



Aspectos Mineralógicos, Químicos e Físicos de Frente de Intemperismo em Filito da Formação Batatal, Quadrilátero Ferrífero
Mineralogical, Chemical and Physical Aspects of Phyllite
Weathering Front of Batatal Formation, Quadrilátero Ferrífero

Marcio Fernandes Leão¹; Emílio Velloso Barroso¹; Helena Polivanov¹;
Eduardo Antônio Gomes Marques²; Eurípedes do Amaral Vargas Jr.¹ & Veronica Dutra de Figueiredo¹

¹Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Geociências,
Departamento de Geologia, Laboratório de Experimentos em Mecânica e Tecnologia de Rochas,
Av. Athos da Silveira Ramos, 274, CCMN-IGEO, Bloco J, sala J0-04, 21941-909,
Cidade Universitária, Ilha do Fundão, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

²Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Engenharia Civil,
Av. Peter Henry Rolfs, s/n, 36570-000, Campus Universitário, Viçosa, MG, Brasil.
E-mails: marciotriton@hotmail.com; emilio@geologia.ufrj.br;
hpolivanov@gmail.com; eamarques@ufv.br; vargas@puc-rio.br; veronica.ufrjgeo@gmail.com

Recebido em: 12/09/2017 Aprovado em: 11/12/2017

DOI: http://dx.doi.org/10.11137/2017_3_398_406

Resumo

O estudo trata de uma frente de intemperismo em filito, proveniente da região do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. Apesar de abundantes na região os processos de alteração para essas rochas ainda são pouco estudados. Busca-se aqui contribuir para o entendimento do intemperismo, investigando sobre uma perspectiva mineralógica, química e física. Foram selecionadas amostras das porções da rocha sã (W1), levemente intemperizada (W2), medianamente intemperizada (W3) e altamente intemperizada (W4). As propriedades mineralógicas, químicas e físicas foram determinadas por petrografia, difratometria de raios-X, fluorescência de raios-X, índices químicos, além de índices-físicos. Os resultados evidenciam a evolução intempérica sofrida pelo filito, sobre os aspectos abordados. Conclui-se que a variação das propriedades físicas está mais bem marcada do que as mudanças mineralógicas e químicas, mostrando o controle do intemperismo físico sobre o desenvolvimento do perfil.

Palavras-chave: Intemperismo; filito; Quadrilátero Ferrífero

Abstract

The study deals with a weathering front in phyllite, coming from the region of Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. Although abundant in the region, the alteration processes for these rocks are still not well studied. The aim is to contribute to the understanding of weathering, investigating a mineralogical, chemical and physical perspective. Samples of the portions of the fresh rock (W1), slightly weathered (W2), moderately weathered (W3) and highly weathered (W4) rock were selected. The mineralogical, chemical and physical properties were accessed by petrography, X-ray diffraction, X-ray fluorescence and chemical indices, as well as physical indices. The results evidences the intemperic evolution undergone by the phyllite, on the covered aspects. The aforesaid statement supports that the variation in the physical properties is better marked than the mineralogical and chemical changes showing the control of the physical weathering on the development of the profile.

Keywords: Weathering; phyllite; Quadrilátero Ferrífero

1 Introdução

Os processos do intemperismo têm grande relevância para a compreensão da evolução da paisagem, controlam mineralizações formadas por enriquecimento supergênico e também modificam a mineralogia e as propriedades físicas das rochas. Trata-se de um fenômeno de larga ocorrência nas partes mais superficiais da crosta terrestre, o que torna seu estudo de grande interesse para cientistas e profissionais de diferentes áreas: geólogos, geomorfólogos, engenheiros geotécnicos, biólogos e pedólogos e agrônomos. Ehlen (2005) apresenta uma extensa e aprofundada discussão sobre as diferentes abordagens destes diversos profissionais. Pedólogos e engenheiros agrônomos tendem a concentrar suas investigações nas partes mais superficiais do solo, pois nesses horizontes se concentram os processos típicos da pedogênese e é maior a fertilidade. Por sua vez, os geólogos olham para o protólito ou para a rocha sobre a qual atuaram os processos intempéricos, na maior parte das vezes, sem a devida distinção do quão alterada pelo intemperismo está a rocha. Entre o protólito e os solos mais superficiais se desenvolve uma vasta gama de produtos do intemperismo e rochas com diferentes intensidades de alteração. Este intervalo é alvo dos interesses de geomorfólogos, geólogos de engenharia e engenheiros geotécnicos. Os geomorfólogos denominam esse intervalo por perfil de intemperismo, enquanto geólogos de engenharia e engenheiros geotécnicos tendem a empregar o termo frente de intemperismo.

As transformações impostas pelo intemperismo podem afetar severamente as propriedades geomecânicas das rochas, com implicações para os movimentos de massa e a evolução das encostas (Yokota & Iwamatsu, 1999; Erguler & Shakoor, 2009; Utili & Crosta, 2011; Lana, 2014), a estabilidade de escavações subterrâneas (Babendererde *et al.*, 2004), as fundações (Saunders & Fookes, 1970) e para o desempenho de rochas quando usadas como materiais de construção. Por essa razão, os geólogos de engenharia e os engenheiros geotécnicos tendem a classificar e subdividir a frente de intemperismo em diferentes estágios de alteração intempérica (“*weathering grades*”).

