

TATIANE ROBAINA RANGEL DE CARVALHO

**CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA, QUÍMICA, FÍSICA E MECÂNICA DE
PERFIS DE INTEMPERISMO DE FILITO SOB CLIMA TROPICAL**

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

Orientador: Eduardo Antonio Gomes Marques

Coorientador: Jaime Wilson Vargas Mello

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2019**

Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Central da Universidade Federal de
Viçosa - Campus Viçosa

T

C331c
2019
Carvalho, Tatiane Robaina Rangel de, 1988-
Caracterização mineralógica, química, física e mecânica de perfis
de intemperismo de filito sob clima tropical / Tatiane Robaina Rangel
de Carvalho. - Viçosa, MG, 2019.
128 f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Orientador: Eduardo Antonio Gomes Marques.
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa.
Inclui bibliografia.

1. Filito - Propriedades mecânicas. 2. Mineralogia. 3.
Intemperismo. 4. Rochas metamórficas. I. Universidade Federal de
Viçosa. Departamento de Engenharia Civil. Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Civil. II. Título.

CDD 22. ed. 624.15132

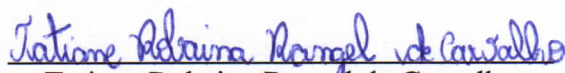
TATIANE ROBAINA RANGEL DE CARVALHO

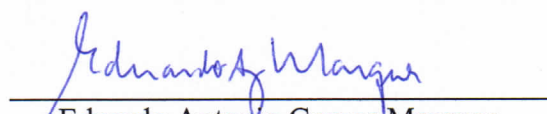
**CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA, QUÍMICA, FÍSICA E MECÂNICA
DE PERFIS DE INTEMPERISMO DE FILITO SOB CLIMA TROPICAL**

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

APROVADA: 02 de agosto de 2019

Assentimento:


Tatiane Robaina Rangel de Carvalho
Autora


Eduardo Antonio Gomes Marques
Orientador

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por Seu Amor, Seu carinho e Sua Força. E à Virgem Maria pelo seu materno amor.

Ao meu esposo João, pela sua compreensão, pelo seu carinho e torcida.

A minha mãe, ao meu pai e ao meu irmão pelo carinho, incentivo, paciência e por confiarem em mim.

Aos meus familiares e amigos pelo acolhimento. De forma especial, agradeço a Luana, Thaís e Cleyd.

Ao Archange e ao Márcio, amigos que muito contribuíram na minha jornada, com muita disponibilidade e bom humor.

Em especial ao professor e orientador Eduardo Antonio Gomes Marques pelo acolhimento desde o princípio, por seu apoio, compreensão, disposição em ajudar e pelos ensinamentos.

Aos membros da banca que aceitaram contribuir com o presente trabalho.

Ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFV pela oportunidade de trilhar o caminho do doutorado.

A FAPEMIG pelo apoio para o desenvolvimento desta pesquisa.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

RESUMO

CARVALHO, Tatiane Robaina Rangel, D.Sc. Universidade Federal de Viçosa, agosto de 2019. **Caracterização mineralógica, química, física e mecânica de perfis de intemperismo de filito sob clima tropical.** Orientador: Eduardo Antonio Gomes Marques. Coorientador: Jaime Wilson Vargas Mello.

Os filitos são reconhecidos por diversos problemas de instabilidade em taludes de mineração e rodovias no Quadrilátero Ferrífero - MG, sudeste do Brasil, região que se destaca no cenário internacional devido à importante produção de minério de ferro. Os problemas de instabilidade estão relacionados, especialmente, à elevada alterabilidade e baixa resistência mecânica dessas rochas. Apesar da importância da região e dos problemas ligados à taludes associados a rochas de baixo grau metamórfico, principalmente filitos, ainda são poucos os trabalhos existentes que visam investigar as implicações da degradação dessa rocha nas características geotécnicas, quando exposta à ação dos agentes intempéricos. O objetivo desta Tese consiste em apresentar os resultados das investigações realizadas, bem como a discussão dos efeitos do intemperismo sobre a mineralogia e propriedades químicas, físicas e mecânicas de filitos em diferentes graus de alteração expostos em três taludes rodoviários no Quadrilátero Ferrífero. A metodologia consistiu em identificar e mapear a distribuição das diferentes classes de intemperismo em três perfis de alteração e a retirada de amostras para realização de testes em laboratório. Avaliações mineralógicas e químicas envolveram petrografia, difratometria e microfluorescência de raios-X. Propriedades físicas e mecânicas foram obtidas pelos índices físicos, martelo de Schmidt (em campo), compressão puntiforme (“*point load test*”), teste de alterabilidade (“*slake durability test*”) e velocidade de propagação de ondas ultrassônicas. Seis níveis de alteração foram avaliados, desde a rocha levemente alterada à rocha muito alterada, incluindo níveis transicionais. Os resultados revelam que as estruturas, particularmente descontinuidades paralelas à foliação metamórfica, exercem papel preponderante na disposição dos materiais alterados ao longo dos perfis. Considerando a mineralogia dos filitos estudados, as mudanças químicas não são profundas até a rocha muito alterada, de forma que há o predomínio do intemperismo físico sobre o químico, apesar do clima tropical. A precipitação de óxidos de ferro devido à alteração de minerais opacos, pode levar ao aumento local da resistência, contribuindo para o desenvolvimento de comportamentos irregulares nos materiais de transição rocha-solo. Conseqüentemente, a previsão de modelos para implantação de obras civis ou de mineração sobre maciços constituídos por essa rocha não deve ser baseada em propriedades isoladas, necessitando de uma avaliação conjunta de características mineralógicas,

físicas e mecânicas, aliadas a um forte controle de campo, especialmente voltado para as descontinuidades.

Palavras-chave: Caracterização geomecânica. Mineralogia. Perfis de intemperismo. Rochas Metamórficas.

ABSTRACT

CARVALHO, Tatiane Robaina Rangel, D.Sc. Universidade Federal de Viçosa, August, 2019. **Mineralogical, chemical, physical and mechanical characterization of phyllite weathering profiles in a tropical climate.** Adviser: Eduardo Antonio Gomes Marques. Co-adviser: Jaime Wilson Vargas Mello.

Phyllites are known by its common instability problems in mining and highways cut slopes in the Quadrilátero Ferrífero - MG, southeast of Brazil, a region that stands out in the international scenario due to the its production of iron ore. The problems of instability are related, especially, to the high alterability and low mechanical resistance of these rocks. In spite of the importance of the region and the problems related to the slopes associated with rocks of low metamorphic degree, mainly phyllites, there are still few previous works that investigate the implications of degradation on geotechnical characteristics of this rock when exposed to the action of the weather agents. The aim of this thesis is to present the results of several laboratory and field investigations, as well as the discussion of the effects of weathering on mineralogy, chemistry, physical and mechanical properties of phyllites in different degrees of alteration, exposed in three road slopes in the Quadrilátero Ferrífero. The methodology consisted in identifying and mapping the distribution of the different weathering classes in three weathering profiles, the determination of the morphology of the weathering profiles, and the collection of undisturbed samples for laboratory tests. Mineralogical and chemical assessments involved petrography, diffraction and X-ray microfluorescence. Physical and mechanical properties were obtained by physical indexes, Schmidt hammer (in the field), point load, slake durability and ultrasonic wave propagation velocity tests. Six levels of weathering were evaluated, from slightly weathered rock to highly weathered rock, including transitional levels. The results show that the structures, particularly discontinuities parallel to the metamorphic foliation, play a predominant role in the arrangement of the altered materials along the profiles. Considering the mineralogy of the phyllites studied, the chemical changes are not very strong up until the highly weathered rock, so that there is the predominance of physical weathering on the initial weathering process, despite the tropical climate. The precipitation of iron oxides due to the alteration of opaque minerals may lead to local increased resistance, contributing to the development of irregular behaviors in rock-soil transition materials. Consequently, the prediction of models for the implantation of civil and mining engineering projects on such rock masses should not be based on isolated properties, requiring a united evaluation of its

mineralogical, physical and mechanical characteristics, together with a strong field control, especially of discontinuities.

Keywords: Mechanical characterization. Mineralogy. Weathering profiles. Metamorphic rocks.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	9
1.1 Introdução geral	9
1.2 Objetivo geral	10
1.3 Objetivos específicos	10
1.4 Estrutura da tese	10
CAPÍTULO 2	11
2.1 Perfis de intemperismo	11
2.2 Perfis de intemperismo de filito	14
CAPÍTULO 3	15
Aspectos geológicos, geomorfológicos e pedológicos da área de estudo	15
CAPÍTULO 4	18
Materiais e métodos	18
CAPÍTULO 5	25
Descrição dos perfis de intemperismo	25
5.1 Descrição do Perfil Fil01	25
5.2 Descrição do Perfil Fil02	33
5.3 Descrição do Perfil Fil03	42
CAPÍTULO 6	54
Artigo submetido	54
Caracterização morfológica, mineralógica e geotécnica de perfis de intemperismo de filito em clima tropical	54
CAPÍTULO 7	78
Artigo proposto	78
Avaliação das variações geoquímicas ao longo de perfis de intemperismo de filito sob clima tropical	78
CAPÍTULO 8	104
Artigo submetido	104
Influência do intemperismo e correlações entre velocidade de propagação de ondas e durabilidade com parâmetros físicos e mecânicos em filitos	104
CAPÍTULO 9	127
CONCLUSÕES GERAIS	127
PERSPECTIVAS PARA TRABALHOS FUTUROS	128

CAPÍTULO 1

1.1 Introdução geral

O intemperismo é responsável por produzir modificações químicas, mineralógicas, físicas e mecânicas nas rochas expostas na superfície terrestre, levando, na maior parte dos casos, à degradação de suas propriedades geotécnicas.

Em se tratando de maciço rochoso, a atuação do intemperismo conduz à formação de diferentes zonas ou níveis de alteração, denominados perfis de intemperismo, indo desde a rocha sã, na base do conjunto, progredindo em direção à superfície até o solo residual, formando uma sequência gradativa de materiais geológico-geotécnicos com características mecânicas distintas. Entretanto, a presença de estruturas geológicas, de descontinuidades provocadas pelo próprio processo intempérico e de camadas que oferecem resistências diferentes à ação do intemperismo, resultam na formação de perfis complexos, como ocorrem, por exemplo, em filitos, xistos e gnaisses, usualmente denominadas como frentes de alteração.

No estudo de rochas alteradas, para se conhecer as propriedades físicas e mecânicas dos materiais geológicos, são amplamente empregados ensaios de compressão uniaxial, compressão puntiforme, resistência à tração (ensaio brasileiro), durabilidade, propagação de ondas ultrassônicas, bem como ensaios *in situ*, como o martelo de Schmidt, que permite estimar a resistência à compressão.

Tendo em vista as transformações geoquímicas que ocorrem ao longo de um perfil, devido a diferentes mobilidades dos elementos químicos, a extensão de alterações provocadas pelos processos intempéricos também é quantificada por meio de índices químicos e petrográficos.

Estudos que visam à avaliação da alterabilidade em rochas para fins de engenharia necessitam de uma boa caracterização das propriedades químicas/mineralógicas, físicas e mecânicas, o que nem sempre é possível, dependendo das condições de alteração do material, como ocorre em filitos.

O filito integra boa parte das formações geológicas existentes no Quadrilátero Ferrífero, uma área de aproximadamente 7000 Km² localizada na porção central do estado de Minas Gerais, e que possui importantes jazidas minerais, de importância mundial. Entretanto, o conhecimento do comportamento mecânico desta rocha é complexo, devido à dificuldade de se retirar amostras intactas e de se preparar amostras adequadas à realização de testes mecânicos, uma vez que se constitui em um material com elevada suscetibilidade à alteração intempérica,

apresentando, com frequência, estágio avançado de decomposição, além de frequente baixa resistência, mesmo nos materiais mais sãos. O estudo dos parâmetros mecânicos dos termos mais intemperizados dos perfis é fundamental, pois, usualmente, são esses que condicionam o comportamento mecânico do maciço e, portanto, a sua estabilidade geotécnica.

Problemas geotécnicos envolvendo filito em obras de mineração, taludes urbanos e de vias (rodovias e ferrovias) são frequentes no Quadrilátero Ferrífero, devido à sua facilidade em sofrer alterações quando exposto à ação dos agentes intempéricos na superfície terrestre, o que leva à rápida degradação de suas características geomecânicas. No caso da mineração contribui também o fato dessa rocha ser comumente encontrada como encaixante dos corpos mineralizados.

1.2 Objetivo Geral

O presente trabalho possui como objetivo principal a caracterização e avaliação da influência do intemperismo sobre a variação de propriedades físicas, mecânicas, mineralógicas e químicas dos materiais geológicos ao longo de perfis de alteração de filitos existentes no Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais.

1.3 Objetivos específicos

- Descrição geológica dos perfis, contemplando as características da matriz e das estruturas dos maciços;
- Caracterização da morfologia dos perfis de intemperismo de filito;
- Classificação do grau de intemperismo dos materiais existentes ao longo dos perfis;
- Caracterização de propriedades físicas, mecânicas, da composição química e mineralógica dos filitos classificados, segundo seu grau de intemperismo;
- Estabelecimento de correlações empíricas para avaliação do relacionamento entre diferentes variáveis físicas e mecânicas.

1.4 Estrutura da Tese

O trabalho é estruturado em uma primeira parte que contém uma introdução geral e os objetivos geral e específicos, apresentados no Capítulo 1. O Capítulo 2 é constituído por uma breve revisão da literatura sobre o estudo de perfis de intemperismo e, especificamente, sobre perfis de intemperismo de filito. No Capítulo 3 é apresentada a localização dos perfis estudados, bem como aspectos geológicos, pedológicos e geomorfológicos da área. O Capítulo 4 descreve os materiais e métodos utilizados ao longo da pesquisa. Finalizando essa primeira parte, o

Capítulo 5 apresenta a descrição geológica específica dos perfis, abordando características do maciço e aspectos micropetrográficos, observados em lâmina. Após o Capítulo 5, conclui-se com as referências utilizadas na elaboração dessa primeira parte.

Na segunda parte da tese, composta pelos capítulos 6, 7 e 8, apresentam-se os resultados obtidos na pesquisa, na forma de artigos a serem submetidos para publicação em periódicos científicos. Os artigos estão estruturados em: introdução; materiais e métodos; resultados e discussões; conclusões; e referências. As figuras, tabelas e quadros dessa segunda parte estão numeradas de acordo com a ordem com que os artigos ocupam na estrutura da tese, por exemplo, no artigo 1, as figuras recebem a numeração 1.1, 1.2, 1.3, enquanto as figuras pertencentes ao artigo 2, estão numeradas em 2.1, 2.2, 2.3 e assim sucessivamente.

A terceira e última parte consiste no Capítulo 9 e aborda as conclusões gerais e perspectivas futuras de estudos que podem ser desenvolvidos a partir dos resultados apresentados nesta tese, com o intuito de ampliar e aprofundar o conhecimento sobre o tema.

CAPÍTULO 2

2.1 Perfis de intemperismo

Considerando uma mesma litologia, reconhecem-se diferentes níveis (estágios) de alteração, de acordo com a intensidade da atuação dos processos intempéricos sobre o maciço (Junior Serra e Ojima, 1998), levando à formação de perfis de alteração (ou de intemperismo), compostos por diversos materiais geológicos com comportamento mecânico distinto, o que tem grande influência em projetos geotécnicos, na execução de obras civis e de mineração.

Price (2009) elencou quatro tipos de perfis de intemperismo em termos de uniformidade e estilo:

- Intemperismo uniforme: neste tipo há redução gradual da intensidade do intemperismo de acordo com a profundidade, comum em litologias homogêneas;
- Intemperismo complexo: consiste em um perfil irregular, desenvolvido em litologias que apresentam camadas com diferentes suscetibilidades ao intemperismo, ou devido a presença de estruturas como juntas, falhas e dobras. Filitos, xistos e gnaisses são exemplos de litologias que evoluem para este tipo de perfil.
- Intemperismo em blocos: desenvolvido, geralmente, em rocha ígnea de granulação grossa, é caracterizado pela presença de blocos são ou levemente intemperizados em meio à rocha decomposta;

- Intemperismo por dissolução: típico de rochas carbonáticas, podendo evoluir para cavernas subterrâneas.

Dearman (1976) seguindo as propostas de seu trabalho anterior (Dearman, 1974) e tendo como base Moye (1955), Ruxton e Berry (1957) e Anon. (1970 e 1972), propôs uma classificação de intemperismo cujos critérios utilizados no reconhecimento das diferentes classes ou graus de alteração do maciço rochoso consistem na coloração/ descoloração, na razão rocha/solo, na presença ou ausência da textura original da rocha e nos efeitos do intemperismo sobre as descontinuidades. Esses critérios são a base do esquema de classificação de intemperismo proposto pela Sociedade Internacional de Mecânica das Rochas – ISRM (2007), que, segundo Marques et al. (2010) é um dos mais amplamente utilizados na atualidade. Recentemente, esta versão (ISRM, 2007) foi revisada em uma nova publicação (ISRM, 2015). Os critérios utilizados pela ISRM (2007 e 2015) para a definição do grau de intemperismo é mostrado no Quadro 1. Como pode ser observado, na versão de 2015 são incrementados a resistência da superfície da rocha a ser arranhada ou não pela ponta do martelo de geólogo e o tipo de som emitido pelo material ao ser golpeado por este.

Quadro 1 – Esquema de classificação de intemperismo para maciços rochosos segundo ISRM (2007 e 2015)

Termo	Descrição (ISRM, 2007)	Descrição (ISRM, 2015)	Classe
Rocha sã	Não há sinais visíveis de alteração da matriz. Leve descoloração pode estar presente ao longo das principais descontinuidades.	O material rochoso não está descolorido e preserva seu aspecto original. Torna-se muito difícil arrancar sua superfície com a ponta de um martelo de geólogo. O material rochoso emite um som de campainha quando é atingido por um golpe de martelo.	W1
Rocha levemente intemperizada	Descoloração da rocha indica o início de intemperismo da matriz e das superfícies das descontinuidades. Toda a matriz pode estar descolorida pelo intemperismo e a rocha pode estar um pouco mais branda externamente em relação à condição sã.	A descoloração está presente apenas próximo à superfície de descontinuidades. A estrutura original está perfeitamente preservada. É difícil arrancar a superfície da rocha com a ponta de um martelo de geólogo. O material rochoso emite um som de campainha quando é atingido por um golpe de martelo.	W2
Rocha medianamente intemperizada	Menos da metade da matriz da rocha está decomposta ou desintegrada à condição de solo. Rocha sã ou descolorida está presente formando um	O material rochoso está descolorido, mas a cor original está presente de forma descontínua. A estrutura original está bem preservada. A superfície da rocha pode ser arranhada pela ponta de	W3

	arcabouço descontínuo ou como núcleos de rocha.	um martelo de geólogo. O material rochoso emite um som intermediário quando atingido por um golpe de martelo.	
Rocha altamente intemperizada	Mais da metade da matriz da rocha está decomposta ou desintegrada à condição de solo. Rocha sã ou descolorida está presente formando um arcabouço descontínuo ou como núcleos de rocha.	Todo o material rochoso está descolorido. A estrutura original está ainda presente e, em boa parte, intacta. A superfície não é facilmente recortada pela ponta de um martelo de geólogo. O material rochoso emite um som abafado quando atingido por um golpe de martelo.	W4
Rocha completamente intemperizada	Toda a matriz da rocha está decomposta ou desintegrada à condição de solo. A estrutura original do maciço está preservada.	Todo o material rochoso está descolorido e convertido a solo, mas a estrutura original ainda está visível. A superfície não é facilmente recortada pela ponta de um martelo de geólogo. O material rochoso emite um som abafado quando atingido por um golpe de martelo.	W5
Solo residual	Toda a rocha está transformada em solo. A estrutura do maciço e da matriz está destruída. Há uma grande variação de volume, mas o solo não foi significativamente transportado.	Todo o material rochoso está convertido a solo. A estrutura original da rocha está completamente destruída. A superfície é facilmente e profundamente recortada pela ponta de um martelo de geólogo. O material rochoso não emite som quando atingido por um golpe de martelo	W6

Fonte: ISRM 2007, 2015)

Vários foram os trabalhos que procuraram caracterizar a variação de propriedades geotécnicas ao longo de perfis de intemperismo em diferentes tipos de rocha, especialmente em regiões tropicais e subtropicais, onde perfis de intemperismo são abundantes, tendo impacto relevante em aplicações de engenharia (Marques et al., 2017). São exemplos: Barroso, 1993 (leptinito no Brasil); Gupta e Rao, 1998 (granitos, basaltos e quartzitos indianos); Lan et al., 2003 (granitos do sul da China); Marques et al., 2010 (gnaisse do Brasil); Koita et al., 2013 (rochas graníticas e vulcanossedimentares da África Ocidental); Leão e Barroso, 2013 (xistos e mármore da República Dominicana); Tating et al., 2013 (arenitos da Malásia); Costa et al., 2015 (formações ferríferas bandadas do Brasil); Alavi Nezhad Khalil Abad et al., 2016 (rochas

graníticas da Malásia); Marques e Williams, 2015 (filitos de Queensland, Austrália); Marques et al, 2016 (basaltos de Queensland, Austrália); Leão et al., 2017 (filitos do Quadrilátero Ferrífero, Brasil).

O estudo de perfis de intemperismo de maciços rochosos de natureza metamórfica, como é o caso do presente trabalho, segundo Dobereiner (1989), é influenciado pela complexidade estrutural, bem como pela anisotropia da rocha e do maciço, que são frequentemente uma das principais causas dos problemas geotécnicos relacionados a essas litologias. Em se tratando de perfis de intemperismo de gnisso, a presença de dobras, falhas, fraturas paralelas e perpendiculares à foliação metamórfica tem um grande efeito na diferenciação das zonas de intemperismo, já que as estruturas controlam o fluxo de água e, por sua vez, a velocidade e a sequência da alteração (Dobereiner et al., 1993). Além disso, esses autores destacam que as propriedades geotécnicas ao longo desses perfis dependem não só da composição mineralógica e química, mas especialmente das características texturais da rocha, como o tamanho, formato e uniformidade na distribuição dos grãos, empacotamento e a fábrica, características estas que são observadas em escala microscópica.

2.2. Perfis de intemperismo de filito

Estudos voltados especificamente para a caracterização de perfis de intemperismo de filito não são comuns, exceções se fazem aos trabalhos publicados por Leão et al. (2017) e Marques et al. (2017).

O perfil de intemperismo estudado por Leão et al. (2017) coincide com um dos perfis que foi alvo de investigação da presente pesquisa. Entretanto, os trabalhos se distinguem na medida que neste estudo foram abordados dois outros perfis, com o objetivo de produzir uma maior variabilidade de dados de diferentes localidades, bem como também foi dado um enfoque geoquímico maior.

Os perfis de filito estudados por Marques et al (2017) e Leão et al. (2017) estão localizados em regiões de clima subtropical e tropical, respectivamente. Ambos os trabalhos concluíram que as estruturas tectônicas e de alívio de tensão exercem papel preponderante na morfologia desses perfis, as quais condicionam contatos bruscos entre diferentes classes de intemperismo nos maciços, aproveitando-se, comumente, da existência da foliação. No perfil desenvolvido sob clima tropical, Leão et al. (2017) destacam que a variação das propriedades físicas mostrou-se mais marcante em relação à mudanças mineralógicas. Marques et al. (2017) observaram o aumento no teor de minerais de ferro e argila com a intensidade da alteração e

destacaram a utilidade de análises mineralógicas em microscopia para a melhor compreensão da sua influência nas propriedades físicas e mecânicas, como, por exemplo, a quantificação de microfraturas.

Andrade e Saraiva (2010) procuraram caracterizar a variação de diferentes propriedades em filitos intemperizados, porém sem o foco na morfologia de perfis. Outras pesquisas também conduzidas em filitos como Shrestha e Broch (2008), Hoek e Guevara (2009), Jeffcoate et al. (2013), Silva e Lana (2012), Lana (2014) Panda et al. (2014), e Pinheiro et al. (2015) estão especificamente relacionadas à estabilidade de estruturas.

CAPÍTULO 3

Aspectos geológicos, geomorfológicos e pedológicos da área de estudo

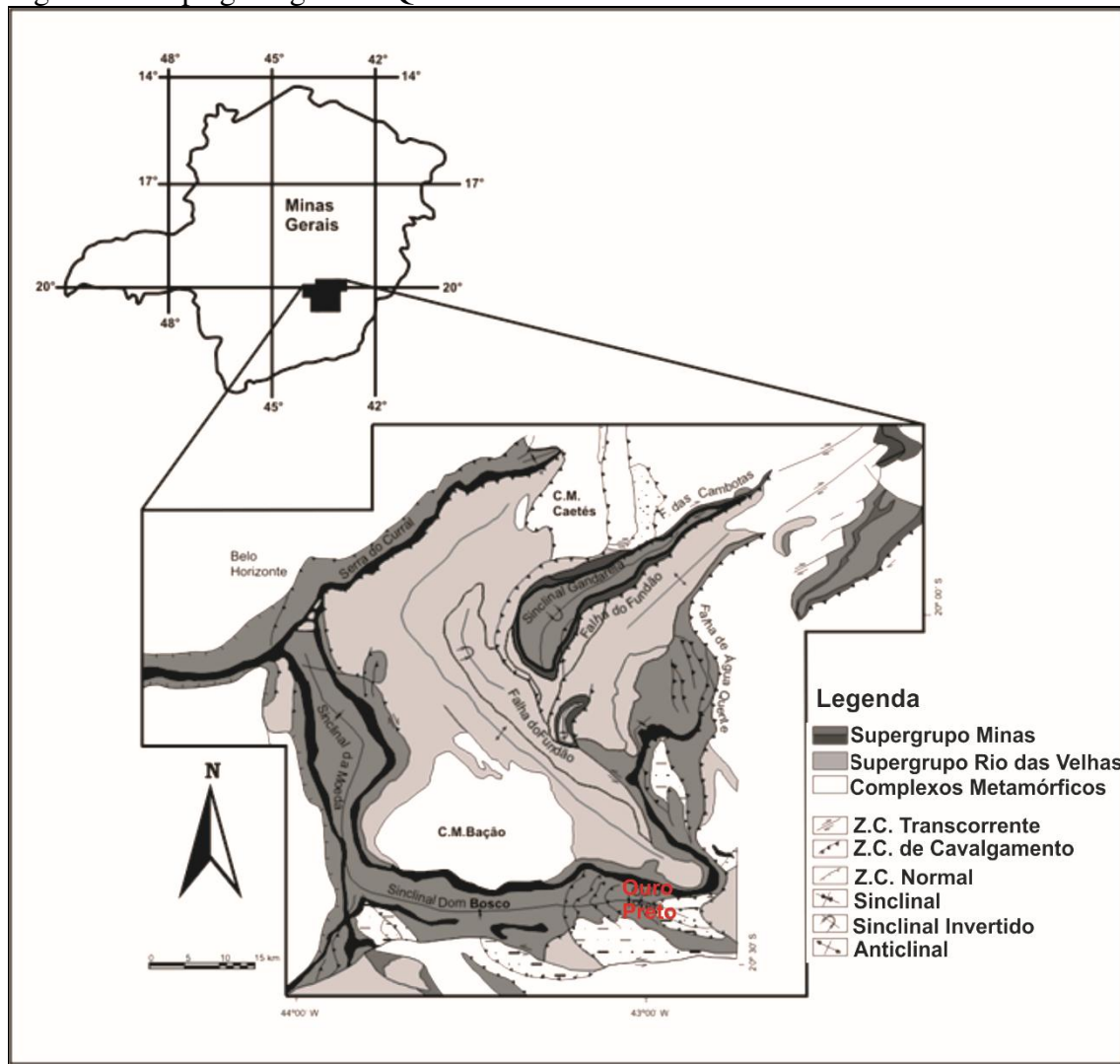
Foram estudados três perfis de intemperismo localizados no sudeste do Brasil, ao longo da BR- 356, próximos às cidades históricas de Ouro Preto e Mariana, no estado de Minas Gerais – Brasil. Os perfis consistem em taludes rodoviários escavados em filito. A seguir apresenta-se uma caracterização dos principais aspectos geológicos, pedológicos, climáticos e geomorfológicos da região em que os mesmos se localizam.

➤ **Geologia**

Os perfis estão inseridos na região do Quadrilátero Ferrífero (QF), uma importante província de extração de minério de ferro, cujo nome se dá pela disposição quadrangular de serras, sendo limitado ao sul pela serra de Ouro Branco, a oeste pela Serra da Moeda, a leste pela Serra do Caraça, e, na extremidade norte, pela Serra do Curral.

A geologia do QF constitui-se de cinco unidades litoestratigráficas principais (Alkmim & Marshak, 1998) (Figura 1): embasamento cristalino, composto por complexos metamórficos granito-gnáissicos, de idade arqueana; Supergrupo Rio das Velhas, constituído por sequência vulcano-sedimentar arqueana (*greenstone belt*); Supergrupo Minas, formado por sedimentos clásticos e químicos proterozoicos metamorfisados e dobrados; intrusões pós-Minas; e Grupo Itacolomi, constituído por metassedimentos clásticos de idade proterozoica.

Figura 1 - Mapa geológico do Quadrilátero Ferrífero



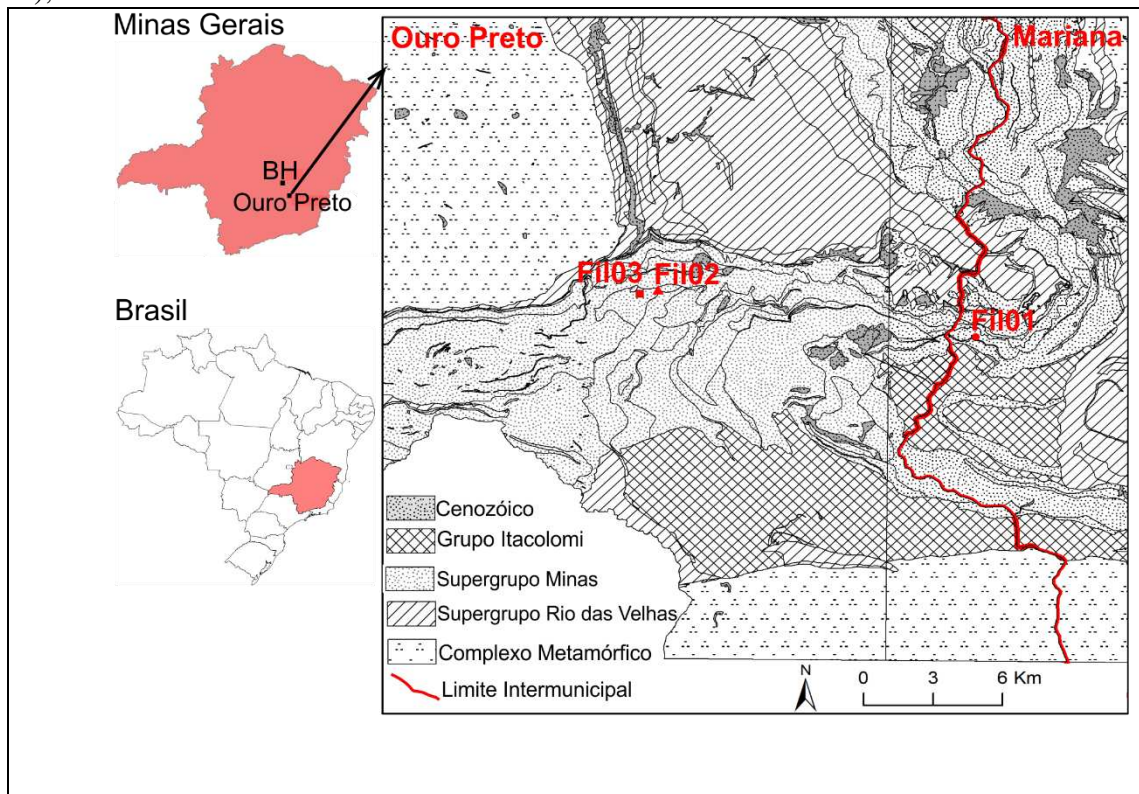
Fonte: Adaptado de Door II, 1958.

O Supergrupo Minas consiste de sedimentos paleoproterozóicos, depositados em bacias formadas sobre terreno arqueano que, posteriormente, foram metamorfisados e dobrados (Renger et al., 1994). As rochas desta unidade são quartzitos, quartzitos ferruginosos, conglomerados, filitos, filitos grafitosos, filitos ferruginosos, filitos dolomíticos, formação ferrífera bandada, margas, dolomitos, dolomitos ferruginosos, mica-xistos, clorita-xistos, *metacherts*, metagrauvacas, que estão sotopostas ao Supergrupo Rio das Velhas em discordância estrutural e estratigráfica, formando, da base para o topo, os Grupos Caraça, Itabira, Piracicaba e Sabará (Dorr, 1969). Como pode ser observado na Figura 2, os três perfis de intemperismo estudados estão localizados em terrenos pertencentes ao Supergrupo Minas. Especificamente, são filitos da Formação Fecho do Funil, do Grupo Piracicaba.

O Grupo Itabira destaca-se por conter a sequência mais espessa de formações ferríferas bandadas com corpos de minério de alto teor economicamente exploráveis, fazendo da região

uma das maiores produtoras de minério de ferro do mundo. Frequentemente associado às frentes de lavra do minério de ferro ocorrem filitos pertencentes ao Supergrupo Minas. Nesses casos, não são raros os problemas de ruptura relacionados a estruturas geológicas e aos efeitos da degradação química dos filitos (Lana, 2014).

Figura 2 - Mapa geológico com a localização dos perfis de intemperismo estudados, situados nos municípios contíguos de Mariana (Fil01) e Ouro Preto (Fil02 e Fil03). Ouro Preto está localizada a, aproximadamente, 100 km da capital do estado de Minas Gerais (Belo Horizonte - BH), Brasil



Fonte: Adaptado de Da Silva et.al, 2005; Romano et. al, 2017.

➤ **Clima e geomorfologia**

A região possui temperatura média anual em torno de 20°C com precipitação que varia entre 1300 mm e 2100 mm por ano (Schobbenhaus e da Silva, 2012). O clima é tropical semiúmido com duas estações bem definidas (Varajão et. al, 2009): verão úmido e inverno seco.

