unidades (HASUI, 2012): unidade clástica basal (Grupo Caraça), unidade química intermediária (Grupo Itabira) e unidade clástica de topo (Grupo Piracicaba). Entre os dois primeiros o contato é transicional e com o Grupo Piracicaba é erosional na base.

O Grupo Caraça apresenta na base a Formação Moeda (quartzitos com intercalações de filitos e níveis conglomeráticos). A Formação Moeda passa de modo transicional para a Formação Batatal (filitos sericíticos, por vezes carbonosos ou ferruginosos).

O Grupo Itabira é iniciado pela Formação Cauê (itabiritos quartzosos ou dolomíticos, sendo formações ferríferas bandadas). A Formação Gandarela, no topo do grupo, é representada por mármore dolomíticos e secundariamente itabiritos e filitos. Já a Formação Cercadinho, ocorre na porção basal do Grupo Piracicaba (alternância de quartzitos e filitos, por vezes ferruginosos). A Formação Fecho do Funil é representada por filitos quartzosos, filitos dolomíticos e lentes de dolomito. As Formações Taboões (ortoquartzitos) e Barreiro (filitos grafitosos) são de ocorrência restrita.

No topo do Supergrupo Minas ocorre o Grupo Sabará (clorita-xistos e filitos, metagrauvacas, metatufos, metaconglomerados e quartzito). O Grupo Itacolmi recobre o Supergrupo Minas, composto por quartzitos de ocorrência restrita, metaconglomerados, quartzitos e filitos grafitosos. Estas rochas ocorrem em discordância sobre o Grupo Piracicaba, com espessura podendo atingir 3500 metros. É significativamente mais jovem que os grupos inferiores, sendo depositado já durante o Evento Transamazônico.

O Grupo Itacolmi apresenta-se sobreposto ao Supergrupo Minas em discordância angular e composto por quartzitos e metaconglomerados com clastos de formação ferrífera bandada, provavelmente da Formação Cauê (DORR 1969), que indicam uma erosão considerável antes de sua deposição. Apresenta espessura estimada de aproximadamente 1000 a 2000 metros.

As rochas intrusivas são representadas por pequenas intrusões de granitóides Paleoproterozóicos, nas rochas do embasamento e também no Supergrupo Minas,

têm idade de 2,04 Ga (NOCE et al. 1998). Estas intrusões estão relacionadas ao Ciclo Orogenético Transamazônico. Diques máficos que ocorrem em todo o Quadrilátero Ferrífero são divididos em três grupos: o primeiro com idades entre 1,7 e 1,5 Ga, de direção geral N-S; o segundo com idades em torno de 906 Ma, de direção geral NW-SE e o terceiro com idade de 120 Ma sem orientação preferencial (SILVA et al. 1995).

Mais recentes, as Bacias Sedimentares Terciárias são depósitos de composição variada que ocorrem como cobertura em todo o QF. Os principais são chapadas de canga, sedimentos lacustres, coberturas detrito-lateríticas e sedimentos flúvio-lacustres. Os sedimentos lacustres são argilitos com folhas fósseis depositados sobre arenitos e conglomerados basais, que correspondem à Formação Fonseca (DORR 1969; MAXWELL 1972), e são encontrados nas bacias Gandarela e Fonseca. As coberturas detrito-lateríticas podem ocorrer como concentrações supergênicas de óxidos de ferro e concreções ferruginosas preenchendo fraturas (LOBATO et al. 2005), ou como solo residual laterítico.

3.2 Contexto Estrutural Regional

O QF apresenta uma estruturação complexa com domos de embasamento Arqueano circundados por grandes sinclinais constituídos por rochas do Supergrupo Minas (ALKMIM e MARSHAK, 1998). As principais estruturas regionais são os sinclinais Moeda, com direção NW-SE; Dom Bosco, com direção aproximadamente E-W; Santa Rita, Gandarela, João Monlevade, Sinclinório de Itabira com direção NE-SW e o Homoclinal Serra do Curral, com direção NE-SW. Os domos de embasamento Arqueano são os complexos do Bonfim, Bação, Caeté e Belo Horizonte.

Destacam-se dois sistemas de falhamentos relacionados à Orogênese Brasileira denominados Cambotas-Fundão, constituído por falhas de empurrão para oeste e com direção variada e o sistema Engenho, constituído por falhas transcorrentes com direção aproximada E-W (figura 3).

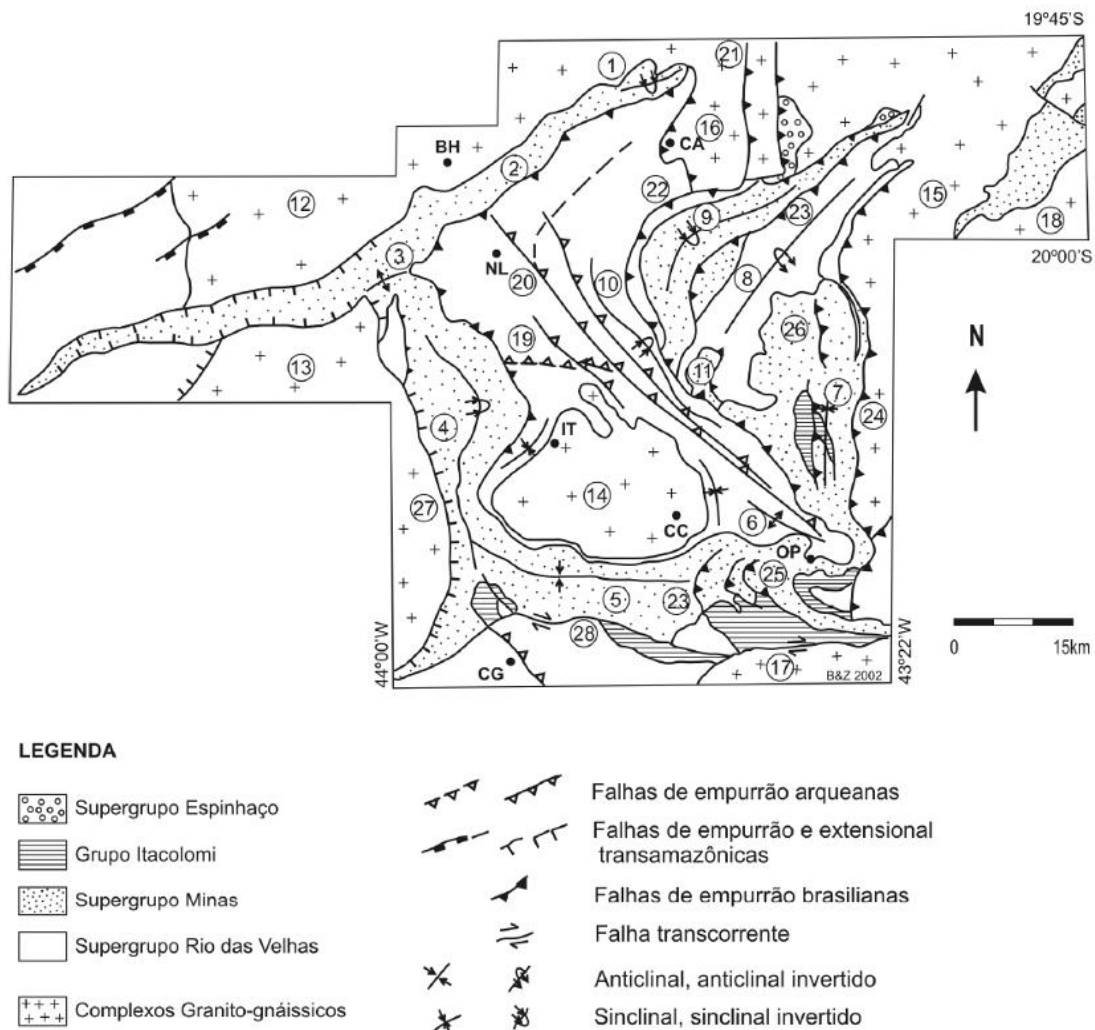


Figura 3 Mapa das principais estruturas do QF. Dobras: 1 - Sinclinal Piedade, 2 - Homoclinal Serra do Curral, 3 - Anticlinal da Serra do Curral, 4 - Sinclinal Moeda, 5 - Sinclinal Dom Bosco, 6 - Anticlinal de Mariana, 7 - Sinclinal Santa Rita, 8 - Anticlinal Conceição, 9 - Sinclinal Gandarela, 10 - Sinclinal Vargem do Lima, 11 - Sinclinal dos Andaimos. Complexos granito-gnáissicos: 12 - Belo Horizonte, 13 - Bonfim, 14 - Bação, 15 - Santa Bárbara, 16 - Caeté. Falhas: 17 - Bem-Te-Vi, 18 - São Vicente, 19 - Raposos, 20 - Caeté, 21 - Cambotas, 22 - Fundão, 23 - Água Quente, 24 - Congonhas, 25 - Engenho. Cidades: BH - Belo Horizonte, CC - Cachoeira do Campo, IT - Itabirito, NL - Nova Lima, CA - Caeté, CG - Congonhas, OP - Ouro Preto (BALTAZAR e ZUCHETTI, 2007 modificado de CHEMALE Jr. et al, 1994).

A evolução tectônica do QF pode ser discutida a partir de um modelo envolvendo três fases deformacionais de acordo com Alkmim e Marshak (1998). A primeira fase relacionada a um evento compressional no ciclo Transamazônico (2,1 Ga), formando dobras em escala regional de direção NE-SW, com vergência para NW. A segunda fase, relacionada ao colapso orogênico Transamazônico (2,095 Ga) é resultante de uma tectônica extensional, responsável pelo soerguimento dos domos granito-gnáissicos. A terceira fase seria relacionada ao ciclo Brasileiro (0,7-0,45 Ga), gerando falhamentos (Sistema Cambotas-Fundão), dobras mesoscópicas e

desenvolvimento de foliação e zonas de cisalhamento indicando transporte regional para oeste e noroeste.

Considerando o complexo contexto geológico-estrutural do QF, podemos esperar, que dentre os processos, para o desenvolvimento de frentes de intemperismo, sejam principalmente governadas por percolação de fluidos em zonas de cisalhamento e alteração superficial. Nesses processos, as trocas químicas relacionadas com zonas de cisalhamento dependem de inúmeros fatores, principalmente quanto à mineralogia original da rocha, às fases secundárias desenvolvidas e à composição dos fluidos atuantes, assim como o grau de metamorfismo e ao mecanismo predominante de deformação.

No âmbito dos processos intempéricos para filitos, podem ser elencados vários fatores como presença e tipo de vegetação, índice pluviométrico, topografia, composição, textura e estrutura original da rocha, bem como o tempo de atuação (KNAUER e SCHRANK, 1994).

3.3 Geologia Local

A figura 4 mostra a localização do talude rodoviário estudado (círculo vermelho) em mapa geológico, escala 1:50.000 (BALTAZAR, 2005). Conforme observado, a área localiza-se sobre a Formação (Fm.) Fecho do Funil, composta por filitos, filitos dolomíticos, quartzitos e formações ferríferas subordinadas. Juntamente está localizada a Fm. Barreiros, composta por grafita xisto, mica xisto e filito; ambas as Fm. pertencem ao Grupo Piracicaba. Todavia, observações ao longo do mapeamento de campo indicaram que o litotipo observado corresponde a rochas típicas da Fm. Batatal do Grupo Caraça, representada por filitos e xistos, definidas por Dorr (1969) como rochas argilosas.

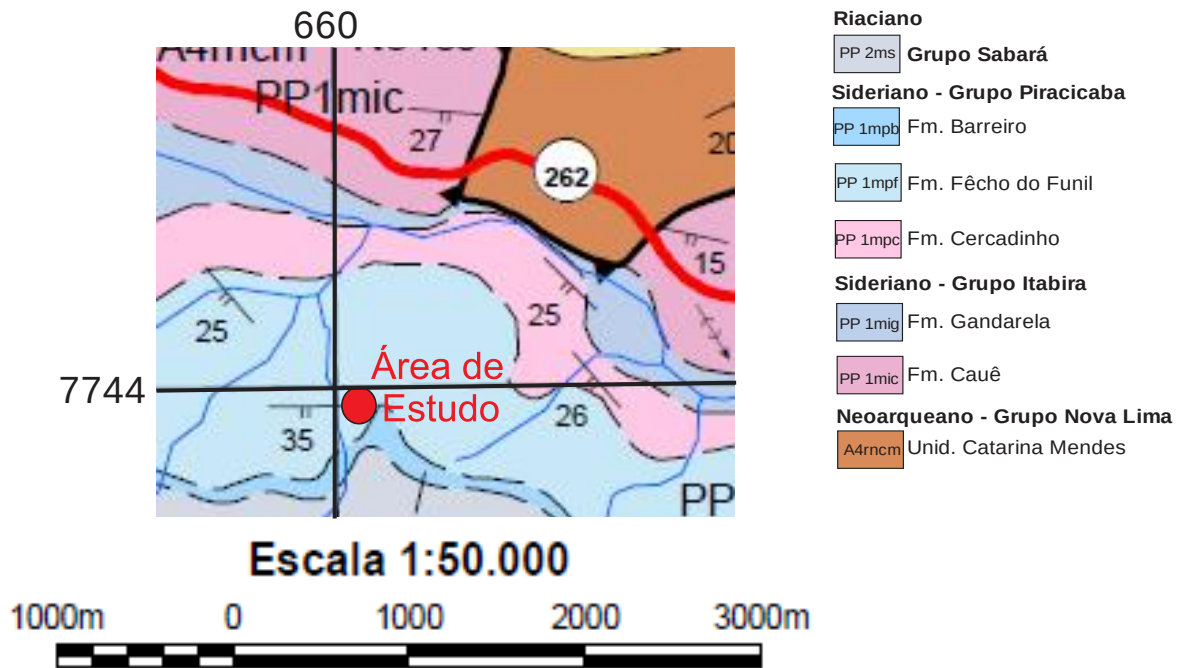


Figura 4 Mapa Geológico 1:50.000 da área de estudo (BALTAZAR et al, 2005 Adaptado).

Conforme descrito por Dorr (1969), a Formação Batatal, essencialmente argilosa, pertencente ao Grupo Caraça, consistindo basicamente em filitos, metacherts, formações ferríferas e filitos grafitosos. Ocorre por grandes áreas e com raros afloramentos em rocha sã, porém são observados diversos afloramentos afetados pelo intemperismo em diversas intensidades. Essa característica provavelmente dificultou a sua observação em trabalhos pretéritos. Além disso, os filitos são rochas muito susceptíveis ao intemperismo, o que acarreta na exposição frequente de substratos cada vez mais profundos.

A Formação Batatal recobre a Formação Moeda, em contato geralmente brusco, todavia em porções onde a granulometria é fina, essencialmente argilosa, o contato é intergradacional. Já o contato da Formação Batatal com rochas subjacentes do Grupo Itabira é gradacional.

Litologicamente é definida como sendo um sericita filito, podendo apresentar significativas quantidades de quartzo, clorita, grafita e material carbonoso, sempre onde o contato desta formação com a Formação Moeda é marcada por materiais finos.

A Formação Batatal é facilmente alterada quando exposta, apresentando cores acinzentadas gradando a amarronzadas, denotando em um saprolito extremamente plástico, com tendência a limonitização e níveis com hematita. Ainda são apontados indícios de matéria orgânica em rochas da Formação Batatal, onde em filitos

grafitosos são observados pseudomorfos de limonita e pirita e lentes com formações ferríferas. Níveis com hematita são mais presentes nas porções superiores da formação, juntamente com cristais de magnetita (DORR, 1969).

4. METODOLOGIA

A metodologia pode ser dividida em duas etapas. A primeira referente ao mapeamento de detalhe geológico-geotécnico do perfil de intemperismo, identificação dos níveis de alteração (ISRM, 2015), classificação dos mesmos, execução de esclerometria in situ e coleta de blocos de rocha. A segunda etapa representa a determinação das propriedades mineralógicas, físicas, químicas e mecânicas das rochas, por ensaios destrutivos e não destrutivos em laboratório.

Cabe ressaltar a grande dificuldade na obtenção de metodologia para a extração e ou obtenção de corpos de prova para os ensaios executados.

4.1 Compartimentação do Perfil de Intemperismo

O mapeamento de superfície foi realizado em um talude de corte localizado nas proximidades do km 140 da BR-356, rodovia que liga as cidades de Mariana (MG) e Ouro Preto (MG), Brasil. Nesse local ocorre um perfil de intemperismo de filito, com níveis de quartzito localizados, bem como seixos de quartzo de até 10 cm, dispersos na superfície do terreno. Foi realizada a identificação dos graus de alteração, segundo os critérios preconizados pela ISRM (2015), de forma adaptada, realçando principalmente as características das discontinuidades observadas (quadro 5).

O talude de corte apresenta diferentes níveis de alteração de filito, compondo uma frente de intemperismo quase completa, da rocha sã ao solo residual. Foram coletados cerca de 600 kg de amostras de blocos de rocha (figura 5), apenas dos níveis W1 a W4, já que W5 não foi identificado e W6 representa a porção de solo residual, por não ser o objetivo deste trabalho.

Em função da marcante foliação da amostra, em planos paralelos, não foi possível obter a dimensão cúbica recomendada para a posterior obtenção de corpos de prova no laboratório, devido à tendência da amostra ao deslocamento durante a amostragem em campo.

Quadro 5 Classes de alteração intempérica das rochas (ISRM, 2015) (adaptada).

Termo	Descrição	Classe
SÃ	Nenhum sinal visível de alteração da matriz; possível leve descoloração ao longo das descontinuidades principais.	W1
LEVEMENTE INTEMPERIZADO	Descoloração indica intemperismo da matriz da rocha e de superfícies de descontinuidade. Toda a matriz da rocha pode estar descolorida pelo intemperismo e pode estar algo mais branda externamente do que na condição sã.	W2
MEDIANAMENTE INTEMPERIZADO	Menos da metade da matriz da rocha está decomposta e/ou desintegrada à condição de solo. Rocha sã ou descolorida está presente, formando um arcabouço descontínuo ou como núcleos de rocha.	W3
ALTAMENTE INTEMPERIZADO	Mais da metade da matriz da rocha está decomposta e/ou desintegrada à condição de solo. Rocha sã ou descolorida está presente, formando um arcabouço descontínuo ou como núcleos de rocha.	W4
COMPLETAMENTE INTEMPERIZADO	Toda a matriz da rocha está decomposta e/ou desintegrada à condição de solo. A estrutura original do maciço está, em grande parte, preservada.	W5
SOLO RESIDUAL	Toda a rocha está convertida em solo. A estrutura do maciço e da matriz da rocha está destruída. Há uma grande variação de volume, mas o solo não foi significativamente transportado.	W6

**Figura 5** Blocos rochosos de filito coletados para ensaios de laboratório. À esquerda nível W1 e a direita nível W4.

As amostras foram acondicionadas em caixas de madeira com serragem, na tentativa de preservar a integridade dos blocos, sendo encaminhadas diretamente ao LEMETRO (Laboratório de Experimentos em Mecânica e Tecnologia das Rochas), localizado no Departamento de Geologia da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), para o início da campanha de ensaios de laboratório.

A descrição e a classificação dos estados de alteração foram baseadas em características macroscópicas como: mineralogia, variação da rocha, testes simples da matriz (risco do canivete e golpes do martelo geológico), identificação das

famílias de fraturas, visando aspectos como abertura, espaçamento, persistência e a estimativa do índice J_v (n° de fissuras/ m^3), conforme sugerido por Palmstrom (2005).

4.2 Caracterização Mineralógica e Química do Perfil de Intemperismo

4.2.1 Análise de Lâminas Petrográficas

A utilização de lâminas petrográficas permite o estudo microscópico, da mineralogia e sua assembleia mineral, do grau de alteração, da granulação e textura, microestruturas e microfissuras existentes, além de outras características que venham a contribuir na caracterização da rocha. A presença de determinadas estruturas, como foliações, clivagens, microfissuras, etc., bastante marcantes em rochas como filitos, podem exercer grande influência no comportamento mecânico e macroscópico das rochas.

Para determinação da mineralogia, textura, microestruturas e dos processos de alteração dos filitos foram confeccionadas, oito lâminas petrográficas (figuras 6 e 7), duas para cada nível de alteração (W1 a W4), sendo uma paralela e outra ortogonal à foliação.



Figura 6 Detalhes de amostras e cortes para lâminas petrográficas em função da foliação.



Figura 7 Lâminas delgadas para os níveis W1 a W4. Em (a) sentido paralelo à foliação e em (b) sentido ortogonal à foliação.

4.2.2 Fluorescência de raios – X (FRX)

A espectrometria de fluorescência de raios-X é uma técnica analítica bastante utilizada em trabalhos de caracterização, quando se objetiva conhecer a geoquímica de determinado material (solo, sedimento ou rocha). A partir deste ensaio é possível determinar a presença de elementos maiores, menores e traços, em termos de concentrações elementares totais e anomalias químicas nos materiais analisados. O método é considerado de grande precisão e com tempo rápido para a análise.

Para os filitos, as amostras foram colocadas em um moinho de anéis (figura 8a) e reduzidas até o pó da rocha, retidas na peneira de 200 mesh. As amostras são fracionadas em partículas menores e colocadas entre as paredes do recipiente de ferro (figura 8b). Através do atrito mecânico entre as partes internas do recipiente a rocha é reduzida a pó (figura 8c).



Figura 8 Em (a) moinho utilizado para moagem das amostras. Em (b) acessórios utilizados no processo de moagem. Em (c) níveis de alteração, W1 a W4, já reduzidos a pó de rocha.

O material foi enviado ao Laboratório de Geoquímica e Sala de Instrumentação da Universidade Federal de Viçosa (UFV), para análise de elementos maiores e menores, utilizando aparelho μ -EDX 1300 - Shimadzu. As amostras foram prensadas em prensa hidráulica ($4 \text{ t cm}^{-2}/\text{min}$) para a confecção de pastilhas com aproximadamente 2 mm de altura. As pastilhas foram armazenadas individualmente em pequenos saquinhos plásticos vedados. Antes de iniciado o ensaio, o aparelho foi previamente preparado para análise quantitativa utilizando-se os Parâmetros Fundamentais (Quantitativo – FP), um modelo matemático que já se encontra internamente no aparelho.

Os resultados obtidos foram interpretados com base em índices químicos apresentados anteriormente nos quadros 1 a 4.

4.2.3 Difração de raios – X (DRX)

O estudo a partir da difração de raios-X é um mecanismo importante para a determinação de minerais, principalmente da fração argila. A técnica consiste em projetar um feixe de raios-x, de forma difratada, em uma placa fotográfica, onde os padrões de difração refletem padrões constituídos por padrões na placa. Assim, são obtidas informações sobre a estrutura do cristal, pelas posições e intensidades destes pontos.

Foram separadas amostras representativas dos quatro níveis de alteração (W1 a W4) que, após moagem, foram analisadas por DRX, modelo D8 Advance (figura 9), sob as condições de tensão aplicada de 40 kV e corrente de 40 mA, velocidade do goniômetro de $0,005^\circ$ 2θ (ângulo de varredura) por passo com tempo de contagem de 1,0 s/ passo, variando de 0 a 70° 2θ , empregando-se o método do pó.

Foram também confeccionadas lâminas para as frações silte e argila, seguindo basicamente os procedimentos descritos por Jackson (1969) e modificados posteriormente por Polivanov (1998), realizados no Laboratório Via Úmida – UFRJ.



Figura 9 Detalhe de aparelho DRX, modelo D8 Advance.

A metodologia de preparação e análise pode ser dividida em três etapas: a análise da fração argila, da fração silte, ambas em lâminas orientadas e, o uso do método do pó (sem orientação), para cada nível de alteração.

Preparação de Lâminas – Fração Argila

Inicialmente houve separação, por pesagem, de 50 ou 100 g de amostra de cada nível de alteração e 100 ml de água destilada. Foram dispostos em um becher com uma solução de 5 ml de NaOH 1 N e agitados por 3 minutos, com bastão de vidro, deixados em repouso por 24 horas. Após esse período as amostras foram submetidas a um agitador mecânico por 15 minutos e sequencialmente lavados, com água destilada, através de um tamis de abertura 53 μ m. O material passado foi vertido em quatro provetas de 1 litro, para cada amostra, até que se atingisse este volume e agitados com haste por 2 minutos. Na proveta, foi previamente identificada uma marca que corresponde a 20 cm de altura (de baixo para cima); os materiais ficaram em repouso por 22 horas igualmente. Após esse período as amostras foram “sifonadas” da proveta do limite superior até a marca de 20 cm e armazenados em recipientes plásticos (figura 10); este material retirado corresponde à fração argila. Ainda nos recipientes foi adicionado 5 ml de HCl 1 N, com o objetivo de neutralizar a solução. Após 24 horas a solução contida em cada recipiente foi colocada em tubos para centrífuga, de polipropileno, de 100 ml, e levados à centrífuga por 15 minutos a 11 rpm; após esse processo houve a separação da fase líquida e sólida, isolando a fração argila. Esse ciclo foi realizado cinco vezes. Em semelhante quantidade de ciclos de centrifugação as amostras sofreram lavagem para retirada de reagentes. Para a verificação da eficácia da lavagem, foi adicionado AgNO_3 , não sendo observada qualquer reação, indicando que a amostra estava limpa.



Figura 10 Amostras W1 a W4, da esquerda para a direita, após o processo final de sifonamento das provetas para obtenção da fração argila e armazenamento da mesma em garrafas pet.

De posse do concentrado da fração argila, foram confeccionadas lâminas orientadas pela técnica da pipetagem (figura 11). Essas lâminas, após período de secagem a temperatura ambiente (condição natural), foram analisadas por DRX. Após esta primeira análise as lâminas sofreram glicolagem (condição glicolada), ou seja, colocadas em dessecador com etileno glicol conectado a uma bomba vácuo por um período de quatro horas e novamente analisadas. Posterior à condição glicolada, as lâminas foram aquecidas (condição aquecida), em mufla a 500°C, por um período de 4 horas e novamente analisadas por DRX.

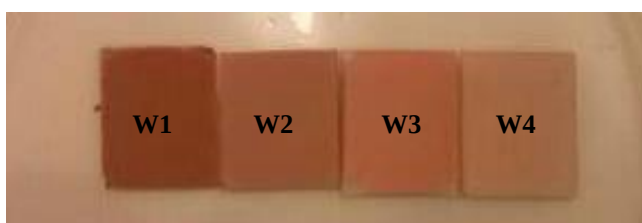


Figura 11 Lâminas delgadas de fração argila prontas para análise em DRX. Da esquerda para a direita os níveis de alteração W1 a W4. Notar a diferença de tonalidade entre as lâminas.

Preparação de Lâminas – Fração Silte

De forma análoga a preparação das lâminas da fração argilosa foram confeccionadas lâminas para a fração silte (figura 12). O processo é semelhante ao preparo das amostras da fração argila, excetuando que no momento do “sifonamento”, o material sifonado até a marca de 20 cm da proveta é descartado e o retido no fundo da proveta é amostrado. Para a fração silte esse processo de sifonamento ocorre várias vezes a cada 15 minutos, sempre completando previamente a proveta de 1l com água destilada e agitando o conteúdo por dois minutos com uma haste. O procedimento encerra quando o líquido na proveta completada até 1l permanece transparente, após agitação e repouso de 15 minutos, significando uma amostra da fração silte pura. Para a fração silte, foram analisadas as amostras apenas na condição natural.

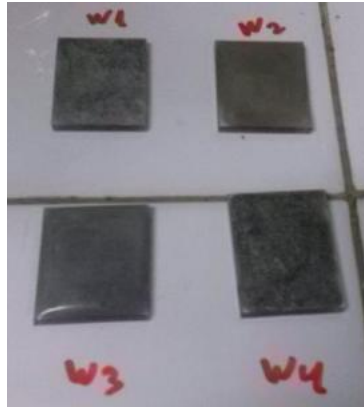


Figura 12 Lâminas delgadas com fração silte em processo de secagem após preparo.

Método do Pó da Rocha

A fração (200 mesh) dos pós das amostras moídas, de cada nível de alteração, foi reduzida em moinho e dispostas em amostrador padrão (figura 13), para análise direta do DRX, não orientada.

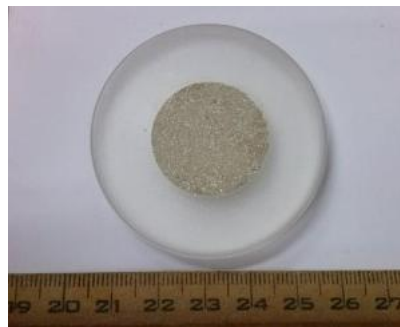


Figura 13 Amostrador com pó de rocha a ser analisado por DRX.

4.3 Caracterização Física do Perfil de Intemperismo

4.3.1 Índices Físicos

As propriedades-índice correspondem às características físicas que refletem diretamente a composição mineralógica e os vazios presentes na rocha, discernindo e quantificando a matriz rochosa. Nesse âmbito foram obtidos os parâmetros de absorção de água, porosidade e massa específica seca e saturada para os filitos, em dez amostras, entre 40 e 60 g (peso natural), conforme preconiza a ISRM (2015).

Devido a grande dificuldade na confecção de amostras regulares optou-se, inicialmente, pela determinação dos índices físicos exclusivamente pelas massas seca, saturada e submersa, onde o volume total da amostra é correlacionado

empiricamente pelo princípio de Arquimedes. Este método da ISRM mostrou-se ineficiente para níveis mais alterados, devido à desagregação da amostra.

O ensaio foi repetido, desta vez utilizando amostras com geometrias praticamente regulares (figura 14), dispensando a necessidade do peso submerso.

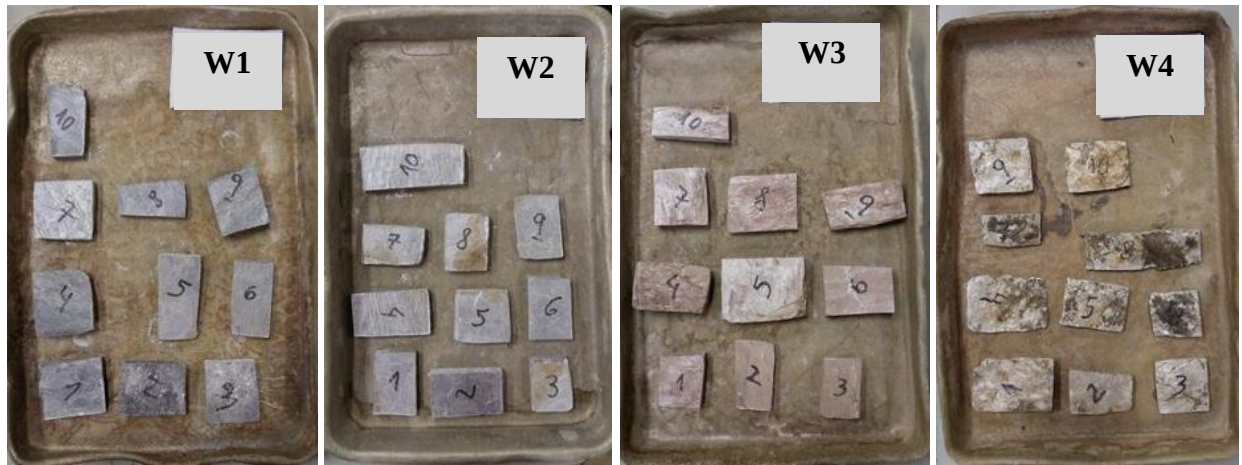


Figura 14 Amostras utilizadas para obtenção dos índices físicos.

Embora a desagregação das amostras durante a saturação tenha sido apenas eventual, pouco intensa e restrita aos estágios mais alterados, após o corte das amostras com geometria regular procedeu-se à saturação com as amostras dentro de um recipiente com água destilada de forma a se evitar a perda de massa dos fragmentos. As massas dos recipientes foram obtidas antes da saturação e a massa saturada foi obtida após o esgotamento da água no interior do recipiente e a separação dos corpos de prova e dos fragmentos eventualmente desagregados.

4.3.2 Porosimetria de Mercúrio

A porosimetria por intrusão de mercúrio tem sido extensivamente utilizada como técnica experimental para caracterizar vários aspectos dos materiais porosos e de pós. Inicialmente proposta por Washburn (1921), sugerindo a obtenção da distribuição de diâmetros de poros a partir de dados pressão-volume durante a penetração de um material poroso pelo mercúrio e, posteriormente aplicada por Henderson et al. (1998), vem sendo desenvolvida desde então.

A técnica, ainda sem norma definida, se baseia no fato de que o mercúrio se comporta como um fluido não-molhante em relação à maior parte das substâncias. Por consequência, não penetra espontaneamente em pequenos furos ou fissuras destes materiais a menos que se aplique uma pressão sobre ele.

O ensaio de porosimetria por injeção de mercúrio fornece a distribuição do diâmetro dos poros a partir de dados de pressão-volume durante este processo. Estes ensaios foram realizados no Laboratório de Tecnologia do Pó, da Universidade de São Paulo (USP – São Carlos), em porosímetro Micromeritics PoreSizer 9320 (figura 15), que possui faixa para ensaios de distribuição média de poros de 300 μm até 0,006 μm , permitindo o uso de pressões de aproximadamente 0,5 psi até 30.000 psi.



Figura 15 Detalhe do porosímetro Micromeritics PoreSizer 9320, USP – São Carlos.

4.3.3 Testes da Cor – Colorímetro

Para estimar a variação das cores nas amostras dos níveis de alteração W1 a W4, foram efetuados testes em colorímetro (BYK, modelo portátil). O aparelho trabalha com um sistema de cor expresso por coordenadas (figura 16) denominadas de L^* (localização da cor no eixo claro-escuro), variando entre $L^* = 0$ preto e $L^* = 100$ branco e, a^* e b^* (variações do tom e croma, respectivamente) cujos eixos são dispostos ortogonalmente entre si e podem variar entre -50 (verde e azul, respectivamente) a + 50 (vermelho e amarelo, respectivamente).

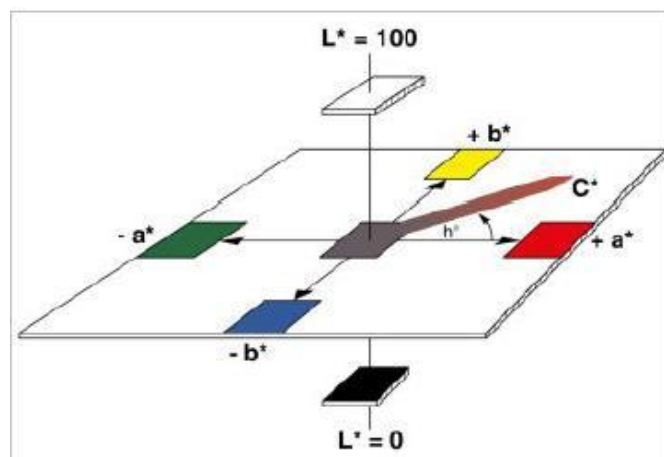


Figura 16 Sistema de coordenadas L^* , a^* , b^* (CIELAB, 1976).

Foram realizados testes na matriz da rocha (figura 17), com mínimo de dez medidas e máximo de trinta medidas, em pontos aproximadamente equidistantes. Cabe ressaltar que o espaçamento entre os pontos é dependente da regularidade da superfície de aplicação.



Figura 17 Detalhes do colorímetro durante o teste da cor na matriz da rocha.

4.3.4 Ensaio de Durabilidade – “*Slake Durabilty Test*”

A durabilidade é uma das características mais importantes e necessárias na previsão do comportamento mecânico das rochas, quanto à ação do ar e da água. Quando as rochas são expostas a processos intempéricos, em obras de engenharia civil, a durabilidade representa a resistência dos materiais a processos de alteração.

Na tentativa de prever esse comportamento pode ser utilizado o “*slake durability test*”. Este ensaio é resultado da exposição de fragmentos de rocha, de tamanho padrão, a ciclos normalizados de secagem, umidificação, bem como ação mecânica. Conforme a ISRM (1981) recomenda, foram colocados dez fragmentos de cada nível de alteração (figura 18) a ser ensaiado, em tamanhos padrões e com dimensões aproximadamente arredondadas (sem arestas), em tambores cilíndricos telados, com abertura suficiente para passagem de água e material desagregado, imersas em água, onde os mesmos giram em uma razão de 200 rpm/10 min em torno de um eixo horizontal.

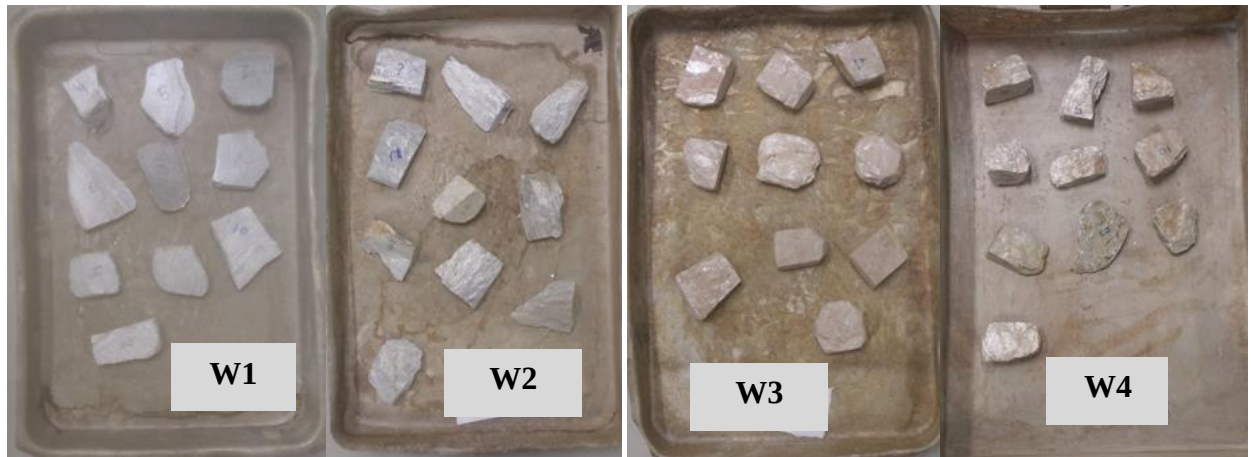


Figura 18 Amostras dos graus de alteração W1 a W4 para o ensaio de durabilidade (“*slake durability test*”).

Previamente o material foi colocado em estufa, onde sua massa seca foi registrada, bem como dos tambores, após 24 horas. Após o resfriamento dos fragmentos, em dessecador, evitando efeitos do choque térmico com a água, foi iniciado o ensaio (figura 19). A partir da rotação dos tambores, os fragmentos de rocha sofrem atrito mecânico entre si, além da água favorecer a desagregação e alteração dos mesmos. Concluído o primeiro ciclo, as amostras foram levadas imediatamente para a estufa, a 105°C, havendo a repetição de todo o processo até que seja finalizado um segundo ciclo.



Figura 19 Equipamento utilizado para a realização do ensaio de durabilidade.

Ao final, o ensaio fornece o índice de “*slake*”, ou de durabilidade (I_d), que corresponde à porcentagem da rocha seca retida nos tambores após um (I_{d1}) ou dois (I_{d2}) ciclos completos.

$$I_d (\%) = \frac{\text{Peso seco (g) após um ou dois ciclos}}{\text{Peso inicial (g) da amostra}}$$

Complementarmente, objetivando apresentar a evolução do índice de “*slake*” o ensaio foi repetido, com novos fragmentos de W1 a W4, até que não houvesse perda de massa no processo.

No caso do nível de alteração W2, foram observadas macroscopicamente, porções da rocha com e sem intercalações de minerais máficos e silicosos preenchendo a foliação, sendo denominados aqui por W2 Foliação.

Buscando-se entender os valores de I_d , obtidos anteriormente, o ensaio foi executado também por repetidas vezes, com novas amostras de cada grau de alteração. Para tal foram separados 100 fragmentos de W1, 90 fragmentos de W2, 40 fragmentos de W2 Foliação, 90 fragmentos de W3 e 120 fragmentos de W4, todos divididos em grupos de 10 fragmentos.

4.3.5 Ciclagem Água-Estufa

O ensaio de ciclagem água-estufa (ABNT - NBR 12696) consiste em submeter amostras de rocha a ciclos de umedecimento e secagem avaliando assim a durabilidade. Verifica-se a velocidade dos efeitos da alteração intempérica, nas amostras rochosas, devido à mineralogia presente, já que as variações de temperatura catalisam reações químicas e físicas, responsáveis pela alteração e desagregação dos materiais.

O procedimento consistiu na quebra manual de fragmentos de rocha de W1 a W4 (figura 20), sendo selecionados cinquenta fragmentos de cada amostra passando na peneira de 76 mm e retidos na peneira de 19 mm. Estas amostras foram submetidas a ciclos alternados de imersão em água (14 +/- 1) horas em temperatura controlada (23 +/- 2)°C e secagem em estufa em (8 +/- 1) horas a (100 +/- 5)°C, resfriadas naturalmente, por (60 +/- 5) minutos antes do próximo ciclo.



Figura 20 Fragmentos dos níveis W1 a W4 para ensaios de ciclagem água-estufa.

Apesar da norma preconizar exames qualitativos nos fragmentos (lasqueamentos, rachaduras, fissuração e/ou desintegração) a cada cinco ciclos (até o ciclo de nº 24) e posteriormente a cada 12 ciclos, esta avaliação não foi realizada. Devido às amostras serem muito brandas este tipo de inspeção torna-se impraticável e passível de erros de interpretação. Optou-se fazer a cada 10 ciclos e no último ciclo, que encerra o ensaio, uma curva granulométrica das amostras para avaliar o efeito da evolução dos fenômenos de desagregação das amostras. Foram utilizadas peneiras com aberturas, em mm, de 19; 12,5; 9,5; 4,76; 2,0; 0,50; 0,053 e; o fundo (<0,053 mm).

4.3.6 Ensaio de Lixiviação em Rocha por Extrator Soxhlet

O ensaio de lixiviação em rocha através do extrator Soxhlet auxilia na avaliação de parâmetros de resistência pelo entendimento dos processos de alteração, que ocorrem em rochas relacionadas a questões como a: (i) diminuição da resistência com a perda de finos ou não, (ii) influência em propriedades mecânicas como a deformação e deformabilidade, (iii) anisotropia em termos de porosidade e permeabilidade e (iv) redução de características de aderência ou adesividade relativos a ligantes hidráulicos e betuminosos (CESP, 1983).

A CESP (1983) preconiza que sejam ensaiadas frações e quantidades de agregados específicas do material da seguinte forma para as peneiras:

- Passando na de 50,0 mm e retido na de 37,5 mm – quantidade de 1,5 kg
- Passando na de 37,5 mm e retido na de 25,0 mm – quantidade de 1,0 kg
- Passando na de 25,0 mm e retido na de 12,5 mm – quantidade de 0,5 kg

- Passando na de 12,5 mm e retido na de 9,5 mm – quantidade de 0,5 kg

A fração e quantidade disponível do material foram escolhidas após lasqueamento com o martelo geológico, correspondentes à fração retida na peneira de 12,5 mm (figura 21).

A fração de cada nível foi previamente lavada e seca em estufa a 105° C, até que o peso seco ficasse constante. As frações foram colocadas envoltas em papel filtro, na forma de cartucho e inseridas dentro do extrator Soxhlet para que os finos não se perdessem durante cada ciclo (figura 22).

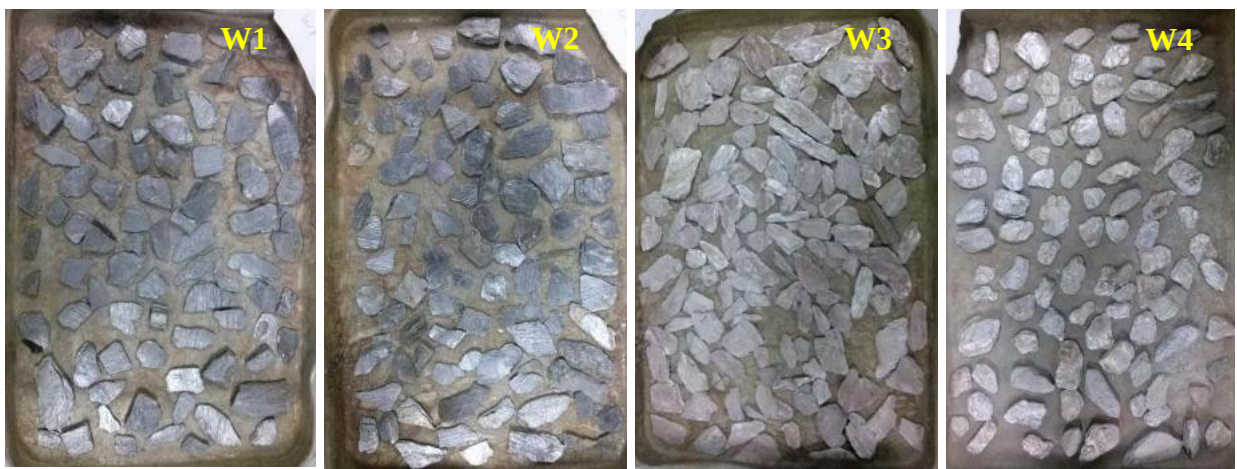


Figura 21 Frações retidas na peneira de 12,5 mm dos níveis W1 a W4 para ensaios de lixiviação em rocha.



Figura 22 Detalhe de amostras em cartucho feito com papel filtro no interior do extrator Soxhlet.

Um ciclo no extrator representa quando há a condensação e precipitação da água, que é evaporada dentro do balão volumétrico proveniente do aquecimento de manta aquecedora. A água precipita sobre a amostra infiltrando nos fragmentos. Quando a água atinge o nível do sifão ela acaba sendo sifonada de volta ao balão, recomeçando o ciclo. O esquema é apresentado na figura 23.

A norma recomenda que as amostras sejam submetidas a um total de 100 ciclos, onde a cada 10 ciclos no extrator, após período de secagem, em estufa a 105°C, haja uma comparação da fração granulométrica quanto a efeitos como a desintegração, fragmentação, rachaduras e lasqueamento. Devido às amostras serem muito brandas este tipo de avaliação torna-se impraticável, da mesma forma que nos ensaios de ciclagem água-estufa. Optou-se fazer a cada 10 ciclos uma curva granulométrica das amostras para avaliar o efeito da evolução dos fenômenos de desagregação das amostras. Foram utilizadas peneiras com aberturas de 12,5 mm, 9,5 mm, 4,76 mm, 2,0 mm, 0,50 mm, 0,053 mm e o fundo (<0,053 mm).



Figura 23 Esquema de montagem do extrator Soxhlet. (1) representa a alimentação contínua de água ao condensador, entrando em (2) e saindo em (3). A água aquecida no balão volumétrico produz vapor (A) que percorre o canalículo (B1 a B2) até o extrator Soxhlet. O vapor sofre condensação e umedece o cartucho de papel filtro com as amostras. Quando a água atinge o sifão em (C1) é finalizado um ciclo, onde o fluido retorna por (C2) para o início do ciclo seguinte.

4.4 Caracterização Mecânica do Perfil de Intemperismo

4.4.1 Esclerometria – Martelo de Schmidt

Para a primeira estimativa dos parâmetros mecânicos das rochas estudadas utilizou-se o martelo de Schmidt. O esclerômetro ou martelo de Schmidt é um equipamento muito útil na obtenção, *in situ*, da resistência à compressão, tratando-se de um ensaio bem simples e não destrutivo, além de oferecer boas correlações com a resistência à compressão uniaxial das rochas e módulo de Young. Cabe ressaltar que o uso deste ensaio não substitui a obtenção de tensões de ruptura através de ensaios de compressão de corpos de prova em laboratório, por exemplo, todavia permite uma estimativa preliminar dessa propriedade.

Seu funcionamento consiste na retração da haste do martelo, pela compressão de uma mola, localizada no interior do equipamento. A haste do martelo vai se retraindo até que atinge o fim do seu curso. Neste momento, ela é liberada instantaneamente, sendo projetada sobre a superfície de aplicação. Este impacto gera uma onda de choque, transmitida à superfície de aplicação, provocando uma espécie de rebote, causando um deslocamento de massa, que posteriormente é transmitida ao aparelho, registrando um valor adimensional R , ou índice esclerométrico. Este valor varia em função da dureza do material, ou seja, quanto maior o valor de R , maior será a dureza da rocha.

O valor de R foi obtido em campo por um esclerômetro digital (figura 24a) e, em laboratório, por um esclerômetro analógico (figura 24b), ambos tipo L, pelo registro de 20 golpes para cada área de 20 cm x 20 cm, sempre ortogonalmente à superfície da foliação, pela adaptação da NBR 7584 (ABNT, 2012). Após a preparação da superfície da rocha a cabeça do martelo de Schmidt foi pressionada perpendicularmente a mesma, até que se ouvisse o estalo, fruto do deslocamento da massa móvel à superfície de aplicação.

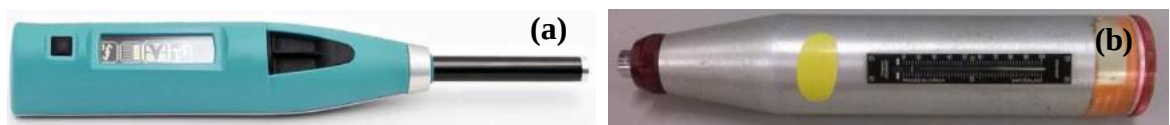


Figura 24 Esclerômetros tipo L, utilizados para obtenção de R .
Em (a) modelo digital e em (b) modelo analógico.

4.4.2 “Point Load Test” - PLT

Conforme a ISRM (1981) preconiza, neste tipo de ensaio a rocha, é carregada pontualmente entre dois cones metálicos e a ruptura se dá pelo desenvolvimento de fraturas de tração paralela ao eixo de carregamento (figura 25). O produto final deste ensaio é o índice de resistência à carga pontual (I_s), sendo padronizado para um diâmetro de 50 mm ($I_{s(50)}$).

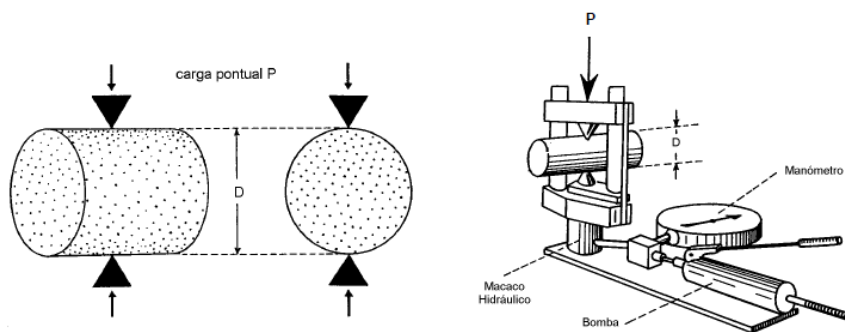


Figura 25 Esquema de carregamento de corpo de prova cilíndrico no ensaio de compressão puntiforme (ISRM, 1981) (adaptado).

Devido à natureza dos filitos, foram preparados corpos de prova irregulares (figura 26), de todos os níveis de alteração (figura 27), para a obtenção de $I_{s(50)}$, respeitando as relações necessárias entre as dimensões. Conforme mostrado na figura 26 W1 e W2 são as arestas da base superior e inferior, respectivamente, L o comprimento e D a espessura do corpo de prova no ponto de aplicação da carga.

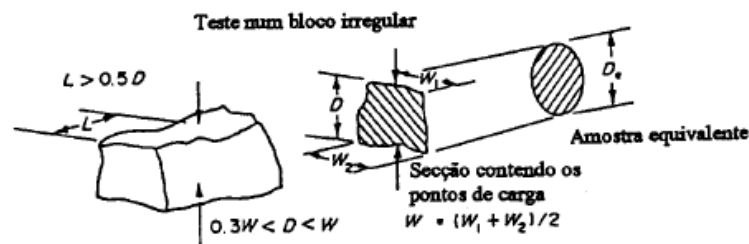


Figura 26 Relação das dimensões proposta pela ISRM (1981) (adaptado) para corpos de prova irregulares.

Para W2 foram ensaiadas amostras nestas duas condições com níveis máficos e silicosos (W2 Foliação) e sem eles (W2).

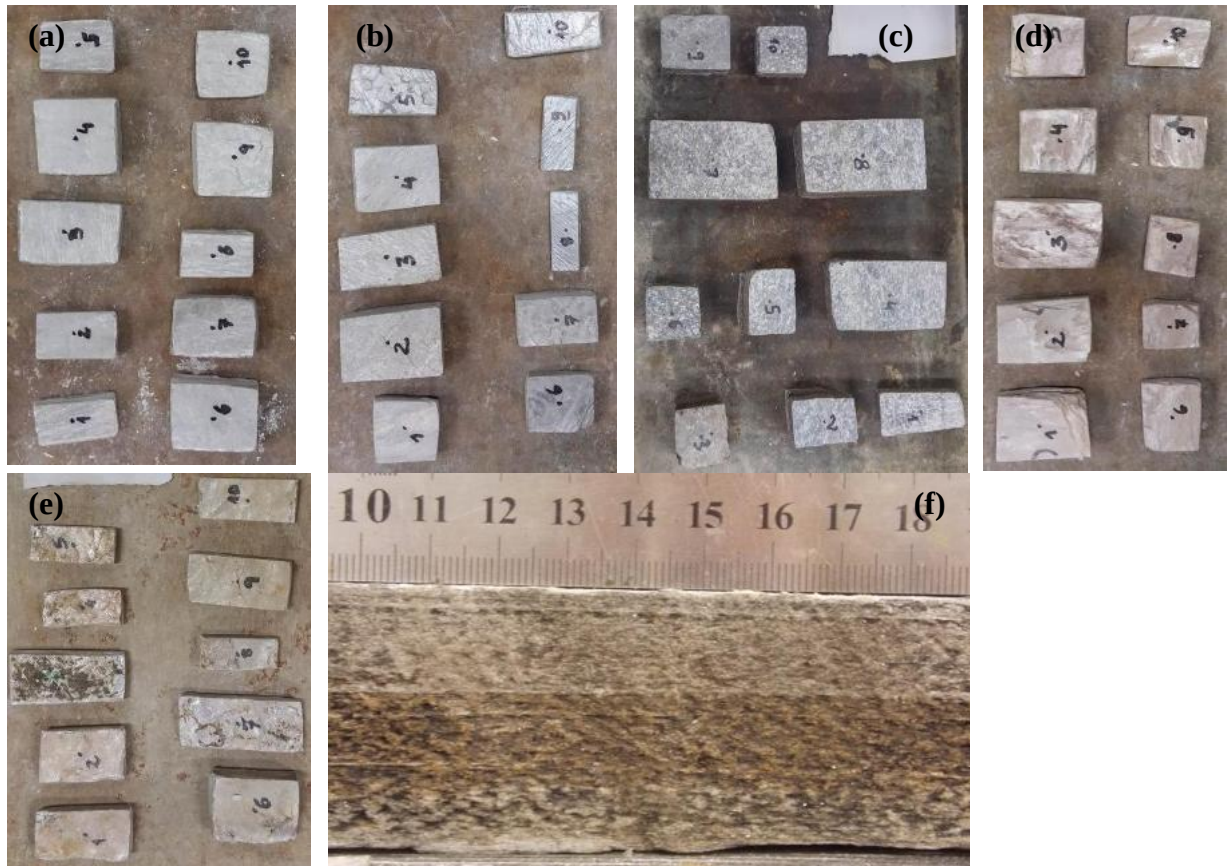


Figura 27 Corpos de prova irregulares dos níveis de alteração W1 (a), W2 (b), W2 foliação (c), W3 (d) e W4 (e). Em (f) é mostrada seção ortogonal à foliação dos níveis máficos e silicosos no nível W2 Foliação.

4.4.3 Ensaio de Cisalhamento Direto

O ensaio de cisalhamento direto foi realizado sob duas condições, amostras não-saturadas (condição de umidade próxima a natural) e saturadas, para todos os graus de alteração. Em ambas as situações, as amostras sofreram uma fase inicial de adensamento por um período de 24 horas, ou até que suas deformações verticais fossem estabilizadas, com a aplicação de uma tensão normal e posteriormente tensão cisalhante até a ruptura, por meio de velocidade controlada. Cabe ressaltar que o período de saturação ocorreu, por 24 horas, em submersão em água destilada, anterior à fase de adensamento e sequencialmente a de cisalhamento com a amostra submersa.

Devido a grande fragilidade da rocha, potencializada em seus graus mais alterados, não foram adotados os procedimentos para os ensaios de cisalhamento direto em rocha. Optou-se por utilizar a prensa de cisalhamento direto convencional para solos (figura 28a) e caixa de cisalhamento com pedras porosas (figura 28b). Os corpos de prova foram confeccionados utilizando uma serra e rebolo diamantado,

além de lixa d'água para ajustes finos. Buscou-se uma dimensão ideal, ou seja, 5 x 5 x 2 cm sempre que possível (figura 28c).



Figura 28 Detalhe de prensa de solos para cisalhamento direto (a) e caixa de cisalhamento. Em (c) corpo de prova de amostra W1 moldado nas dimensões para a caixa de cisalhamento (5 x 5 x 2 cm).

Tanto para as condições não-saturada e saturada foram utilizadas tensões normais de 25 kPa, 50 kPa, 100 kPa, 200 kPa, 300 kPa e 400 kPa, sendo cisalhados 3 corpos de prova para cada nível de tensão, no sentido paralelo à foliação. Ao total, foram executados 144 ensaios, 72 na condição não-saturada e 72 na condição saturada.

A velocidade de cisalhamento foi determinada por meio de ensaio de adensamento unidimensional do nível mais são (W1). A partir do gráfico da variação da altura pela raiz do tempo (figura 29), foi definido o valor de t_{100} (0,8 min), tanto para condição não-saturada quanto para a condição saturada, sendo este o que corresponderia à consolidação devido à aplicação do carregamento. Segundo Head (1986) o valor do tempo para a resistência de pico ser atingida (t_f) corresponde ao produto da constante 12,7 pelo valor de t_{100} , sendo t_f igual a 10,16, resultando em uma velocidade de 0,49 mm/ min.