Em estudos recentes relacionados com a influência do intemperismo sobre as características petrofísicas e as propriedades geomecânicas das

rochas, ainda se nota uma elevada concentração de pesquisas em rochas magmáticas tais como dunitos e dioritos (Ündül & Tugrul, 2012), granitoides (Momeni *et al.*, 2015) e ignibritos (Pola *et al.*, 2016). Em comparação aos estudos em rochas ígneas intrusivas e vulcânicas, as rochas metamórficas são menos abordadas tendo como principais estudos aqueles relacionados aos gnaisses (Dobereiner *et al.*, 1993; Marques *et al.*, 2010), metagranodioritos (Kiliç *et al.*, 2014), xistos (Leão & Barros, 2013), filitos (Marques & Williams, 2015; Leão & Marques, 2016), ardósias (Papadopoulos & Marinos, 1992) e itabiritos (Costa *et al.*, 2015).

Esse artigo tem por finalidade colaborar para a compreensão da evolução da frente de intemperismo em filitos desenvolvida em clima tropical. A alteração intempérica é tratada e discutida com base em dados mineralógicos, químicos e físicos. As amostras foram coletadas na Formação Batatal e são provenientes de um talude rodoviário localizado entre as cidades históricas de Ouro Preto e Mariana, região sudeste do Brasil, inserida no Quadrilátero Ferrífero (QF).

2 Contexto Geológico

O Quadrilátero Ferrífero é uma região localizada na porção Centro-Sudeste do estado de Minas Gerais (MG), Brasil, com aproximadamente 7.000 km² (Dorr, 1969). Composta por uma peculiar geologia representada na base pelo complexo metamórfico do Bação, rochas arqueanas supracrustais do Supergrupo Rio das Velhas e, seqüências metassedimentares de idade Paleo e Mesoproterozoicas, correspondentes ao Supergrupo Minas, Grupo Itacolomi e Supergrupo Espinhaço (Schobbenhaus & Da Silva, 2012).

Estratigraficamente, o Supergrupo Minas é composto pelos grupos Caraça, Itabira e Piracicaba, e sobrepõe-se em contato tectônico às rochas do complexo metamórfico do Bação e do Supergrupo Rio das Velhas (Schobbenhaus & Da Silva, 2012). O Grupo Caraça é composto por quartzitos e filitos sendo subdividido nas Formações Moeda (inferior) e Batatal (superior). O contato entre as duas formações é geralmente abrupto, salvo em áreas nas quais a Formação Moeda é argilosa; as duas formações são intergradacionais e podem não ser separadas. A Formação Batatal é representada por filitos e filitos

grafitosos. Apesar de vasta ocorrência raramente exibe afloramentos de rochas não intemperizadas (Dorr, 1969).

De fato, as rochas com baixa intensidade de alteração intempélica estão associadas aos taludes de corte de grande altura na mineração. Mesmo em taludes de corte rodoviário, filitos pouco alterados são mais raros e na maioria das vezes estão associados com filitos em estágios de alteração mais avançados. A Figura 1 apresenta o mapa geológico local com indicação em vermelho da área de estudo.

Sobrejacente ao Grupo Caraça, o Grupo Itabira, formado por seqüências metassedimentares químicas, divide-se nas Formações Cauê (inferior) e (superior). Cabe ressaltar que o contato entre as Formações Batatal e Cauê é concordante e gradacional, geralmente marcado pela ocorrência de hematita na Formação Batatal, com aumento gradual e quantitativo em direção a Formação Cauê (Angeli, 2011).

3 Materiais e Métodos

3.1 Aspectos Geológicos: Classes de Alteração

As classes de alteração foram definidas em campo por mapeamento geológico de um perfil de intemperismo de filitos adaptando da proposta sugerida pela ISRM (2015). Quatro classes de alteração intempélica foram amostradas: W1 (rocha sã), W2 (rocha pouco alterada), W3 (rocha medianamente alterada) e W4 (rocha muito

alterada). Levando-se em consideração que nos filitos os minerais se apresentam em dimensões diminutas, os seguintes critérios foram usados no campo para identificar os diferentes estágios de alteração da rocha pelo intemperismo: mineralogia, cor, variação da litologia, testes simples da matriz (risco do canivete e golpes do martelo geológico) e identificação das características das famílias de fraturas (abertura, espaçamento, persistência e a estimativa de $J_v - n^\circ$ de fissuras/m³).

3.2 Aspectos Mineralógicos

As propriedades mineralógicas foram determinadas por análise de lâminas petrográficas (luz transmitida) e por difratometria de raios-X (DRX- método do pó). Para a petrografia foram confeccionadas duas lâminas para cada estágio de alteração, uma na direção ortogonal e outra na direção paralela à foliação da rocha, totalizando oito lâminas. Para a preparação das amostras a serem analisadas por DRX, cada nível de alteração sofreu moagem mecânica em moinho de anéis, para redução do tamanho das partículas, possibilitando distribuição homogênea do material. As análises foram realizadas com radiação gerada a partir de tubo de cobre sob condições de tensão aplicada de 40 kV, corrente de 40 mA, velocidade do goniômetro de 0,005°/s e ângulo de varredura (2θ) variando de 2° a 70°.