Segundo o RADAM BRASIL (1983), o Quadrilátero Ferrífero é caracterizado por dobramentos, resultantes de vários ciclos geotectônicos, que se refletem no relevo, destacado pelos processos erosivos que se dão de forma diferenciada em função do controle estrutural e da heterogeneidade litológica. Tal controle estrutural é observado no alinhamento de cristas em meio a vales profundos, como também em compartimentos planálticos que passaram por

sucessivos processos erosivos e que, por isso, podem conter apenas resquícios desses dobramentos.

➤ **Perfil de solo sobre filito da Formação Fecho do Funil**

Varajão et al. (2009) descrevem o perfil de solo desenvolvido sobre filito da Formação Fecho do Funil como sendo pouco desenvolvido, com transição abrupta entre o horizonte C (saprolito) para o horizonte B pouco espesso (aproximadamente 30 cm) com transição gradual para um horizonte A. A rocha fresca apresenta foliação marcada por níveis de quartzo, intercalados com níveis de micas e minerais opacos. No saprolito, os autores observaram o aparecimento de sericita, caulinita e impregnações ferruginosas de composição hematítica e goethítica que se intensificam em direção ao topo, na transição para o horizonte B. Neste horizonte, ocorrem caulinita, illita, gibbsita e goethita.

CAPÍTULO 4

Materiais e métodos

➤ **Seleção e caracterização dos perfis**

Os perfis de alteração de filito foram previamente selecionados mediante pesquisa bibliográfica e escolhidos por meio de reconhecimento de campo. Após a seleção, os trabalhos de campo foram planejados de acordo com o número e a localização dos taludes. Em campo, procedeu-se à caracterização tátil visual dos materiais neles existentes, contemplando: a descrição da rocha, incluindo textura e cor da matriz e do maciço rochoso; mineralogia; presença e tipo de estruturas; morfologia e razão solo/rocha (maciço).

Foram coletados dados referentes às discontinuidades do maciço rochoso, como, por exemplo, espaçamento, persistência, abertura e tipo de material de preenchimento. Foram também realizados testes expeditos com a matriz, como pressão dos dedos e golpe com martelo de geólogo, e estimada a resistência à compressão com esclerômetro (martelo) de Schmidt, aplicado na direção perpendicular à foliação metamórfica, quando possível. O martelo de Schmidt registra um valor adimensional (R), que consiste no rebote resultante do impacto do aparelho sobre a superfície da rocha. O valor de R aumenta conforme a dureza do material.

Os graus de alteração dos materiais resultantes do intemperismo foram preliminarmente identificados seguindo os critérios sugeridos pela ISRM – Sociedade Internacional de Mecânica das Rochas (2007 e 2015) (Quadro 1).

Com a compartimentação preliminar dos perfis, amostras representativas dos diferentes materiais geológicos que compõem as classes de intemperismo identificadas foram coletadas a fim de que fossem efetuados os ensaios de caracterização física, mecânica, química e mineralógica, nos laboratórios da UFV e de outras instituições. Ressalta-se que as descrições macroscópicas e a coleta de amostras contemplaram a rocha sã (W1) até a rocha muito intemperizada (W4). Os materiais pertencentes aos níveis W5 e W6 da classificação da ISRM (2015) foram apenas identificados nas frentes de intemperismo, mas não fazem parte do escopo do presente estudo.

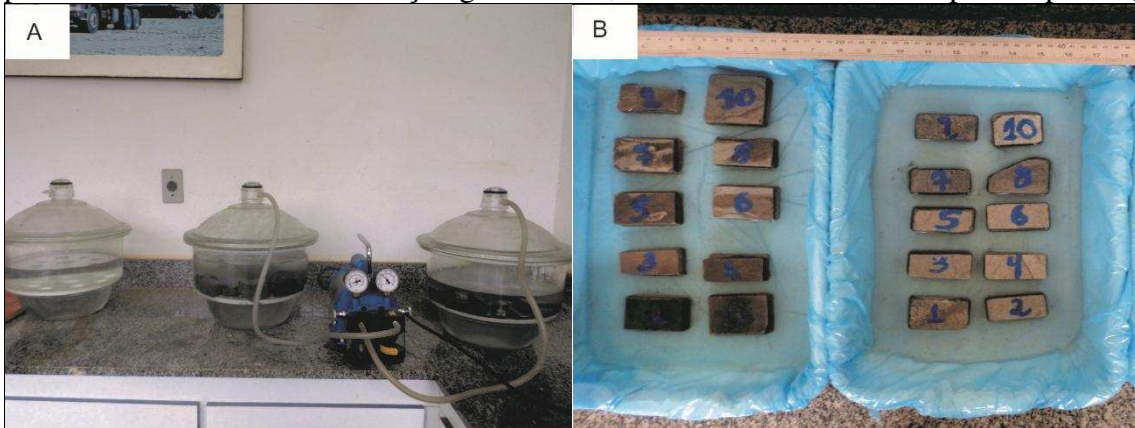
➤ **Ensaio de laboratório**

Os ensaios de caracterização física seguiram as recomendações da ISRM (2007), compreendendo os seguintes parâmetros:

- ✓ Densidade aparente seca e saturada;
- ✓ Porosidade aparente;
- ✓ Absorção d'água aparente;
- ✓ Velocidade de propagação de ondas ultrassônicas;
- ✓ Durabilidade.

Os resultados dos índices físicos (densidade aparente seca e saturada, porosidade aparente e absorção d'água aparente) correspondem à média de dois ensaios realizados para cada grau de intemperismo identificado nos três perfis. Os ensaios seguiram às diretrizes da ISRM (2007), com exceção das amostras W3 e W4 do perfil Fil01. Estes fílitos desagregaram facilmente ao serem submetidos à saturação à vácuo, fazendo-se a opção pela saturação gradacional, conforme a norma brasileira (ABNT, NBR 12766) (Figura 3), da seguinte forma: adicionou-se água até 1/3 da altura dos corpos-de-prova. Após 4 h, 2/3 da altura dos corpos-de-prova foram submergidos. Por um período de mais 4h completou-se a submersão, deixando-se perfazer o tempo de 24 h.

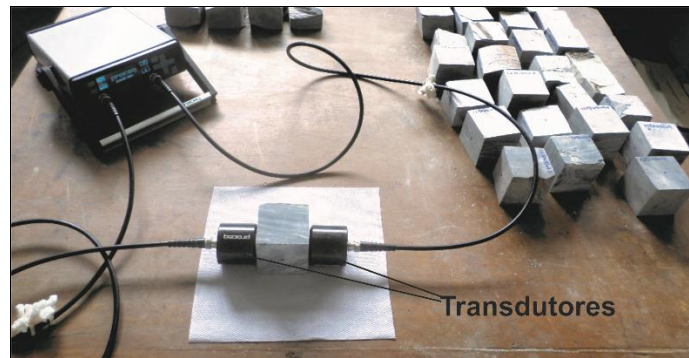
Figura 3 – Amostras submetidas à saturação à vácuo (A). Amostras de filitos W3 e W4 do perfil Fil01 submetidas à saturação gradacional, com 1/3 da altura dos corpos-de-prova (B)



Fonte: Autor

A velocidade de propagação de ondas ultrassônicas foi determinada utilizando um *Portable Ultrasonic Non-destructive Digital Indicating Tester* (PUNDIT) (Figura 4). O teste foi realizado em amostras de rocha de formato aproximadamente retangular, preparadas para o teste de compressão puntiforme, contemplando todos os graus de intemperismo identificados em todos os três perfis. Para obtenção do formato retangular das amostras a partir dos blocos rochosos coletados em campo, foi necessário o uso de serra diamantada à úmido. As amostras tiveram suas extremidades ligeiramente polidas para garantir um melhor ajuste dos transdutores - responsáveis pela emissão e recepção das ondas ultrassônicas. Fez-se também o uso de vaselina no local de fixação dos transdutores para garantir um melhor acoplamento destes. Para a realização dos testes, a amostra acoplada aos transdutores era ligeiramente elevada da mesa de ensaios, não permanecendo apoiada a nenhuma superfície. A velocidade de propagação de ondas ultrassônicas é calculada a partir do tempo gasto para que a onda sonora se propague de um transdutor a outro. Conhecendo-se o tamanho da amostra, determina-se a velocidade, conforme as recomendações da ISRM (2007). O número de amostras utilizadas de cada classe de intemperismo contemplada no presente estudo foram: 13 do filito W1/W2; 19 do filito W2; 20 do filito W2/W3; 38 do filito W3; 23 do filito W3/W4, e 19 do filito W4.

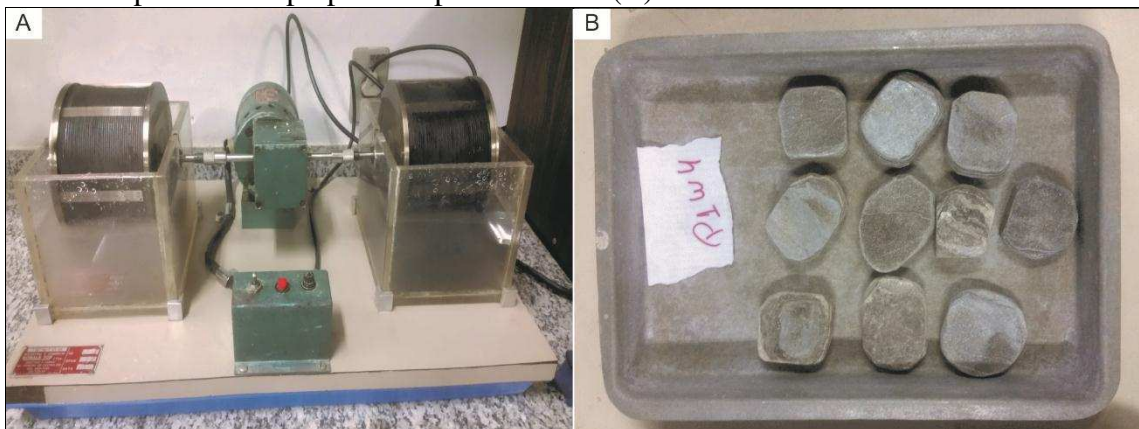
Figura 4 - PUNDIT utilizado para medição da velocidade de propagação de ondas nos filitos



Fonte: Autor

O slake durability test mede a resistência de uma amostra de rocha à desintegração resultante de ciclos de umedecimento e secagem. O ensaio foi realizado em laboratório da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) e seguiu a norma da ISRM (2007). Dez fragmentos de cada classe de alteração observada em todos os perfis tiveram suas arestas previamente aparadas, para obtenção de extremidades aproximadamente arredondadas, e levados para estufa até a obtenção de uma massa constante. Posteriormente, os fragmentos de cada amostra de filito foram colocados em tambores cilíndricos, formados por uma malha metálica com abertura de 2mm, e imersos em um tanque com água, submetidos a uma velocidade de 20 rpm durante 10 minutos. Cada amostra foi submetida a dois ciclos de umedecimento e secagem (I_{d1} e I_{d2} , respectivamente). O índice de durabilidade é definido como a razão entre o peso seco da fração de amostra retida no cilindro após o ensaio e o peso seco inicial da amostra.

Figura 5 – Equipamento utilizado no ensaio de durabilidade (A). Fragmentos de amostra do filito W4 do perfil Fil01 preparados para o ensaio (B)



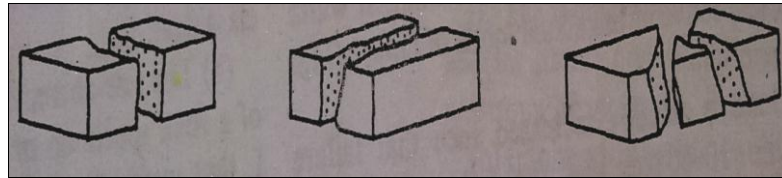
Fonte: Autor

O ensaio de compressão puntiforme (*point load test*) é rápido e prático e consiste na obtenção do índice de resistência (I_s), definido para um diâmetro padrão de 50 mm ($I_{s(50)}$).

Neste ensaio, a amostra de rocha é comprimida entre duas ponteiros cônicos de metal duro, que devido ao carregamento, provocam a sua ruptura através do desenvolvimento de fraturas de tração. A realização deste ensaio seguiu os procedimentos sugeridos pela ISRM (2007). Devido à dificuldade na preparação de corpos-de-prova imposta pela fragilidade dos filitos, os ensaios foram realizados em amostras irregulares, de formato aproximadamente retangular. Para a obtenção do $I_{s(50)}$, o índice de carga pontual obtido foi multiplicado por um fator de correção conforme sugestão da ISRM (2007).

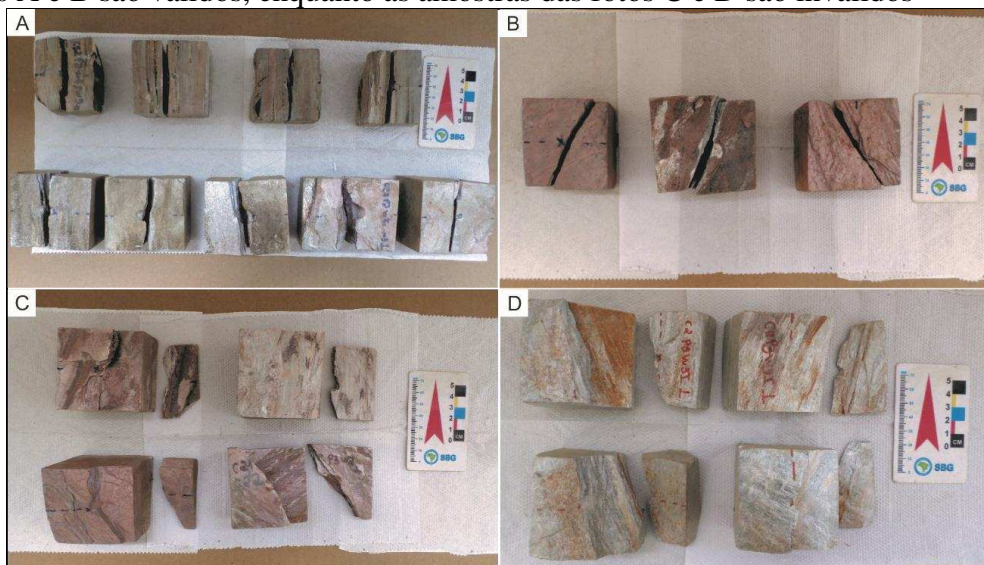
Ao todo foram 302 espécimes submetidas ao teste de compressão puntiforme para avaliar a resistência das rochas estudadas. Entretanto, apenas 53 ensaios realizados paralelos à foliação e 82 perpendiculares foram considerados válidos (Figura 6 e Figura 7). Nos ensaios inválidos realizados na direção perpendicular, o plano de ruptura não atingia o ponto de aplicação da carga, sendo interrompido por fraturas paralelas à foliação, superfícies mais resistentes (níveis oxidados) ou dobras. Os ensaios foram realizados no laboratório de mecânica das rochas do Departamento de Engenharia Civil da UFV (Figura 8).

Figura 6 – Testes considerados válidos em amostras em formato de blocos



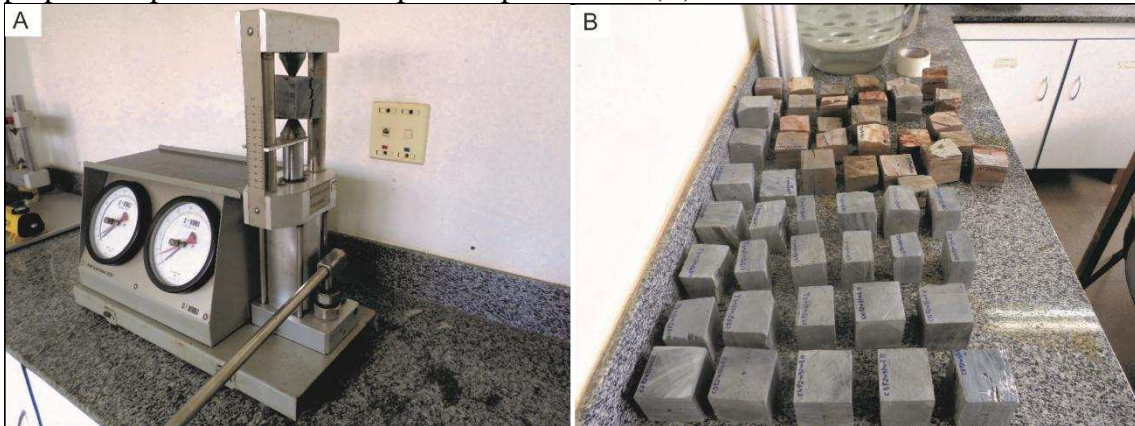
Fonte: ISRM, 2007

Figura 7 – Amostras de filito W3/W4 do perfil Fil02 (A) e filito W3 de diferentes pontos do perfil Fil03 (B, C e D) após ensaio de compressão puntiforme. Os ensaios com as amostras das fotos A e B são válidos, enquanto as amostras das fotos C e D são inválidos



Fonte: Autor

Figura 8 – Equipamento utilizado para o ensaio de compressão puntiforme (A). Amostras preparadas para o teste de compressão puntiforme (B)



Fonte: Autor

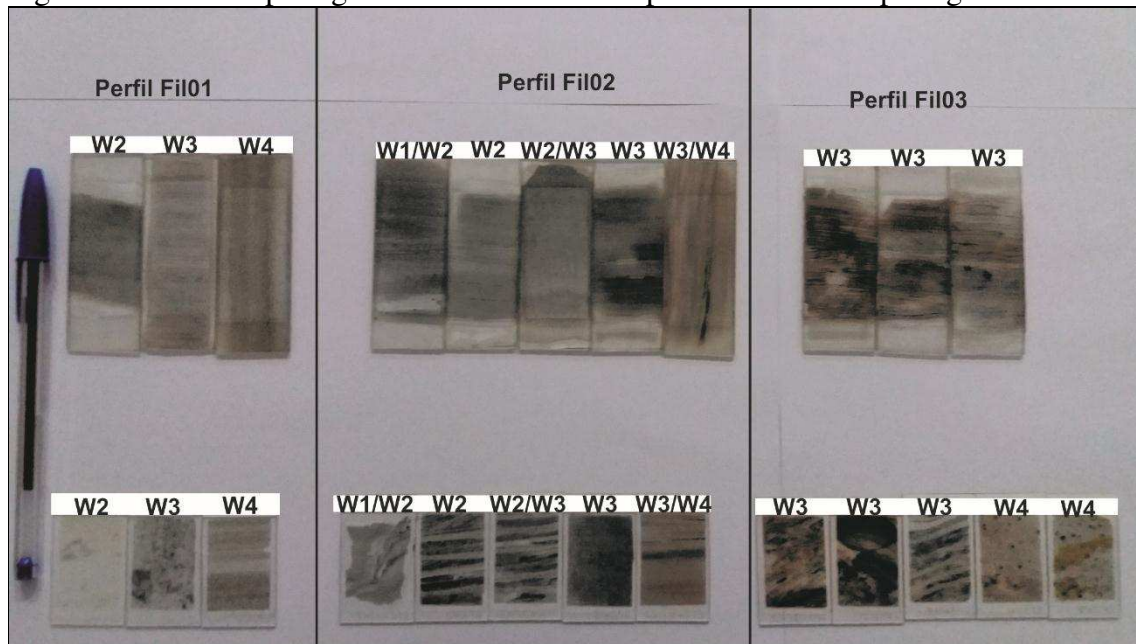
Os ensaios de compressão uniaxial e resistência à tração indireta (ensaio brasileiro), inicialmente previstos, não puderam ser executados, uma vez que, após várias tentativas, não foi possível retirar dos blocos de rocha coletados em campo, corpos-de-prova com as medidas padrão. Isto ocorreu devido às descontinuidades, especialmente aquelas paralelas à foliação metamórfica, como também ao estado de alteração dos filitos.

Para a obtenção da mineralogia e da química dos diferentes materiais geológicos presentes foram realizadas as seguintes técnicas:

- ✓ Confeção e análise de lâminas delgadas em microscópio petrográfico;
- ✓ Difractometria de raios-X (DRX);
- ✓ Microfluorescência de raios-X, com o intuito de determinar a composição química.

A análise micropetrográfica contemplou a mineralogia, bem como as características texturais, microestruturais e a avaliação dos efeitos do intemperismo sobre a matriz da rocha. Foram confeccionadas um total de vinte e quatro lâminas petrográficas, doze perpendiculares e doze paralelas à foliação, sendo duas para cada classe de alteração das três frentes estudadas (Figura 9). No caso do perfil Fil03, foram analisadas seis lâminas petrográficas para a classe W3 (três perpendiculares e três paralelas à foliação) em pontos distintos do perfil, buscando compreender melhor os efeitos da ação intempérica e possíveis variações mineralógicas, uma vez que o nível ocorre em partes diferentes da frente de alteração.

Figura 9 – Lâminas petrográficas confeccionadas para análise micropetrográfica



Fonte: Autor

A DRX foi realizada para a identificação da mineralogia, sendo aplicada à fração fina dos filitos produzida por moagem para a redução das partículas até a obtenção do pó da rocha, posteriormente coletadas por decantação em meio aquoso. Três tipos de leitura foram feitas: em condição natural; a partir da saturação em etileno-glicol; e após o aquecimento à temperatura de 525°C. O equipamento utilizado foi um Bruker D8 Advance, com tubo de cobre, corrente de 40 mA, voltagem de 40 kV e ângulo de varredura 2θ 0-70°, com leituras a cada 0,02°.

A microfluorescência de raios-X (μ -XRF) foi utilizada para a obtenção da composição química dos filitos nos diferentes estados de alteração. O aparelho utilizado foi o μ -EDX 1300 – Shimadzu (EDX), previamente calibrado para análise quantitativa empregando-se os Parâmetros Fundamentais (Quantitativo – FP), o qual consiste em um modelo matemático que já se encontra no software do aparelho, baseado em quatro amostras de referência: Soil Montana II – NIST 2711a (*National Institute of Standards and Technology of the United States*); BHVO-2 – Basalt – USGS (*U.S. Geological Survey Certificate of Analysis*); COQ-1 – Carbonatite – USGS; e SDC-1 – Mica – USGS. As análises foram feitas em porções representativas da matriz da rocha, previamente definidas, demarcadas em pequenos fragmentos de formato retangular com superfícies lisas e paralelas nos diferentes graus de intemperismo.

CAPÍTULO 5

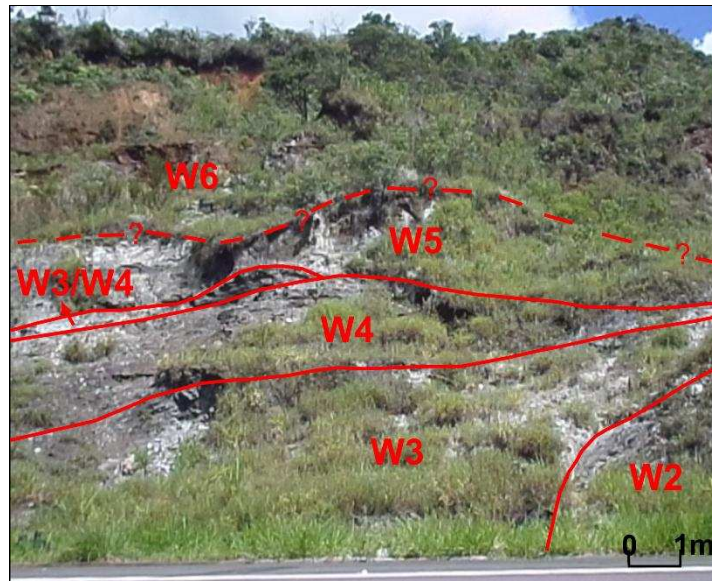
Descrição dos perfis de intemperismo

Neste capítulo são apresentadas as descrições realizadas *in situ* de cada um dos perfis de intemperismo, contemplando os aspectos mencionados no capítulo anterior (Materiais e Métodos), bem como as principais características observadas nas lâminas petrográficas. As descrições da matriz da rocha e do maciço são abordadas em conjunto com os aspectos microscópicos, uma vez que estes foram de fundamental importância para melhor compreensão e adequação do grau de intemperismo dos materiais presentes em cada perfil, haja vista os filitos consistirem em rochas de granulação fina.

5.1 Descrição do Perfil Fil01

O perfil de intemperismo FIL01 (Figura 10) consiste em filito sericítico prateado. A rocha é tipicamente composta por grãos finos, sendo formada por quartzo, muscovita/sericita, opacos e, secundariamente, por cloritas. As classes de alteração identificadas variaram entre levemente intemperizada (W2) e solo residual maduro (W6), conforme ISRM (2007 e 2015). Não foi verificada a presença de filito são (W1) no local. A foliação é milimetricamente espaçada, penetrativa, aberta e/ou preenchida por material inconsolidado. Ocorrem duas famílias de fraturas principais, veios de quartzo paralelos à foliação e forte clivagem de crenulação. A transição entre as classes de alteração é brusca e controlada pela foliação metamórfica. Os materiais pertencentes aos níveis W5 e W6 foram apenas identificados nas frentes de intemperismo, mas não fazem parte do escopo do presente estudo, como mencionado anteriormente.

Figura 10 – Perfil Fil01 compartimentado segundo classes de intemperismo (ISRM 2007, 2015)



Fonte: Autor

➤ Descrição macroscópica e de lâmina petrográfica da classe de intemperismo W2

Descrição macroscópica

O filito classificado como W2 (Figura 11) apresenta coloração cinza prateado com manchas alaranjadas e escuras (Figura 12), ambas resultantes da alteração de minerais opacos. Ocorrem fraturas com aberturas milimétricas a centimétricas e presença de veios quartzosos. Foi necessário mais de um golpe firme com martelo de geólogo para fraturar a matriz da rocha. Como comentado por Leão et al. (2017), não houve emissão de som metálico com o golpe do martelo e a rocha pôde ser riscada pela unha. Estes critérios são utilizados na classificação da ISRM (2015), porém não se mostraram adequados para definição de grau de alteração de filitos.

Descrição de lâmina petrográfica

Composta por muscovita, quartzo, opacos e, secundariamente, por cloritas. A contagem modal mostrou a predominância de micas (61.7% de muscovita/sericita), seguida por quartzo (17%), opacos (14%), óxidos de ferro (3%) e cloritas (1.5%). Fraturas e vazios correspondem a 1% e 1.5%, respectivamente. O conjunto está crenulado. A foliação principal é dada pela muscovita, que apresenta cores de birrefringência intensas. Os grãos de quartzo e opacos estão estirados, acompanhando a foliação. Ocorrem veios de quartzo paralelos à foliação, veios constituídos por opacos e cloritas e níveis cimentados. As fraturas existentes correspondem a planos de foliação abertos. Verifica-se a atuação do intemperismo químico pela alteração de

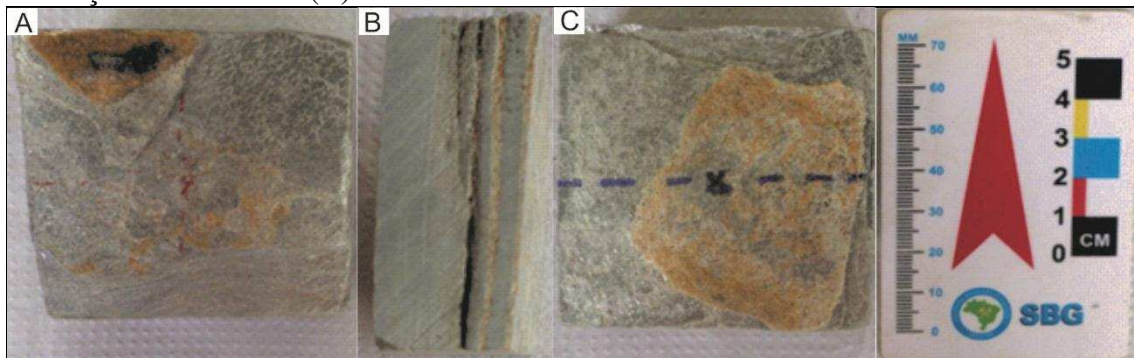
opacos e deposição dos resíduos sobre os minerais. A Figura 13 mostra os principais aspectos encontrados em lâmina petrográfica do filito W2.

Figura 11 - Afloramento de filito W2 no perfil FIL01



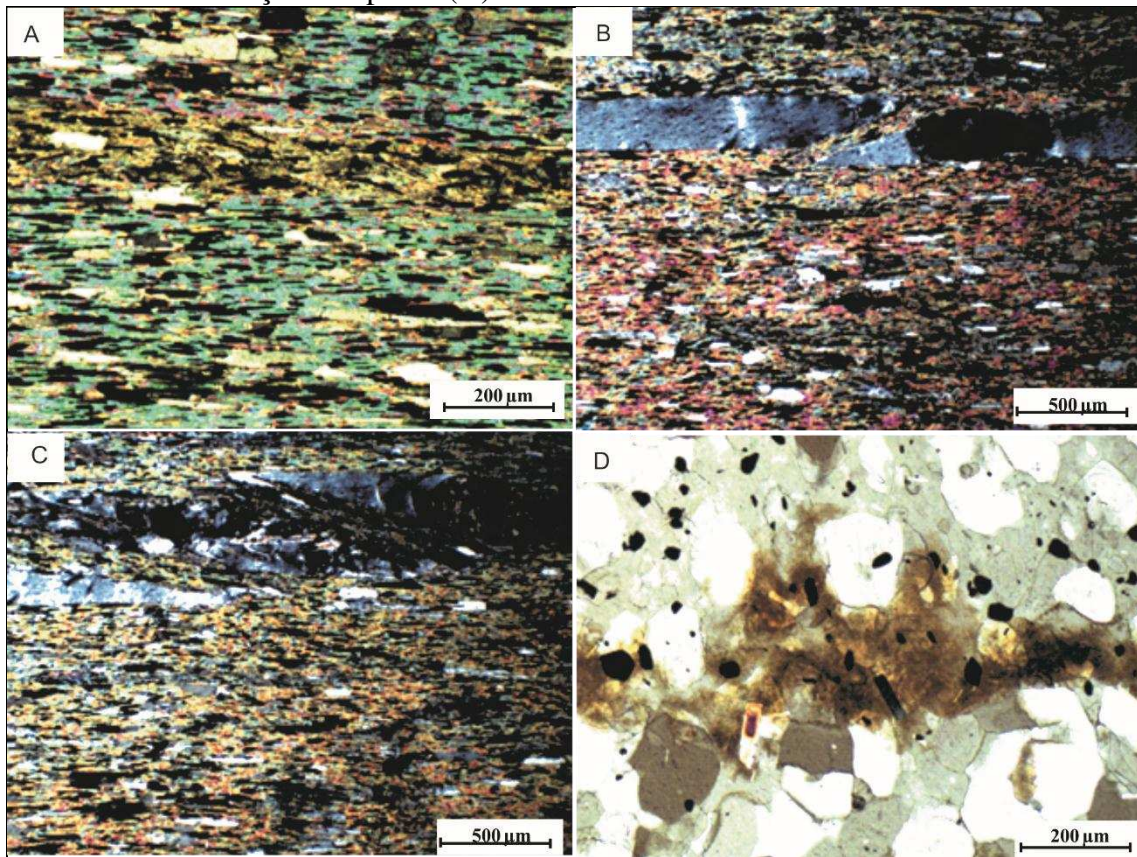
Fonte: Autor

Figura 12 – Aspectos da matriz de filito W2 em que se observam manchas alaranjadas e escuras resultantes do intemperismo de opacos (A e C), fraturas abertas e níveis cimentados paralelos à foliação metamórfica (B)



Fonte: Autor

Figura 13 - Aspectos texturais e mineralógicos de filito W2 em lâmina petrográfica. Observe-se quartzos e opacos estirados (A), fraturas paralelas à foliação (B e C) e manchas acastanhadas resultantes da alteração de opacos (D)



Fonte: Autor

➤ Descrição macroscópica e de lâmina petrográfica da classe de intemperismo W3

Descrição macroscópica

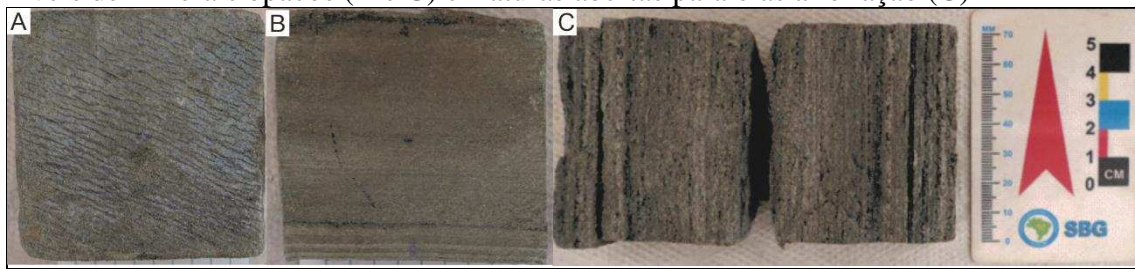
O filito classificado como W3 possui coloração cinza pálido a escuro (Figura 14). É marcado por níveis constituídos essencialmente por opacos (Figura 15). O intemperismo destes resulta em material inconsolidado, de textura arenosa, e coloração escura. A presença destes níveis opacos alterados é o principal responsável pela redução da resistência mecânica do filito W3. Leão et al. (2017) também identificaram e descreveram a presença destes níveis. Ocorrem manchas de oxidação em discontinuidades. As fraturas apresentam abertura milimétrica. A matriz da rocha é friável, oferecendo pouca resistência ao golpe do martelo de geólogo.