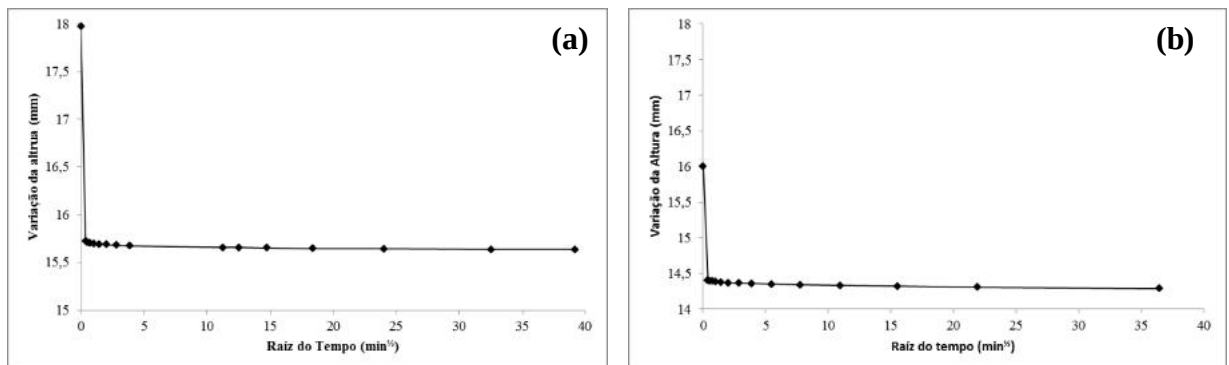


Figura 29 Relação da variação da altura pela raiz do tempo, para as condições não-saturada (a) e saturada (b), em amostra W1.

Apesar do valor da velocidade de cisalhamento obtida, optou-se por adotar uma velocidade menor de 0,15 mm/min, que apesar de mais baixa, objetiva comparar os resultados obtidos por outros autores sobre mesmas prerrogativas para filitos.

4.5 Preparação de Amostras e Corpos de Prova

De forma a subsidiar os ensaios previstos para o estudo, buscou-se entender o comportamento dos filitos, em termos de resistência à preparação de amostras (processos mecânicos de extração, corte, fragmentação, etc.). A seguir são apresentadas técnicas que foram empregadas na tentativa de extração de amostras/corpos-de-prova.

4.5.1 Britagem

Para avaliar a disponibilidade de fragmentos de filito para ensaios de durabilidade, químicos e índices-físicos foi selecionado um bloco de rocha irregular, de nível de alteração W3 e massa inicial 803,98 g, para britagem. Optou-se por este nível de alteração devido a dois fatores: (i) maior disponibilidade em relação aos demais níveis de alteração e, (ii) por ser um nível de alteração intermediário, entre amostras levemente e altamente intemperizadas.

A amostra foi passada uma única vez em britador mecânico e colocada em uma sequência de peneiras com fundo (figura 30) sendo levadas a uma mesa vibratória para peneiras.

Conforme observado na figura 30, o material britado apenas ficou retido nas duas últimas peneiras da sequência e principalmente no fundo. A massa de 893,98 g ficou distribuída da seguinte maneira: 0 g na de 50,0 mm, 0 g na de 37,5 mm, 0 g na de 25,0 mm, 239,62 g na de 12,5 mm, 119,15 g na de 9,5 mm e 534,31 g no fundo do conjunto. Considerando que para os ensaios de durabilidade (ciclagem água-estufa e lixiviação em rocha) as massas úteis foram retidas nas peneiras de 12,5 mm e 9,5 mm, estima-se uma perda de 60 % de amostra no decorrer do processo.

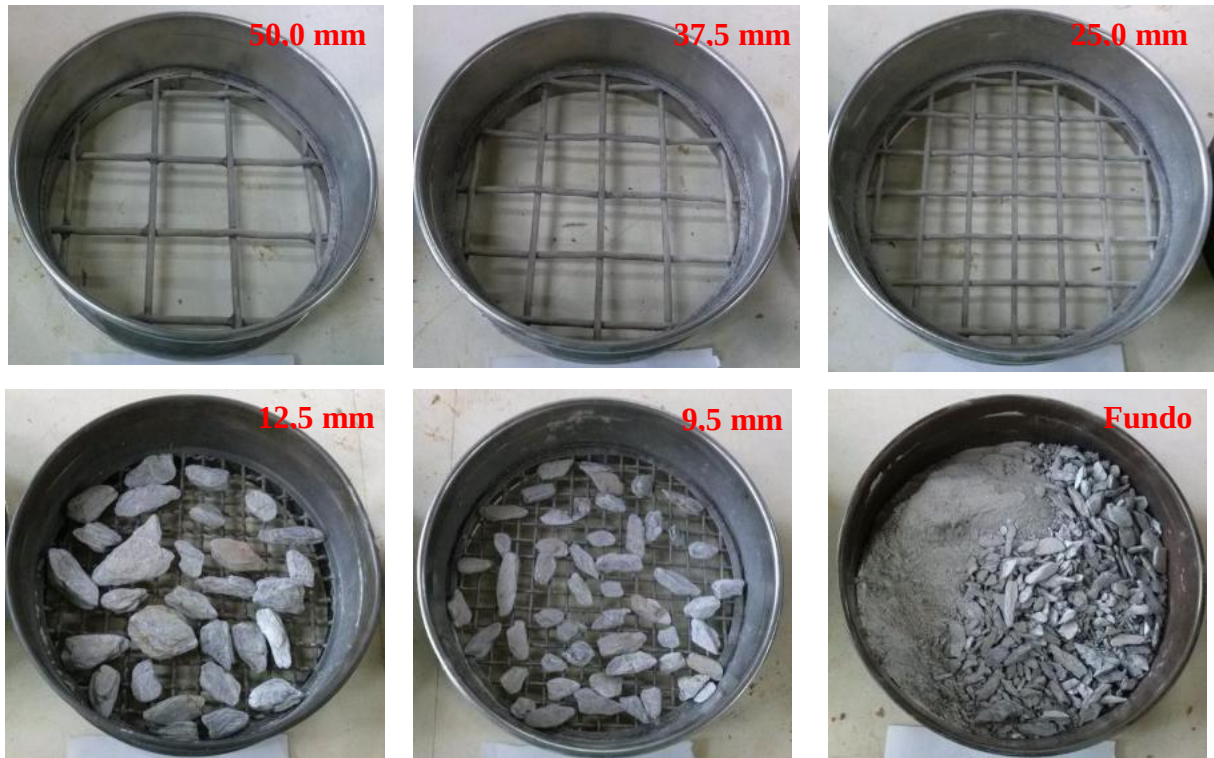


Figura 30 Resultado da amostra após processo de britagem e peneiramento.

Optou-se por lascar a rocha com o martelo geológico (níveis W1 a W3) e manualmente (nível W4) para obtenção de fragmentos representativos para o ensaio.

4.5.2 Obtenção de Corpos-de Prova

Para a execução de ensaios físicos não destrutivos e mecânicos destrutivos, buscou-se corpos-de-prova de geometria regular, tendo em vista a praticidade de interpretação dos resultados, com amostras regulares.

Foi selecionado, para esta avaliação, um bloco de rocha, nível W3, pelos motivos anteriormente citados, no item 4.5.1. Este bloco foi envelopado com plástico filme e posteriormente cimentado adquirindo uma base regular. Utilizando uma perfuratriz modelo semelhante à sonda MACH-920, adaptada a um berço, foi iniciada a perfuração e extração do corpo-de-prova em amostrador para rocha.

O processo se mostrou ineficaz, tendo em vista a fácil desagregação da rocha em contato com a água, face à força e velocidade de perfuração, não permitindo a recuperação da rocha. A natureza dos filitos limita as técnicas de obtenção de amostras para ensaios, onde na maior parte das vezes esse deve ser feito

manualmente com auxílio de instrumentos de corte, como serras e serrotes, bem como lixas de parede. A figura 31(a e b) mostra os resultados de preparação de corpos-de-prova utilizando técnicas de extração convencional e a de preparo manual para as amostras de filito.

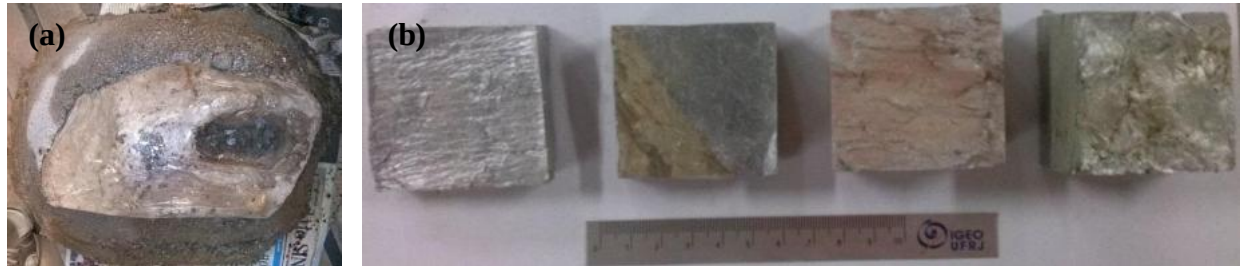


Figura 31 Em (a) bloco de rocha W3 após tentativa de extração de corpos-de-prova. Em (b) amostras dos graus de alteração W1 a W4 confeccionadas manualmente para ensaios mecânicos.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos são apresentados em termos de propriedades físicas, químicas e mecânicas para os filitos estudados.

5.1 Caracterização do Perfil de Intemperismo

O levantamento geológico de campo permitiu definir a compartimentação e o detalhamento da morfologia da frente de intemperismo estudada, sendo definidas em campo cinco classes de alteração, não sendo identificada a classe W5. A classe W6, por representar o solo residual foi apenas definida em campo sem coleta de amostras e caracterização da mesma no presente estudo.

A figura 32 mostra o perfil de intemperismo estudado e as figuras 33 a 37 exibem características observadas ao longo do mapeamento.



Figura 32 Imagem panorâmica do talude rodoviário estudado (km 140 da BR-356).

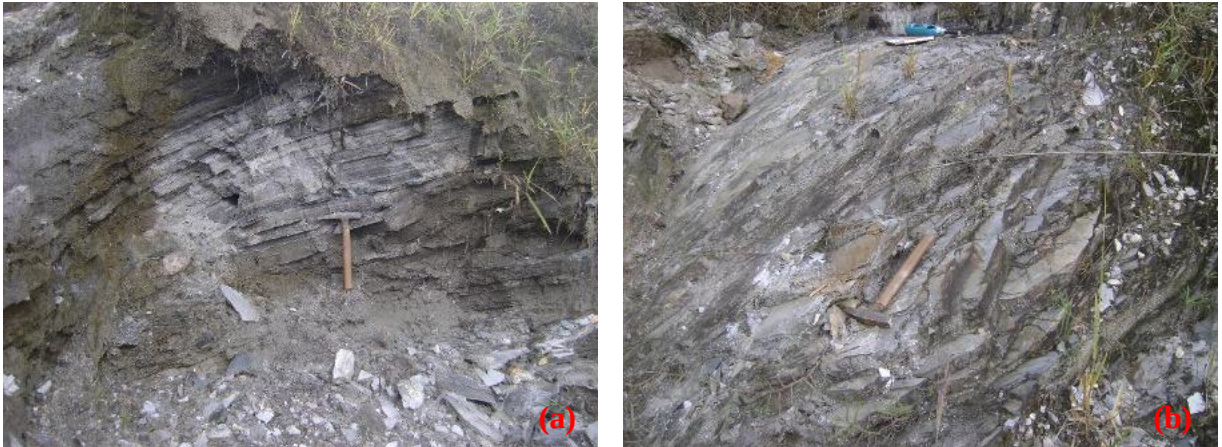


Figura 33 Em (a), destaque de quartzito, que ocorre em porções da frente de intemperismo, de forma intercalada com o filito na parte oeste do talude. Em (b), afloramento de filito W1/W2, micáceo, de granulometria fina, riscado facilmente pelo martelo geológico, sendo medianamente resistente ao golpe do mesmo. São notados níveis oxidados entre as foliações.



Figura 34 Em (a), detalhe de famílias de fraturas ortogonais entre si, induzindo a formação de blocos e posterior queda do perfil de intemperismo. Em (b), detalhe de abertura entre as fraturas, com média de 0,5 mm (W2).



Figura 35 Em (a), evidência de W1 que ocorre entre níveis W3. Apesar da rocha ser considerada sã, ela apresenta forte deslocamento nos planos de foliação. Em (b), trecho de contato entre as classes W4 e W3 com forte alteração entre os planos de foliação.



Figura 36 Em (a) contato brusco entre os níveis W6 e W4 (trecho mais acima do talude). Blocos de rocha filito (W3 e em menor quantidade W1/W2), estão dispostos na encosta. Em (b) detalhe de seixos de quartzo centimétricos, que ocorrem dispersos na superfície do perfil de alteração.



Figura 37 Veios de quartzo que ocorrem em trechos do perfil de alteração, intercalados com a rocha filito. Sua evidência é mais proeminente em níveis W3 e principalmente W4.

Com base nas características supracitadas é apresentada a figura 38, com a identificação dos níveis de alteração identificados na frente de intemperismo. Os pontos em amarelo indicam os locais de coleta de amostras para ensaios.

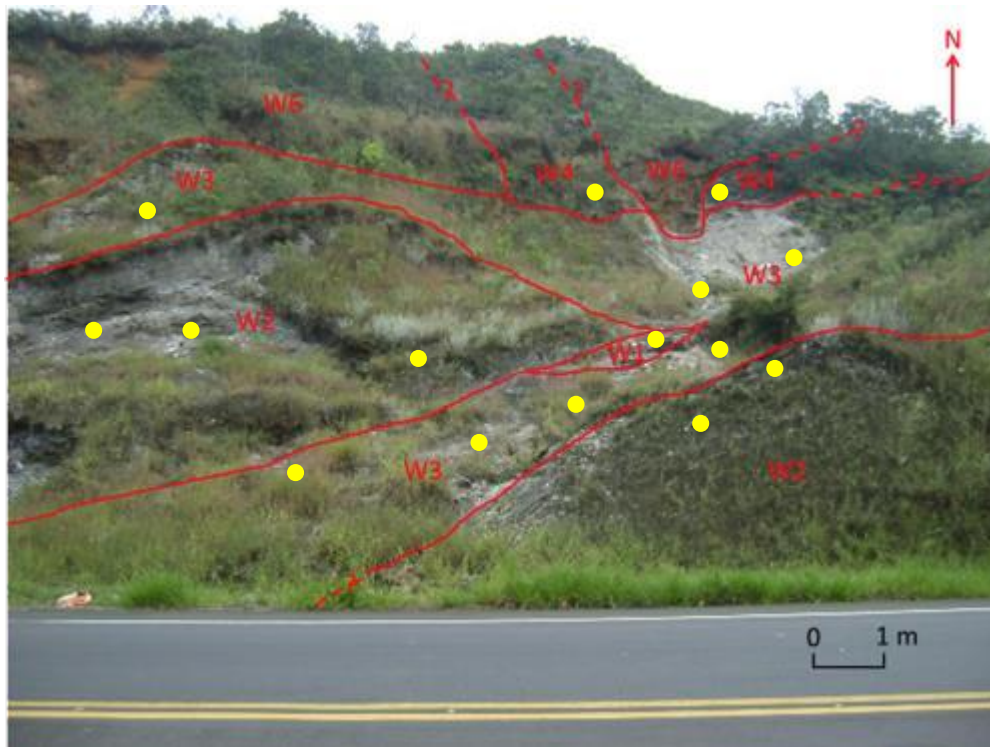


Figura 38 Distribuição dos níveis de alteração com base nas interpretações de campo.

É possível observar que os graus de alteração apresentam contatos abruptos, com certa tendência dos níveis mais alterados ocorrerem próximo a superfície. A presença de fraturas, principalmente paralelas à foliação metamórfica condiciona esta condição, resultando em interdigitações entre graus de alteração distintos, conforme observado para os níveis W1, W2 e W3. Este fato corrobora a ideia que feições estruturais, sobretudo paralelas à foliação, devem controlar a distribuição espacial destes graus no interior da frente de intemperismo, ou seja, há um controle estrutural sobre o desenvolvimento do perfil. São observados nos níveis de alteração W2 e principalmente W3, passagens centimétricas (até 8 cm) de graus de alteração intermediários, ou seja, W2/W3 e W3/W4, observadas em fraturas persistentes paralelas à foliação.

Na parte oeste do talude foi identificado, na classe W2, níveis de minerais máficos, silicosos e em menor quantidade argilominerais, preenchendo as foliações (W2 Foliação). As rochas que apresentaram essa característica mostraram baixa resistência mecânica em testes simples realizados com o martelo geológico e de risco por lâmina de aço. Essas rochas tiveram a pior resistência conforme o aumento da espessura do material de preenchimento, podendo ser milimétrica a centimétrica (até 10 cm em média), principalmente para W2. As características são apresentadas no quadro 6.

Quadro 6 Principais características das classes de alteração identificadas.

Grau de Alteração	W1	W2	W3	W4
Descrição Táctil-Visual	Rocha, em geral, possui uma granulometria muito fina, de cor prata e brilho intenso em amostras W1 reduzindo para fosco, em graus mais alterados (W4), aparência sedosa, com desprendimento de argila, areia fina e fragmentos centimétricos em níveis W4 por lascamento laminar, ao longo do plano natural de foliação da rocha. Exibe clivagens de crenulação (W1 e W2) em dois planos ortogonais uns ao outro. Apesar da gradação clara de mudança em aspectos da rocha, não é possível observar variações mineralógicas macroscopicamente. Os graus de alteração são distinguidos principalmente pela mudança da cor e variações físicas e mecânicas da rocha. No material de classe W2 são observados níveis milimétricos a centimétricos de mineralogia máfica com passagens silicosos e argilosos (W2 foliação).			
Coerência	Rocha coerente	Rocha coerente a pouco coerente	Rocha pouco coerente	Rocha muito pouco coerente
Cor	Cinza prateado	Cinza prateado com passagens amareladas	Cinza escuro com passagens avermelhadas e/ou rosadas	Cinza escuro com passagens variadas de cor e brilho fosco
Fraturamento	A rocha apresenta fraturas paralelas e ortogonais à foliação			
Abertura (cm)	0 a 0,2	0,2 a 0,5	0,5 a 0,8	0,8 a 2,0
Espaçamento (cm)	> 100	100 a 50	50 a 5	< 1
J_v (fraturas/m³)	1 a 3	1 a 3	3 a 10	3 a 10

Conforme observado no quadro 6 certas características apontadas no quadro 5 (ISRM, 2015) não são aplicáveis à classificação dos níveis de alteração dos filitos, como por exemplo, a descoloração da rocha, a resistência da rocha aos golpes do martelo geológico e o som emitido por esses golpes. Segundo a classificação preconizada pela ISRM, todos os níveis de alteração, inclusive o mais são, seriam classificados como W6. Os filitos não sofrem descoloração e sim mudança na cor conforme o avanço dos processos de alteração. Todos os níveis, incluindo os menos intemperizados, não emitem sons metálicos ao golpe do martelo e são riscados pela unha.

Devido às distintas particularidades existentes nessas rochas, denotando grande heterogeneidade, faz-se necessária a inclusão de características das discontinuidades e testes na matriz, como as apontadas no quadro 6.

As principais famílias de fraturas ocorrem paralelas e ortogonais à foliação, e podem condicionar a estabilidade dos taludes da região, através do tombamento ou rupturas planares de massas rochosas. Na figura 39 é apresentado o aspecto dos planos de foliação.

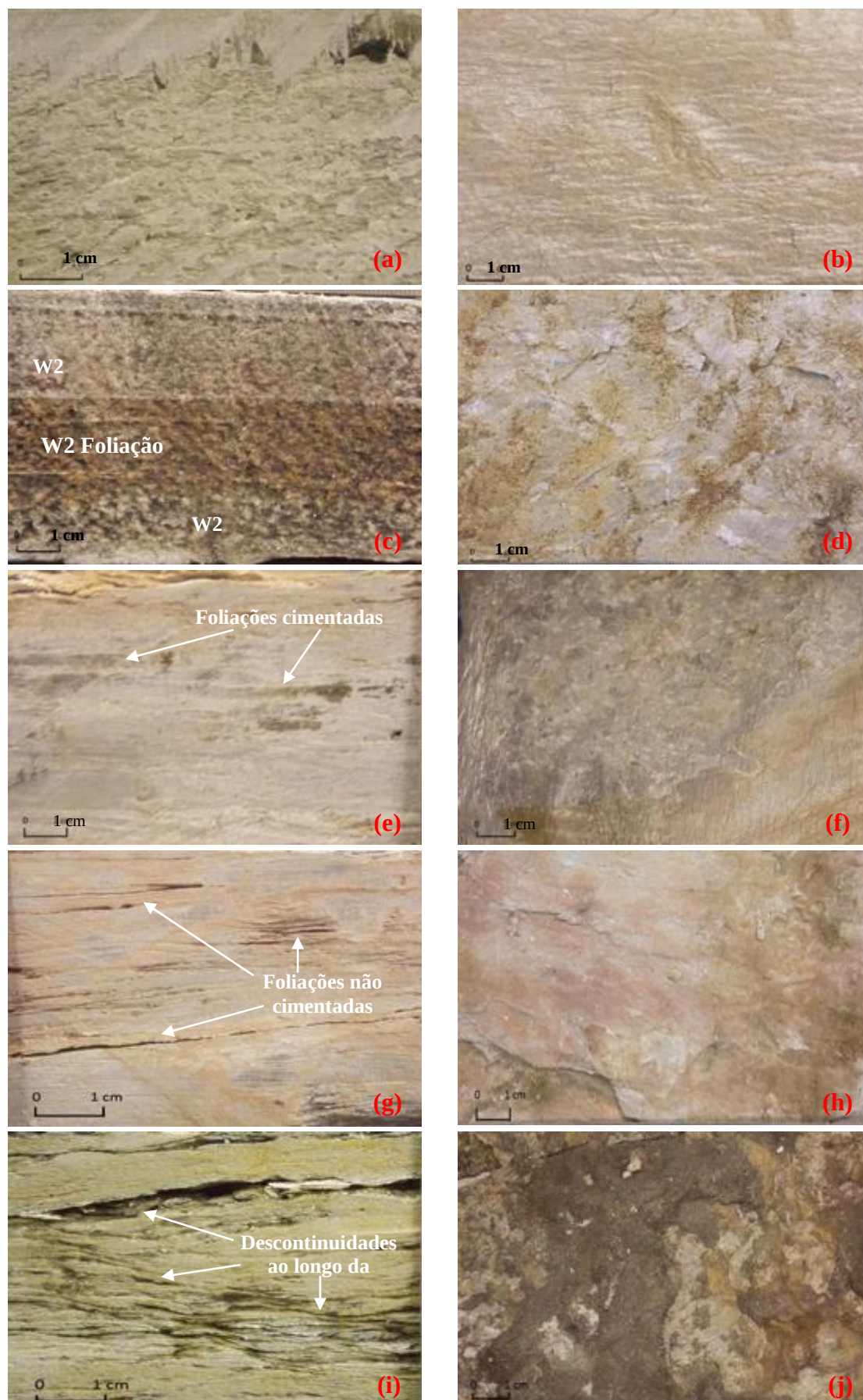


Figura 39 Planos de foliação observados no sentido ortogonal (à esquerda) e paralelo (à direita) dos graus de alteração W1 (a) e (b), W2 Foliação (c) e (d), W2 (e) e (f), W3 (g) e (h) e W4 (i) e (j), respectivamente.

Conforme observado na figura 39 existe grande evolução dos graus de alteração, nos planos ortogonais da foliação, com aumento do material de preenchimento. Nos planos paralelos à foliação existe um progressivo aumento da persistência e aberturas dos planos de descontinuidades. Cabe ressaltar que a propagação de fissuras tende a ocorrer em planos de foliação pouco ou sem preenchimento de materiais oxidados.

É possível observar que o nível W1 exhibe marcante clivagem de crenulação e cor cinza prateada, com praticamente nenhuma abertura de suas descontinuidades. A persistência das fraturas neste nível apenas pode ser evidenciada sob um aspecto macroscópico, em escala de campo já que, quando presentes, as descontinuidades ocorrem preferencialmente em planos paralelos à foliação, seccionando a rocha em placas.

Conforme o grau de alteração evolui há um aumento da abertura, marcante persistência e redução do espaçamento entre as descontinuidades, principalmente paralelas à foliação. Esse comportamento deve estar ligado ao alívio de pressão ocasionado pela redução da tensão confinante atuante sobre as rochas e pela posição da foliação pouco inclinada em relação ao terreno natural, fazendo com que o alívio se dê preferencialmente na direção ortogonal a esses planos estruturais. As descontinuidades que ocorrem ortogonais à foliação não mostram grande variação em termos de espaçamento, abertura e persistência, denotando origens distintas das famílias de fraturas ortogonais e paralelas, relacionadas a processos tectônicos, de alteração e de alívio de pressões. Esse fato pode ser explicado devido à facilidade das fraturas e fissuras se propagarem preferencialmente ao longo dos planos de foliação ao menor esforço mecânico, principalmente à tração, dificultando a amostragem.

A rocha no nível W2 tende a exibir níveis amarelados, W3 níveis rosados e W4 níveis amarelados a cinza fosco escuro com passagens esverdeadas. Cabe ressaltar que existe pequena distinção visual entre os níveis W2 e W3, basicamente pela mudança na cor da rocha, o que prejudica a classificação tátil-visual desses níveis e a análise de seu comportamento com base nos testes e ensaios executados in situ.

Em particular, o subnível W2 Foliação, que ocorre em alguns níveis de W2 e em menor quantidade em W3 e W4, pode apresentar aberturas de até 10 cm, preenchidas por mineralogia máfica e passagens arenosas e argilosas. A presença

deste nível diferenciado em meio ao contexto do perfil de alteração pode ser fruto do contato geológico entre as Formações Cauê e a Formação Batatal, marcado pela existência de níveis de hematita.

Nos graus de alteração W2, W3 e W4, são observadas cimentações por óxidos, que contribuem de maneira diversificada a testes distintos realizados na rocha (figura 39). O aumento de planos de foliação cimentados por óxidos cresce conforme a abertura, persistência e espaçamento das discontinuidades (quadro 6), variam para estes níveis, em função da alteração da rocha. Esses planos cimentados fornecem certa resistência à rocha em testes simples ao golpe do martelo e risco com lâmina de aço. Apesar de W4 possuir maiores concentrações de óxidos, a cimentação em seus planos de foliação não é suficiente para garantir a integridade do filito, tendo em vista que a matriz da rocha perde resistência com o avanço da alteração.

5.2 Análise Petrográfica

Com base na mineralogia encontrada a rocha foi classificada como um filito. A figura 40 e a tabela 1 mostram a mineralogia principal da rocha, excetuando os traços, e a contagem modal, de forma semiquantitativa, respectivamente. Raposo (1996) obteve resultados semelhantes, para filitos da Formação Batatal.

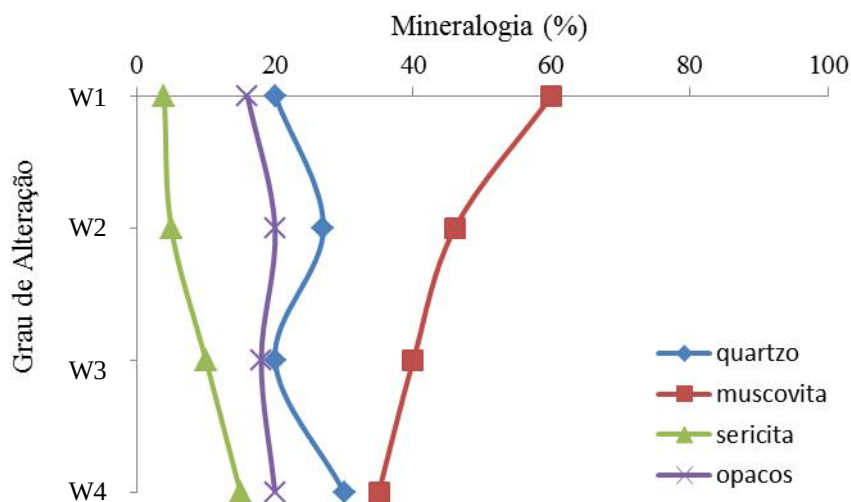


Figura 40 Contagem modal para os níveis de alteração W1 a W4.

Tabela 1 Contagem modal semiquantitativa para os graus de alteração

Grau de Alteração	Contagem Modal (%)					
	Muscovita	Quartzo	Opacos	Sericita	Cianita	Turmalina
W1	60	20	16	4	-	-
W2	46	27	20	5	2	-
W3	40	20	18	10	10	2
W4	35	30	20	15	-	-

Conforme observado na figura e tabela acima, há redução das quantidades de muscovita e aumento das quantidades de sericita conforme o grau de alteração avança. A distinção entre esses dois minerais, ocorre nas bordas alteradas da muscovita evidenciando que a sericita é um mineral secundário oriundo da muscovita. Há um aumento relativo de grãos de quartzo, mineral resistente ao intemperismo, nas classes mais alteradas, provavelmente pela redução da quantidade de muscovita com a evolução do intemperismo. O aumento da concentração de minerais opacos ocorre, apesar de sutil, conforme a rocha sofre alteração, o que provavelmente está associado aos níveis cimentados nas foliações.

As figuras 41 (a e b) a 44 (a e b) mostram as principais características observadas nas lâminas petrográficas, a partir de luz polarizada e nicóis cruzados, para os graus de alteração W1 a W4, respectivamente.

O nível W1 (figuras 41a e b) possui bandas de muscovita lepidoblásticas submilimétricas (cores de birrefringência elevadas), juntamente com cristais de quartzo granoblásticos milimétricos, em conjunto crenulado. A foliação S1 marcada pela muscovita é paralela ao S0, apresentando poucos traços de alteração. São presentes fraturas não preenchidas e alguns veios de quartzo paralelos à formação.

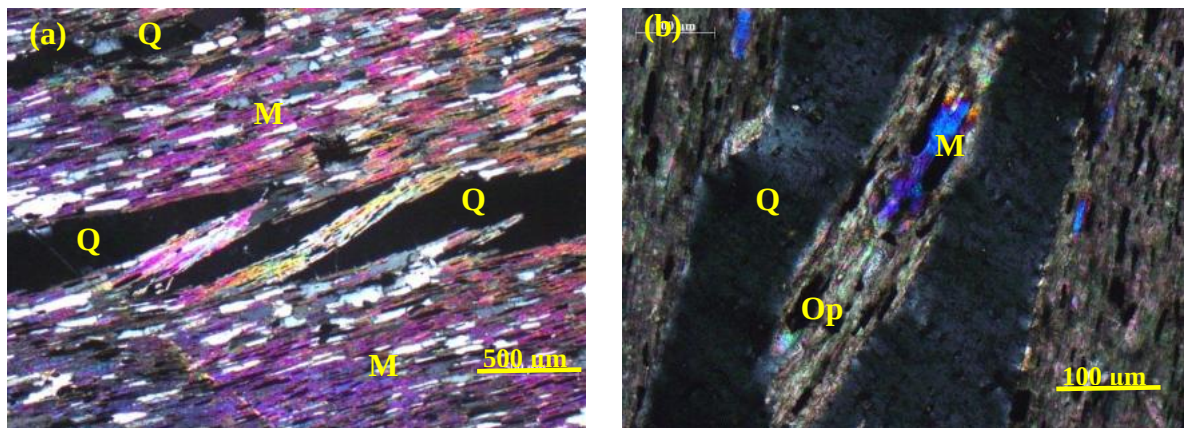


Figura 41 Principais características observadas em W1. Legenda: M – muscovita, Q – quartzo e Op - opacos.

O nível W2 (figuras 42a e b) possui bandas micáceas intercaladas com bandas quartzo-micáceas em conjunto crenulado, onde S1 e S0 ocorrem semelhante a W1, excetuando as bandas quartzo-micáceas que não são orientadas com S1. A foliação S2 é marcada pelo preenchimento de minerais opacos, cujos produtos de alteração migraram e se depositaram nas bordas dos quartzos. Ocorre alteração da muscovita para sericita. Ao contrário de W1 não foram observados veios de quartzo, apenas pontualmente na rocha com cianita associada. As fraturas, quando existentes, correspondem aos planos de foliação abertos.

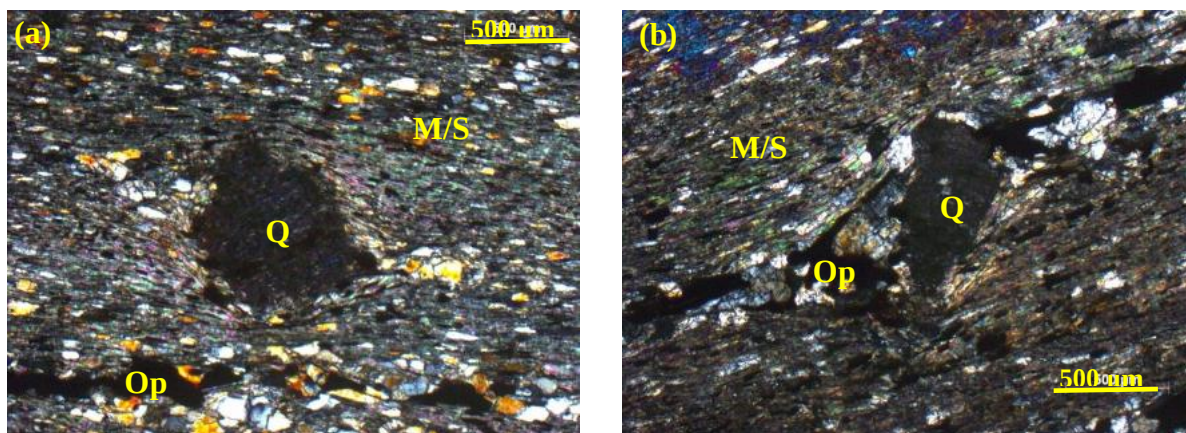


Figura 42 Principais características observadas em W2. Legenda: M/S – alteração de muscovita para sericita, Q – quartzo e Op - opacos.

A alteração dos minerais opacos, observados no nível W3 (figuras 43a e b), tende a fornecer à rocha uma coloração avermelhada na lâmina. Esses minerais ocorrem dispersos ou intercalados nas foliações e, grande parte das muscovitas continua se alterando para sericita. São observados cristais de turmalina inalterados seguindo a foliação S1, onde as fraturas existentes acompanham a foliação, não sendo preenchidas e quase que restritas à matriz da rocha. Em filitos do Supergrupo Rio das Velhas, esses minerais são representados por pirita, pirrotita, arsenopirita, calcopirita, além de grãos de hematita encontrados em zonas de alteração das micas (PALACIO, 2003). Já em filitos da Formação Cauê esses minerais podem ser goethita e hematita (NERI, 2012).

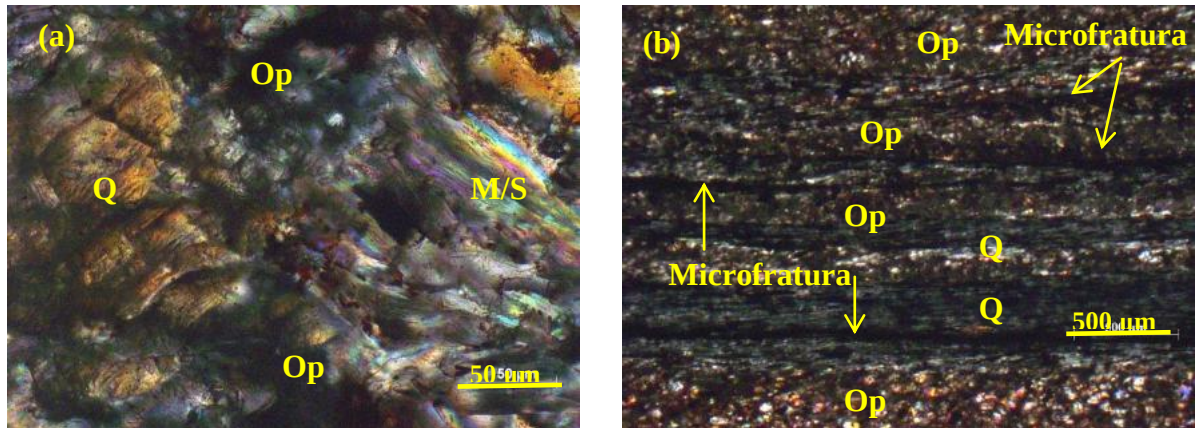


Figura 43 Principais características observadas em W3. Legenda: M/S – alteração de muscovita para sericita, Q – quartzo e Op - opacos.

O nível mais alterado W4 (figura 44a e b), possui em menor quantidade grãos de quartzo estirados seguindo a foliação S1. A muscovita apresenta porções mais alteradas para sericita nas bordas (redução da cor de birrefringência). Minerais opacos tendem a progressiva alteração, resultando em óxidos dispersos pela lâmina. Da mesma forma, que os níveis anteriores às fraturas existentes tendem a ocorrer ao longo da foliação, todavia sem preenchimento. Esta característica pode ser explicada devido as grandes aberturas nesse nível, permitindo a lixiviação dos materiais de preenchimento.

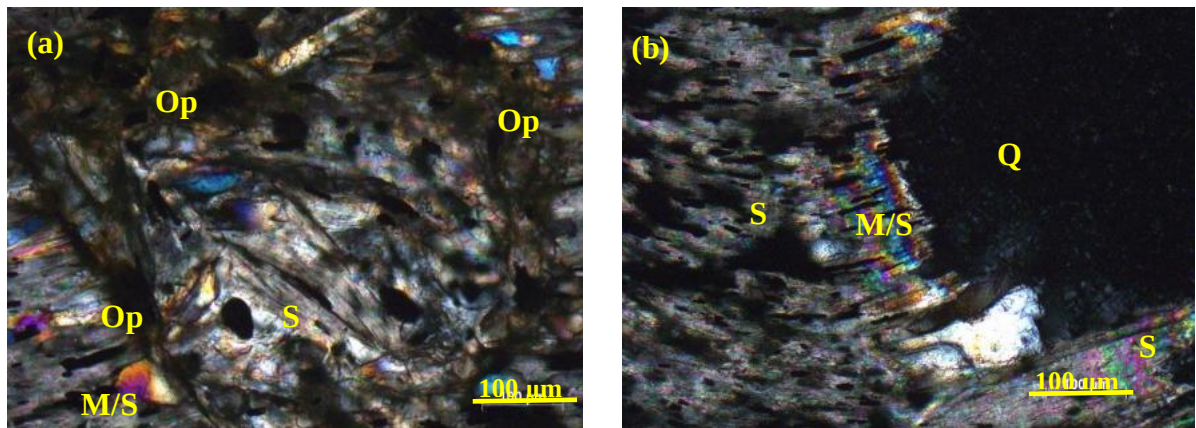


Figura 44 Principais características observadas em W4. Legenda: M/S – alteração de muscovita para sericita, S – sericita, Q – quartzo e Op - opacos.

A petrografia da rocha corroborou características macroscópicas importantes, como a alteração da muscovita e minerais máficos, refletindo na mudança da cor da rocha, marcando a evolução intempérica da mesma. São evidenciadas também microfraturas desenvolvidas na matriz da rocha, estando intercaladas a níveis

quartzosos e máficos, minerais que devem compor a cimentação existente nos planos de foliação.

5.3 Fluorescência de raios – X (FRX)

Os resultados obtidos por FRX para elementos maiores e menores são apresentados na tabela 2, respectivamente em porcentagem (%) e partes por milhão (ppm). Nas figuras 45 e 46 são apresentados gráficos para ilustrar as variações dos elementos maiores.

Tabela 2 Elementos maiores (%) e menores (ppm) para os graus de alteração W1 a W4.

Amostra (%)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	Na ₂ O	CaO	TiO ₂
W1	51,89	21,88	13,75	6,81	1,67	1,83	0,64	1,14
W2	49,80	28,39	9,73	7,36	1,64	1,36	0,73	0,68
W3	50,69	26,17	11,59	7,08	1,27	1,38	0,73	0,78
W4	55,50	25,23	7,62	6,35	1,50	1,87	0,71	0,85
Amostra (ppm)	Cr ₂ O ₃	MnO	Sb ₂ O ₃	SrO	ThO ₂	U ₃ O ₈	As ₂ O ₃	ZrO ₂
W1	697,93	282,06	45,61	232,76	86,17	163,05	114,77	0,01
W2	78,56	177,30	128,16	172,29	121,51	145,35	97,32	0,01
W3	148,37	151,44	85,63	194,09	45,60	125,32	110,35	0,01
W4	411,87	142,24	150,29	235,97	110,31	204,24	128,98	0,01

As concentrações obtidas são compatíveis com xistos ferruginosos da Sequência Metassedimentar Bom Sucesso, correlacionada com o Grupo Caraça (SPIER et al., 2017), porém este último ainda apresenta teores superiores de Fe₂O₃ (20,44 – 30,43%), CaO (8,18% - 12,17%) e MgO (2,95% - 9,3%), em relação os filitos da Formação Batatal (NERI, 2012). Os valores elevados de SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃ e K₂O, em relação às demais concentrações, correspondem a mineralogia identificada na rocha, ou seja, muscovita e sericita (KAl₂Si₃AlO₁₀(OH,F)₂), quartzo (SiO₂) e óxidos.

Com base na figura 45 é possível notar que o comportamento geoquímico de Al₂O₃ apresenta tendência inversa a de SiO₂, ao longo do perfil, sem variações significativas. W1 e W3 apresentam praticamente os mesmos valores e em W4 há uma redução de 1% e aumento de 5% dos valores, respectivamente. Esse tipo de comportamento representa a composição inicial do material estudado, que baseado na petrografia, mostra ser constituído por quartzo, muscovita e sericita, caracterizando a rocha como alumino-silicática. O quartzo é altamente resistente ao

intemperismo químico e a muscovita apesar de menos em relação ao quartzo, também apresenta resistência. O sutil aumento em W4 da concentração de SiO_2 , provavelmente é resultado da formação de argilomineral.

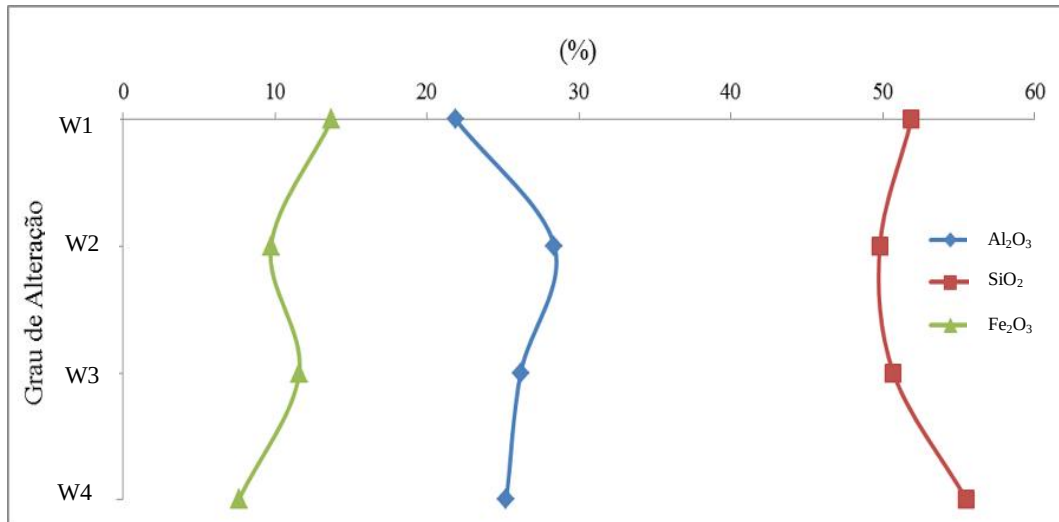


Figura 45 Elementos maiores (Al_2O_3 , SiO_2 e Fe_2O_3) em porcentagem para W1 a W4.

A concentração de Fe_2O_3 exibe variação ao longo da frente de intemperismo, provavelmente em função da presença das fraturas e microfraturas, sendo removido de determinados níveis como Fe^{+2} e precipitando nas zonas mais oxigenadas sob a forma Fe^{+3} .

Nota-se na figura 46, que a concentração de K_2O apresenta um comportamento homogêneo juntamente com o Na_2O . Já as concentrações de CaO , MgO e Ti_2O , mostram pequena variação com o aumento do intemperismo. Essa característica provém da composição da rocha. A concentração de K_2O destaca-se frente às outras, tendo em vista que o K está presente na composição química da muscovita e sericita, havendo maior proporção em relação aos elementos alcalino-terrosos. Esse comportamento contrasta com processos de alteração superficial em filitos hematíticos da região, onde há redução dos teores de SiO_2 , MgO , CaO e Na_2O e enriquecimento de K_2O (KNAUER e SCHRANK, 1994).

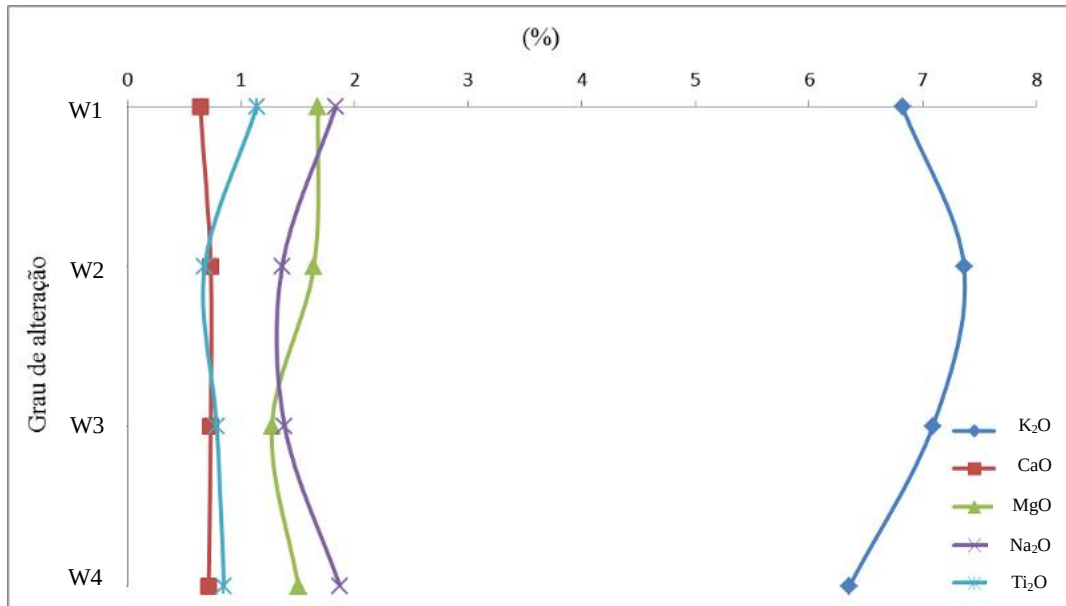


Figura 46 Elementos maiores (K₂O, CaO, MgO, Na₂O e TiO₂) em porcentagem para W1 a W4.

Do ponto de vista geoquímico, a evolução intempérica analisada não mostrou grandes contribuições, além de comprovar compatibilidade com a mineralogia identificada por petrografia. Justifica-se essa observação por dois fatos predominantes. O primeiro deles refere-se à alteração química ser incipiente (frente de alteração). Em segundo a própria constituição mineralógica do material estudado, composta por quartzo, muscovita e seu produto de alteração, a sericita. É complexo analisar apenas com base na química total (figuras 45 e 46), deduzir com base em uma análise química total, a variação das concentrações químicas do filito em função do avanço do intemperismo.

5.4 Índices de Alteração

Com base nos resultados da análise química total por FRX, são apresentados os índices químicos, conforme listados anteriormente nos quadros 1 a 4.

As figuras 47 e 48 exibem os índices que relacionam elementos químicos imóveis constantes (Al₂O₃ e TiO₂), elementos químicos que reduzem a sua concentração pela evolução dos processos intempéricos e aumento da lixiviação (SiO₂, Na₂O, K₂O, CaO e MgO).

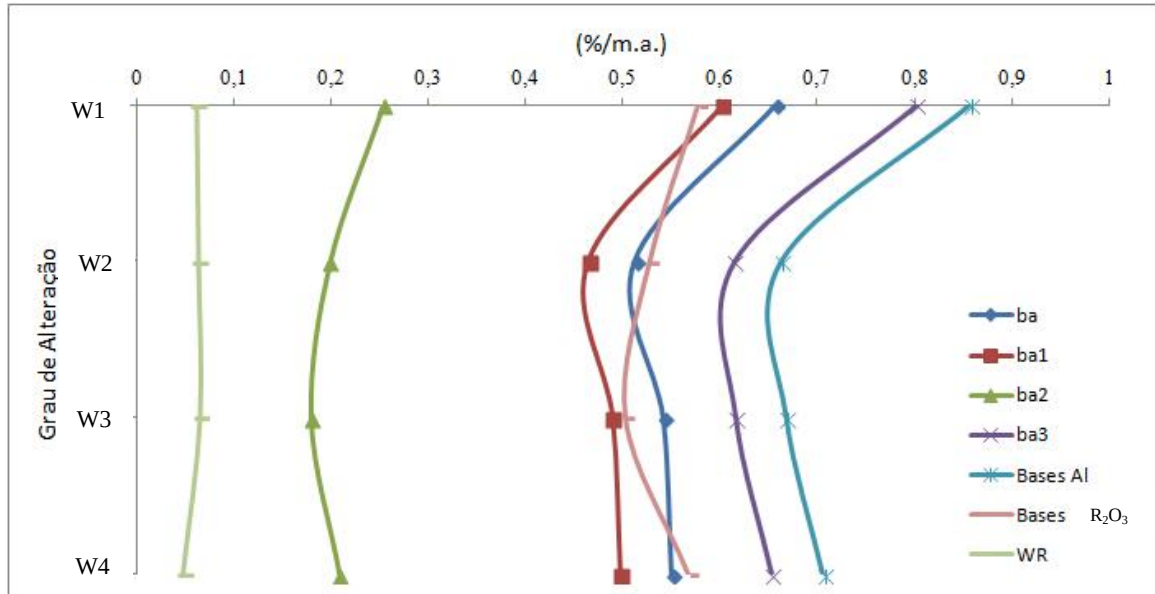


Figura 47 Índice químico relação mobilizável/imobilizável (ba, ba1, ba2 e ba3 – HARRASSOWITZ, 1926; Bases R₂O₃ e Al – COLMAN, 1982 e WR – CHITTLEBOROUGH, 1991).

Os índices ba, ba1, ba2 e ba3, mostraram redução dos valores conforme houve evolução do intemperismo. Os índices Bases Al e Bases R₂O₃ expuseram comportamentos levemente diferenciados entre si, já que a concentração de MgO segue quase constante ao longo dos graus de alteração. Alguns elementos imobilizáveis como o Fe₂O₃ e TiO₂ as concentrações variam opostamente à concentração de Al₂O₃ em W1 a W4. Em perfis de alteração de biotita-gnaisses-granitóides esse índice tende a decrescer com o intemperismo, havendo perda de bases e ganho de água (OHARA et al, 2003). Já o índice WR apresentou coerência ao longo do intemperismo, já que relaciona elementos muito móveis (CaO, MgO e Na₂O) com elementos pouco móveis (ZrO₂), sendo o índice quase constante entre W1 e W3 e decrescendo em W4.

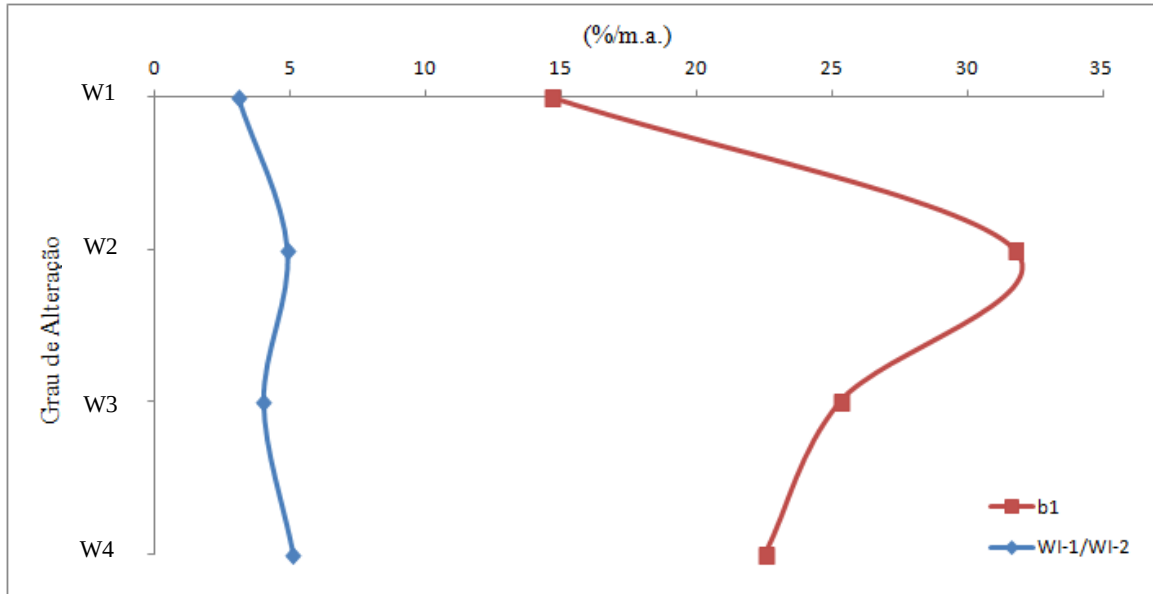


Figura 48 Índice químico relação mobilizável/imobilizável (b1 – ROCHA FILHO et al, 1985; WI-1/WI-2 – DARMODY et al, 2005).

Conforme a figura 48, o índice b1 mostrou aumento brusco em W2 devido ao enriquecimento de Al_2O_3 e redução de TiO_2 neste grau, possivelmente associado a outro processo secundário, como também da alteração química. Já o índice WI-1/WI-2, não expressou o comportamento do perfil de alteração, com valores próximos entre os graus W1 e W3 e entre W2 e W4.

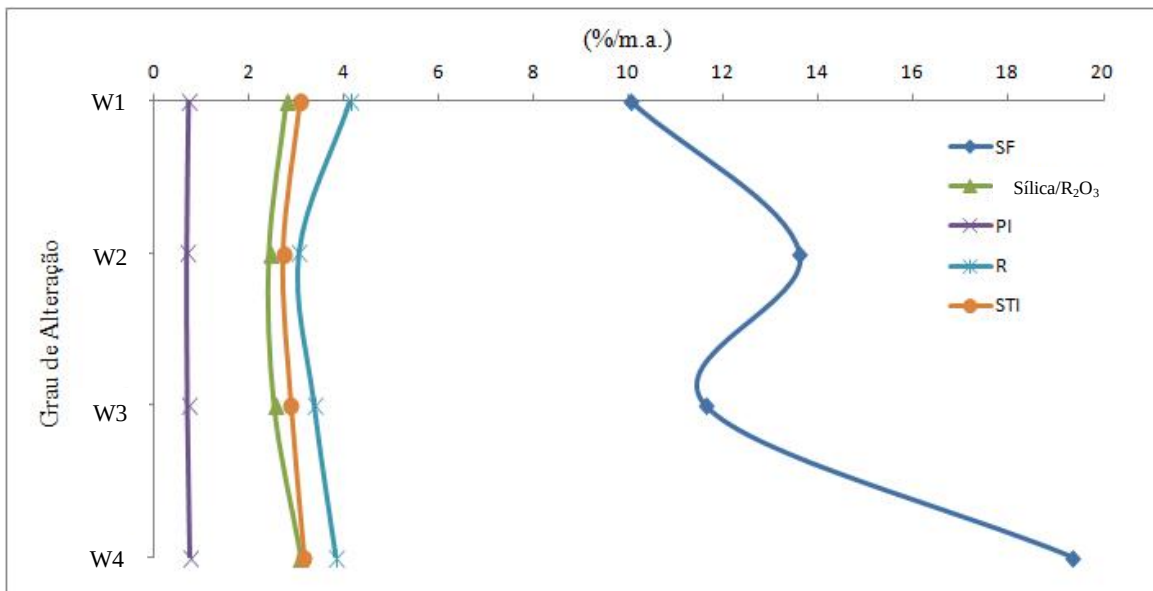


Figura 49 Conteúdos de sílica (SF e Sílica/R₂O₃ – JENNY, 1941; PI – REICHE, 1943; R – RUXTON, 1986; STI – JAYAWARDENA E IAZAMA, 1994).

Em termos de conteúdo de sílica (figura 49), os índices mostraram variação pouco expressiva, exceto o índice SF, que destoou quando comparado W1 e W4. A

sutil e progressiva tendência dos outros índices (Sílica/ R_2O_3 , PI, R e STI) mostraram a não alteração do quartzo nesta evolução intempérica, podendo-se afirmar que houve concentração de SiO_2 em W4, refletindo a formação dos argilominerais. O próprio índice R, bastante recomendado para avaliação a perda de sílica com alumina, em rochas ígneas e metamórficas, pelo avanço do intemperismo, foi pouco expressivo para os filitos estudados.

Na figura 50 são apresentados índices que avaliam a alteração química das rochas, em especial para a alteração de feldspatos em argilominerais nas rochas (CIA, CIW, ALKRatio e PIA). Cabe ressaltar que o índice CWI exclui K_2O da sua fórmula, não sendo recomendado sua aplicação em rochas e solos que possuam K-feldspato, ou minerais derivados.