3.3 Aspectos Químicos

Para a avaliação da evolução geoquímica na frente de intemperismo, dados de química total foram

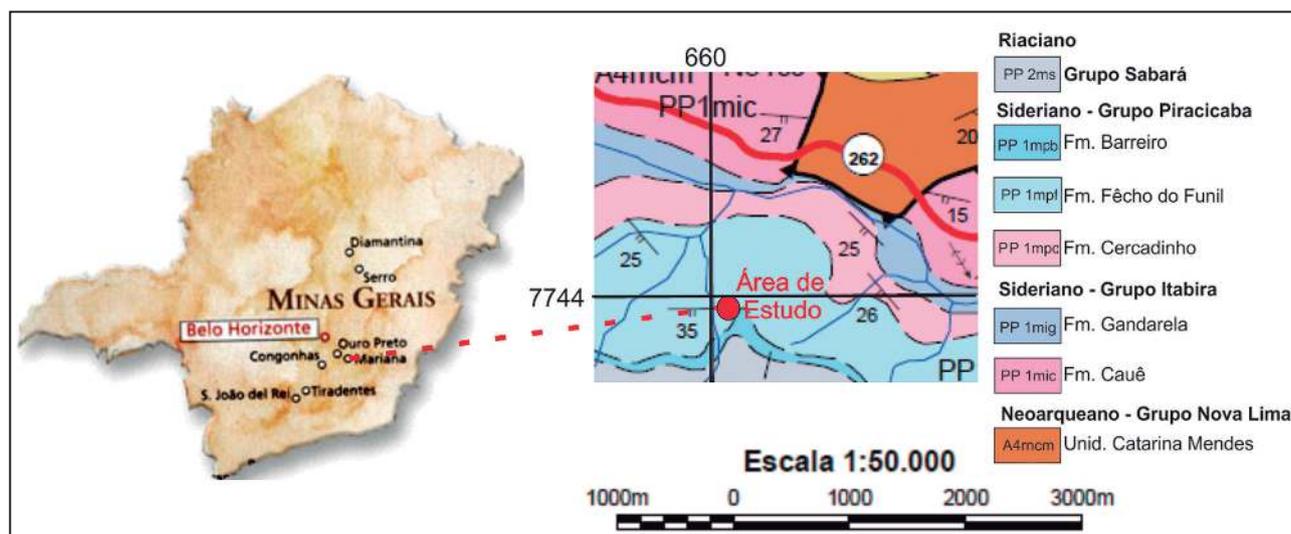


Figura 1 Mapa geológico 1:50.000 da área de estudo (adaptado de Baltazar *et al.*, 2005). O ponto vermelho indica a localização aproximada da área estudada, situada entre as cidades históricas de Ouro Preto e Mariana.

obtidos por fluorescência de raios-X. Os resultados de elementos maiores, foram interpretados por índices químicos que consideram a relação entre elementos mobilizáveis/imobilizáveis (ba, ba1, ba2 e ba3 – Harrassowitz, 1926), o conteúdo de sílica (Sílica/R₂O₃ – Jenny, 1941 e R – Ruxton, 1986), além da própria alteração química (CIA – Nesbitt & Young, 1989 e CIW – Harnois, 1988), conforme a Tabela 1.

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
$SF = \frac{SiO_2}{Fe_2O_3}$ $\frac{Silício}{R_2O_3} = \frac{SiO_2}{Al_2O_3 + Fe_2O_3 + TiO_2}$	Jenny, 1941
$R = \frac{SiO_2}{Al_2O_3}$	Ruxton, 1986
$CIA = \frac{Al_2O_3}{Al_2O_3 + CaO + Na_2O + K_2O} \times 100$	Nesbitt e Young, 1982
$CIW = \frac{Al_2O_3}{Al_2O_3 + CaO + Na_2O} \times 100$	Harnois, 1988

Tabela 1 Índices químicos para as relações entre elementos químicos, conteúdo de sílica e alteração química.

3.4 Aspectos Físicos

As características físicas determinadas foram a capacidade de absorção de água, porosidade, massas específicas seca e saturada, tomando-se a medida das massas por gravimetria e o volume total pelo princípio de Arquimedes (ISRM, 2015). A partir de dez fragmentos de cada nível de alteração, a massa seca foi determinada após 24 horas em estufa (105°C). Os mesmos fragmentos foram colocados submersos em água destilada por 24 horas em dessecador, sendo ainda aplicado vácuo por 2 horas e sequencialmente foram tomadas as massas saturadas.

4 Resultados e Discussão

4.1 Aspectos Geológicos: Classes de Alteração

A Figura 2 apresenta a seção da frente de intemperismo e o aspecto macroscópico da rocha.

Na mesma figura, são apresentadas, à direita, as Figuras 2A, 2B e 2C, representando detalhes da frente intemperismo estudada. A Figura 2A mostra o aspecto das famílias de fraturas que ocorrem em W2, no contato com W3. Já a Figura 2B demonstra o contato interdigitado entre as classes de alteração, com presença de quartzito junto a W2 e, na Figura 2C é apresentado o aspecto o detalhe da marcante foliação do afloramento de classe W2.

Macroscopicamente a rocha apresenta matriz fina sedosa e minerais não observáveis com auxílio de lupa de campo (10 x). Em W1 a rocha é cinza claro e em W2 ainda predomina a cor cinza com porções amarelas e ocres, principalmente nos planos de foliação. Em W3 tons de rosa mesclam-se na matriz cinza e em W4 a matriz permanece cinza e nas foliações observam-se cores marrons escuras e amarelas. O brilho é intenso em W1 e torna-se progressivamente fosco até W4.

As famílias de fraturas ocorrem ortogonalmente e principalmente paralelas à foliação. Essas descontinuidades mostram redução do espaçamento e aumento da abertura e persistência, conforme a evolução do grau de alteração. O material de preenchimento das fraturas, quando presente, é composto por precipitações de óxidos e hidróxidos de ferro e, cristalização de quartzo. A rocha tende a se deslocar e propagar fissuras em planos de foliação onde a presença desses preenchimentos é quase nula ou inexistente.

4.2 Aspectos Mineralógicos

A Tabela 2 apresenta a contagem modal para cada um dos quatro estágios de alteração, obtida por estimativa visual em lâminas petrográficas.