Figura 14 - Afloramento de filito W3 no perfil FIL01



Fonte: Autor

Figura 15 - Aspectos da matriz de filito W3 em que se observam clivagem de crenulação (A), níveis de minerais opacos (B e C) e fraturas abertas paralelas à foliação (C)

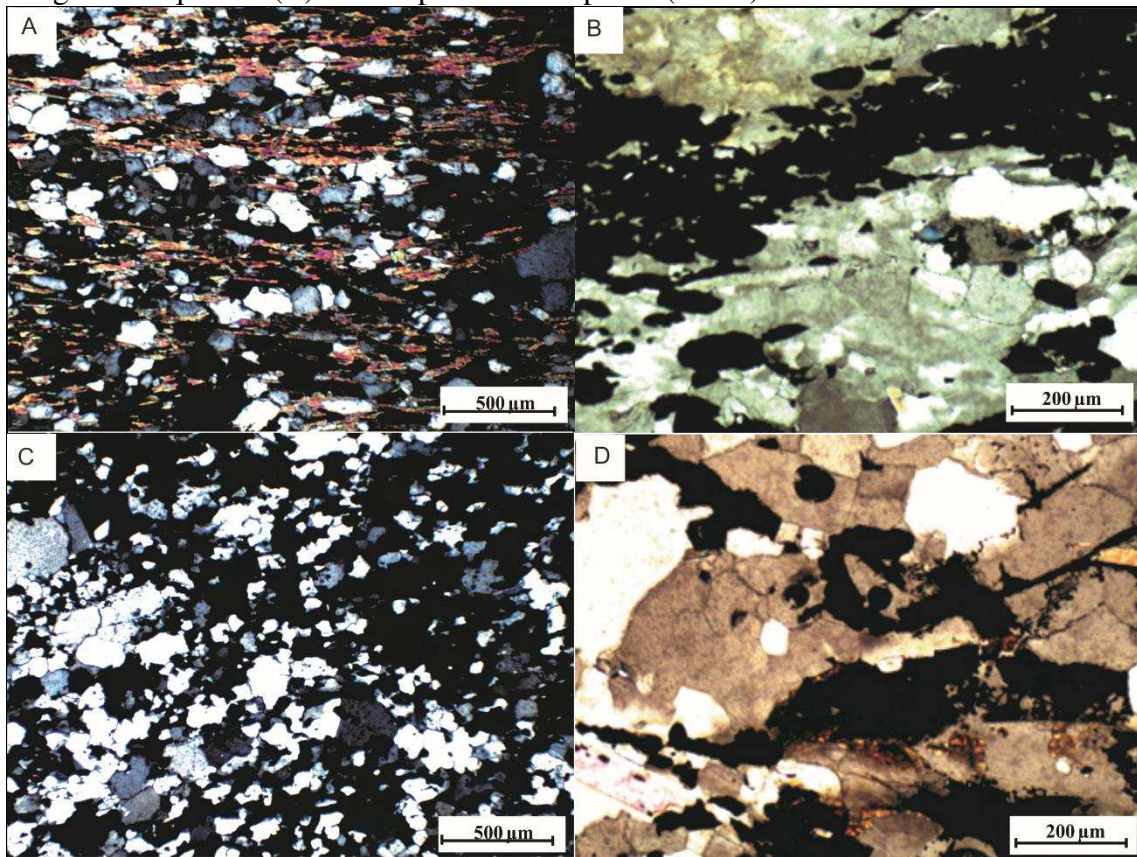


Fonte: Autor

Descrição de lâmina petrográfica

Constituída predominantemente por quartzo anédrico a subédrico, seguido por micas e opacos e, secundariamente, por cloritas. A porcentagem modal mostrou o predomínio de quartzo (51.5%), seguido por mica (13%) e opacos (20%), em menor proporção estão os óxidos de ferro (3%) e cloritas (1.5%). O percentual de vazios é de 12%. Os opacos exibem alinhamento, formando bandas. As cloritas apresentam leve pleocroísmo em verde e cor de interferência em verde ou azul. A alteração se dá por manchas marrom-acastanhadas (resultantes da alteração de opacos) nos interstícios e sobre grãos de quartzo. A Figura 16 mostra os principais aspectos encontrados em lâmina petrográfica do filito W3.

Figura 16 - Aspectos texturais e mineralógicos de filito W3 em lâmina petrográfica. Observe-se o predomínio de quartzo na matriz (A), alinhamento de opacos (B), fraturas intragranulares em grãos de quartzo (C) e intemperismo de opacos (C e D)



Fonte: Autor

➤ Descrição macroscópica e de lâmina petrográfica da classe de intemperismo W4

Descrição macroscópica

O filito classificado como W4 está totalmente descolorido (Figura 17), caracterizado pela alternância de coloração entre cinza, marrom-acastanhado e níveis escuros (pretos) de textura arenosa (Figura 18). A foliação está preservada. As fraturas podem ter aberturas centimétricas. Há intercalações centimétricas com materiais W3/W4 ao longo de toda a camada, como também com veios de quartzo milimétricos. A matriz é friável, sendo facilmente penetrada pelo golpe de martelo de geólogo.

Figura 17 - Afloramento de filito W3 no perfil Fil01



Fonte: Autor

Figura 18 - Aspectos da matriz de filito W4 em que se observam cores variegadas, intemperismo dos níveis formados por minerais opacos, tornando a matriz rochosa friável e escura, além da precipitação de óxido e hidróxido de Fe



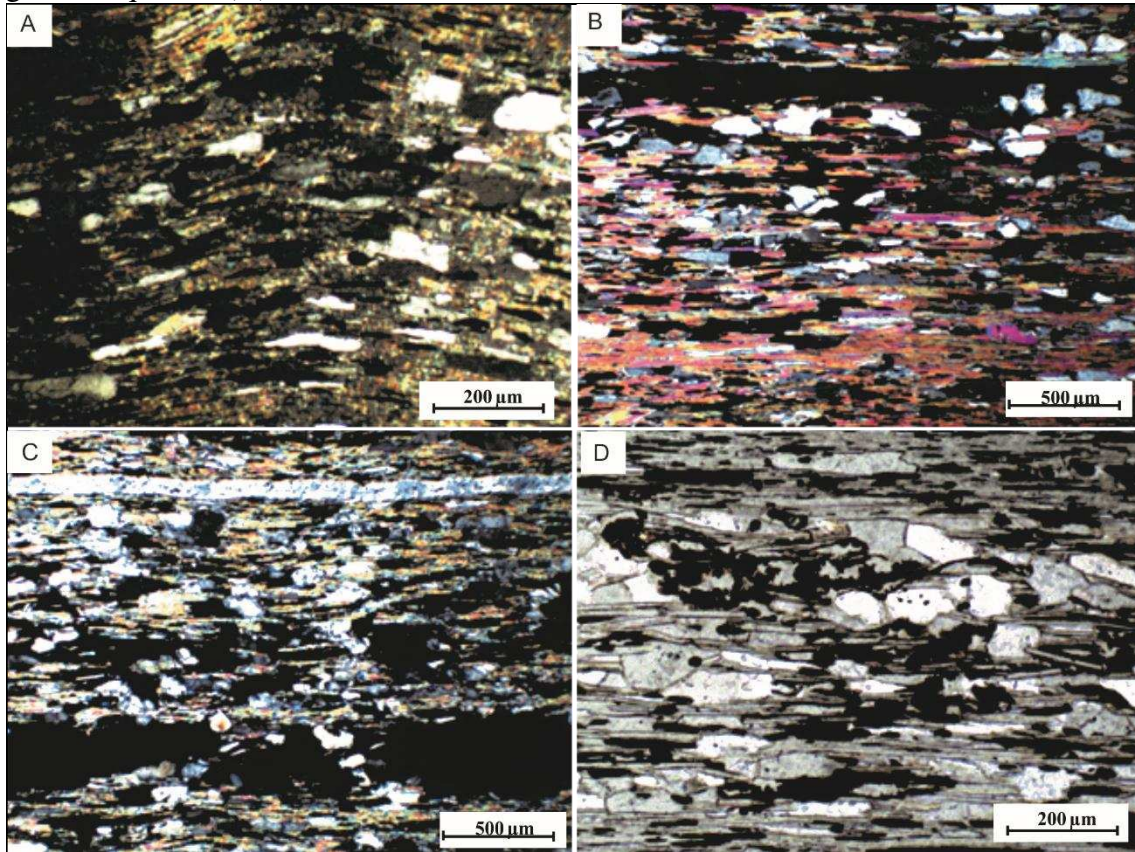
Fonte: Autor

Descrição de lâmina petrográfica

Há bandas essencialmente quartzosas intercaladas com bandas micáceas. A contagem modal mostrou o predomínio de mica (33%) e quartzo (29.4%), seguida por opacos (16%) e, secundariamente, óxidos de ferro (5%) e argilas (2.8%). As cloritas ficaram com percentual inferior a 1%. Vazios e fraturas correspondem a 11.5% e 1.5 %, respectivamente. Os opacos ocorrem em ambas as bandas e estão estirados. Nas bandas quartzosas, os cristais de quartzo são anédricos a subédricos, tornando-se mais perceptíveis as fraturas intragranulares. Nas bandas predominantemente micáceas os quartzos estão estirados. Há grãos de clorita que estão esbranquiçados nas bordas, preservando a cor verde no interior do grão e que possuem extinção permanente (provavelmente devido à deposição de material opaco), entretanto, alguns grãos exibem cor de interferência azul. Esses grãos parecem estar se alterando, pois já não preservam as cores típicas em todo o cristal. A precipitação de óxido/hidróxido de Fe se dá nas fraturas intragranulares dos quartzos, na clivagem das micas e também sobre a superfície desses grãos. Há fraturas não preenchidas que correspondem a planos de foliação abertos. As cores de

interferência das micas já não são tão vivas. Na Figura 19 mostra-se os principais aspectos encontrados em lâmina petrográfica do filito W4.

Figura 19 - Aspectos texturais e mineralógicos de filito W4 em lâmina petrográfica. Observe-se clivagem de crenulação (A), fraturas paralelas à foliação (B e C) e alteração de opacos sobre grãos de quartzo (D)



Fonte: Autor

Atuação do Intemperismo no perfil Fil01

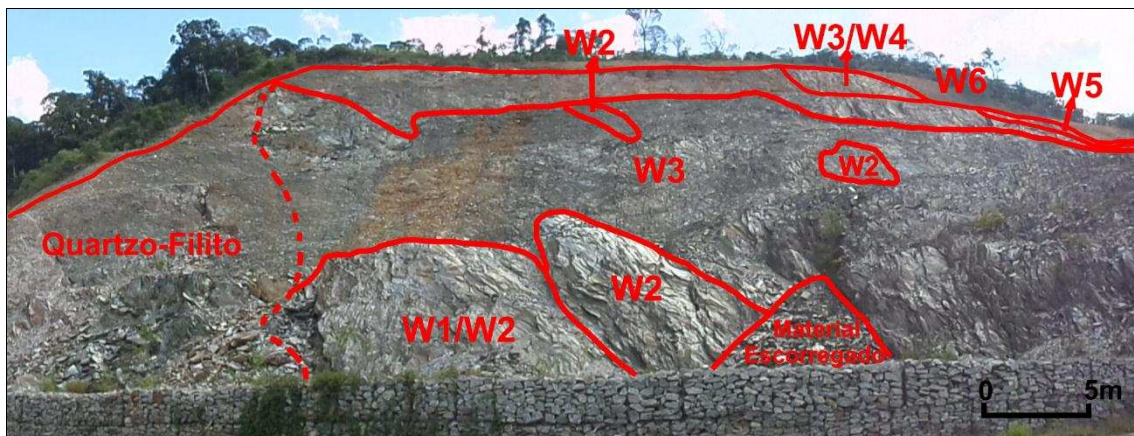
Um dos principais efeitos da exposição dessas rochas às condições atmosféricas consiste na formação de descontinuidades paralelas à foliação metamórfica que, com o avanço do intemperismo, se intensificam. Verificou-se, além do aumento, do nível W2 para o W4, de planos de foliação abertos, a maior abertura dessas descontinuidades que se tornam mais degradadas nos membros mais alterados. O aumento das fraturas paralelas à foliação foi interpretado como uma resposta ao alívio de pressões resultante da erosão e do soerguimento tectônico, aspecto já também relatado por Fookes et al. (1971), e frequentemente encontrado em superfícies expostas ao intemperismo em maciços rochosos metamórficos. Essa característica marcante observada no maciço é perceptível também em lâmina petrográfica, como, por exemplo, pela presença de fraturas intragranulares de grãos de quartzo. À medida que o intemperismo físico se processa, criando espaços preferenciais para a entrada de água na

rocha, ocorre a dissolução dos minerais opacos e precipitação de óxidos de ferro. Há formação de inúmeros vazios na rocha, tornando a matriz friável, como em W3 e W4 e verifica-se a progressiva alteração da clorita para argila.

5.2 Descrição do Perfil Fil02

O perfil, mostrado na Figura 20, é resultante da alteração de filito de coloração cinza, composto principalmente por quartzo, muscovita/sericita e clorita. As cloritas ocorrem concentradas em bandas. Verificou-se, com frequência, a ocorrência de *box spots*, provavelmente de magnetita. As classes de alteração identificadas variaram de filito praticamente são (W1/W2) a solo residual maduro (W6). Entretanto, são apenas descritos no presente trabalho os filitos W1/W2 ao filito W3/W4, já que os filitos W5 e W6 fogem do escopo da pesquisa. A foliação é penetrativa, com espaçamento milimétrico, podendo estar selada, aberta e/ou preenchida. Há duas famílias de fratura principais, sendo uma delas dada pela clivagem de crenulação, perpendicular à foliação metamórfica, que controla a direção em que se observam as rupturas em escala do maciço. O maciço apresenta veios de quartzo e dobras.

Figura 20 – Perfil Fil02 compartimentado segundo classes de intemperismo (ISRM 2007, 2015)



Fonte: Autor

➤ Descrição macroscópica e de lâmina petrográfica da classe de intemperismo W1/W2

Descrição macroscópica

O filito classificado como W1/W2 possui superficialmente uma leve descoloração variando em tons de cinza claro a prateado com manchas marrom-acastanhadas e avermelhadas ao longo das discontinuidades (Figuras 21 e 22). A foliação é predominantemente selada, porém pode possuir aberturas milimétricas a centimétricas, chegando a 2,5 cm. Há sinais de

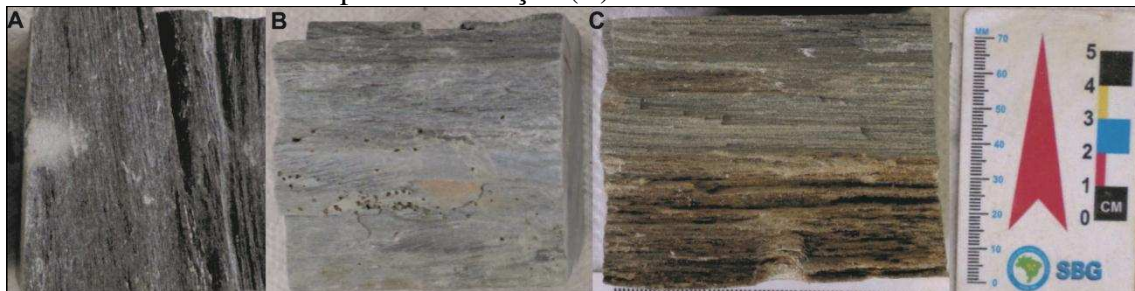
oxidação em *box spots*. Foi necessário mais de um golpe firme com martelo de geólogo para fraturar a matriz da rocha.

Figura 21 - Afloramento de filito W1/W2 no perfil Fil02. Destacado em vermelho, mostra-se a direção da clivagem de crenulação, perpendicular à foliação, ao longo da qual observam-se rupturas no maciço



Fonte: Autor

Figura 22 - Aspectos do filito W1/W2 em que se observam a matriz praticamente sã, com foliação aberta (A), bandas de clorita (de cor verde) e *box spots* oxidados (B) e manchas marrom-acastanhadas em plano de foliação (C)



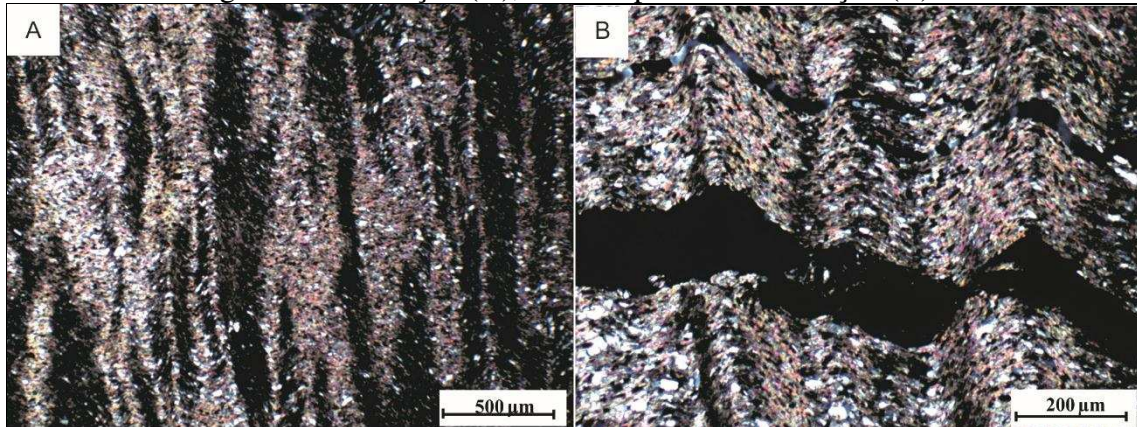
Fonte: Autor

Descrição de lâmina petrográfica

A rocha é formada por intercalações de bandas micáceas e quartzosas (Figura 23). A contagem modal mostrou a predominância de micas (46.7%), seguida por quartzo (29.5%) e opacos (13%); enquanto a clorita corresponde a 1%, óxidos 2.5%, argila 3.5%, vazios 1.3% e fraturas 2.5%. O conjunto está fortemente crenulado. Quartzos e opacos estão estirados. Ocorrem veios constituídos predominantemente por quartzo e, secundariamente, por opacos e micas. Há lixiviação de opacos em veios constituídos principalmente por opacos e cloritas. A alteração dos opacos leva à precipitação de óxidos. Há cristais de clorita que são incolores e possuem cor de interferência azul, como também cristais que apresentam pleocroísmo de verde

claro a verde escuro, com cor de interferência em azul. Tanto o pleocroísmo quanto a cor de interferência não são homogêneos em todo o cristal, já que se observa uma cor verde mais intensa no núcleo e cor de interferência acastanhada nas bordas, mostrando indícios de alteração meteórica na clorita.

Figura 23 - Aspectos texturais e mineralógicos de filito W1/W2 em lâmina petrográfica. Observa-se clivagem de crenulação (A), fraturas paralelas à foliação (B)



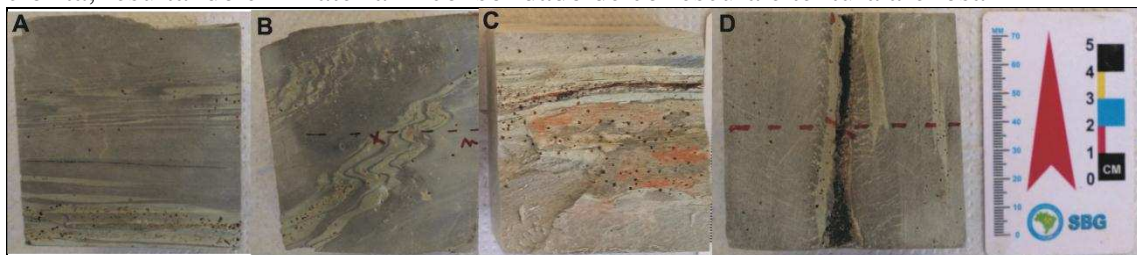
Fonte: Autor

➤ Descrição macroscópica e de lâmina petrográfica da classe de intemperismo W2

Descrição macroscópica

O filito classificado como W2 possui coloração cinza claro (Figura 24), entretanto, superficialmente, a rocha está localmente descolorida, apresentando tons marrom-acastanhados. Há manchas avermelhadas ao longo das discontinuidades e sinais de oxidação em *box spots*. Presença de fraturas com aberturas milimétricas e centimétricas. Bandas de cor verde, constituídas por opacos e cloritas começam a apresentar sinais de alteração, resultando em material de textura arenosa, formando níveis de coloração escura. Foi necessário mais de um golpe firme com martelo de geólogo para fraturar a matriz da rocha.

Figura 24 - Aspectos da matriz do filito W2. Em A observam-se níveis de clorita (cor verde), *box spots* oxidados e fratura. Em B dobras em níveis de clorita. Em C manchas avermelhadas resultantes da alteração de opacos. Em C e D verifica-se o início da alteração dos níveis de clorita, resultando em material inconsolidado de cor escura e textura arenosa

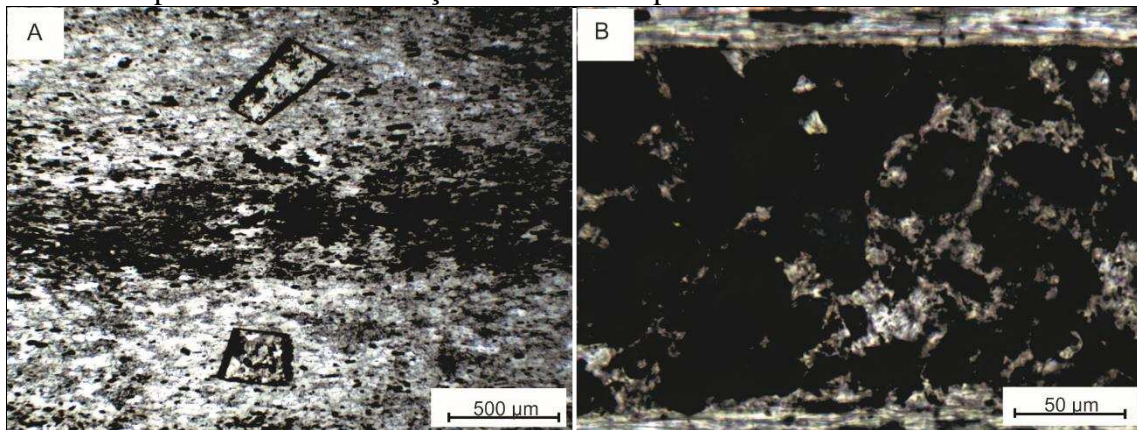


Fonte: Autor

Descrição de lâmina petrográfica

A análise modal mostrou a predominância de mica (43.7%), seguida por quartzo (28%), opacos (14.8%), óxidos de ferro (3%), clorita (2.5%) e argila (1%). Vazios e fraturas correspondem a 5% e 2%, respectivamente. O conjunto está crenulado. Os grãos de quartzo e opacos estão estirados, acompanhando a foliação principal, dada pelas micas. Estas exibem uma cor levemente esverdeada e apresentam suas típicas cores de interferência. Ocorrem veios constituídos por opacos, clorita e sericita. Há também cloritas na matriz da rocha. Presença de fraturas e vazios. *Box spots* possuem formatos cúbico, retangular e losangular. Os cristais de clorita nos veios chegam a 0,25 mm de diâmetro e possuem cores de interferência principalmente verde e azul. Boa parte das cloritas que constituem os veios estão obliteradas pela deposição de material opaco, tornando-se opacas sob a luz polarizada (Figura 25). As cloritas presentes na matriz também apresentam sinais de alteração, já que a cor de interferência verde ou arroxeadada não é uniforme em muitos cristais, ficando as bordas com cores acastanhadas.

Figura 25 - Aspectos texturais e mineralógicos de filito W2 em lâmina petrográfica. Observe-se níveis de minerais opacos e *box spots* oxidados (A). Em B níveis formados por cloritas obliteradas por resíduos da alteração de minerais opacos



Fonte: Autor

➤ Descrição macroscópica e de lâmina petrográfica da classe de intemperismo W2/W3

Descrição macroscópica

O filito classificado como W2/W3 está superficialmente descolorido, apresentando cores acastanhadas (Figura 26). Ao longo das discontinuidades ocorrem manchas avermelhadas. Há *box spots*, dobras e veios de quartzo. A foliação pode apresentar aberturas milimétricas e estar preenchida com material inconsolidado, de cor escura e textura arenosa, resultante da alteração de minerais opacos. Foi necessário um golpe firme com martelo de

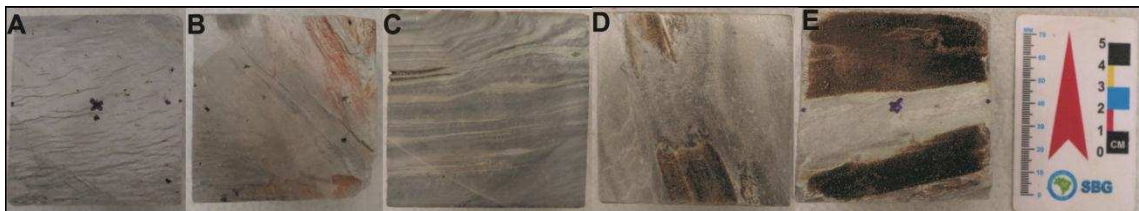
geólogo para fraturar a matriz da rocha. Na Figura 27, são apresentados aspectos da matriz desse filito.

Figura 26 - Afloramento de filito W2/W3 no perfil Fil02.



Fonte: Autor

Figura 27 - Aspectos da matriz do filito W2/W3. Em A observa-se clivagem de crenulação. Em B, manchas avermelhadas, resultante do intemperismo dos opacos. Em C, níveis de coloração verde compostos por opacos e clorita, em que se verifica o início da formação de material inconsolidado escuro de textura arenosa. A mudança de cor e textura destes níveis é resultante da alteração dos opacos e da clorita, que se converte em argila. Em D e E formação deste mesmo material



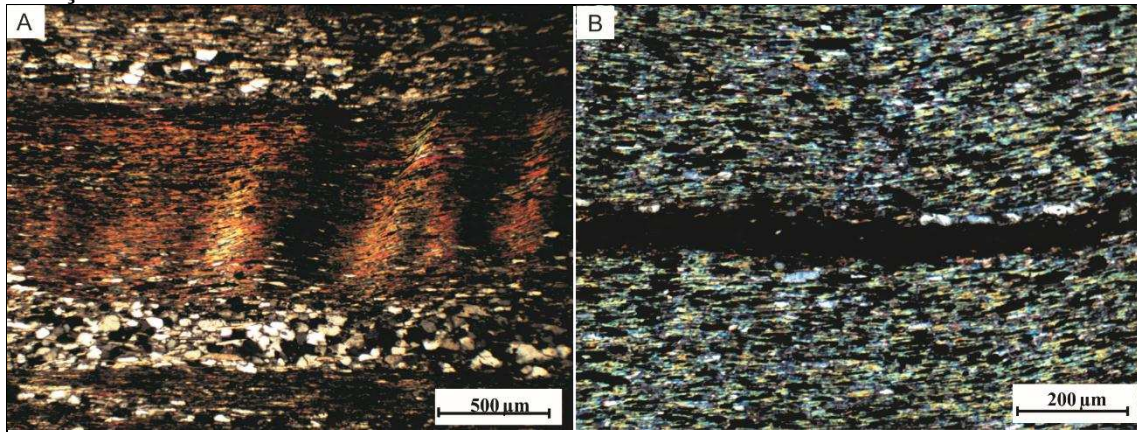
Fonte: Autor

Descrição de lâmina petrográfica

A rocha é formada pela alternância de bandas quartzosas e micáceas. Ocorrem ainda bandas ricas em opacos. A análise modal mostrou o predomínio de mica (54.7% de muscovita/sericita), seguida por quartzo (17%), opacos (15.8%), e secundariamente, óxidos de ferro (3%), argila (3%) e clorita (1%). Vazios e fraturas correspondem a 2.5% e 3%, respectivamente. O conjunto está crenulado. As micas possuem cor levemente esverdeadas com suas cores de interferência típicas, vivas. Os opacos e os quartzos estão estirados, acompanhando a foliação principal dada pelas micas. Há veios formados por quartzo e opacos que estão nitidamente se alterando. Os resíduos resultantes da alteração dos opacos se depositam em fraturas intragranulares, nas bordas e superfície dos grãos de quartzo. Há cloritas

muito pequenas, sendo de difícil identificação (com tamanho médio de 0,0125mm). Fraturas correspondem a planos de foliação abertos.

Figura 28 - Aspectos texturais e mineralógicos de filito W2/W3 em lâmina petrográfica. Em A observa-se alternância de bandas micáceas e quartzosas (A). Em B, fratura alterada paralela à foliação



Fonte: Autor

➤ Descrição macroscópica e de lâmina petrográfica da classe de intemperismo W3

Descrição macroscópica

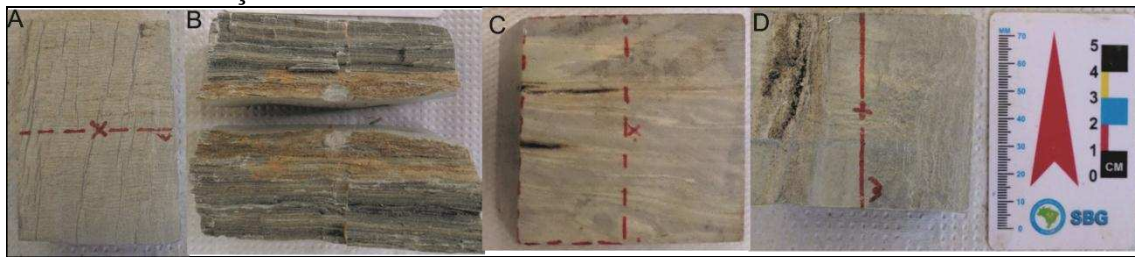
O filito classificado como W3 possui cor cinza claro (Figuras 29 e 30). Há manchas avermelhadas e marrom-acastanhadas ao longo das discontinuidades. Presença de fraturas com aberturas milimétricas e sinais de oxidação. Material inconsolidado de cor escura, de textura arenosa, preenchendo fraturas, resultante do intemperismo das bandas constituídas por opacos e clorita. Foi necessário mais de um golpe firme com martelo de geólogo para fraturar a matriz da rocha.

Figura 29 - Afloramento de filito W3 no perfil Fil02



Fonte: Autor

Figura 30 - Aspectos da matriz do filito W3. Em A, observa-se clivagem de crenulação. Em B, manchas marrom-acastanhadas. Em C e D, intemperismo de níveis constituídos por opacos e clorita com formação de material escuro de textura arenosa

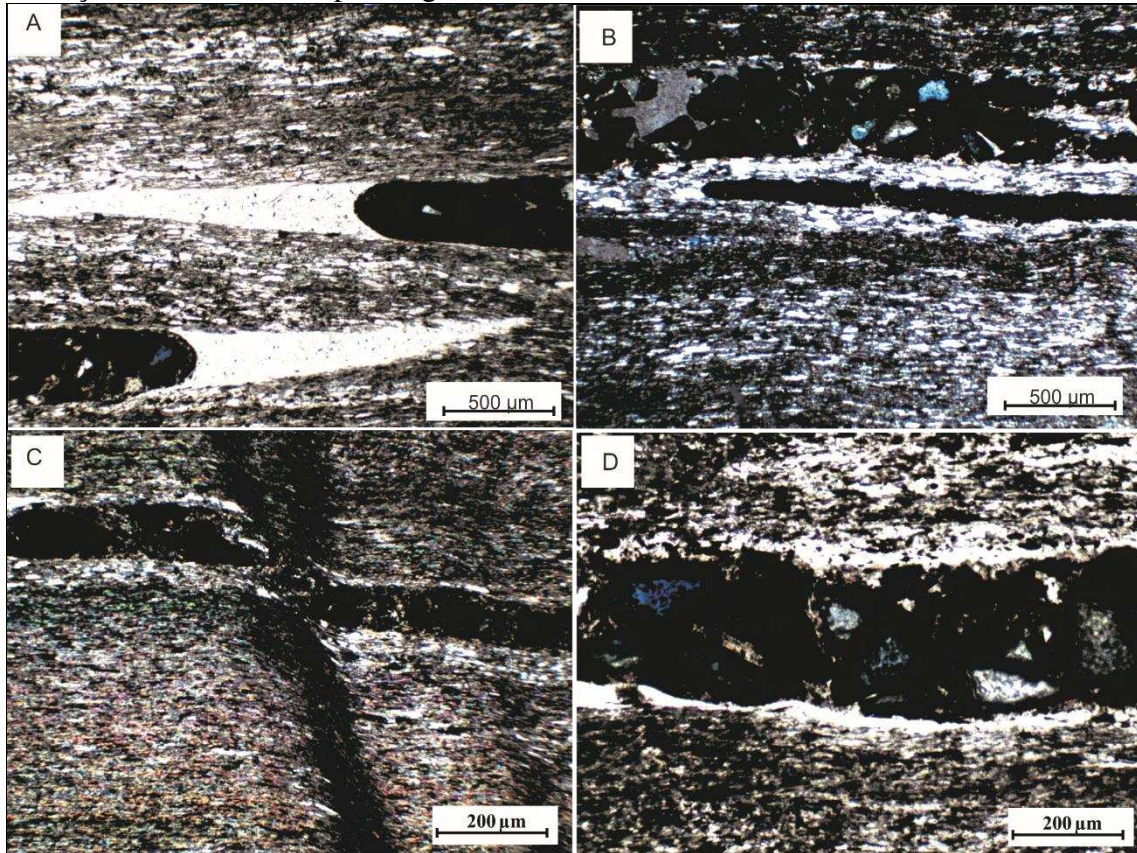


Fonte: Autor

Descrição de lâmina petrográfica

Intercalações de bandas enriquecidas em quartzo e bandas micáceas (Figura 31). A análise modal mostrou o predomínio de mica (46.4%), seguida por quartzo (16%), opacos (17.6%), óxidos de ferro (5.5%) e clorita (3.5%). Os vazios e fraturas correspondem a 2.5 %, cada um. O conjunto está crenulado. Quartzos e opacos estão estirados. Há veios paralelos a foliação constituídos por clorita e opacos. O produto da alteração de opacos produz manchas acastanhadas sobre os grãos e precipitação de óxido/hidróxido de Fe. As micas estão levemente esverdeadas e apresentam cores fortes de birrefringência. Alguns cristais de clorita e quartzo possuem fraturas intragranulares. Os cristais de clorita nos veios chegam a 0,25 mm, mas há cloritas de pequeno tamanho dispersas na matriz. Estes grãos apresentam-se levemente esverdeados ou incolores com cor de interferência verde fraco. São difíceis de serem contabilizadas pelo tamanho (chegam a 0,0125 mm) e estão obliteradas pelos resíduos dos opacos. Nos veios, as cloritas possuem cor azul, com cor de interferência também em azul, outras apresentam cor verde e birrefringência em verde. Algumas apresentam sinais de alteração dados pela presença de cores brancas em partes do cristal. Sobre muitas dessas cloritas ocorre também a deposição de material opaco.