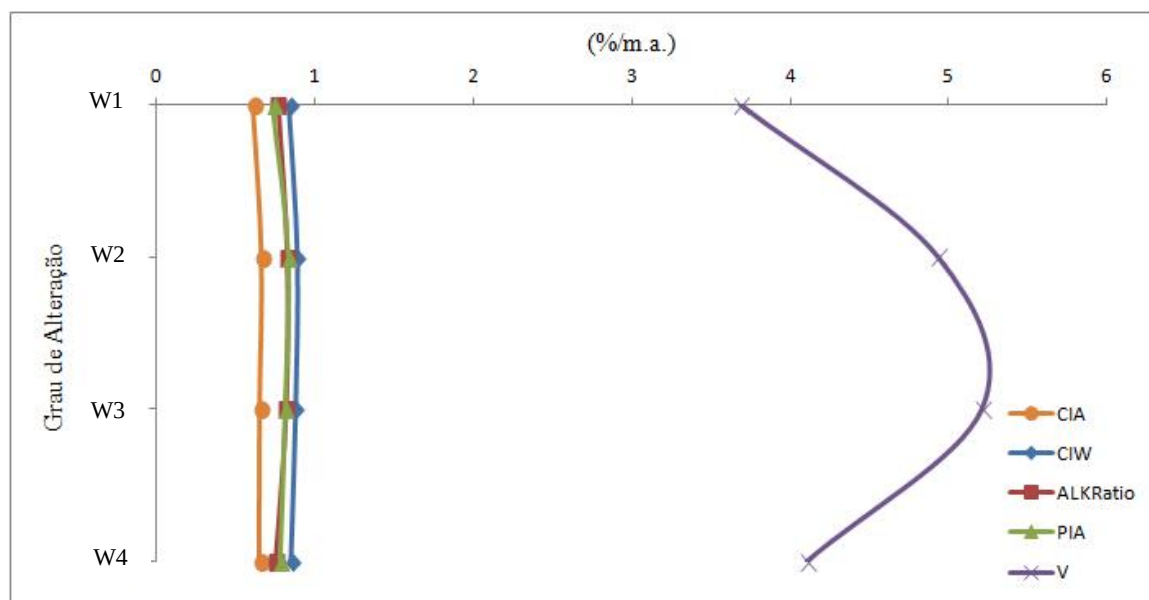


Figura 50 Índices baseados na alteração química (CIA – NESBITT e YOUNG, 1982; CIW – HARNOIS, 1988; ALKRatio – HARNOIS e MOORE, 1988; PIA – FEDO et al, 1995; V – VOGT, 1972).

Os índices CIA, CIW, AlkRatio e PIA apresentaram o comportamento esperado, já que na caracterização petrográfica não foram identificados feldspatos. Entretanto, como esses índices consideram elementos como o Al, K e Si, presente na fórmula química da mineralogia principal da rocha (muscovita, sericita e quartzo), observa-se uma discreta tendência, oriunda dos processos de alteração nesses minerais. O índice CIA, mostrou valores em torno de 66% (%/m.a) com variações sutis. Em folhelhos este índice varia em torno de 70% e 75% (NESBITT e YOUNG, 1982), para filitos em torno de 75% (LE PERA e SORRISO-VALVO, 2000), podendo chegar a valores entre 85% e 100% se a atuação do intemperismo for intensa o suficiente para a produção de argilominerais ricos em argila, como caulinita. O índice V variou

mais expressivamente conforme a evolução intempérica. Este índice considera o acúmulo das concentrações de Al_2O_3 e K_2O , havendo um aumento brusco para os graus W2 e W3, mais ricos nessas concentrações em relação a W1 e W4.

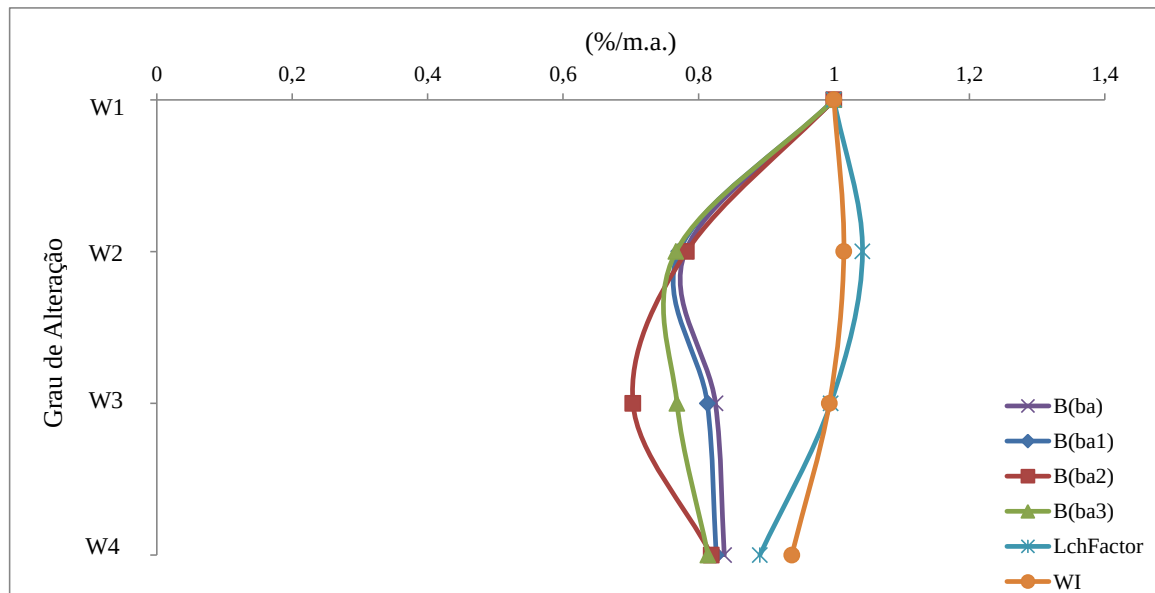


Figura 51 Índices normalizados (B – HARRASSOWITZ, 1926; LchFactor – JENNY, 1941; WI – SHORT, 1961).

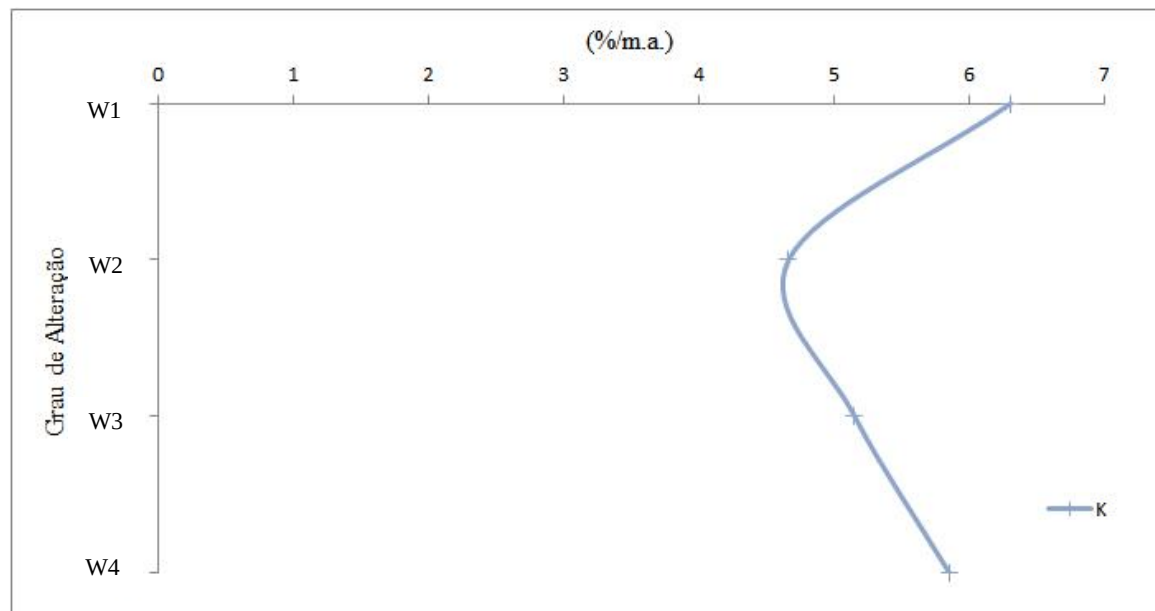


Figura 52 Índices normalizados (K – ROCHA FILHO et al., 1985).

As figuras 51 e 52 apresentam os índices normalizados B (a partir dos índices ba, ba1, ba2 e ba3) e K, mostraram redução conforme o avanço do intemperismo. Já os índices LchFactor e WI, opostamente em relação aos índices anteriores, aumentaram com a evolução do intemperismo. Na passagem da evolução

intempérica tanto para W2 quanto para W3, há uma maior redução de Al_2O_3 e concentração de SiO_2 . Esse comportamento prossegue até W4. A variação entre essas concentrações indica a alteração da rocha, conforme observado por petrografia, havendo progressiva redução da quantidade de mica e enriquecimento de quartzo.

Com base nas análises pelos índices químicos a comparação entre os níveis W1 e W4 é evidenciado um padrão que acompanha o intemperismo. Entretanto, os níveis W2 e W3 mostram um comportamento não linear, ou seja, dependendo do índice analisado, refletem uma indefinição do ponto de vista químico e pouco conclusiva para esses dois graus de alteração.

5.5 Difração de raios – X (DRX)

Os resultados por DRX do pó da rocha para cada um dos quatros estágios de alteração são apresentados na figura 53.

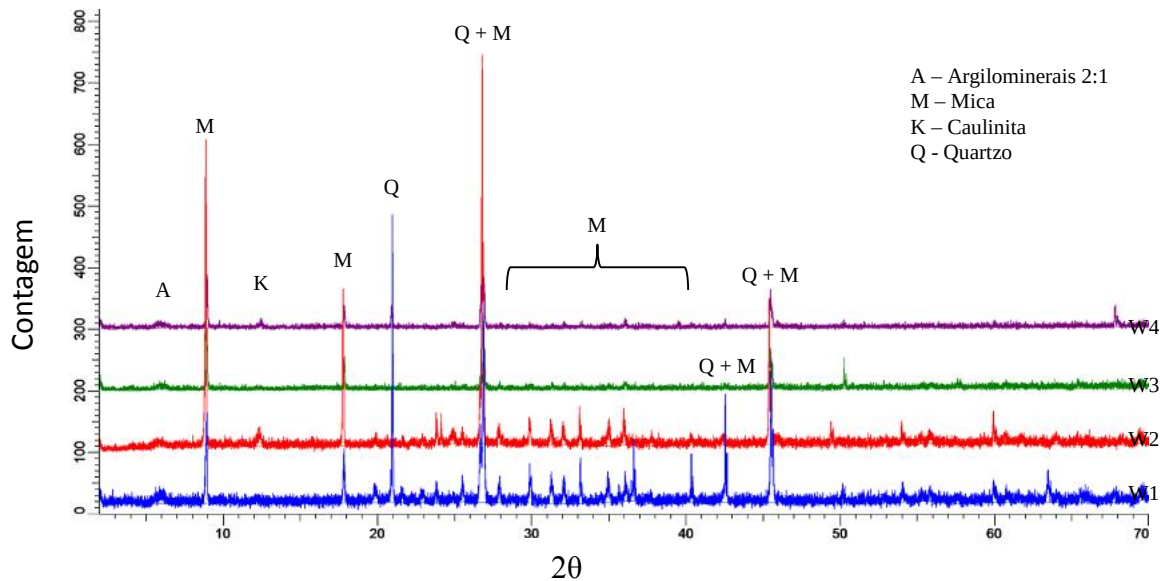


Figura 53 DRX executado pelo método do pó para os níveis de alteração.

Conforme observado na figura 53 são identificadas significativas quantidades de material micáceo e quartzo. Argilominerais foram observados em todos os níveis, assim como a muscovita. Cabe ressaltar que a sericita apresenta sinais semelhantes, o que marcaria a alteração mineral, apesar de não ser possível distinguir a proporção entre esses dois minerais. Em filitos do Supergrupo Rio das Velhas, a presença de sericita e clorita, definem nessas rochas a maior ou menor proporção de minerais expansivos, no caso ilitas e esmectitas (PALACIO, 2003).

A caulinita ocorre em picos de 12,2° sendo mais evidente nos níveis de alteração W2 e W4, indicando que os processos intempéricos são mais atuantes nesses níveis. Argilominerais 2:1 aparecem em picos discretos em torno de 6° desde o nível W1 até W4, em pequenas proporções.

As análises executadas na fração argila (figura 54) indicaram que a caulinita permanece na amostra, após o processo de glicolagem, porém sua estrutura é destruída quando aquecida a 500 °C. Os grãos minerais de ilita e/ou muscovita e quartzo permanecem inalterados após os três tratamentos. São evidenciados, além desses três minerais, pequenas quantidades de feldspatos, não identificados por petrografia, devido à textura fina da rocha.

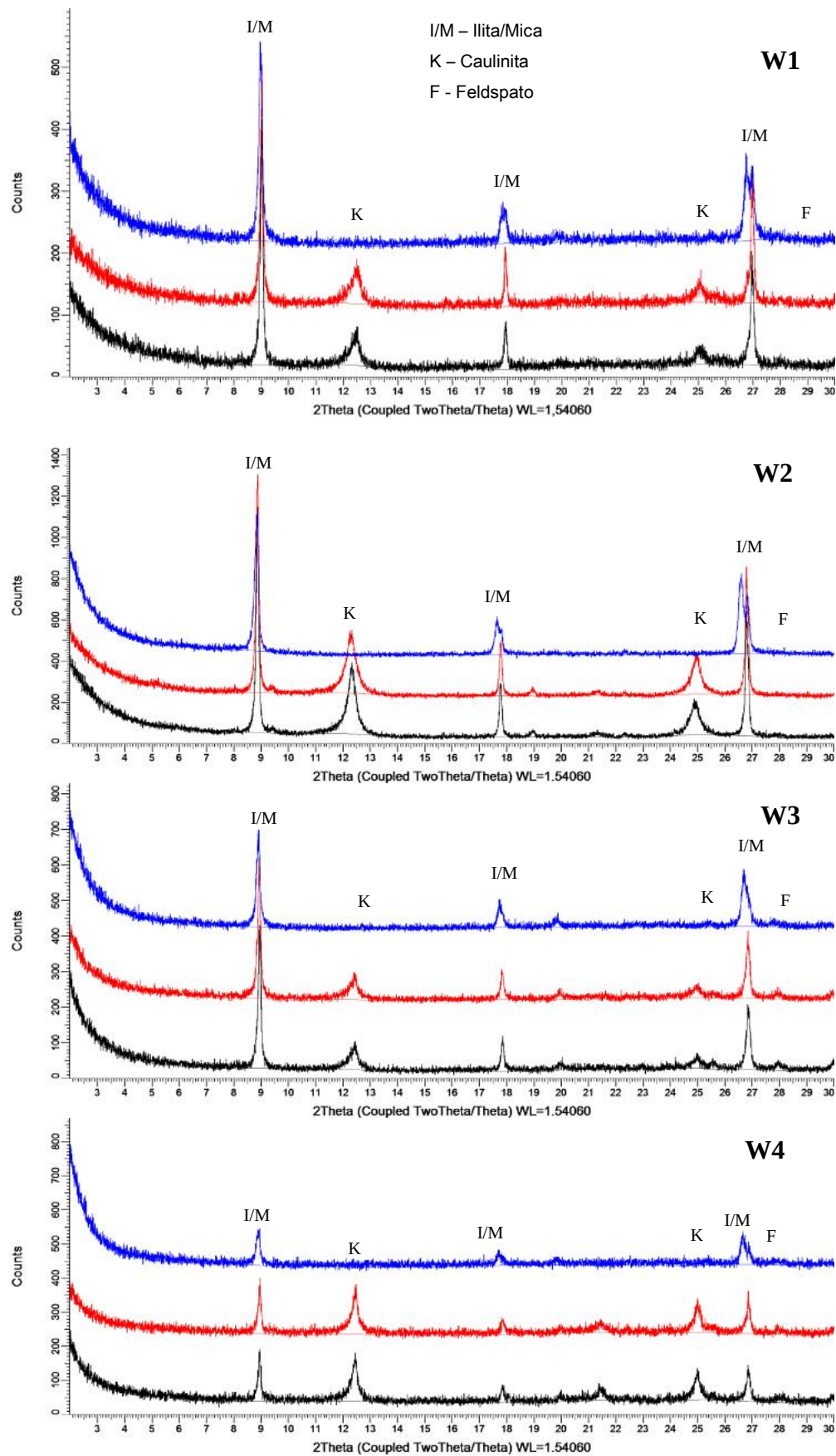


Figura 54 DRX da fração argila dos graus de alteração (Legenda: preto - amostra natural; vermelho - amostra glicolada e azul – amostra aquecida).

A tabela 3 e figura 55 apresentam as análises semiquantitativas da fração argila, utilizando a metodologia de quantificação por área de pico.

Tabela 3 Análise semiquantitativa para a fração argila

Amostra	Mineralogia/Semiquantitativa (%)	
	Muscovita	Caulinita
W1	75	25
W2	70	30
W3	51	49
W4	32	68

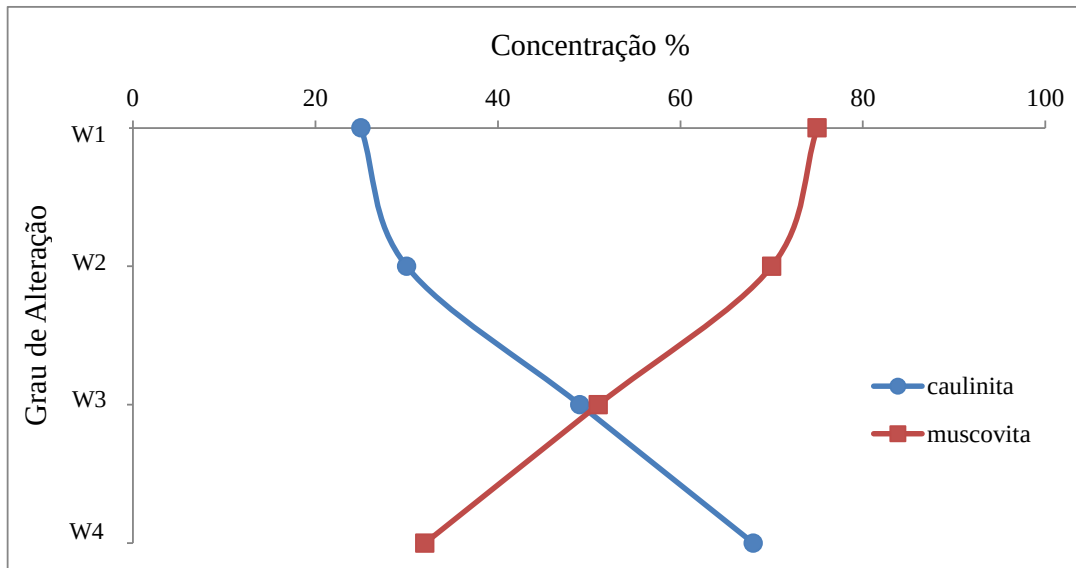


Figura 55 Semiquantificação da fração argila realizada por área de pico

Com base na tabela 3 nota-se ação intemperica com redução da muscovita e aumento da caulinita devido a evolução da alteração. Assim, é possível afirmar que a caulinita é um argilomineral secundário que aumenta sua concentração na direção dos níveis mais intemperizados.

São apresentados na figura 56 a fração silte analisada por DRX, apenas na condição natural.

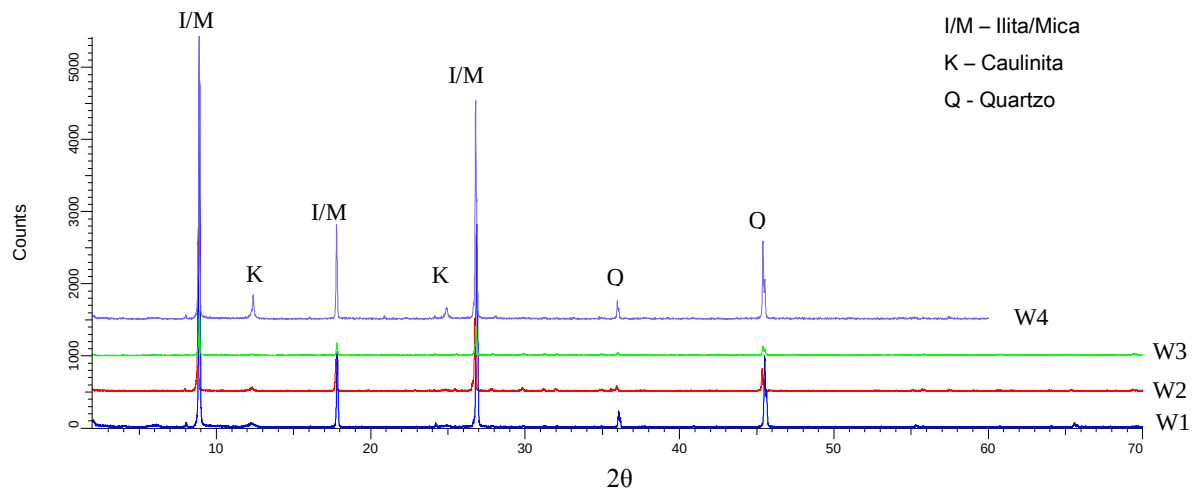


Figura 56 DRX da fração silte dos graus de alteração estudados.

Os resultados demonstram gradação de níveis de alteração, onde W1 e W2 são menos intemperizados e W3 e W4 sofreram maior ação da meteorização, sendo evidenciado pelo aumento da quantidade de caulinita (K) no nível W4.

A tabela 4 e figura 57 apresentam as análises semiquantitativas da fração silte, para os níveis de alteração, utilizando a metodologia de quantificação por área de pico.

Tabela 4 Análise semiquantitativa para a fração silte.

Amostra	Mineralogia/Semiquantitativa (%)		
	Argilominerais 2:1	Muscovita	Caulinita
W1	1	97	2
W2	0	96	4
W3	4	90	6
W4	0	89	11

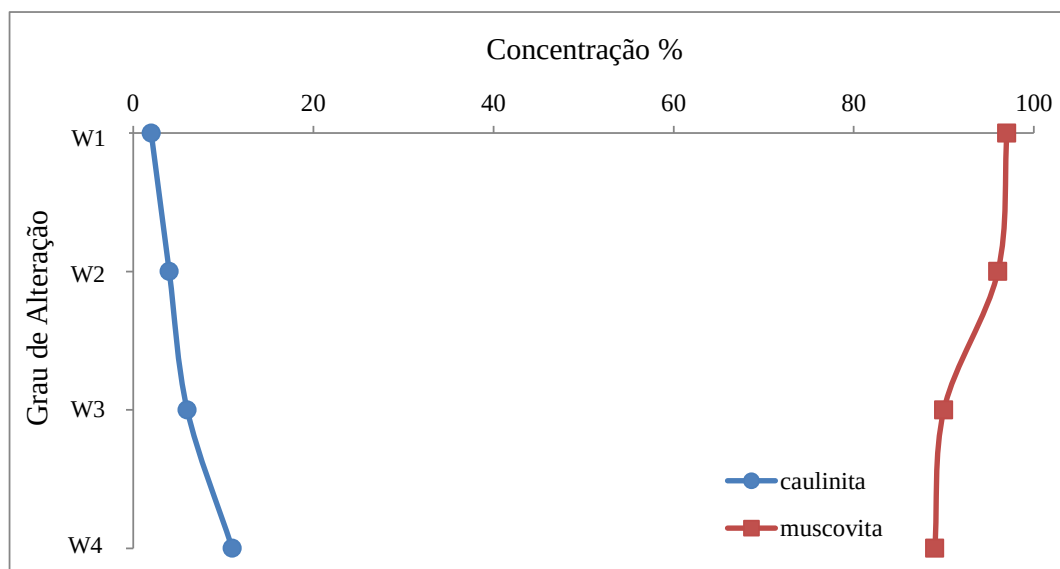


Figura 57 Semiquantificação da fração silte realizada por área de pico

Com base na análise da fração silte, nota-se que os resultados seguiram o mesmo padrão observado nas análises semiquantitativas da fração argila, ou seja, a concentração de muscovita decresce e a de caulinita aumenta, no sentido de W1 – W4, seguindo a ordem intempérica da fração argila. Cabe ressaltar que nesta fração, para os níveis W1 e W3, foram observadas reduzidas quantidades de argilominerais 2:1.

Em filitos argilosos de semelhante composição mineralógica e interestratificados mostraram que a presença de argilas ativas (ilita-esmectita ou ilita clorita), proporcionaram perda da resistência mecânica, após processos de expansão com água (GARZÓN et al, 2010). Em testes com água em amostras de mão, foi observado deslocamento dos planos de foliação, sem muita desagregabilidade das amostras.

5.6 Índices Físicos

Os índices-físicos obtidos (figuras 58 a 61) são apresentados em termos da porosidade, absorção de água, massa específica seca e saturada (baseada no teor de umidade medido), para os níveis de alteração W1 a W4. Nas figuras os valores destacados representam as médias, enquanto as alturas dos símbolos sinalizam a dispersão dos dados. Os resultados são apresentados nas tabelas 5 a 8.

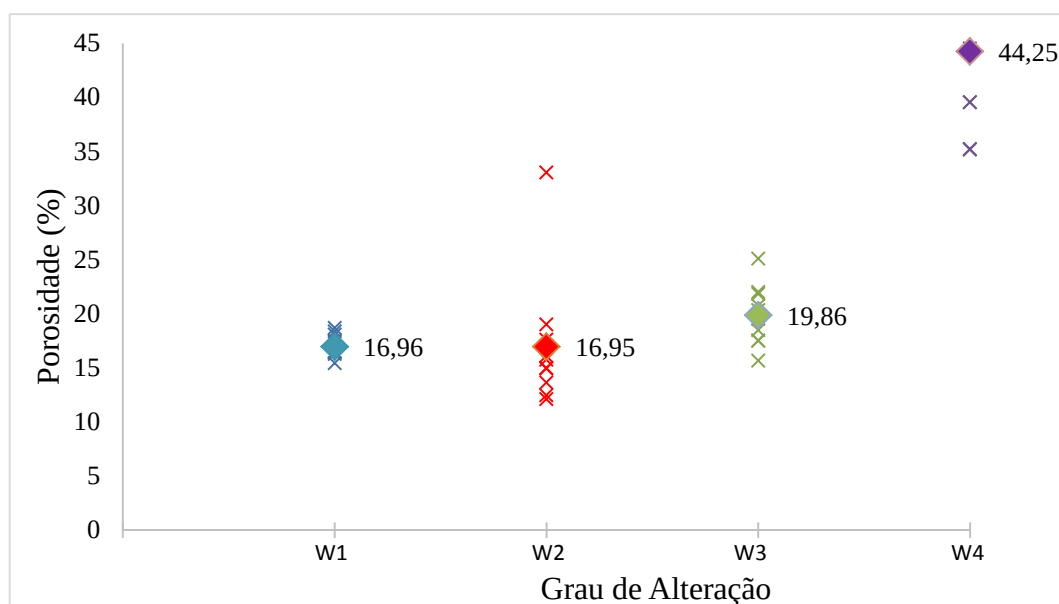


Figura 58 Valores de porosidade (%) para os graus de alteração. Em destaque o valor correspondente a média das medidas.

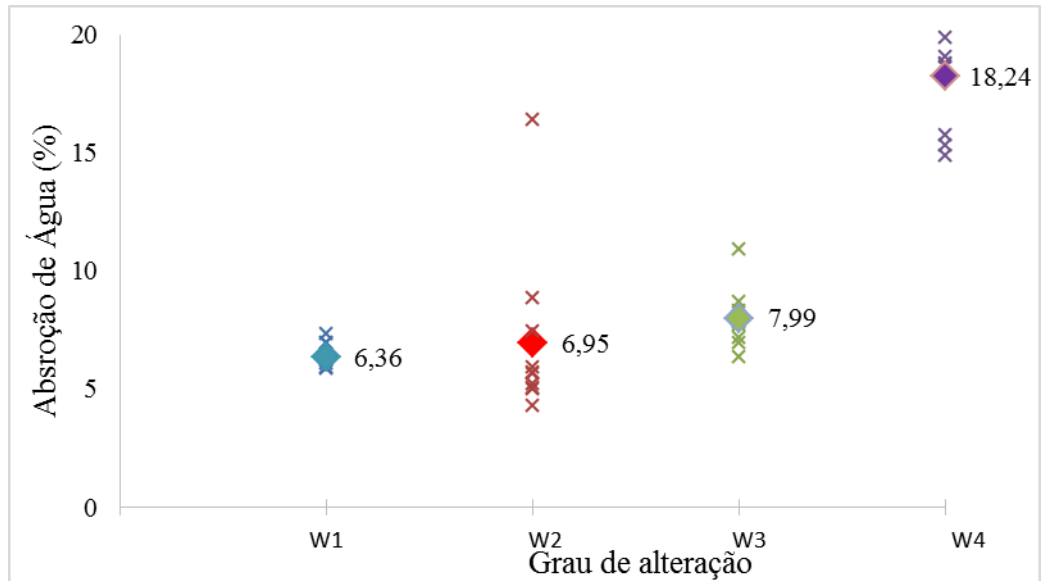


Figura 59 Valores da capacidade de absorção de água (%) para os graus de alteração. Em destaque o valor correspondente a média das medidas.

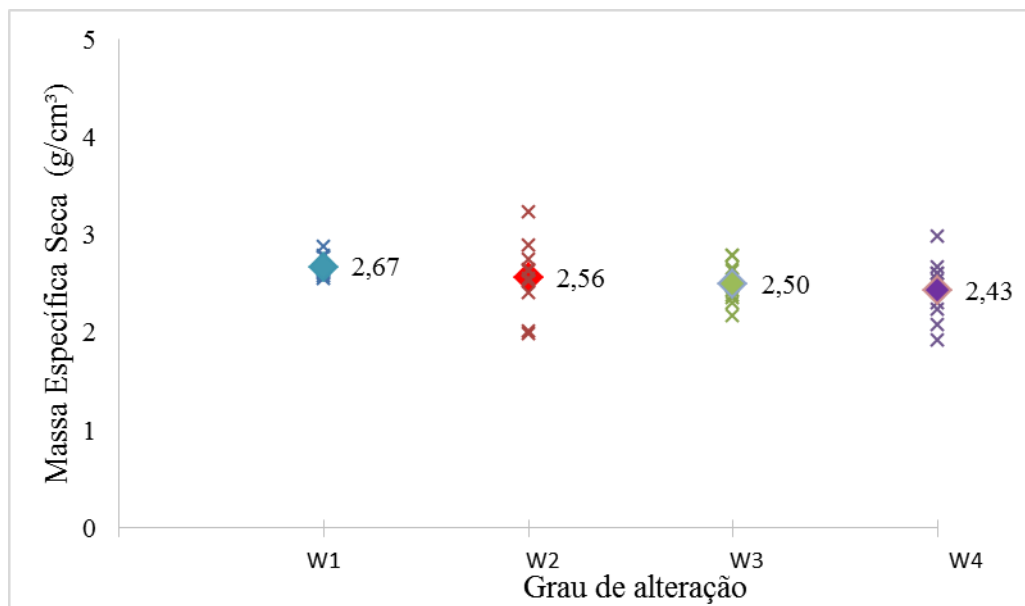


Figura 60 Valores de massa específica seca (g/cm^3) para os graus de alteração. Em destaque o valor correspondente a média das medidas.

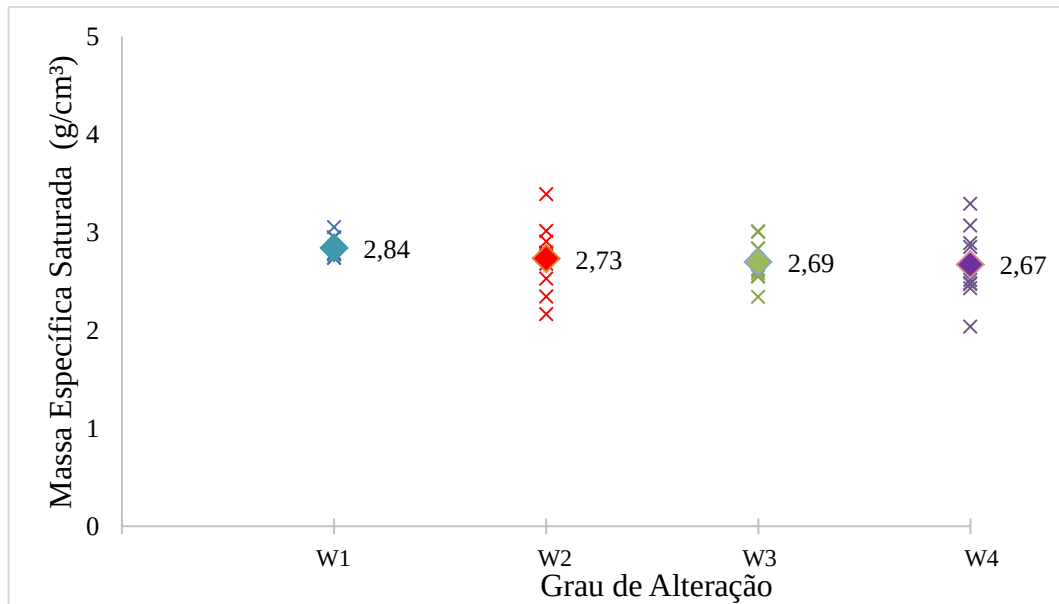


Figura 61 Valores de massa específica saturada (g/cm^3) para os graus de alteração. Em destaque o valor correspondente a média das medidas.

Tabela 5 Valores de porosidade (%) encontrados para os graus de alteração

Grau de Alteração	Valor Mínimo	Valor Máximo	Média (10 medições)	Desvio Padrão (%)	Coefficiente de Variação (%)
W1	15,00	18,70	16,96	1,24	7,34
W2	12,10	33,10	16,95	6,05	35,68
W3	15,60	25,10	19,86	2,74	13,81
W4	35,16	55,07	44,25	6,70	15,14

Tabela 6 Valores de capacidade de absorção de água (%) para os graus de alteração.

Grau de Alteração	Valor Mínimo	Valor Máximo	Média (10 medições)	Desvio Padrão (%)	Coefficiente de Variação (%)
W1	5,64	7,33	6,36	0,54	8,57
W2	4,31	16,42	6,95	3,58	51,48
W3	6,34	10,89	7,99	1,23	15,35
W4	14,89	20,67	18,23	1,23	6,73

Tabela 7 Valores de massa específica seca (g/cm^3) para os graus de alteração.

Grau de Alteração	Valor Mínimo	Valor Máximo	Média (10 medições)	Desvio Padrão (g/cm^3)	Coefficiente de Variação (%)
W1	2,55	2,88	2,67	0,10	3,90
W2	1,99	3,23	2,56	0,37	14,54
W3	2,17	2,79	2,50	0,21	8,39
W4	1,91	2,98	2,43	0,31	12,90

Tabela 8 Valores de massa específica saturada (g/cm^3) para os graus de alteração.

Grau de Alteração	Valor Mínimo	Valor Máximo	Média (10 medições)	Desvio Padrão (g/cm^3)	Coefficiente de Variação (%)
W1	2,74	3,05	2,84	0,10	3,68
W2	2,16	3,39	2,73	0,34	12,57
W3	2,34	3,01	2,69	0,22	8,03
W4	2,04	3,29	2,67	0,36	13,56

A porosidade tende a aumentar juntamente com a absorção conforme há a evolução do grau de alteração da rocha. Apesar de rochas metamórficas, no geral, possuírem baixa porosidade, a ação do intemperismo permite que este parâmetro seja influenciado pelo desenvolvimento de microfissuras, no contorno dos grãos e nas juntas, característica esta na formação de descontinuidades ao longo das foliações. Cabe ressaltar que o nível W2 apresenta mineralizações (W2 Foliação) preenchendo as foliações, o que aparentemente interfere no aumento da porosidade das rochas que possuem essa característica. O peso específico fornece características importantes acerca da mineralogia e grau de alteração das rochas; neste caso é possível notar que tanto a massa específica seca quanto a massa específica saturada reduziram conforme o aumento do grau de alteração, mas de maneira muito menos intensa que o aumento da porosidade e da capacidade absorção de água, mostrando uma influência importante do intemperismo físico sobre essas propriedades.

Em filitos sericíticos da Formação Cauê (W2), os valores de massa específica seca, saturada, porosidade e capacidade de absorção d'água, foram semelhantes aos encontrados no presente estudo, ou seja, 2,26 – 2,34 (g/cm³), 2,45 – 2,50 (g/cm³), 15,98 – 18,31(%) e 6,85 – 8,23 (%), respectivamente (SANTIAGO, 2008), pouco inferiores aos encontrados para a Formação Batatal.

5.7 Porosimetria de Mercúrio

Na figura 62 é apresentada a curva de distribuição acumulada de tamanho de poros, em função da injeção de mercúrio sob pressão. Conforme as pressões de injeção vão sendo elevadas os poros com diâmetros pequenos vão sendo preenchidos. Há redução progressiva após o alcance da pressão limite do equipamento, não permitindo saber se existem poros menores, já que o limite inferior dos tamanhos está condicionado pela capacidade de injeção do aparelho.

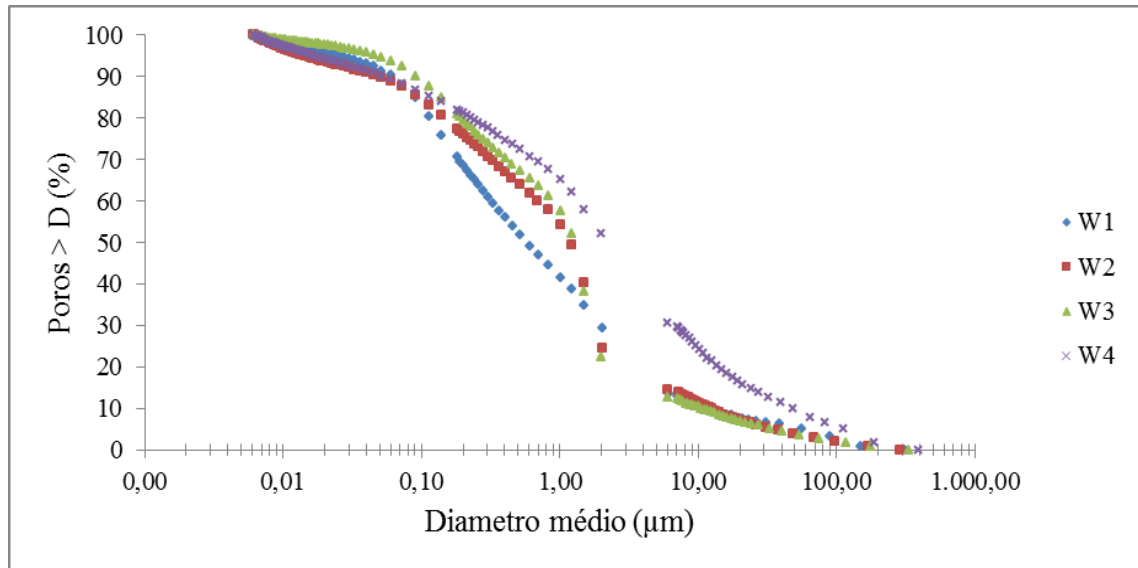


Figura 62 Variação da porosidade com o intemperismo (W1 à W4), determinada no processo de injeção de mercúrio.

As curvas de distribuição de tamanho de poros são bastante semelhantes até aproximadamente o valor de 0,07 μm , a partir do qual ocorre uma diferenciação. Um percentual de tamanho de poros, em torno de 87,5% a 90% são maiores do que 0,07 μm . Todas as curvas são contínuas, até próximo de 1,0 μm , valor a partir do qual as curvas de W2 e W3 apresentam uma nítida inflexão. No intervalo entre 1,0 e 2,0 μm se concentram 33% a 38% dos tamanhos dos poros nas classes de alteração W2 e W3, respectivamente, onde esses dois níveis se confundem. A curva da classe W4 de alteração é mais contínua, a exemplo da curva obtida para W1. Observa-se, um aumento da porosidade com o intemperismo desde W1 até W4. Cabe ressaltar que processos de compactação mecânica tendem a reduzir drasticamente a macroporosidade dos filitos sem redução das microporosidades (ROMERO e SIMMS, 2008; GARZÓN et al., 2010).

A figura 63 representa a curva de drenagem, processo posterior ao processo de injeção. Apesar da diferença entre a injeção e drenagem, tendo em vista que no processo de redução da pressão (drenagem), parte do mercúrio injetado acaba não retornando, ambas obedeceram a um padrão, ou seja, há aumento da porosidade com o aumento do grau de alteração.

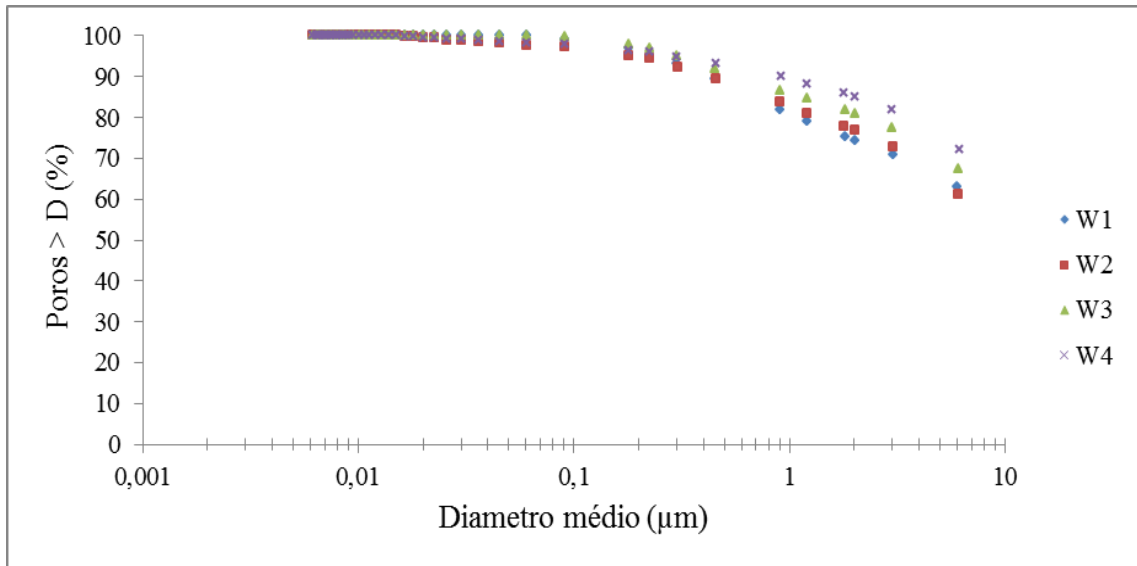


Figura 63 Variação da porosidade com o intemperismo (W1 à W4), determinada no processo de drenagem de mercúrio.

5.8 Avaliação da cor por colorímetro

São apresentados nas figuras 64 a 67 e respectivamente nas tabelas 9 a 12 às figuras, os valores obtidos para L^* (luminosidade), a^* (intensidade cor vermelha/verde), b^* (intensidade da cor amarelo/azul) e ΔE^* (variação total da cor), para os níveis de alteração W1 a W4. Foram realizados testes também no subnível W2 Foliação (cor laranja).

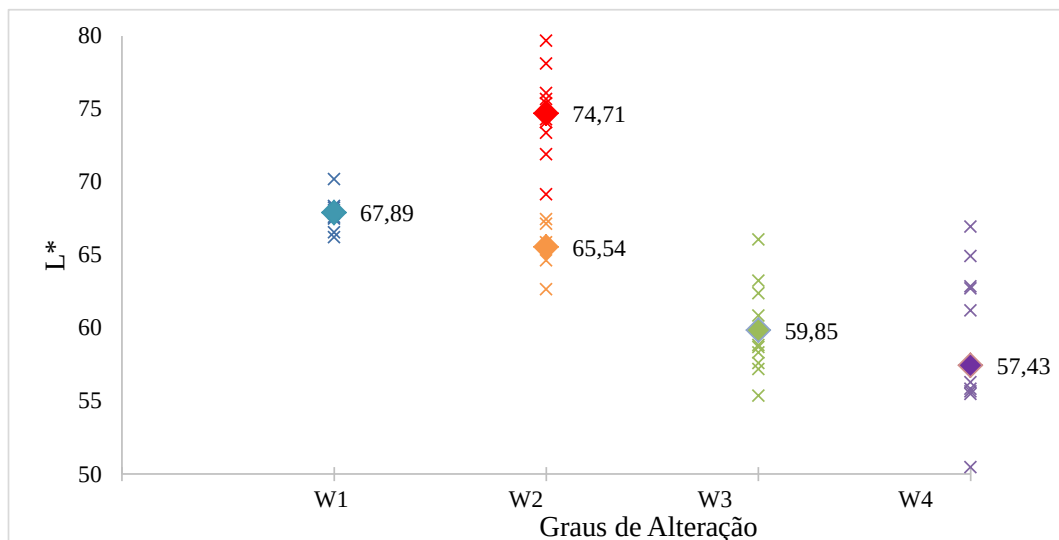
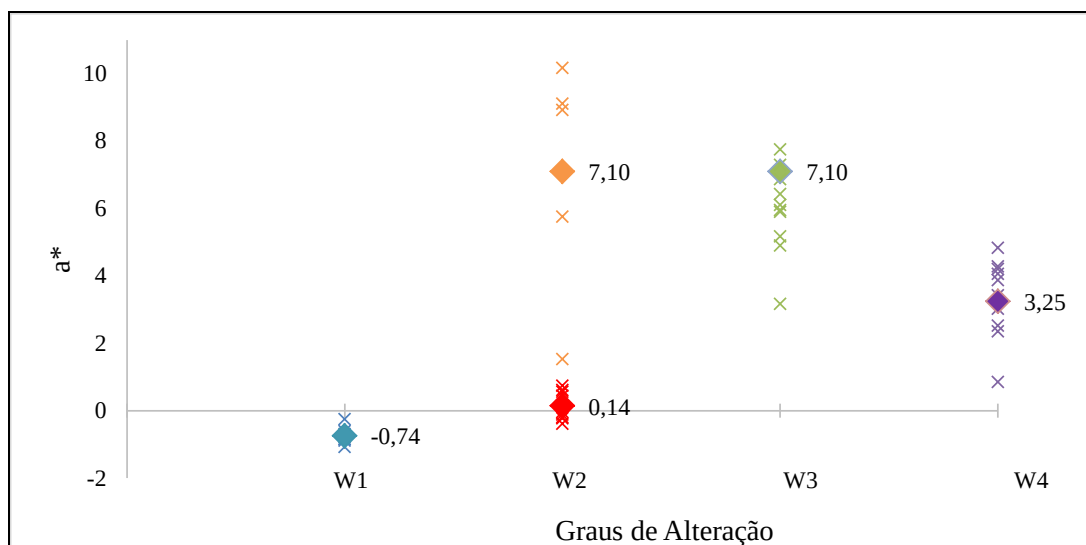


Figura 64 Valores da luminosidade L^* para os graus de alteração dos filitos (W1 a W4 e, W2 Foliação – cor laranja). Em destaque o valor correspondente a média das medidas.

Tabela 9 Valores da luminosidade L^* para os graus de alteração.

Grau de Alteração	Valor Mínimo	Valor Máximo	Média (10 medições)	Desvio Padrão (%)
W1	66,21	70,20	67,89	1,10
W2	69,16	79,67	74,71	2,85
W2 (foliação)	62,64	67,44	65,54 (5 medições)	1,97
W3	55,36	66,05	59,85	3,24
W4	39,40	66,93	57,43	7,76

Analisando os resultados para L^* nota-se uma tendência da redução deste parâmetro com a evolução do intemperismo, ou seja, as amostras escurecem. Esse fato pode ser explicado pela alteração da mica na rocha, responsável pelo brilho. Nos planos da foliação a luminosidade foi distinta ao padrão, provavelmente devido a minerais alterados.

**Figura 65** Valores da intensidade de cor vermelho/verde a^* para os graus de alteração dos filitos (W1 a W4 e, W2 Foliação – cor laranja). Em destaque o valor correspondente à média das medidas.**Tabela 10** Valores da intensidade cor vermelho/verde a^* para os graus de alteração.

Grau de Alteração	Valor Mínimo	Valor Máximo	Média (10 medições)	Desvio Padrão (%)
W1	-1,08	-0,25	-0,74	0,22
W2	-0,39	0,61	0,14	0,39
W2 (foliação)	1,53	10,17	7,10 (5 medições)	3,52
W3	3,17	7,75	5,95	1,32
W4	0,85	4,83	3,25	1,16

Os valores da intensidade de cor a^* também mostraram tendência, todavia crescente com o aumento do intemperismo. No caso das análises nos níveis W2 Foliação e W3, os valores mais altos de a^* , com tendência a cor vermelha, já eram

esperados já que possuem pontualmente manchas avermelhadas e partes avermelhadas a rosadas, respectivamente, em observações ao olho nu.

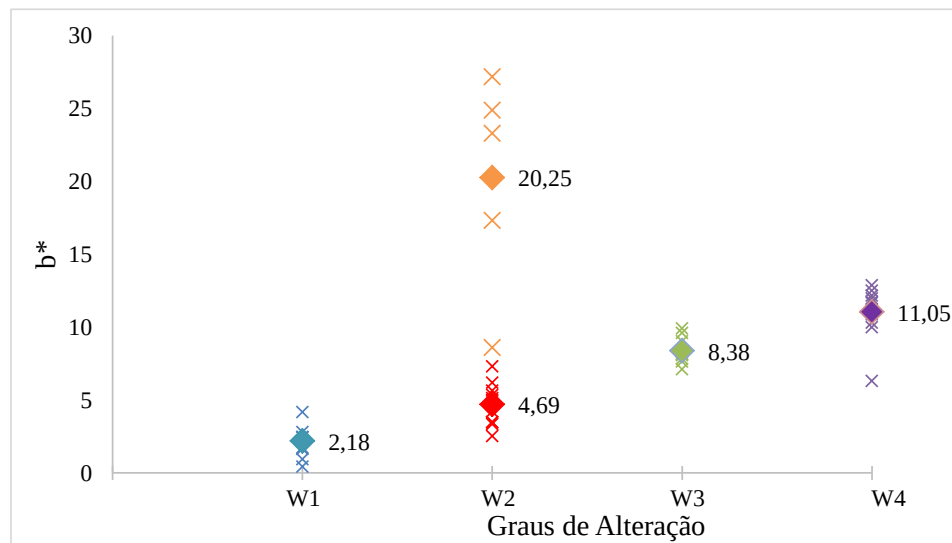


Figura 66 Valores da intensidade de cor amarelo/azul b^* para os graus de alteração dos filitos (W1 a W4 e, W2 Foliação – cor laranja). Em destaque o valor correspondente a média das medidas.

Semelhante ao parâmetro a^* o parâmetro b^* mostrou tendência crescente conforme o intemperismo progride. Os planos de foliação da rocha exibem cores amarelas a amareladas, levemente avermelhadas, possivelmente fruto da alteração de minerais máficos.

Tabela 11 Valores da intensidade cor amarelo/azul b^* para os graus de alteração.

Grau de Alteração	Valor Mínimo	Valor Máximo	Média (10 medições)	Desvio Padrão (%)
W1	0,42	4,17	2,18	1,06
W2	2,52	7,30	4,69	1,43
W2 (foliação)	8,60	27,17	20,25 (5 medições)	7,46
W3	7,10	9,91	8,38	0,88
W4	6,31	12,87	11,05	1,80

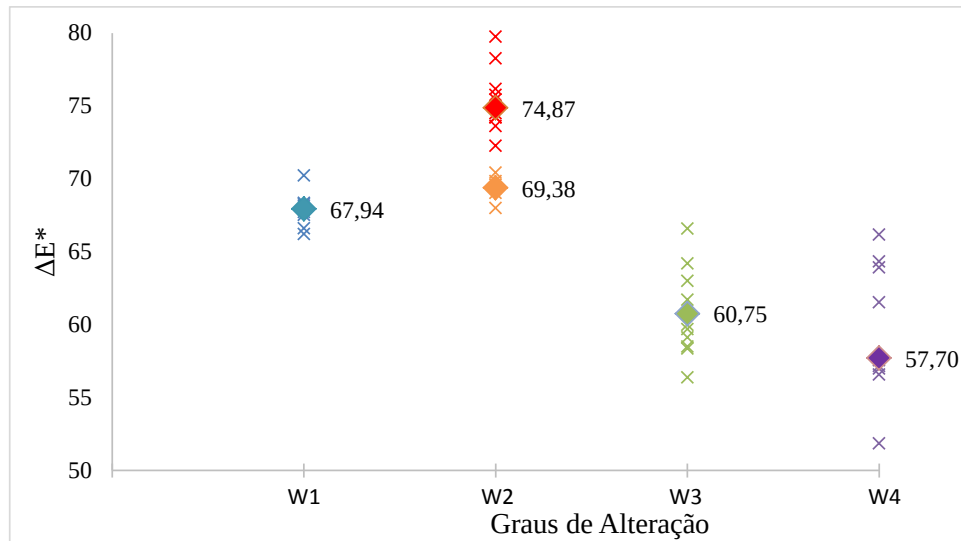


Figura 67 Valores da variação total da cor ΔE^* para os graus de alteração dos filitos (W1 a W4 e, W2 Foliação – cor laranja). Em destaque o valor correspondente a média das medidas.

Tabela 12 Valores da variação total da cor ΔE^* para os graus de alteração.

Grau de Alteração	Valor Mínimo	Valor Máximo	Média (10 medições)	Desvio Padrão (%)
W1	66,22	70,22	67,94	1,09
W2	69,37	79,75	74,87	2,79
W2 (Foliação)	68,00	70,43	69,38 (5 medições)	0,92
W3	56,38	66,59	60,75	3,09
W4	40,91	66,18	57,70	7,36

A variação total da cor (ΔE^*) é expressa pela raiz quadrada da soma das diferenças quadráticas de cada vetor (L^* , a^* e b^*), conforme expressão abaixo:

$$\Delta E^* = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2}$$

O parâmetro ΔE^* mostrou expressiva variação conforme a evolução do grau de intemperismo, principalmente para os níveis W2 Foliação, W3 e W4, que apresentaram maior desvio padrão, respectivamente. Com base nos resultados pode-se afirmar que o efeito da alteração nos filitos não causa descoloração da rocha e sim mudança de cor, o que evidencia a necessidade de adaptar as classificações de campo para descrição do estado de rochas, principalmente para as de baixo grau, como os filitos.

5.9 “Slake Durability Test”

A figura 68 mostra o estado final das amostras, após o ensaio de durabilidade (I_{d2}). Com base apenas nas figuras nota-se que o nível W4 praticamente desintegrou e os níveis W3 e W2 tiveram aumento no número de fragmentos, enquanto W1

reduziu de 10 para 9 fragmentos, onde um mais fragmentos desagregaram completamente.

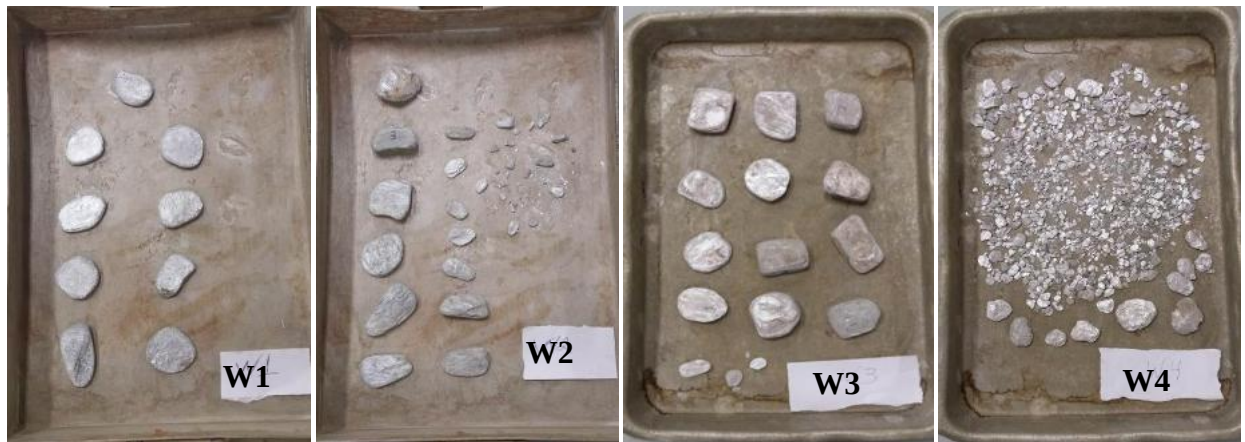


Figura 68 Resultado das amostras de W1 a W4 após dois ciclos do ensaio de “slake”.

Na tabela 13 e figura 69 são apresentados os valores de I_d , correspondente a dois ciclos do ensaio, para os quatro níveis de alteração.

Tabela 13 Valores de I_d (%) para os níveis de alteração W1 a W4.