A rocha foi classificada como filito sendo composta principalmente por muscovita, quartzo e minerais opacos, além de proporções menores de minerais secundários como a sericita, apresentando por vezes cianita e turmalina. A concentração de quartzo varia em função da sua própria concentração no protólito, tendo em vista ser resistente ao intemperismo químico. São apresentadas na Figura 3 (3A a 3D), as fotomicrografias da rocha com as principais características observadas.

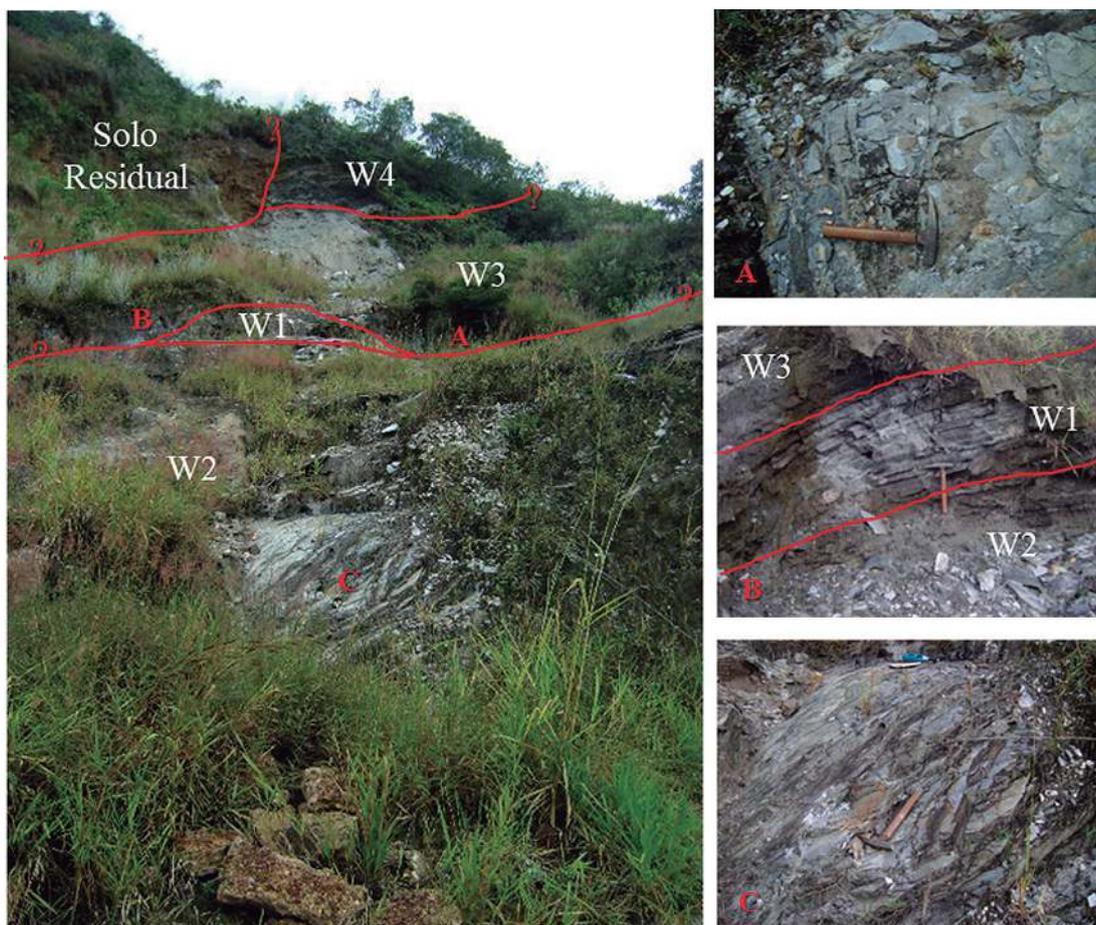


Figura 2 Frente de intemperismo com definição dos graus de alteração. As letras A, B e C mostram detalhes localizados na frente de intemperismo.

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	-	-

Tabela 2 Contagem modal semiquantitativa para os estágios de alteração.

Em W1 a muscovita apresenta birrefringência elevada tende a ocorrer em bandas lepidoblásticas, intercaladas com quartzo recristalizado (Figura 3A – W1). Em W2 as microfaturas existentes tendem a ocorrer ao longo da foliação, concordantes ou não, podendo ocorrer preenchidas com minerais máficos (Figura 3B – W2). Em W3 é observada na lâmina coloração avermelhada dispersa e/ou distribuída nos planos de foliação, característica observada também macroscopicamente nas amostras de mão (Figura 3C – W3). A sericita é proveniente da alteração da muscovita, aumentando a concentração conforme

o intemperismo avança. Ocorre nas bordas da muscovita, apresentando cores de birrefringência notoriamente mais baixas (Figura 3D – W4).

A Figura 4 apresenta fotomicrografias das lâminas de W1 (Figura 4A) e W3 (Figura 4B), com nicóis descruzados, comparando os cristais de minerais opacos bem definidos e orientados, sem vestígios de alteração no nível mais são (Figura 4A). Conforme o intemperismo evolui, as discontinuidades aumentam suas aberturas e persistências e os minerais opacos se alteram, promovendo a concentração de hidróxidos e óxidos de ferro ao longo dos planos da foliação (Figura 4B).