Figura 31 - Aspectos texturais e mineralógicos de filito W3 em lâmina petrográfica. Em A, B C e D observa-se veios paralelos à foliação, constituídos por opacos e clorita. Em D é possível perceber a mudança de cor de cristais de clorita, que passam de azul para branco, refletindo a alteração destes minerais para argila



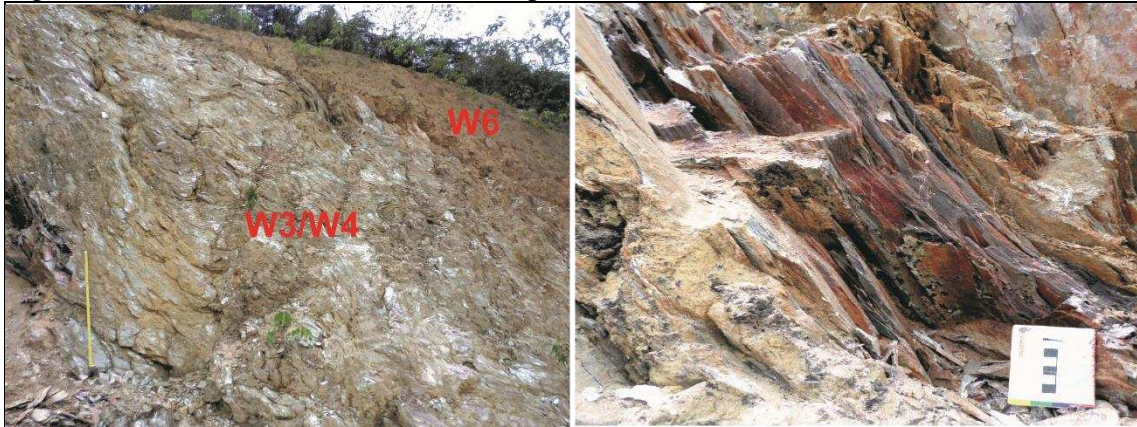
Fonte: Autor

➤ Descrição macroscópica e de lâmina petrográfica da classe de intemperismo W3/W4

Descrição macroscópica

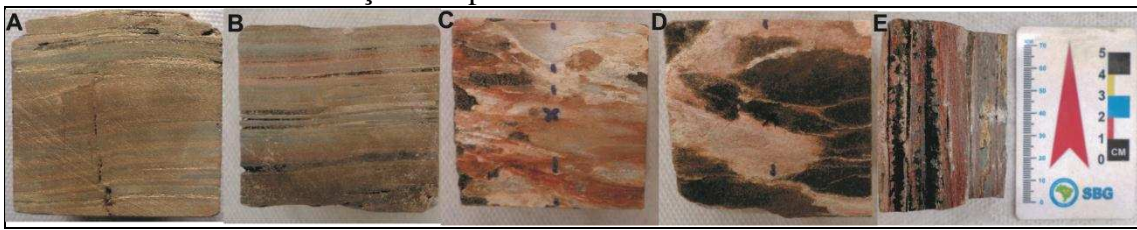
A matriz do filito classificado como W3/W4, está descolorida, apresentando tonalidades avermelhadas (Figuras 32 e 33). As fraturas possuem aberturas milimétricas a centimétricas. A presença de material inconsolidado preenchendo fraturas, resultante do intemperismo das bandas constituídas por opacos e clorita, são mais abrangentes em relação aos níveis menos alterados (W2, W2/W3 e W3). Foi necessário apenas um golpe firme com martelo de geólogo para fraturar a matriz da rocha.

Figura 32 - Afloramento de filito W3 no perfil Fil02



Fonte: Autor

Figura 33 - Aspectos da matriz do filito W3/W4. Em A observa-se família de fratura perpendicular à foliação. Em B, fraturas paralelas à foliação, preenchidas por material inconsolidado, resultante do intemperismo de opacos. Em C, D e E, cores avermelhadas e níveis escuros resultantes da alteração de opacos

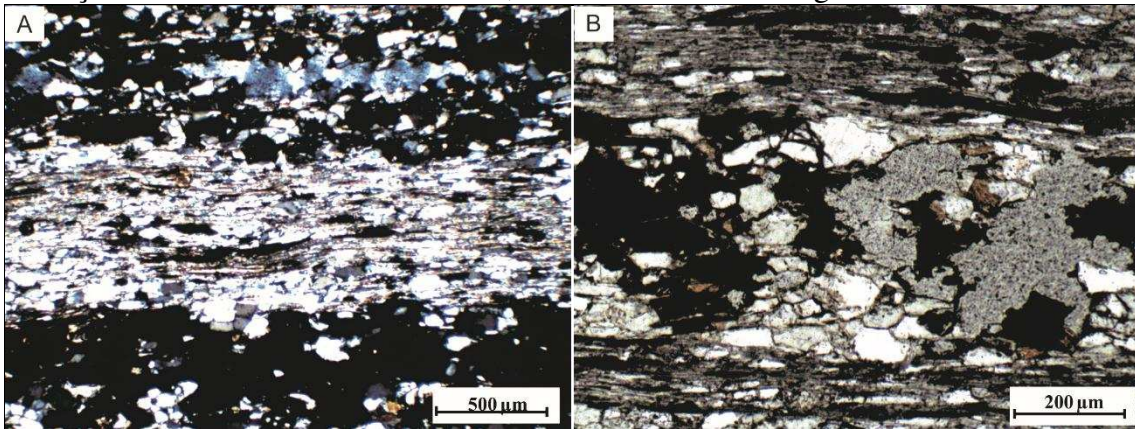


Fonte: Autor

Descrição de lâmina petrográfica

A análise modal mostrou a predominância de micas (34.2% de muscovita e sericita), seguida por quartzo (20%), opacos (12%), óxido de ferro (15%) e clorita (2.3%). Os vazios e fraturas representam 14% e 1.5%, respectivamente. As micas estão com suas cores de birrefringência típicas. Há intercalações de bandas quartzosas e micáceas. Opacos e quartzos estão estirados. O conjunto está crenulado. Os veios formados por clorita e opacos, típicos de W2 e W3, já praticamente não possuem cloritas. Nestes veios, os opacos estão bastante intemperizados. Há cloritas de tamanho muito pequeno (cerca de 0,01 mm), presentes na matriz, difíceis de serem contabilizadas. Como um todo, as cloritas azuis (presentes nos veios) são raras, sendo mais frequentes as verdes (encontradas na matriz). Ocorrem fraturas e intensa precipitação de óxido/hidróxido de Fe que se depositam nas bordas e superfícies dos grãos de quartzo e muscovita (Figura 34).

Figura 34 - Aspectos texturais e mineralógicos de filito W3/W4 em lâmina petrográfica. Em A e B observa-se a geração de vazios e opacos intensamente alterados, levando a uma intensa liberação de óxidos/hidróxidos de ferro, formando crostas ferruginosas



Fonte: Autor

Atuação do Intemperismo no perfil Fil02

De forma semelhante ao que ocorre com o perfil Fil01, há o aumento das discontinuidades paralelas à foliação com a intensidade do intemperismo, bem como de sua abertura. O intemperismo químico inicia-se com a alteração de minerais opacos que, a princípio, resulta em manchas avermelhadas e marrom-acastanhadas em discontinuidades. Com o avanço do intemperismo, os opacos são intensamente solubilizados, recristalizando-se como óxido/hidróxidos de ferro, chegando a formar crostas ferruginosas. A alteração sofrida pelas cloritas resulta em mudanças nas características óticas deste mineral, observadas em lâmina petrográfica, como a mudança de cor, passando progressivamente de azul ou verde intenso para branco, caracterizando sua transformação para argila.

5.3 Descrição do Perfil Fil03

O perfil Fil03 é formado a partir do intemperismo de um filito composto, principalmente, por quartzo, muscovita/sericita, minerais opacos, e secundariamente, clorita. Foram identificados o filito medianamente intemperizado (filito W3) ao filito completamente intemperizado (filito W5). Entretanto, são descritos os filitos W3 e W4, uma vez que o filito W5 não faz parte do escopo da pesquisa. A foliação é milimetricamente espaçada, penetrativa e frequentemente apresenta aberturas, podendo estar preenchida com material inconsolidado. Ocorrem duas famílias de fraturas principais, clivagem de crenulação e veios de quartzo. Em geral, a matriz rochosa apresenta tonalidades avermelhadas. No perfil há intercalações do filito com quartzo-filito. O filito W3 é descrito em três pontos distintos do perfil buscando compreender melhor os efeitos da ação intempérica, uma vez que o nível ocorre em partes diferentes da frente de alteração.

Figura 35 - Perfil Fil03 compartimentado segundo classes de intemperismo (ISRM 2007, 2015)



Fonte: Autor

➤ Descrição macroscópica e de lâmina petrográfica da classe de intemperismo W3 – Local 1

Descrição macroscópica

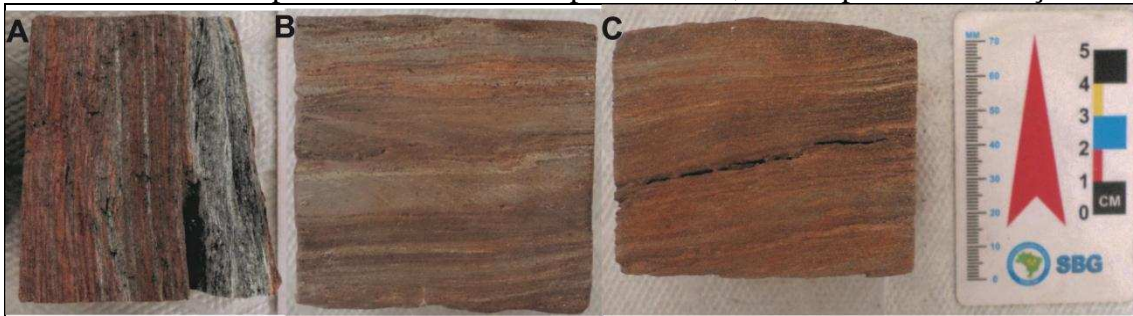
O filito classificado como W3 está totalmente descolorido, apresentando tons avermelhados (Figuras 36 e 37), resultante do intemperismo de minerais opacos. Ocorrem fraturas oblíquas e paralelas à foliação, com aberturas milimétricas a centimétricas, bem como veios de quartzo. A matriz é facilmente penetrada pelo golpe de martelo de geólogo.

Figura 36 - Afloramento de filito W3 no perfil Fil03



Fonte: Autor

Figura 37 - Aspectos da matriz do filito W3. Matriz da rocha em tons avermelhados (A, B e C), decorrentes do intemperismo dos minerais opacos. Em C, fratura paralela à foliação

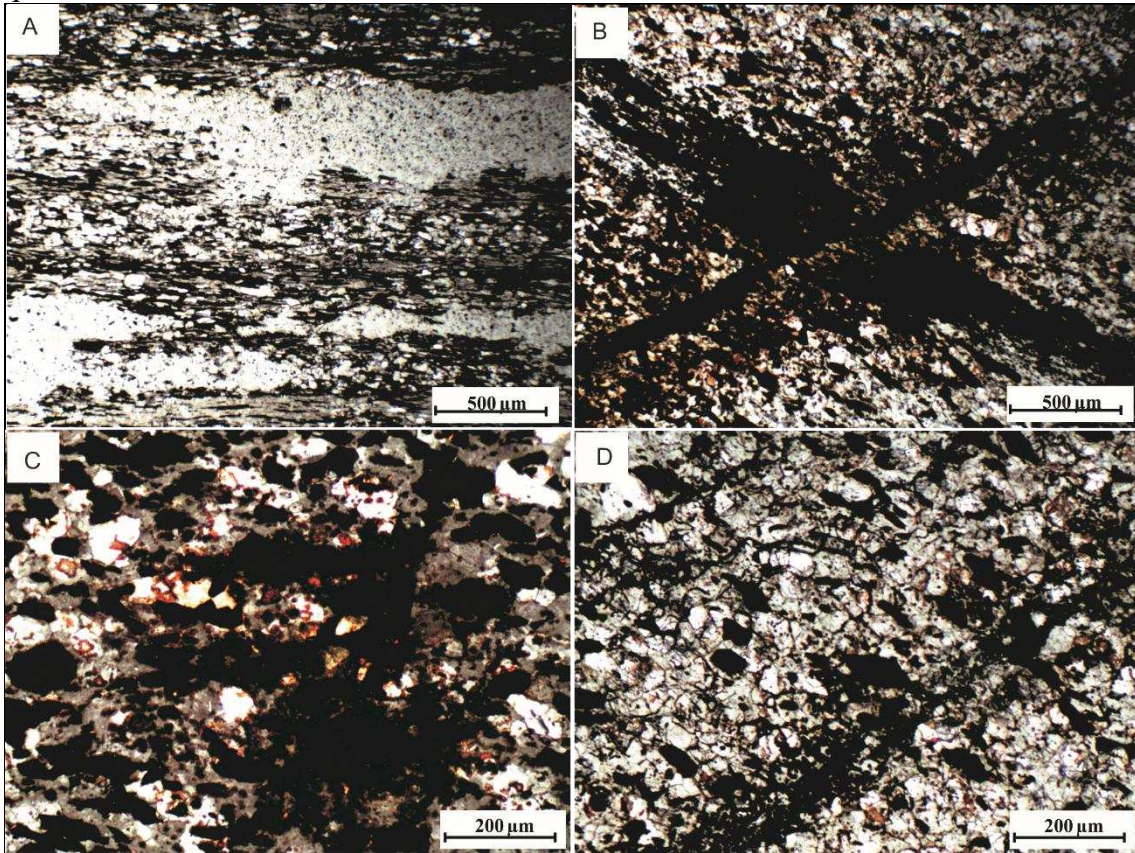


Fonte: Autor

Descrição de lâmina petrográfica

Bandas quartzosas intercalam-se com bandas micáceas. A análise modal mostrou o predomínio de quartzo (29.9%), seguido por muscovita/sericita (13%), opacos (18%), óxidos de ferro (18.5%), clorita (0.8%) e argila (0.8%). Vazios e fraturas correspondem a 12.5% e 6.5%, respectivamente. Os quartzos são anédricos a subédricos, com diâmetro médio de 0.1 mm. Os opacos estão estirados e ocorrem, principalmente, nas bandas micáceas. Há fraturas intragranulares, intergranulares e transgranulares. Há duas famílias principais de fraturas transgranulares que se interceptam entre si formando um “x” (ocorrendo também dentro de grãos de quartzo). Essas fraturas podem estar parcialmente preenchidas ou seladas por óxidos/hidróxidos de Fe. Óxidos/hidróxidos de ferro também se depositam em fraturas no interior de grãos de quartzo e nos interstícios dos cristais. Há conexões entre fraturas intra e intergranulares. A abertura das fraturas chegam a 0,8 mm. Há veios constituídos por cloritas azuis e opacos. Há também cloritas na matriz.

Figura 38 - Aspectos texturais e mineralógicos de filito W3 em lâmina petrográfica. Em A, fraturas paralelas à foliação sem preenchimento. Em B, fraturas transgranulares oxidadas. Em C e D precipitação de óxidos de ferro nos interstícios e em fraturas intragranulares de grãos de quartzo



Fonte: Autor

➤ Descrição macroscópica e de lâmina petrográfica da classe de intemperismo W3 – Local 2

Descrição macroscópica

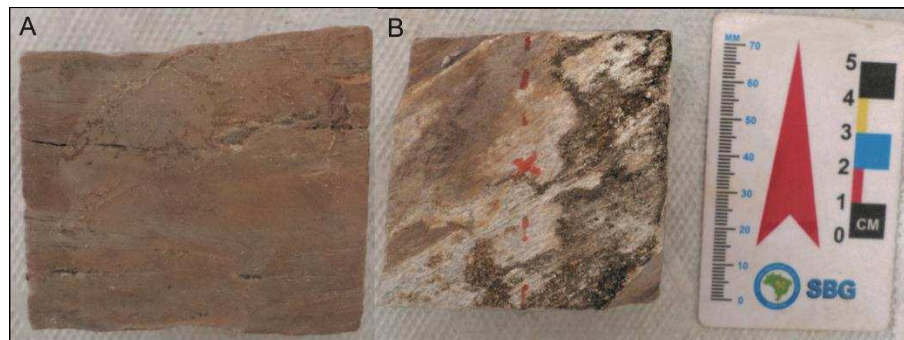
Nesse local o filito classificado como W3 está descolorido, apresentando tons avermelhados. Os planos de foliação possuem aberturas milimétricas a centimétricas, podendo estar preenchidos com material escuro de textura arenosa, resultante do intemperismo dos minerais opacos. A matriz é facilmente penetrada pelo golpe de martelo de geólogo.

Figura 39 - Afloramento de filito W3 no perfil Fil03



Fonte: Autor

Figura 40 - Aspectos da matriz do filito W3. Em A, matriz com tonalidade avermelhada e em B, formação de material escuro de textura arenosa, ambos resultantes do intemperismo dos opacos



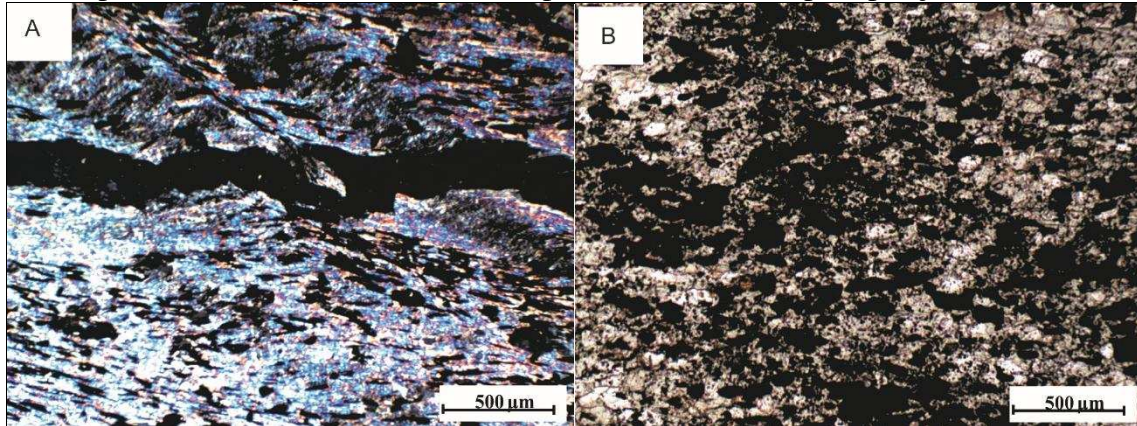
Fonte: Autor

Descrição de lâmina petrográfica

Apresenta tonalidades avermelhadas. A análise modal mostrou o predomínio de quartzo (43.4%), seguido por muscovita/sericita (14.4%), opacos (11%), óxidos de ferro (15%), cloritas (1.5%) e argilas (1.7%). Vazios correspondem a 13%. Os grãos de quartzo são anédricos a subédricos e podem estar estirados. As micas ora possuem suas cores típicas de interferência, ora cores acastanhadas e podem aparecer como ripas. Os opacos estão estirados e alterados, com consequente precipitação de óxidos e hidróxidos de Fe que depositam-se sobre os grãos de quartzo e muscovita, bem como nos interstícios destes cristais. Em trechos predominantemente micáceos há forte clivagem de crenulação. Ocorrem veios de quartzo, com cristais que chegam a 2.5 mm, e também veios com cloritas e opacos. As cloritas presentes em veios possuem cor azul escuro ou verde, com birrefringência, respectivamente, em azul e verde ou castanho. As cloritas da matriz são verde e algumas delas sob a luz polarizada ficam permanentemente

escuras, provavelmente, devido à deposição de óxidos. Há cloritas também que apresentam cor branca, transformando-se progressivamente em argila.

Figura 41 - Aspectos texturais e mineralógicos de filito W3 em lâmina petrográfica. Em A, fratura paralela à foliação. Em B, matriz apresentando intensa precipitação de óxidos



Fonte: Autor

➤ Descrição macroscópica e de lâmina petrográfica da classe de intemperismo W3 – Local 3

Descrição macroscópica

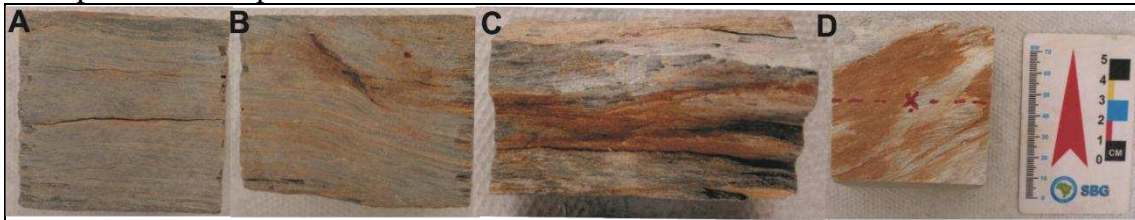
O terceiro nível de filito classificado como W3 está parcialmente descolorido, com manchas avermelhadas e alaranjadas, principalmente ao longo da foliação (Figuras 42 e 43). Ocorrem fraturas paralelas, perpendiculares e oblíquas à foliação. As fraturas podem possuir aberturas milimétricas a centimétricas. A matriz é facilmente penetrada pelo golpe de martelo de geólogo.

Figura 42 - Afloramento de filito W3 no perfil Fil03



Fonte: Autor

Figura 43 - Aspectos da matriz do filito W3. Fraturas e manchas avermelhadas resultantes do intemperismo dos opacos

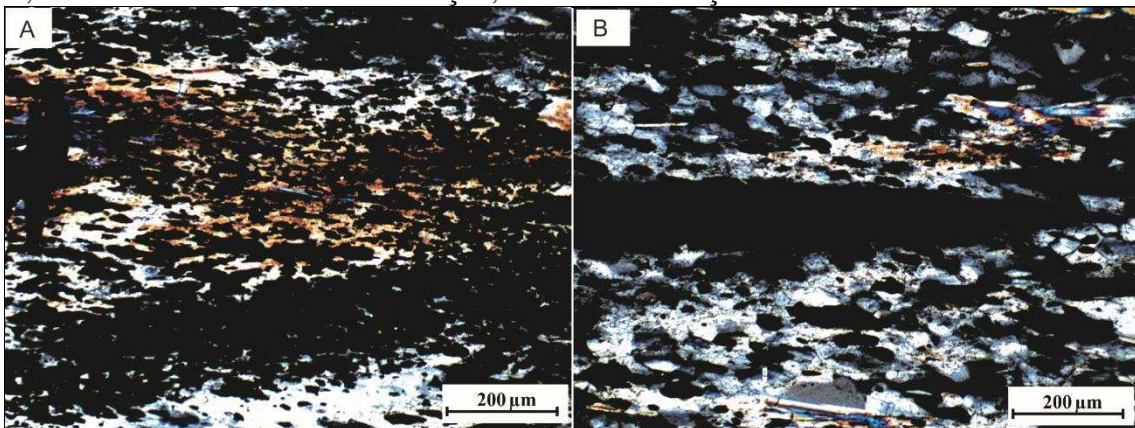


Fonte: Autor

Descrição de lâmina petrográfica

Há intercalações de bandas micáceas com bandas quartzosas. A análise modal mostrou o predomínio de muscovita/sericita (50.9%), seguida por quartzo (22.5%), opacos (13.1%), argila (7%), óxidos de ferro (3%) e clorita (1%). Vazios e fraturas correspondem a 2% e 0.5%, respectivamente (Figura 44). Os quartzos e opacos estão estirados. As micas são acinzentadas, ora apresentado suas cores típicas de interferência, ora cor acastanhada. Presença de *box spots* e clivagem de crenulação. Em veios constituídos por quartzos e opacos, estes praticamente já não existem, dando origem a uma massa opaca que se deposita sobre os grãos de quartzo. Na matriz, cristais de clorita estão brancos, alguns preservando ainda em seu centro a cor verde claro. Há também cloritas com pleocroísmo de incolor a verde e cor de interferência acastanhada. Nota-se que alguns cristais de clorita não apresentam cor de interferência uniforme: são acastanhados nas bordas e no centro do cristal são azuis (e somente nesta parte central há extinção). Há também cloritas com cor verde sem pleocroísmo e cor de interferência acinzentada.

Figura 44 - Aspectos texturais e mineralógicos de filito W3 em lâmina petrográfica. Em A e B, muscovitas com sinais de alteração, exibindo coloração acastanhada



Fonte: Autor

➤ Descrição macroscópica e de lâmina petrográfica da classe de intemperismo W4

Descrição macroscópica

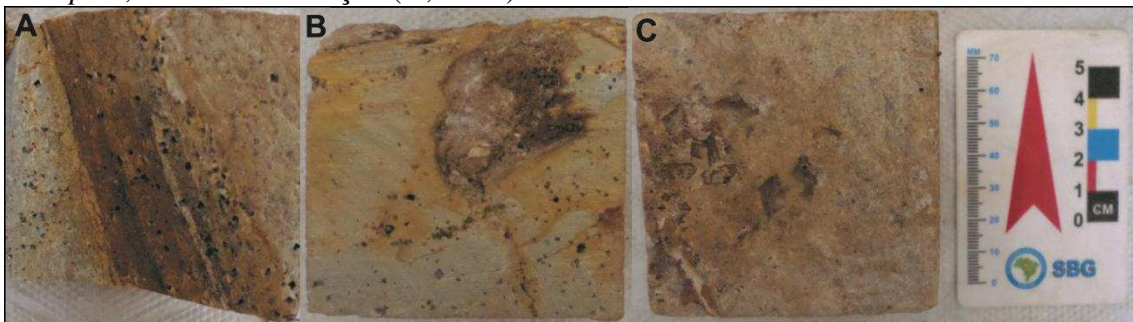
O filito classificado como W4 possui a matriz totalmente descolorida com tonalidades amareladas e avermelhadas. A matriz está parcialmente desintegrada a solo.

Figura 45 - Afloramento de filito W4 no perfil Fil03



Fonte: Autor

Figura 46 - Aspectos da matriz do filito W4. Núcleos rochosos do filito W4, em se observam *box spots*, fraturas e oxidação (A,B e C)



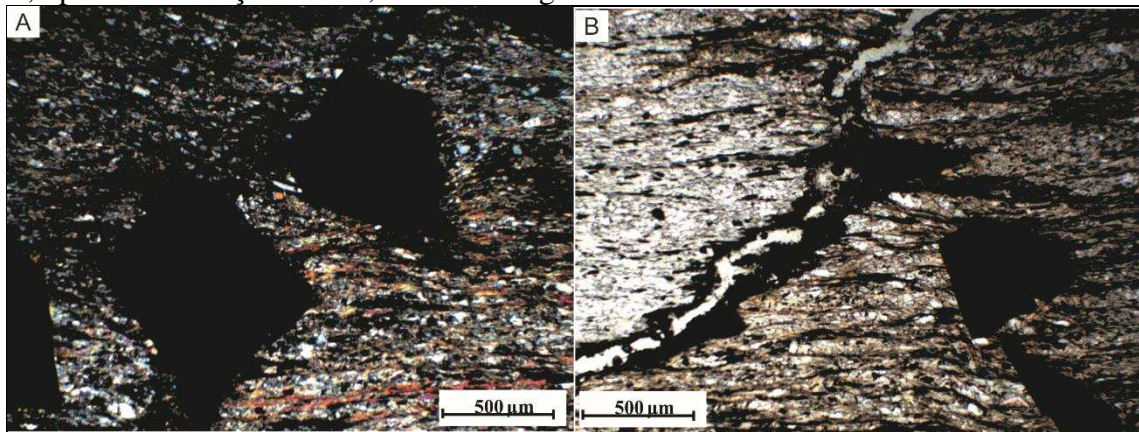
Fonte: Autor

Descrição lâmina petrográfica

Observa-se alternância de bandas quartzosas e micáceas. A análise modal mostrou o predomínio de muscovita/sericita (51.3%), seguida por quartzo (15%), opacos (15.7%), óxidos de ferro (9%), argilas (4.5%) e cloritas (1.5%). Vazios e fraturas correspondem a 2% e 1%, respectivamente. O conjunto está crenulado. Ocorrem grãos opacos de diferentes formas (retangular, triangular, losangular), os quais chegam a apresentar 1,38 mm de diâmetro. Os minerais opacos também ocorrem estirados e em veios. Nestes, devido à lixiviação, há formação de vazios. Presença de cloritas na matriz e precipitação de óxido/hidróxido de Fe. As cloritas

de cor verde já começam a perder sua cor, estando parcialmente brancas. A cor de interferência e a extinção não são uniformes no cristal. Cloritas acinzentadas, sem pleocroísmo, ficam completamente escuras ao se cruzar os nicóis. Estas cloritas acinzentadas parecem estar totalmente alteradas. Há fraturas em cujas bordas depositam-se óxidos resultantes da alteração dos opacos, que possuem abertura média de 0,1 mm.

Figura 47 - Aspectos texturais e mineralógicos de filito W4 em lâmina petrográfica. Em A e B, opacos e oxidação. Em B, fratura transgranular oxidada



Fonte: Autor

REFERÊNCIAS

- ABAD, S.; Tugrul, A.; Gokceoglu, C.; JAHED ARMAGHANI, D. Characteristics of weathering zones of granitic rocks in Malaysia for geotechnical engineering design. **Engineering Geology**, v. 200, p. 94–103. 2016.
- Alkmim, F.F; Marshak, S. Tranzamazonian Orogeny in the southern São Francisco Craton region, Minas Gerais, Brazil: evidence for Paleoproterozoic collision and collapse in the Quadrilátero Ferrífero. **Precambrian Research**, v. 90, p. 29-58. 1998.
- Andrade P.S; Saraiva, A.A. Physical and mechanical characterization of phyllites and metagreywackes in central Portugal. **Bull Eng Geol Env**, v.69, p. 207–214. 2010.
- Anon. The logging of rock cores for engineering purposes. **Q. Jl. Engng. Geol.**, v. 3, p. 1-24. 1970.
- Anon. The preparation of maps and plans in terms of engineering geology. **Q. Jl. Engng. Geol.**, v. 5, p. 295-382. 1972.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 12766**: rochas para revestimento - determinação da massa específica aparente, porosidade aparente e absorção d'água aparente. Rio de Janeiro: ABNT, 1992.
- BARROSO, E.V. **Estudo das características geológicas e comportamento geotécnico de um perfil de intemperismo de leptinito**. 1993. Dissertação – Departamento de Geologia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 1993.

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: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON SLOPE STABILITY IN OPEN PIT MINING AND CIVIL ENGINEERING*, 2015, Cape Town. **Anais...** Cape Town: Slope Stability, 2015.

DA SILVA, W.G; FRANÇA, A.V.M.; SAMPAIO, J.L.D. **Folha Mariana, SF.23-X-B-I-3 e SF.23-X-B-IV-1, escala 1:50.000: projeto geologia do Quadrilátero Ferrífero - integração e correção cartográfica em SIG/ editores**. Belo Horizonte: CODEMIG, 2005. Escala 1:50.000.

DEARMAN, W.R. Weathering classification in the characterization of rock for engineering purposes in British practice. **Bull. Int. Assoc. Eng. Geol.**, v. 9, p. 33–42. 1974.

DEARMAN, W.R. Weathering classification in the characterization of rock: a revision. **Bull. Int. Assoc. Eng. Geol.**, v. 13, p. 123–127. 1976.

DOBEREINER, L. Construction problems related to excavation on soft rocks. Proceedings 12th Int. Cong. Soil Mech. Found. Eng., General Report. ISSMFE, Rio de Janeiro, p. 4. 1989.
DOBEREINER L.; DURVILLE, J.L; RESTITUITO, J. Weathering of the massiac gneiss (Massif Central, France). **Bull Int Assoc Eng Geol**, v. 47, p. 79–96. 1993.

GUPTA, A.S; RAO, K.S. Index properties of weathered rocks: interrelationships and applicability. **Bul Eng Geol Env**, v. 57, p. 161-172. 1998.

DORR, J.N. Physiographic, stratigraphic and structural development of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil. **US Geol Surv**: 641 – A. 1969.

FOOKES, P.G; DEARMAN, W.R; FRANKLIN, J.A. Some engineering aspects of rock weathering with field examples from Dartmoor and elsewhere. **Q J Eng Geol**, v. 4, p.139-185. 1971.

HOEK, E.; GUEVARA, R. Overcoming squeezing in the Yacambu - Quibor Tunnel, Venezuela. **Rock Mech Rock Eng**, v. 42, p. 389–418. 2009.

INTERNATIONAL SOCIETY ON ROCK MECHANICS. **ISRM**: the complete ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring: 1974–2006. ISRM, 2007.

INTERNATIONAL SOCIETY ON ROCK MECHANICS. **ISRM**: the IRSM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring: 2007–2014. Springer, Cham, 2015.

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*, 2013. **Anais...** Perth, Wa, 2013. P. 12–14.

JUNIOR SERRA, E.; OJIMA, L.M. Caracterização e classificação de maciços rochosos. *In: OLIVEIRA, M.A.S; BRITO, S.N.A. (org.). Geologia de Engenharia*. São Paulo: ABGE, 1998, p. 211 – 226.

KOITA, M.; JOURDE, H.; KOFFI, K.J.P; DA SILVEIRA, K.S.; BIAOU, A. Characterization of weathering profile in granites and volcanosedimentary rocks in West Africa under humid tropical climate conditions. Case of the Dimbokro Catchment (Ivory Coast). **J. Earth Syst. Sci.**, v. 122, n. 3, p. 841–854. 2013.

LAN, H.X; HU, R.L.; YUE, Z.Q.; LEE, C.F.; WANG, S.J. Engineering and geological characteristics of granite weathering profiles in South China. **J Asian Earth Sci**, v. 21, n.4, p. 353–364. 2003.

LANA, M.S. Numerical modeling of failure mechanisms in phyllite mine slopes in Brazil. **Int J Min Sci Technol**, v. 24, p. 777–782. 2014.