Grau de Alteração	Massa Inicial (g)	Massa Final (g)	I_{d1} (%)	I_{d2} (%)
W1	563,20	150,27	51,11	26,68
W2	540,72	260,15	63,97	48,11
W3	572,12	381,88	81,70	66,75
W4	546,97	74,12	22,59	13,55

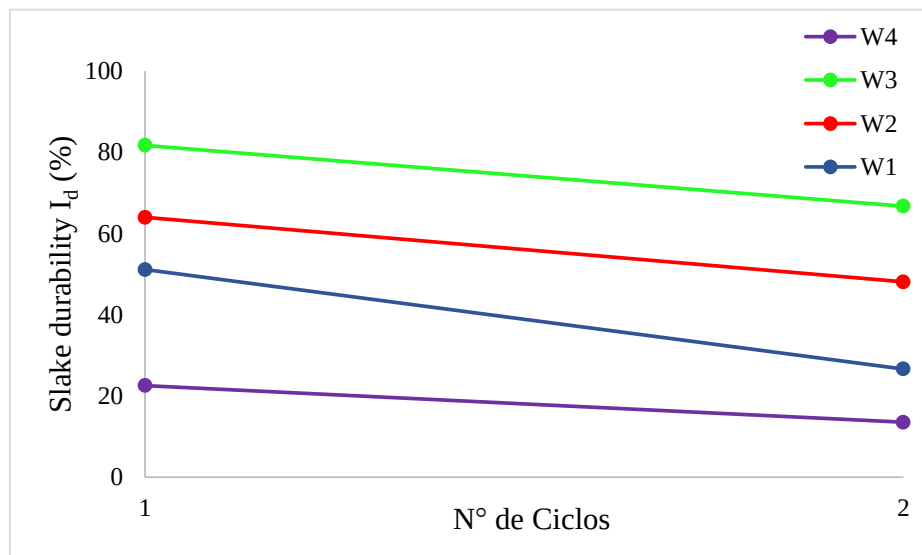


Figura 69 Índices de “slake” (I_{d1} e I_{d2}) apresentados para W1 a W4.

Baseado nos resultados nota-se que a durabilidade não acompanha diretamente a evolução do intemperismo. Excetuando o nível W4, que apresentou baixa durabilidade esperada, o nível W3 apresentou a maior durabilidade (durabilidade média), seguido de W2 e W1 (ambos de durabilidade baixa). Os planos

de foliação facilitam a degradação física das rochas durante o ensaio devido a elevadas aberturas e persistências, descritas anteriormente. Considerando apenas este aspecto W1 deveria apresentar a maior durabilidade em relação aos demais, tendo em vista que seus planos de foliação são pouco marcantes apesar de visíveis. Todavia, a presença de níveis cimentados, oriundos de processos paralelos ao intemperismo, e concordantes com os planos de foliação, em W2 e W3, denotam maior durabilidade em relação a W1 que representado pela durabilidade da matriz.

Em uma segunda campanha de ensaios, foram separadas dez amostras de cada nível de alteração, objetivando avaliar a evolução por dez ciclos consecutivos (I_{d10}). Os resultados são apresentados na tabela 14 e figura 70.

Tabela 14 Valores de I_d (%) para os níveis de alteração W1 a W4.

Grau de Alteração	MI (g)	MF (g)	I_{d1}	I_{d2}	I_{d3}	I_{d4}	I_{d5}	I_{d6}	I_{d7}	I_{d8}	I_{d9}	I_{d10}
W1	510	47	65,88	44,31	30,98	23,72	19,01	15,88	13,33	11,76	10,39	9,21
W2	561	133	60,24	43,13	36,36	32,44	29,41	27,69	26,38	25,31	24,59	23,70
W3	520	65	55,76	37,50	29,23	24,23	20,96	18,07	15,76	14,42	13,46	12,50
W4	591	111	35,19	24,70	21,82	20,81	20,13	19,62	19,28	19,12	18,95	18,78

Legenda: MI: Massa Inicial; MF Massa Final.

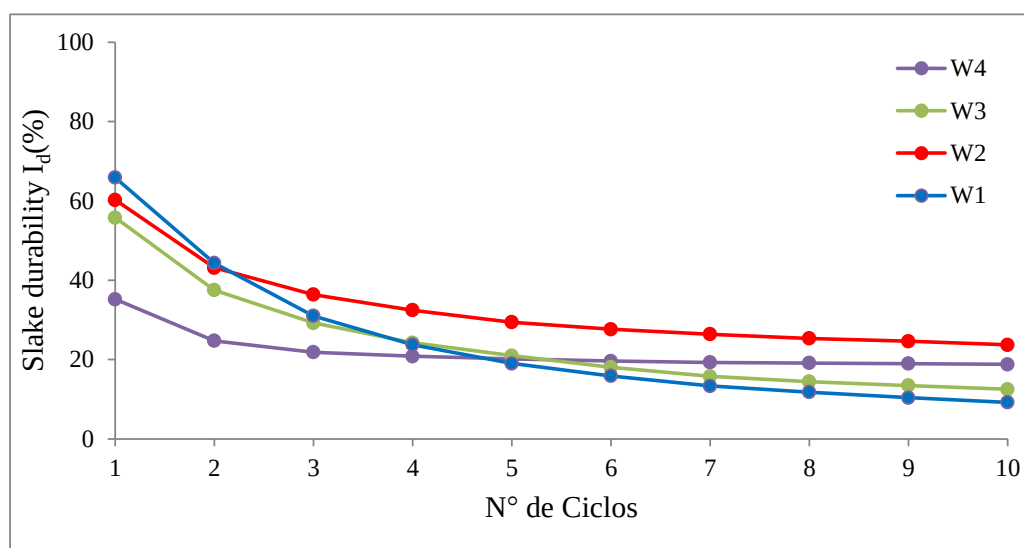


Figura 70 Evolução dos índices de "slake" (I_{d1} a I_{d10}) ao longo de dez ciclos para os níveis de alteração.

Conforme observado, até I_{d2} , as amostras do nível W1 tenderam a exibir maior durabilidade (média), decrescendo até uma durabilidade muito baixa conforme a evolução do intemperismo. A partir de I_{d3} o nível W1 sofre uma brusca redução de sua durabilidade até que em I_{d10} torna-se o nível com menor índice dentre todas. Observando a figura 71 nota-se que em um primeiro momento a rocha tende a

desagregação e posteriormente as partículas menores vão sendo desintegradas e as maiores desgastadas.

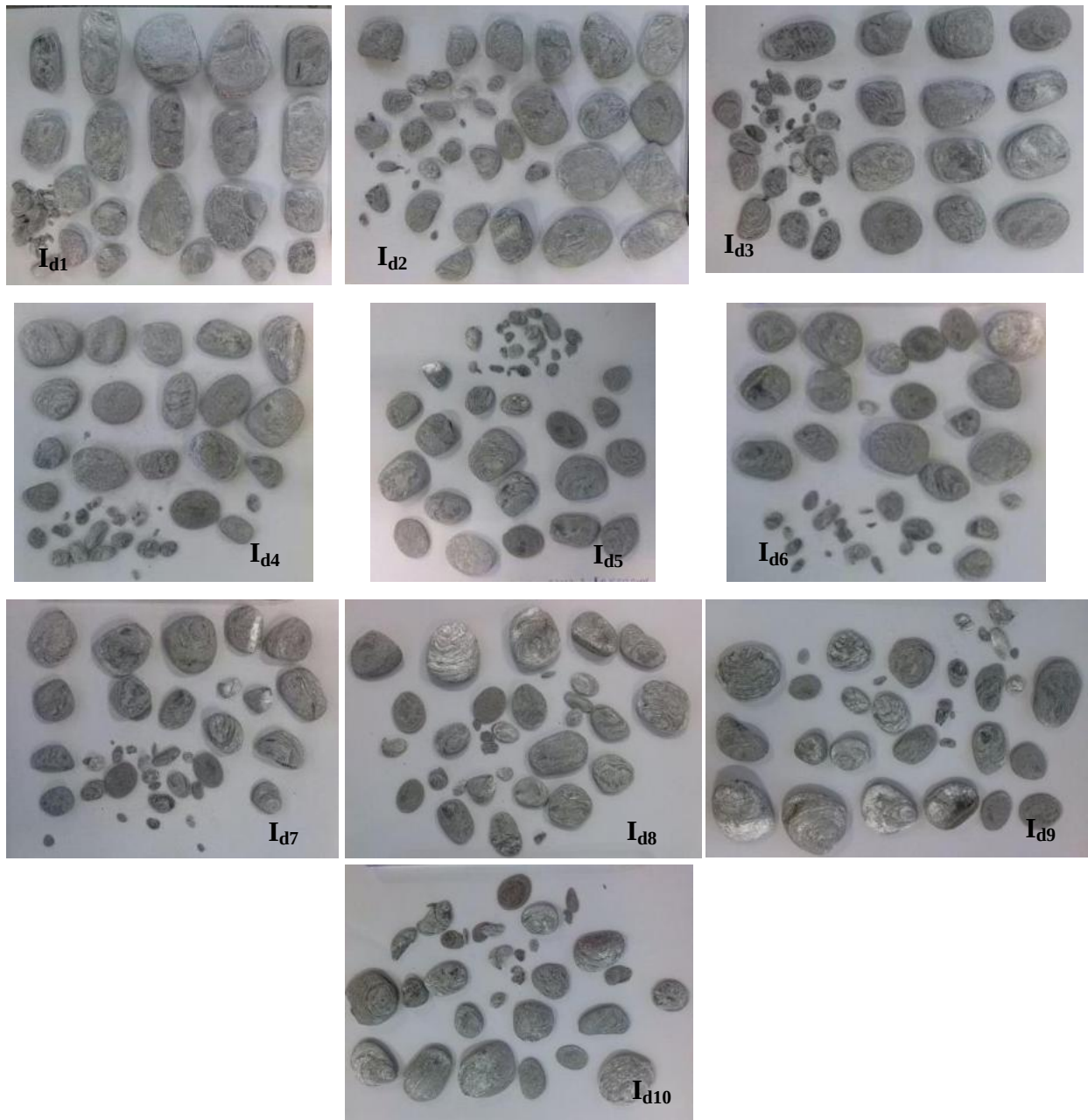


Figura 71 Evolução dos índices de “slake” (I_{d1} a I_{d10}) para amostras W1.

A amostra W2 (figura 72) a partir de I_{d3} apresentou menor perda de massa em relação aos outros níveis, justificando a sua maior durabilidade final. Houve na verdade um desgaste seletivo nessas amostras, com a preservação dos fragmentos que continham níveis cimentados, mostrando a heterogeneidade da rocha.

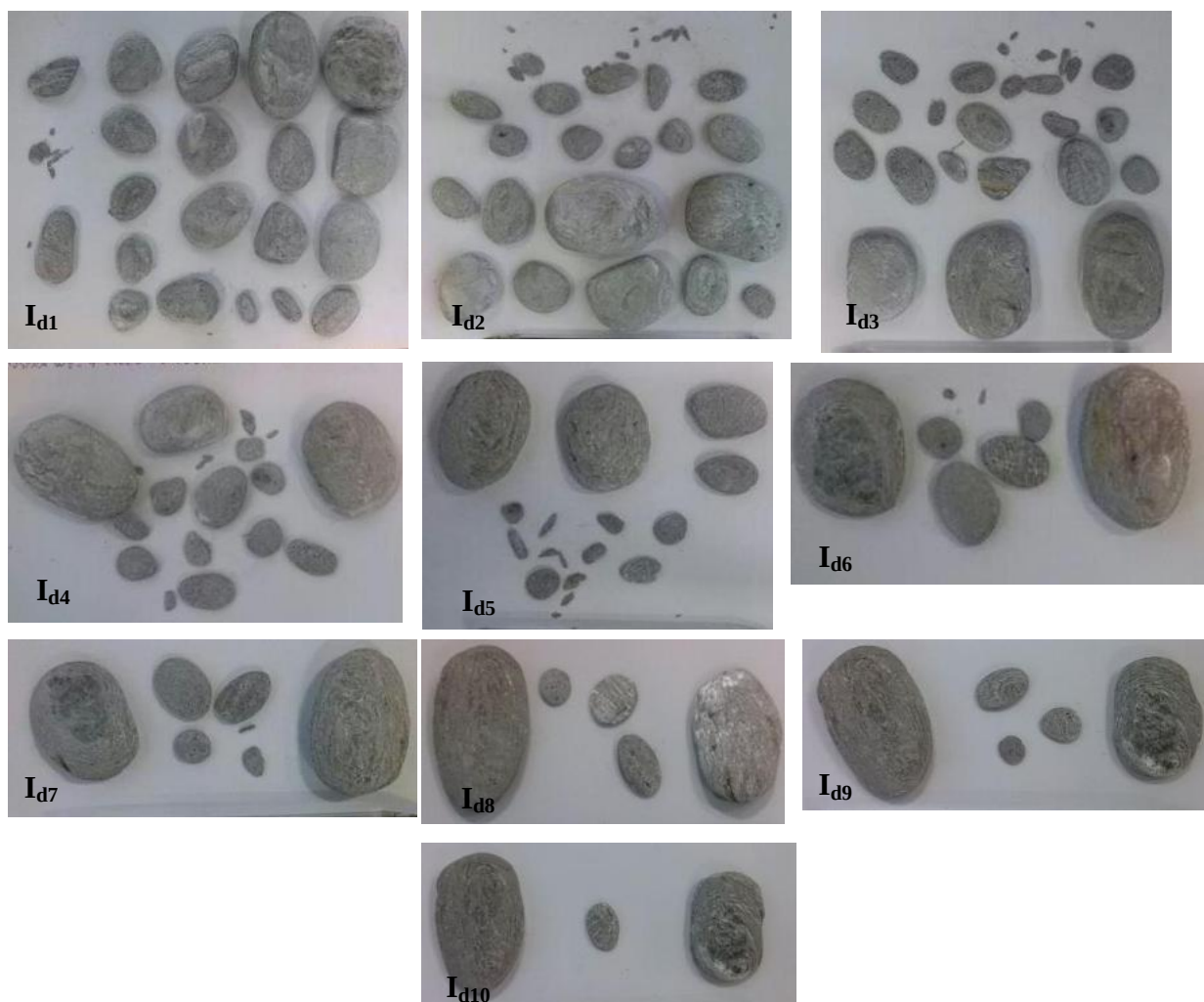


Figura 72 Evolução dos índices de “slake” (I_{d1} a I_{d10}) para amostras W2.

O nível W3 (figura 73) apresentou um comportamento semelhante a W1, quanto à desintegração das partículas menores, e semelhante a W2, com reduzido desgaste em fragmentos que apresentavam níveis cimentados.

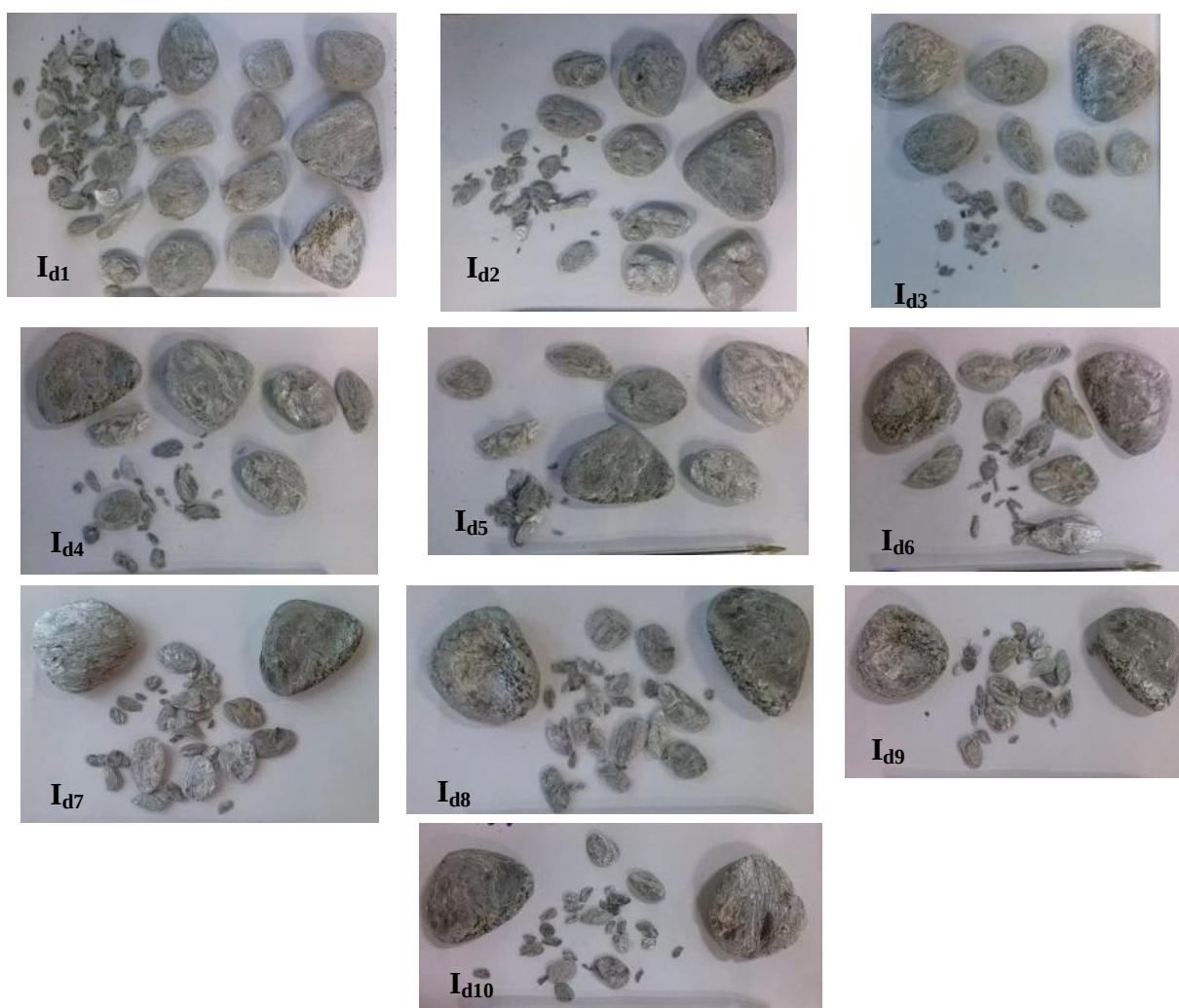


Figura 73 Evolução dos índices de “slake” (I_{d1} a I_{d10}) para amostras W3.

Já o nível W4 (figura 74), a partir de I_{d3} , apresentou discreta variação da durabilidade, com redução dos fragmentos em frações homogêneas e praticamente constantes até I_{d10} . Considerando que a massa específica deste nível é inferior aos outros e há grande susceptibilidade à desintegração, as partículas menores permanecem menos tempo em contato com as telas metálicas do equipamento, reduzindo o atrito e a cominuição dos fragmentos ao longo dos ciclos. Apesar de serem evidenciados níveis cimentados em fragmentos antes do ensaio, não parece haver contribuição da mesma para a durabilidade deste nível, já que a matriz da rocha está muito alterada.

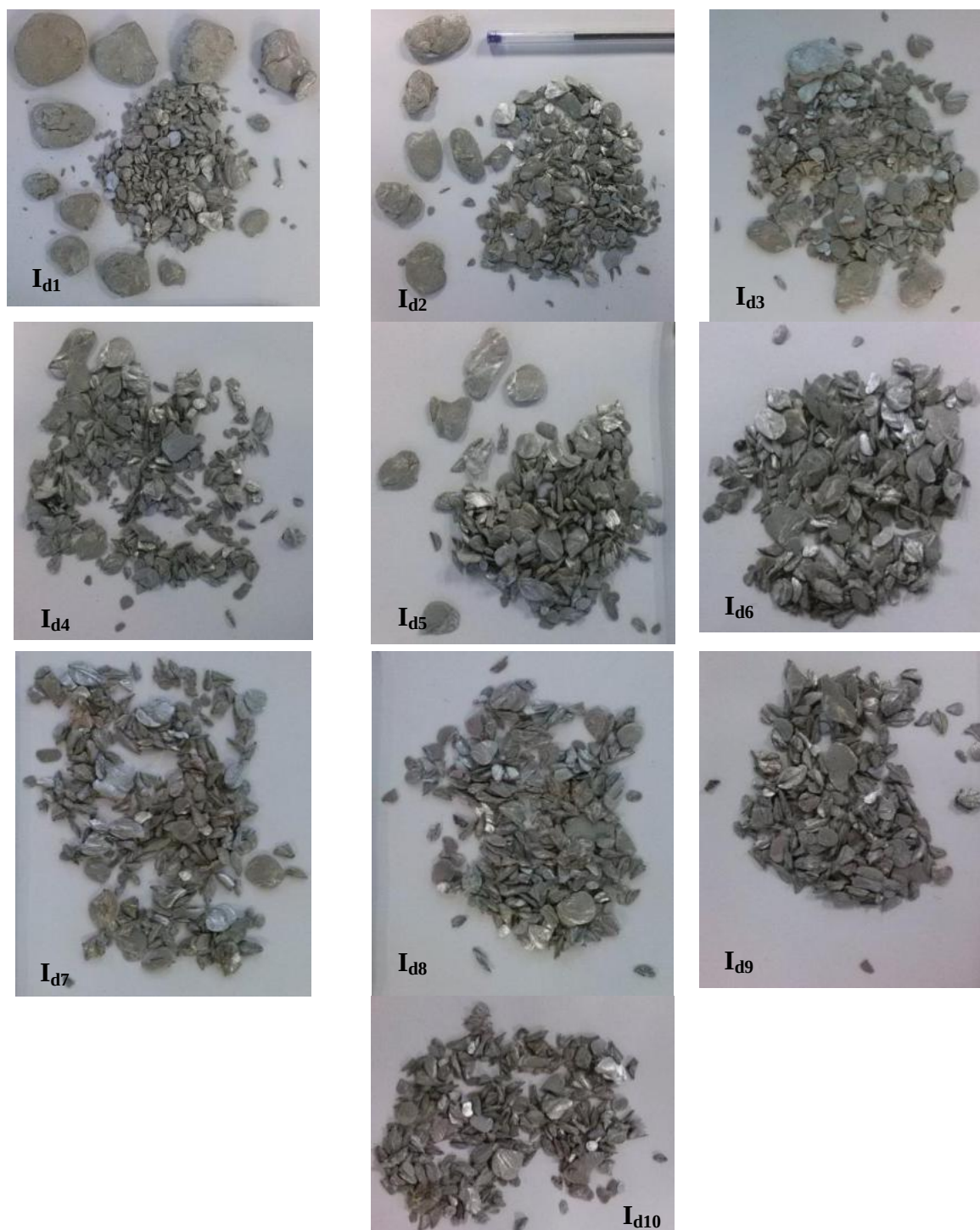


Figura 74 Evolução dos índices de “slake” (I_{d1} a I_{d10}) para amostras W4.

A tabela 15 e a figura 75 apresentam os resultados encontrados para o índice de “slake”, por meio da repetibilidade do ensaio inúmeras vezes, para os quatro níveis de alteração, incluindo desta vez o subnível W2 Foliação. As letras s e cv na tabela 15 representam o desvio padrão e o coeficiente de variação, respectivamente.

Tabela 15 Valores de I_d (%) para W1 a W4 considerando a repetibilidade.

Grau de Alteração	Ensaio	MI (g)	MF (g)	I_{d1} (%)	I_{d2} (%)	Média I_{d1} (%)	Média I_{d2} (%)	s I_{d1} (%)	s I_{d2} (%)	cv I_{d1} (%)	cv I_{d2} (%)
W1	1	508,13	271,83	112,05	53,50	59,25	27,55	4,74	6,03	8,00	21,88
	2	563,24	290,61	87,70	51,60						
	3	512,63	320,88	153,00	62,59						
	4	536,51	321,02	155,96	59,83						
	5	569,48	317,20	154,92	55,70						
	6	546,14	344,32	190,90	63,05						
	7	468,95	313,45	167,04	66,84						
	8	548,36	344,05	150,23	62,74						
	9	519,47	301,64	157,83	58,07						
	10	501,90	293,80	117,24	58,54						
W2	1	538,65	151,98	54,81	28,21	59,51	29,39	8,07	4,67	13,56	15,90
	2	533,22	113,26	44,71	21,24						
	3	515,23	186,18	69,46	36,14						
	4	510,76	154,96	60,85	30,34						
	5	571,32	148,81	51,07	26,05						
	6	586,86	207,15	67,41	35,30						
	7	574,81	154,43	66,07	26,87						
	8	594,24	168,36	60,40	28,33						
	9	545,66	174,69	60,79	32,01						
W2 Foliação	1	565,01	9,67	4,21	1,71	9,53	5,08	7,37	5,15	77,31	101,44
	2	567,81	12,23	4,31	2,15						
	3	536,83	68,12	19,89	12,69						
	4	433,67	16,28	9,70	3,75						
W3	1	510,56	365,23	85,37	71,54	83,03	64,96	6,90	6,07	8,31	9,35
	2	502,15	310,97	80,42	61,93						
	3	625,04	402,51	83,83	64,40						
	4	421,41	303,46	97,31	72,01						
	5	471,63	294,75	79,05	62,50						
	6	513,93	347,20	81,95	67,56						
	7	463,98	275,37	80,90	59,35						
	8	588,79	320,17	71,67	54,38						
	9	548,38	389,26	86,75	70,98						
W4	1	536,79	31,27	19,55	5,83	19,47	7,43	2,85	1,28	14,66	17,23
	2	517,44	33,99	15,98	6,57						
	3	523,55	44,25	22,35	8,45						
	4	527,97	45,61	18,46	8,64						
	5	546,12	33,01	15,70	6,04						
	6	524,75	37,75	19,69	7,19						
	7	444,34	36,82	22,27	8,29						
	8	435,66	41,98	24,57	9,64						
	9	572,45	34,43	15,91	6,01						
	10	547,34	46,97	20,54	8,58						
	11	540,68	41,13	21,08	7,61						
	12	489,79	30,88	17,56	6,30						

Legenda: MI: Massa Inicial; MF Massa Final.

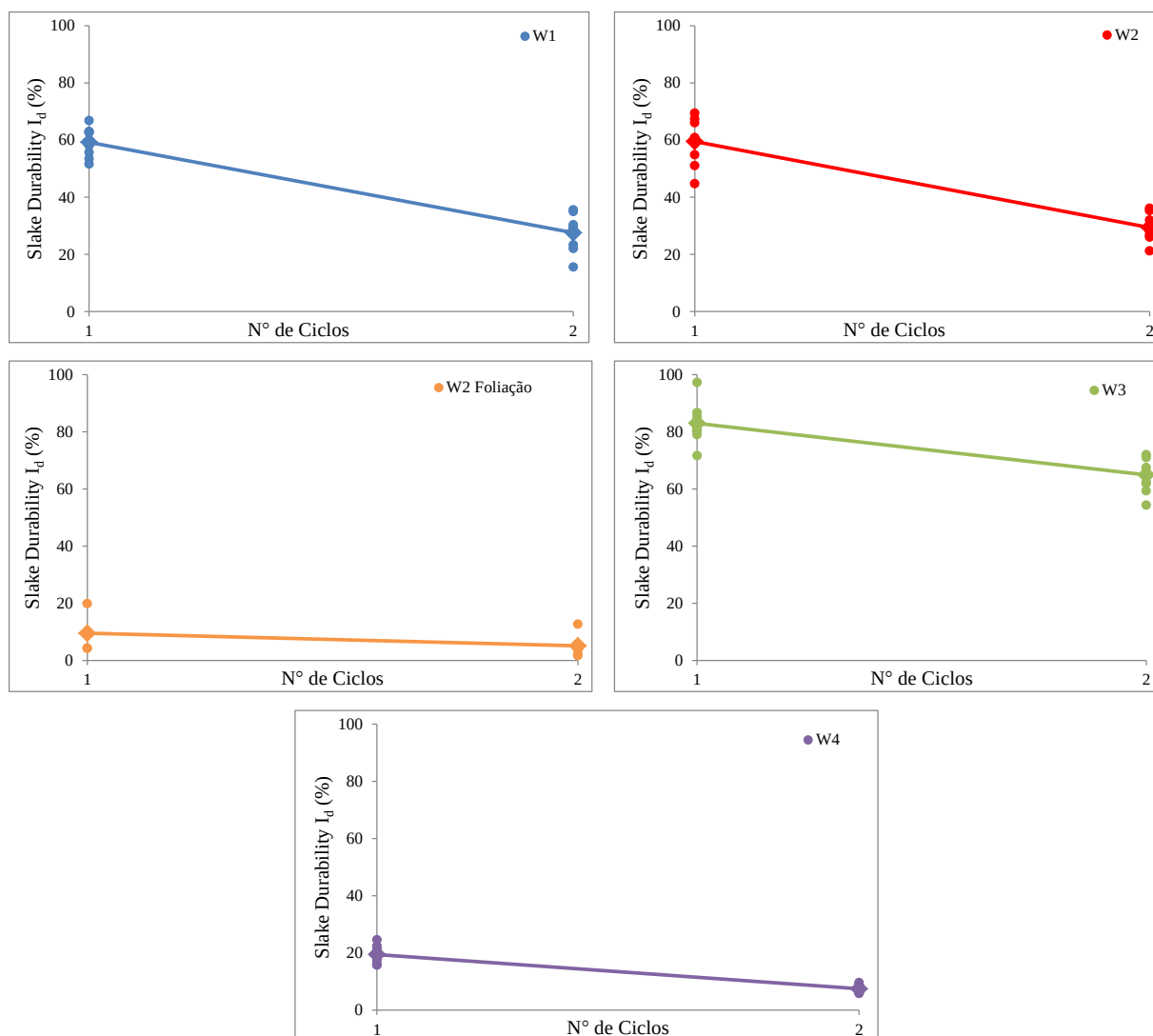


Figura 75 Índices de “slake” (I_d) para os graus de alteração com base na repetibilidade do ensaio.

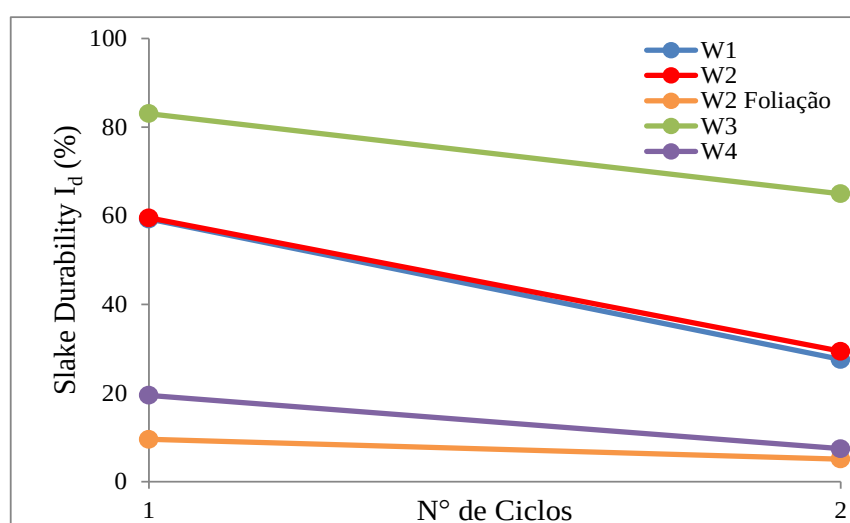


Figura 76 Valores médios de I_d para os graus de alteração com base na repetibilidade do ensaio.

Com base na tabela 15 e figuras 75 e 76 é possível notar que mesmo após a repetição de vários ensaios para cada nível, os valores de I_d não refletem a evolução

do intemperismo, onde W3 se sobressai em relação aos demais níveis. W1 e W2 apresentam comportamento semelhante, com W1 ainda apresentando uma menor durabilidade em relação a W2. O nível W4 exibiu valores de durabilidade baixos em todos os ensaios. O subnível W2 Foliação apresentou a menor durabilidade entre todos os materiais ensaiados. Com base nos resultados acredita-se que o efeito da cimentação, de minerais nos planos de foliação, promove certa resistência à rocha, mesmo em estágios de alteração avançados, como no caso de W3. As amostras após I_{d2} são apresentadas na figura 77, com o n° de ensaios repetidos para cada nível.

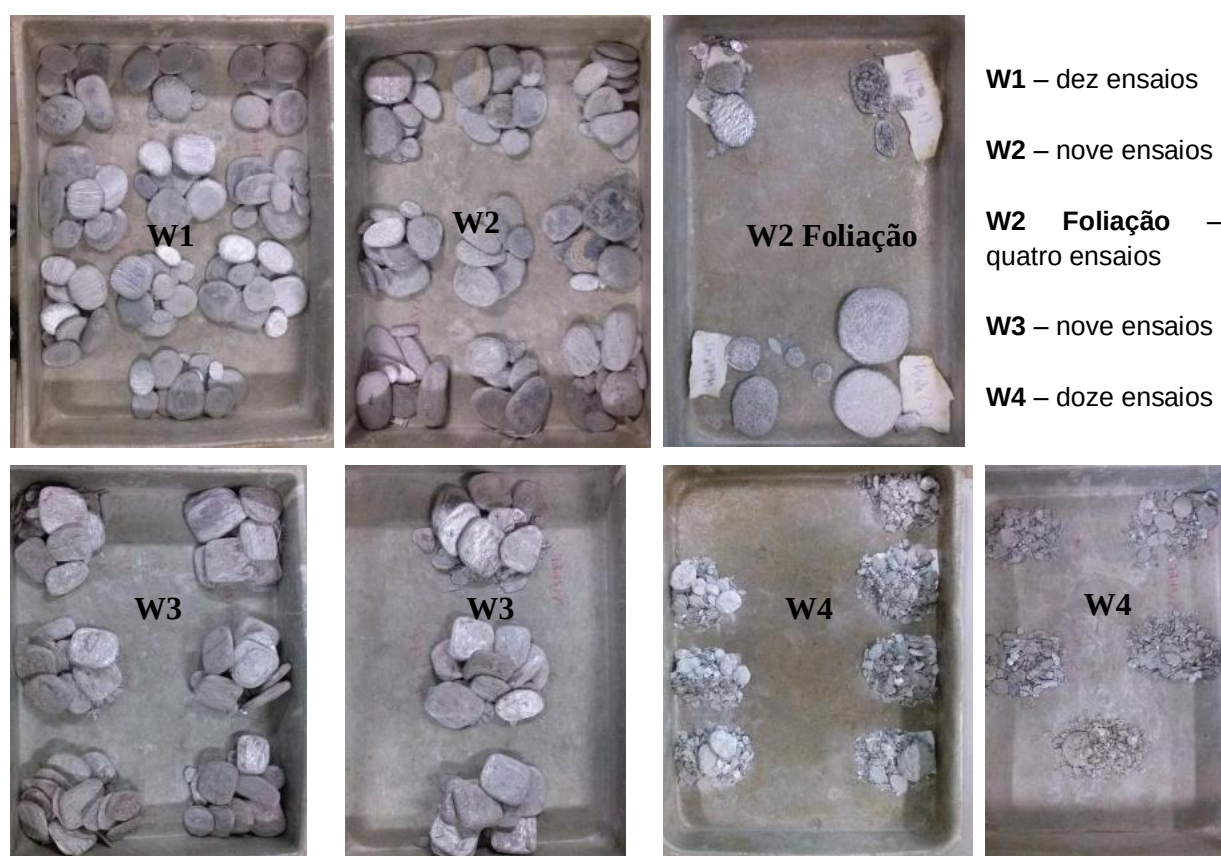


Figura 77 Amostras após o I_{d2} para os quatro graus de alteração.

A figura 77 mostrou praticamente o mesmo resultado apresentado nas figuras 68 e 71 a 74. A partir de valores de índice de I_d para filitos sericíticos e dolomíticos, da região de Brumadinho (MG), concluiu-se que essas rochas possuem média a alta durabilidade, em graus de alteração W2 e W3 (SILVA e LANA, 2012). Apesar da carência de informações acerca da mineralogia e planos de foliação da rocha, acredita-se que esses filitos possuam níveis minerais ferruginosos e cimentados ao longo da foliação, refletindo na durabilidade. Essa interpretação se dá pelo contato

desses filitos com formações ferríferas, responsáveis por facilitar a percolação e precipitar óxidos dissolvidos em planos de descontinuidade.

Cabe ressaltar que em rochas argilosas como siltitos, argilitos e folhelhos, por exemplo, características como a superfície de contato, a presença de descontinuidades, o teor de umidade, processos erosivos pretéritos sofrido pelas amostras e a própria gênese da rocha, influenciam diretamente a durabilidade (GAUTAM e SHAKOOR, 2013).

A figura 78 apresenta alguns fragmentos produzidos ao término de I_{d2} para os graus de alteração.

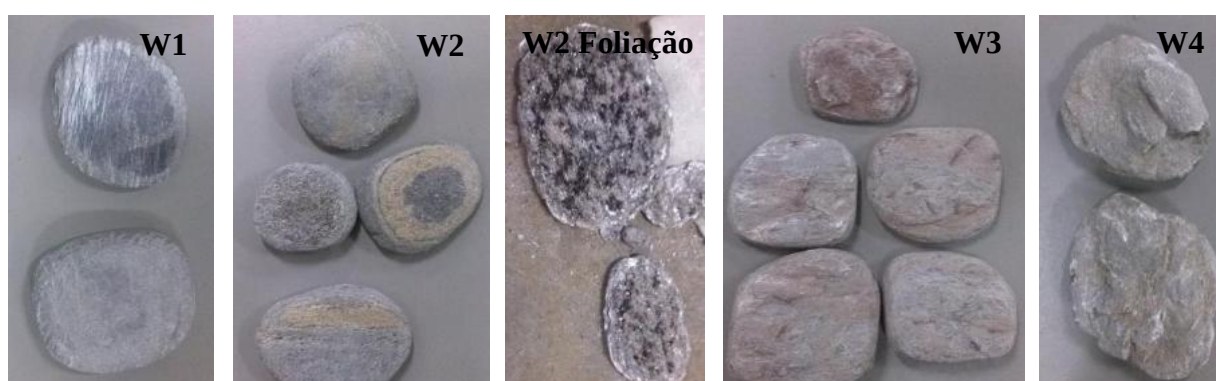


Figura 78 Detalhe de fragmentos após I_{d2} evidenciando os materiais minerais que ocorrem entre as foliações.

Cabe ressaltar que em W1, não são observados sinais de cimentação, sendo este nível representante da matriz da rocha. W2 apresenta planos oxidados e levemente cimentados, todavia é difícil quantificar a proporção entre matriz/planos cimentados. Em W3 essa cimentação não está apenas localizada nos planos de foliação como também dispersa pela rocha, denotando uma coloração avermelhada e garantindo um aumento na durabilidade. Em W4 os planos cimentados, apesar de presentes, não conseguem garantir elevada durabilidade, devido à grande fragilidade da matriz, sofrida com processos de alteração. Em especial, no subnível W2 Foliação, ocorre marcante presença de óxidos e quartzo, porém devido à reduzida coesão interna do material, há rápida desagregação das partículas.

Em argilitos são, a presença de quartzo, nos planos de foliação, forneceu resultados distintos em termos de resistência à compressão puntiforme (0,1 – 0,3 MPa, muito baixa), alta durabilidade média (70 a 90% de i_d) e baixos valores de coesão e ângulo de atrito (28 – 50 kPa e 38° – 47°) obtidos por cisalhamento direto (BELL et al., 1997). Em filitos quartzíticos a durabilidade pode alcançar valores em torno de 99%, devido à presença de quartzo na foliação (RAMAMURTHY et

al.,1993). Elevadas durabilidades, em torno de 90% para W2 e 54% - 86% para W3 foram encontradas por Silva (2010), contrastando com os resultados aqui obtidos; como não são mencionadas características mineralógicas dessas rochas não é possível afirmar a influência de planos cimentados, apesar de se acreditar nessa possibilidade devido ao contexto regional.

5.10 Ciclagem Água-Estufa

Nas figuras 79 a 82 são apresentadas as frações para os níveis W1 a W4, respectivamente, após ensaio de ciclagem água-estufa e passadas na sequência de tamises 19,0 mm, 12,5 mm, 9,5 mm, 4,76 mm, 2,0 mm, 0,5 mm, 0,053 mm e fundo (< 0,053 mm). Este processo foi realizado a cada dez ciclos e ao final do ensaio, ou seja, até que não restasse nenhum fragmento na peneira de 19 mm. Cabe ressaltar que nenhuma amostra chegou ao ciclo 120° ciclo.

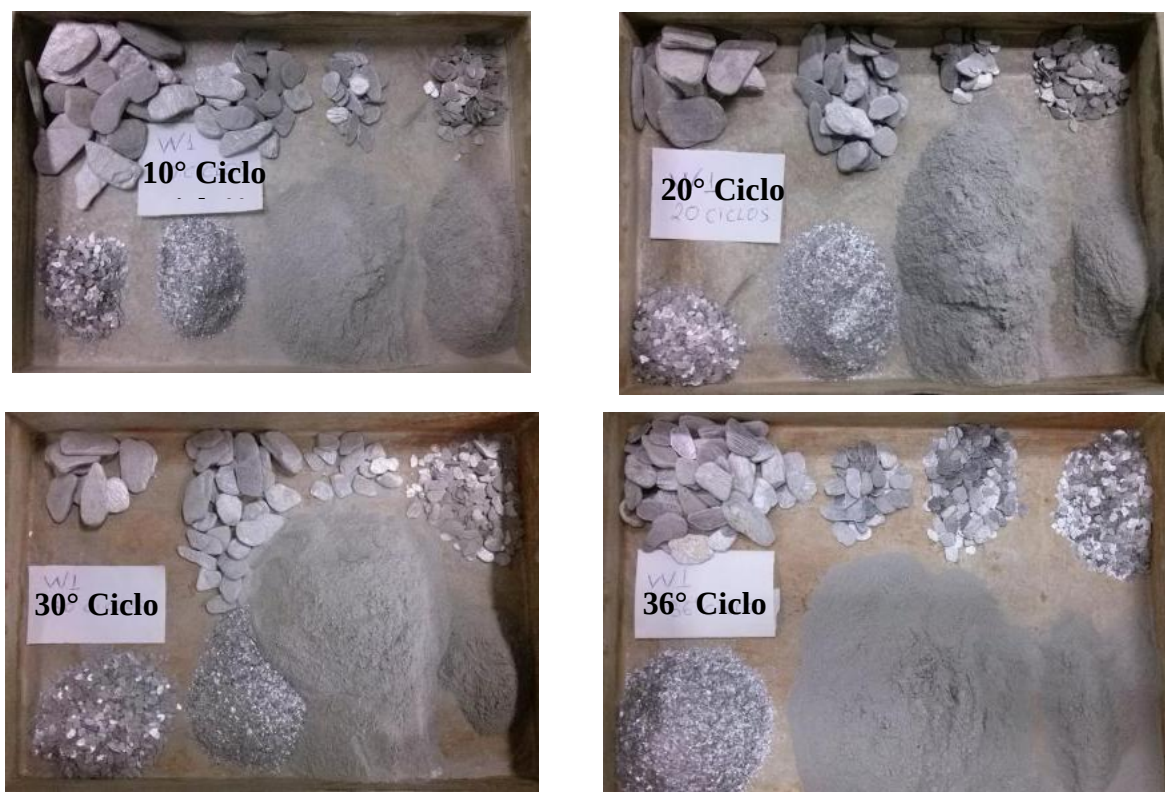


Figura 79 Frações do nível W1 após 10, 20, 30 e 36 ciclagens água-estufa.

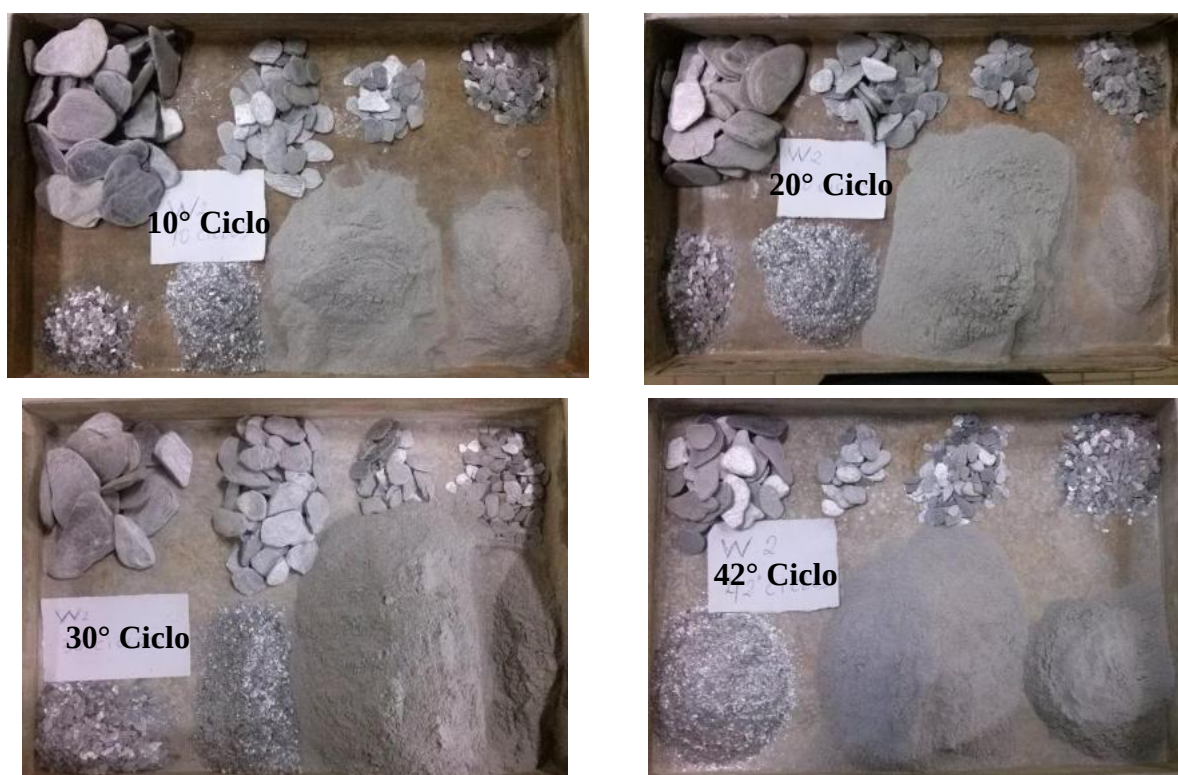


Figura 80 Frações do nível W2 após 10, 20, 30 e 42 ciclagens água-estufa.

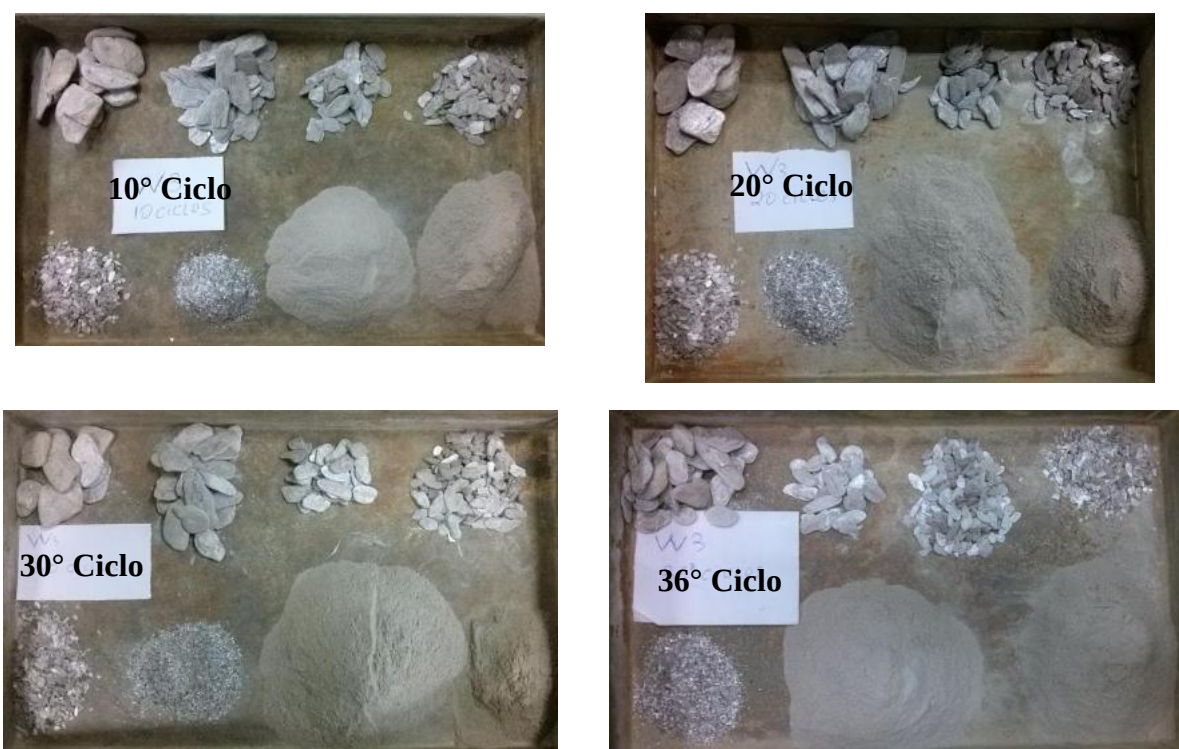


Figura 81 Frações do nível W3 após 10, 20, 30 e 36 ciclagens água-estufa.

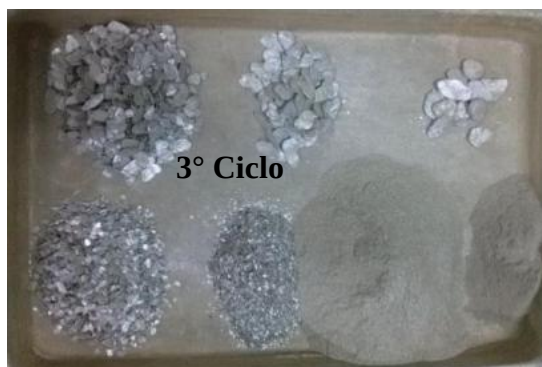


Figura 82 Frações do nível W4 após 3 ciclagens água-estufa.

A figura 83 apresenta a evolução do material ensaiado, em termos de porcentagem e do número de ciclos realizados.

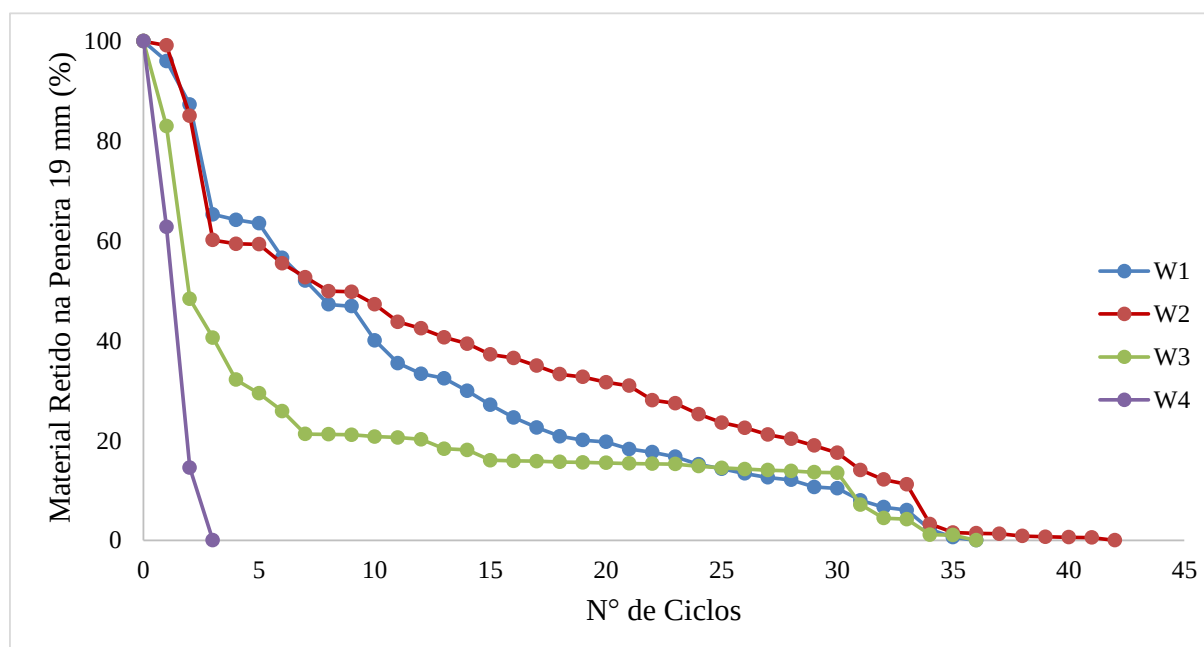


Figura 83 Frações dos níveis de alteração conforme execução da ciclagem água-estufa.

Conforme é observado na figura 83, os níveis de alteração exprimiram um comportamento esperado quanto à durabilidade, de uma forma geral. W1 após o sexto ciclo tendeu a apresentar uma durabilidade inferior a W2. No ciclo vigésimo sexto ciclo este comportamento se repetiu, porém em relação a W3. Ao final, W2 apresentou uma durabilidade levemente superior em relação a W1 e W3, sendo o nível de alteração com maior número de ciclos. Nos resultados obtidos pelo “*slake durability test*” W3 apresentou a maior durabilidade seguido de W2, W1 e W4. A presença de cimentos minerais nos planos de foliação parece influenciar a resposta à alterabilidade da rocha, tendo em vista que essa característica foi observada nas amostras ensaiadas. O nível W1, sem planos cimentados, representa unicamente a resistência à durabilidade da matriz e da mesma forma W4, possui grandes

aberturas e persistências em seus planos de foliação, além da matriz altamente alterada, favorecendo a sua alta desagregação (ensaio finalizado no terceiro ciclo).

Apesar de não ter sido feita uma avaliação qualitativa do ensaio (processos de lasqueamentos, rachaduras, fissuração e/ou desintegração) é possível observar, na figura 84, uma alternância do número de fragmentos, retidos na peneira de 19,0 mm, para cada nível, produzidos ao longo do ensaio.

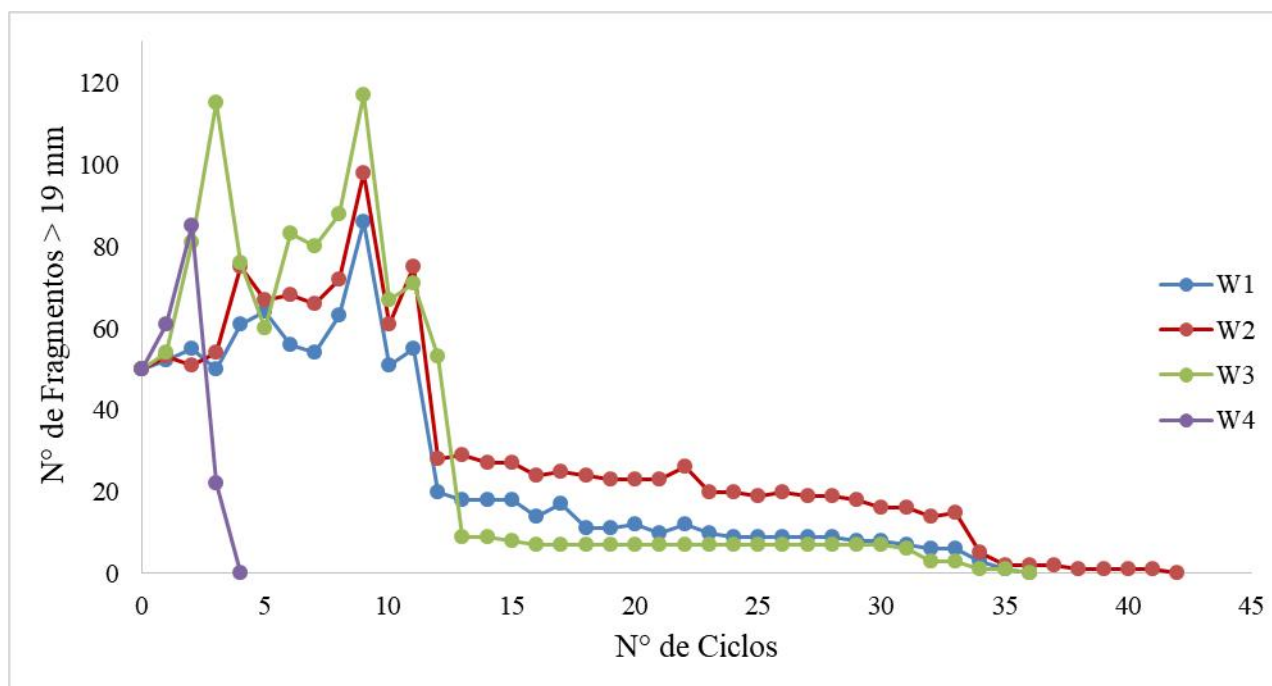


Figura 84 Frações dos níveis de alteração após períodos determinados de ensaio ciclagem água-estufa.

A alternância, entre mais e menos fragmentos prossegue até o décimo segundo ciclo, para W1 e W2 e, décimo terceiro ciclo, para W3, permanecendo menos expressiva até o término do ensaio. W4 apresentou comportamento atípico, em relação aos outros níveis, com rápida desagregação e fragmentação das amostras em partículas menores. Nota-se que o mecanismo principal atuante nas amostras é a fissuração ao longo da foliação da rocha e secundariamente a desintegração das amostras, principalmente das partes superficiais e arestas, dando um aspecto mais arredondado ou mesmo tabular aos fragmentos. Apesar da indicação do ensaio para medir processos de alteração, principalmente extremas, ele não representou isoladamente os processos de alteração que ocorrem nos filitos, sendo influenciado por materiais secundários presente nas discontinuidades.

A tabela 16 representa as frações granulométricas dos níveis de alteração, a cada 10 ciclos e último ciclo, ou seja, quando nenhum fragmento ficou retido no tamis de 19,0 mm. Com base nessa tabela foram elaboradas curvas granulométricas

a cada dez ciclos e ao último ciclo do ensaio para cada nível de alteração, de forma a avaliar a evolução das frações dos materiais ensaiados à medida que o ensaio de durabilidade progride. Esses resultados são apresentados nas figuras 85 a 88, para os níveis W1 a W4, respectivamente.

Tabela 16 Massas retidas nas peneiras após ensaio de ciclagem água-estufa.