Os resultados de DRX são apresentados na Figura 5 até 70° (2θ). Conforme observado foram identificadas mica (M) e quartzo (Q) em proporções maiores que os demais minerais. Argilominerais (A) são encontrados em todos os níveis de alteração, constando-se a caulinita (C) nos níveis mais alterados (W3 e W4) e minerais 2:1 em todos os níveis. Suti picos em 21,7° e 33,5° indicaram as presenças de goethita e hematita, respectivamente. Cabe ressaltar

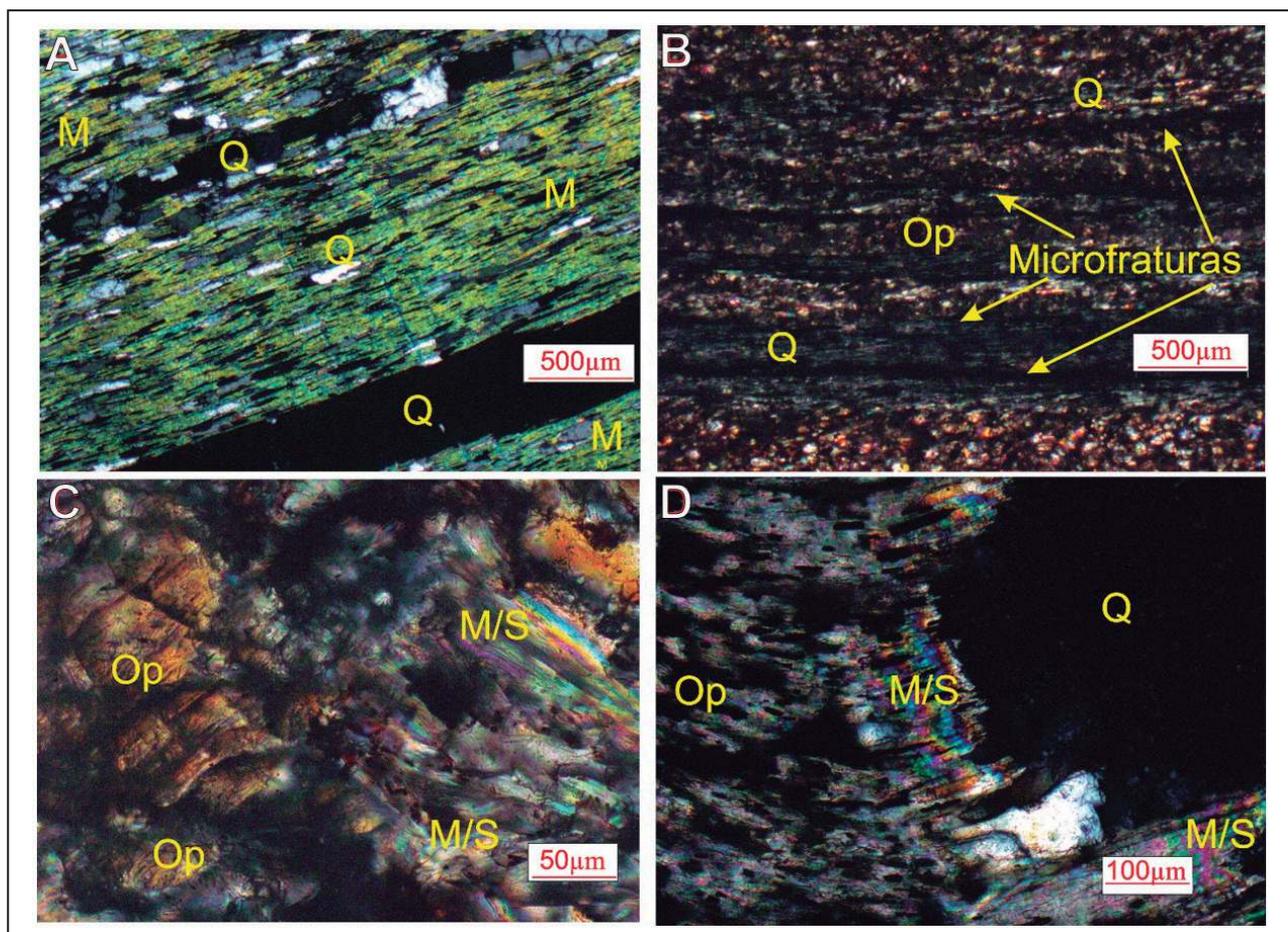


Figura 3 Principais características observadas em lâminas petrográficas a partir de luz polarizada e nicóis cruzados, para os graus de alteração W1 (3A), W2 (3B), W3 (3C) e W4 (3D). Legenda: M – muscovita, Q – quartzo, S – sericita, M/S – transformação de muscovita para sericita e Op – opacos.

que o método de análise não privilegiou os sinais dos óxidos, devido à utilização de radiação proveniente de tudo de cobre, não sendo possível definir claramente essa mineralogia. Os picos de muscovita e sericita correspondem às mesmas posições no difratograma, não sendo possível distinguir as proporções entre esses minerais, devido a resolução do equipamento. Os resultados observados são compatíveis com as análises petrográficas.

4.3 Aspectos Químicos

Os resultados obtidos por fluorescência de raios-X para elementos maiores são apresentados na Tabela 3.

É possível notar que o comportamento geoquímico de Al_2O_3 apresenta tendência inversa ao do SiO_2 , ao longo do perfil, sem variações intensas, nos níveis de alteração estudados. Essas variações, principalmente, em SiO_2 e Al_2O_3 , são reflexo da

porcentagem de muscovita (W1) e cianita (W2 e W3) e Quartzo, que são proporcionalmente inversos.