LEÃO, M.F; BARROSO, E.V. 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, 2013. **Anais...**São Paulo: ABGE, 2013. p. 52-52.

LEÃO M.F.; BARROSO, E.V.; POLIVANOVI, H.; MARQUES, E.A.G.; VARGAS JR, E.A. Weathering of metapelites from the Quadrilátero Ferrífero mineral province, southeastern Brazil. **Bull Eng Geol Env**. 2017.

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

MARQUES, E.A.G.; WILLIAMS, D.J. Weathering profiles of Bunya phyllite in southeast Brisbane—a geotechnical approach. *In*: ANZ 2015—12TH AUSTRALIA NEW ZEALAND CONFERENCE ON GEOMECHANICS, 2015. Proceedings. Wellington (NZ): New Zealand Geotechnical Society Inc, 2015. p. 1–8.

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, 2016. **Anais...** Porto: Sociedade Portuguesa de Geotecnia, 2016.

MARQUES, E.A.G.; WILLIAMS, D.J.; ASSIS, I.R.; LEÃO, M.F. Effects of weathering on characteristics of rocks in a subtropical climate: weathering morphology, in situ, laboratory and mineralogical characterization. **Environ Earth Sci.**, v. 76. 2017.

MOYE, D.G. Engineering Geology for the Snowy Mountains Scheme. **J1. Inst. Eng. Australia**, v. 27, p. 281-99. 1955.

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. **Eng Geol**, v. 181, p. 297–308. 2014.

PINHEIRO, A.L.; LANA, M.S.; SOBREIRA, F.G. Use of the distinct element method to study flexural toppling at the Pico Mine, Brazil. **Bull Eng Geol Env**, v. 74, p.1177–1186. 2015.

PRICE, D.G. Weathering and weathering processes. **Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology**, v. 28, p. 243 – 252. 1995.

- RADAMBRASIL. **Folhas SF 23/24 Rio de Janeiro/Vitória, geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação e uso potencial da terra.** Rio de Janeiro, 1983 v. 32. 780p.
- RENGER, F.E.; NOCE, C.M.; ROMANO, A.W.; MACHADO, N. Evolução sedimentar do Supergrupo Minas: 500 Ma de registro geológico no Quadrilátero Ferrífero, MG. **Geonomos**, v. 2, n. 1, p. 1-11. 1994.
- ROMANO, A.W.; REZENDE, L.F.S.; MACEDO, B.O.P. **Folha Ouro Preto, SF.23-X-A-III, escala 1:100.000: projeto Triângulo Mineiro.** Belo Horizonte: CODEMIG, 2017. Escala 1:100.000.
- RUXTON, B.P.; BERRY, L. Weathering of granite and associated erosional features in Hong Kong. **Bull. Geol. Assoc. Amer.**, v. 68, p. 1263–1292. 1957.
- 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. **Tunn Undergr Space Technol**, v. 23, p. 638–650. 2008.
- SILVA, C.H.C.; LANA, M.S. Influence of slake durability on geotechnical behavior of phyllites of Pau Branco Mine. **Rev Esc Minas**, v. 65, p. 413–418. 2012.
- TATING, F.; HACK, R.; JETTEN, V. Engineering aspects and time effects of rapid deterioration of sandstone in the tropical environment of Sabah, Malaysia. **Engineering Geology**, v. 159, p. 20–30. 2013.
- VARAJÃO, C.A.C.H.; SALGADO, A.A.R.; VARAJÃO, A.F.D.C.H.; BRAUCHER, R.; COLIN, F.; NALINI JR., H.A. Estudo da evolução da paisagem do Quadrilátero Ferrífero (Minas Gerais, Brasil) por meio da mensuração das taxas de erosão (10be) e da pedogênese(1). **R. Bras. Ci. Solo**, v. 33, p.1409-1425. 2009.

CAPÍTULO 6

Artigo submetido:

Caracterização morfológica, mineralógica e geotécnica de perfis de intemperismo de filito em clima tropical

Caracterização morfológica, mineralógica e geotécnica de perfis de intemperismo de filito em clima tropical

Resumo: Rochas de baixo grau metamórfico, devido à textura fina, apresentam limitação em relação à avaliação dos efeitos do intemperismo sobre as características macroscópicas da matriz, em função do reduzido tamanho dos grãos minerais. Além disso, o caráter anisotrópico e a elevada alterabilidade impõem dificuldades na preparação de amostras para realização de ensaios comumente utilizados na aquisição de parâmetros físicos e mecânicos para fins geotécnicos. Este artigo apresenta os resultados do estudo realizado sobre os efeitos do intemperismo sobre a morfologia de perfis típicos e sobre as características texturais, mineralógicas, e as propriedades físicas e mecânicas da matriz rochosa em filitos e seus materiais de intemperismo, desenvolvidos em clima tropical. Os autores selecionaram três taludes, em cortes de estrada, e em cada um deles diferenciaram materiais geológicos de acordo com o estado de alteração. Amostras foram coletadas para descrição em lâmina petrográfica, obtenção de propriedades-índices e mecânicas, usando o teste de carga pontual. Em campo foram realizadas descrições detalhadas e estimada a resistência *in situ* com martelo de Schmidt. Os resultados mostraram que as estruturas geológicas exercem forte influência, controlando a morfologia dos perfis estudados. O processo de intemperismo não foi uniforme nas rochas quando estas atingiram grau de degradação mais avançado. Entretanto, os parâmetros físicos associados à mineralogia revelaram ser úteis na previsão dos estágios iniciais de alteração dos filitos. O aumento de óxidos e da porosidade mostraram estar ligados às principais variações no comportamento das características físicas e mecânicas, principalmente a partir do filito medianamente intemperizado (W3). Após este estágio, os materiais transicionais apresentaram um comportamento algo errático em relação às propriedades físicas e mecânicas. O aumento da porosidade foi a principal característica relacionada à diminuição da resistência dos filitos estudados.

Palavras-chave: Perfil de intemperismo. Caracterização mineralógica. Caracterização física. Rocha de baixo grau metamórfico.

1. Introdução

Rochas de baixo grau metamórfico são conhecidas pela sua reduzida resistência mecânica e também por sua alterabilidade comumente elevada. Além disso, 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 dos materiais com características de rocha, em 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 (Ruxton e Berry, 1957; Irfan e Dearman 1978; Papadopoulos e Marinos, 1992 Tuğrul

e Gürpınar, 1997; Gupta e Rao, 2001; Moon e Jayawardane, 2004; Arel e Önalp, 2004; Andrade e Saraiva, 2010; Basu et al., 2012; Borrelli et al., 2014; Moemi et al., 2015).

Em países de clima subtropical e tropical, como o Brasil, podem ser mencionados trabalhos acerca de perfis de intemperismo, como de Barroso, 1993 (leptinito no Brasil); Gupta e Rao, 1998 (granitos, basaltos e quartzitos indianos); Lan et al., 2003 (granitos do sul da China); Marques et al., 2010 (gnaiesses do Brasil); Koita et al., 2013 (rochas graníticas e vulcanossedimentares da África Ocidental); Leão e Barroso, 2013 (xistos e mármore da República Dominicana); Tating et al., 2013 (arenitos da Malásia); Costa et al., 2015 (formações ferríferas bandadas do Brasil); Alavi Nezhad Khalil Abad et al., 2016 (rochas graníticas da Malásia); Marques e Williams, 2015 (filitos de Queensland, Austrália); Marques et al., 2016 (basaltos de Queensland, Austrália) e Leão et al., 2017 (filitos do Quadrilátero Ferrífero, Brasil).

Apesar dos esforços dos pesquisadores em diversos locais do mundo, ainda há muito que se avançar na definição de perfis de intemperismo típicos em diferentes tipos de rocha sob condições tropicais (Abad et al., 2015). Além disso, são escassos os trabalhos acerca do comportamento geológico-geotécnico de perfis de alteração oriundos de rochas de baixo grau metamórfico em clima tropical, podendo-se citar Jeffcoate et al., 2013; Fietze et al., 2013 e Leão et al., 2017). Alguns estudos associados à esse tipo de rocha estão relacionados à estabilidade de obras civis, geralmente conduzidos para solucionar casos específicos (Shrestha e Broch, 2008; Hoek e Guevara, 2009; He e Wang, 2013; Panda et al., 2014). Soma-se a esses fatores um grande número de proposições e terminologias que dificultam 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).

No Quadrilátero Ferrífero, sudeste do Brasil, a conjugação de rochas de baixo grau metamórfico com o clima tropical resulta em frequentes problemas de instabilidade de taludes de mineração e rodoviários associados com filitos e xistos, principalmente (Silva e Lana, 2012; Lana, 2014 e Pinheiro et al., 2015). Apesar da expressiva produção de minério de ferro na região, pouco se conhece das propriedades geotécnicas dos materiais que compõem as frentes de intemperismos associadas à esses litotipos (Leão et al., 2017).

Neste artigo, é apresentado o estudo de três frentes/perfis de intemperismo de filitos, localizados no Quadrilátero Ferrífero, Brasil. Apresenta-se a morfologia das frentes de intemperismo, com destaque para as características da matriz e discontinuidades existentes no maciço rochoso. Complementarmente, realizou-se a caracterização micropetrográfica e

determinação de índices físicos, bem como a obtenção da resistência à compressão da matriz rochosa, por meio de esclerometria (com o martelo de Schmidt) e ensaios de compressão puntiforme. Ao final, são apresentadas correlações entre as propriedades físicas e mecânicas, de forma a demonstrar mais claramente a influência e evolução do intemperismo sobre as mesmas.

2. Geologia

Os perfis de intemperismo objeto do estudo estão expostos em taludes de corte localizados ao longo da rodovia BR-356 que liga as cidades históricas de Mariana e Ouro Preto, no estado de Minas Gerais - Brasil. Estas cidades situam-se na região conhecida como Quadrilátero Ferrífero, importante província mineral do Brasil, de onde são extraídos, dentre outros minérios, ferro e ouro.

O Quadrilátero Ferrífero é considerado estruturalmente complexo, constituindo-se de cinco principais unidades litoestratigráficas (Alkmim & Marshak, 1998): embasamento cristalino, complexos metamórficos de idade arqueana; Supergrupo Rio das Velhas, constituído por sequência vulcano-sedimentar arqueana (*greenstone belt*); Supergrupo Minas, formado por sedimentos proterozóicos, metamorfisados e dobrados; intrusões pós-Minas; e Grupo Itacolomi, composto por metassedimentos clásticos proterozóicos. Os taludes rodoviários que são alvo de investigação do presente trabalho, foram implantados em filitos da Formação Fecho do Funil, pertencente ao Supergrupo Minas (Figura 1.1).

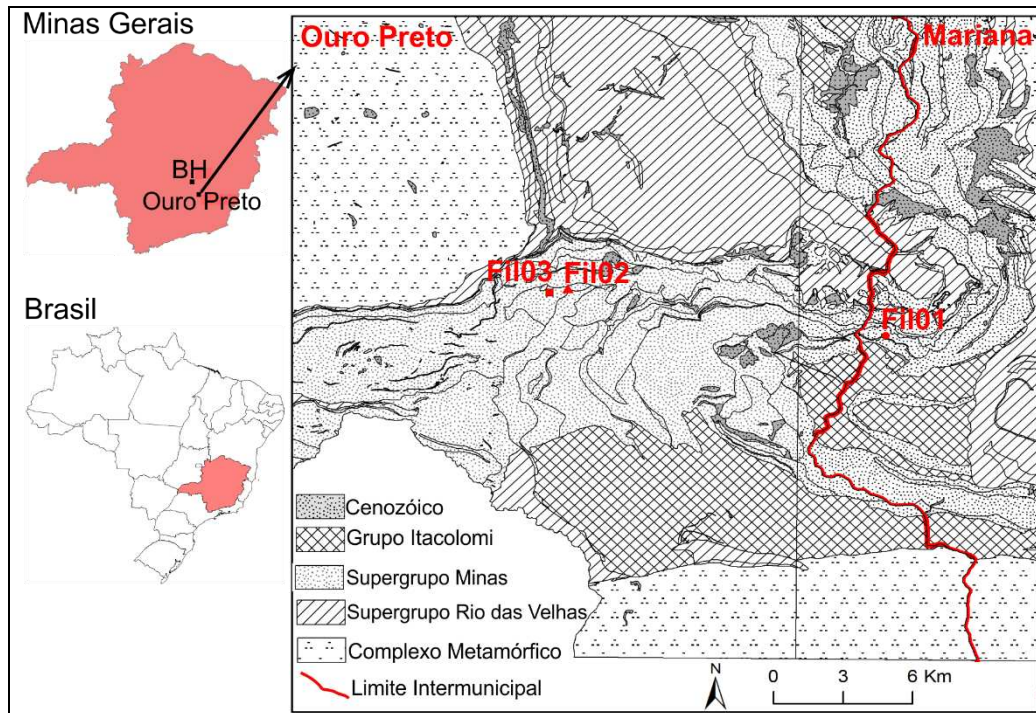


Figura 1.1 - Mapa geológico (adaptado de da Silva et.al, 2005; Romano et. al, 2017) com a localização dos perfis de intemperismo estudados, situados nos municípios contíguos de Mariana (Fil01) e Ouro Preto (Fil02 e Fil03). Ouro Preto está localizada a, aproximadamente, 100 km da capital do estado de Minas Gerais (Belo Horizonte - BH), Brasil

3. Métodos

Diferentes estágios de alteração foram definidos em cada perfil a partir da classificação proposta pela Sociedade Internacional de Mecânica das Rochas - ISRM (2015). Foi executada a descrição macroscópica da rocha intacta (matriz rochosa, mineralogia, cor e indícios de alteração) e do maciço rochoso em si, pela identificação de estruturas geológicas e discontinuidades e suas características de interesse (espaçamento, abertura, persistência e alteração), bem como testes expeditos para averiguação da resistência da rocha, através do golpe de martelo de geólogo e pressão dos dedos. Cabe ressaltar que as descrições macroscópicas e a coleta de amostras contemplaram a rocha sã a pouco alterada (W1/W2) até a rocha muito alterada (W4). Os materiais pertencentes aos níveis W5 e W6 da classificação da ISRM foram apenas identificados nas frentes de intemperismo, mas não fazem parte do escopo do presente estudo.

Amostras dos diferentes graus de alteração de filitos foram obtidas dos perfis para realização de ensaios de laboratório e caracterização micropetrográfica.

A análise micropetrográfica contemplou as características texturais, microestruturais e a avaliação dos efeitos do intemperismo sobre as mesmas. Foram confeccionadas um total de vinte e quatro lâminas petrográficas, doze perpendiculares e doze paralelas à foliação, sendo

duas para cada classe de alteração das três frentes estudadas. No caso do perfil Fil03, foram analisadas seis lâminas petrográficas para a classe W3 (três perpendiculares e três paralelas a foliação) em pontos distintos do perfil, buscando compreender melhor os efeitos da ação intempérica, uma vez que o nível ocorre em partes diferentes da frente de alteração.

As propriedades físicas foram avaliadas a partir da massa específica seca e saturada, porosidade aparente e capacidade de absorção de água aparente. Os testes foram feitos de acordo com a ISRM (2007), com exceção das classes W3 e W4 do perfil Fil01. Estes filitos desagregaram facilmente ao serem submetidos à saturação à vácuo, pelo que os autores realizaram uma saturação gradacional, conforme a norma brasileira (ABNT, NBR 12766), da seguinte forma: adicionou-se água até 1/3 da altura dos corpos-de-prova. Após 4 h, 2/3 da altura dos corpos-de-prova foram submergidos. Por um período de mais 4h, completou-se a submersão, deixando-se perfazer o tempo de 24 h.

A resistência da rocha à compressão foi estimada *in situ* usando-se o martelo de Schmidt, tipo L, digital, aplicado na direção perpendicular à foliação metamórfica. O martelo de Schmidt registra um valor adimensional (*R*), que consiste no rebote resultante do impacto do aparelho sobre a superfície da rocha. O valor de *R* aumenta conforme a dureza do material. A resistência à compressão puntiforme foi obtida em laboratório a partir de amostras irregulares (aproximadamente cúbicas) de todos os graus de alteração para os três perfis de intemperismo, na direção paralela e perpendicular à foliação (ISRM, 2007), tendo sido também determinado o índice de anisotropia.

4. Resultados e discussão

4.1 Características dos perfis de intemperismo

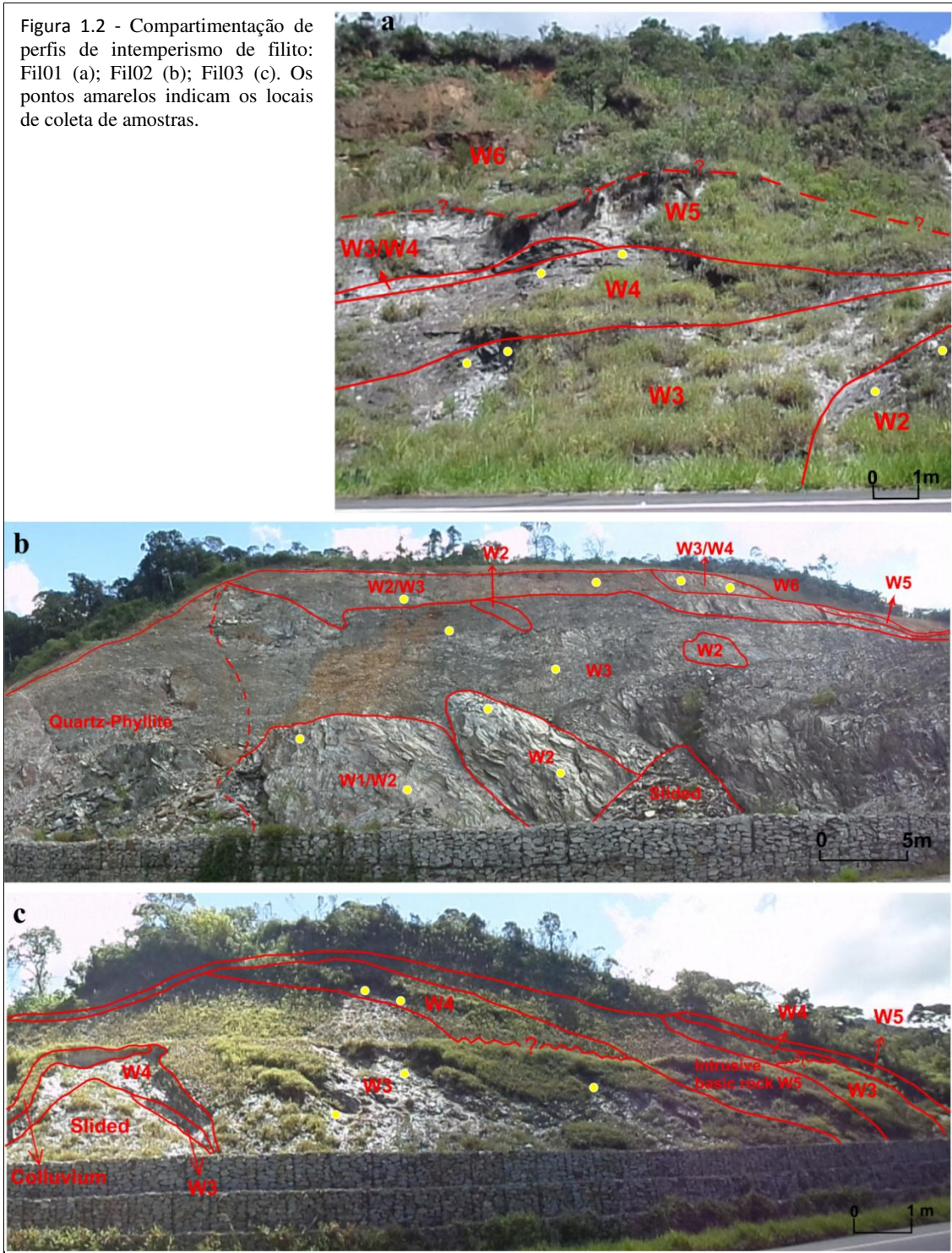
A descrição mineralógica, textural e estrutural *in situ* dos perfis possibilitaram a distinção de diferentes graus de intemperismo de filitos (ISRM, 2015). O golpe com martelo de geólogo foi utilizado na avaliação da resistência da matriz para a distinção das classes de alteração. Desta forma, foi possível definir as seguintes classes de intemperismo: (i) pouco intemperizada (W1/W2, W2 e W2/W3), sendo necessário mais de um golpe firme com martelo de geólogo para fraturar a rocha, (ii) medianamente intemperizada (W3 e W3/W4), sendo necessário um único golpe firme para fraturá-la, e (iii) muito intemperizada (W4), em que a matriz da rocha se desagregava com o golpe do martelo.

Na Figura 1.2, são apresentados os três perfis objeto do estudo. Com base na observação em campo, nota-se que o contato solo-rocha é abrupto, bem como entre as classes de materiais

rochosos, havendo interdigitações entre as mesmas. Esta disposição morfológica das classes de alteração é controlada por condicionantes estruturais, em especial: foliação metamórfica, clivagem de crenulação e dobras. Macroscopicamente, ocorre diminuição do espaçamento, aumento da persistência e abertura de fraturas nos filitos mais intemperizados. As fraturas tendem a se desenvolver principalmente paralelas aos planos de foliação, favorecendo a formação de lascas com nítida separação do maciço.

A clivagem de crenulação foi observada em filitos menos intemperizados (Figura 1.3), gerando desprendimentos de massas rochosas perpendiculares à foliação. As fraturas mostraram ser os principais direcionadores do fluxo de água, especialmente àquelas paralelas à foliação metamórfica, controlando a morfologia dos perfis. O contato abrupto entre zonas com diferentes graus de intemperismo em perfis de rochas metamórficas é também relatado em estudos prévios (Dobereiner et al., 1993; Barroso, 1993; Marques e Williams, 2015; Leão et al., 2017). O aumento das fraturas paralelas à foliação foi interpretado como uma resposta ao alívio de pressão resultante da erosão e do soerguimento tectônico (Fookes et al., 1971), frequentemente encontrado em superfícies expostas ao intemperismo em maciços rochosos metamórficos.

Figura 1.2 - Compartimentação de perfis de intemperismo de filito: Fil01 (a); Fil02 (b); Fil03 (c). Os pontos amarelos indicam os locais de coleta de amostras.



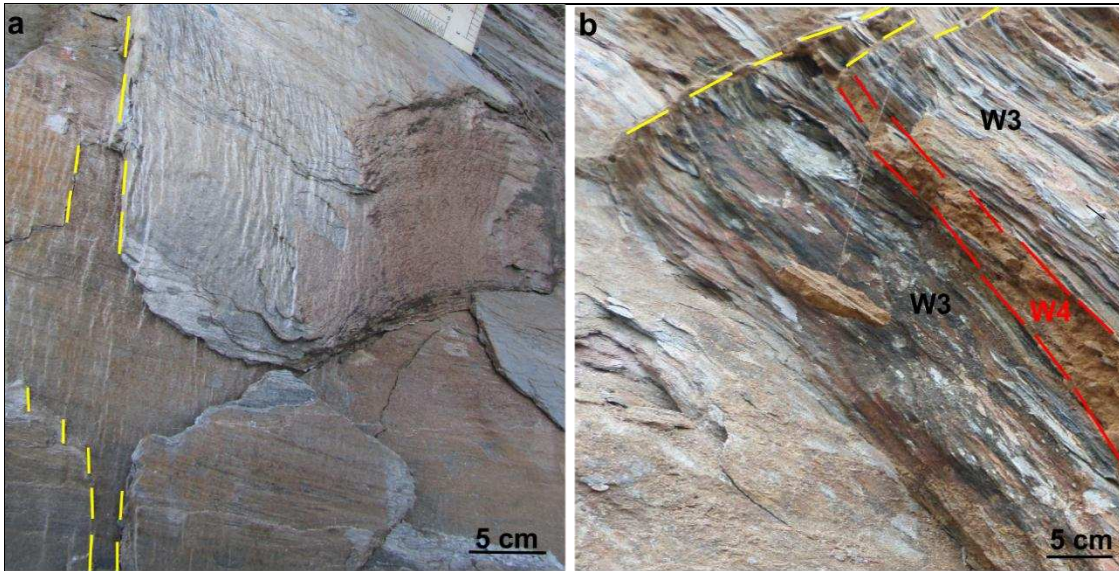


Figura 1.3 - As rupturas perpendiculares à foliação, na direção dada pela clivagem de crenulação, destacadas em amarelo (a e b) e as aberturas paralelas à foliação, em vermelho, criam caminhos preferenciais para a ação do intemperismo químico. Particularmente as aberturas paralelas propiciam contato brusco entre materiais com graus de intemperismo distintos(b), enquanto a clivagem de crenulação controla a direção de ruptura do maciço

Os perfis Fil02 e Fil03 apresentam, além dessas, algumas características particulares. No perfil Fil02, os contatos entre os diversos níveis de alteração do maciço apresentam, além do controle estrutural citado anteriormente, um controle geomorfológico. É possível notar na Figura 2b que há um abaulamento dos limites entre as classes que é aproximadamente paralelo ao perfil do terreno. Esta característica pode ser observada para todos os contatos entre classes distintas. No perfil Fil03, a existência desses dois controles, estrutural e geomorfológico, também é observada, contudo o controle geomorfológico restringe-se ao contato W4 – W5. Além disso, a presença de uma rocha intrusiva na porção direita (NE) do corte, paralela à foliação, também compõem um aspecto distinto em relação a este perfil.

Conforme o aumento do grau de alteração, notou-se um aumento nas concentrações de óxidos entre as discontinuidades, preferencialmente naquelas paralelas à foliação, bem como na própria matriz da rocha, em todos os perfis. Embora o filito seja uma rocha de granulação fina, a mudança de cor e brilho de alguns minerais serviram como critérios para determinar macroscopicamente a evolução intempérica. Isto foi possível devido a presença de veios formados por minerais opacos e cloritas, como mostra a Figura 1.4.

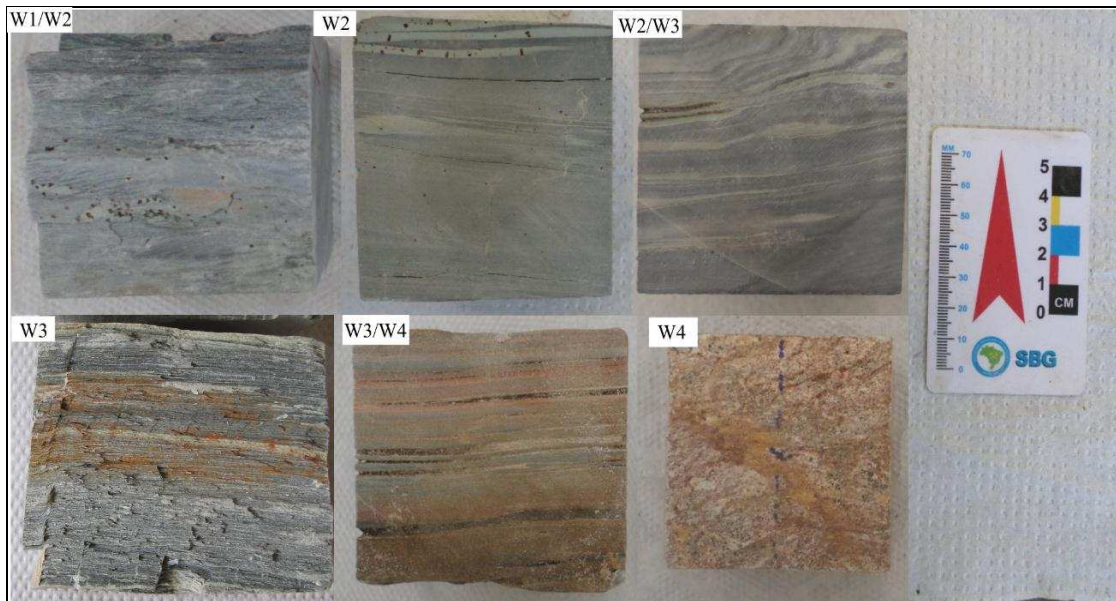


Figura 1.4 - Diferentes graus de alteração dos filitos. As amostras W1/W2, W2, W2/W3, W3 e W3/W4 foram coletadas do perfil Fil02, enquanto a amostra W4 foi extraída do perfil Fil03. Veios formados por minerais opacos e clorita exibem coloração verde nos filitos W2 e W2/W3, sendo neste último possível observar o início do intemperismo nesta feição. Em W3/W4, estes veios perdem a cor verde, em decorrência da transformação da clorita em argila, e assumem cor escura, resultante da alteração dos opacos. Esta feição foi observada à olho nu somente no perfil Fil02. Nos demais perfis ela apareceu somente em escala microscópica. Com a progressão do intemperismo (W3, W3/W4 e W4), os minerais opacos conferem à matriz da rocha uma coloração avermelhada em função da liberação de óxido de ferro

4.2 Caracterização petrográfica

A descrição das lâminas petrográficas foi essencial para melhor compreensão e ajuste dos limites das zonas de alteração dos perfis definidos em campo, uma vez que os filitos são rochas de granulação fina, o que pode dificultar a observação macroscópica dos efeitos do intemperismo sobre a matriz da rocha.

A mineralogia básica identificada por petrografia consiste em mica branca (muscovita e sericita), quartzo, minerais opacos e clorita. Os minerais placóides formam finas bandas, caracterizando a foliação, intercalando-se com bandas ricas em quartzo. O metamorfismo levou ao estiramento de boa parte dos minerais de quartzo e opacos e produziu microdobras, gerando, em algumas amostras, clivagem de crenulação (Fil01W2, Fil02W1/W2, Fil02W2, Fil02W2/W3, Fil02W3, Fil03W3, Fil03W4). Em veios preenchidos por opacos e cloritas, comuns a todos os perfis, o desenvolvimento das cloritas atinge dimensões que chegam a 0,25 mm. Foi observada a presença de clorita também na matriz, entretanto, em tamanhos menores que aquelas (em média 0,01 mm), portanto, difíceis de serem contabilizadas utilizando o método da contagem modal. O resultado da análise modal encontra-se na Tabela 1.1. Na Figura 1.5 são apresentados os principais aspectos dos efeitos do intemperismo encontrados nas lâminas petrográficas.

Os resultados encontrados a partir da análise petrográfica (Tabela 2.1) são semelhantes aqueles obtidos por Varajão et al. (2009) em perfis de alteração desenvolvidos sobre filito da Formação Fecho do Funil. Os autores verificaram que a rocha fresca é marcada por níveis de quartzo, intercalados com níveis de micas e minerais opacos.

Tabela 1.1 – Resultado da análise modal das classes de alteração dos três perfis de intemperismo investigados Fil01, Fil02 e Fil03

	Muscovita/ sericita	Quartzo	Opacos	Clorita	Óxidos	Argila	Vazios	Fraturas
Fil01W2	61.7	17.0	14.0	1.5	3.0	0.3	1.5	1.0
Fil01W3	13.0	51.5	20.0	1.5	2.0	0.0	12.0	0.0
Fil01W4	33.0	29.4	16.0	0.8	5.0	2.8	11.5	1.5
Fil02W1/ W2	46.7	29.5	13.0	1.0	2.5	3.5	1.3	2.5
Fil02W2	43.7	28.0	14.8	2.5	3.0	1.0	5.0	2.0
Fil02W2/ W3	54.7	17.0	15.8	1.0	3.0	3.0	2.5	3.0
Fil02W3	46.4	16.0	17.6	3.5	5.5	6.0	2.5	2.5
Fil02W3/ W4	34.2	20.0	12.0	1.0	15.0	2.3	14	1.5
Fil031W3	13.0	29.9	18.0	0.8	18.5	0.8	12.5	6.5
Fil032W3	14.4	43.4	11.0	1.5	15	1.7	13	0.0
Fil033W3	50.9	22.5	13.1	1.0	3.0	7.0	2.0	0.5
Fil03W4	51.3	15.0	15.7	1.5	9.0	4.5	2.0	1.0

Parte das muscovitas no filito W1/W2 (perfil Fil02) apresenta alteração, exibindo cor de interferência amarelada, enquanto algumas estão totalmente convertidas em caulinita. Com a liberação de óxido/hidróxidos de ferro, como produto do intemperismo dos minerais opacos, ocorre também geração de vazios na matriz, aspecto que aumenta significativamente nos filitos W3, W3/W4 e W4 (em todos os perfis, de forma geral). Varajão et al. (2009) também verificaram um aumento em impregnações ferruginosas, oriundas da alteração de opacos, da base para o topo em saprolitos de filito da Formação Fecho do Funil. No filito W1/W2, os cristais de clorita estão sãos, apresentando cor de interferência azul anômala. Entretanto, com o aumento do intemperismo, a análise microscópica revelou mudança de cor para amarelo e perda de pleocroísmo nas cloritas, as quais chegaram a se transformar em argila, exibindo coloração cinza-pálida. Estas cloritas mantinham, entretanto, sua forma original. Resultado similar foi encontrado por Aspandiar & Eggleton (2002), que estudando os mecanismos de alteração da clorita em perfil de basalto, verificaram que os efeitos iniciais do intemperismo

deste mineral foram representados pela mudança de cor para amarelo, seguida pela perda de pleocroísmo e, por fim, pela exibição de cor cinza pálido, quando os cristais de clorita sofriram pseudomorfose, dando origem a argilas. Os resultados sugerem que a clorita, ao sofrer pseudomorfose transformando-se em argila, é uma importante indicadora do grau de intemperismo nos filitos estudados.

Cabe ressaltar que as mudanças mineralógicas mais expressivas, como a maior liberação de óxido/hidróxido de ferro e a formação de vazios, ocorreram especialmente nos filitos W3, W3/W4 e W4, refletindo diretamente nos índices físicos e propriedades físicas, como será discutido posteriormente. Na Figura 1.5 apresenta-se fotografias exemplificando os aspectos descritos anteriormente.