Tabela 26: Massas Retidas nas Peneiras após Citaro de Selenio em Água Oxidada											
Amostra	MI (g)	MF (g)	Tamis (mm)								Ciclo
			19	12,5	9,5	4,76	2,0	0,5	0,053	<0,053 (Fundo)	
W1	1103,63	1072,00	442,18	132,86	33,09	42,94	43,46	53,3	240,92	83,25	10
W2	1632,24	1591,12	771,27	200,69	44,72	49,83	39,76	63,41	318,06	103,38	10
W3	954,79	933,88	227,46	172,65	58,85	83,73	45,14	30,65	191,25	124,15	10
W4	1108,84	1060,24	0,00	32,95	72,06	196,38	153,59	104,16	445,20	55,90	3
W1	1072,00	1056,82	217,42	172,51	24,99	62,96	76,78	108,69	470,01	32,02	20
W2	1591,12	1574,01	516,62	221,83	45,42	55,40	69,45	119,34	659,10	41,10	20
W3	933,88	925,93	148,06	176,64	59,89	96,82	55,26	39,13	325,27	58,32	20
W4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
W1	1056,82	1041,68	114,98	146,15	28,24	64,81	76,78	108,69	470,01	32,02	30
W2	1574,01	1553,11	285,97	271,95	41,26	64,94	69,45	119,34	659,10	41,10	30
W3	925,93	896,48	129,27	148,02	47,03	94,18	55,26	325,27	325,27	58,32	30
W4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
W1	1041,68	1379,58	0,00	220,69	49,02	74,47	85,61	152,62	747,93	49,24	36
W2	1553,11	1028,15	0,00	157,67	29,36	60,13	78,07	127,82	506,25	68,85	42
W3	896,48	842,49	0,00	193,22	46,81	93,71	57,28	40,71	286,11	124,65	36
W4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Legenda: MI: Massa Inicial; MF Massa Final.

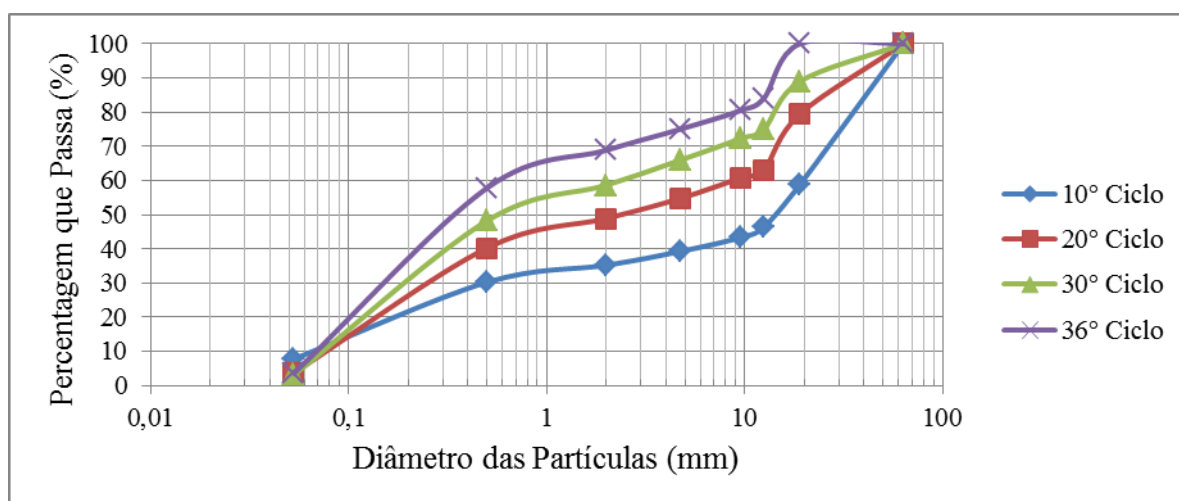


Figura 85 Curvas granulométricas para amostras W1 em ensaio de ciclagem água-estufa.

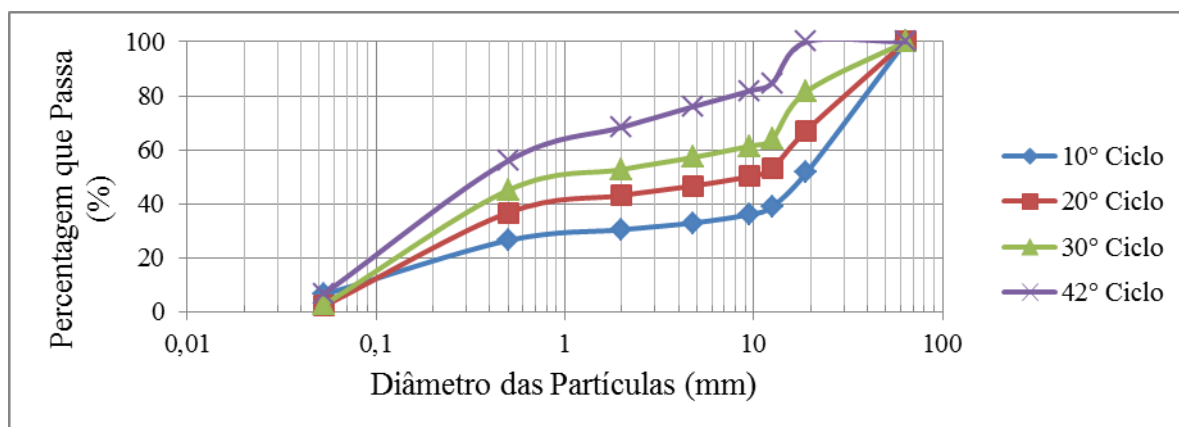


Figura 86 Curvas granulométricas para amostras W2 em ensaio de ciclagem água-estufa.

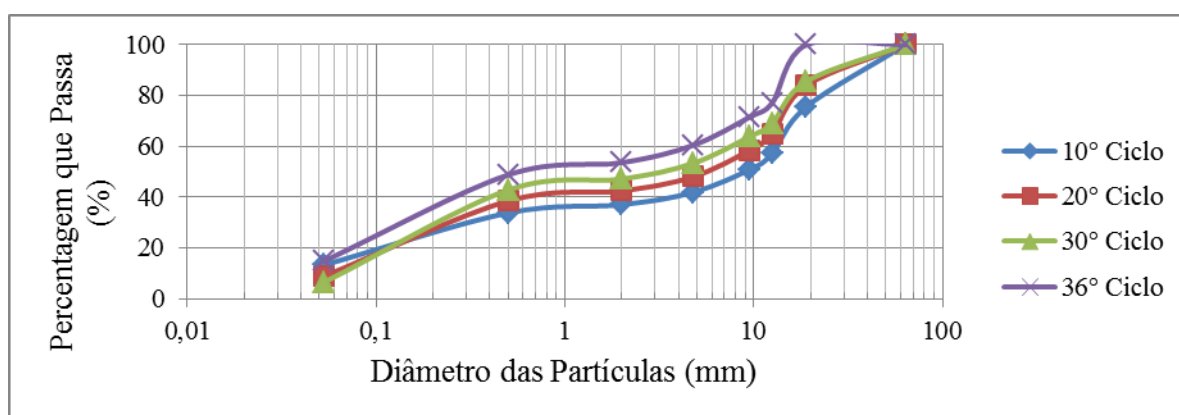


Figura 87 Curvas granulométricas para amostras W3 em ensaio de ciclagem água-estufa.

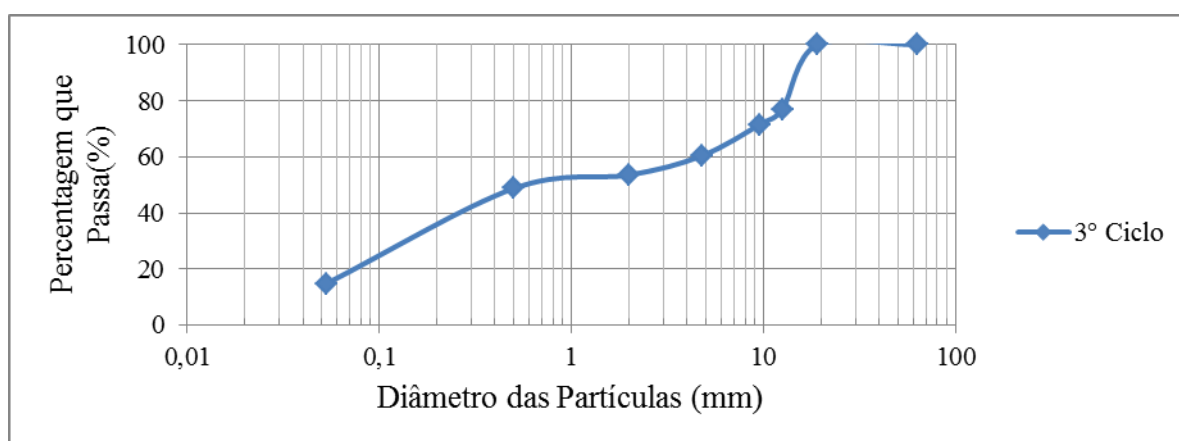


Figura 88 Curvas granulométricas para amostras W4 em ensaio de ciclagem água-estufa.

Analisando as curvas granulométricas dos níveis de alteração nota-se que a durabilidade da rocha diminui conforme aumenta o número de ciclos a que são submetidos, havendo aumento das frações finas (diâmetro da partícula < 2,0 mm) pela desintegração das amostras. A diferença das massas iniciais e finais entre os ciclos pode ser explicada devido à perda de materiais muito finos (< 0,053 mm) durante o ensaio.

Devido às dimensões finais dos fragmentos, não foi possível realizar ensaios físicos complementares e mecânicos. Entretanto, Santiago (2008) afirma que em ensaios de ciclagem água-estufa para filitos sericíticos, notou-se redução das massas específicas seca e saturada e aumento da porosidade e capacidade de absorção d'água, conforme evolução dos ciclos. Em termos mineralógicos houve a brusca redução da concentração de muscovita frente a outros minerais como o quartzo.

5.11 Ensaio de Lixiviação em Rocha por Extrator Soxhlet

Conforme mencionado na metodologia desse ensaio, não foi possível realizar o exame qualitativo das amostras, pelo mesmo motivo apresentado no ensaio de ciclagem água estufa, conforme pode ser evidenciado nas figuras 89 a 91.

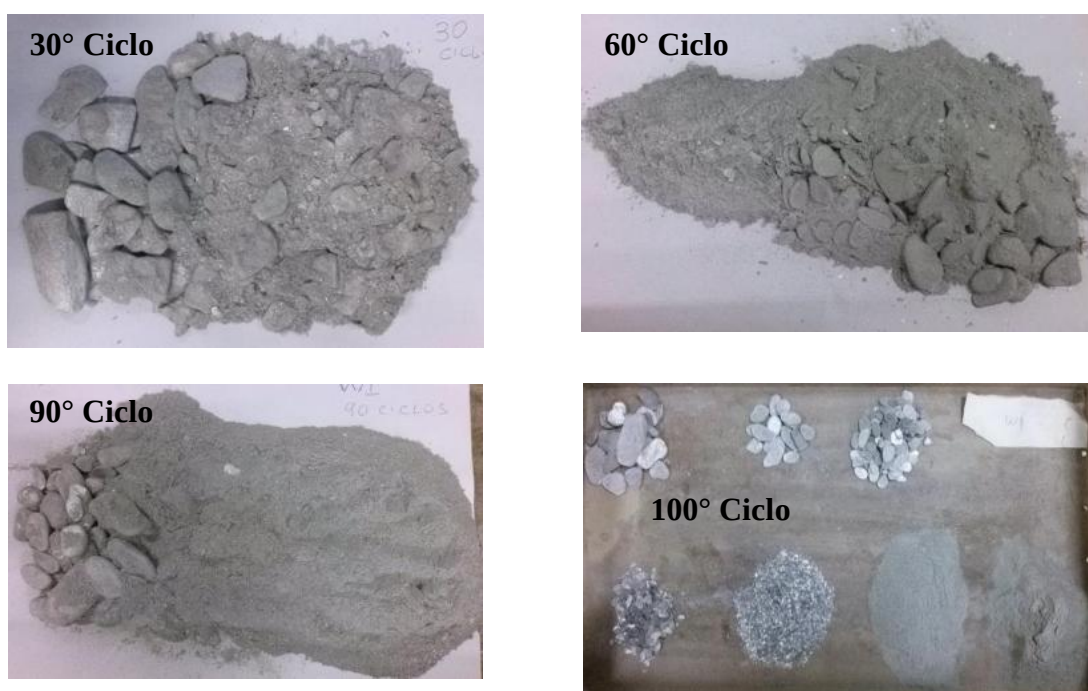


Figura 89 Amostras W1 após 30, 60, 90 e 100 ciclos por extrator Soxhlet.



Figura 90 Amostras W2 após 30, 60, 90 e 100 ciclos por extrator Soxhlet.



Figura 91 Amostras W3 após 30, 60, 90 e 100 ciclos por extrator Soxhlet.

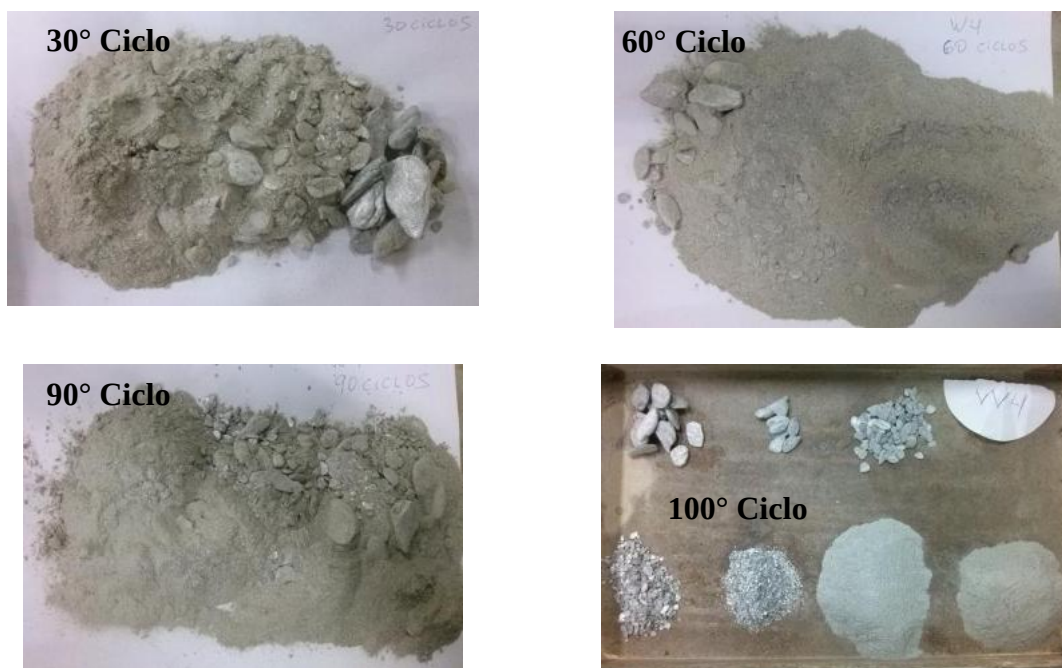


Figura 92 Amostras W4 após 30, 60, 90 e 100 ciclos por extrator Soxhlet.

De forma semelhante é apresentado, como para a ciclagem água-estufa (figura 93) a evolução do número de fragmentos retidos na peneira de malha 12,5 mm para os níveis de alteração, até a finalização do ensaio (100 ciclos) e a perda de massa das amostras durante esse processo (figura 94).

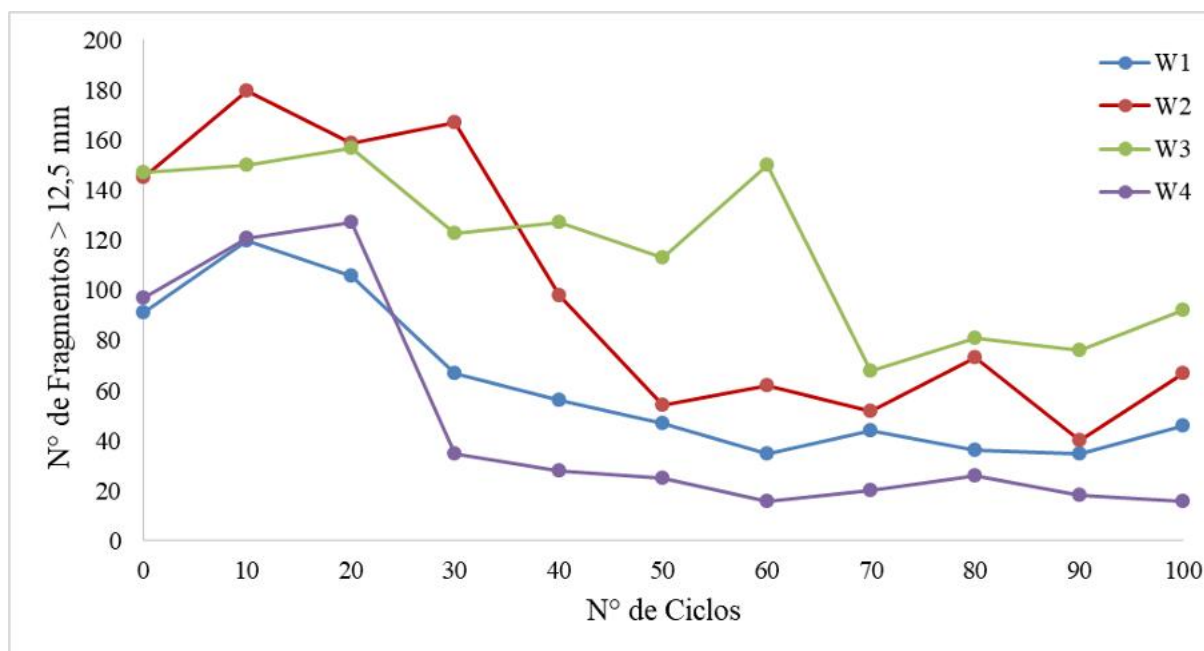


Figura 93 Variação do número de fragmentos ao longo do ensaio de lixiviação em rocha para W1 a W4.

Conforme observado na figura 93, ao contrário do ocorrido no ensaio de ciclagem água-estufa, as amostras se fragmentaram até aproximadamente o 30º ciclo, onde posteriormente o número de fragmentos reduziu drasticamente, possivelmente pelo deslocamento das amostras. A presença de níveis cimentados, em maior quantidade em W3, pode ter retardado a alterabilidade.

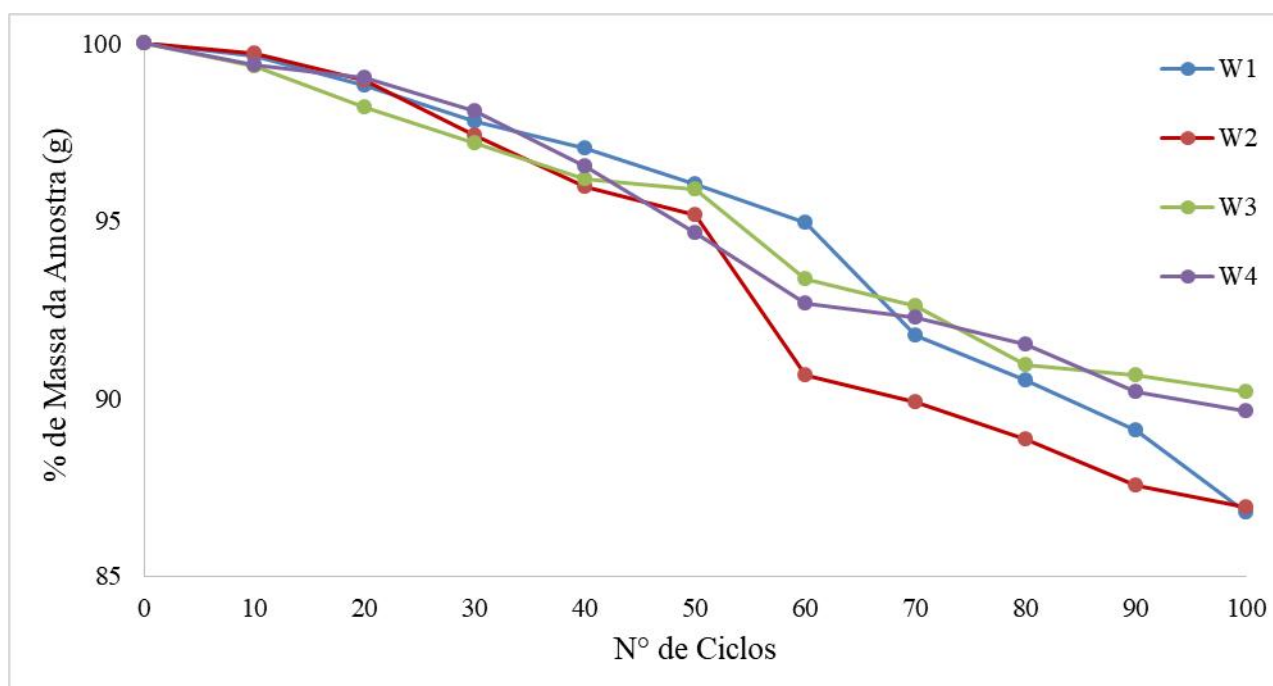


Figura 94 Evolução da massa dos quatro níveis de alteração ao longo de 100 ciclos.

A figura 94 mostra em termos de porcentagem da massa inicial para os quatro níveis de alteração ao longo dos 100 ciclos realizados. Apesar da utilização de papel filtro no ensaio houve perda de 10 a 15% da massa inicial das amostras, onde a amostra W1 perdeu mais em relação a W4. Tal fato pode ser justificado pela ausência de níveis cimentados em W1. Em ensaios de ciclagem água-estufa essa perda pode chegar a 67 % da massa inicial para filitos sericíticos (SANTIAGO, 2008).

Assim como no ensaio de ciclagem água-estufa, foram elaboradas curvas granulométricas, a cada 10 ciclos, para avaliar a evolução da durabilidade ao longo dos ciclos. Os resultados são apresentados nas figuras 95 a 98, para W1 a W4 respectivamente.

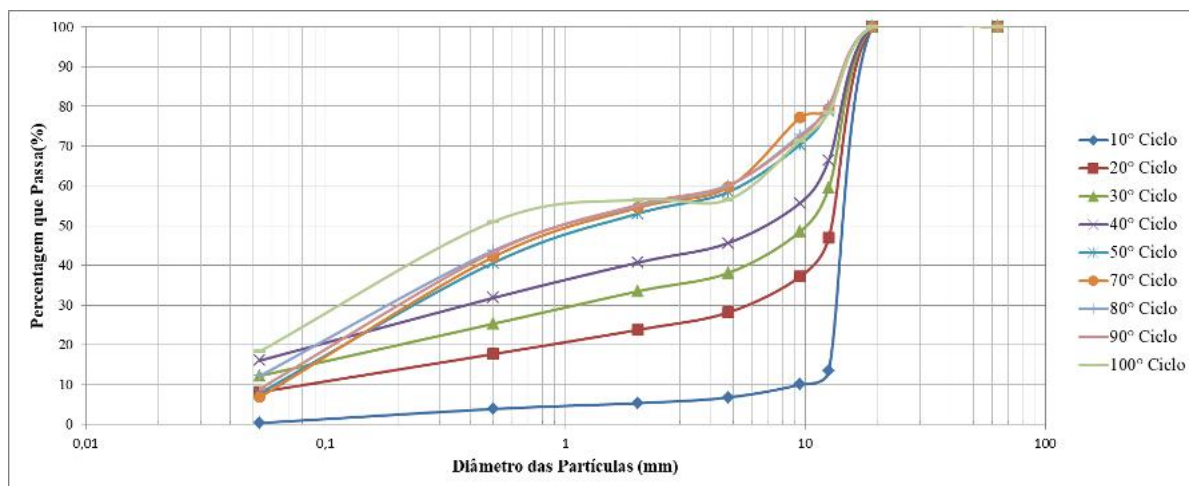


Figura 95 Curvas granulométricas de amostras W1 a cada 10 ciclos do ensaio de lixiviação em rocha.

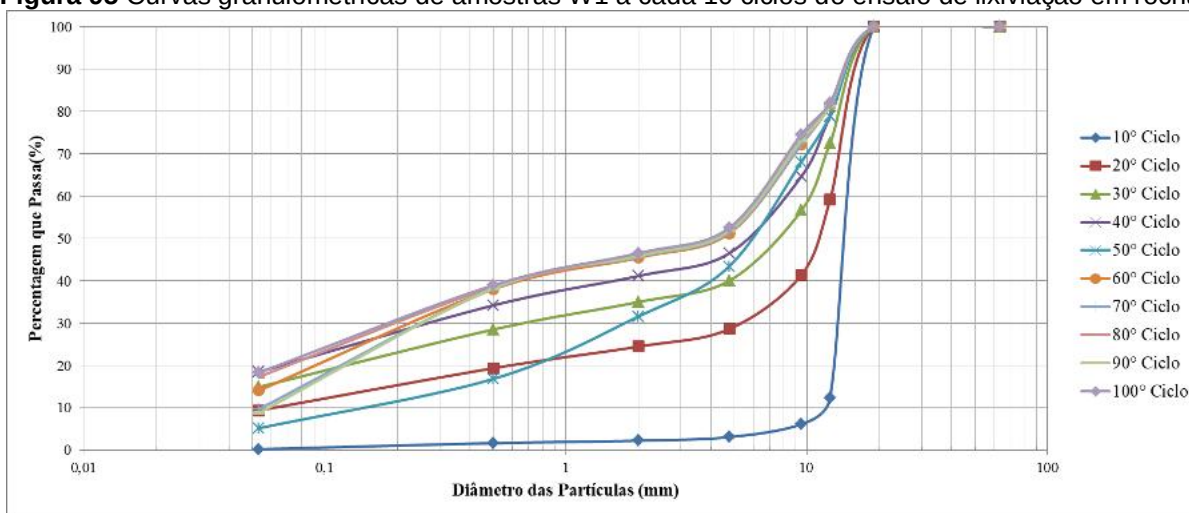


Figura 96 Curvas granulométricas de amostras W2 a cada 10 ciclos de ensaio do lixiviação em rocha.

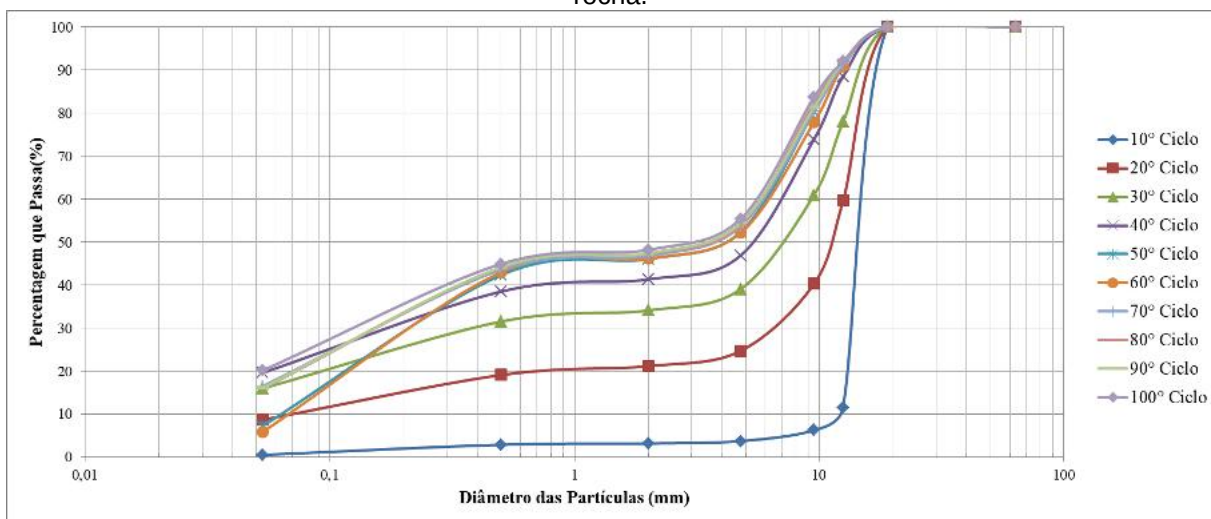


Figura 97 Curvas granulométricas de amostras W3 a cada 10 ciclos do ensaio de lixiviação em rocha.

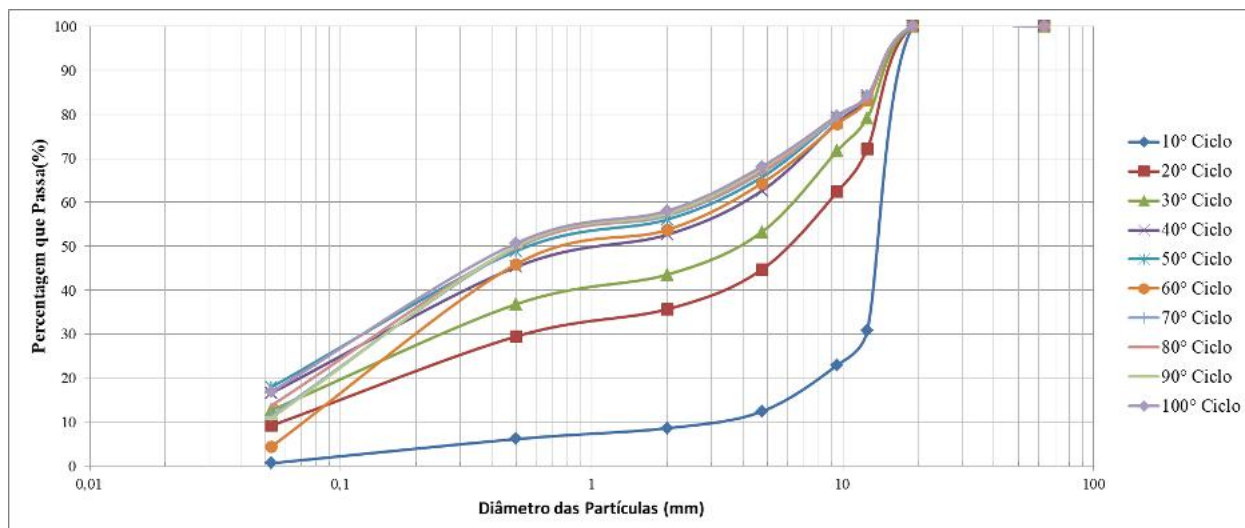


Figura 98 Curvas granulométricas de amostras W4 a cada 10 ciclos do ensaio de lixiviação em rocha.

Com base nas curvas granulométricas nota-se a grande atuação dos processos de degradação física nas amostras até o 40° ciclo, para todos os níveis, onde a partir daí as amostras tendem a apresentar curvas mais uniformes. O comportamento observado demonstra que a durabilidade dessas rochas é dependente, da presença de níveis cimentados e da superfície específica dos fragmentos ensaiados. A partir do 40° ciclo, conforme observado nas figuras 85 a 88, a formação de frações mais finas não é expressiva a partir de determinado ciclo, quando comparados aos ciclos iniciais dos ensaios.

Em amostras de mármore submetidas a ensaios de ciclagem, foram notadas pronunciadas reduções na coesão, cerca de 90% do valor inicial, e ângulo de atrito, conforme redução da durabilidade (MISCEVIC e VLASTELICA, 2014). Cabe ressaltar que devido a grande alterabilidade das amostras, a execução de ensaios físicos e mecânicos tornou-se inviável devido às dimensões remanescentes dos fragmentos, já que não atenderiam as prerrogativas das normas respectivamente.

5.12 Esclerometria de Schmidt

O valor de R obtido representou e diferenciou bem os níveis de alteração identificados em campo, havendo uma redução crescente desse índice conforme a progressão do intemperismo. Esse comportamento foi observado tanto na condição in situ quanto nos ensaios executados em blocos de rocha no laboratório, conforme apresentado nas figuras 99 e 100, além das tabelas 17 e 18, respectivamente. No

caso das amostras ensaiadas em laboratório, cada linha representa um bloco de rocha ensaiado.

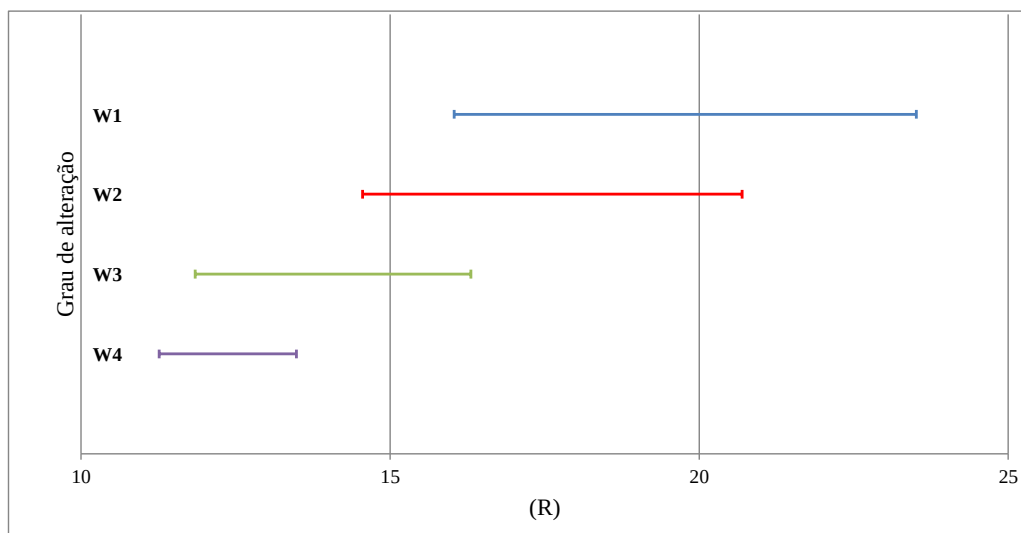


Figura 99 Esclerometria executada in situ, ortogonalmente à foliação, para os níveis de alteração.

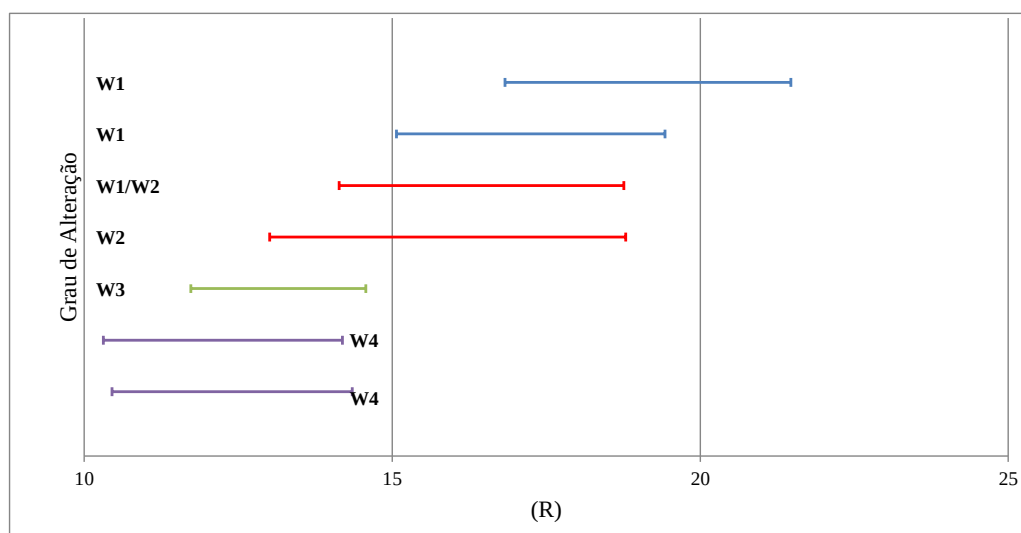


Figura 100 Esclerometria executada em laboratório, ortogonalmente à foliação, para os níveis de alteração.

Tabela 17 Valores de R obtidos em afloramento rochoso.

Grau de Alteração	Valor Mínimo	Valor Máximo	Média (20 medidas)	Desvio Padrão (%)	Coefficiente de Variação
W1	17,0	29,5	19,78	3,84	19,44
W2	11,5	23,0	17,63	3,15	17,89
W3	12,0	17,5	14,08	2,29	16,27
W4	10,5	14,5	12,38	1,15	9,26

Tabela 18 Valores de R obtidos em blocos rochosos

Grau de Alteração	Valor Mínimo	Valor Máximo	Média (20 medidas)	Desvio Padrão (%)	Coefficiente de Variação
W1	13,0	23,0	19,15	2,39	12,48
W1	12,0	21,0	17,25	2,24	12,99
W1/W2	12,0	20,0	16,45	2,37	14,41
W2	10,0	22,0	15,90	2,97	18,68
W3	11,0	18,0	13,15	1,46	11,10
W4	10,0	16,0	12,25	1,99	16,24
W4	10,0	17,0	12,4	2,01	16,21

A anisotropia mecânica pode ser avaliada pela realização do ensaio em direções diferentes em relação à foliação da rocha, cabendo ressaltar que em ensaios não horizontais ocorre a influência da gravidade (BASU e AYDIN, 2004; AYDIN e BASU, 2005). Os valores de R refletiram o efeito da alteração sobre a dureza superficial das classes de alteração identificadas no talude quando a esclerometria executada foi ortogonal à foliação. Em ensaios realizados no sentido paralelo à foliação os valores de R não foram representados na escala do esclerômetro ($R < 10$).

Alguns aspectos das rochas ensaiadas podem influenciar nos valores de R, como por exemplo, o grau de polimento da rocha, a presença de planos de foliação, existência de superfícies soltas na execução do ensaio, a penetração da ponteira em materiais muito alterados e friáveis, a heterogeneidade do mesmo. Quando executado em laboratório, deve-se ainda garantir a estabilidade da amostra (KATZ et al., 2000).

Os valores de R, nos filitos estudados, reproduziram bem a variação da dureza superficial conforme evolução do grau de alteração. Nos níveis W1 a W4 há certo aumento da porcentagem de quartzo e redução da porcentagem de mica, conforme o avanço da alteração. Esse dado acompanha a redução do valor de R, mostrando que neste caso a ação de processos intempéricos condiciona mais a dureza da rocha do que a própria mineralogia.

Em rochas duras, como granitos, é recomendada a repetição de múltiplos impactos sobre um mesmo ponto (AYDIN e DUZGOREN-AYDIN, 2002). Para os filitos estudados esse procedimento modifica as características da superfície de aplicação, não sendo adequado. Greco e Sorriso-Valvo (2005) realizaram muitas medições de esclerometria, considerando a influência das características das descontinuidades do maciço. Para os quatro grupos de rochas estudados: (i) rochas

plutônicas, (ii) rochas de baixo a médio grau metamórfico (filitos e argilitos), (iii) augen gnaisses e (iv) de médio a alto grau metamórfico (xistos, gnaisses, anfibolitos e migmatitos), apenas as rochas cristalinas mostraram baixa influência das descontinuidades, sendo maiores dependentes dessas características as rochas foliadas. Neste caso, recomenda-se executar o ensaio sobre uma malha desenhada em superfície regular da rocha, com pontos de aplicação afastados entre si, de 5 a 10 cm, conforme as condições encontradas.

5.13 “Point Load Test” – PLT

Foram executados ensaios de compressão puntiforme nos níveis de alteração estudados, sendo ainda acrescentado o nível W2 (Foliação), que possui horizontes com preenchimentos minerais nas foliações da rocha. Os resultados são apresentados na figura 101 e na tabela 19. Os valores das médias foram calculados conforme ISRM (1981), excluindo os dois valores maiores e os dois menores do ensaio.

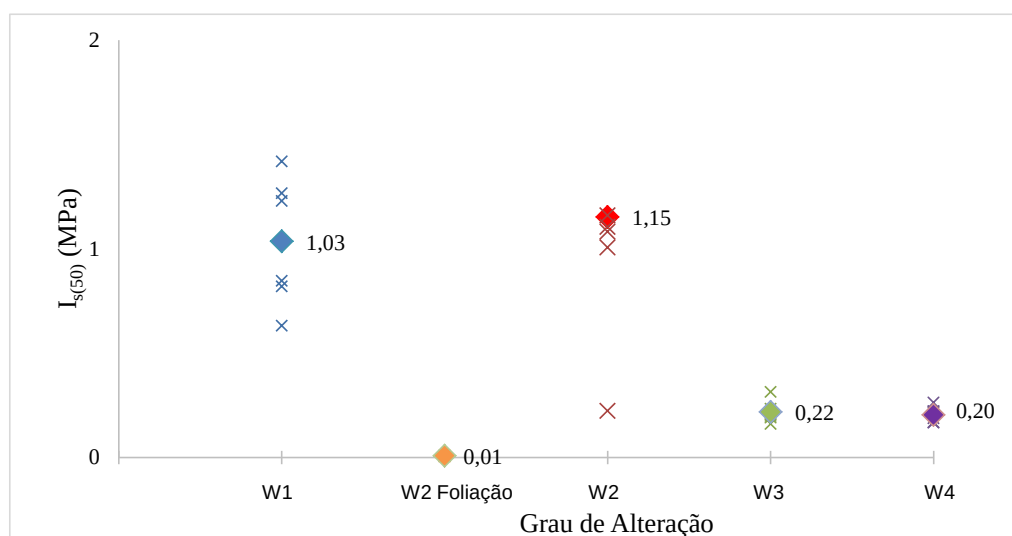


Figura 101 Valores de $I_{s(50)}$ determinados para os níveis de alteração existentes no filito.

Tabela 19 Valores de $I_{s(50)}$ (MPa) para os níveis de alteração.

Grau de Alteração	Valor Mínimo	Valor Máximo	Média (6 medidas de 10 ensaios - ISRM, 1981)	Desvio Padrão (%)	Coefficiente de Variação
W1	0,63	1,42	1,03	0,31	30,02
W2	0,22	2,35	1,15	0,51	44,40
W2 Foliação	0,01	0,01	0,01	0,00	15,40
W3	0,16	0,31	0,22	0,05	22,40
W4	0,17	0,26	0,20	0,03	14,74

Com base nos valores de $I_{s(50)}$ nota-se um decréscimo de resistência à medida que o grau de alteração avança. Observa-se uma grande diferença entre os resultados das classes W2 e W2 (Foliação). Essa distinção de comportamento é resultante da espessura de material de preenchimento existente ao longo da foliação. Amostras de W2 Foliação apresentaram o pior valor de $I_{s(50)}$ conforme a espessura desse preenchimento aumenta. A existência desses materiais de preenchimento facilita a penetração dos cones do equipamento na rocha, em torno de 0,3 a 0,6 cm (figura 102a), havendo necessidade de correção dos valores calculados. No nível W2 (Foliação), as passagens compostas essencialmente por filito oferecem alguma resistência, havendo propagação da fratura rapidamente nas passagens com material de preenchimento ao longo das foliações (figura 102b).

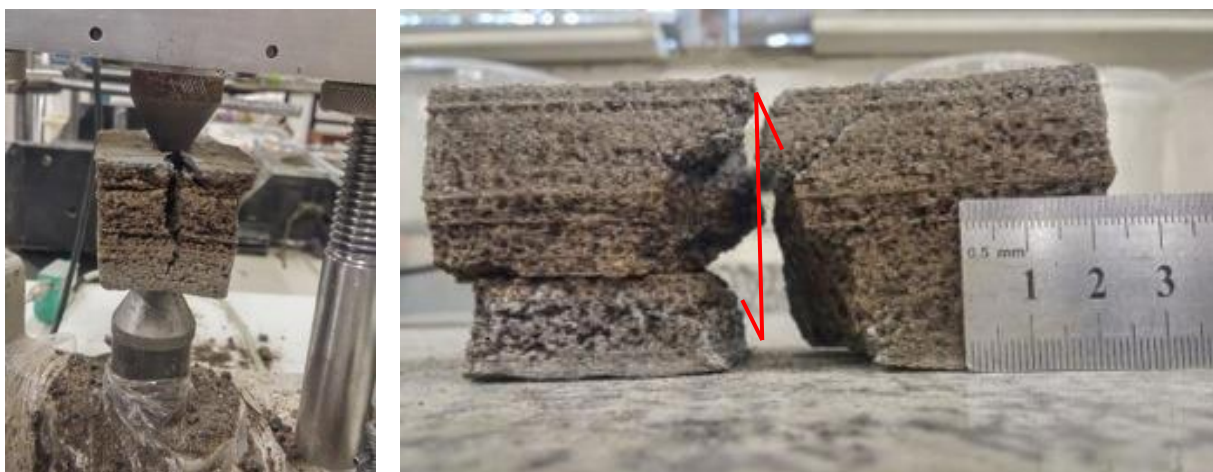


Figura 102 (a) Execução de PLT em classe W2 (Foliação); notar elevada penetração do cone na amostra. (b) Amostra de W2 Foliação após ensaio.

Marques e Williams (2015) obtiveram, para diversos graus de alteração dos filitos Bunya (Austrália), níveis W2 a W4 (ISRM, 2015), de semelhantes características físicas, valores 20 % maiores comparados ao presente estudo, evidenciando a grande heterogeneidade dos filitos.

A ISRM (2015) propõe a correlação linear empírica entre a resistência a compressão uniaxial (q_u) e a resistência à compressão puntiforme de $q_u = 24 I_{s(50)}$. Para filitos, esta relação se mostra inadequada. Estudos de Salcedo (1983) e Look & Griffiths (2001), demonstram que a correlação entre esses dois parâmetros seria cinco vezes menor que a proposta pela ISRM (2015), ou seja, $q_u = 5 I_{s(50)}$, independente do grau de alteração, classificando os filitos como brandos, mesmo para o nível são (W1).

5.14 Ensaio de Cisalhamento Direto

São apresentados os resultados para os ensaios de cisalhamento direto, executados no sentido paralelo à foliação, para W1 a W4, além do subnível W2 Foliação, executados nas condições, natural e saturada.

5.14.1 Condição Natural

As figuras 103 a 107 apresentam os resultados para a máxima tensão cisalhante (τ) e normal (σ'_n), na ruptura, além do deslocamento horizontal (δ_h) e vertical (δ_v), para os graus de alteração, dentre os três corpos de prova (Cp) ensaiados, para cada tensão vertical de adensamento (σ'_v). Os resultados na íntegra, para os 72 Cps, são apresentados nas tabelas 20 a 24, incluindo a umidade medida no plano de cisalhamento (w).

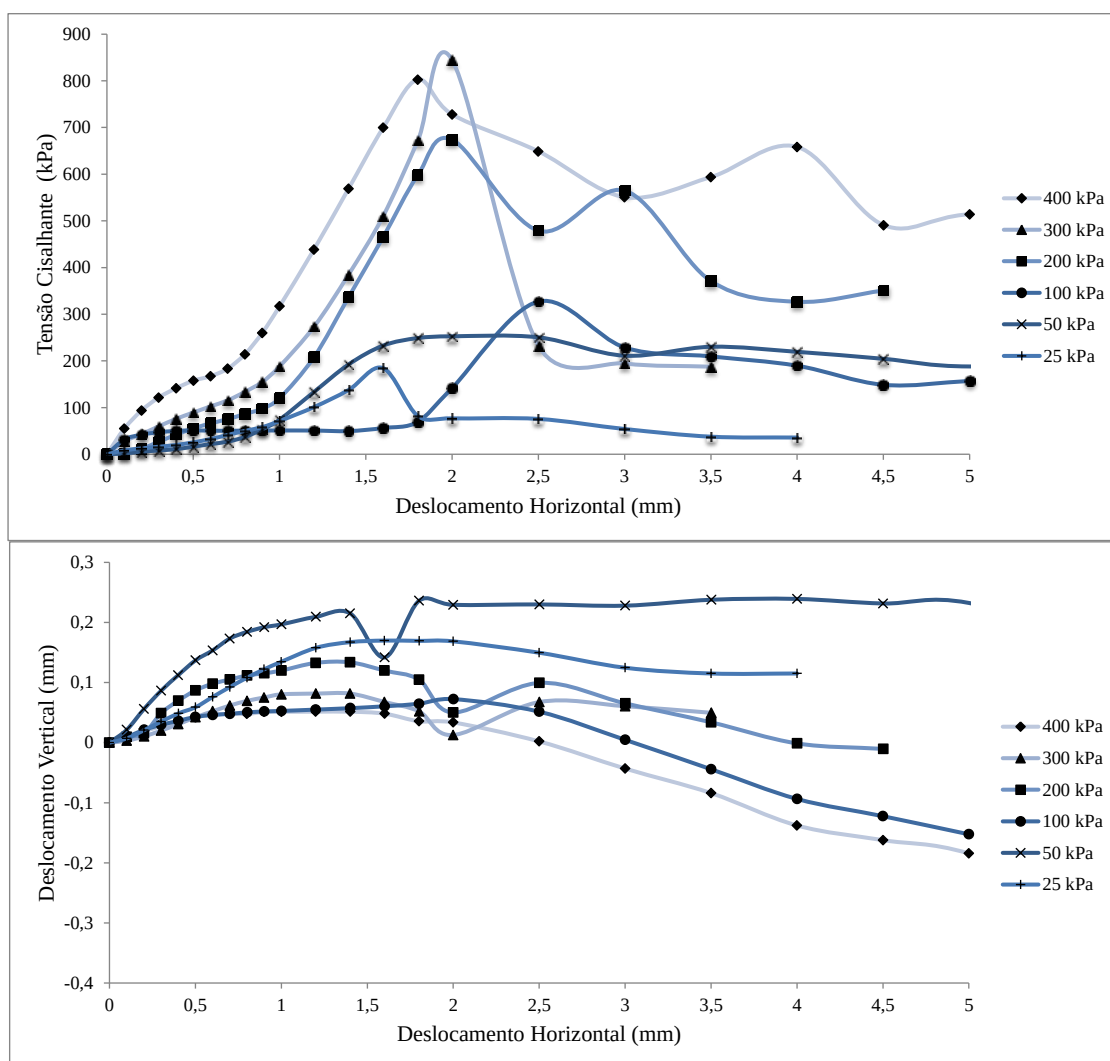


Figura 103 Resultados para condição natural, relacionando $\tau \times \sigma'_n$ e δ_h para W1.

Tabela 20 Dados de resistência na ruptura obtidos para W1 a partir de 18 Cps

CP	1	2	3	4	5	6	7	8	9
σ'_v (kPa)		400			300			200	
σ'_n (kPa)	413,92	443,91	430,26	319,36	333,54	314,59	214,90	213,26	209,57
τ (kPa)	586,07	802,70	493,17	358,92	844,85	254,38	386,79	673,94	304,55
δ_h (mm)	1,60	1,80	1,40	2,00	2,00	1,20	1,40	2,00	1,20
w (%)	1,34	0,34	0,93	1,58	1,12	0,13	0,85	1,07	0,53
CP	10	11	12	13	14	15	16	17	18
σ'_v (kPa)		100			50			25	
σ'_n (kPa)	105,49	107,59	104,58	53,19	57,33	57,58	27,25	27,18	25,89
τ (kPa)	327,23	269,82	256,00	252,74	189,67	46,41	75,37	124,91	184,65
δ_h (mm)	2,50	2,50	3,50	2,00	1,60	1,80	2,00	1,80	1,60
w (%)	0,35	0,32	0,16	3,87	1,46	4,21	0,22	0,61	0,37

As amostras de W1 (figura 103) apresentaram uma queda acentuada da tensão pós pico de resistência, evidenciando um comportamento frágil, principalmente para as tensões normais mais elevadas (400 kPa a 200 kPa), em torno de $\delta_h = 2$ mm a 2,5 mm. Na tensão de 100 kPa a amostra apresentou um pico anterior à tensão pós-pico, provavelmente pela quebra de porção resistente da foliação. Em tensões normais mais baixas (50 kPa e 25 kPa) as amostras não apresentaram pico máximo pronunciado, denotando um comportamento tendendo ao dúctil. Na relação δ_h e δ_v , todos os CPs mostraram suave expansão até a tensão de pico ($\delta_h = 2$ mm e 1,5 mm para 50 kPa, aproximadamente). Cabe ressaltar que para as amostras submetidas às tensões de 400 kPa, 300 kPa, 200 kPa e 50 kPa houve contração (entre $\delta_h = 3$ mm e 4 mm) posterior a ruptura.

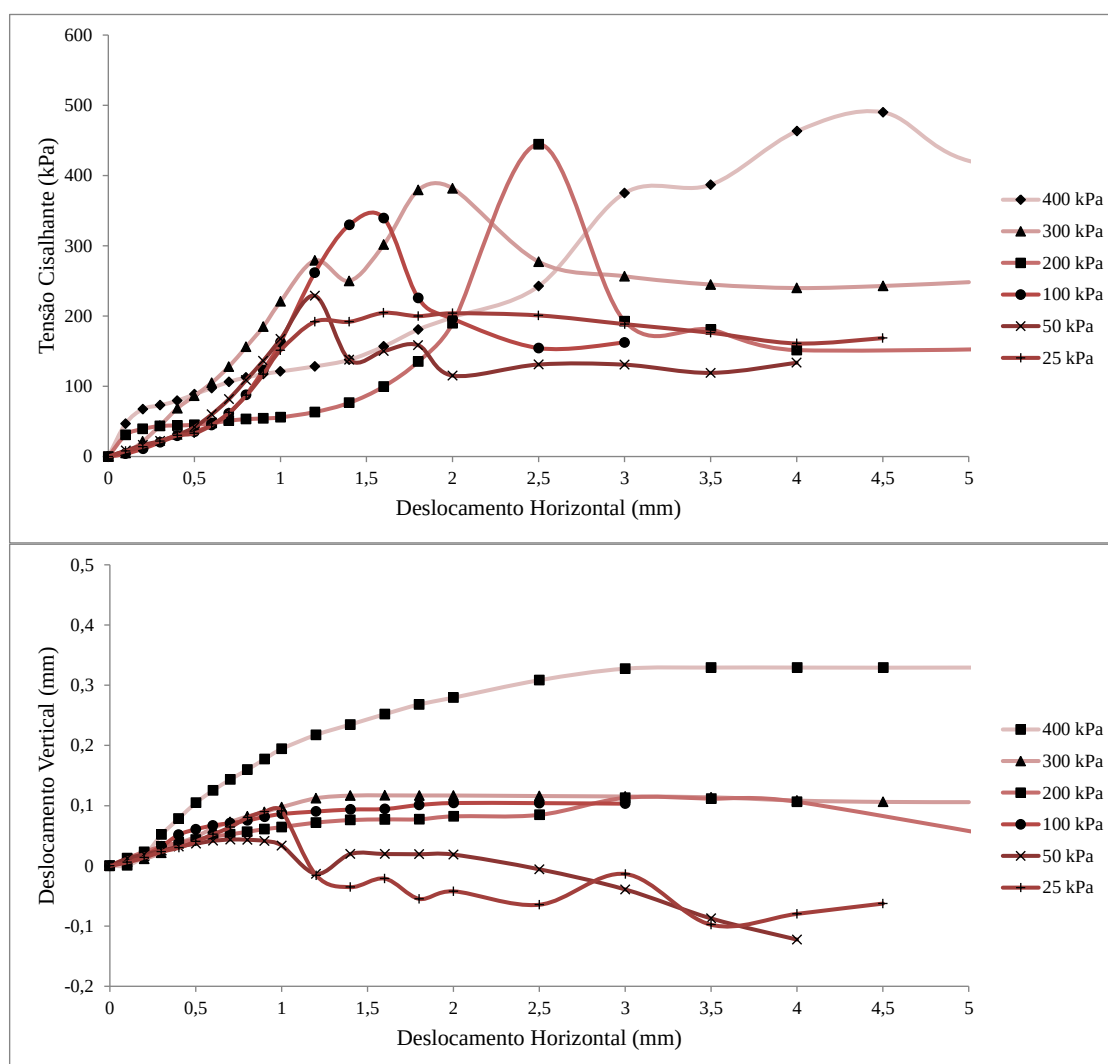


Figura 104 Resultados para condição natural, relacionando τ x σ'_n e δ_h para W2.

Tabela 21 Dados de resistência na ruptura obtidos para W2 a partir de 12 Cps

CP	1	2	3	4	5	6	7	8	9
σ'_v (kPa)		400			300			200	
σ'_n (kPa)	-	502,35	508,47	-	356,78	329,15	-	226,58	211,08
τ (kPa)	-	489,94	382,61	-	381,76	361,76	-	254,12	444,45
δ_h (mm)	-	4,50	2,00	-	2,00	1,40	-	1,80	2,50
w (%)	-	0,11	0,27	-	1,00	0,33	-	0,63	0,32
CP	10	11	12	13	14	15	16	17	18
σ'_v (kPa)		100			50			25	
σ'_n (kPa)	-	105,71	110,03	-	57,41	55,37	-	25,88	28,09
τ (kPa)	-	339,16	189,54	-	143,44	158,46	-	170,86	204,51
δ_h (mm)	-	1,60	1,60	-	2,50	1,80	-	1,60	1,60
w (%)	-	0,19	0,69	-	0,46	0,30	-	0,89	0,11

Com base na figura 104, as amostras de W2 apresentaram tensões de pico reduzidas em relação a W1 e de uma forma geral, picos secundários ao longo do ensaio, possivelmente pela quebra da foliação. As amostras, no geral, exibiram um

comportamento frágil. As relações entre δ_h e δ_v , mostraram expansão nos Cps para σ'_v superiores a 100 kPa e contração para valores inferiores a mesma.

Já o subnível W2 Foliação (figura 105) os valores de tensão de pico foram muito superiores aos obtidos para W2 e inclusive W1, apresentando picos pouco pronunciados, mas ainda de caráter frágil. Na tensão de 400 kPa é possível notar ($\delta_h = 1$ mm) uma quebra no plano da foliação durante o cisalhamento. Cabe ressaltar que a maior tensão de pico foi obtida com σ'_v de 300 kPa até 100 kPa e posteriormente a de 400 kPa. As relações entre δ_h e δ_v demonstram que todas as amostras, excetuando a de 300 kPa, apresentaram contínua contração, a partir de $\delta_h = 1$ mm. Esse comportamento representa não só a grande heterogeneidade das amostras de W2 Foliação ensaiadas (presença de níveis cimentados), como também para o próprio filito ensaiado.