A concentração de Fe_2O_3 (total) exibe variação ao longo da frente de intemperismo, provavelmente em função da presença das fraturas e microfraturas, sendo removido de determinados outras porções do maciço na forma de Fe^{+2} e precipitando nas zonas mais oxigenadas sob a forma Fe^{+3} . A concentração de CaO apresenta um comportamento homogêneo juntamente com o K_2O , MgO e o Na_2O , que mostram pequena

Grau de Alteração	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	Na ₂ O	CaO	TiO ₂	Total (%)
W1	51,89	21,88	13,75	6,81	1,67	1,83	0,64	1,14	99,61
W2	49,80	28,39	9,73	7,36	1,64	1,36	0,73	0,68	99,69
W3	50,69	26,17	11,59	7,08	1,27	1,38	0,73	0,78	99,69
W4	55,50	25,23	7,62	6,35	1,50	1,87	0,71	0,85	99,63

Tabela 3 Elementos maiores (%) para os níveis de alteração W1 a W4.

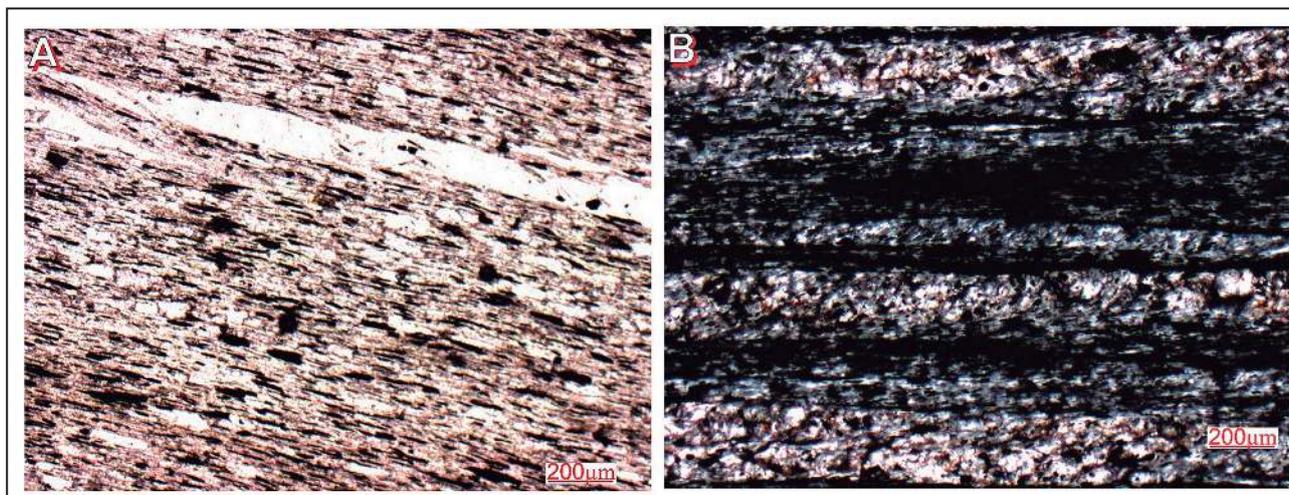


Figura 4 Aspecto dos minerais opacos (cor preta) observados em lâminas petrográficas com luz polarizada e nicóis descruzados. Em W1 (4A) os minerais opacos estão bem definidos e orientados, já em W3 (4B) os produtos da alteração tendem a se concentrar ao longo da foliação.

variação com o aumento do intemperismo no perfil de intemperismo, fruto da composição da rocha.

Na Tabela 4 são apresentados os valores dos índices químicos, com base na análise química total e a partir dos índices já apresentados na Tabela 1.

Grau de Alteração	ba	ba1	ba2	ba3	SiO ₂ /R ₂ O ₃	R	CIA	CIW
W1	0,66	0,60	0,25	0,80	2,80	4,14	113,69	0,84
W2	0,51	0,46	0,19	0,61	2,44	3,06	113,86	0,83
W3	0,54	0,49	0,18	0,62	2,54	3,38	113,51	0,82
W4	0,55	0,49	0,21	0,65	3,09	3,84	113,23	0,75

Tabela 4 Índices químicos obtidos para os níveis de alteração W1 a W4.

Os índices ba, ba1, ba2 e ba3, mostraram discreta redução dos valores mostrando que a alteração química é pouco representativa. Em termos de conteúdo de sílica, os índices mostraram variação pouco expressiva. A relação SiO₂/R₂O₃ e o índice R não se mostraram representativos para a caracterização do intemperismo químico. Os índices CIA e CIW se apresentaram quase constantes.

De uma forma geral, quando comparados os níveis extremos da frente de intemperismo, W1 e W4, há uma sutil evidência de um padrão crescente de intensidades de intemperismo químico. O mesmo não ocorre quando se comparam os níveis W2 e W3, que se mostram bastante semelhantes e não