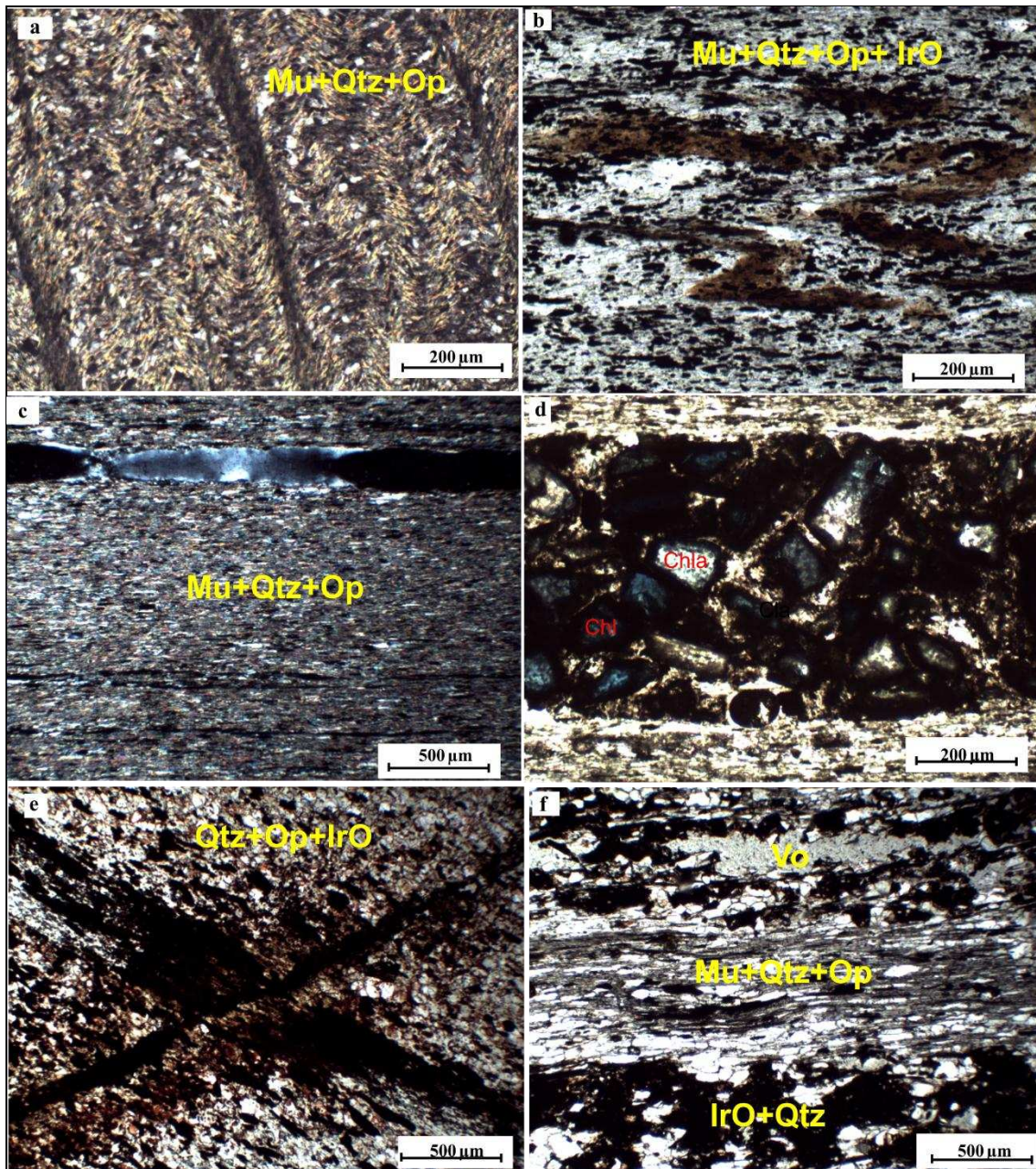


Figura 1.5 - Aspectos texturais e mineralógicos de filitos em lâmina petrográfica. As imagens b, c, d, e, f mostram os principais efeitos da alteração intempérica de minerais opacos e cloritas, em que as siglas significam: *IrO* óxidos/hidróxidos de ferro; *Mu* muscovita; *Op* opacos; *Qtz* quartzo; *Vo* vazios. Em (a) tem-se a clivagem de crenulação dada pela muscovita e sericita (filito W1/W2). Em (b) mostra-se a precipitação de óxidos/hidróxidos de ferro devido ao intemperismo de opacos (filito W1/W2). Em (c) observa-se uma fratura alterada paralela à foliação (filito W2). Em (d) Veio constituído por cloritas e opacos, com cloritas levemente alteradas (Chl) e parcialmente ou totalmente convertidas a argilas (Chla) (filito W3). Em (e) precipitação de óxidos/hidróxidos de ferro na matriz e em fraturas transgranulares (filito W3). Em (f) Geração de vazios e opacos intensamente alterados, levando a uma intensa liberação de óxidos/hidróxidos de ferro, formando crostas ferruginosas (filito W3/W4).

4.3 Caracterização física

4.3.1 Índices Físicos

Os resultados da massa específica seca, saturada, da porosidade e da capacidade de absorção de água na saturação são apresentados na Figura 1.6. Pode-se observar que os filitos pertencentes às classes W1/W2, W2 e W2/W3 apresentaram valores de massa específica seca

e saturada acima de 2.7 g/cm^3 e baixos valores de porosidade e capacidade de absorção de água na saturação. As mudanças mais significativas nos índices físicos ocorreram na passagem desse primeiro grupo para o grupo composto por materiais W3, W3/W4 e W4. De forma similar, Marques et al. (2010) estudando o intemperismo de rochas metamórficas de alto grau do Brasil, mostrou mudança acentuada nessas propriedades físicas nas classes de rochas medianamente e muito alteradas. Dobereiner et al. (1993) também observou variação significativa na densidade seca e saturada e na porosidade na passagem das classes levemente a medianamente intemperizadas em perfil de gnaiss desenvolvido na França. Ramamurthy et al. (1993) em seu trabalho sobre o comportamento mecânico de diferentes tipos de filitos na região do Himalaia, obtiveram valores de massa específica seca de 2.7 g/cm^3 para filitos micáceos e carbonáticos e 2.8 g/cm^3 para filitos quartzíticos, todos são. Valores muito semelhantes foram obtidos neste trabalho para os filitos W1/W2, W2 e W2/W3. Com base nos resultados obtidos, os índices físicos demonstraram ser bons marcadores do intemperismo, principalmente a porosidade e a capacidade de absorção d'água, mesmo com aumento da dispersão para níveis mais alterados como W3 e W4, e nos níveis transicionais, devido à heterogeneidade da rocha.

4.4 Caracterização Mecânica

4.4.1 Compressão puntiforme

Ao todo 302 espécimes foram submetidas ao teste de compressão puntiforme para avaliar a resistência das rochas estudadas. Entretanto, apenas 53 ensaios realizados paralelo à foliação e 82 perpendiculares foram considerados válidos, conforme recomendação da ISRM (2007). Nos ensaios inválidos realizados na direção perpendicular, o plano de ruptura não atingia o ponto de aplicação da carga, sendo interrompido por fraturas paralelas à foliação, superfícies mais resistentes (níveis oxidados) ou dobras. Essa característica é comum em ensaios executados em rochas brandas, como filitos, podendo ocorrer ainda a penetração dos cones do equipamento na rocha (Leão et al., 2017).

A partir dos dados mostrados na Tabela 1.3 nota-se grande anisotropia quando são comparados ensaios executados no sentido ortogonal e paralelo à foliação, através do índice de carga pontual ($I_{s(50)}$), conforme reforçado pelo índice de anisotropia (I_a). Nenhuma redução clara da anisotropia foi detectada com o aumento do intemperismo.

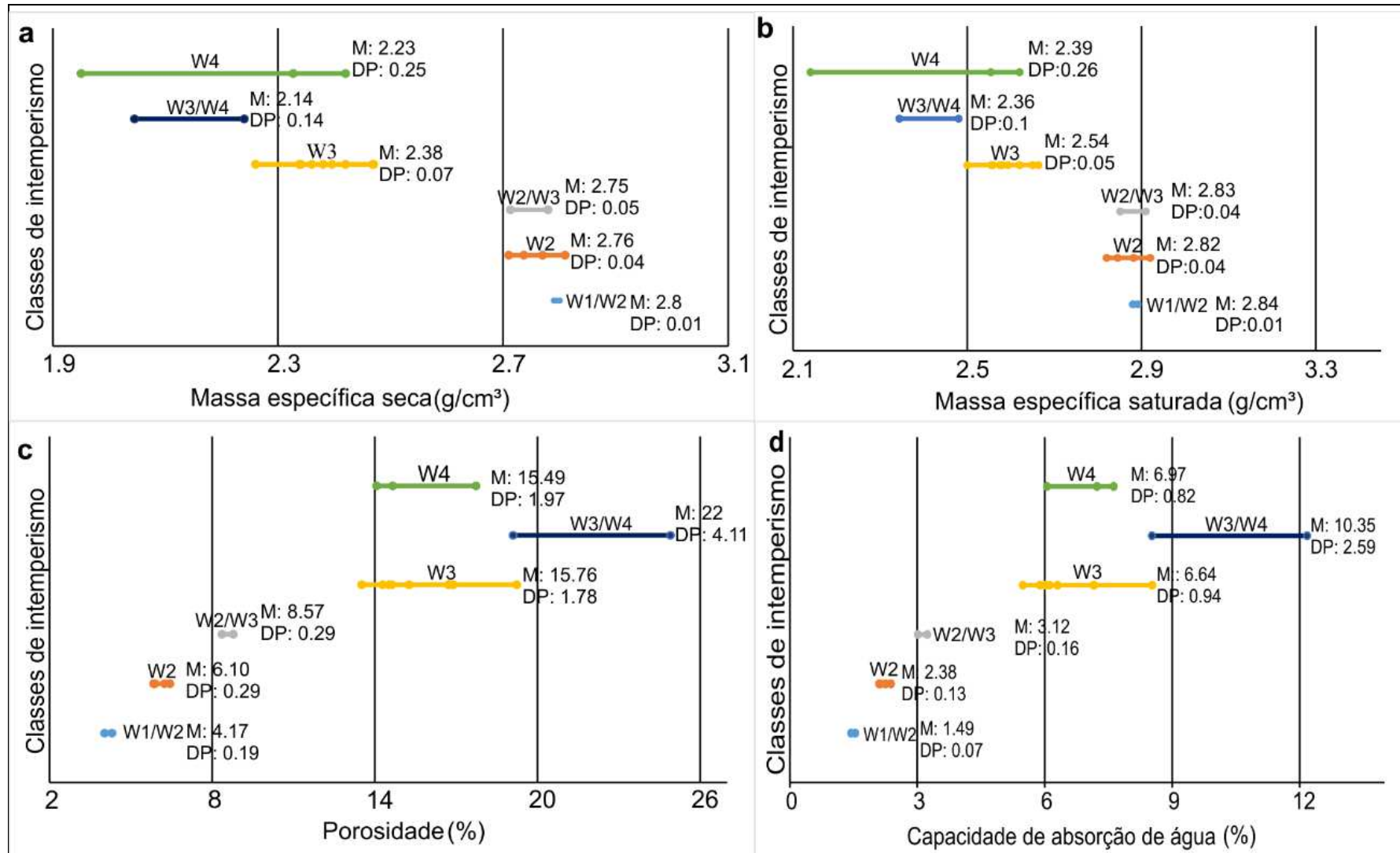


Figura 1.6 - Resultados da massa específica seca (a), massa específica saturada (b), porosidade (c) e capacidade de absorção (abs) de água (d) de filitos. Os gráficos a e b mostram redução, enquanto c e d aumentaram com a evolução do intemperismo sobre os filitos, sendo destacadas a média (M) e o desvio padrão (DP).

Tabela 1.2 – Valores médios da compressão puntiforme (I_s (50)) realizada ortogonal e paralela à foliação para as classes de

Classes de intemperismo	Ortogonal à foliação		Paralela à foliação		$I_a(50)$	Número de amostras
	I_s (50) (MPa)	Desvio Padrão	$I_s(50)$ (MPa)	Desvio Padrão		
W1/W2	2.29	1.15	0.54	0.54	4.24	23
W2	1.03	0.20	0.18	0.05	5.72	19
W3	0.50	0.29	0.16	0.09	3.13	64
W3/W4	0.59	0.13	0.07	0.04	8.43	10
W4	0.59	0.30	0.10	0.11	5.60	19

intemperismo.

De forma geral, os resultados dos ensaios de compressão puntiforme mostram uma tendência geral de diminuição da resistência com o aumento do intemperismo. Nota-se que a variação da resistência é menor na direção paralela, mostrando que o processo de intemperismo tem um controle estrutural sobre a resistência e este não é uniforme. Observa-se também que os valores de resistência obtidos na direção perpendicular à foliação apresentam uma menor variação nos materiais mais alterados (W3, W3/W4 e W4). Comportamento semelhante foi obtido por Marques et al. (2017) em filitos com diferentes graus de alteração da Austrália, a partir dos quais foi demonstrado que nos filitos classificados como medianamente alterados (classe III) e muito alterados (classe IV e IV/V) não houve bruscas variações na resistência.

A semelhança da média dos valores de resistência obtidos na direção perpendicular para os filitos W3, W3/W4 e W4, possivelmente, está relacionada ao aumento da porosidade, que ocorre de forma significativa nestes materiais de transição rocha - solo. Resultado análogo foi encontrado por Tuğrul (2004) em diferentes tipos de rochas da Turquia, em que este autor obteve uma relação clara entre a resistência à compressão uniaxial e a porosidade e percebeu que a partir das rochas medianamente intemperizadas, houve uma queda na resistência, enquanto a porosidade aumentou acentuadamente.

4.4.2 Martelo de Schmidt

Com base nos valores de esclerometria, mostrados na Figura 1.7, houve grande dispersão para todos os níveis. Comparando níveis de alteração mais extremos, como W1/W2 com W3/W4, há representatividade da evolução do intemperismo sobre a resistência. Entretanto, para materiais transicionais, como os W3, a dispersão de resultados é elevada. Fatores relacionados com a redução da resistência da matriz da rocha com o intemperismo denotam valores mais baixos. Os valores elevados apresentados pelos materiais W3/W4 podem ser explicados pela presença de óxidos de ferro dispersos nos planos de foliação de forma

irregular e heterogênea, o que aumenta a resistência. Este fator se torna mais influente com o aumento do intemperismo. Leão et al. (2017) em seu estudo com filitos também na região do Quadrilátero (Brasil), verificou a presença de níveis oxidados nos planos de foliação, os quais podem influenciar a resistência da rocha, mesmo com degradação da matriz rochosa pelo intemperismo. Este mesmo efeito também foi observado por Marques et al. (2017), estudando filitos da Austrália. Não foi possível a obtenção de medidas da classe exclusivamente W4 devido ao seu maior grau de deterioração.

Dos resultados apresentados, fica claro que os materiais de transição rocha – solo, em função dos efeitos da ação do intemperismo, apresentam comportamento bastante irregular podendo ocorrer, inclusive, aumento da resistência devido à precipitação de óxidos de ferro em descontinuidades pré-existentes. Esse efeito é dependente do desenvolvimento de novas descontinuidades com o avanço do intemperismo (físico) e da mineralogia da rocha – que deve conter minerais que liberem óxido de ferro para as descontinuidades ou outros componentes que, depositando-se nas descontinuidades previamente criadas pelo intemperismo, venham a cimentá-las (intemperismo químico).

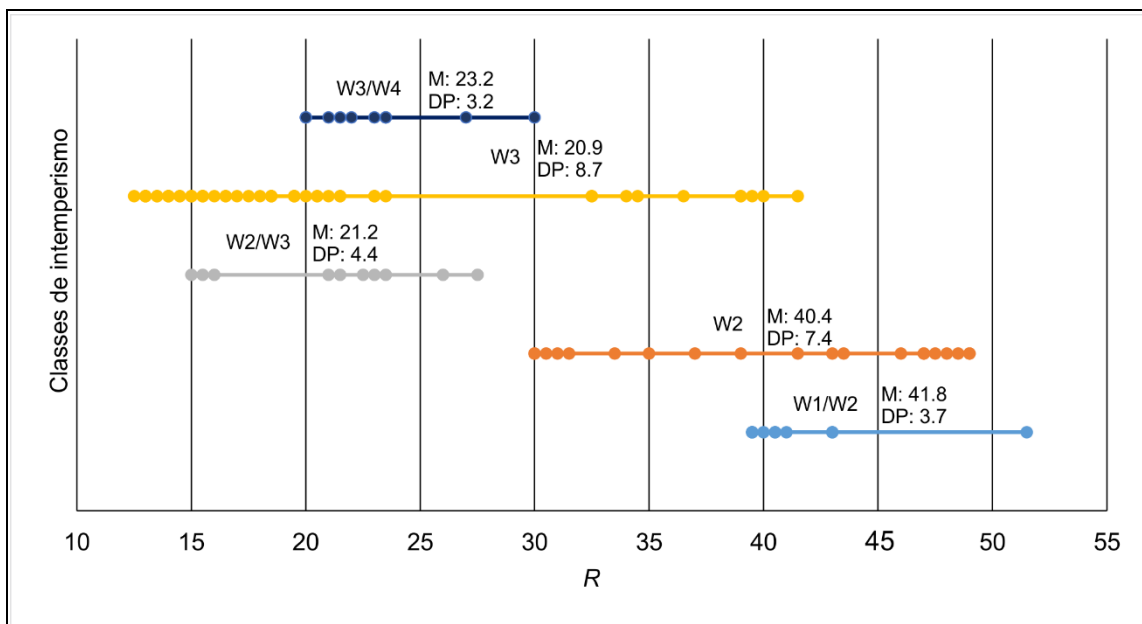


Figura 1.7 - Valores de R a partir do martelo de Schmidt para as diferentes classes de alteração executado perpendicular à foliação

4.5 Correlações entre Propriedades Físicas e Mecânicas

Os resultados das análises de regressão feitas entre a média dos valores das propriedades físicas e mecânicas são apresentados nas Figuras 1.8, 1.9 e 1.10. As correlações não são lineares, o que sugere uma diminuição acentuada das propriedades geotécnicas com o intemperismo. Esta característica é observada pela redução da resistência - ainda que nem sempre contínua, seja da dureza da matriz (R), seja do valor de $I_{s(50)}$, com o aumento da porosidade e capacidade de absorção d'água, evidenciando a influência dos processos intempéricos nas propriedades mecânicas dos filitos.

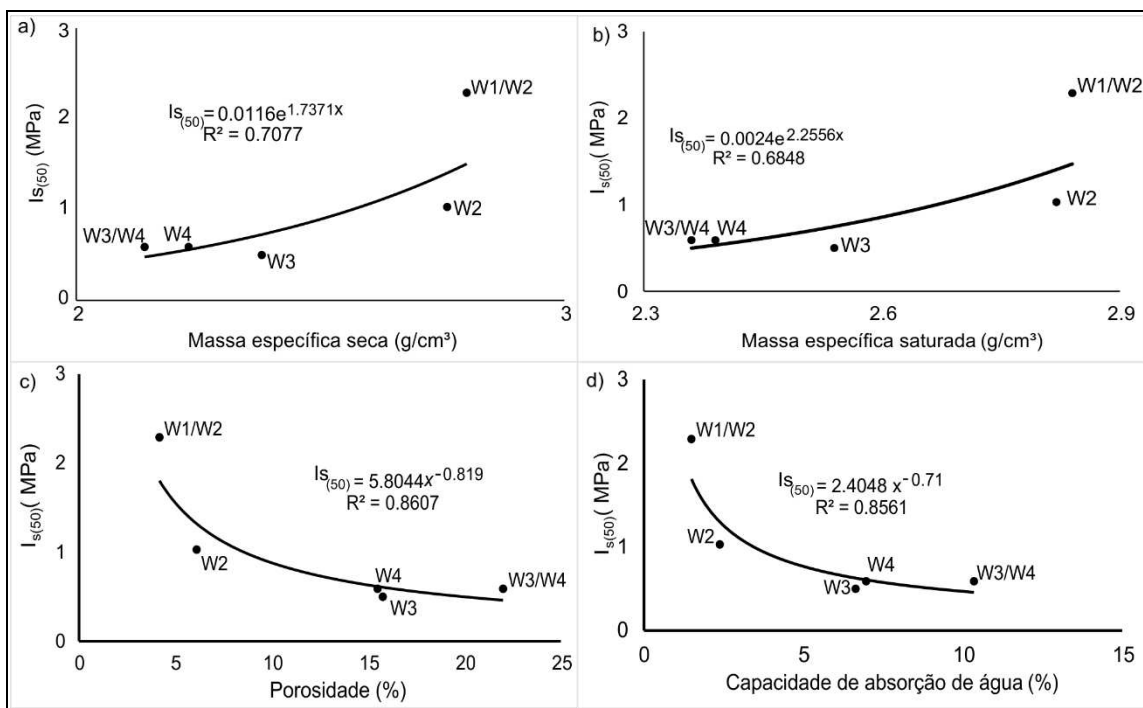


Figura 1.8 - Correlações entre $I_{s(50)}$ (perpendicular) e a massa específica seca (a), massa específica saturada (b), capacidade de absorção d'água (c) e porosidade (d).

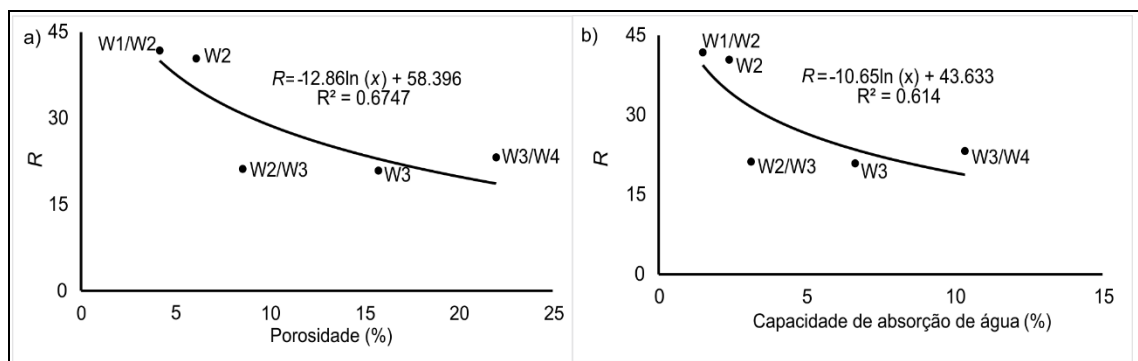


Figura 1.9 - Correlações entre R e a porosidade (a) e a capacidade de absorção d'água (b)

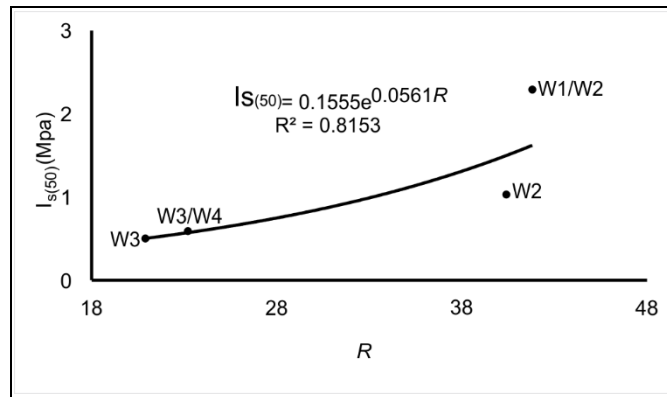


Figura 1.10 - Correlação entre $I_{S(50)}$ (perpendicular) e R

5. Conclusões

A morfologia dos perfis de intemperismo de filito estudados apresentou um forte controle estrutural, dado, especialmente, pela foliação metamórfica, que implica em contatos abruptos e interdigitados entre as distintas classes de alteração. Há também um controle geomorfológico, dado pelo relevo muito ondulado. A micropetrografia mostrou-se fundamental na identificação dos efeitos de transformações mineralógicas e texturais sobre o comportamento físico e mecânico observado. Os minerais que melhor marcaram o intemperismo foram os opacos e a clorita. Como consequência do intemperismo químico sobre os minerais opacos há precipitação de soluções ricas em óxidos/hidróxidos de ferro em poros secundários da rocha e em descontinuidades que se desenvolvem paralelamente à foliação, enquanto que a alteração das cloritas resulta na formação de argila. O aumento de óxidos e da porosidade ocorreram acentuadamente no filito medianamente intemperizado (W3) e estão ligados às principais variações no comportamento das características físicas e mecânicas.

Os resultados obtidos para as propriedades físicas e mecânicas refletiram uma clara influência do intemperismo, mesmo em frentes geologicamente complexas como as dos filitos estudados. Tais propriedades mostraram-se úteis na identificação do estado de alteração dessas rochas até a classe W3 (medianamente intemperizada), tendo em vista que ação do intemperismo não se mostrou uniforme após este estágio, indicando que os materiais transicionais apresentam um comportamento algo errático em relação à essas propriedades. O aumento da porosidade foi a principal característica relacionada à diminuição da resistência dos filitos estudados. Correlações entre diferentes propriedades físicas e mecânicas foram estabelecidas, obtendo-se coeficientes de regressão significativos, especialmente entre a porosidade e capacidade de absorção d'água com $I_{S(50)}$ e entre este e o valor de R. Os resultados obtidos não devem ser estendidos a outros tipos de rocha, particularmente brandas, uma vez

que os filitos são heterogêneos e anisotrópicos. Entretanto, a metodologia utilizada, baseada em avaliações simples e expeditas na rocha intacta e descontinuidades pode ser replicada para estudos em outros tipos litológicos por considerar particularidades geológico-geotécnicas.

Referências

- Abad Svank, Mohamad ET, Komoo I, Kalatehjari R (2015) A typical weathering profile of granitic rock in Johor, Malaysia based on joint characterization. *Arab J Geosci* 8:2191–2201. [https://doi: 10.1007/s12517-014-1345-7](https://doi.org/10.1007/s12517-014-1345-7)
- Abad Svank, Tugrul A, Gokceoglu C, Jahed Armaghani D (2016) Characteristics of weathering zones of granitic rocks in Malaysia for geotechnical engineering design. *Engineering Geology* 200: 94–103. [https://doi: 10.1016/j.enggeo.2015.12.006](https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2015.12.006)
- Alkmim FF, Marshak S (1998) Tranzamazonian Orogeny in the southern São Francisco Craton region, Minas Gerais, Brazil: evidence for Paleoproterozoic collision and collapse in the Quadrilátero Ferrífero. *Precambrian Research* 90: 29-58
- Andrade PS, Saraiva AA (2010) Physical and mechanical characterization of phyllites and metagreywackes in central Portugal. *Bull Eng Geol Env* 69:207–214. [https://doi:10.1007/s10064-009-0251-9](https://doi.org/10.1007/s10064-009-0251-9)
- Arel E, Önalp A (2004) Diagnosis of the transition from rock to soil in a grandiorite. *J Geotech Geoenviron ASCE* 130(9):968–974. [https://doi: 10.1061/~ASCE!1090-0241~2004!130:9~968!](https://doi.org/10.1061/~ASCE!1090-0241~2004!130:9~968!)
- Aspandiar MF, Eggleton RA (2002) Weathering of chlorite: I. reactions and products in microsystems controlled by the primary mineral. *Clays and Clay Minerals* 50:685–698.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT (1992). NBR 12766: Rochas para revestimento - Determinação da massa específica aparente, porosidade aparente e absorção d'água aparente. ABNT, Rio de Janeiro.
- Barroso EV (1993) Study of geological characteristics and geotechnical behavior of a Leptinite weathering profile. Dissertation, Department of Geology, Federal University of Rio de Janeiro, Brazil (in Portuguese).

- Basu A, Ghosh N, Das M Categorizing weathering grades of quartzitic materials and assessing Brazilian tensile strength with reference to assigned grades. *Int J Rock Mech Min Sci* 49: 148–155. <https://doi:10.1016/j.ijrmms.2011.11.012>.
- Borrelli L, Perri F, Critelli S, Gullà G (2014) Characterization of granitoid and gneissic weathering profiles of the Mucone River basin (Calabria, southern Italy). *Catena* 113: 325–340. <https://doi:10.1016/j.catena.2013.08.014>
- Costa TAV, Mercer K., Dight P, Marques EAG (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: *Slope Stability 2015. International Symposium on Slope Stability Inopen Pit Mining and Civil Engineering*, Cape Town. Anais... Cape Town: Slope Stability.
- Da Silva WG, França AVM, Sampaio JLD (2005) Folha Mariana, SF.23-X-B-I-3 e SF.23-X-B-IV-1, escala 1:50.000: projeto geologia do Quadrilátero Ferrífero - integração e correção cartográfica em SIG/ editores. CODEMIG, Belo Horizonte
- Dobereiner L, Durville JL, Restituto J (1993) Weathering of the massiac gneiss (Massif Central, France). *Bull Int Assoc Eng Geol* 47:79–96. doi:10.1007/BF02639596
- Fietze C, Creighton A, Castro LM, Hammah R (2013) Pit slope design in phyllites for the Simandou large open pit project. In: Dight PM (ed) *Proceedings of the 2013 international symposium on slope stability in open pit mining and civil engineering*. Australian Centre for Geomechanics, Perth, pp 115–125
- Fookes PG, Dearman WR, Franklin JA (1971) Some engineering aspects of rock weathering with field examples from Dartmoor and elsewhere. *Q J Eng Geol* 4:139-185
- Gupta AS, Rao KS (1998) Index properties of weathered rocks: interrelationships and applicability. *Bul Eng Geol Env* 57:161-172
- Gupta AS, Rao KS (2001) Weathering indices and their applicability for crystalline rocks. *Bull Eng Geol Environ* 56:257–274
- He C, Wang B (2013) Research progress and development trends of highway tunnels in China. *J Mod Transp* 21:209–223. <https://doi:10.1007/s40534-013-0029-4>
- Hoek E, Guevara R (2009) Overcoming squeezing in the Yacambu - Quibor Tunnel, Venezuela. *Rock Mech Rock Eng* 42:389–418. <https://doi:10.1007/s00603-009-0175-5>

International Society on Rock Mechanics - ISRM (2007) The complete ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring: 1974–2006. ISRM.

Irfan TY, Dearman WR (1978) Engineering classification and index properties of a weathered granite. *Bull Int Assoc Eng Geol* 17:79–90

ISRM (2015) The IRSM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring: 2007–2014. Springer, Cham.

Jeffcoate A, Campbell M, Vannay J-C, Perriaux B (2013) 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

Koita M, Jourde H, Koffi K J P, Da Silveira K S, Biaou A (2013) Characterization of weathering profile in granites and volcanosedimentary rocks in West Africa under humid tropical climate conditions. Case of the Dimbokro Catchment (Ivory Coast). *J. Earth Syst. Sci.* 122 (3):841–854.

Lan HX, Hu RL, Yue ZQ, Lee CF, Wang SJ (2003) Engineering and geological characteristics of granite weathering profiles in South China. *J Asian Earth Sci* 21 (4): 353–364.

Lana MS (2014) Numerical modeling of failure mechanisms in phyllite mine slopes in Brazil. *Int J Min Sci Technol* 24:777–782. <https://doi:10.1016/j.ijmst.2014.10.007>

Leão M F, Barroso EV (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 Anais...* São Paulo: ABGE, p. 52-52

Leão MF, Barroso EV, Polivanovi H, Marques EAG, Vargas Jr EA (2017) Weathering of metapelites from the Quadrilátero Ferrífero mineral province, southeastern Brazil. *Bull Eng Geol Env.* [https://doi: 10.1007/s10064-017-1036-1](https://doi:10.1007/s10064-017-1036-1)

Marques EAG, Barroso EV, Menezes Filho AP, Vargas JR EA (2010) Weathering zones on metamorphic rocks from Rio de Janeiro – Physical, mineralogical and geomechanical characterization. *Engineering Geology* 111:1-18. <https://doi:10.1016/j.enggeo.2009.11.001>

Marques EAG, Williams DJ (2015) Weathering profiles of Bunya phyllite in southeast Brisbane—a geotechnical approach. In: *ANZ 2015—12th Australia New Zealand Conference*

on Geomechanics. Proceedings. New Zealand Geotechnical Society Inc. Wellington (NZ), pp 1–8

Marques EAG, Williams DJ, Assis IR, Leão MF (2017) Effects of weathering on characteristics of rocks in a subtropical climate: weathering morphology, in situ, laboratory and mineralogical characterization. *Environ Earth Sci.* 76:602. [https://doi: 10.1007/s12665-017-6936-7](https://doi.org/10.1007/s12665-017-6936-7)

Marques EAG, Williams DJ, Pereira LC (2016) 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 Sociais Anais... Porto: Sociedade Portuguesa de Geotecnia

Momeni AA, Khanlari GR, Heidari M, Sepahi AA, Bazvand E (2015) New engineering geological weathering classifications for granitoid rocks. *Engineering Geology* 185: 43–51. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enggeo.2014.11.012>

Moon V, Jayawardane J (2004) Geomechanical and geochemical changes during early stages of weathering of Karamu Basalt, New Zealand. *Engineering Geology* 74:57-72.

Panda MK, Mohanty S, Pingua BMP, Mishra AK (2014) Engineering geological and geotechnical investigations along the head race tunnel in Teesta Stage-III hydroelectric Project, India. *Eng Geol* 181:297–308

Papadopoulos Z, Marinos P (1992) On the anisotropy of the Athenian Schist and its relation to weathering. *Bull Int Assoc Eng Geol* 45: 11-116

Pinheiro AL, Lana MS, Sobreira FG (2015) Use of the distinct element method to study flexural toppling at the Pico Mine, Brazil. *Bull Eng Geol Env* 74:1177–1186. [https://doi:10.1007/s10064-014-0713-6](https://doi.org/10.1007/s10064-014-0713-6)

Ramamurthy T, Rao GV, Singh J (1993) Engineering behavior of phyllites. *Engineering Geology* 33: 209-225.

Romano AW, Rezende LFS, Macedo BOP (2017). Folha Ouro Preto, SF.23-X-A-III, escala 1:100.000: projeto Triângulo Mineiro. CODEMIG, Belo Horizonte.