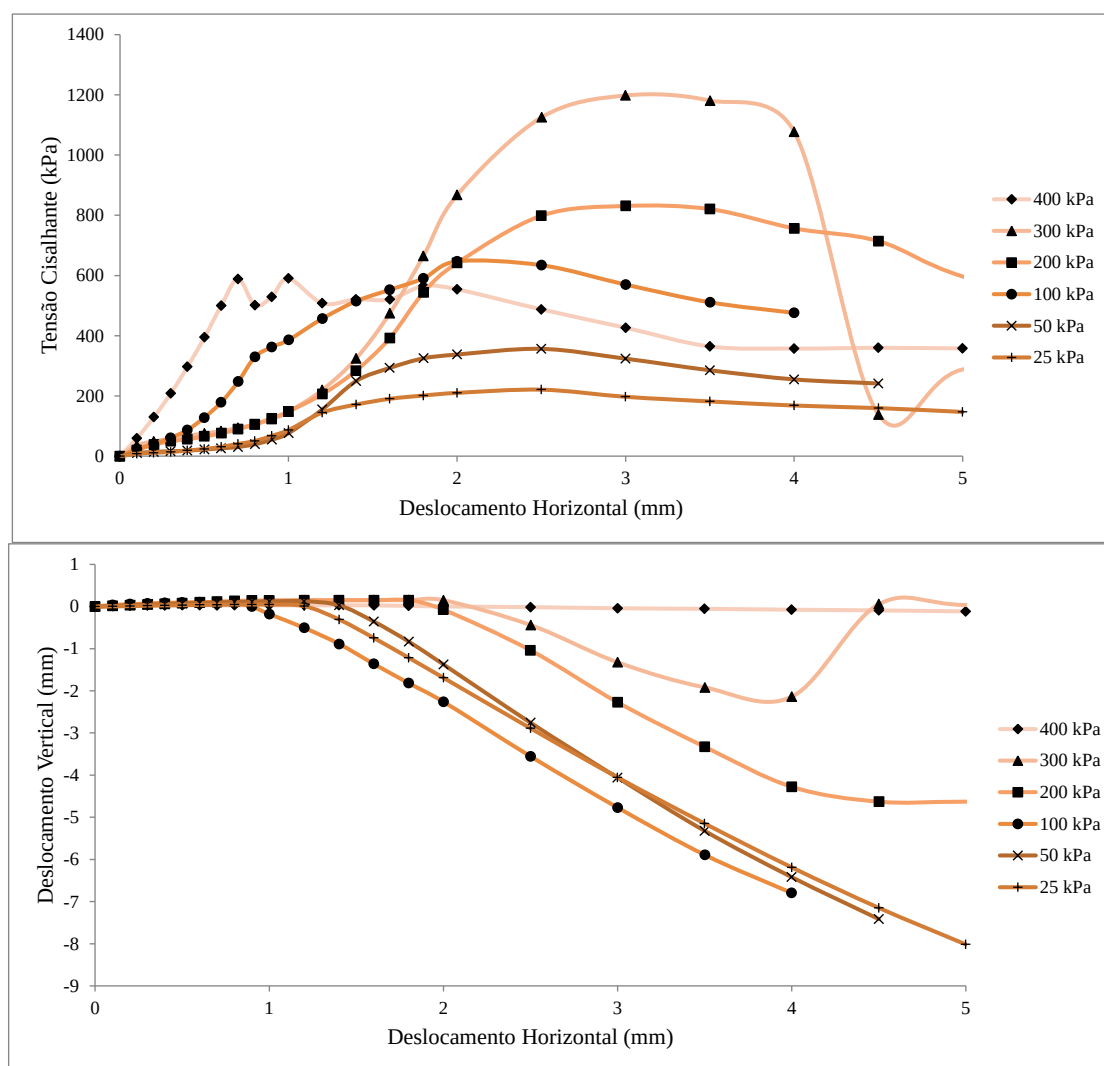


Figura 105 Resultados para condição natural, relacionando $\tau \times \sigma'_n$ e δ_h para W2 Foliação.

Tabela 22 Dados de resistência na ruptura obtidos para W2 Foliação a partir de 6 Cps

CP	1	2	3	4	5	6	7	8	9
σ'_v (kPa)		400			300			200	
σ'_n (kPa)	433,82	-	-	341,40	-	-	218,00	-	-
τ (kPa)	590,05	-	-	1197,75	-	-	830,89	-	-
δ_h (mm)	1,00	-	-	3,00	-	-	3,00	-	-
w (%)	0,95	-	-	1,94	-	-	0,45	-	-
CP	10	11	12	13	14	15	16	17	18
σ'_v (kPa)		100			50			25	
σ'_n (kPa)	118,73	-	-	56,24	-	-	26,95	-	-
τ (kPa)	647,13	-	-	356,39	-	-	220,88	-	-
δ_h (mm)	2,00	-	-	2,50	-	-	2,50	-	-
w (%)	0,47	-	-	0,50	-	-	0,87	-	-

Os resultados para W3 (figura 106) mostraram a mesma tendência observada em W1 e W2, porém com tensões de pico superiores em relação a ambos, em torno de 1 mm a 2 mm (δ_h). Cabe ressaltar que esse comportamento não era esperado se for considerado apenas o efeito do intemperismo. Entretanto, o efeito da cimentação, observada na caracterização mineralógica e física parece influir sobre a resistência ao cisalhamento. Todas as amostras mostraram sutil expansão, excetuando aquelas submetidas a tensões de 25 kPa e 50 kPa, possivelmente influenciado pela proporção matriz alterada/planos cimentados.

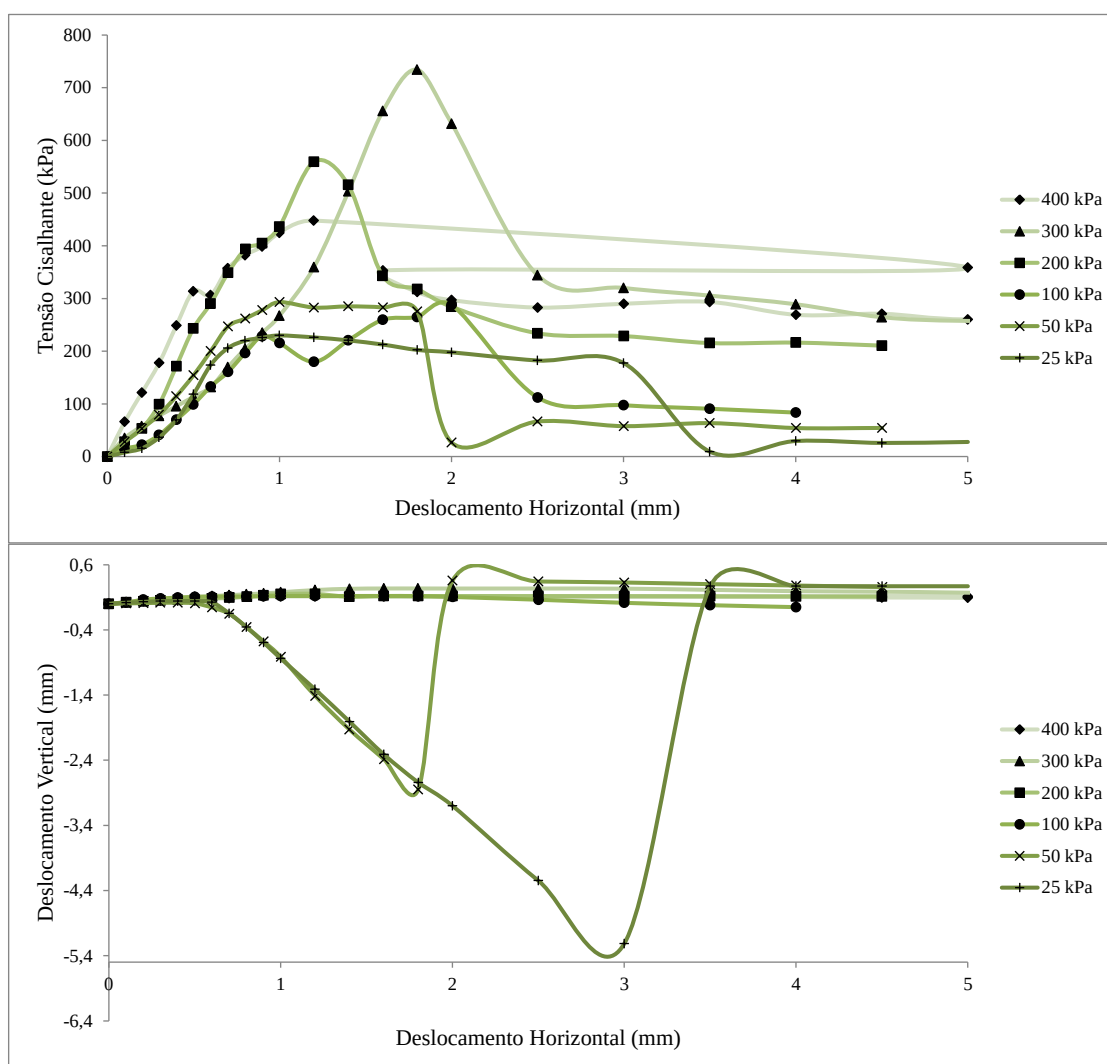


Figura 106 Resultados para condição natural, relacionando a $\tau \times \sigma'_n \delta_h$ para W3.

Tabela 23 Dados de resistência obtidos para W3 a partir de 18 Cps

CP	1	2	3	4	5	6	7	8	9
σ'_v (kPa)		400			300			200	
σ'_n (kPa)	405,36	454,09	444,39	365,91	346,01	344,51	206,97	212,45	201,13
τ (kPa)	324,75	447,91	429,69	714,18	722,36	734,12	379,55	276,90	559,44
δ_h (mm)	0,70	1,20	1,20	2,50	2,00	1,80	1,60	0,90	1,20
w (%)	0,15	0,84	0,75	0,63	1,67	0,39	0,76	0,72	0,93
CP	10	11	12	13	14	15	16	17	18
σ'_v (kPa)		100			50			25	
σ'_n (kPa)	108,85	106,45	104,50	55,54	55,42	55,45	25,65	24,45	25,56
τ (kPa)	159,97	261,34	287,51	151,95	191,69	293,12	229,88	188,74	72,91
δ_h (mm)	2,00	1,00	2,00	2,00	0,90	1,00	1,00	0,80	1,00
w (%)	1,08	1,03	1,37	0,48	6,04	4,41	1,20	0,06	0,89

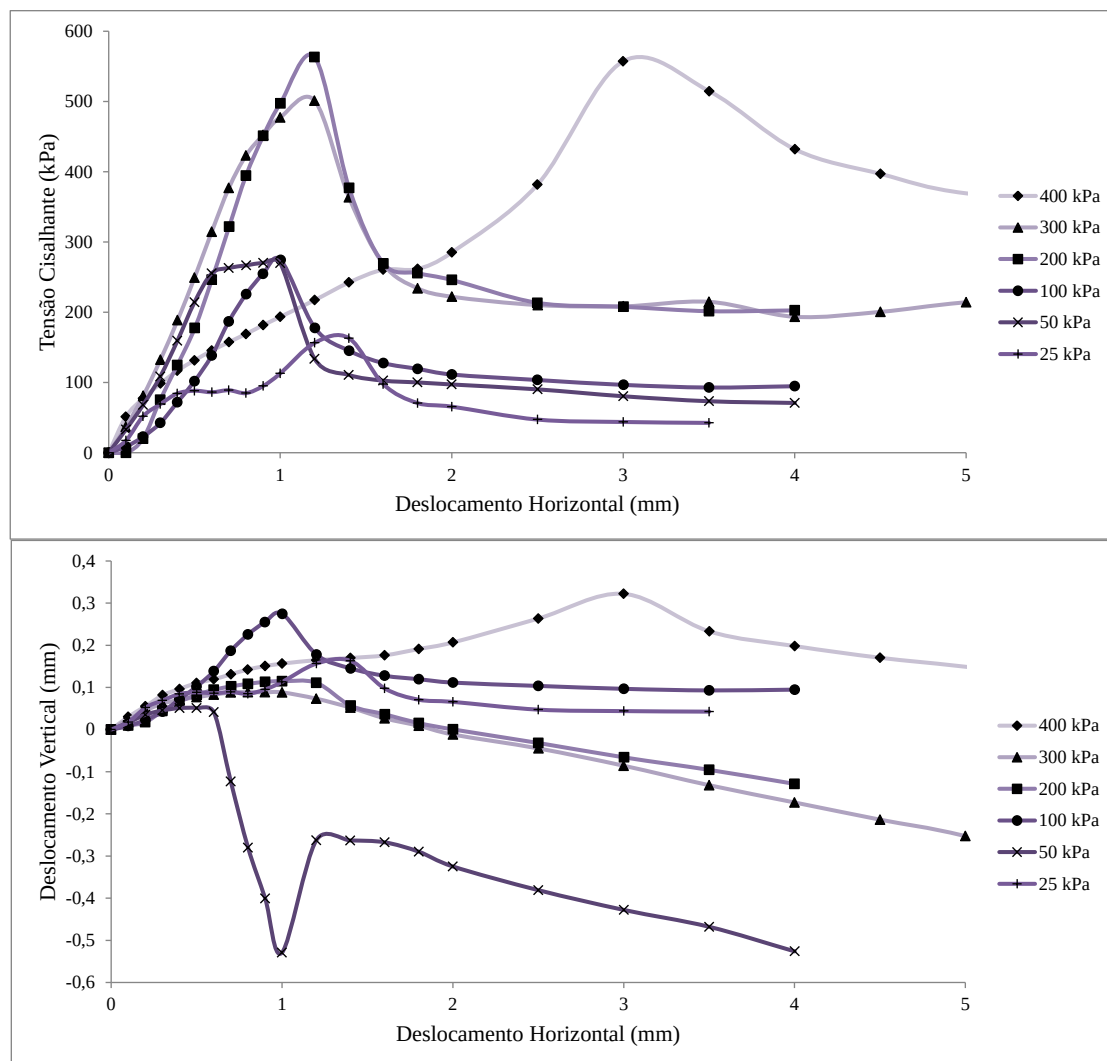


Figura 107 Resultados para condição natural, relacionando a τ x σ'_n e δ_h para W4.

Tabela 24 Dados de resistência na ruptura obtidos para W4 a partir de 18 Cps

CP	1	2	3	4	5	6	7	8	9
σ'_v (kPa)		400			300			200	
σ'_n (kPa)	482,31	551,49	431,58	354,50	326,32	339,08	212,39	213,28	214,63
τ (kPa)	525,51	557,14	388,77	381,73	501,12	183,05	460,02	563,18	129,70
δ_h (mm)	2,00	3,00	1,20	2,00	1,20	0,90	1,00	1,20	0,50
w (%)	0,18	3,46	0,43	0,66	0,13	0,09	0,36	2,79	0,57
CP	10	11	12	13	14	15	16	17	18
σ'_v (kPa)		100			50			25	
σ'_n (kPa)	117,52	100,94	108,46	53,81	54,04	55,43	27,54	26,49	27,93
τ (kPa)	274,34	142,15	123,32	218,55	141,21	270,37	139,65	102,25	163,03
δ_h (mm)	1,00	0,50	1,00	0,60	0,80	0,90	0,60	0,80	1,40
w (%)	0,84	0,56	1,21	0,18	0,33	0,33	0,33	0,45	0,44

Os resultados de W4 mostraram mais uniformidade em termos de δ_h (0,5 mm a 1,0 mm) para a ocorrência da tensão máxima de pico, excetuando para 400 kPa ($\delta_h = 3$ mm). As amostras exibiram ainda um comportamento mais frágil, mesmo que para esse nível de alteração seria esperado uma resposta dúctil (FERREIRA, 2004). As amostras, no geral, mostraram expansão até a tensão de pico e posteriormente

contração, excetuando na tensão de 50 kPa, com brusca contração e posterior expansão ($\delta h = 1$ mm). Apesar do elevado estado de alteração da matriz este grau de alteração conseguiu obter tensões cisalhantes próximas aos outros níveis, sendo possivelmente influenciada pela presença de níveis cimentados em sua foliação.

A figura 108 exhibe as superfícies de foliação cisalhadas. Nota-se que a progressão do intemperismo propicia um aumento de oxidações e cimentações, oriundas provavelmente da percolação de fluidos mineralizados pelas descontinuidades. No caso de W2 Foliação, o material de preenchimento parece ser oriundo de processo distinto que ocorre em W2 a W4, todavia sofreu efeitos do intemperismo juntamente com o filito. Esse preenchimento é provavelmente fruto da percolação/precipitação de fluidos ricos em ferro, de formações geológicas ferríferas que fazem contato com a Formação Batatal.

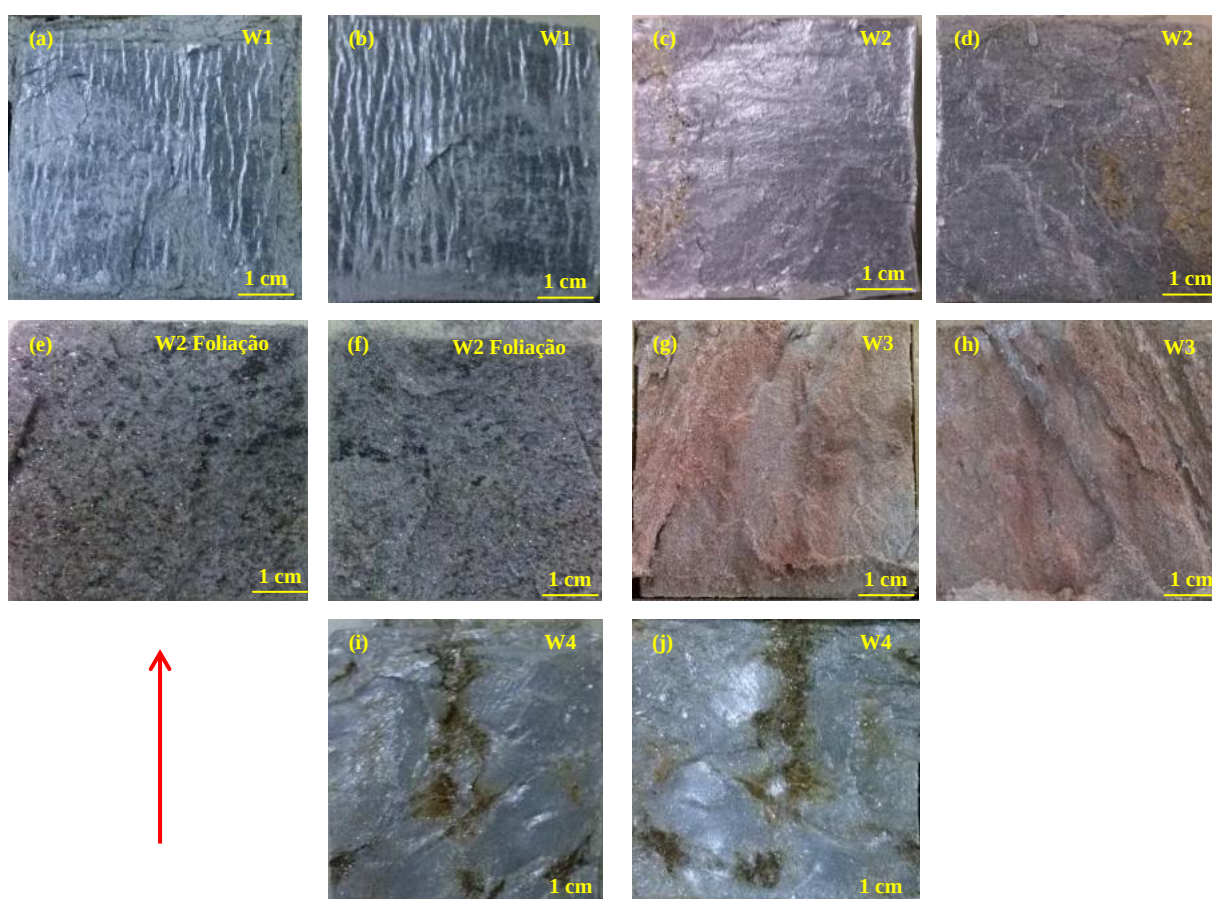


Figura 108 Aspectos das superfícies de cisalhamento, condição natural, para W1 (a e b), W2 (c e d), W2 Foliação (e e f), W3 (g e h) e W4 (i e j). A seta vermelha indica o sentido do cisalhamento.

A rugosidade fornece certa resistência às amostras, identificada em picos secundários nas figuras 103 a 107. Entretanto, valores elevados de σ'_n somados ao efeito do intemperismo, facilitam a quebra dessas rugosidades. Cabe ressaltar que,

para W2 e principalmente W2 Foliação e W3, existe ainda associado, como já mencionado, o efeito da cimentação, gerando porções ainda resistentes, mesmo com a redução da coesão interna da rocha. Essas porções cimentadas foram observadas nas superfícies de cisalhamento após o ensaio. As figuras 109 a 112 mostram as envoltórias de resistência, por meio da relação entre τ máxima e σ'_n para os graus de alteração. São plotados os resultados de todos os corpos de prova ensaiados, sob duas condições, (a) relações lineares (Mohr-Coulomb) e (b) não lineares, representadas, pelas seguintes equações:

$$\tau = c' + \sigma'_n \tan \phi' \quad (a)$$

$$\tau = A \sigma'^B \quad (b)$$

Onde c' e ϕ' são respectivamente, o intercepto coesivo e o ângulo de atrito de Mohr-Coulomb e, A e B são parâmetros da envoltória curva de resistência sendo apresentados os coeficientes de correlação (R^2), obtidos a partir das linhas de tendência. As amostras de W2 e W2 Foliação foram plotadas juntamente de forma a comparar a influência da cimentação ao longo da foliação.

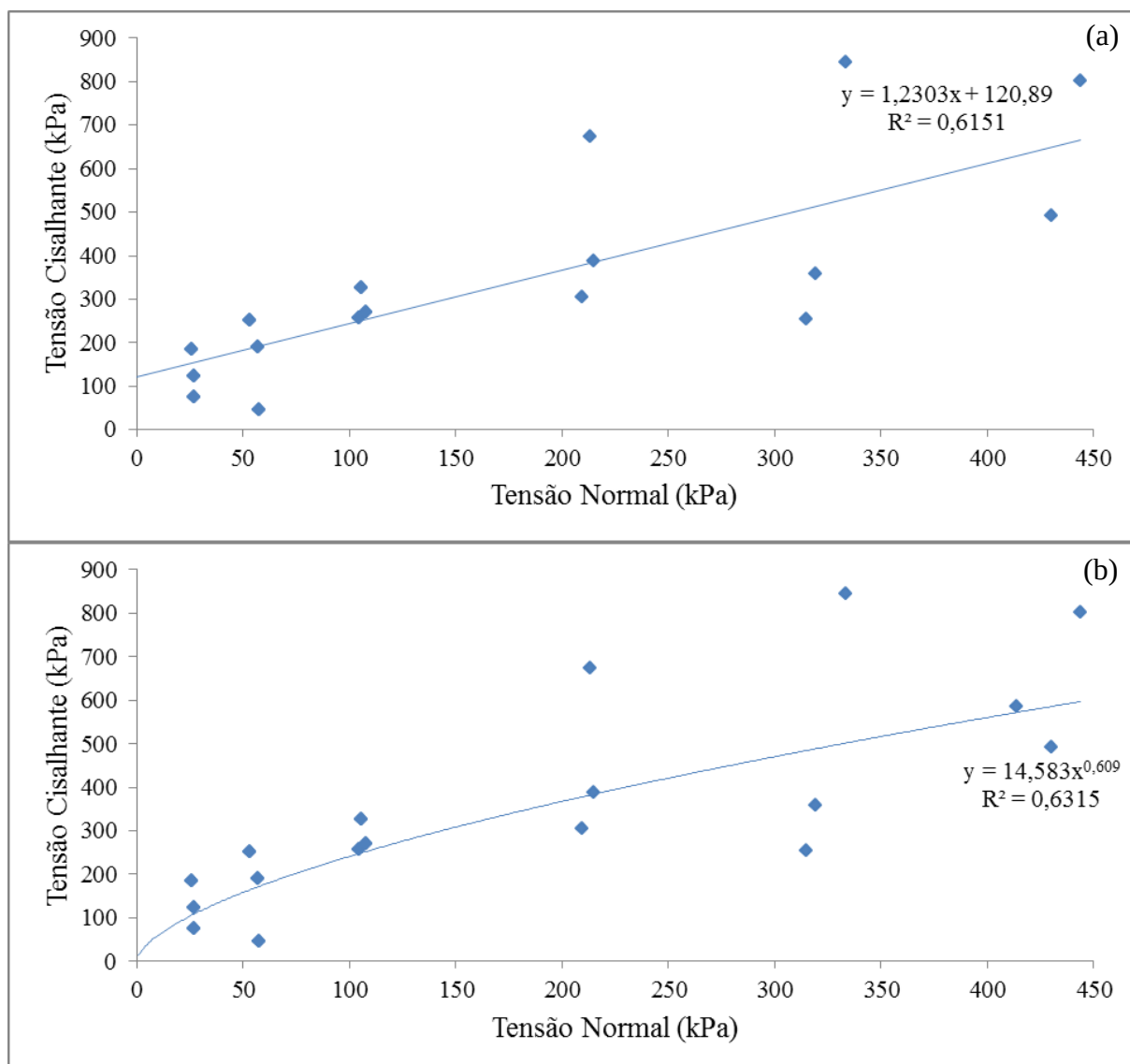


Figura 109 Relações linear (a) e não linear (b) para W1 na condição natural.

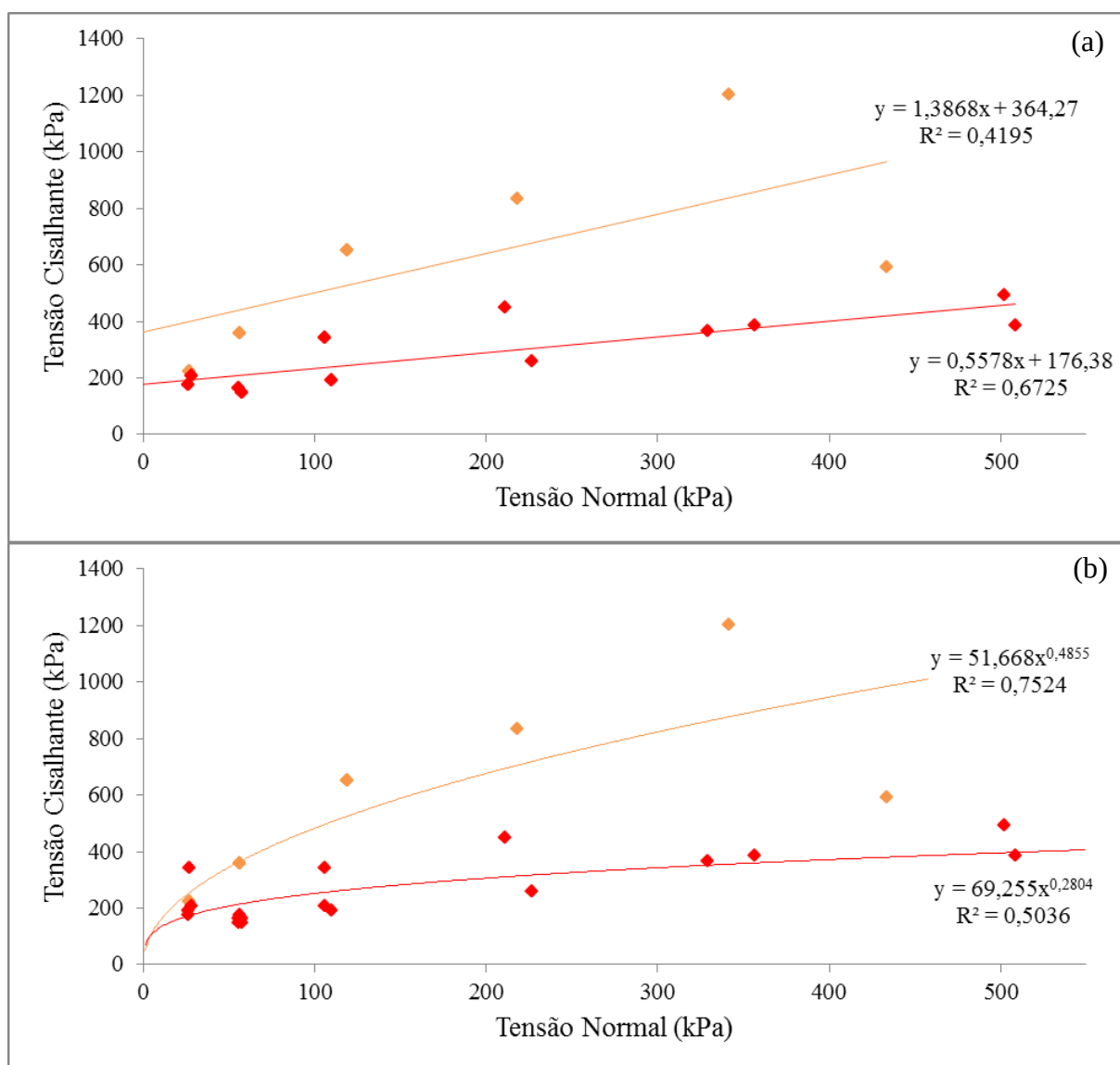


Figura 110 Relações linear (a) e não linear (b) para W2 (vermelho) e W2 Foliação (laranja) na condição natural.

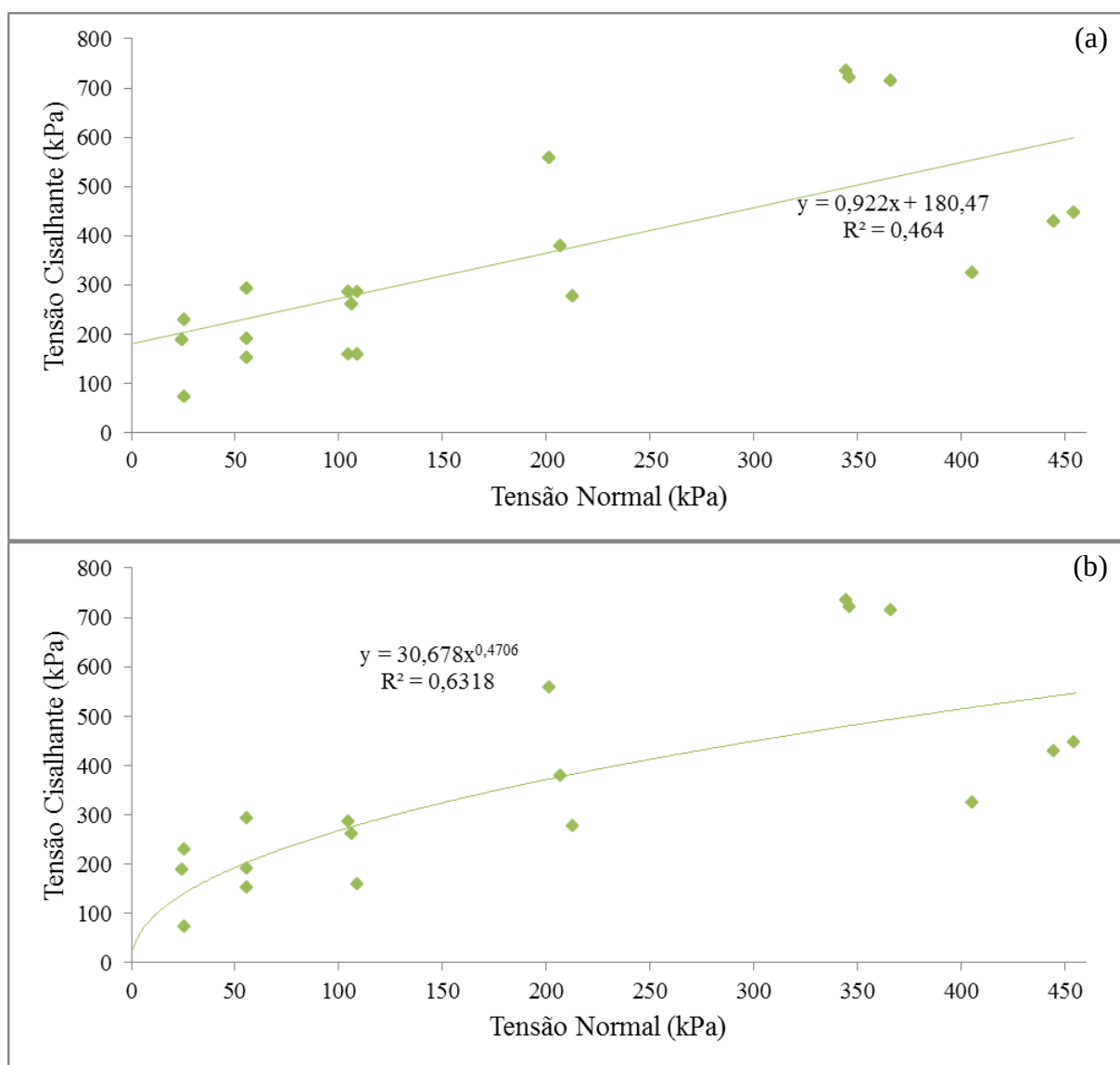


Figura 111 Relações linear (a) e não linear (b) para W3 na condição natural.

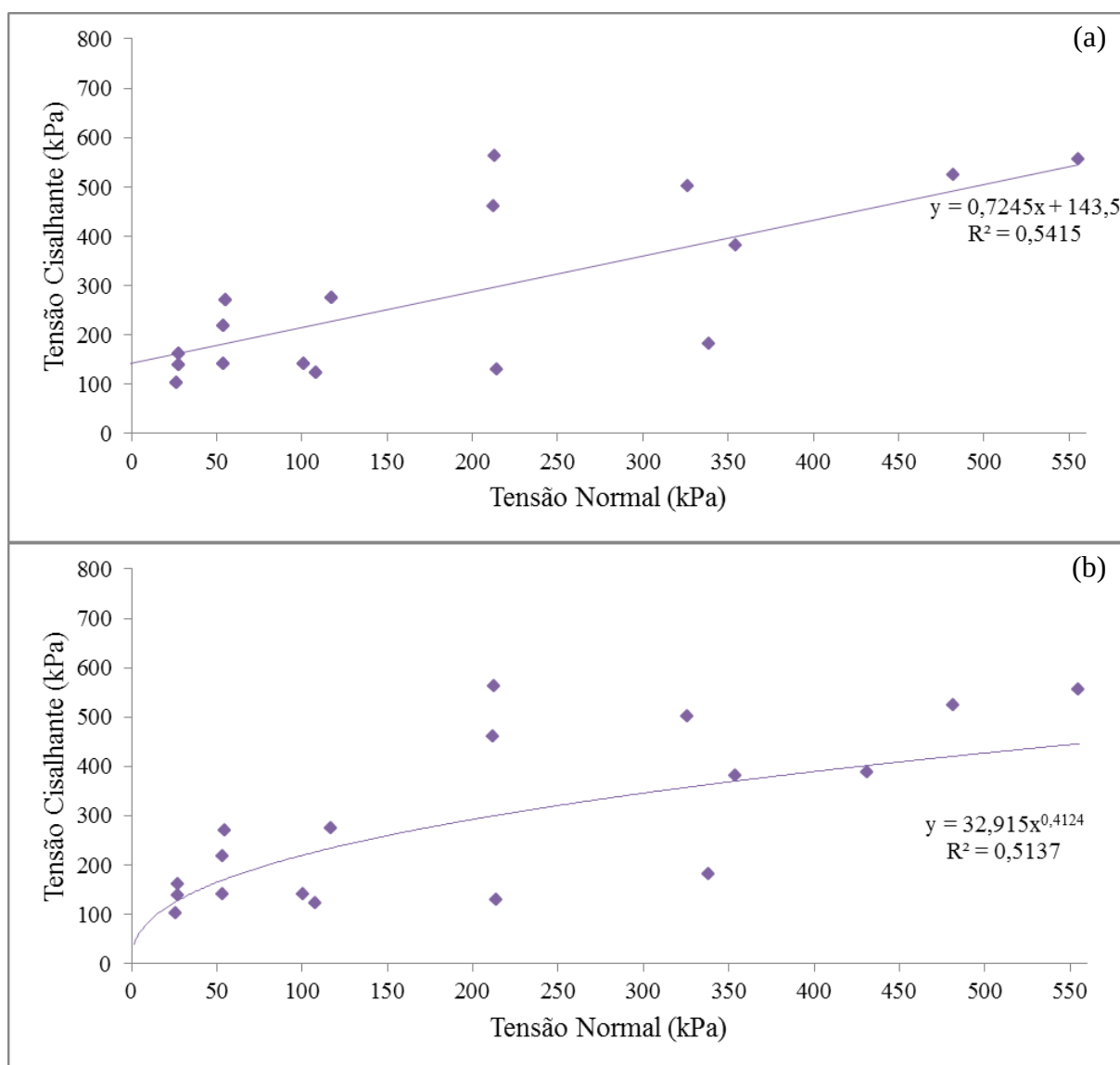


Figura 112 Relações linear (a) e não linear (b) para W4 na condição natural.

É possível notar que todos os níveis apresentaram reduzida dispersão para tensões baixas (25 kPa e 50 kPa). Em tensões mais elevadas a dispersão se mostrou mais elevada. Em ambos os casos as envoltórias não lineares representaram melhor a rocha foliada. Em W1 a resistência ao cisalhamento é praticamente da matriz e para os demais níveis ocorre uma influência maior da quantidade de níveis cimentados e menor da matriz.

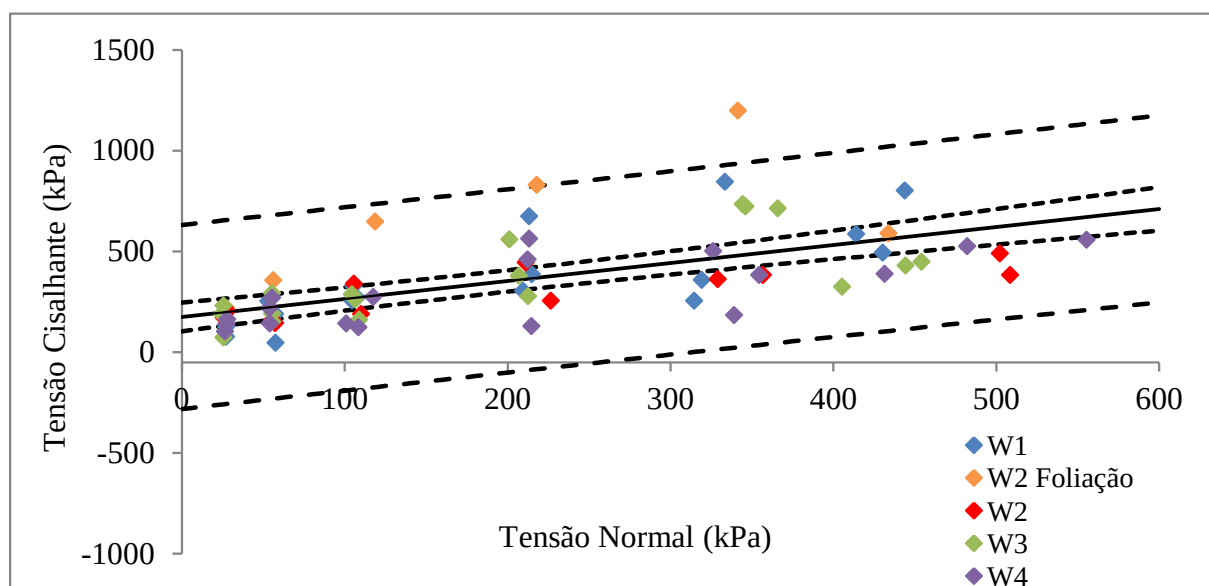
Na tabela 25 são resumidos os parâmetros de resistência definidos considerando-se (a) envoltórias lineares (critério de Mohr-Coulomb) e (b) não lineares, com base nas figuras 109 a 112.

Tabela 25 Parâmetros de resistência para os graus de alteração na condição natural

Amostras	Parâmetros de Resistência					
	Envoltória Linear			Envoltória Não Linear		
	c' (kPa)	ϕ' (°)	R ²	A	B	R ²
W1	120,9	50,9	0,61	14,58	0,61	0,63
W2	176,4	29,2	0,67	69,26	0,28	0,50
W2 Foliação	364,3	54,2	0,42	51,67	0,49	0,75
W3	168,9	43,7	0,46	30,68	0,47	0,63
W4	143,5	35,9	0,54	32,92	0,41	0,51

Com base nos resultados de c' e ϕ' fica evidente o efeito do intemperismo sobre a matriz da rocha e a influência de planos de foliação cimentados. Considerando a ausência desses níveis seria esperada uma progressiva redução de c' à medida que a alteração evoluísse.

São incluídos ainda limites de confiança da resistência individual (linhas tracejadas mais longas) e da resistência média (linhas tracejadas mais curtas), para um nível de significância de 95% (figura 113). Os valores médios de c' e ϕ' corresponderam a 174,9 kPa e 41,8°, respectivamente. Comparando os valores obtidos na tabela 25 com a figura 113 fica evidenciada a grande heterogeneidade da rocha, sendo os parâmetros de resistência do maciço rochoso semelhante a W2. A adoção de valores médios, em rochas foliadas com porções cimentadas, como os filitos, acaba por superestimar os parâmetros de resistência de porções mais fracas do maciço, representando riscos em dimensionamentos de obras de engenharia, a depender da ação do intemperismo sobre o perfil.

**Figura 113** Limites de intervalos de confiança (95% de significância) para os graus de alteração na condição natural.

Fietze et al. (2013) a partir de resultados de cisalhamento em filitos identificaram uma redução de ϕ' e c' com o aumento da alteração, onde W2 – 28° e

230 kPa, W3/W4 - 25° e 75 kPa e W4/W5 – 23° e 39 kPa. Em perfis de alteração de filitos associados a formações ferríferas do Quadrilátero Ferrífero, são observados valores decrescentes, principalmente, de c' e ϕ' , conforme evolução da ação intempérica, sendo W2/W1 (42° e 520 kPa), W3 (34° e 230 kPa), W4 (28° e 150 kPa) e W5 (25° e 50 kPa) (DILÁSCIO E PELUCI, 2005). Apesar de pouco discutido, a proporção de níveis cimentados/matriz e o efeito do intemperismo nos filitos citados acima, fica evidente a influência que preenchimentos minerais e cimentações ao longo dos planos de foliação aumentaram os valores de c' e ϕ' , comparando ambos os casos. Cabe ressaltar que o contexto estrutural do maciço influencia a facilidade/dificuldade da ocorrência desses níveis, gerando grande heterogeneidade, como na porção da Formação Batatal estudada.

Em suma, W1 apresentou o menor valor de coesão, sendo a rocha sã e sem cimentações nos planos da foliação, representando a resistência da matriz. O valor de c' aumenta de W2 até W4 e de ϕ' praticamente reduz, na mesma razão que a quantidade de níveis cimentados e oxidados aumenta. Apesar de W4 possuir a matriz bastante alterada, o material de preenchimento é capaz de fornecer ainda certa resistência conforme a amostra é carregada e sofre deslocamento ao longo dos planos de foliação. Em estudos acerca da anisotropia de folhelhos, Heng et al. (2015) constataram que amostras ensaiadas paralelas à foliação apresentaram menor c' e ϕ comparadas a outras direções. Além do mais a presença de planos cimentados aumentaram a resistência da rocha devido ao aumento do atrito entre os planos.

5.14.2 Condição Saturada

As figuras 114 a 117 apresentam, de forma semelhante ao apresentado para os ensaios na condição natural, as relações entre τ , σ'_n , $\bar{\sigma}_h$ e $\bar{\sigma}_v$, para os graus de alteração, na condição saturada. Os resultados na íntegra, para os 72 Cps ensaiados, são apresentados nas tabelas 26 a 30.

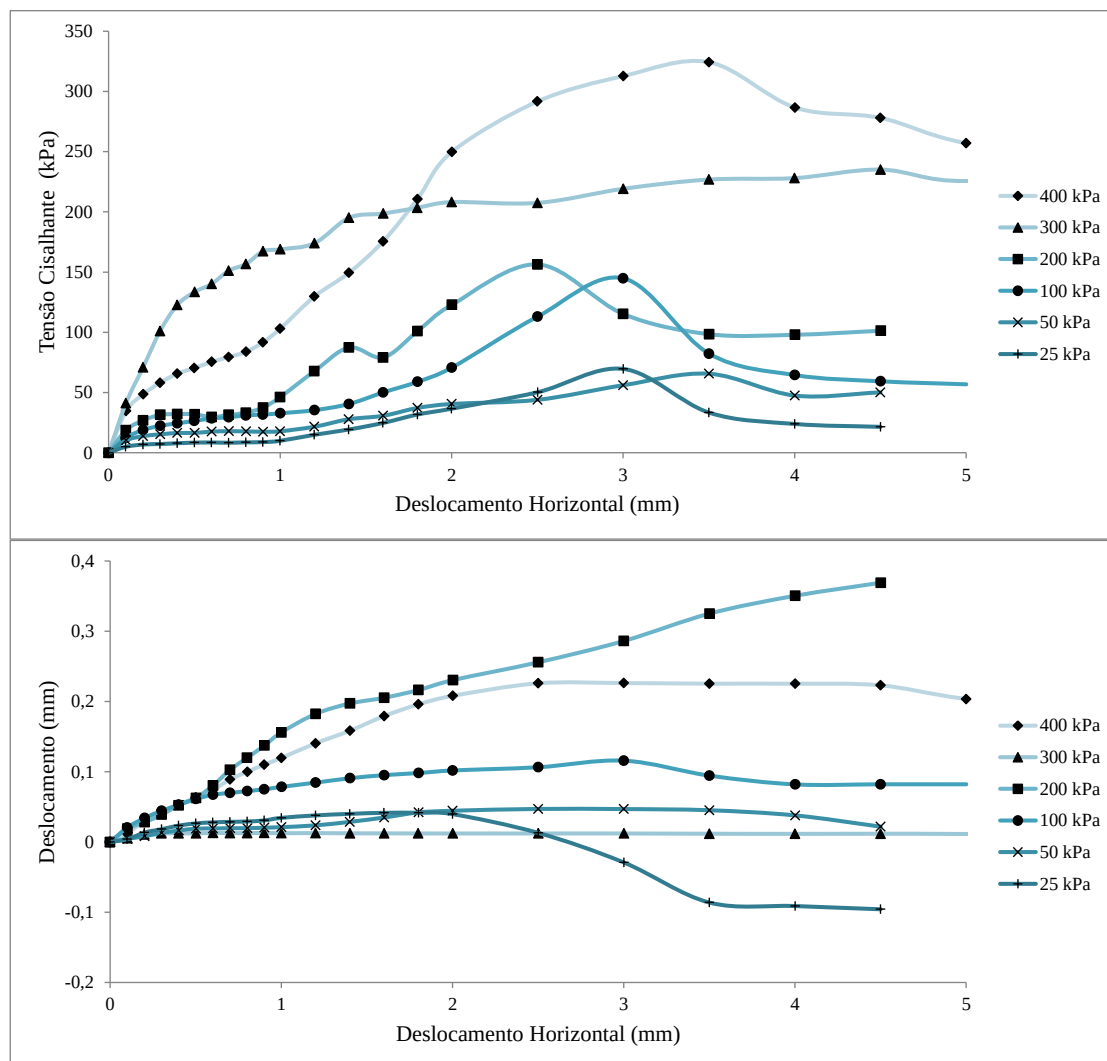


Figura 114 Resultados para condição saturada, relacionando a $\tau \times \sigma'_n$ e δ_h para W1.

Tabela 26 Dados de resistência obtidos para W1 a partir de 18 CPs

CP	1	2	3	4	5	6	7	8	9
σ'_v (kPa)		400			300			200	
σ'_n (kPa)	431,22	430,38	445,92	364,09	313,09	309,15	220,46	276,43	230,29
τ (kPa)	133,26	324,29	167,66	239,64	160,15	152,28	92,57	93,62	156,39
δ_h (mm)	3,50	3,50	4,00	6,00	2,00	1,40	4,50	8,00	2,50
w (%)	11,89	11,74	10,92	10,40	8,71	9,99	9,22	11,68	8,97
CP	10	11	12	13	14	15	16	17	18
σ'_v (kPa)		100			50			25	
σ'_n (kPa)	190,00	117,82	102,22	55,29	55,11	56,88	27,72	30,03	26,11
τ (kPa)	144,88	93,12	80,32	65,61	34,49	52,47	69,61	9,49	17,44
δ_h (mm)	3,00	2,50	1,80	3,50	3,50	2,00	3,00	6,00	3,00
w (%)	10,02	6,90	7,52	11,01	7,39	10,19	8,90	6,77	6,93

As amostras de W1 (figura 114) apresentaram uma queda suave após a tensão de pico de resistência ($\delta_h = 2,5$ mm a 3,0 mm), tendendo a um comportamento frágil, todavia mais discreto se comparado ao ensaio sob condições naturais. A presença da água influenciou diretamente a resistência da matriz da rocha, onde praticamente

todas as amostras expandiram durante o cisalhamento, provavelmente pela presença de argilominerais, identificados por DRX.

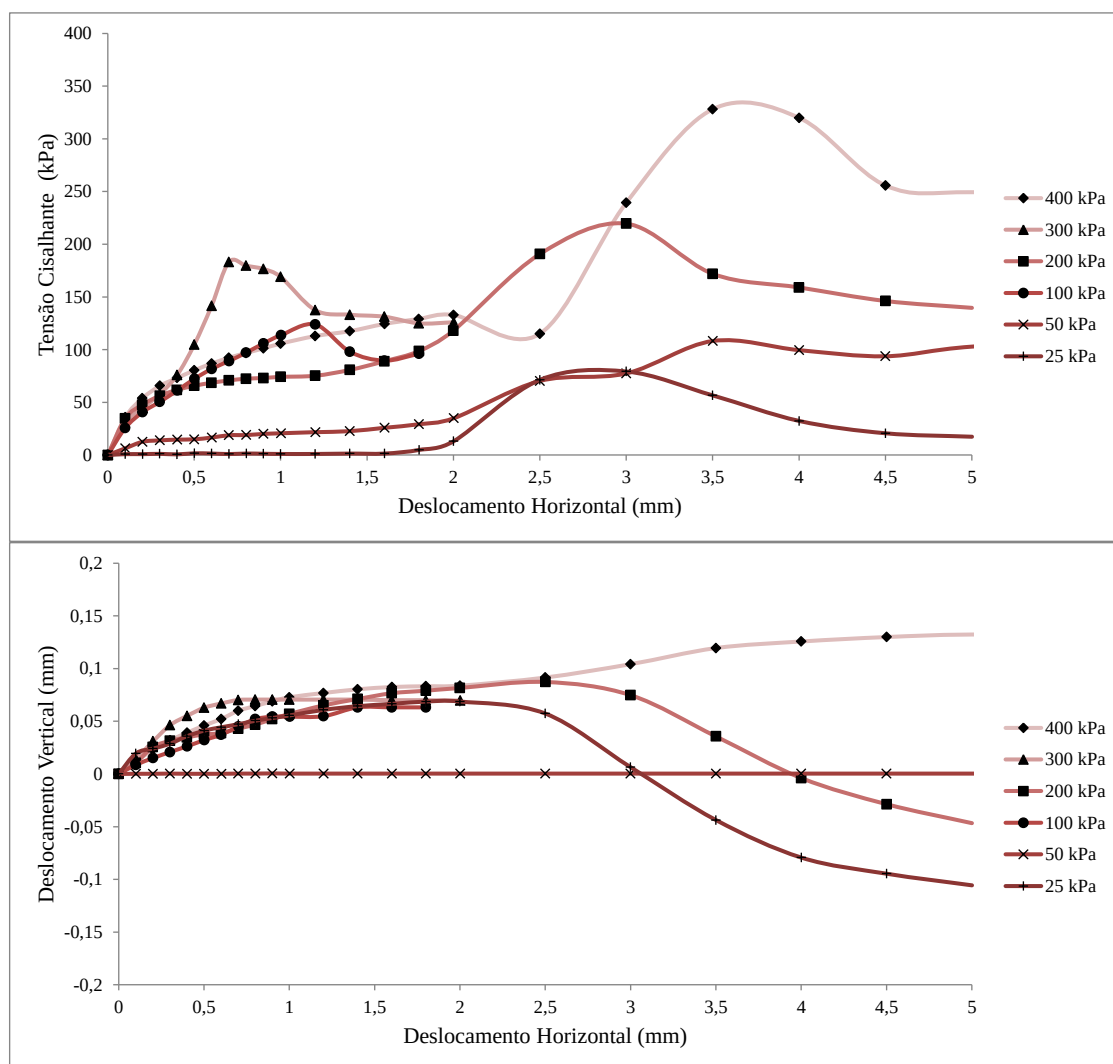


Figura 115 Resultados para condição saturada, relacionando a $\tau \times \sigma'_n \delta_h$ para W2.

Tabela 27 Dados de resistência obtidos para W2 Foliação a partir de 11 CPs

CP	1	2	3	4	5	6	7	8	9
σ'_v (kPa)		400			300			200	
σ'_n (kPa)	-	440,91	451,04	-	338,28	310,76	-	206,67	217,53
τ (kPa)	-	211,20	328,04	-	127,63	183,10	-	47,56	219,52
δ_h (mm)	-	2,50	3,50	-	3,50	0,70	-	2,50	3,00
w (%)	-	25,68	10,89	-	9,21	8,32	-	7,18	13,82
CP	10	11	12	13	14	15	16	17	18
σ'_v (kPa)		100			50			25	
σ'_n (kPa)	-	106,91	118,98	-	-	51,90	-	28,34	29,29
τ (kPa)	-	77,39	123,89	-	-	20,39	-	48,81	79,24
δ_h (mm)	-	1,20	1,20	-	-	1,00	-	1,00	3,00
w (%)	-	11,44	8,30	-	-	9,19	-	6,72	6,59

W2 (figura 115) apresentou tensões de pico reduzidas comparadas a condição natural. As tensões de pico ocorreram em pontos variados ($\delta_h = 1,0$ mm a 3,0 mm). Assim como em W1 houve menor índice de picos secundários (quebra da foliação),

mostrando o enfraquecimento da rocha devido à saturação. O grau W2 exibe um comportamento frágil e as amostras mostraram expansão até a tensão cisalhante de pico e posteriormente contração (200 kPa e 25 kPa).

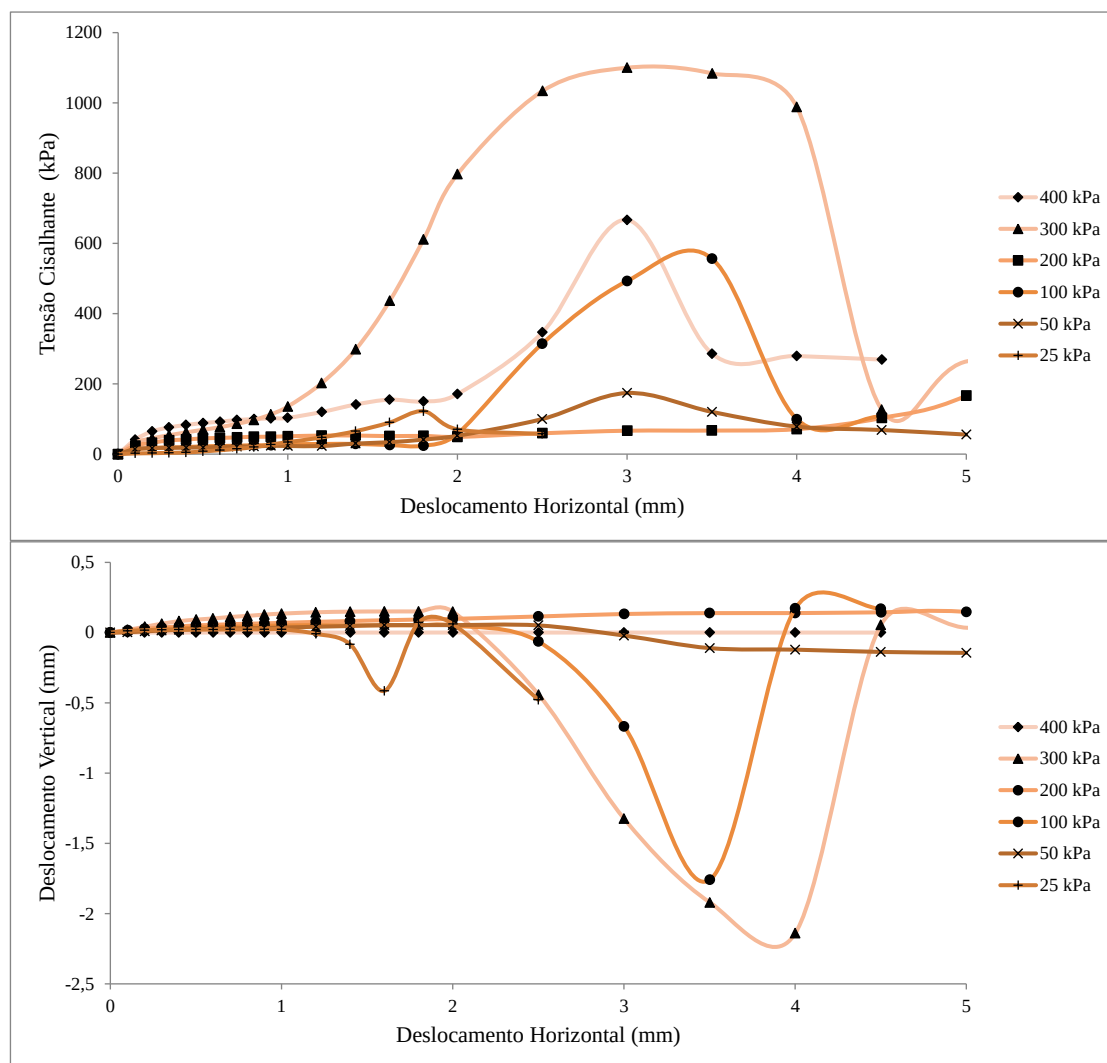


Figura 116 Resultados para condição saturada, relacionando a $\tau \times \sigma'_n$ e δ_h para W2 Foliação.