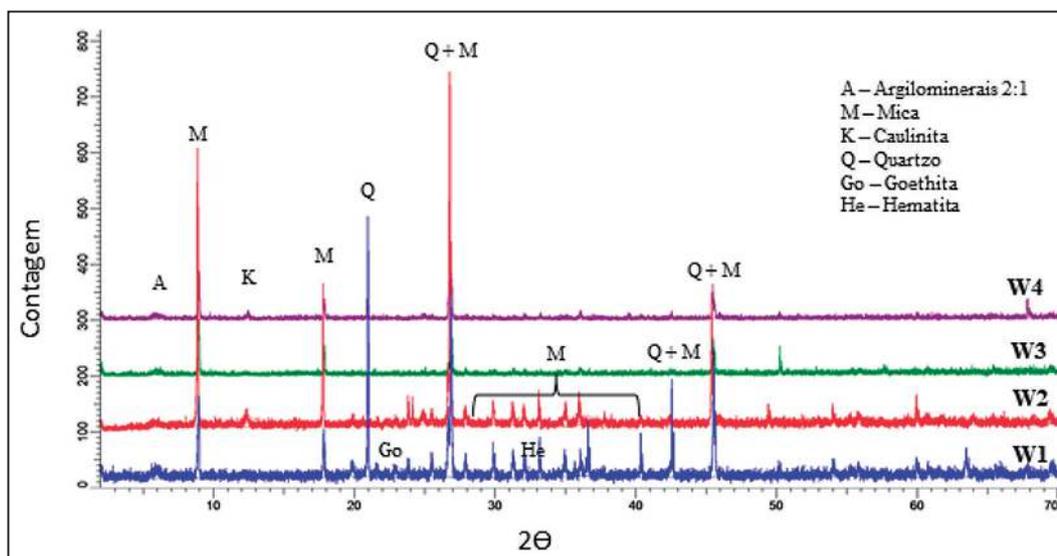


Figura 5 DRX pelo método do pó.
Legenda:
A – argilominerais 2:1,
M – mica,
C – caulinita e
Q – quartzo.

permitem uma clara distinção entre ambos no que se refere à intensidade do intemperismo químico. Esses aspectos denotam uma baixa mobilidade dos elementos na frente de intemperismo e, portanto, uma ação ainda incipiente da componente química do intemperismo.

4.4 Aspectos Físicos

Os resultados dos índices-físicos, para W1 e W4, são apresentados nas Figuras 6 e 7.

Os valores de porosidade e absorção de água aumentam conforme evolução do grau de alteração da rocha. Apesar de baixa porosidade, característica de rochas metamórficas, a ação do intemperismo é observada nesse índice, bem como a capacidade de absorção de água (Figura 6). Estes parâmetros podem ser influenciados pelo desenvolvimento de microfissuras identificadas em análises petrográficas no contorno dos grãos. A massa específica seca e a saturada (Figura 7) são reduzidas conforme aumento do grau de alteração, mas de maneira muito menos intensa que o aumento da porosidade e da capacidade absorção de água, mostrando uma

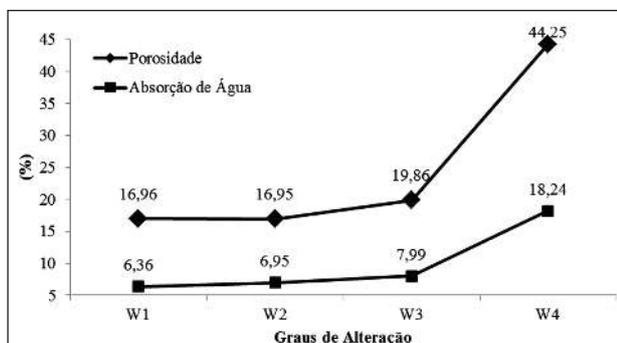


Figura 6 Valores de porosidade e absorção de água, em %, para os níveis de alteração.

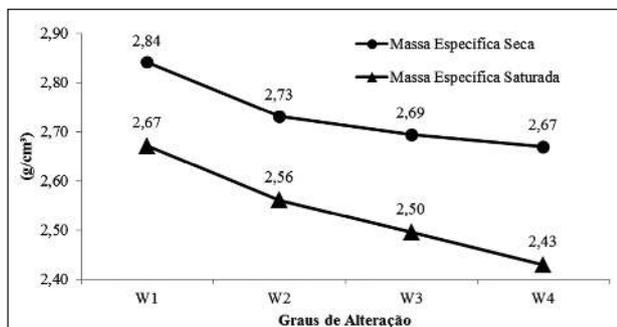


Figura 7 Valores de massa específica seca e saturada, em g/cm³, para os níveis de alteração.

influência importante do intemperismo físico sobre essas propriedades.

5 Conclusões

Os graus de alteração puderam ser definidos em campo, principalmente pela variação da cor e característica das descontinuidades na frente de intemperismo. Em termos mineralógicos, a evolução do intemperismo é marcada pela redução da quantidade de muscovita e aumento de sericita, além do aumento da concentração de argilominerais nos níveis mais alterados. Geoquimicamente, todos os índices apresentaram variações pouco acentuadas, distintamente dos resultados encontrados para os índices físicos que expressaram de forma satisfatória, a variação ao longo dos graus de alteração. O aumento da porosidade está principalmente relacionado com o surgimento, abertura e propagação de fraturas e microfaturas, as quais devem estar geneticamente associadas ao desconfinamento na superfície da crosta e à fadiga térmica, tendo em vista a diferenciação da mineralogia (concentração relativa de sericitas) na frente de intemperismo. Com base nos resultados conclui-se que o intemperismo físico prevalece sobre o químico na frente de intemperismo nos filitos estudados.

6 Agradecimentos

Os autores agradecem à CAPES pelo apoio à pesquisa e aos revisores anônimos que apresentaram relevantes sugestões para este manuscrito.