Ruxton BP, Berry L (1957) Weathering of granite and associated erosional features in Hong Kong. *Geol Soc Am Bull* 68(10):1263–1292

Shrestha G, Broch E (2008) Influences of the valley morphology and rock mass strength on tunnel convergence: with a case study of Khimti 1 headrace tunnel in Nepal. *Tunn Undergr Space Technol* 23:638–650. <https://doi:10.1016/j.tust.2007.12.006>

Silva CHC, Lana MS (2012) Influence of slake durability on geotechnical behavior of phyllites of Pau Branco Mine. *Rev Esc Minas* 65:413–418. <https://doi:10.1590/S0370-44672012000300019>

Tating F, Hack R, Jetten V (2013) Engineering aspects and time effects of rapid deterioration of sandstone in the tropical environment of Sabah, Malaysia. *Engineering Geology* 159: 20–30. <https://doi:10.1016/j.enggeo.2013.03.009>

Tuğrul A (2004) The effect of weathering on pore geometry and compressive strength of selected rock types from Turkey. *Eng. Geol* 75: 215–277. <https://doi:10.1016/j.enggeo.2004.05.008>

Tuğrul A, Gürpınar O (1997) A proposed weathering classification for basalts and their engineering properties (Turkey). *Bull Int Assoc Eng Geol* 55: 139-149

CAPÍTULO 7

Artigo proposto:

Avaliação das variações geoquímicas ao longo de perfis de intemperismo de filito sob clima tropical

Avaliação das variações geoquímicas ao longo de perfis de intemperismo de filito sob clima tropical

Resumo

O presente estudo avaliou a variação da geoquímica e o comportamento de diferentes índices químicos de filitos classificados como levemente a muito alterados ao longo de perfis de intemperismo desenvolvidos em condições tropicais. Os resultados revelam que as transformações químicas dos filitos levemente a medianamente intemperizados estão relacionadas, especialmente, à decomposição de feldspato, clorita, talco e pirofilita, que não constituem a mineralogia principal dessas rochas, tendo como principal produto de alteração a caulinita. Já o intemperismo da muscovita deu-se de forma mais efetiva a partir do filito muito alterado. Boa parte dos elementos químicos não apresentaram comportamento regular com o aumento do intemperismo. Apenas Ca e Mg mostraram ser adequados para serem utilizados como elementos mobilizáveis em índices químicos das rochas estudadas. Como consequência, boa parte dos índices avaliados não são sensíveis o suficiente para registrar a variação do intemperismo, embora possam exibir tendências gerais entre membros extremos dos perfis. A exceção se faz para o índice “Cálcio-magnésio/alumínio” (ba2), que deve ser aplicado apenas em situações em que o Al não apresenta grandes variações.

Palavras-chave: Filito. Intemperismo. Geoquímica. Índices químicos.

1. Introdução

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 fluorescência de raios-X (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 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 Quadrilátero Ferrífero, é regido pelo pH, potencial de oxirredução,

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 o 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).

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. Duzgoren-Aydin et al. (2002) fazem uma revisão de vários índices químicos desenvolvidos ao longo dos anos, suas limitações e aplicabilidades, os quais, segundo os autores, estão voltados principalmente para rochas de composição félsica e intermediária, alguns para básicas, enquanto outros preveem ser adequados para todos os tipos litológicos.

O padrão gradual ou contínuo no comportamento de índices químicos em perfis de alteração, em geral, reflete o intemperismo de rochas parentais homogêneas. No entanto, a segregação de minerais micáceos e o desenvolvimento de foliação durante o metamorfismo produzem camadas com diferentes composições químicas, nem sempre exibindo tendências simples em termos de elementos químicos (Price e Velbel, 2003). Hu et al. (2014) ressaltam a necessidade de se encontrar índices adequados a áreas específicas, já que os métodos não fornecem um índice químico uniforme e, ainda, considerando uma mesma área, um índice não é universal, já que o intemperismo depende de muitos fatores. A conclusão semelhante chegaram Khanlari e Naseri (2016) observando o padrão desordenado de concentração dos elementos maiores devido à especificidade da área de estudo, encontrando pobre correlação em índices químicos que consideram proporções moleculares.

Em muitos desses índices são assumidas relações entre elementos imóveis (pouco solúveis) com móveis (cuja concentração reduz conforme o intemperismo e a lixiviação avançam). Espera-se, assim, que com a intensidade do intemperismo, certos elementos permaneçam no produto de alteração como, por exemplo, o Al, enquanto outros são mobilizados como Si, Na, K, Ca, e Mg. Isto ocorre, por exemplo, com os índices “Potássio-sódio-cálcio/alumínio” (ba), “Potássio-sódio/alumínio” (ba1), “Cálcio-magnésio/alumínio” (ba2) e “Potássio-sódio-magnésio/alumínio” (ba3) (Harrassowitz, 1926); “Bases Al” e “Bases R_2O_3 ” (Colman, 1982); “Silício/ R_2O_3 ” (Jenny, 1941); “Sílica/alumínio” (R) (Ruxton, 1968); “Product Index” (PI) (Reiche, 1943); “Chemical Index Alteration” (CIA) (Nesbitt e Young,

1982); “Índice de Vogt” (V) (Vogt, 1927); “Índice químico de intemperismo” (CIW) (Harnois, 1988); “Índice de alteração do plagioclásio” (PIA) (Fedo et al., 1995). Entretanto, essa premissa nem sempre é garantida. Gardner (1980 e 1992), avaliando o comportamento do Al em saprolitos derivados de diferentes rochas ígneas e metamórficas do Brasil e algumas rochas cristalinas dos EUA, alerta que a mobilização significativa desse elemento durante o intemperismo é mais comum do que geralmente se supõe, fruto de ambientes com pH abaixo de 4,5 e na presença de ácidos orgânicos.

Em vista do exposto, o presente estudo avalia a variação da geoquímica e de diferentes índices químicos ao longo de três perfis de intemperismo de filitos desenvolvidos em condições tropicais, na região do Quadrilátero Ferrífero – MG, Brasil.

2. Aspectos Geológicos

Os perfis de intemperismo estão localizados no sudeste do Brasil, inseridos na região conhecida como Quadrilátero Ferrífero, assim denominada pelo seu arranjo geométrico, que se dá pelo alinhamento de serras formando uma configuração aproximadamente quadrangular.

A região possui temperatura média anual em torno de 20°C com precipitação que varia entre 1300 mm e 2100 mm por ano (Schobbenhaus e da Silva, 2012). O clima é tropical semiúmido com duas estações bem definidas (Varajão et. al, 2009): verão úmido e inverno seco.

A geologia do Quadrilátero constitui-se de cinco unidades litoestratigráficas principais (Alkmim & Marshak, 1998): embasamento cristalino, composto por complexos metamórficos granito-gnáissicos, de idade arqueana; Supergrupo Rio das Velhas, constituído por sequência vulcano-sedimentar arqueana (*greenstone belt*); Supergrupo Minas, formada por sedimentos clásticos e químicos proterozoicos metamorfisados e dobrados; intrusões pós-Minas; e Grupo Itacolomi, constituído por metassedimentos clásticos de idade proterozoica.

O Supergrupo Minas é formado por quatro grupos: Caraça, Itabira, Piracicaba e Sabará. Dentre estes, o Grupo Itabira destaca-se por conter a sequência mais espessa de formações ferríferas bandadas com corpos de minério de alto teor economicamente exploráveis, fazendo da região uma das maiores produtoras de minério de ferro do mundo. Frequentemente associado às frentes de lavra do minério de ferro ocorrem filitos pertencentes ao Supergrupo Minas. Nesses casos, não são raros os problemas de ruptura relacionados a estruturas geológicas e aos efeitos da degradação química dos filitos (Lana, 2014). Na Figura 2.1 é apresentado o mapa geológico com a localização dos três perfis de intemperismo de filito, pertencentes à Formação Fecho do Funil - Grupo Piracicaba, em que foram coletadas amostras para os testes químicos e

mineralógicos. Cabe ressaltar, a ausência de mapas geológicos de detalhe das regiões de interesse e, desta forma, as formações geológicas correspondentes aos perfis estudados não são bem definidas e delimitadas no mapa geológico. Associado ao fato está a crescente ação do intemperismo que expõe camadas geológicas subsuperficiais.

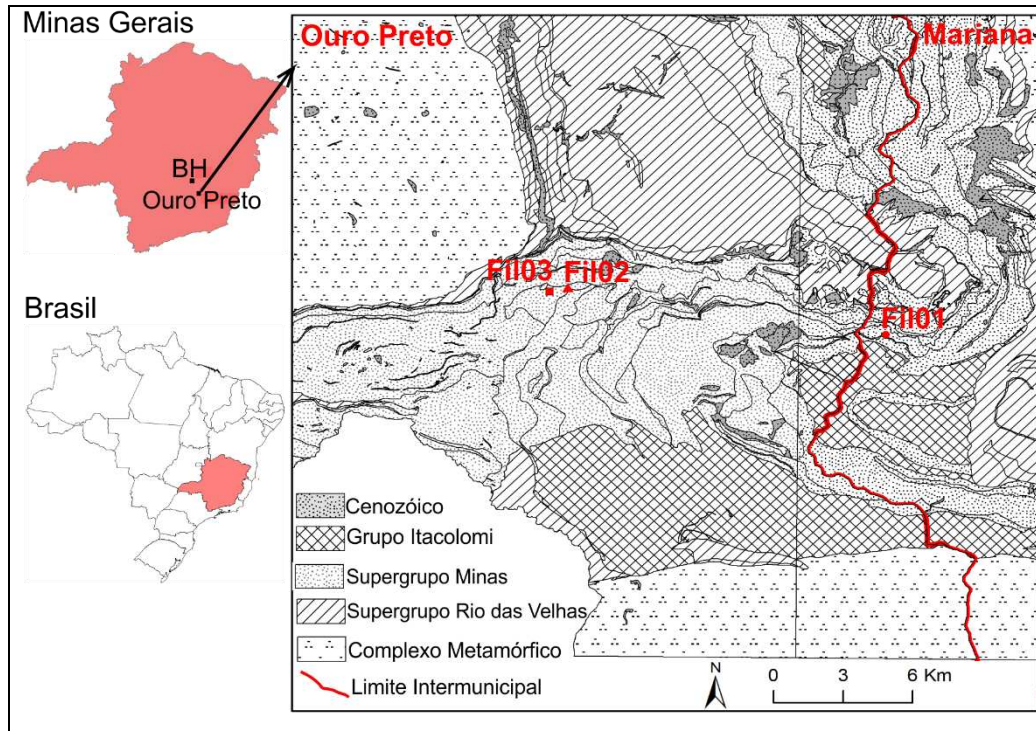


Figura 2.1 - Mapa geológico (adaptado de da Silva et.al, 2005; Romano et. al, 2017) com a localização dos perfis de intemperismo estudados, situados nos municípios contíguos de Mariana (Fil01) e Ouro Preto (Fil02 e Fil03). Ouro Preto está localizada a, aproximadamente, 100 km da capital do estado de Minas Gerais (Belo Horizonte - BH), Brasil.

3. Metodologia

Três perfis de intemperismo foram selecionados ao longo da rodovia BR 356 na região do Quadrilátero Ferrífero, MG – Brasil, nos quais foi determinado o grau de alteração, segundo a classificação da Sociedade Internacional de Mecânica das Rochas - ISRM (2015).

Com base em levantamento detalhado de campo foram reconhecidos seis níveis de intemperismo: W1/W2 (rocha quase sem sinais de alteração); W2 e W2/W3 (rocha pouco alterada); W3, W3/W4 e W4/W3 (rocha medianamente alterada); W4 (rocha muito alterada); W5 (rocha completamente alterada, mas a estrutura original ainda é visível); e W6 (solo residual maduro). Amostras representando diferentes graus de intemperismo foram coletadas para testes em laboratório. Não foram coletadas amostras da rocha completamente alterada (W5) e do solo residual maduro (W6) e, portanto, testes não foram realizados nestes materiais e fogem ao escopo da pesquisa.

A mineralogia foi avaliada a partir da análise de lâminas petrográficas e da difratometria de raios-X (DRX), ambas realizadas nos filitos classificados como W1/W2 ao W4. A DRX foi aplicada à fração fina dos filitos, produzida por moagem para a redução das partículas até a obtenção do pó da rocha, posteriormente coletadas por decantação em meio aquoso. Três tipos de leitura foram feitas: em condição natural; a partir da saturação em etileno-glicol; e após o aquecimento à temperatura de 525°C. O equipamento utilizado foi um Bruker D8 Advance, com tubo de cobre, corrente de 40 mA, voltagem de 40 kV e ângulo de varredura 2θ 0-70°, com leituras a cada 0,02°.

A composição química dos filitos nos diferentes estados de alteração (W1/W2 ao W4) foi determinada por microfluorescência de raios-X (μ -XRF). O aparelho utilizado foi o μ -EDX 1300 – Shimadzu (EDX), previamente calibrado para análise quantitativa empregando-se os Parâmetros Fundamentais (Quantitativo – FP), o qual consiste em um modelo matemático que já se encontra no software do aparelho, baseado em quatro amostras de referência: Soil Montana II – NIST 2711a (*National Institute of Standards and Technology of the United States*); BHVO-2 – Basalt – USGS (*U.S. Geological Survey Certificate of Analysis*); COQ-1 – Carbonatite – USGS; e SDC-1 – Mica – USGS. As análises foram feitas em porções representativas da matriz da rocha, previamente definidas, demarcadas em pequenos fragmentos de formato retangular com superfícies lisas e paralelas nos diferentes graus de intemperismo.

Os parâmetros químicos foram avaliados em termos da relação entre elementos mobilizáveis/imobilizáveis, conteúdo de silício, na alteração química e por meio de índices normalizados, conforme Quadro 2.1.

Quadro 2.1 – Índices químicos avaliados no presente trabalho.

	Índices Químicos	Autor
Índices químicos baseados em relações moleculares elementos mobilizáveis/imobilizáveis	$ba = \frac{K_2O + Na_2O + CaO}{Al_2O_3}$ $ba1 = \frac{K_2O + Na_2O}{Al_2O_3}$ $ba2 = \frac{CaO + MgO}{Al_2O_3}$ $ba3 = \frac{K_2O + Na_2O + MgO}{Al_2O_3}$	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
Índices químicos baseados no conteúdo de silício	$SF = \frac{SiO_2}{Fe_2O_3}$	Jenny, 1941
	$Sílica/R_2O_3 = \frac{SiO_2}{Al_2O_3 + Fe_2O_3 + TiO_2}$	
	$PI = \frac{SiO_2}{SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3 + FeO + TiO_2}$	Reiche, 1943
	$R = \frac{SiO_2}{Al_2O_3}$	Ruxton, 1986
	$STI = \frac{\frac{SiO_2}{TiO_2}}{\frac{SiO_2}{TiO_2} + \frac{SiO_2}{Al_2O_3} + \frac{Al_2O_3}{TiO_2}}$	Jayawardena e Iazama, 1994
Índices químicos baseados na alteração química	$CIA = \frac{Al_2O_3}{Al_2O_3 + CaO + Na_2O + K_2O} \times 100$	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
Índices químicos normalizados	$B = \frac{b_{alterado}}{b_{são}}$	Harrassowitz, 1926
	$LCHFactor = \frac{I_{alterado}}{I_{são}}, \text{ onde } I = \frac{K_2O + Na_2O}{SiO_2}$	Jenny, 1941
	$K = \frac{I_{alterado}}{X_{são}}, \text{ onde } I = \frac{SiO_2}{Al_2O_3} \quad X = \frac{K_2O + Na_2O + CaO}{Al_2O_3}$	Rocha Filho et al., 1985

4. Resultados e Discussões

4.1. Composição mineralógica: Lâmina petrográfica e DRX

A composição mineralógica dos filitos estudados identificada por meio da análise de lâminas petrográficas, consiste em muscovita/sericita, quartzo, opacos, óxidos de ferro, clorita e minerais de argila. Na Figura 2.2 são exemplificados os principais aspectos encontrados.

A DRX confirma os minerais identificados em lâmina micropetrográfica. Nas Figuras 2.3, 2.4 e 2.5 são apresentados os difratogramas dos três perfis de intemperismo.

Os picos do quartzo e da muscovita estão presentes desde o filito levemente alterado (W1/W2, perfil Fil02) ao filito muito alterado (W4, perfil Fil01) (Figuras 2.3, 2.4 e 2.5), porém a intensidade dos picos tende a diminuir com a progressão do intemperismo. Este comportamento é esperado, uma vez que o quartzo e a muscovita são os constituintes principais

e os mais resistentes ao intemperismo e, em função do surgimento de novos minerais, sua participação percentual vai sendo reduzida.

Feldspato, talco e pirofilita, embora não tenham sido identificados em lâmina petrográfica, foram detectados na análise de DRX. O feldspato foi identificado no perfil Fil01 somente no filito W2 e no perfil Fil03 apenas em uma das amostras coletadas do filito W3. No perfil Fil02, verificou-se a presença deste mineral do grau W1/W2 ao W3/W4, com uma queda significativa da intensidade do pico neste último nível. Este comportamento é esperado em perfis de intemperismo de rochas metamórficas de alto grau (gnaisse) desenvolvidos em clima tropical, em que os feldspatos tendem a desaparecer no saprolito e no solo residual (Dobereiner et al., 1993). Talco e pirofilita foram identificados nos perfis Fil01 e Fil02 até o filito W3, enquanto nos filitos W3/W4 e W4 já não são mais encontrados.

A clorita foi detectada no perfil Fil02 e está presente até o filito W3, não sendo mais encontrada em W3/W4. A caulinita é o mineral de argila presente em todos os graus de alteração estudados, resultante da alteração de feldspatos, cloritas e muscovitas, constituindo o produto de intemperismo mineral dominante, aparecendo desde a rocha levemente a muito alterada. A illita foi observada nos filitos W3 (perfil Fil03), W3/W4 (perfil Fil02) e W4 (perfil Fil01). De forma semelhante, Dobereiner et al. (1993) constataram que caulinita e illita são os principais minerais de argila em perfil de gnaisse e formam-se desde os primeiros estágios de intemperismo. Gibbsita aparece no filito W3/W4 (perfil Fil02) e goethita no filito W4 (perfil Fil03), demonstrando o estágio mais avançado de intemperismo desses níveis. Os dados obtidos do presente estudo são semelhantes aos encontrados por Varajão et al. (2009) que relatam a presença de caulinita como produto de alteração de feldspatos em saprolitos de perfis de intemperismo de filito da Formação Fecho do Funil.

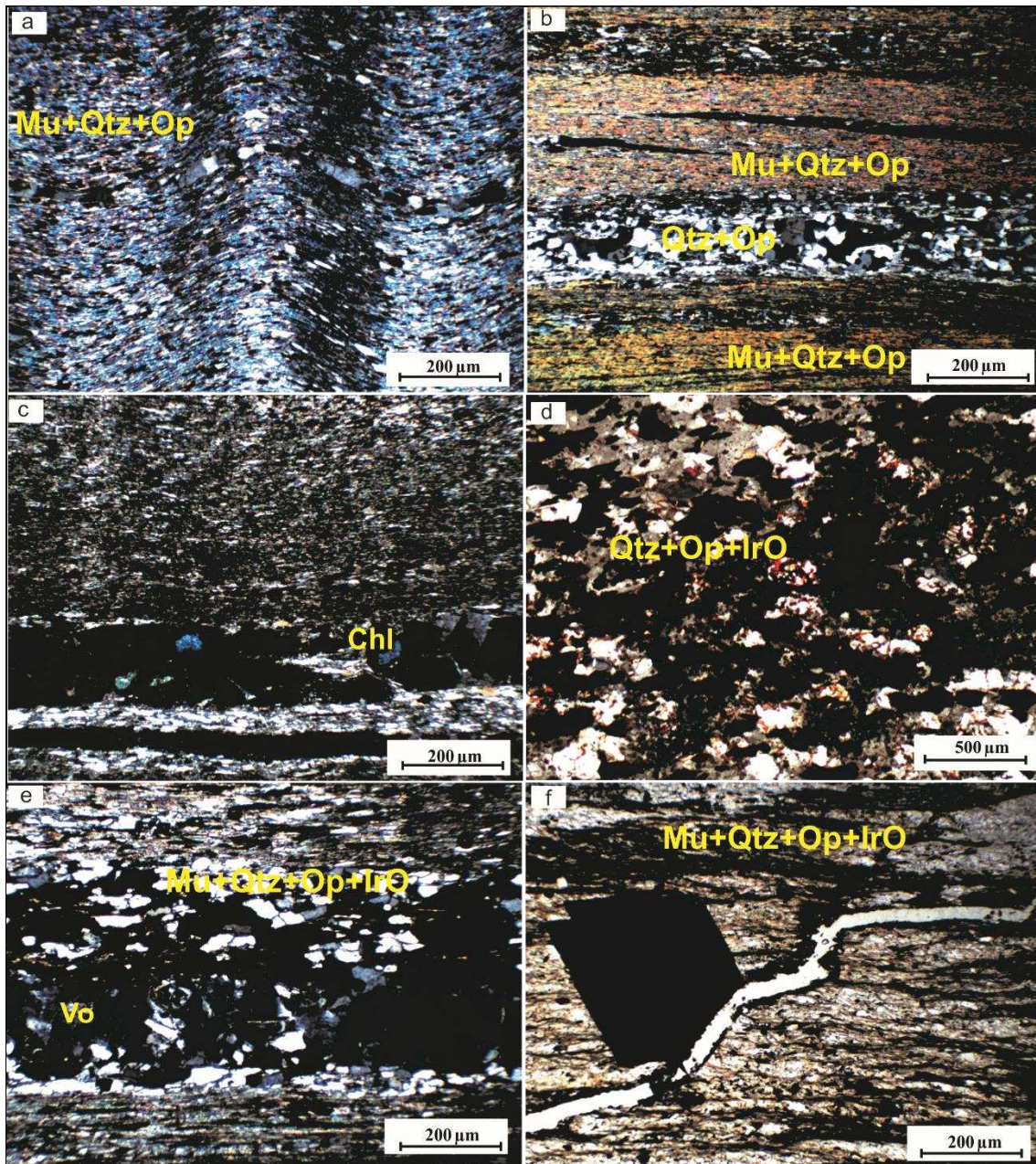


Figura 2.2 - Lâminas petrográficas mostrando as principais características mineralógicas dos filitos. Estes possuem granulação fina, com foliação marcante dada pelos filossilicatos. Em (a) observa-se bandas milimétricas ricas em muscovita com minerais opacos e quartzo, os quais apresentam estiramento mineral. Formação de microdobras (filito W2/W3). Em (b) verifica-se a alternância de bandas micáceas e quartzosas, alteração de opacos e fraturas paralelas à foliação (filito W2/W3). Em (c) veio constituído por cloritas, das quais boa parte encontra-se alterada a caulinita (filito W3). Em (d) precipitação de óxido/hidróxido de ferro sobre os grãos e em fraturas intragranulares de quartzo, formando crosta ferruginosa (filito Fil03W3). Em (e) geração de vazios e opacos intensamente alterados (filito W3/W4). Em (f) precipitação de óxidos de ferro na matriz e em fratura transgranular (Filito W4). As siglas significam: *Chl* clorita; *IrO* óxidos/hidróxidos de ferro; *Mu* muscovita; *Op* opacos; *Qtz* quartzo; *Vo* vazios.

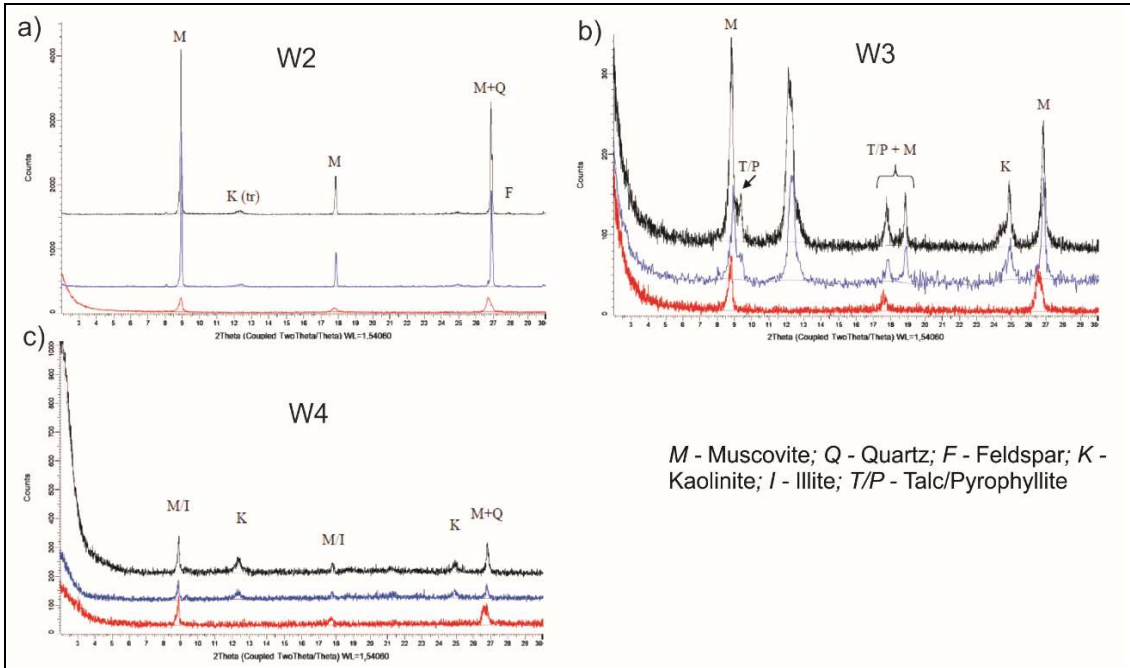


Figura 2.3 - DRX dos diferentes graus de alteração de filito do perfil Fil01. A cor preta nos difratogramas refere-se a condição normal da fração fina, a azul representa as amostras saturadas com etileno-glicol e a vermelha são de amostras aquecidas a 525 °C.

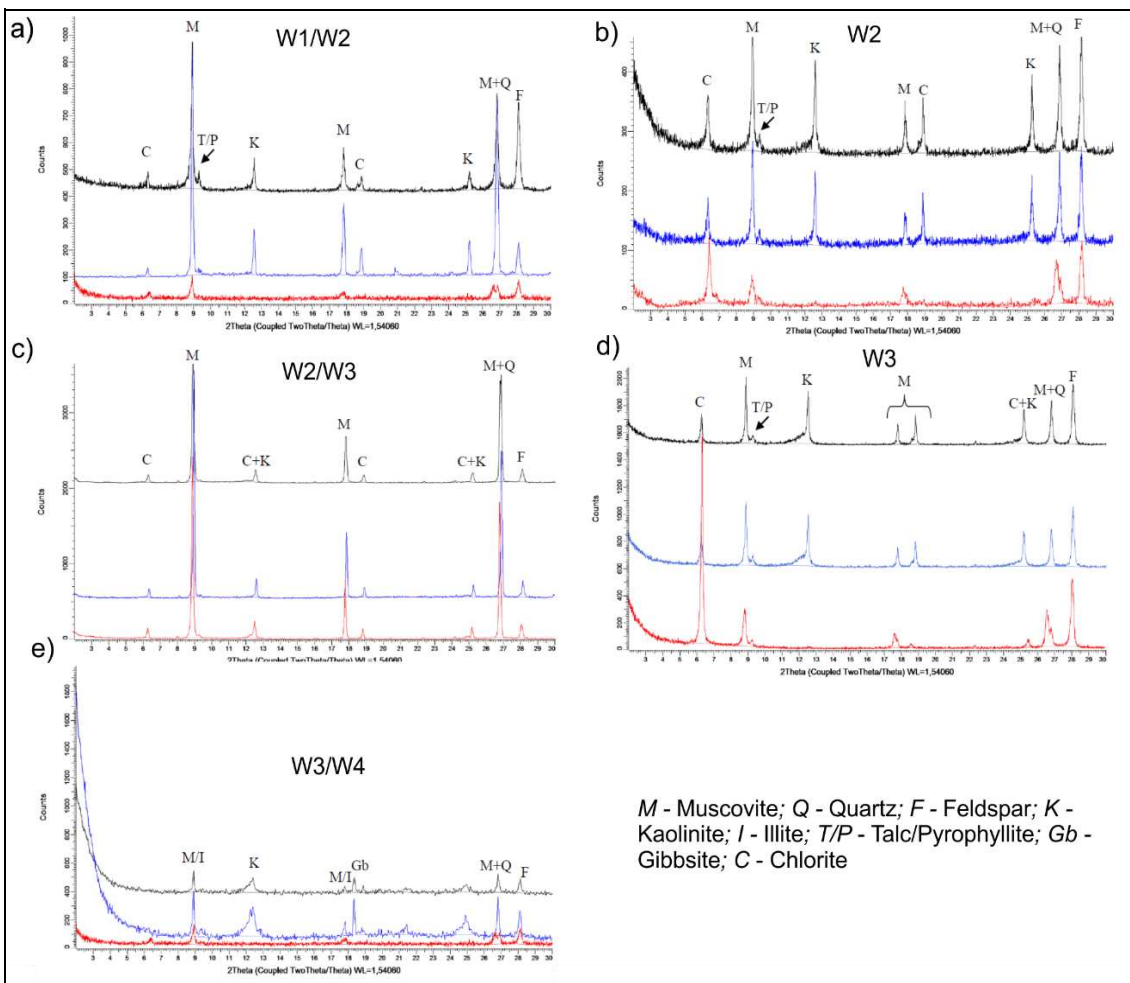


Figura 2.4 - DRX dos diferentes graus de alteração de filito do perfil Fil02.

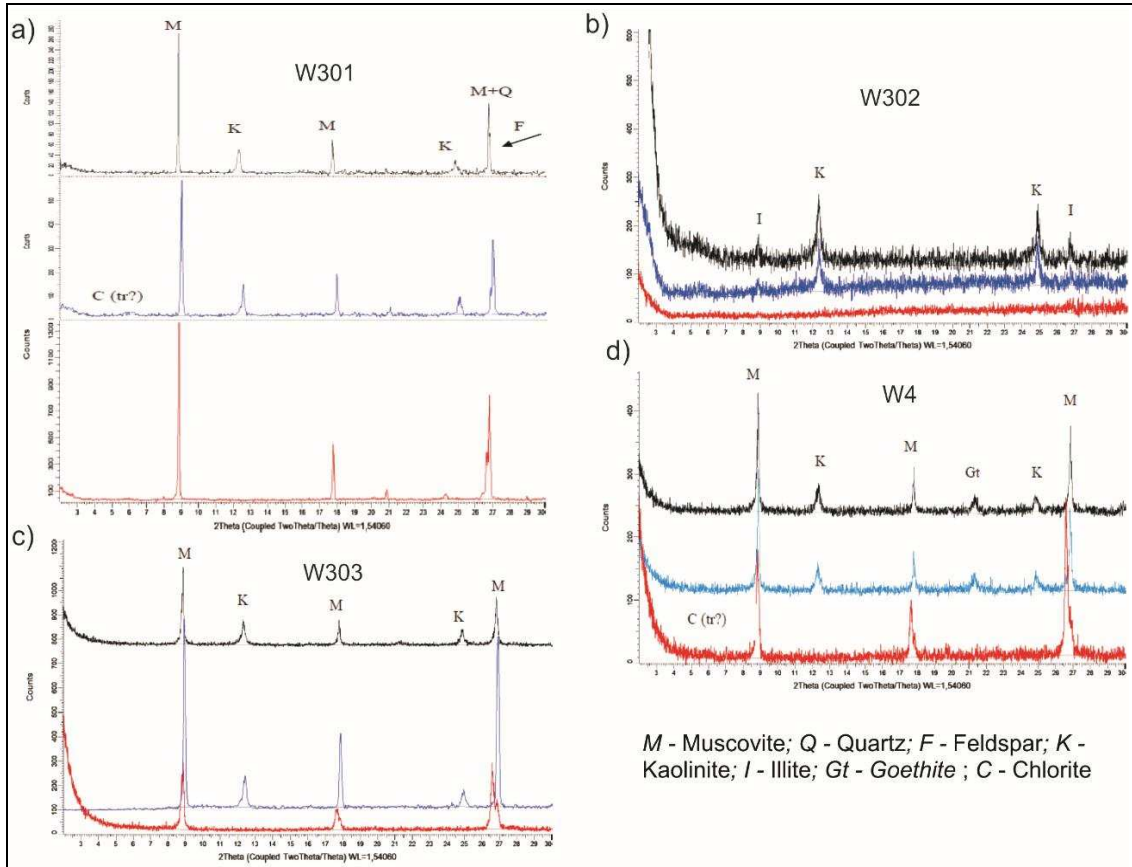


Figura 2.5 - DRX dos diferentes graus de alteração de filito do perfil Fil03.

4.2. Fluorescência de raios-X (FRX)

A composição química obtida por FRX para os filitos em diferentes graus de alteração são compatíveis com a mineralogia identificada por DRX e lâmina petrográfica. Os resultados, expressos em porcentagens de óxidos (Tabela 2.1), confirmam a presença predominante de sílica e alumínio que compõem as estruturas do quartzo e filossilicatos, e, em menor proporção, a presença de elementos alcalinos terrosos, com destaque para o potássio, que constitui muscovita/sericita e feldspato. Na Tabela 2.2 são apresentados os resultados para os elementos menores, em ppm.

Tabela 2.1 - Média dos valores em porcentagem dos elementos maiores para todos os perfis (Fil01, Fil02 e Fil03).

		Classes de	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	Na ₂ O	SiO ₂	TiO ₂
		intemperismo								
Fil01	W2		20.82	0.42	13.49	5.66	1.73	1.85	54.23	1.22
	W3		18.58	0.37	13.44	5.41	1.57	2.14	56.75	0.99
	W4		13.79	0.30	4.98	4.15	1.38	2.05	35.75	0.46
Fil02	W1/W2		23.48	2.35	9.12	3.23	1.92	2.04	56.52	0.74
	W2		27.24	1.24	13.64	5.14	3.22	1.64	45.85	0.93
	W2/W3		26.32	0.92	11.83	6.10	1.13	1.72	49.89	1.45
	W3		23.79	1.32	12.04	5.79	1.79	2.15	45.25	0.76

	W3/W4	21.97	0.26	9.33	3.85	0.86	2.29	39.67	0.88
Fil0 3	W301	16.90	0.24	9.65	3.54	2.11	1.85	65.50	0.47
	W302	26.36	0.44	7.41	6.29	1.76	1.81	54.24	0.75
	W303	24.00	0.39	7.78	5.28	2.11	1.19	45.51	0.59
	W4	20.86	0.37	5.15	5.43	0.60	2.17	42.42	0.58

Tabela 2.2 - Média dos valores em ppm dos elementos menores para todos os perfis (Fil01, Fil02 e Fil03).