Tabela 28 Dados de resistência obtidos para W2 Foliação a partir de 7 CPs

CP	1	2	3	4	5	6	7	8	9
σ'_v (kPa)		400			300			200	
σ'_n (kPa)	426,52	-	-	326,29	-	-	240,84	-	-
τ (kPa)	666,76	-	-	1099,85	-	-	415,35	-	-
δ_h (mm)	3,00	-	-	3,00	-	-	6,00	-	-
w (%)	11,51	-	-	7,13	-	-	8,38	-	-
CP	10	11	12	13	14	15	16	17	18
σ'_v (kPa)		100			50			25	
σ'_n (kPa)	110,81	-	-	60,11	55,61	-	29,51	-	-
τ (kPa)	556,28	-	-	108,19	174,07	-	122,19	-	-
δ_h (mm)	3,50	-	-	3,50	3,00	-	1,80	-	-
w (%)	7,20	-	-	6,22	8,74	-	6,92	-	-

W2 Foliação (figura 116) ainda foi o nível com os resultados de c' e ϕ' mais elevados em relação aos demais, todavia as amostras tenderam a apresentar

expansão ao longo do ensaio, mesmo após a tensão de ruptura de pico. A princípio a amostra não sofreu tanta influência da saturação, todavia a presença de níveis cimentados forneceu grande resistência ao cisalhamento à rocha.

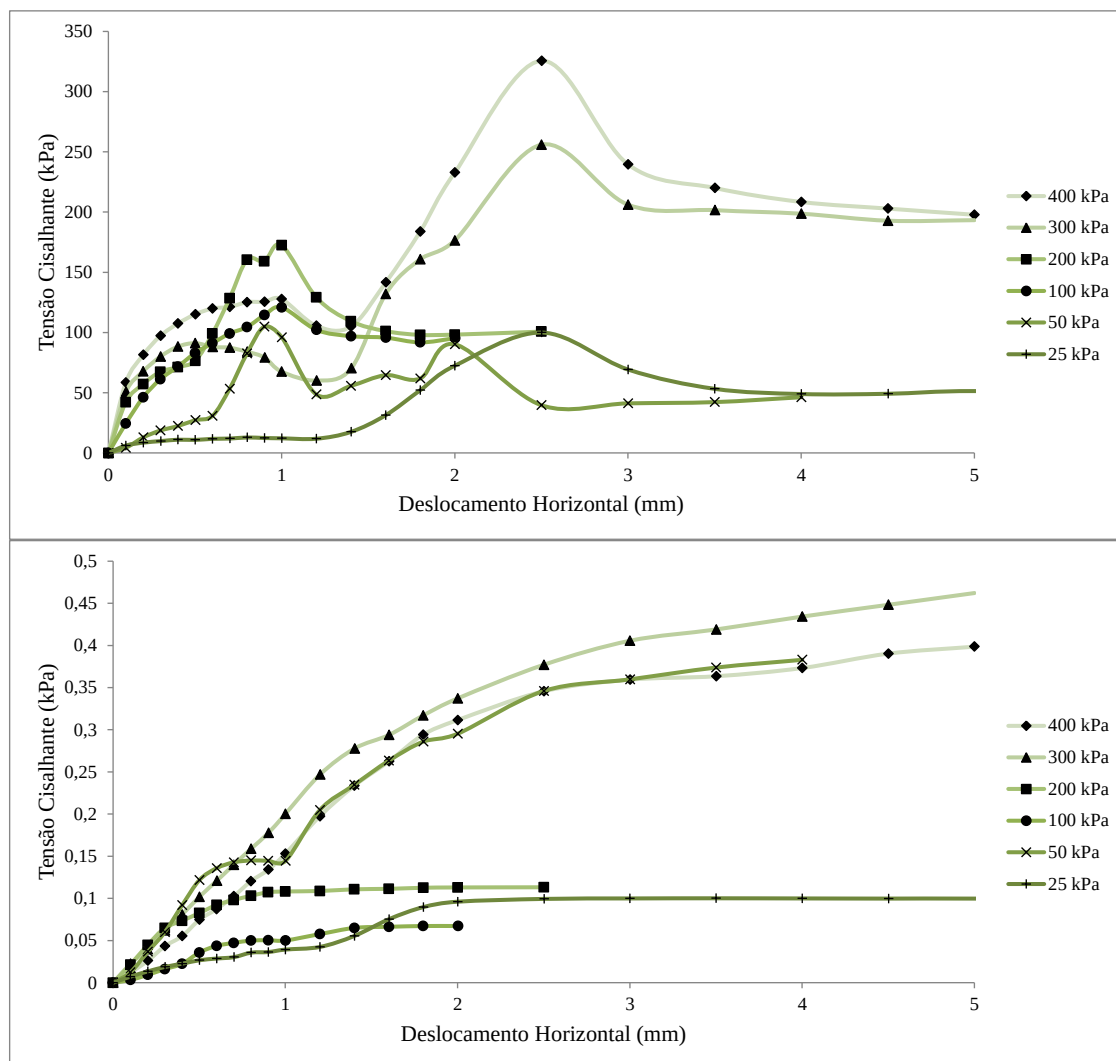


Figura 117 Resultados para condição saturada, relacionando a $\tau \times \sigma'_n$ e δ_h para W3.

Tabela 29 Dados de resistência obtidos para W3 Foliação a partir de 18 CPs

CP	1	2	3	4	5	6	7	8	9
σ'_v (kPa)		400			300			200	
σ'_n (kPa)	424,00	431,22	430,38	329,88	307,57	323,41	206,97	220,45	208,73
τ (kPa)	184,26	325,60	262,92	243,50	95,26	255,94	137,54	117,88	172,39
δ_h (mm)	1,80	2,50	2,50	3,50	1,20	2,50	1,60	2,50	1,00
w (%)	11,15	10,65	13,60	7,61	17,62	10,15	13,65	11,68	7,98
CP	10	11	12	13	14	15	16	17	18
σ'_v (kPa)		100			50			25	
σ'_n (kPa)	102,10	109,72	104,23	54,85	52,92	55,33	27,62	27,25	27,69
τ (kPa)	40,97	78,71	120,85	36,27	39,35	104,87	99,94	71,05	42,02
δ_h (mm)	1,00	1,40	1,00	3,50	0,80	0,90	2,50	1,20	1,00
w (%)	12,69	11,40	10,89	14,02	10,43	10,84	14,76	11,97	8,69

W3 (figura 117) mostraram a mesma tendência observada em W1 e W2, ou seja, com tensões de pico de cisalhamento inferiores a condição natural. Também é observado que essas tensões ocorreram em posições distintas, em torno de $\delta_h = 2,5$ mm (400 kPa e 300 kPa) e $\delta_h = 1,0$ mm (200 kPa a 25 kPa). Devido ao efeito da alteração ser maior nesse nível, os resultados das tensões cisalhantes esperadas deveriam ser inferiores em relação a níveis mais são. Entretanto, os níveis cimentados nas foliações observados em W3 parecem ter compensado o efeito da saturação nas amostras. Todas as amostras apresentaram expansão após a ruptura, sendo no geral progressiva em tensões mais elevadas e, constante em tensões mais baixas.

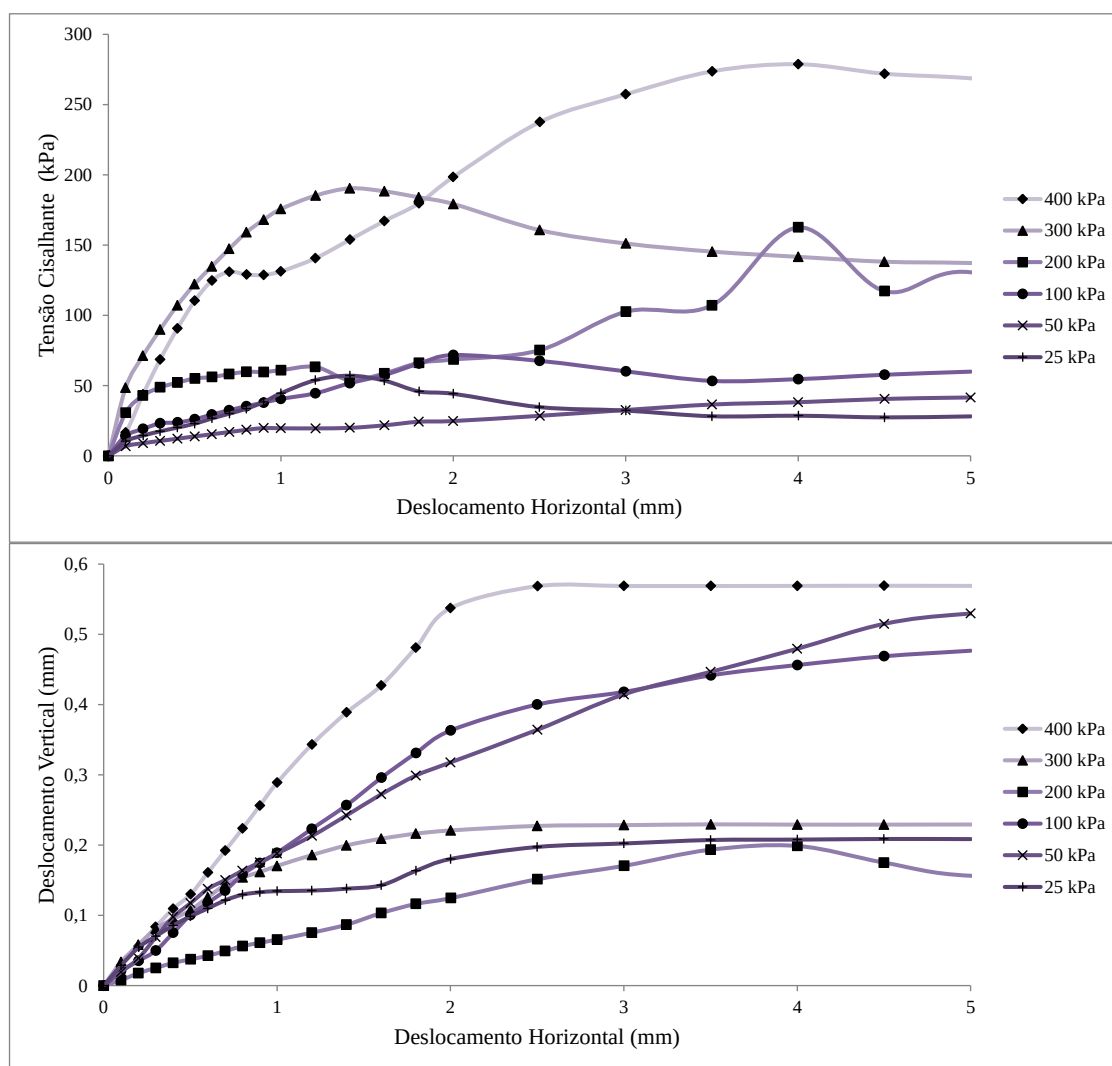


Figura 118 Resultados para condição saturada, relacionando a $\tau \times \sigma'_n$ e δ_h para W4.

Tabela 30 Dados de resistência obtidos para W4 Foliação a partir de 18 CPs

CP	1	2	3	4	5	6	7	8	9
σ'_v (kPa)		400			300			200	
σ'_n (kPa)	474,17	548,59	513,14	341,13	341,12	308,83	219,92	237,09	218,31
τ (kPa)	177,00	278,71	152,28	120,79	148,89	190,37	73,41	127,61	162,57
δ_h (mm)	5,00	4,00	10,00	5,00	4,00	1,40	4,50	5,00	4,00
w (%)	19,15	86,13	58,55	18,29	20,11	18,61	30,23	14,08	22,29
CP	10	11	12	13	14	15	16	17	18
σ'_v (kPa)		100			50			25	
σ'_n (kPa)	113,71	108,77	106,91	62,21	57,71	52,69	25,24	25,66	25,97
τ (kPa)	71,68	71,76	58,67	43,48	34,26	38,99	57,06	13,71	39,73
δ_h (mm)	3,00	2,00	1,20	6,00	4,00	0,60	1,40	0,30	0,90
w (%)	22,29	16,83	15,05	23,83	16,07	17,93	14,82	17,23	13,43

Para W4 (figura 118) é possível notar que existe uma tendência ao comportamento dúctil, sendo o grau de alteração que mais perdeu resistência em relação aos demais, inclusive quando comparado a amostras W4 cisalhadas na condição natural. Assim como W3, as amostras tenderam a expansão, de forma mais acentuada, até atingirem a tensão de pico e se mantendo constante posteriormente a isso.

A figura 119 exhibe as superfícies de foliação ao longo do cisalhamento, na condição saturada. Assim como as amostras apresentadas para condição natural (figura 108), nota-se que à medida que o grau de alteração evolui a presença de oxidações e cimentações vão se desenvolvendo ao longo da foliação. As superfícies de cisalhamento pós-ensaio saturado apresentam arestas na rugosidade, porém facilmente deslocáveis ao menor esforço sobre as mesmas. Para a condição saturada, a resistência da rocha acaba sendo mais influenciada pela quantidade de níveis cimentados já que a matriz, além de sofrer a ação do intemperismo, é penalizada pela presença de argilominerais expansivos.

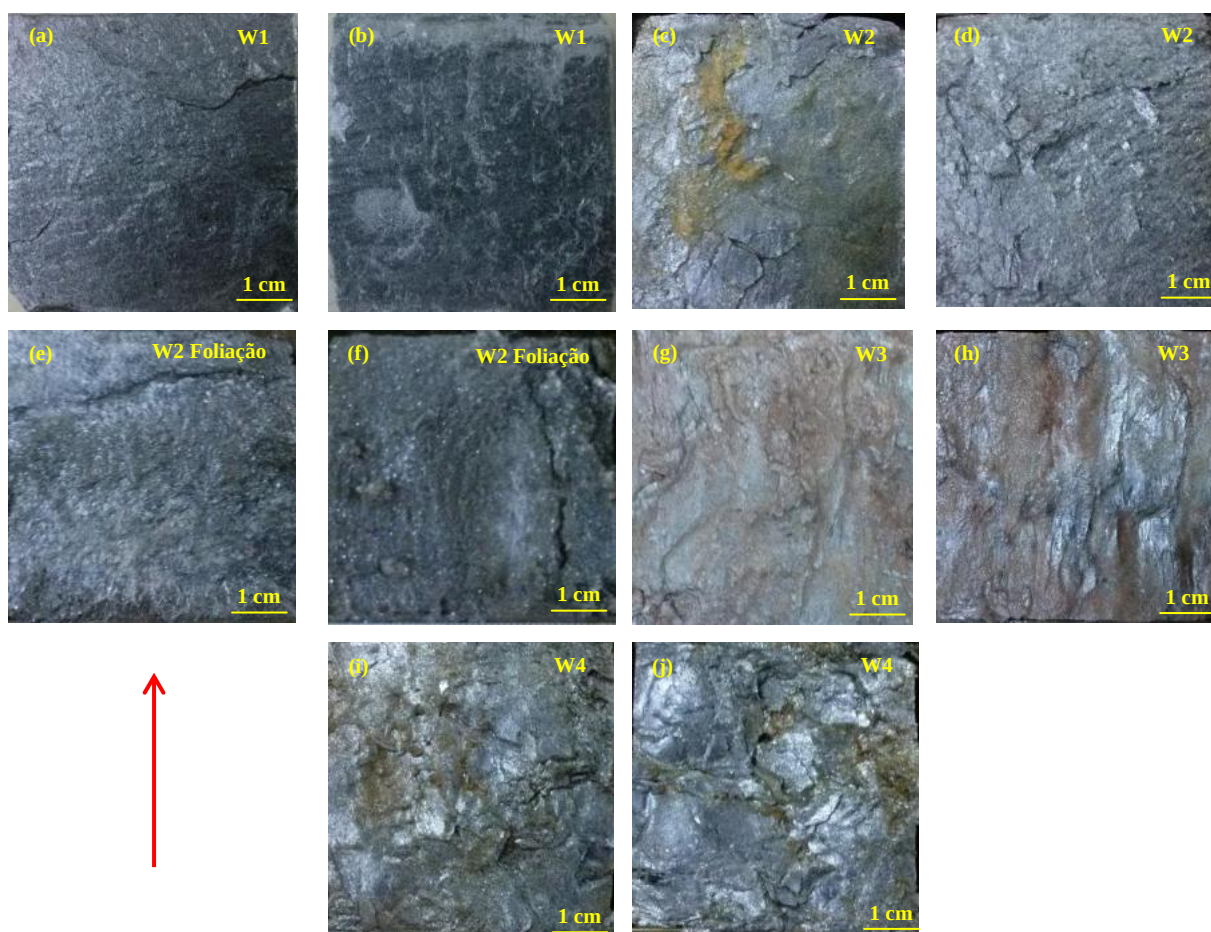


Figura 119 Aspectos das superfícies de cisalhamento, condição saturada, para W1 (a e b), W2 (c e d), W2 Foliação (e e f), W3 (g e h) e W4 (i e j). A seta vermelha indica o sentido do cisalhamento.

Semelhante à condição saturada, as figuras 120 a 123 mostram a relação entre τ máxima e σ'_n para os graus de alteração. São plotados os resultados de todos os corpos de prova ensaiados em (a) relações lineares e (b) não lineares. As amostras de W2 e W2 Foliação foram plotadas juntamente para comparar a influência da cimentação ao longo da foliação.

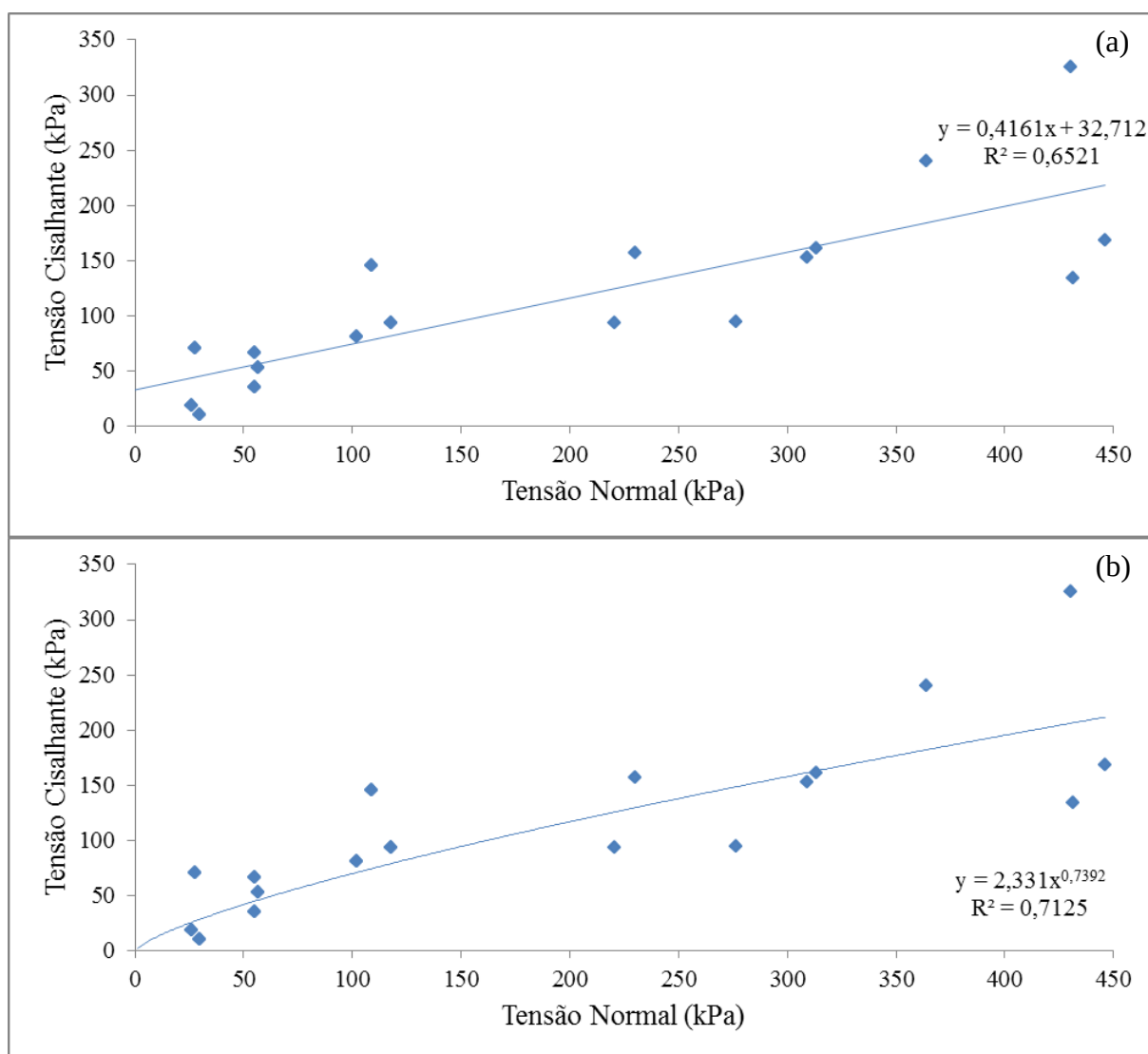


Figura 120 Relações linear (a) e não linear (b) para W1 na condição saturada.

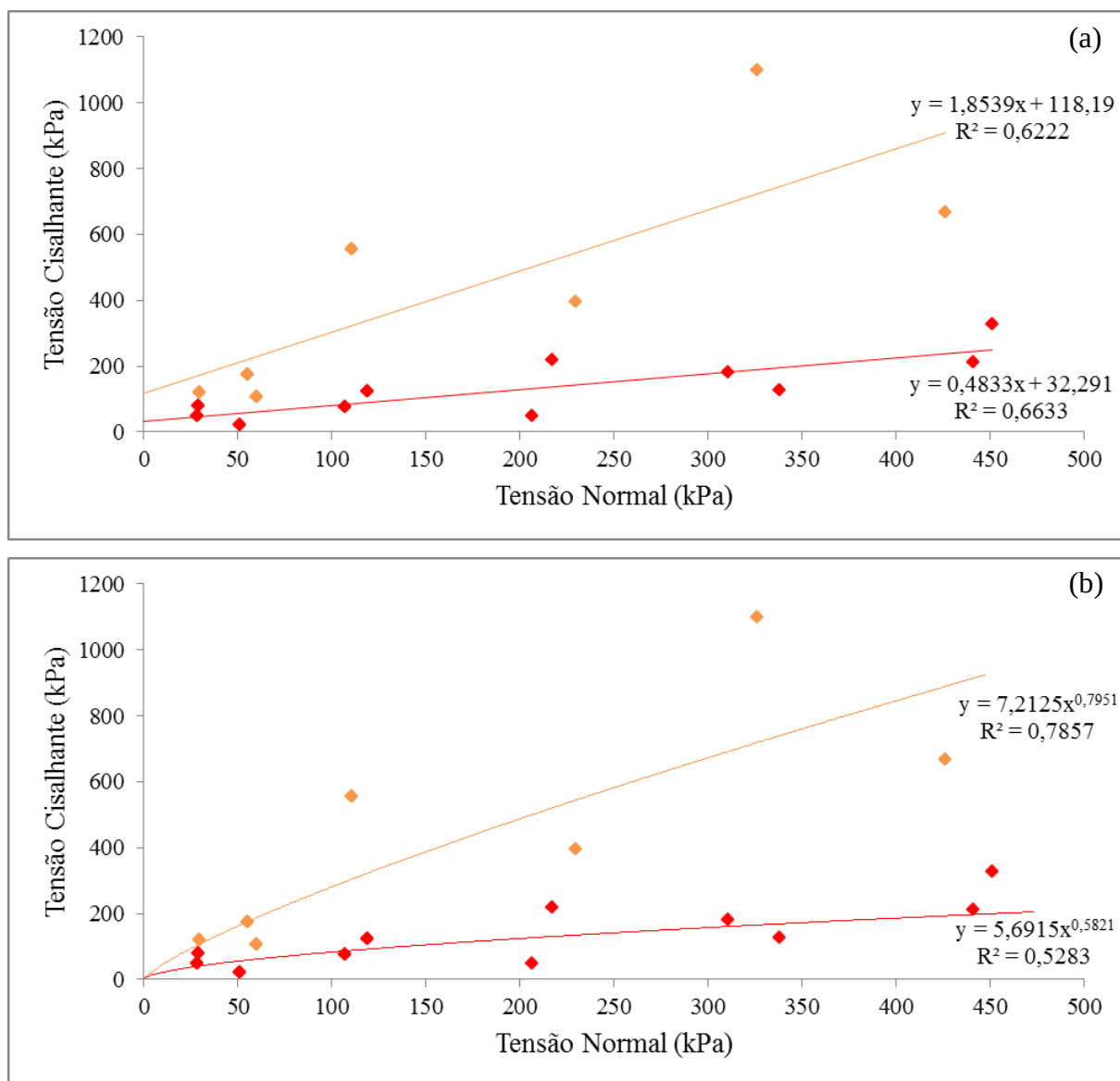


Figura 121 Relações linear (a) e não linear (b) para W2 (vermelho) e W2 Foliação (laranja) na condição saturada.

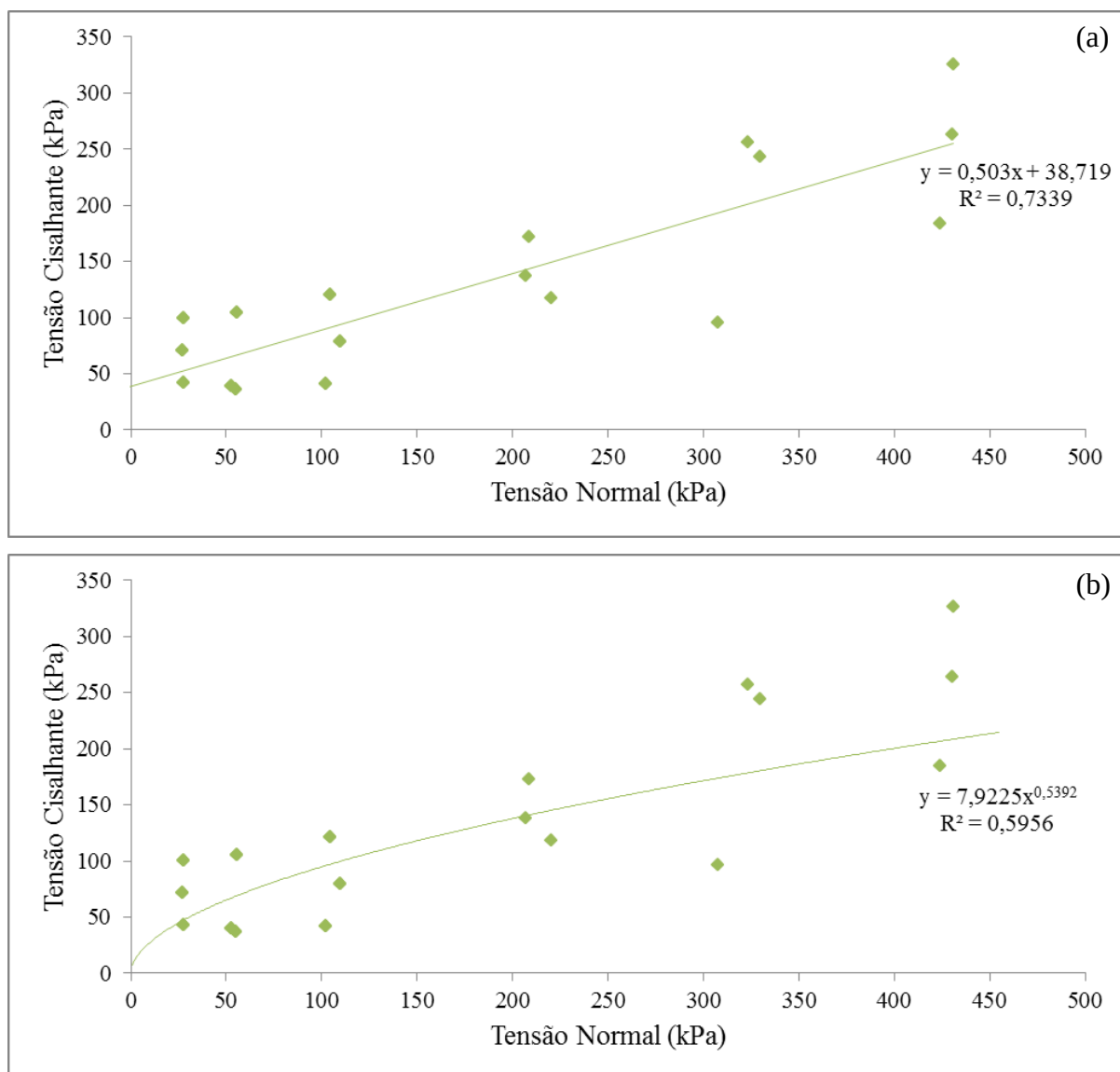


Figura 122 Relações linear (a) e não linear (b) para W3 na condição saturada.

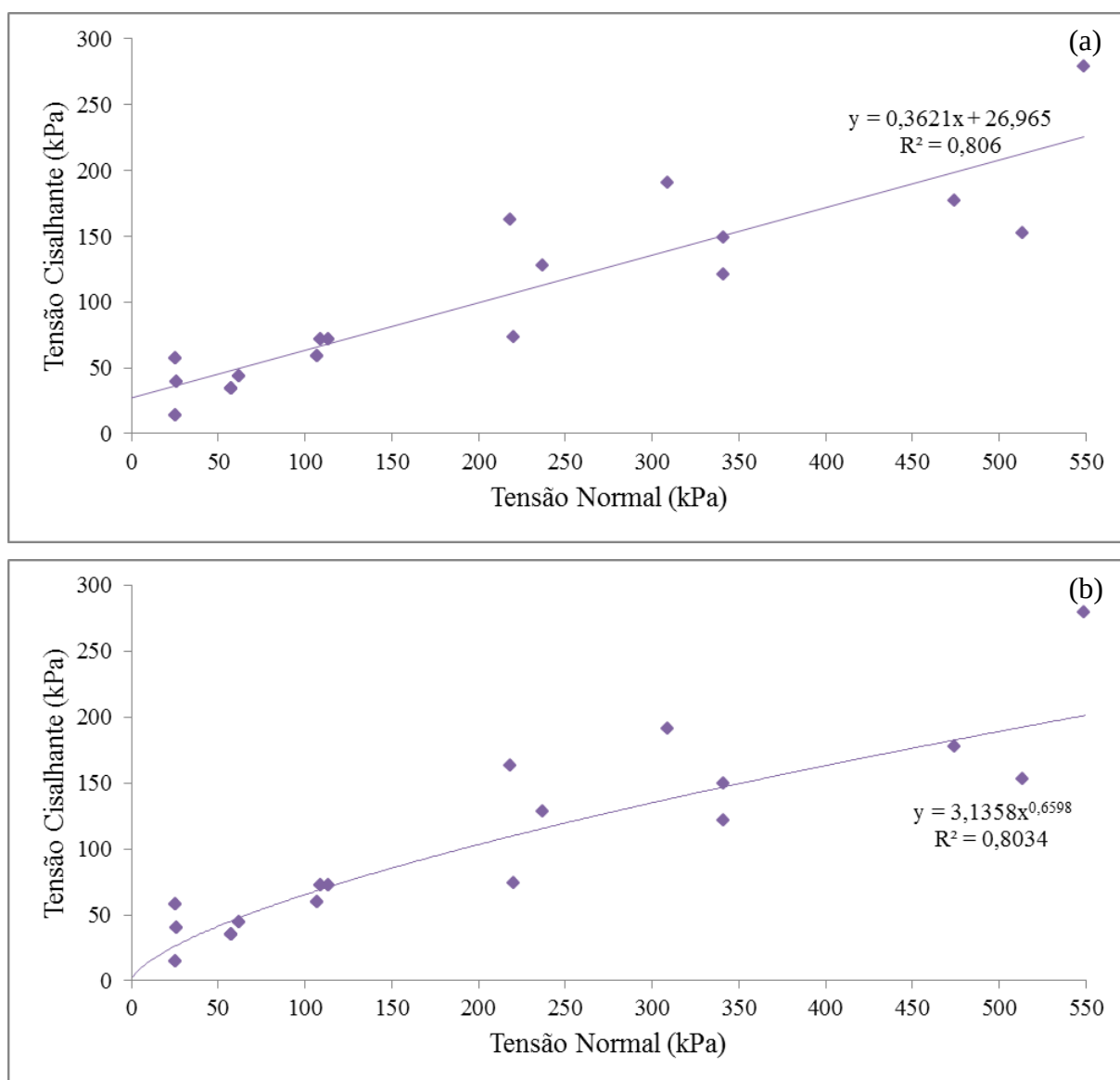


Figura 123 Relações linear (a) e não linear (b) para W4 na condição saturada.

Nota-se que em todos os níveis de alteração há reduzida dispersão para todas as tensões, principalmente nos níveis mais alterados. As envoltórias não lineares representaram melhor a rocha foliada. Em W1 a resistência ao cisalhamento é praticamente da matriz, perdendo-a drasticamente em função principalmente de argilominerais expansivos. Todos os outros níveis de alteração reduziram drasticamente os valores de c' e ϕ' , porém a quantidade de níveis cimentados pareceu influenciar diretamente, nesta condição a resistência da rocha.

Na tabela 31 são resumidos os parâmetros de resistência considerando (a) envoltórias lineares (critério de Mohr-Coulomb) e (b) não lineares, conforme as equações apresentadas anteriormente, com base nas figuras 120 a 123.

Tabela 31 Parâmetros de resistência para os graus de alteração na condição saturada

Amostras	Parâmetros de Resistência					
	Envoltória Linear			Envoltória Não Linear		
	c' (kPa)	ϕ' (°)	R ²	A	B	R ²
W1	32,7	22,6	0,65	2,33	0,74	0,71
W2	32,3	25,8	0,66	5,69	0,58	0,53
W2 Foliação	118,2	61,7	0,62	7,21	0,79	0,79
W3	38,7	26,7	0,73	7,92	0,54	0,59
W4	26,9	19,9	0,81	3,14	0,66	0,80

Apesar da drástica redução dos valores de c' e ϕ' , comparado à condição natural, fica evidente que o efeito do intemperismo ainda é influenciado pela ocorrência de planos de foliação cimentados na rocha, mesmo com a perda da resistência da matriz.

A figura 124 mostra os limites de intervalos de confiança para os resultados do cisalhamento na condição saturada. Os valores médios de c' e ϕ' corresponderam a 49,7 kPa e 27,2°, respectivamente. Comparando os valores obtidos na tabela 31 nota-se que, principalmente para a c' o valor está acima dos obtidos para os graus de alteração, excetuando o subnível W2 Foliação.

Nesta condição mais crítica (rocha saturada), ressalta-se a importância de avaliar as propriedades do maciço rochoso cautelosamente. A estimativa por valores médios denotam interpretações otimistas, dada às particularidades das rochas foliadas, como nos filitos aqui estudados.

Garzón et al. (2010) observaram que amostras saturadas de filitos, submetidas ao cisalhamento, apresentaram uma redução de c' e ϕ em comparação a amostras naturais, devido à presença de argilominerais. Em clorita-xistos o efeito da água proporcionou uma redução de cerca de 55% da coesão comparado a amostras naturais, além de suavizar as rugosidades das superfícies de cisalhamento, conforme o aumento da tensão normal (ZHOU et al., 2014).

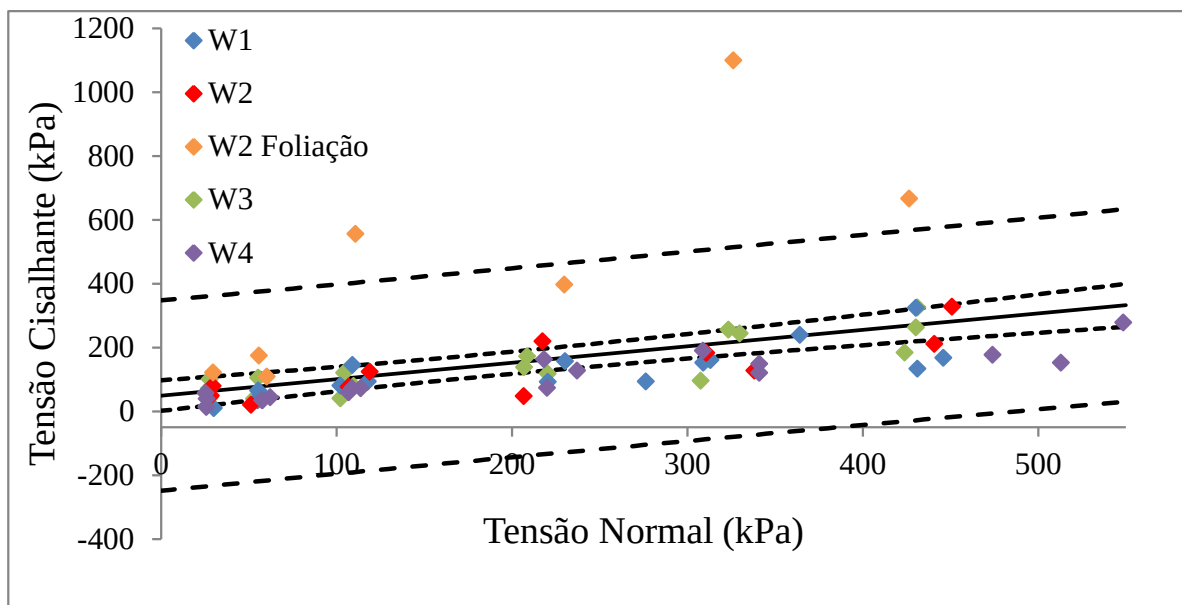


Figura 124 Limites de Intervalos de confiança, 95% de significância para W4 Foliação, condição saturada.

As figuras 125 e 126 apresentam um comparativo entre os valores de c' e ϕ' obtidos para as condições, natural e saturada.

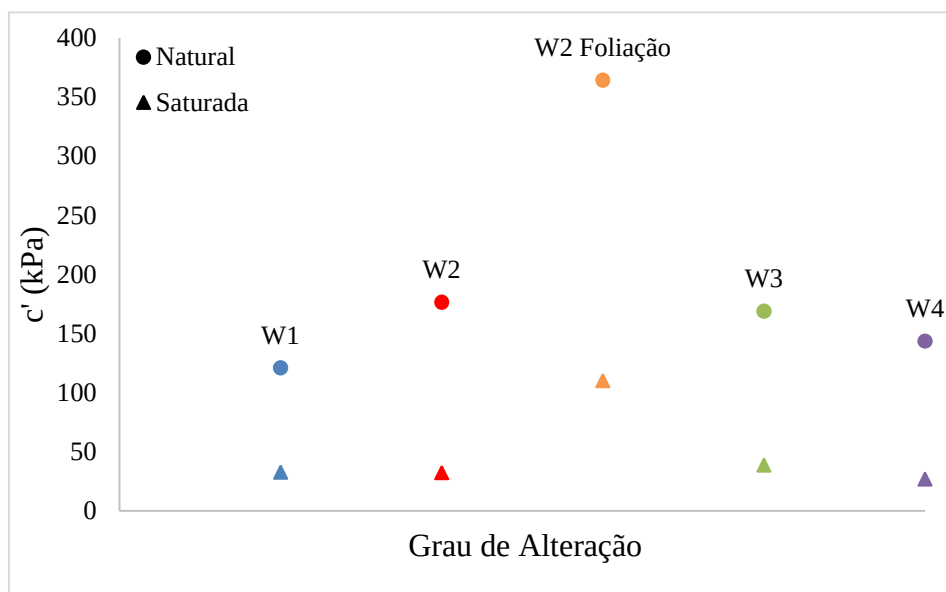


Figura 125 Comparação entre os valores de c' para a condição natural e saturada.

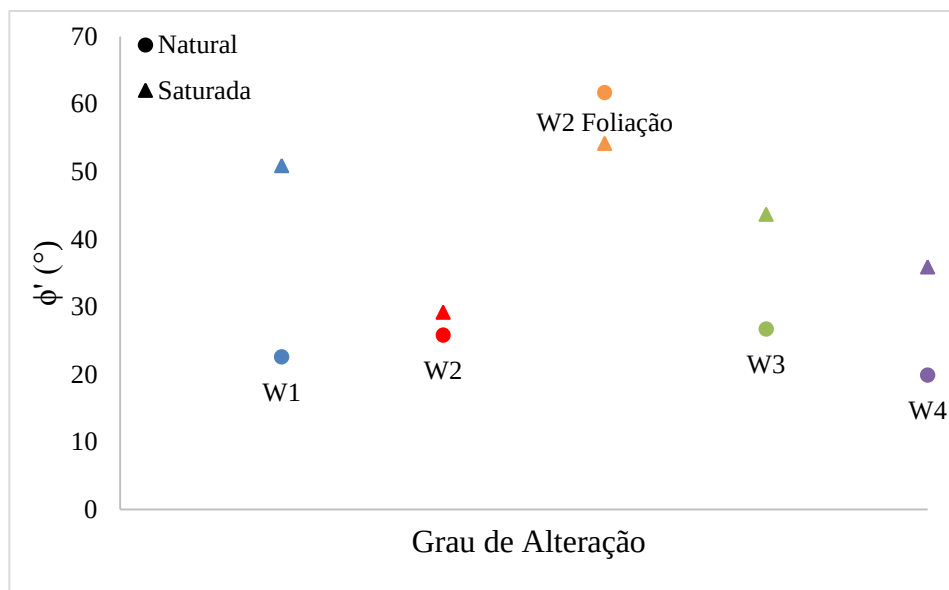


Figura 126 Comparação entre os valores de ϕ' para a condição natural e saturada.

Com base nas figuras 125 e 126 nota-se que, na condição natural, os valores de c' e ϕ' não reduziram conforme a evolução do intemperismo. O mesmo parece ocorrer na condição saturada, apesar dessa tendência ficar mais próxima ao esperado para o avanço da alteração. A drástica redução da coesão interna da rocha é diretamente influenciada pela presença de minerais expansivos, como já mencionado, justificada na saturação das amostras. Em ambas as condições do ensaio, a perda não progressiva dos parâmetros de resistência justifica-se pela proporção entre planos cimentados e matriz na amostra.

5.15 Relações Entre os Parâmetros Obtidos

Nas figuras 127 a 130 são apresentadas relações entre parâmetros físicos, químicos e mecânicos para os graus de alteração.

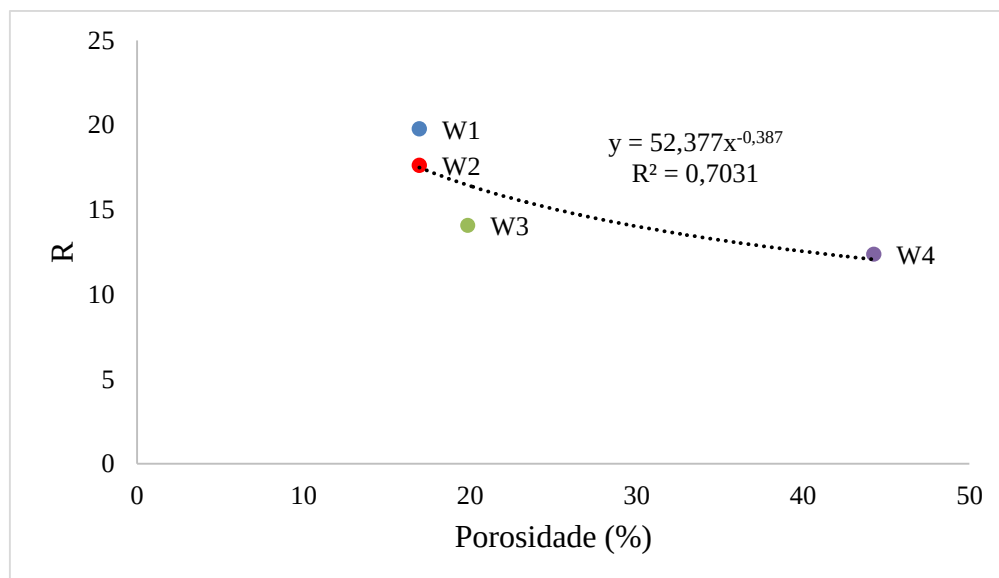


Figura 127 Relação entre os valores de porosidade com resultados de R para os graus de alteração.

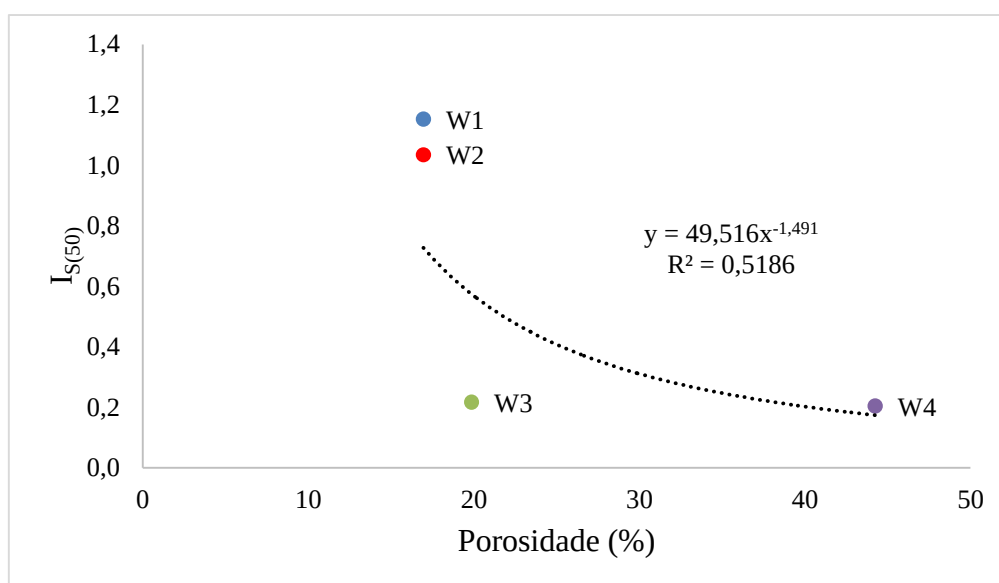


Figura 128 Relação entre os valores de porosidade com resultados de $I_{s(50)}$ para os graus de alteração.

Com base nas figuras 127 e 128 nota-se que há redução da resistência, seja da dureza da matriz (R), seja do valor de $I_{s(50)}$ com o aumento da porosidade, evidenciando a influência dos processos intempéricos nas propriedades mecânicas dos filitos.

Conforme as observações de campo os graus de alteração são distinguidos pela mudança de cor, características das discontinuidades (redução do espaçamento e, aumento da persistência, abertura e J_v), principalmente em planos paralelos à foliação. Cabe ressaltar que a perda da resistência à compressão (R) permitiu igualmente definir os graus de alteração.

Na escala da matriz da rocha as propriedades físicas apresentam marcantes descontinuidades, principalmente nas curvas de distribuição dos tamanhos dos poros. Essas descontinuidades das propriedades físicas e mecânicas são nítidas especialmente entre W2 e W3. Os ensaios de durabilidade, sem exceção, mostraram que o efeito do intemperismo não pode ser avaliado apenas com base na alteração da rocha devendo ser avaliado conjuntamente a outras características da rocha.

Sob o ponto de vista mineralógico é possível definir a evolução intempérica a partir da redução da quantidade de muscovita (mineral primário) e aumento da sericita (produto de sua alteração), bem como o desenvolvimento de microfissuras paralelas à foliação da rocha. Ambas as características também foram tidas como marcadoras do intemperismo. A presença de cimentações, compostas por óxidos (minerais máficos) e quartzo, foi observada ao longo dessas microdescontinuidades. Essa característica, assim como a concentração de argilominerais 2:1 (DRX) aumentam na transição de W1 para W2 e assim por diante, onde W4 detém as maiores quantidades de ambos, influenciando a variação das propriedades mecânicas para os graus de alteração.

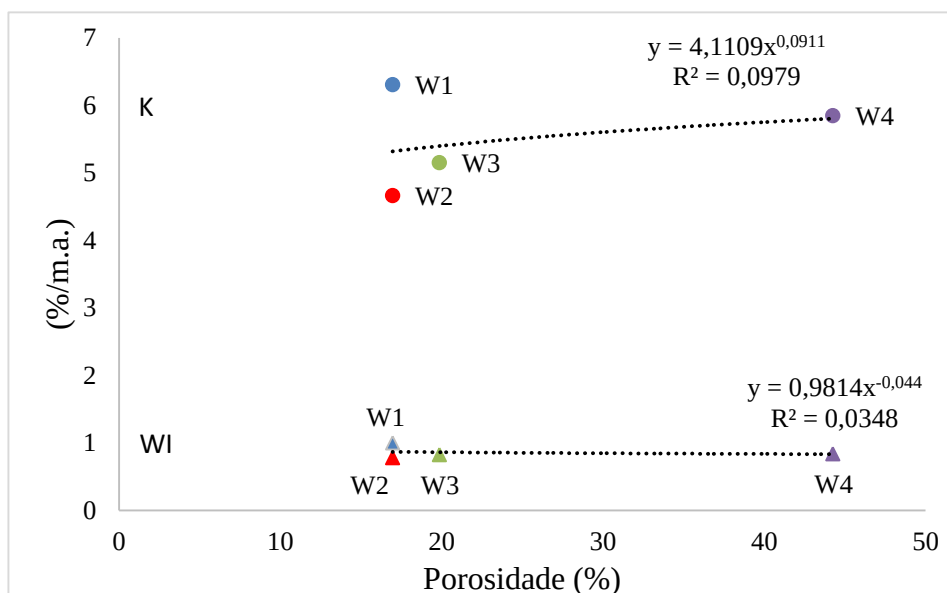


Figura 129 Relação entre os valores de porosidade com resultados de índices químicos normalizados K e WI para os graus de alteração.

Os resultados de FRX avaliados por índices de alteração (figura 129) mostram um enriquecimento de determinados teores com o desenvolvimento do intemperismo, justificando não só a mineralogia da rocha estudada como também a presença de cimentações, oriundas de outras formações geológicas, principalmente

ferríferas. Apesar da pouca influência química sobre o perfil, os índices de alteração K e WI, mostraram brusco aumento de W2 para W3 e sequencialmente redução para W4. A rocha, ao sofrer intemperismo, aumenta a porosidade, facilitando a percolação de fluidos mineralizados que precipitam em vazios da rocha, principalmente devido a porosidade secundária. Esse processo gera cimentação influenciando a durabilidade e resistência mecânica à compressão e ao cisalhamento da rocha. Quando saturadas, as amostras tendem a um enfraquecimento da matriz e a cimentação passa a contribuir com a resistência da amostra, contrabalanceando o efeito do intemperismo.

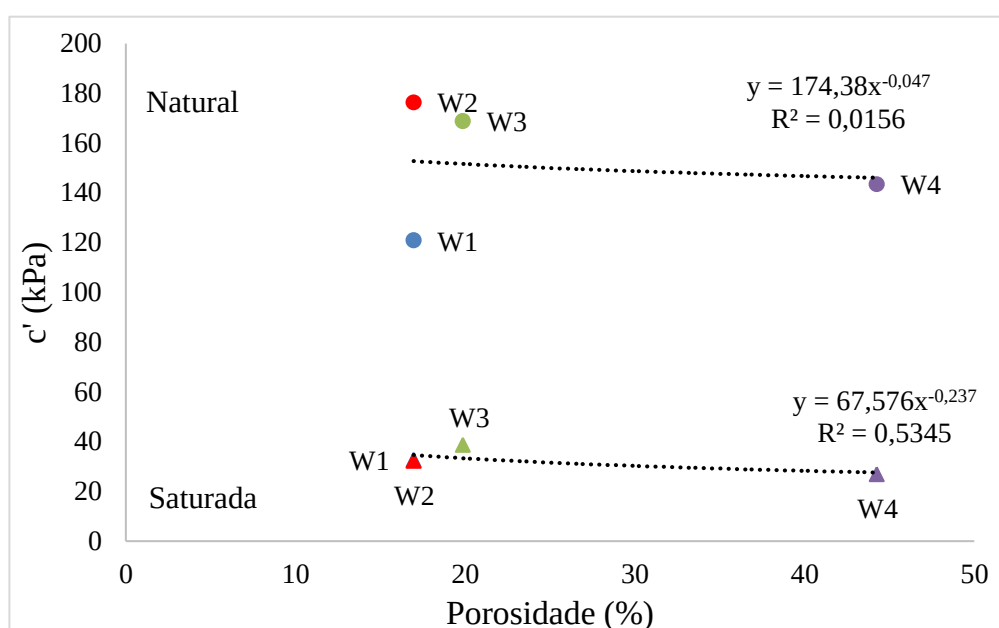


Figura 130 Relação entre os valores de porosidade com resultados de c' para os graus de alteração.

Em termos de propriedades mecânicas, se adotadas as correlações entre $I_{s(50)}$ e a compressão uniaxial, disponíveis na literatura, a rocha é branda de W1 até W4. Ressalta-se também a elevada dispersão dos dados de resistência e sua marcante não linearidade quando correlacionada com a porosidade (figura 128). Essa particularidade também foi observada na resistência ao cisalhamento.

Os valores de c' (figura 130) aumentam em função da porosidade, em ambas as condições (natural e saturada). W1 apresentou o menor valor na condição natural e W4 praticamente se igualou a W1 e W2. Assim, na condição natural, o maior valor de c' correspondeu à amostra com maiores níveis cimentados decrescendo conforme a influência da cimentação reduz ($W2 \text{ Foliação} > W2 > W3 > W4$) até o valor mais baixo, W1 (sem níveis cimentados). Quando as amostras foram cisalhadas na condição saturada a água influenciou diretamente as características

da matriz (argilominerais 2:1) havendo drástica redução de c' , para todos os graus de alteração. Entretanto, a redução da resistência da rocha não seguiu a mesma regra ($W2 \text{ Foliação} > W3 > W1 > W4 > W2$).

Considerando a rocha sem níveis cimentados ($W1$), sob a influência única do intemperismo, esperava-se que os parâmetros físicos e mecânicos seguissem a sequência de alteração $W1 > W2 > W3 > W4$ e os parâmetros químicos o inverso. Entretanto, a presença de níveis cimentados ao longo da foliação fornece à rocha uma resistência complementar influenciando diretamente as propriedades dos filitos.

Essas características podem ser observadas principalmente quando comparamos $W2$, $W3$ e $W4$, ou seja:

- $W2$ possui maior razão de matriz/níveis cimentados, desta forma a influência da alteração é menor, dos argilominerais maior e dos níveis cimentados, menor.
- Em $W3$ a razão matriz/níveis cimentados é menor e assim a influência da alteração é maior, dos argilominerais menor e dos níveis cimentados maior.
- Já $W4$ a razão matriz/níveis cimentados é ainda menor, sendo a influência da alteração maior, dos argilominerais menor e dos níveis cimentados maior.

Como já mencionado ao longo dos resultados, o efeito do intemperismo é mais elevado em $W4$, além de exibir menor proporção matriz/níveis cimentados. Apesar dessa característica esse grau não obteve a resistência fornecida pela cimentação. As amostras de $W2$ e $W3$ se sobressaem, alternadamente em determinados ensaios, devido à heterogeneidade da própria rocha, que pelas características anteriormente discutidas, possibilitam o desenvolvimento de porções mais alteradas e/ou cimentadas de forma distinta entre esses graus.

CONCLUSÕES

Os filitos estudados exibem efeitos do intemperismo. Considerando o desenvolvimento da frente de intemperismo em clima tropical, as variações das propriedades físicas e mecânicas marcam melhor a transição entre os graus de alteração do que as mudanças mineralógicas em si, mostrando a ação do intemperismo físico sobre o desenvolvimento do perfil. A evolução da frente de intemperismo não é gradual, já que as discontinuidades são interfaces abruptas entre diferentes estágios de alteração intempérica e exercem relevante papel na distribuição destes estágios no maciço rochoso.

A morfologia da frente de intemperismo para o filito estudado não se ajusta, em grande parte, aos modelos tradicionais descritos na literatura. Assim, não é razoável considerar uma classificação única que se ajuste a todos os tipos de rochas, principalmente se excetuarem características das discontinuidades, muito relevantes em maciços rochosos foliados. Os critérios tradicionalmente estabelecidos para descrição da alteração intempérica da matriz da rocha devem ser usados com ressalvas no caso de rochas intrinsecamente brandas.

Considerando os graus de alteração notam-se grandes discontinuidades das propriedades físicas e mecânicas, especialmente entre W2 e W3. Entretanto, comparando os níveis mais extremos (W1 e W4) observa-se em todos os sentidos, o efeito do intemperismo sobre a rocha. Quimicamente conclui-se que os processos de intemperismo não são tão marcantes quando comparamos a características que regem o intemperismo físico. Neste sentido a presença de discontinuidades é determinante para a ação de ambos os processos, não só por favorecer o acesso às porções mais internas do maciço, como permitir a percolação de fluidos mineralizados. A precipitação desses fluidos nos planos da foliação, principalmente, propiciou certa resistência mecânica e física em níveis com avançado grau de alteração (matriz da rocha mais fraca).

Conclui-se que, a avaliação do intemperismo em rochas de baixo grau metamórfico tendem a exibir grande heterogeneidade e provável anisotropia. Desta forma, devem ser consideradas: (i) as características do maciço rochoso (influência das discontinuidades), (ii) a presença de níveis cimentados e sua proporção em

relação à rocha intacta, (iii) as características da matriz (mineralogia, por exemplo), (iv) a presença de argilominerais expansivos e por fim, (V) o efeito da alteração sobre o todo conjunto (maciço rochoso).