7 Referências

- Angeli, G. 2011. Utilização de Análises Químicas para Classificação dos Litotipos do Minério de Ferro e Modelagem 3D da Mina de Brucutu - MG. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOQUÍMICA, 13, 2011, *Resumos expandidos*, Gramado, SBGq, p. 1461-1464.
- Babendererde, S; Hoek, E.; Marinos, P. & Cardoso, A.S. 2004. Characterization of Granite and the Underground Construction in Metro do Porto, Portugal. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SITE CHARACTERIZATION, 1, 2004, *Trabalhos completos*, Porto, FEUP, p. 1-8.
- Baltazar, O.F.; Baars F.J.; Lobato, L.M.; Reis, L.B.; Achtschin, A.B.; Berni, G.V. & Silveira, V.D. 2005. 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, Belo Horizonte. (Projeto:

- CODEMIG).
- Costa, T.A.V.; Mercer, K.; Dight, P. & Marques, E.A.G. 2015. 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: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON SLOPE STABILITY IN OPEN PIT MINING AND CIVIL ENGINEERING*, 25, 2015, Brisbane, *Papers*, Australian Centre for Geomechanics, p. 1-6.
- Dobereiner, L.; Durville, J.L. & Restituito, J. 1993. Weathering of the Massiac Gneiss (Massif Central, France). *Bulletin International Association of Engineering Geology*, 47: 79-96.
- Dorr, J.V.N. 2nd. 1969. Physiographic, Stratigraphic and Structural Development of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. *United States Geological Survey*, 641(A): 1-110.
- Ehlen, J. 2005. Above The Weathering Front: Contrasting Approaches to the Study and Classification of Weathered Mantle. *Geomorphology*, 67: 7-21.
- Erguler, Z.A. & Shakoor, A. 2009. Quantification of Fragment Size Distribution of Clay-Bearing Rocks after Slake Durability Testing. *Environmental and Engineering Geoscience*, 15(2): 81-89.
- Harnois, L. 1988. The CIW Index: A New Chemical Index of Weathering. *Sedimentary Geology*, 55: 319-322.
- Harrassowitz, H. 1926. Laterit. *Forschungsh Geologie Paläontologie*, 4: 253-566.
- ISRM, International Society of Rock Mechanics. 2015. *The ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 2007-2014*. Cham, Springer, 293p.
- Jenny, H. 1941. *Factors of Soil Formation: A System of Quantitative Pedology*. New York, McGraw-Hill Book Company, 271p.
- Kiliç, R.; Ulamis, K.; Yurdakul, M. & Kadioglu, Y.K. 2014. The Alteration Degree of the Metacrystalline Rocks Based on UAI, Bolu (Turkey). *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 73: 193.
- Lana, M.S. 2014. Numerical Modeling of Failure Mechanisms in Phyllite Mine Slopes in Brazil. *International Journal of Mining Science and Technology*, 24: 777-0782.
- Leão, M.F. & Barroso, E.V. 2013. Comportamento Geotécnico de Perfis de Alteração Oriundos de Rochas Metamórficas Existentes na Península de Samaná, República Dominicana. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA E AMBIENTAL*, 13, 2013, Rio de Janeiro, *Trabalhos completos*, ABGE, p. 1-6.
- Leão, M.F. & Marques, E.A.G. 2016. Morphology and Geotechnical Characterization of a Phyllite Weathering Profile Developed Under Tropical Climate. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON GEOTECHNICAL AND GEOPHYSICAL SITE CHARACTERISATION*, 5, 2016, Queensland, *Trabalhos completos*, IAEG/ISRM/ISSMFE, p. 1-6.
- Marques, E.A.G.; Barroso, E.V.; Menezes Filho, A.P. & Vargas Jr, E.A. 2010. Weathering Zones on Metamorphic Rocks from Rio de Janeiro: Physical, Mineralogical and Geomechanical Characterization. *Engineering Geology*, 111: 1-18.
- Marques, E.A.G. & Williams, D.J. 2015. Weathering Profiles of Bunya Phyllite in Southwest Brisbane - A Geotechnical Approach. *In: AUSTRALIA NEW ZEALAND CONFERENCE ON GEOMECHANICS*, 12, 2015, Wellington, *Papers*, New Zealand Geotechnical Society, p. 1-8.
- Momeni, E.; Armaghani, D.J.; Hajihassani, M. & Amin, M.F.M. 2015. Prediction of Uniaxial Compressive Strength of Rock Samples Using Hybrid Particle Swarm Optimization-Based Artificial Neural Networks. *Measurement*, 60: 50-63.
- Nesbitt, H.W. & Young, G.M. 1989. Formation and Diagenesis of Weathering Profiles. *Journal of Geology*, 97: 129-147.
- Papadopoulos, Z. & Marinos, P. 1992. On the Anisotropy of the Athenian Schist and its Relation to Weathering. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, 45: 111-116.
- Pola, A.; Martínez-Martínez J.; Macías, J.L.; Fusi, N.; Crosta, G.; Garduño-Monroy, V.H. & Núñez-Hurtado, J.A. 2016. Geomechanical Characterization of the Miocene Cuitzeo Ignimbrites, Michoacán, Central Mexico. *Engineering Geology*, 214: 79-93.
- Ruxton, B.P. 1986. Measures of the Degree of Chemical Weathering of Rocks. *The Journal of Geology*, 76: 518-527.
- Saunders, M.K. & Fookes, P.G. 1970. A Review of the Relationship of Rock Eathering and Climate and its Significance to Foundation Engineering. *Engineering Geology*, 4: 289-325.
- Schobbenhaus, C. & Silva, C.R. 2012. *Geoparques do Brasil: Propostas*. Rio de Janeiro, CPRM, 653p.
- Ündül, O. & Tuğrul, A. 2012. The Influence of Weathering on the Engineering Properties of Dunites. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 45: 225-239.
- Utili, S. & Crosta, G.B. 2011. Modeling the Evolution of Natural Cliffs Subject to Weathering: 1. Limit Analysis Approach. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 116: 1-16.
- Yokota, S. & Iwamatsu, A. 1999. Weathering Distribution in a Steep Slope of Soft Pyroclastic Rocks as an Indicator of Slope Instability. *Engineering Geology*, 55: 57-68.