Este estudo demonstra que os perfis de intemperismo em filitos, desenvolvidos em clima tropical, impõem grande heterogeneidade e variabilidade de propriedades no interior do maciço rochoso. Não é observada, de uma forma geral, linearidade na relação entre a resistência da matriz da rocha com propriedades físicas, químicas e mecânicas, que caracterizam a intensidade da alteração. Esse conjunto de características oferece complexidade à definição de modelos geomecânicos que representem adequadamente o meio geológico. Como consequência, há dificuldade na previsão do comportamento de estruturas de engenharia executadas em sítios que possuam essas rochas.

Sugestões Para Pesquisas Futuras

À continuação da pesquisa sobre frentes de alteração em rochas brandas propõem-se o desenvolvimento de novos estudos, elencados abaixo:

1. **Classificação de Perfis de Intemperismo:** Comparativo entre frentes de intemperismo de rochas brandas para adequação de classificações geomecânicas atualmente praticadas;
2. **Anisotropia:** Proposta de métodos de amostragens eficazes em rochas brandas e/ou alteradas (obtenção de CPs), de forma a subsidiar o estudo da anisotropia para essas rochas;
3. **Influência da cimentação nas características do maciço:** Investigação dessa particularidade nas propriedades físicas, mecânicas e químicas das rochas e consequentemente anisotropia causada. Complementação aos ensaios já executados, para: (i) avaliar as propriedades elásticas e sua densidade, bem como o grau de fissuramento da rocha (propagação de onda), (ii) obter a resistência à tração (ensaio brasileiro); (iii) determinação da resistência e deformabilidade das rochas, pela trajetória de tensões, além do mecanismo de ruptura (ensaio de compressão simples e triaxial) e. (v) determinação da resistência ao corte (*scratch test*);
4. **Revisão de Procedimentos para Avaliação do Intemperismo:** Ajuste a critérios de classificação em ensaios de durabilidade visando representar a

influência de características (cimentação) na alterabilidade da rocha. Correlacionar índices de durabilidade com parâmetros mecânicos. Aplicação discriminada de índices de alteração para avaliação do intemperismo químico;

5. **Subsídio a Parâmetros Geotécnicos:** Entendimento da influência de zonas mais competentes do maciço (planos cimentados, neste caso) em perfis de intemperismo e sua influência à “criterização” do maciço rochoso. Apoio a modelos matemáticos aplicadas às principais obras civis (cortes de estrada, taludes de mineração e escavações subterrâneas).

REFERENCIAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas técnicas. **NBR 12696: Agregados: Verificação do comportamento mediante ciclagem artificial água-estufa.** Rio de Janeiro, 1992.

ABNT – Associação Brasileira de Normas técnicas. **NBR 7584: Concreto endurecido – avaliação da dureza superficial pelo esclerômetro de reflexão.** Rio de Janeiro, 2012.

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

AGLIARDI, F.; CROSTA, G.; ZANCHI, A. Structural constraints on deep-seated slope deformation kinematics. **Engineering Geology**, v. 59, p. 83-102, 2001.

AKAI, K.; Testing methods for indurated soils and soft rocks – Interim report. ISSMFE – TC 22 – Technical Committee on Indurated Soils and Soft Rocks. Geotechnical Engineering of Hard Soils – Soft Rocks, In: Int. Symp. ISSMFE / IAEG / ISRM, **Anais...** Athens, Greece, 1993, v. 3, p. 1707-1737, 1997.

ALKMIM F.F.; BRITO NEVES B.B.; ALVES J.A.C. Arcabouço tectônico do Cráton do São Francisco: uma revisão. In: MISI, A.; DOMINGUEZ, J.M.L. (eds.), **O Cráton do São Francisco**, Salvador, SBG, p. 45-62, 1993.

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

ALMEIDA, F.F.M. O Cráton do São Francisco. **Rev. Bras. Geociências**, v. 7, p. 349-364, 1977.

ANDRADE, P. S.; SARAIVA, A. A. Physical and mechanical characterization of phyllites and metagreywackes in central Portugal. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, v. 69, p. 207-214, 2010.

AYDIN, A.; BASU, A. The Schmidt hammer in rock material characterization. **Engineering Geology**, v.81, p. 1-14, 2005.

AYDIN, A.; DUZGOREN-AYDIN, N.S. Indices for scaling and predicting weathering-induced changes in rock properties. **Environ. Eng. Geosci**, v.8, p. 121–135, 2002.

AZEVEDO, I.; MARQUES, E. A. G. **Introdução a Mecânica das Rochas.** Viçosa:UFV. 363 p., 2002.

BALTAZAR, O.F., ZUCCHETTI, M.; Lithofacies associations and structural evolution of the Archean Rio das Velhas greenstone belt, Quadrilátero Ferrífero, Brazil: a review of the setting of gold deposits Ore Geology Reviews. **Ore Geology Reviews**, v. 32, p. 471-499, 2007.

BALTAZAR, O.F.; BAARS F.J.; LOBATO, L.M.; REIS, L.B.; ACHTSCHIN, A.B.; BERNI, G.V.; SILVEIRA, V.D. Mapa Geológico Mariana na Escala 1:50.000 com Nota Explicativa. In: **Projeto Geologia do Quadrilátero Ferrífero - Integração e Correção Cartográfica em SIG com nota explicativa**. Lobato *et al.* (2005) CODEMIG. Belo Horizonte, 2005.

BALTAZAR, O.F.; BAARS F.J.; LOBATO, L.M.; REIS, L.B.; ACHTSCHIN, A.B.; BERNI, G.V.; SILVEIRA, V.D. Mapa Geológico Mariana na Escala 1:50.000 com Nota Explicativa. In: **Projeto Geologia do Quadrilátero Ferrífero - Integração e Correção Cartográfica em SIG com nota explicativa**. Lobato *et al.* (2005) CODEMIG. Belo Horizonte, 2005.

BARROSO, E. V. **Estudo das características geológicas e do comportamento geotécnico de um perfil de intemperismo em leptinito**. UFRJ: Dissertação (Mestrado em Geologia). UFRJ, Rio de Janeiro, 1993.

BARROSO, E. V.; POLIVANOV, H.; PRESTES, A.; NUNES, A. L. S.; VARGAS JR, E. A.; ANTUNES, F. Basic properties of weathered gneissic rocks in Rio de Janeiro, Brazil. In: Int. Symposium Geotechnical Engineering of Hard Soils-Soft Rocks, Athens, **Anais...** Rio de Janeiro, Brazil, v. 1, p. 29-35, 1993.

BARTON, N. Review of a new shear-strength criterion for rock joints. **Eng. Geol.**, v. 7, p. 287-332, 1973.

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

BASU, A; AYDIN, A. A method for normalization of Schmidt hammer rebound values. **International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences**, v. 41, p. 1211–1214, 2004.

BELL, F. G.; CULSHAW, M. G.; CRIPPS, J. C. A review of selected engineering geological characteristics of English Chalk. **Engineering Geology**, v. 54, p. 237-269, 1999.

BELL, F.G., ENTWISLE, D.C., CULSHAW,M.G. A geotechnical survey of some British Coal Measures mudstones, with particular emphasis on durability. **Eng. Geol.** 46, 115–129, 1997.

BENNETT, C.; NORBERT, M. Tunnelling within the Bunya Phyllite of Legacy Way, Brisbane, Queensland. In: 15 Australasian Tunnelling Conference, p. 131–140, **Anais...** Sydney, 2014.

BERHANE, G.; GEBREYOHANNES, T.; MARTENS, K.; WALRAEVENS, K. Overview of micro-dam reservoirs (MDR) in Tigray (northern Ethiopia): Challenges and benefits. **Journal of Africa Earth Sciences**, v. 123, p. 210-222, 2016.

BHASIN, R.; BARTON, N.; GRIMSTAD, E.; CHRYSSANTHAKIS, P. Engineering geological characterization of low strength anisotropic rocks in the Himalayan region for assessment of tunnel support. **Engineering Geology**, v. 40, p. 169-193, 1995.

BIENIAWSKI, Z. T. Determining Rock Mass Deformability: Experience from Case Histories. **Int. J. Rock Mechanics Min. Sci.**, v. 15, p. 237-247, 1978.

BIENIAWSKI, Z. T. Engineering Classification of Jointed Rock Masses. **Trans. S. Afr. Inst. Civ. Eng.**, v. 15, p. 335-344, 1973.

BIENIAWSKI, Z. T. **Engineering Rock Mass Classifications**. A complete Manual for Engineering and Geologists in Mining, Civil and Petroleum Engineering. John Wiley e Sons, 251p., 1989.

BIENIAWSKI, Z. T. Estimating the Strength of rock Materials. **J. S. Afr. Inst. Min. Metall**, v. 74, n. 8, p. 312-320, 1974.

BIENIAWSKI, Z. T. Rock Mass Classifications in Rock Engineering. In: Symposium on Exploration for Rock Engineering, **Anais...** Johannesburg, p. 97-106, 1976.

BIENIAWSKI, Z. T. **Rock Mechanics Design in Mining and Tunnelling**. A. A. Balkema:Rotterdam, p. 97-133, 1984.

BIENIAWSKI, Z. T. The Geomechanics Classification in Rock Engineering Applications. In: 4 Int. Congress Rock Mechanics, ISRM, **Anais...** Montreux, v. 2, p.41-48, 1979.

BRADY, B. H. G.; BROWN, E. T. Rock mechanics for underground mining. Allen & Unwin. London, 527 p, 1985.

BRIMHALL, G. H; DIETRICH, W. E. Constitutive mass balance relations between chemical composition, volume, density, porosity, and strain in metasomatic hydrochemkai systems:Results on weathering and pedogenesis. **Geochimica et Cosmochimica Acta** v. 51, 1986.

BROCH, E.; FRANKLIN, J. A. The point-load strength test. **Int. J. Rock Mechanics Min. Sci. Geomech. Abstr.**, v. 9, p. 669-697, 1972.

BROWN, R. T. **Rock characterization testing and monitoring**. ISRM Suggested Method. Pergamon Press, 211 p., 1981.

BSI. British Standards Institute. **Code of Practice for Site Investigations**, British Standard BS5930:1981. British Standards Institute, London. 1981.

BURTON, G. J.; PINEDA, J. A.; SHENG, D.; AIREY, D. Microstructural changes of an undisturbed, reconstituted and compacted high plasticity clay subjected to wetting and drying. **Engineering Geology**, v.193, p. 363-373, 2015.

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

CESP – Companhia Energética de São Paulo. **Ensaio de Lixiviação de Rochas – Lixiviação em extrator Soxhlet**. Norma CESPE/MRL-03. Laboratório Central de Engenharia Civil, São Paulo, 1983.

CHADWICK, A. O; BRIMHALL, G.H; HENDRICKS, D. M. From a black to a gray box a mass balance interpretation of pedogenesis. **Geomorphology**, v. 3, 1990.

CHEMALE, F. Jr., ROSIÈRE, C. A.; ENDO, I. The tectonic evolution of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. **Precambrian Research**, v. 65, p. 25 – 54, 1994.

CHITTLEBOROUGH, D.J. Indices of weathering for soils and paleosols formed on silicate rocks. **Australian Journal of Earth Sciences**, v. 38, n. 1, p. 15-20, 1991.

CHIU, H. K.; JOHNSTON, I. W.; DONALD, I. B. Appropriate techniques for triaxial testing of saturated soft rocks. **Int. J. Rock Mechanics Min. Sci. Geomech. Abstr.**, v. 20, p. 107-120, 1983.

CIAMPONE, M.A.; McVEY, D.E.; GERKE, T.L.; BRIGGS, W.D.; ZHANG, Y.; MAYNARD, J.B.; HUFF, W.D. Non-systematic weathering profile in the Blue Ridge Mountains, **Role of geochemical variables: Geological Society of America Abstracts with Programs**, v. 24, n. 7, 214 p., 1992.

CIELAB – Commission International de Eclairage. Recommendations on Uniform Color Spaces, Color Difference Equations, Psychometric Color Terms. Supplement 2 to CIE publication 15. **Colorimetry Bureau Central de la CIE**. Paris, 1976.

CLERICI, A. Engineering geological characterization of weak rocks: classification, sampling and testing. In: ISRM Symposium: Eurock'92, **Anais...** Chester, UK, J.A. Hudson (Editor), p. 179-184, 1992.

COLMAN, S. M. Chemical weathering of basalts and andesites: evidence from weathering rinds. **US Geol. Surv. Prof. Pap.**, n. 1246, 51 p., 1982.

COSTA, T. A. V.; MERCER, K.; DIGHT, P.; MARQUES, E. A. G. Weathered banded iron formations in Vale iron ore mines on the western side of the Iron Quadrangle, Brazil: weak hematite and weathered argillaceous itabirite geotechnical characteristics and implications of matric suction effects on slope stability. In: Slope Stability 2015. International Symposium on Slope Stability In open Pit Mining and Civil Engineering 2015, Cape Town. **Anais...** Cape Town: Slope Stability, 2015.

CZEREWKO, M. A.; CRIPPS, J. C. Simple index tests for assessing the durability properties of mudrocks. The Geotechnics of Hard Soils – Soft Rocks. In: 2 Int. Symp Hard Soils – Soft Rocks, **Anais...** Naples, Italy, v. 1, p. 127-135, 1998.

DARMODY, R. G.; THORN, C. E. AND ALLEN, C. E. Chemical weathering and boulder mantles, Kärkevagge, Swedish Lapland. **Geomorphology**, v. 67, p. 159-170, 2005.

DEARMAN, W. R. Weathering classification in the characterisation of rock: a revision. **Bulletin International Association of Engineering Geology**, v. 14, n. 1, p. 123-127, 1975.

DEARMAN, W. R.; BAYNES F. J.; IRFAN, T. Y. Engineering grading of weathered granite. **Engineering Geology**, v. 12, p. 345-374, 1978a.

DEARMAN, W. R.; IRFAN, T. Y. Assessment of the degree of weathering in granite using petrographic and physical index tests. In: International Symposium on Deterioration and 32 A. Aydin Protection of Stone Monuments, **Anais...** Paris, p. 1-135, 1978b.

DEERE, D. U.; MILLER, R. P. **Engineering Classification and Index Properties for intact rock**. Technical Report N. AFWL:TR, Univ. of Illinois, Urbana, p. 65 – 116, 1966.

DEERE, D. U.; PATTON, F. D. Slope stability in residual soils. In: 4 PanAmerican Conference on Soil Mechanics & Foundation Engineering, **Anais...** San Juan, n. 1, p. 87-170, 1971.

DEO, P. Shales as embankment materials. Report n°45, **Joint Highway Research Project**, Purdue University, West Lafayette, KY, 1972.

DEO, P. Use of shale in embankments. Report n°14, **Joint Highway Research Project**, Purdue University, West Lafayette, IN, 1973.

DEO, P.; WOOD, L. E.; LOVELL, C. W. Use of shale in embankments. **National Research Council, Transportation Research Board**, Special Report, v. 148, p. 87-96, 1974.

DHAKAL, G.; YONEDA, T.; KATO, M.; KANEKO, K. Slake durability and mineralogical properties of some pyroclastic and sedimentary rocks. **Engineering Geology**, v. 65, p. 31-45, 2002.

DICK, J. C.; SHAKOOR, A. Lithological controls of mudrock durability. **Quarterly Journal Engineering Geology**, London, v. 25, p. 31-46, 1992.

DICK, J. C.; SHAKOOR, A. The effects of lithologic characteristics on mudrock durability. In: 6 Int. Congress, Int. Assoc. engineering Geology, **Anais...** Amsterdam, v. 4, p. 3061-3066, 1990.

DICK, J. C.; SHAKOOR, A.; WELLS, N. A geological approach toward developing a mudrock-durability classification system. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 31, p. 17-27, 1994.

DILÁSCIO, M. V.; FIGUEIREDO, R. P. Estudo computacional do mecanismo de tombamento flexural em filitos **Rem: Revista Escola de Minas**, v. 58, n. 1, p. 21-26 Escola de Minas Ouro Preto, Brasil, 2005.

DOBEREINER, L. E. DE FREITAS, M. H. Geotechnical Properties of Weak Sandstones. *Géotechnique*, v. 36, p. 79-94, 1986.

DOBEREINER, L. **Engineering geology of weak sandstones**. PhD Thesis. Imperial College of Science and Technology. University of London. 471 p., 1984.

DOBEREINER, L. General Report/Discussion session 5: Construction problems related to excavation on soft rock. In: 12 Int. Conf. Soil Mech. And Found. Engineering, **Anais...** Rio de Janeiro, p. 2435-2449, 1989.

DOBEREINER, L.; DURVILE, J. L.; RESTITUITO, J. Weathering of the Massiac Gneiss (Massif Central, France). **Bulletin International Association of Engineering Geology**, v. 47, p. 79-96, 1993.

DORR 2d, J. V. N. Physiographic, stratigraphic and structural development of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. **United States Geological Survey**, n. 641-A, p. 1-110, 1969.

DUFFAUT, P. Structural weaknesses in rocks and rock masses. Tentative classifications and behavior. In: International Symposium on Weak Rock, **Anais...** Tóquio, p. 93-97, 1981.

DUSSEAUT, M. B.; CIMOLINI, P.; SODERBERG, H. E SCAFE, D. W. Rapid index tests for transicional materials. **Geoth. Testing Jr.**, GTJODJ, v. 6, n. 2, p. 64-72, 1983.

ENDO, I.; MACHADO, R. Reavaliação e novos dados geocronológicos (Pb/Pb E K/Ar) da região do Quadrilátero Ferrífero e adjacências. **Rev. Inst. Geoc.**, USP, Geol. USP Sér. Cient., São Paulo, v. 2, p. 23-40, 2002.

ERGULER, Z. A.; SHAKOOR, A. Relative contribution of various climatic processes in disintegration of clay-bearing rocks. **Engineering Geology**, v. 108, p. 36-42, 2009.

FEDO, C. M.; NESBITT, H. W.; YOUNG, G. M. Unraveling the effects of potassium metasomatism in sedimentary rocks and paleosols, with implications for paleoweathering conditions and provenance. **Geology**, v. 23, p. 921-924, 1995.

FELIX, C. Essais et critères de choix pour des grés (molasses) de substitution lors de travaux de restauration. **Chantiers, Suisse**, v. 18, p. 429-423, 1987.

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 (Mestrado em Engenharia Civil), UFOP, Ouro Preto, MG, 136 p., 2000.

FERRARI, A.; FAVERO, V.; MARSCHALL, P.; LALOULI, L. Experimental analysis of the water retention behavior of shales. **International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences**, v. 72, p. 61-70, 2014.

FERREIRA, S. B. **Estudo de ruptura em talude urbano no Morro do Curral - Ouro Preto/MG**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral), UFOP, Ouro Preto, MG. 87 p., 2004.

FIETZE, C.; CREIGHTON, A.; CASTRO, L., M.; HAMMAH, R. **Pit slope deisgn in phyllites for the simandou large open pit project: Slope Stability 2013**. P.M. Dight (ed) 2013 Australian Centre for Geomechanics, Perth, 2013.

FIGUEIREDO, R. O.; AQUINO, T. V. C. 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 (ABGE). **Anais...** Florianópolis. p. 2274-2290, 2005.

FIORI, P. A.; CARMIGNANI. **Fundamentos de mecânica dos solos e das rochas – aplicações na estabilidade de taludes**. Ed. UFPR. 550 p., 2001.

FOOKES, P.G., SWEENEY, M., MANBY, C.N.D. AND MARTIN, R.P. Geological and geotechnical engineering aspects of low-cost roads in mountainous terrain. **Engineering Geology**, v. 21, n. 1-2, 1985.

FRANKLIN, J. A. A shale rating system and tentative applications to shale performance. **Transportation Research Record**, v. 790, p. 2-12, 1981.

FRANKLIN, J. A.; CHANDRA, A. The slake durability test. **Int. J. Rock. Mechanics Min. Sci. Geomech. Abstr.**, v. 9, p. 325-341, 1972.

FRANKLIN, J. A; BROCH, E. E WALTON, G. Logging the mechanical character of rock. **Inst. Min. Metall. Trans.**, Sec. A, v. 80, n. 770, p. A1-A9, 1971.

FRANKLIN, J.A. Evaluation of shales for construction projects: An Ontario shale rating system. Report RR 229, **Research and Development Branch, Ministry of Transportation and Research**, Toronto.1983

FRAZÃO, E. B. **Metodologia para Avaliação da Alterabilidade de Rochas a Partir de Estudo Experimental em Amostras de Basalto da UHE de Três Irmãos - Estado de São Paulo**. Tese (Doutorado), EESC, USP, São Carlos, 1993.

FUENKAJORN, K. Experimental assessment of long-term durability of some weak rocks. **Bull Eng Geol Environ**, v. 70, p. 203–211, 2011.

FUSI, N; MARTINEZ-MARTINEZ, J. Mercury porosimetry as a tool for improving quality of micro-CT images in low porosity carbonate rocks. **Engineering Geology**, v. 166, p. 272-282, 2013.

GAMBLE, J. C. **Durability-plasticity classification of shales and other argillaceous rocks**. PhD Thesis, Univ. Illinois, Urbana-Champaign, 161 p., 1971.

GAMON, T. I. A comparison of schemes for engineering description and classification of weathered rocks in Hong Kong. **Bulletin of International Association of Engineering Geology**, n. 28, p. 225-232, 1983.

GARDNER, L. R. Long-term isovolumetric leaching of aluminum from rocks during weathering: implications for the genesis of saprolite. **Catena**, v. 19, p. 521-537, 1992.

GARDNER, L. R. Mobilization of AL and Ti during weathering - isovolumetric geochemical evidence. **Chemical Geology**, v. 30, p. 151-165, 1980.

GARZÓN, E.; SÁNCHEZ-SOTO, P. J.; ROMERO, E. Physical and geotechnical properties of clay phyllites. **Applied Clay Science**, v. 48, p. 307-318, 2010.

GAUTAM, T. P.; SHAKOOR, A. Slaking behavior of clay-bearing rocks during a one-year exposure to natural climatic conditions **Engineering Geology** v. 166, p. 17–25, 2013.

GCO: Geotechnical Control Office. **Guide to rock and soil descriptions**. Geotechnical Control Office, Hong Kong Government Printer, Hong Kong, 1988.

GENIS, M.; BASARIR, H.; OZARSLAN, A.; BILIR, E., BALABAN, E. Engineering geological appraisal of the rock masses and preliminary support design, Dorukhan Tunnel, Zonguldak, Turkey. **Engineering Geology**, v. 92, p. 14-26, 2007.

GEOLOGICAL SOCIETY. The description of rock masses for engineering purposes. Engineering Group Working Party Report. **Quarterly Journal of Engineering Geology**, n°. 10, p. 355-388, 1977.

GIDIGASU, M. D. Degree of weathering in the identification of laterite materials for engineering purposes: a review. **Engineering Geology**, v. 8, p. 213-266, 1974.

GIDIGASU, M. D. The importance of soil genesis in the engineering classification of Ghana soils. **Engineering Geology**, v. 5, p. 117-161, 1971.

GÖKÇEOĞLU, C.; AKSOY, H. New approaches to the characterization of claybearing, densely jointed and weak rock masses. **Engineering Geology**, v. 58, p. 1–23, 2000.

GÖKCEOLU, C.; ULUSAY, R.; SÖNMEZ, H. 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**, v. 57, n°. 3-4, p. 215-237, 2000.

GOLDICH, S. S. Stone line profiles: importance in geochemical exploration. **J. Geochem. Explor.**, v. 30, p. 35-61, 1938.

GOMES, C. M. B. C. **Caracterização geotécnica de rochas brandas**. Dissertação (Mestrado). FCT/UNL, Lisboa, 257 p., 1992.

GOODMAN, R. E. **Engineering Geology. Rock in engineering construction**. John Wiley & Sons, 412 p., 1993.

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

GRAINGER, P. The classification of mudrocks for engineering purposes. **Quarterly Journal Engineering Geology**, London, v. 17, p. 381-387, 1984.

GRECO, R.; SORRISO-VALVO, M. Relationships between joint apparent separation, Schmidt hammer rebound value, and distance to faults, in rocky outcrops, Calabria, Southern Italy. **Engineering Geology** v. 78, p. 309–320, 2005.

HARNOIS, L. 1988. The CIW index: a new chemical index of weathering. **Sedimentary Geology**. v. 55, p. 319-322, 1988.

HARNOIS, L.; MOORE, J. M. Geochemistry and origin of the ore chimney formation, a transported paleoregolith in the Greenville Province of Southeastern Ontario, Canada. **Chemical Geology**, v. 69, p. 267-289, 1988.

HARRASSOWITZ, H. Laterit. Material und Versuch erdgeschichtlicher Auswertung. **Fortschritte der Geologie und Paläontologie**, v. 4, p. 14. Berlin, 1926.

HASUI, Y.; CARNEIRO, C. D. R.; ALMEIDA, F. F. M.; BARTORELLI, A. **Geologia do Brasil**. Editora Beca, São Paulo, 900 p., 2012.

HAWKES; MELLOR, M. Uniaxial testing in rock mechanics laboratories. **Engineering Geology**, v. 4, p. 177-285, 1970.

HAWKINS, A. B. General report: The nature of hard soils/soft rocks. The Geotechnics of Hard Soils – Soft Rocks. In: 2 Int. Symp. Hard Soils – Soft Rocks, **Anais...** Naples, Italy, 1998, v. 3, p. 1391-1402, 2000.

HAWKINS, A. B.; PINCHES, G. M. The engineering description of mudrocks. **Quarterly Journal Engineering Geology**, London, v. 25, n°.1, p. 17-30, 1992.

HE, C.; WANG, B. Research progress and development trends of highway tunnels in China. **Journal of Modern Transportation**, v. 21, p. 209-223, 2013.

HE, M. Latest progress of soft rock mechanics and engineering in China. **Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering**, v. 6, n°. 3, p. 165-179, 2014.

HEAD, K. A. Manual of soil laboratory testing. Pentech Press, v. 2 London, 442 p., 1986.

HENDERSON, P. J.; MCMARTIN, I.; HALL, G. E.; PERCIVAL, J. B.; WALKER, D. A. The chemical and physical characteristics of heavy metals in humus and till in the vicinity of the base metal smelter at Flin Flon, Manitoba, Canada, **Environmental Geology**, v. 34, p. 39–58, 1998.

HENG, S; GUO, Y.; YANG, C.; DAEMEN, J.; Li, Z. Experimental and theoretical study of the anisotropic properties of shale. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, v. 74, p. 58-68, 2015.

HOEK, E.; BROWN, E. T. Practical Estimates of Rock Mass Strength, **Int. J. rock Mechanics and Mining Sciences**, Pergamon, v. 34, n.8, p. 1165-1186, 1997.

HOEK, E.; GUEVARA, R. Overcoming squeezing in the Yacambú-Quibor Tunnel, Venezuela. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, v. 42, p. 389-418, 2009.

HOLANDA, C. E. F.; BUENO, G. T. Comportamento de elementos químicos em ambiente supergênico e pedogênese – Parque Municipal das Mangabeiras, Quadrilátero Ferrífero (MG). **Rev. de Geografia**. Recife: UFPE – DCG/NAPA, v. especial VIII SINAGEO, n. 3, 2010.

HOPKINS, T. C.; DEEN, R. C. Identification of shales. **Geotechnical Testing J.**, GTJODJ, v. 7, n. 1, p. 10-18, 1984.

HOSHINO, K. Consolidation and strength of the soft sedimentary rocks. In: International Symposium on Weak Rock, **Anais...** Tóquio, p. 155-160, 1981.

HU, R.; OYEDIRAN, I.A.; GAO, W.; ZHANG, X.; LI, H.L. "Plagioclase solution degree index": a new index to evaluate the weathering degree of granite. **Bull. Eng. Geol. Environ.**, v. 73, p. 589–594, 2014.

HUDEC, P. Rock properties and physical processes of rapid weathering and deterioration. In: Moore, D. P., Hungr, O. (Eds), **Proceedings of 8th International Congress of IAEG**, v. 1. Balkema, Rotterdam, p. 335-341, 1998.

IAEG. International Association of Engineering Geology Rock and soil description and classification for engineering geological mapping. **Bulletin of International Association of Engineering Geology**, n.24, p. 253-274, 1981.

ISRM – International Society of Rock Mechanics. **Basic geotechnical description of rock masses**. Int. Society of Rock Mechanics, Commission on the Classification of Rock and Rock Masses. Int. J. Rock. Mechanics Min. Sci. Geomech. Abstr, v. 18, p. 85-110, 1981.

ISRM – International Society of Rock Mechanics. **Suggested methods for determining water content, porosity, density, absorption and related properties and swelling and slake durability index properties**. Int. J. Rock. Mechanics Min. Sci. Geomech. Abstr., v. 16, n.2, p. 141-156, 1979.

ISRM – International Society of Rock Mechanics. **The ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring**: 2007-2014, 5 ed., R. Ulusay (Editor). 2015.

JACKSON, M.L. **Soil chemical analysis**: advanced course. Published by the author, Dep. of Soil Science, Univ. of Wisconsin, Madison, WI. 2 ed., 1969.

JAMEI, M; GUIRAS, H.; CHTOUROU, Y.; KALLEL, A., ROMERO E.; GEORGOPOULOS, I. Water retention properties of perlite as a material with crushable soft particles. **Engineering Geology**, v. 122, p. 261-277, 2011.

JAYAWARDENA, U. S. DE; IZAWA, E. A new chemical index of weathering for metamorphic silicate rocks in tropical regions: a study from Sri Lanka. **Engineering Geology**, v. 36, p. 303-310, 1994.

JEFFCOATE, A.; CAMPBELL, M.; VANNAY, J-C.; PERRIAUX, B. Modelling Intact Rock Strength of Clay-Rich Rocks with Geochemistry at the Simandou Iron Ore Deposit, Guinea West Africa. In: Iron Ore Conference **Anais...** Perth, Wa, p. 12-14, 2013.

JENNY, H., **Factors of soil formation**. New York, McGraw-Hill, 281 p., 1941.

JEREMIAS, F. T. S. A. A. **Influência dos factores geológicos nas propriedades geotécnicas das rochas silto-argilosas**. Tese (Especialista do LNEC). Lisboa. 474 p., 1997.

KANJI, M. A. Critical issues in soft rocks. **Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering**, v. 6, p. 186-195, 2014.

KATZ, O.; RECHES, Z.; ROEGIERS, J.-C. Evaluation of mechanical rock properties using a schmidt hammer. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, v. 37, p. 723-728, 2000.

KNAUER, L. G.; SCHRANK, A. A origem dos filitos hematíticos da Serra do Espinhaço Meridional, Minas Gerais. **Geonomos**, Belo Horizonte, v. 01, n. 01, p. 33-38, 1994.

KONG, T. B.; KOMOO, I. Urban Geology: Case Study of Kuala Lumpur, Malaysia. **Engineering Geology**, Amsterdam, v. 28, n. 1-2, p. 71-94, 1990.

LANA, M. S. **Estudo dos mecanismos de ruptura em taludes de grande altura em um maciço rochoso de geologia estrutural complexa**. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Minas). UFMG. Belo Horizonte, 211 p., 2000.

LANA, MILENE SABINO, Numerical modeling of failure mechanisms in phyllite mine slopes in Brazil. **International Journal of Mining Science and Technology**, v.24, n. 6, p. 77-789, 2014.

LASHKARIPOUR, G. R. E PASSARIS, E. K. S. Correlations between index parameters and mechanical properties of shales. In: 8 Int. Congress Rock Mechanics, ISRM, **Anais...** Tokyo, v. 1, p. 257-261, 1995.

LE PERA, E.; SORRISO-VALVO, M. Weathering, erosion and sediment composition in a high-gradient river, Calabria, Italy. **Earth Surface Processes and Landforms**. v. 25, p. 277-292, 2000.

LEÃO, M. F. **Análise tensão-deformação de uma barragem de concreto gravidade em solo residual preponderantemente anisotrópico**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Departamento de Engenharia Civil, UERJ, Rio de Janeiro, 2015.

LEÃO, M. F. **Modelagem geológico-geomecânica da Barragem San Juan, República Dominicana**. Dissertação (Mestrado em Geologia), Departamento de Geologia, UFRJ. Rio de Janeiro, 2011.

LEÃO, M. F.; BARROSO, E. V.; POLIVANOV, H.; MARQUES, E. A. G.; VARGAS Jr. A. E. Weathering of metapelites from the Quadrilátero Ferrífero mineral province, southeastern Brazil. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, v. 76, p. 1-15, 2017.

LEÃO, M. F.; BARROSO, E. V. Comportamento Geotécnico de Perfis de Alteração Oriundos de Rochas Metamórficas Existentes na Península de Samaná, República Dominicana. In: CBGE, 2013, Rio de Janeiro. Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental. **Anais...**São Paulo: ABGE, 2013. v. 01, p. 52-52. 2013.

LEÃO, M. F.; MARQUES, E. A. G. Morphology and geotechnical characterization of a phyllite weathering profile developed under tropical climate. In: 5 International Conference on Geotechnical and Geophysical Site Characterisation, **Anais...Queensland**, 2016.

LEE, S. G. FREITAS, M. H. Quantitative definition of highly weathered granite using the slake durability test. **Géotechnique**. v. 38, p. 635-640, 1988.

LICHT, O. A. B. **Prospecção Geoquímica**: Princípios, técnicas e métodos. Rio de Janeiro: CPRM, 35 p, 1998.

LOBATO et al.. **Projeto Geologia do Quadrilátero Ferrífero: Integração e Correção Cartográfica em SIG com Nota Explicativa**. Belo Horizonte: CODEMIG, 1 CD-ROM, 2005.

LONDE, P. The Malpasset Dam Failure. **Engineering Geology**, Amsterdam, v. 24, n.1-4, p. 295-329, 1987.

LOOK, B. G.; GRIFFITHS, S. G. An engineering assessment of the strength and deformation properties of brisbane rocks. **Australian Geomechanics Journal**, v. 36, p. 17-30, 2001.

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

LUMB, P. The properties of decomposed granite. **Géotechnique**, v. 12, n. 3, p. 226-243, 1962.

LUTTON, R. J. **Design and construction of compacted shales embankments**. v. 3, Slaking Indexes for Design Federal Highway Administration, US Department of Transportation, Report n. FHWA-RD-77-1, 94 p., 1977.

MAIA, P. C. de A. **Avaliação do Comportamento Geomecânico e de Alterabilidade de Enrocamentos**. PUC: Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Civil), Departamento de Engenharia Civil, PUC, Rio De Janeiro, 2001.

MARQUES, E. A. G.; VARGAS Jr.; E. A.; Antunes, F. S. A study of the durability of some shales, mudrocks and siltstones from Brazil. **Geotechnical and Geological Engineering**, v. 23, p. 321-348, 2005.

MARQUES, E. A. G.; WILLIAMS, D. J. Weathering Profiles of Bunya Phyllite in Southwest Brisbane - a Geotechnical Approach. In: 12 Australia New Zealand Conference on Geomechanics, 2015. Wellington. **Anais...** Wellington: Changing the Face of the Earth, v. 1, p. 1-8, 2015.

MARQUES, E. A. G.; WILLIAMS, D. J.; PEREIRA, L. C. Weathering profiles of basalts and tuffs from mapleton-maleny plateau – A geotechnical approach. In: 15 Congresso nacional de Geotecnia e 8 Congresso Luso-Brasileiro de Geotecnia, A Geotecnia e os Desafios Societais. 2016, Porto. **Anais...** Porto: Sociedade Portuguesa de Geotecnia, 2016.

MARQUES, E. A. G.; VARGAS Jr, E. A., Alteration studies of some shales and siltstones of the Recôncavo sedimentary basin - Northeast Brazil. In: 7 International Congress of The International Association of Engineering Geology, 1994, Lisboa. 7 International Congress of The International Association of Engineering Geology. **Anais...** Rotterdam, Netherlands: A. A. Balkema, p. 1-8.1994.

MARQUES, E.A.G.; BARROSO, E. V.; MENEZES FILHO, A.P.; VARGAS, E. DO A. Weathering zones on metamorphic rocks from Rio de Janeiro: Physical, mineralogical and geomechanical characterization. **Engineering Geology**, v. 111, p. 1-18, 2010.

MARTIN, R. P. Use of index tests for engineering assessment of weathered rocks. In: 5 Int. Congress, Int. Assoc. Engineering Geology, **Anais...** Buenos Aires, 5th, p. 433-450, 1986.

MAXWELL, C. H. Geology and ore deposits of the Alegria district, Minas Gerais, Brazil. **U.S. Geol. Surv. Prof. Paper** v. 341-J, p. 72, 1972.

MINETTE, Enivaldo. **Quantificação Geomecânica e de Alterabilidade de um Diorito**. PUC: Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Departamento de Engenharia Civil, PUC, Rio De Janeiro, 1982.

MISCEVIC, P.; VLASTELICA, G. Impact of weathering on slope stability in soft rock mass. **Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering**, v. 6, p. 240-250, 2014.

MOON, V. G.; BEATTIE, A. G. Textural and microstructural influences on the durability of Waikato Coal Measures mudrocks. **Quarterly Journal Engineering Geology**, v. 28, p. 303-312, 1995.

MORGENSTERN, N. R.; EIGENBROD, K. D. Classification of argillaceous soils and rocks. **J. Geotech. Engineering Div., Amer. Soc. Civ. Eng**, v. 100, n. GT 10, p. 1137-1156, 1974.

MOYE, D. G. Engineering geology for the Snowy Mountains Scheme. **Journal of the Institution of Engineers**, v. 27, p. 287-298, 1955.

MÜLLER, L. Rock mass behavior – determination and application in engineering practice; advances in rock mechanics. In: 5 Int. Congress Rock Mechanics, ISRM, **Anais...** Denver, v. 1, p. 205-215, 1974.

NERI M. E. N. V. **Supergrupo minas na serra de bom sucesso, extremo sudoeste do quadrilátero ferrífero – MG: petrografia, geoquímica e isótopos de U-Pb**. Dissertação (Mestrado em Geologia). UFMG. Belo Horizonte, 2012.

NESBITT, H. W.; YOUNG, G. M. Early proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites. **Nature**, v. 279, p. 715-717, 1982.

NEWBERRY, J. Engineering geology in the investigation and construction of the Batang Padang hydro-electric scheme, Malaysia. **Quarterly Journal of Engineering Geology**, n. 3, p. 151-181, 1970.

NOCE C.M., MACHADO N., TEIXEIRA W. U-Pb geochronology of gneisses and granitoids in the Quadrilátero Ferrífero (southern São Francisco craton): age constraints for Archean and Paleoproterozoic magmatism and metamorphism. **Rev.Bras. Geoc.**, v. 28, p. 95-102, 1998.

OHARA, T.; RUEDA, J. R. J.; MATTOS, J. T. Características espectrais e geoquímicas de perfis de alteração intempérica em granitóides da região leste do estado de São Paulo, Brasil. In: Anais XI SBSR, **Anais...**Belo Horizonte, Brasil. p. 903-911, 2003.

OJIMA, L. M.; RODRIGUES, J. D. Weathering of phyllite in Morgavel Tunnel. In: Int. IAEG Symp. On Engineering Geology and Underground Construction, **Anais...** Lisboa, v.1, p. 11-114, 1983.

OLIVEIRA, F; WRIGHT, H.; LE CLÉAC'H, JM.; PELLENARD, P. Fabric control on strain and rupture of heterogeneous shale samples by using a non-conventional mechanical test. **Applied Clay Science**, v. 26, p. 367-387, 2004.

OLIVEIRA, R. Weak rock material. The engineering geology of weak rock. In: 26 Annual Conference of the Engineering Group of the Geological Society, **Anais...** Leeds, United Kingdom, n. 8 , p. 5-15, 1993.

OLIVIER, H. J. Importance of rock durability in the engineering classification of Karoo rock masses for tunneling. In: Symp. Explor. Rock Engineering, **Anais...** Johannesburg, Balkema, p. 137-144, 1976.

OLIVIER, H.J., A new engineering geological rock durability classification. **Eng. Geol.**, v. 14, p. 255-279, 1979.

OLIVIER, H.J., Some aspects of the influence of mineralogy and moisture redistribution on the weathering behaviour of mudrocks. In: Proc. 4th Int Cong. Rock Mech. **Anais...**Montreux, v. 3, p. 1–8, 1980.

OLIVIER, H.J.: Some aspects of the engineering-geological properties of swelling and slaking mudrocks, In: Proceedings of 6th International IAEG Congress. **Anais...**Rotterdam, p. 707–711, 1990.

PALACIO A. B. **Caracterização petrográfica e geoquímica das rochas encaixantes e dos minérios auríferos da Mina de Morro Velho (Mina Velha) – Distrito de Nova Lima – MG.** Dissertação (Mestrado em Geociências). Campinas, SP, 2003.

PALMSTROM, A. Characterizing the Strength of Rock Masses for Use in Design of Underground Structures, In: Conf. Design and Construction of Underground Structures, **Anais...** New Delhi, p. 43-52, 1995.

PALMSTROM, A. Measurements of and Correlations between Block Size and Rock Quality Designation (RQD). **Tunnels and Underground Space Technology**, v. 20, p. 362-377, 2005.

PALMSTROM, A. Rmi: A System for Characterizing Rock Mass Strength for Use in Rock Engineering. **J. Rock Mechanics and Tunneling Technology**, India, v. 1, n. 2, p. 69-108, 1996.

PANDA, M. K.; MOHANTY, S.; PINGUA, B. M. P.; MISHRA, A. K. Engineering geological and geotechnical investigations along the head race tunnel in Teesta Stage-III hydroelectric Project, India. **Engineering Geology**, n. 181, p. 297-308, 2014.

PAPADOPOULOS, Z.; MARINOS, P. On the anisotropy of the athenian schist and its relation to weathering. **Bulletin of the International Association of Engineering Geology**, n. 45, p. 111-116, 1992.

PECHORKIN, I. A. Engineering geological aspects of study of karst deposits. In: 5 Int. Congress, Int. Assoc. Engineering Geology, **Anais...** Buenos Aires, 1986, p. 637-641, 1986.

PELLS, O. J. N.; FERRY, M. J. Needles stringency in sample preparation standards for laboratory testing of weak rocks. In: 5 Int. Congress Rock Mechanics, ISRM, **Anais...** Melbourne, v. 1, p. A203-A207, 1983.

PEÑA, F. J. R. **Elastic properties of sedimentary anisotropic rocks**. Dissertation (Master of Degree), Massachusetts Institute of Technology, Venezuela, 1989.

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

PINHEIRO, A. L.; LANA, M. S.; SOBREIRA, F. G. Use of the distinct element method to study flexural toppling at the Pico Mine, Brazil. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, n. 74, p. 1177-1186, 2015.

PINHO, A. B. **Caracterização Geotécnica de Maciços Rochosos de Baixa Resistência – o Flysch do Baixo Alentejo**. Évora: Tese (Doutorado Geologia). Universidade de Évora, Évora, 2003.

POISEL, R.; ANGERER, H.; PÖLLINGER, M.; KALCHER, T.; KITTL, H. Mechanics and velocity of the Lärchberg-Galgenwald landslide (Austria). **Engineering Geology**, v. 109, p. 57-66, 2009.

POLIVANOV, H.. **Caracterização química, mineralógica, física e geotécnica de perfis de intemperismo desenvolvidos de gnaisses no Rio de Janeiro**. UFRJ: Tese (Doutorado em Geologia), Departamento de Geologia. UFRJ, Rio de Janeiro. RJ, 1998.

PRODAN, V., M.; MILEUSNIĆ, M.; ARBANAS, S. M.; ARBANAS Z, Influence of weathering processes on the shear strength of siltstones from a flysch rock mass along the northern Adriatic coast of Croatia. **Bull. Eng. Geol. Environ.** p. 1-17, 2016.

PYE, K.; MILLER, J. A. Chemical and biochemical weathering of pyritic mudrocks in a shale embankment. **Quarterly Journal Engineering Geology**, v. 23, p. 265-381, 1990.

RAJ, J. K. Characterisation of weathering profiles developed over granitic bedrock in humid tropical areas. In: International Seminar on Laterite, **Anais...** Kuala Lumpur, v. 1, p. 355-374, 1983.

RAMAMURTHY, T.; VENKATAPPA, R. G.; SINGH, J. Engineering behaviour of phyllites. **Engineering Geology**, v. 33, p. 209–225, 1993.

RAPOSO F. O. **Formações ferríferas e metassedimentos químicos de áreas selecionadas do Quadrilátero Ferrífero e suas relações com níveis rudáceos**. Dissertação (Mestrado em Geologia) Instituto de Geociências, UFMG, Minas Gerais, 127 p., 1996.

REICHE, P. Graphic representation of chemical weathering. **J. Sedim. Pet.**, v. 13, p. 58-68, 1943.

ROCHA FILHO, P.; ANTUNES, F. S.; FALCÃO, M. F. G., Quantitative influence of the weathering upon the mechanical properties of a Young gneiss residual soil. In: First Int. Conf. Geomech. Trop. Lateritic Saprolitic Soils Brasília, v. 1, p. 281-294, **Anais...** Brasil, 1985.

ROCHA, M. Alguns problemas relativos à Mecânica das Rochas dos materiais de baixa resistência. **Memória nº491**, LNEC, Lisboa, 25 p. 1977.

ROCHA, M. **Estruturas subterrâneas**. LNEC, Lisboa. 1976.

RODRIGUES, J. D. About the quantitative determination of rock weatherability. A case history. Memória n. 449, **LNEC**, 18 p., 1978.

RODRIGUES, J. D. **Alterabilidade de rochas em problemas de Geologia de Engenharia. Aplicação a casos portugueses**. Tese (Especialista do LNEC), Lisboa, 1975.

RODRIGUES, J. D. Estimation of the content of clay minerals and its significance in stone decay. Memória n.478, **LNEC**, 14 p., 1976.

RODRIGUES, J. D. Proposed Geotechnical Classification of Carbonate Rocks Based on Portuguese and Algerian Examples. **Memória n. 704**, LNEC, Lisboa, 1988.

ROMANA, M. New Adjustment Ratings for Application of Bieniawski Classification to Slopes. In: Symposium on the Role of Rock Mechanics, **Anais...** Zacatecas, p. 49-53, 1985.

ROMERO, E., SIMMS, P. H., Microstructure investigation in unsaturated soils: a review with special attention to contribution of mercury intrusion porosimetry and environmental scanning electron microscopy. **Geotech. Geol. Eng.** v. 26, p. 705–727, 2008.

RUSSEL, D. J. Controls on shale durability: the response of two Ordovician shales in the slake durability test. **Canadian Journal**, v. 19, p. 1-3, 1982.

RUXTON, B. P. Measures of the degree of chemical weathering of rocks. **J. Geol.**, v. 76, p. 518-527, 1986.

RUXTON, B. P.; BERRY, L. Weathering of granite and associated erosional features in Hong Kong. **Bulletin of the Geological Society of America**, n. 68, p. 1263-1292, 1957.

SAITO, T. Variation of physical properties of igneous rocks in weathering. In: International Symposium on Weak Rock, **Anais...** Tóquio, p. 191-196, 1981.

SALCEDO, D. A. Macizos Rocosos: Caracterización, resistencia al corte y mecanismos de rotura. In: Conferencia 25 Aniversario Sociedad Venezolana de Mecánica del Suelo e Ingeniería de Fundaciones, p. 143-172, **Anais...** Caracas, 1983.

SANTI, P. M., Improving the jar slake, slake index, and slake durability tests for shales. **Environmental and Engineering Geoscience** v. 3, p. 385-396, 1998.

SANTIAGO, L. O. R. **Alteração e alterabilidade de rochas básicas intrusivas metamorizadas e filitos sericíticos da região do Quadrilátero Ferrífero e sua implicação no comportamento mecânico**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Departamento de Engenharia Civil, UFV. Viçosa, MG, 2008.

SCARPELLI, A. G. **Classificação geomecânica aplicada à avaliação da estabilidade de taludes em minas de ferro do Quadrilátero Ferrífero**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). EESC-USP, SP. 187 p., 1994.

SEEDSMAN, R., The behavior of clay shales in water, **Can. Geotech. J.**, v. 23, p. 18-22, 1986.

SHORT, N. M. Geochemical Variations in Four Residual Soils. **The Journal of Geology** v. 69, n. 5, p. 534-571, 1961.

SHRESTHA, G.; BROCH, E. Influences of the valley morphology and rock mass strength on tunnel convergence: With a case study of Khimti 1 headrace tunnel in Nepal. **Tunnelling and Underground Space Technology**, v. 23, p. 638-650, 2008.

SILVA AM, CHEMALE JR F & KUYUMJIAN RM. O Ambiente tectônico dos diques máficos do Quadrilátero Ferrífero e Espinhaço Meridional e suas implicações para a evolução do Cráton São Francisco. In: Simpósio Nacional de Estudos Tectônicos, 5, **Anais...** Gramado. SBG-CPGQ-UFRGS, 1996. Boletim de Resumos Expandidos, p. 209-210, 1995.

SILVA, C. H. C. **Comportamento Geotécnico dos filitos do talude oeste da mina pau branco**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas). UFOP, Ouro Preto, 2010.

SILVA, C. H. C.; LANA, M. S. Influence of slake durability on geotechnical behavior of phyllites of Pau Branco Mine. **REM. Revista Escola de Minas**, Ouro Preto, v. 65, n. 3, p. 413-418, 2012.

SINGH, B. E GOEL, R. K. Rock Mass Classification. **A Practical Approach in Civil Engineering. Elsevier**, 267 p., 1999.

SMART, G. D.; ROWLANDS, N.; ISAAC, A.K. Progress towards establishing relationships between the mineralogy and physical properties of Coal Measures rocks. **Int. J. Rock Mechanics Mining Sci. Geomechanical Abstr.**, v. 19, p. 81-89, 1982.

SOWERS, G. I. Foundation problems in residual soils. In: International Conference in Engineering Problems of Regional Soils, **Anais...Beijing**, p. 154–171, 1988.

SPEARS, D. A. TAYLOR, R. K., The influence of weathering on the composition and engineering properties of in situ Coal Measures rocks. **Int. J. Rock Mechanics Mining Sci.**, v. 9, p. 729-756, 1972.

SPIER, C. A.; OLIVEIRA, S. M. B.; SIAL, A. N.; RIOS, F. J. Geochemistry and genesis of the banded iron formations of the Cauê Formation, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. **Precambrian Research**, v. 152, p. 170-206, 2007.

SPINK, T. W.; NORBURY, D. R. The engineering geological description of weak rocks and overconsolidated soils. The Engineering Geology of Weak Rock. In: 26 Annual Conference of the Engineering Group of the Geological Society, **Anais... Leeds**, United Kingdom, n. 8, p. 289-301, 1993.

SUTTON, S. J.; MAYNARD, J. B. Multiple alteration events in the history of a sub-huronian regolith at lauzon bay, Ontario. **Canadian Journal of Earth Sciences**, v.29, n. 3, p. 432-445, 1992.

TABOADA, T.; CORTIZAS, A. M.; GARCIA, C.; GARCÍA-RODEJA E. Particle-size fractionation of titanium and zirconium during weathering and pedogenesis of granitic rocks in NW Spain. **Geoderma**, v. 131, p. 218-236, 2006.

TARDY, Y.; NAHON, D. Geochemistry and evolution of lateritic landscape. In: Martini, I. O. e Chesworth, W. (eds.), **Weathering, Soils and Paleosoils. Developments in Earth Surface Processes 2**. Elsevier, p. 407-443, 1985.

TAYLOR, R. K. Coal measures mudrocks: composition, classification and weathering processes. **Quartely Journal Engineering Geology**, London, v. 21, p. 85-99, 1988.

TAYLOR, R. K.; SMITH, T. J., The engineering geology of clay minerals: swelling, shrinking and mudrock breakdown. In: Proc. Conference Clay Minerals, **Anais... Durham**, v. 21, p. 235–260, 1986.

TAYLOR, R. K.; SPEARS, D. A. The breakdown of British Coal Measures rocks. **Int. J. Rock Mechanics Min. Sci. Geomech. Abstr.**, v. 7, p. 481-501, 1970.

TAYLOR, R. K.; SPEARS, D. A., The breakdown of British Coal Measures rocks. **Int. J. Rock Mechanics Mining Sci.**, v. 7, p. 481-501, 1970.

THANACHIT, S; SUDDHIPRAKARN, A; KHEORUENROMNE, I, GILKES, R. J. The geochemistry of soils on a catena on basalt at Khon Buri, northeast Thailand. **Geoderma**, 2005.

TSIDZI, K. E. N. The influence of foliation on point load strength anisotropy of foliated rocks. **Engineering Geology**, Amsterdam, v. 29 p. 49-58, 1990.

VALLEJO, L.E. and STEWAT-MURPHY, A. Influence of Pore Wall Roughness on the Slaking of Shales, In: Proceedings of the 38th Rock Mechanics Symposium: Rock Mechanics in the National Interest. **Anais...**Washington, v. 1, p. 93–98, 2001.

VAN DER WEIJDEN, C. H.; VAN DER WEIJDEN, R. Mobility of major, minor and some redox-sensitive trace elements and rare-earth elements during weathering of four granitoids in central Portugal. **Chemical Geology**, n. 125, p. 149-167, 1995.

VARLEY, P. M., Susceptibility of Coal Measures mudstone to slurring during tunnelling. **Q. J. Eng. Geol.**, v. 23, p. 147-160, 1990.

VETZEL, A., EINSELE, G., On the physical weathering of various mudrocks. **Bull. Int. Assoc. Eng. Geol.** v. 44, p. 89–100, 1991.

VOGT, T. 1972. Sulitjelmefeltets geologi og petrografi. **Norges Geologiske Undersøkelse** v. 121, n. 3-4, p. 1 – 560 (in Norwegian, with English abstract), 1972.

VOIGHT, B. On the functional classification of rocks for engineering purposes. In: International Symposium of Rock Mechanics, **Anais...** Espanha, p. 131-135, 1970.

WASHBURN, E. W. The Dynamics of Capillary Flow. **Phys. Rev.**, v. 17, p. 273, 1921.

WICKHAM, G. E.; TIEDEMANN, H. R.; SKINNER, E. H. Support determination based on geologic predictions. In: Rapid Excavation Tunneling Conf., **Anais...** AIME, New York, p. 43-64, 1972.

WOOD, L. E.; DEO, P., A suggested system for classifying shales materials for embankments. **Bulletin of the Association of Engineering Geologists** v.12, p. 39–55, 1975.

XU, S.; GRASSO, P. E MAHTAB, A. Use of Schmidt hammer for estimating mechanical properties of weak rock. In: 6 Int. Congress, Int. Assoc. Engineering Geology, **Anais...** Amsterdam, v. 1, p. 511-519, 1990.

YRFAN, T. Y. Mineralogy, fabric properties and classification of weathered granites in Hong Kong. **Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology**. v. 29, n. 1, p. 5-35, 1996.

ZHOU, H.; ZHANG, C.; LI, Z., HOU, D.; HOU, J. Analysis of mechanical behavior of soft rocks and stability control in deep tunnels **Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering** v. 6, p. 219-226, 2014.

APÊNDICE

Weathering of metapelites from the Quadrilátero Ferrífero mineral province, southeastern Brazil.

Bull Eng Geol Environ
DOI 10.1007/s10664-017-1036-1



ORIGINAL PAPER

Weathering of metapelites from the Quadrilátero Ferrífero mineral province, southeastern Brazil

Marcio Fernandes Lello¹ · Emilio Velloso Barron¹ · Helena Polivanov¹ ·
Eduardo Antonio Gomes Marques² · Euripedes do Amaral Vargas Jr.^{1,3}

Received: 5 November 2016 / Accepted: 14 March 2017
© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2017

Abstract Low-grade metamorphic rocks are known for their low mechanical strength and high weatherability. In the Quadrilátero Ferrífero, an important mineral province located in southeastern Brazil, this set of features results in frequent issues with mining and road slope instability, mainly associated with phyllites. Despite the significant iron ore production that occurs in this province, little is known about the geotechnical properties of the materials constituting the weathering front. Here, we report work aimed at investigating the changes in the basic properties of phyllites at four weathering grades. The methodology used included the field classification and mapping of four weathering grades in order to assess their spatial distribution on a road slope, as well as sampling for geological characterization by petrography and X-ray diffraction (XRD). In addition, the authors performed a physical characterization of all weathering grades, including index properties, mercury porosimetry, and strength data obtained with a Schmidt hammer both in the field and in the laboratory as well as using the point load test (PLT). Results showed the relevance of structural features such as discontinuities and metamorphic foliation observed in the weathering morphology *in situ*, with different weathering

intensities occurring along the slope. Changes in the porosity and pore size distribution in the weathering front were nonlinear, as were resistance variations. The difficulty involved in performing the macroscopic identification of weathering grades due to the very fine texture of the rock as well as microstructural heterogeneities are likely causes of the observed variability in phyllite properties. This fundamental knowledge may aid the prediction of short-term and long-term scenarios for slope stability based on rock weatherability.

Keywords Metapelite · Weathering profile · Phyllite · Quadrilátero Ferrífero · Characterization tests

Introduction

It is a well-known fact that weathering leads to chemical and physical changes in rocks that significantly affect their properties and geomechanical behavior. Weathering also promotes alterations of the spatial distributions of rocks at the rock mass scale. For these reasons, weathering and the products of it have long been of interest to those performing geotechnical investigations and stability analysis of rock masses and engineering projects on such masses. Pioneers in this field have often focused on the weathering of granites and granodiorites (Moyle 1955; Runtou and Berry 1957; Lumb 1962; Newbery 1970).

The differences between the weathering profiles of granites and gneisses as well as their implications for engineering projects were first discussed by Deere and Patton (1971). Those authors proposed typical weathering profiles for both rock types and defined criteria for the classification of several grades of weathering. There have also been important contributions in this context from

✉ Marcio Fernandes Lello
marcioltriton@hotmail.com

¹ LEMETRO – Laboratório de Experimentos em Mecânica e Tecnologia das Rochas, Departamento de Geologia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brazil

² Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Brazil

³ Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brazil