	Classes de intemperismo	Cr ₂ O ₃	MnO	Sb ₂ O ₃	SrO	ThO ₂	U ₃ O ₈	As ₂ O ₃	ZrO ₂
Fil01	W2	270.31	291.52	79.22	34.04	19.98	8.87	95.79	180.59
	W3	191.02	961.78	117.27	70.88	31.61	8.16	212.29	112.32
	W4	267.98	2285.51	39.63	31.34	3.22	4.90	53.96	163.04
Fil0 2	W1/W2	334.92	91.40	144.43	278.33	9.82	4.19	117.70	182.14
	W2	885.97	536.43	14.00	242.82	47.02	6.59	203.68	175.16
	W2/W3	280.45	131.06	26.77	201.04	18.28	3.53	98.63	171.94
	W3	494.65	352.32	28.55	245.08	13.07	7.25	201.96	161.69
	W3/W4	370.95	5338.75	38.98	92.13	11.37	4.84	151.37	202.04
Fil0 3	W301	251.87	50.33	44.19	117.67	23.21	8.87	207.13	217.43
	W302	787.38	70.56	12.91	115.45	29.12	8.06	222.63	181.35
	W303	707.84	34.16	75.48	177.56	19.02	8.46	214.88	140.28
	W4	288.88	51.02	40.28	79.74	19.52	6.36	143.60	137.05

Nos gráficos da Figura 2.6 os elementos maiores foram normalizados utilizando como base a concentração da rocha parental ($X_{\text{Amostra}}/X_{\text{Parental}}$) (Duzgoren-Aydin et al., 2002). Dessa forma, se o valor do elemento normalizado X for inferior a 1, houve mobilização do elemento na amostra analisada em relação à concentração da rocha parental. Se, por outro lado, o valor for superior a 1, significa que houve enriquecimento do elemento. Para a confecção dos gráficos foram utilizados os dados geoquímicos dos perfis Fil01 e Fil02, uma vez que possuem pelo menos três classes de intemperismo distintas, enquanto o perfil Fil03 apresenta somente duas (W3 e W4).

O comportamento dos elementos maiores mostra, no geral, que, com o aumento do intemperismo, há lixiviação de Si, Al, Ca, K (perfil Fil01), Mg e Ti (perfil Fil01). Os elementos Ti (perfil Fil02), Na (perfis Fil01 e Fil02) e K (perfil Fil02) exibem um pequeno aumento. A perda dos elementos deve-se ao intemperismo de feldspatos, cloritas, talco/pirofilita, que tende a ocorrer principalmente até a rocha medianamente alterada (filito W3), como se observa nos difratogramas dos filitos W3/W4 (perfil Fil02) e W4 (perfis Fil01 e Fil03) (Figuras 2.3, 2.4 e 2.5), em que não se detecta mais a presença desses minerais.

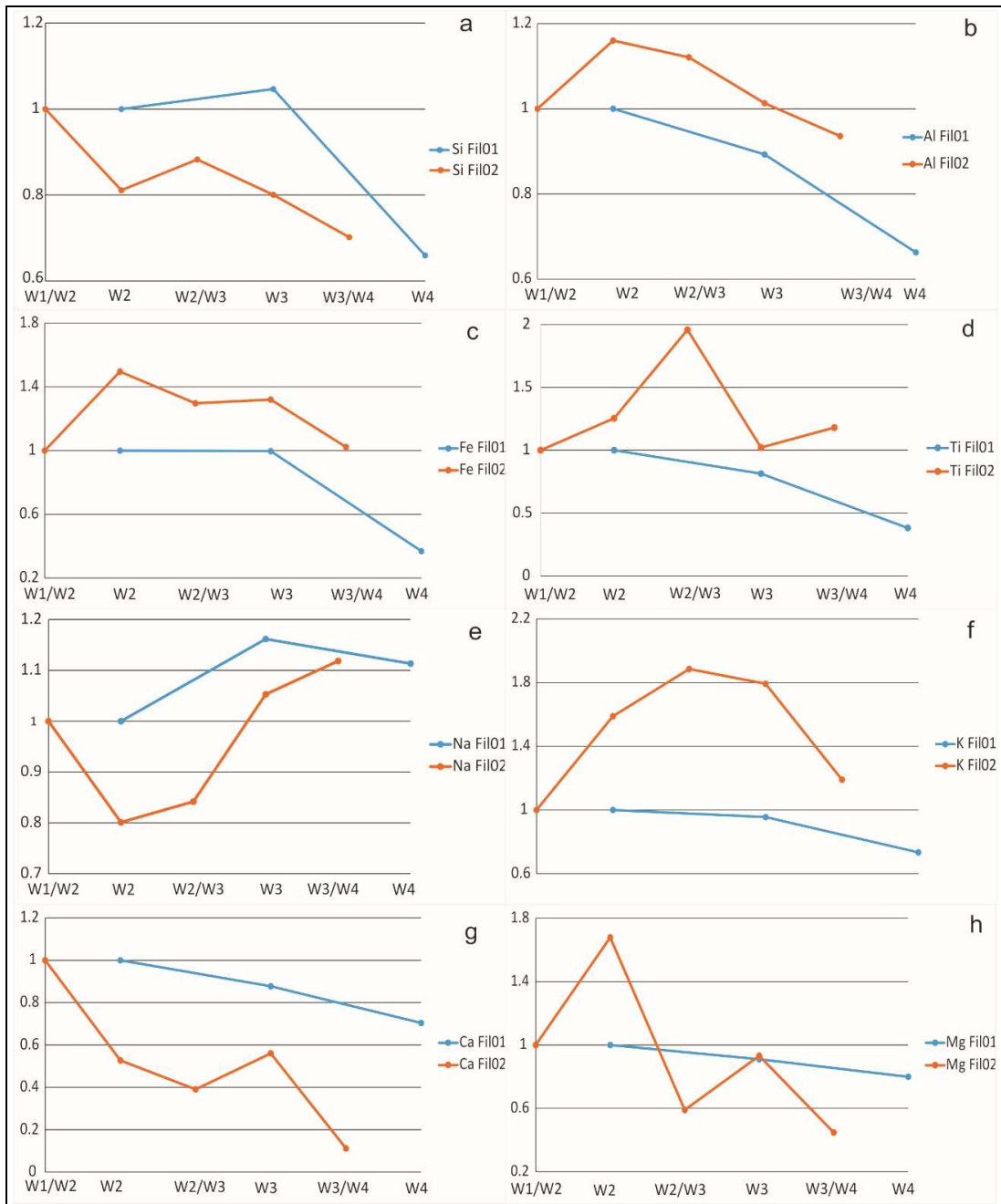


Figura 2.6 - Evolução do comportamento dos elementos maiores normalizados pela rocha parental com o aumento do grau de intemperismo.

O Fe_2O_3 diminuiu de W2 para W4 no perfil Fil01, enquanto permaneceu constante comparando os membros extremos do perfil Fil02 (Figura 2.6c). Esperava-se o aumento de Fe_2O_3 devido à oxidação de FeO durante o intemperismo (Khanlari et al, 2012), principalmente porque a micropetrografia revelou o aumento da precipitação de óxidos de Fe na matriz e em microfraturas nos filitos mais alterados. Essa variação da concentração de Fe_2O_3 , provavelmente, está relacionada à presença de fraturas e microfraturas (que se intensificam com o aumento da alteração), sendo removido como Fe^{+2} de determinados níveis e se precipitando

como Fe^{+3} em outros, como sugerido por Leão (2017) em seu trabalho com filitos do Quadrilátero Ferrífero.

A Figura 2.6f mostra aumento na quantidade de K nas amostras W2, W2/W3 e W3 em relação à amostra W1/W2 no perfil Fil02. Este incremento ocorre devido à presença de feldspato, como detectado na análise de DRX (Figura 2.4), cuja alteração dá origem à caulinita. Nota-se que a partir do filito W3 nos perfis 1 e 2 há uma queda mais acentuada de K, que está relacionada a dois fatores: ao intemperismo mais avançado dos feldspatos, uma vez que o pico deste mineral já não está presente nos difratogramas das amostras W3 e W4 do perfil Fil01 (Figuras 2.3b e 2.3c), enquanto diminui significativamente no difratograma de W3/W4 do perfil Fil02 (Figura 2.4e); e à formação de illita, que se verifica em W3/W4 (Figura 2.4e) e W4 (Figura 2.3c), tendo como consequência a perda parcial de K, devido à fase inicial do intemperismo da muscovita.

A perda do Mg parece estar intimamente relacionada ao intemperismo da clorita com o aumento da degradação no perfil Fil02 (Figura 2.6h), a qual transforma-se em caulinita. Esta relação pode ser melhor observada pelas variações da intensidade dos picos da clorita nos difratogramas (Figura 2.4) que coincidem com as mudanças das concentrações de Mg. Em W3/W4 (perfil Fil02), a ação intempérica é mais severa, não se detectando mais a presença de picos de clorita no difratograma e, como consequência, verifica-se uma queda mais acentuada da concentração de Mg. Aspandiar e Eggleton (2002a) verificaram que a transformação de clorita para minerais de argila em regolito derivado de basalto, foi caracterizada pela perda de Mg, Fe e Al. Entretanto, os mecanismos e produtos de alteração da clorita foram influenciados pela distância a macro e micro-fissuras, que funcionam como passagens de soluções (Aspandiar e Eggleton, 2002a,b).

Salienta-se que, de forma similar a este estudo, Varajão et al. (2009) verificaram a irregularidade do comportamento, ou melhor, a não linearidade de concentração de elementos químicos maiores, especificamente Ca, Na e Mg, em perfis de intemperismo de diferentes litologias do Quadrilátero Ferrífero, incluindo filitos, atribuindo como causa a variação mineralógica e a baixa maturidade dos perfis.

4.3. Índices Químicos

Com base nos resultados de FRX (Tabelas 2.1 e 2.2) são apresentados os índices químicos (Tabelas 2.3, 2.4, 2.5 e 2.6), conforme listados anteriormente no Quadro 2.1, para as três frentes de intemperismo.

Tabela 2.3 – Índices químicos ba, ba1, ba2 e ba3, Bases R2O3 e Al, WR e b1.

	Classe de alteração	ba	ba1	ba2	ba3	Bases:Al	Bases R ₂ O ₃	WR	b1
Fii01	W2	0.38	0.36	0.10	0.44	0.46	0.27	0.02	17.12
	W3	0.43	0.41	0.10	0.49	0.51	0.29	0.04	18.77
	W4	0.47	0.45	0.12	0.55	0.57	0.41	0.02	29.73
Fii02	W1/W2	0.32	0.22	0.18	0.31	0.41	0.29	0.03	31.62
	W2	0.29	0.25	0.16	0.37	0.41	0.27	0.03	29.25
	W2/W3	0.33	0.30	0.08	0.34	0.37	0.25	0.02	18.10
	W3	0.39	0.33	0.13	0.41	0.46	0.30	0.03	31.38
	W3/W4	0.29	0.28	0.05	0.32	0.33	0.23	0.02	25.06
Fii03	W301	0.33	0.32	0.14	0.44	0.46	0.29	0.02	35.69
	W302	0.32	0.31	0.08	0.37	0.39	0.30	0.02	35.19
	W303	0.29	0.27	0.10	0.36	0.37	0.28	0.03	40.37
	W4	0.38	0.36	0.05	0.39	0.41	0.32	0.02	35.76

Tabela 2.4 - Índices químicos SF, Sílica/R₂O₃, PI, R, STI e W11/W1-2.

	Classe de alteração	SF	Sílica/R ₂ O ₃	PI	R	STI
Fii01	W2	4.02	1.53	0.60	2.60	0.69
	W3	4.22	1.72	0.63	3.05	0.72
	W4	7.19	1.86	0.65	2.59	0.70
Fii02	W1/W2	6.20	1.70	0.63	2.41	0.69
	W2	3.36	1.10	0.52	1.68	0.61
	W2/W3	4.22	1.26	0.56	1.90	0.63
	W3	3.76	1.24	0.55	1.90	0.64
	W3/W4	4.25	1.23	0.55	1.81	0.63
Fii03	W301	6.79	2.42	0.71	3.88	0.78
	W302	7.32	1.57	0.61	2.06	0.66
	W303	5.85	1.41	0.58	1.90	0.64
	W4	8.23	1.59	0.61	2.03	0.66

Tabela 2.5 - Índices químicos CIA, CIW, ALKRatio, PIA e V.

	Classe de alteração	CIA	V	CIW	ALKRatio	PIA
F101	W2	0.72	6.62	0.90	0.75	0.87
	W3	0.70	5.86	0.88	0.72	0.84
	W4	0.68	4.80	0.85	0.67	0.80
F102	W1/W2	0.75	4.23	0.84	0.61	0.82
	W2	0.77	5.31	0.90	0.76	0.88
	W2/W3	0.75	8.60	0.91	0.78	0.88
	W3	0.72	5.63	0.87	0.73	0.84
	W3/W4	0.77	7.58	0.90	0.63	0.88
F103	W301	0.75	4.86	0.89	0.66	0.86
	W302	0.76	8.15	0.92	0.78	0.90
	W303	0.78	7.94	0.94	0.82	0.92
	W4	0.72	8.36	0.89	0.71	0.86

Tabela 2.6 - Índices normalizados B, LchFactor e K .

	Classe de alteração	B(ba)	B (ba1)	B (ba2)	B(ba3)	LCHFactor	K
F101	W2	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	6.84
	W3	1.12	1.13	1.01	1.11	0.96	8.02
	W4	1.24	1.25	1.18	1.24	1.25	6.81
F102	W1/W2	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	7.41
	W2	0.91	1.11	0.90	1.20	1.58	5.18
	W2/W3	1.02	1.32	0.43	1.11	1.68	5.84
	W3	1.20	1.49	0.72	1.34	1.88	5.86
	W3/W4	0.90	1.24	0.28	1.04	1.66	5.56
F103	W301	1.02	1.42	0.77	1.45	0.88	11.93
	W302	1.00	1.37	0.46	1.22	1.60	6.34
	W303	0.88	1.20	0.57	1.17	1.52	5.84
	W4	1.18	1.62	0.26	1.28	1.92	6.26

Na Figura 2.7 são relacionados elementos químicos considerados imóveis (Al_2O_3 e TiO_2) e elementos químicos que reduzem a sua concentração pela evolução dos processos intempéricos e aumento da lixiviação (SiO_2 , Na_2O , K_2O , CaO e MgO). Os índices ba, ba1, ba2 e ba3 mostraram aumento constante para o perfil Fil01 devido à redução de elementos mobilizáveis (como K_2O , CaO e MgO) e Al_2O_3 (considerado imóvel). Este mesmo comportamento foi refletido para os índices Bases Al e Bases R_2O_3 . O aumento dos índices ocorrido no perfil Fil01 deve-se à redução mais acentuada na concentração de Al_2O_3 . Para o

Perfil Fil02 todos os índices apresentaram redução (ba, ba2, ba3, Bases Al e Bases R_2O_3), com exceção do ba1. No perfil Fil03, os índices exibiram variações, inclusive entre a mesma classe de intemperismo. Isto se deve provavelmente à heterogeneidade química herdada da rocha. Ressalta-se que o índice ba2 pareceu ser mais sensível para capturar as variações do intemperismo nos perfis Fil02 e Fil03, chegando quase a 0 para o filito W4. Observa-se que os componentes móveis deste índice (CaO e MgO) diminuem em todos os perfis. Entretanto, como a concentração do Al_2O_3 permanece praticamente constante no perfil Fil02, o índice ba2 mostrou uma boa correlação com os graus de intemperismo. Já o índice WR ficou praticamente constante ao longo dos três perfis.

O índice b1 (Figura 2.7) mostrou tendência oposta para os perfis Fil01 e Fil02, permanecendo constante para Fil03, com exceção apenas da amostra W3. O perfil Fil01 apresentou redução de TiO_2 marcante, enquanto o perfil Fil02 exibiu um pequeno aumento, o que explica o comportamento de ambos. Duzgoren-Aydin et al. (2002) estudando rochas piroclásticas obtiveram um padrão semelhante ao do perfil Fil02. Os autores consideraram o índice não sensível o suficiente para capturar as variações do intemperismo, recomendando evitar índices que consistem em proporções de óxidos únicos.

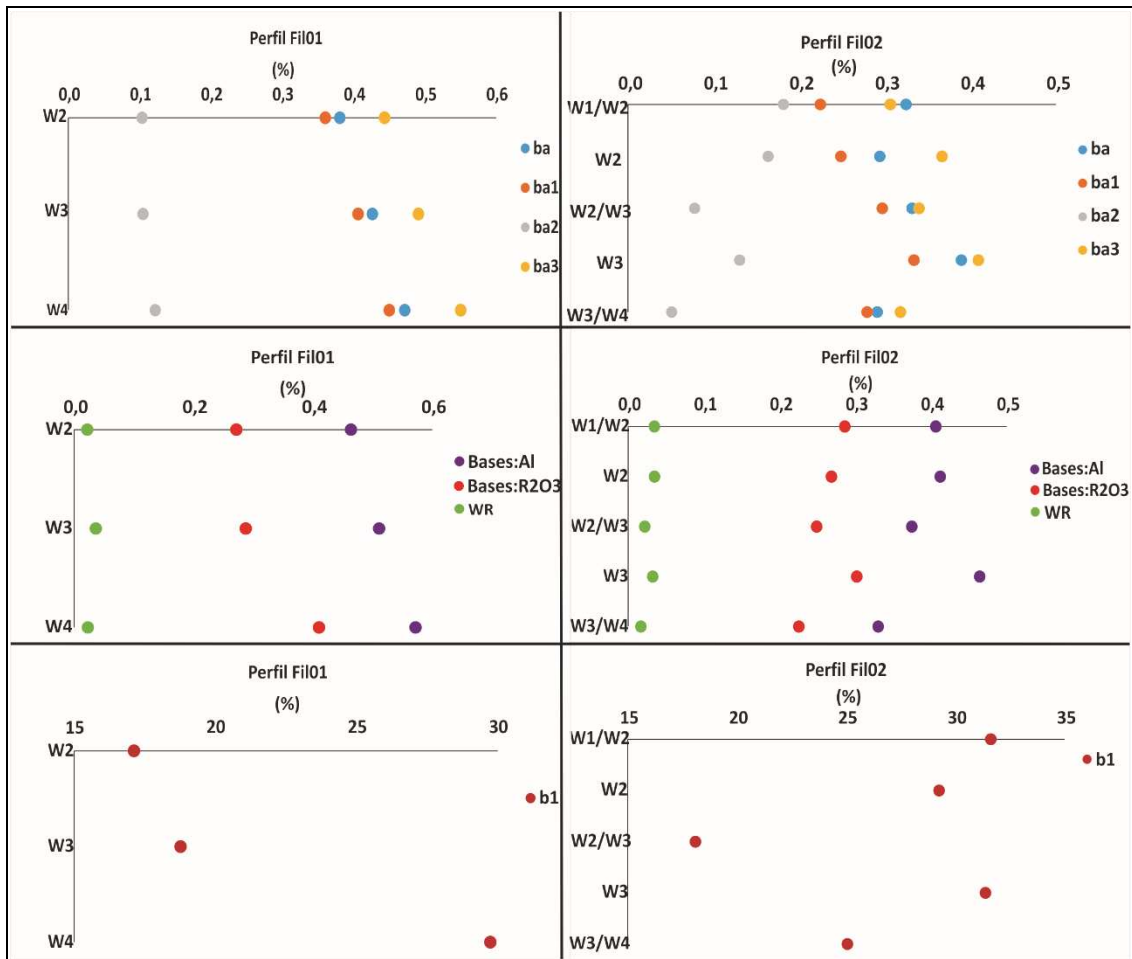


Figura 2.7 - Índices químicos relação mobilizável/imobilizável (ba, ba1, ba2 e ba3 – Harrassowitz. 1926; Bases R₂O₃ e Al – Colman. 1982; WR – Chittleborough. 1991; b1 – Rocha Filho et al. 1985).

Em termos de conteúdo de sílica (Figura 2.8), os índices mostraram variação pouco expressiva, exceto o índice SF, que destoou quando comparado graus de alteração extremos. O índice SF considera o Fe₂O₃ constante durante o intemperismo, no entanto, como a concentração deste óxido diminuiu significativamente de W2 para W4 nas amostras do perfil Fil01, o índice aumentou. No perfil Fil02, o conteúdo de Fe permanece praticamente constante entre os membros mais extremos, ocasionando a diminuição do índice. As tendências distintas dos perfis Fil01 e Fil02 podem ser explicadas pela presença de fraturas e microfraturas que propiciam variações na precipitação de Fe⁺³ (que tende a ocorrer em níveis mais oxigenados). Price e Velbel (2000) demonstraram que em um perfil de intemperismo as fraturas tectônicas na rocha mãe controlavam a complexa redistribuição do ferro durante o intemperismo. Os autores sugeriram que a oxidação do ferro ferroso em ferro férrico foi ocasionada pela água subterrânea rica em oxigênio que flui ao longo das juntas, propiciando o enriquecimento de ferro na face dessas discontinuidades. Os resultados da presente pesquisa indicam que índices

que tem como base o Fe_2O_3 como único óxido imóvel avaliador, como o SF, não são adequados para a avaliação dos graus de intemperismo em se tratando das rochas metamórficas estudadas.

A sutil e progressiva tendência dos índices PI, R e STI sugere a alteração de feldspatos, cloritas, talco e pirofilita que correspondem a uma pequena porcentagem dos minerais dos filitos estudados, dos quais somente a clorita foi identificada por lâmina petrográfica, sendo os demais por DRX. O aumento contínuo do índice Sílica/ R_2O_3 ao longo do perfil Fil01 deve-se à diminuição de Al, Fe e Ti (considerados imóveis). Enquanto a rápida redução do índice das amostras W1/W2 para W2 no perfil Fil02 é explicada pela tendência oposta destes elementos. Semelhante ao presente estudo, Gupta e Rao (2001) obtiveram uma pequena variação para o índice STI e pouca expressividade para o índice PI em quartzitos, granitos e basaltos. Duzgoren-Aydin et al. (2002) encontraram uma pobre correlação entre rochas piroclásticas e graus de intemperismo expressa pelos índices SF, Sílica/ R_2O_3 , PI e R. O índice STI, embora não tenha apresentado variação regular, diminuiu com o aumento do intemperismo no perfil Fil02. Esta tendência foi análoga às rochas metamórficas submetidas ao intemperismo de clima tropical estudadas por Jayawardena e Izawa (1994), a partir das quais os autores propuseram tal índice. A característica comum no padrão dos índices PI, R e STI indica que a seleção do SiO_2 como único óxido móvel avaliador do intemperismo não é apropriada, pois como o Si mobilizado até a rocha muito alterada (W4) e parece ser principalmente oriundo de minerais acessórios, a expressividade desses índices é bastante sutil, embora possam apresentar tendências gerais. O índice Sílica/ R_2O_3 também não se mostrou adequado, pois, além deste motivo, é fortemente baseado nos óxidos Al_2O_3 , Fe_2O_3 e TiO_2 , considerados como imóveis, o que não ocorre ao longo dos perfis estudados.

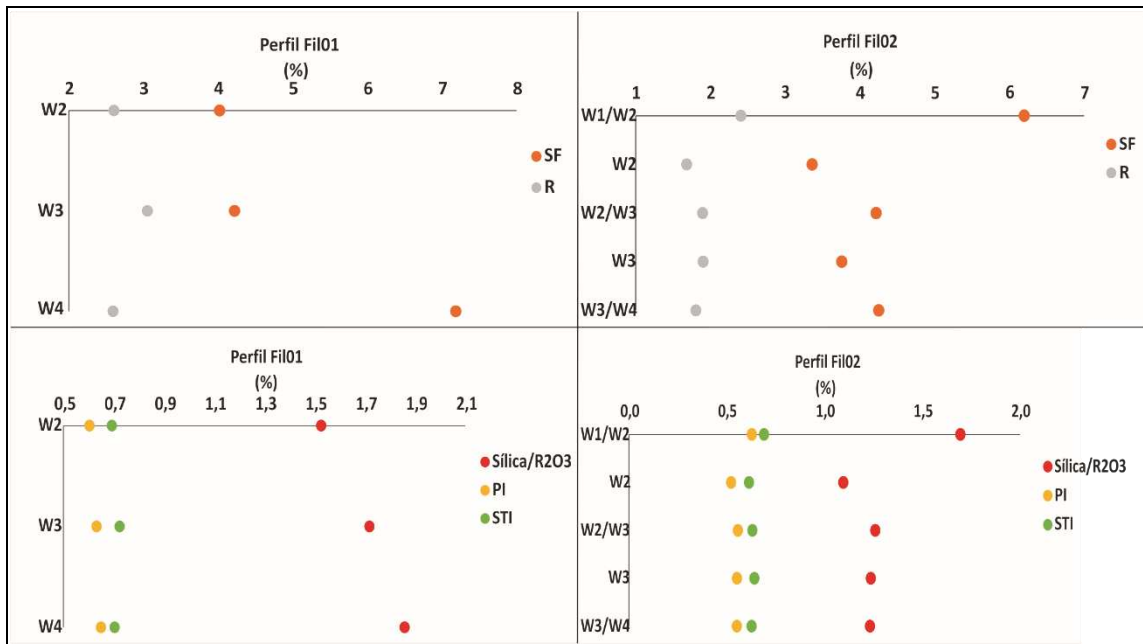


Figura 2.8 - Índices químicos baseados no conteúdo de sílica (SF e Sílica/R₂O₃ – Jenny, 1941; PI – Reiche, 1943; R – Ruxton, 1986; STI – Jayawardena e Iazama, 1994).

Na Figura 2.9 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 CIW exclui K₂O da sua fórmula, não sendo recomendada sua aplicação para rochas e solos que possuam K-feldspato, ou minerais derivados.

Os índices CIA, CIW, AlkRatio e PIA apresentaram o comportamento esperado, já que a presença de feldspatos nas amostras é discreta. Em folhelhos o índice CIA varia em torno de 70% e 75% (Nesbit 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, sendo compatíveis com os valores observados em todos os perfis. O índice V variou mais expressivamente conforme a evolução intempérica, entretanto, não exibiu sensibilidade suficiente para registrá-la. Nenhum dos índices (CIA, CIW, AlkRatio, PIA e V) correlacionaram-se bem com o grau de intemperismo dos filitos estudados. Price e Velbel (2003) constataram que a aplicação dos índices CIA, CIW, PIA e V deve ser feita com extrema cautela em perfis derivados de rocha heterogênea, uma vez que assumem o Al₂O₃ como imóvel.

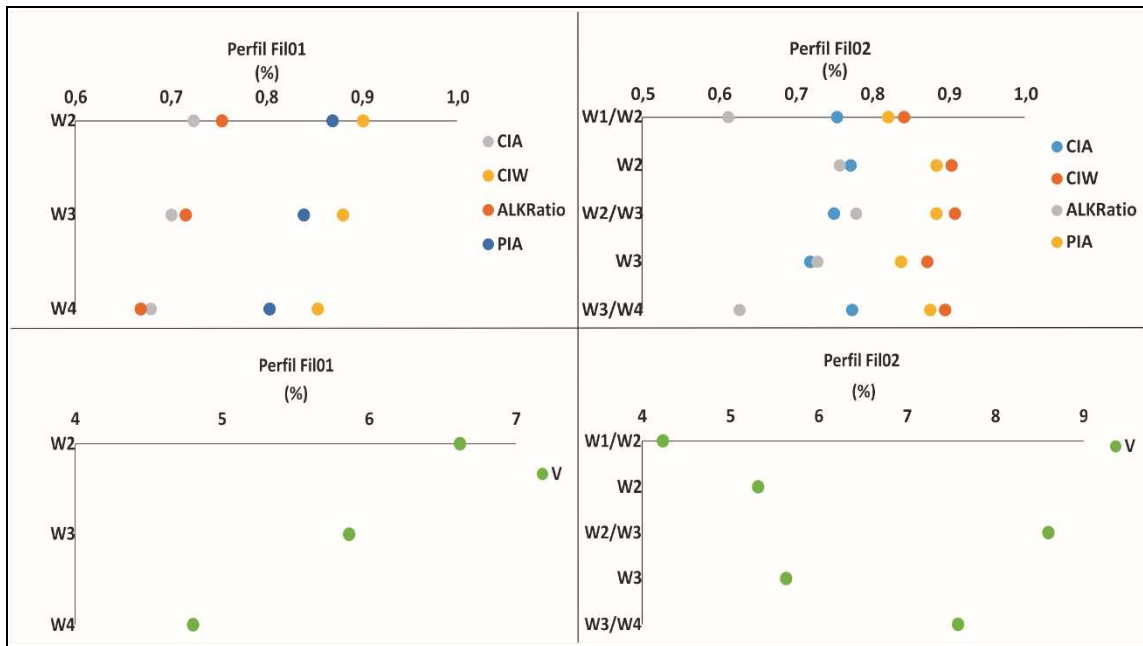


Figura 2.9 - Índices baseados na alteração química (CIA – Nesbitt e Young, 1982; CIW – Harnois, 1988; ALKRatio – Harnois e Moore, 1988; PIA – Fedo et al. 1995; V – Vogt, 1972).

A Figura 2.10 apresenta os índices normalizados B (a partir dos índices ba, ba1, ba2 e ba3), que mostram aumento para a maior parte das amostras conforme o avanço do intemperismo, com exceção do índice B(ba2) do perfil Fil02. O índice K diminuiu nos perfis Fil02 e Fil01, sendo neste último uma redução bem discreta. Os índices normalizados não foram calculados para o perfil Fil03, uma vez que nesta frente de intemperismo foram coletadas apenas amostras de filitos medianamente alterados e muito alterados, não sendo possível a normalização em relação a um membro são ou pouco alterado, como foi feito nos perfis Fil01 e Fil02. Os índices normalizados B e K são pouco conclusivos, pois consideram como imóveis o Al_2O_3 , o que não ocorre na prática, haja vista que todos os perfis mostraram que houve mobilização desse elemento até o filito W4.

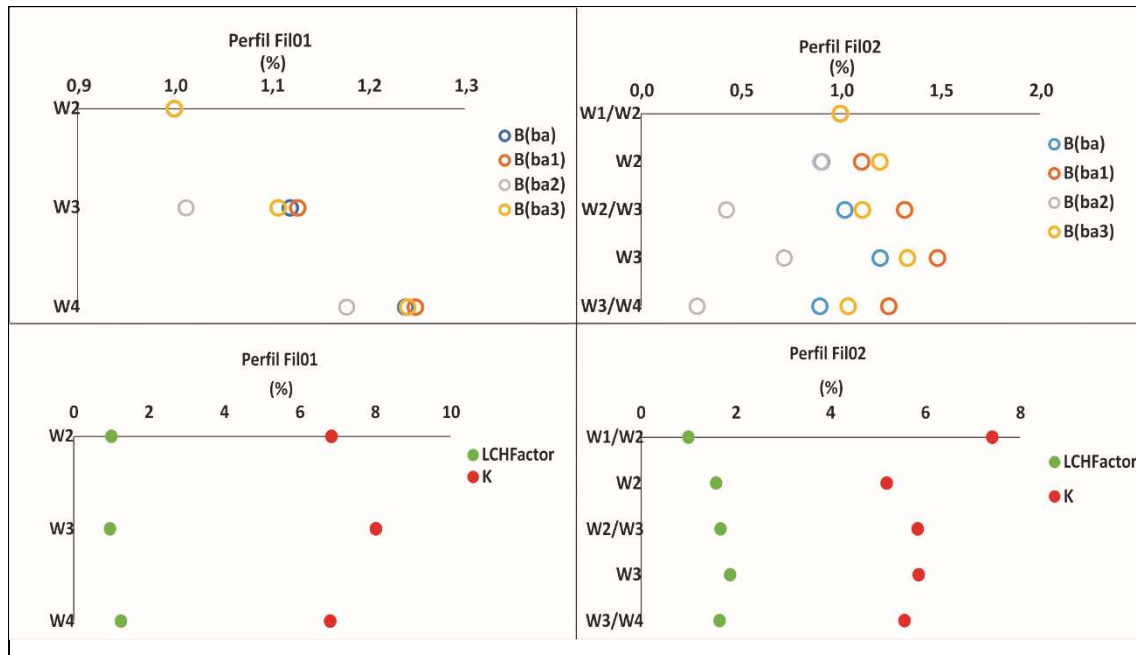


Figura 2.10 - Índices normalizados (B – Harrassowitz, 1926; LchFactor – Jenny, 1941; K – Rocha Filho et al., 1985)

5. Conclusão

A química dos filitos ao longo dos perfis de intemperismo variou principalmente devido à alteração de feldspato, clorita, talco e pirofilita, que não constituem a mineralogia principal das rochas, mostrando-se, portanto, bastante sutil. A mobilização de metais alcalinos e alcalinos terrosos, sílica, alumínio, ferro e titânio, devido ao intemperismo desses minerais, se deu especialmente entre a rocha levemente alterada e a rocha medianamente alterada (W3), tendo como principal produto de alteração a caulinita. A partir do filito muito alterado (W4) iniciou-se o intemperismo da muscovita e o surgimento de outros minerais de argila (ilita, gibbsita e goethita).

Boa parte dos elementos químicos não mostraram padrão regular com o aumento da intensidade do intemperismo, especialmente no perfil Fil02. Embora os membros extremos dos perfis possam ter exibido tendências gerais, os níveis transicionais não refletiram um comportamento linear. Essa heterogeneidade química observada pode ser atribuída às características das amostras que, por sua vez, influenciaram os índices químicos. Estes mostraram pouca sensibilidade em registrar o grau de intemperismo, sendo pouco conclusivos.

Os índices que consideram o Al_2O_3 como óxido imobilizável não se mostraram adequados, como ba, ba1, ba3, Bases Al, Bases R_2O_3 , assim como B e K normalizados, CIA, V, CIW e PIA. A exceção se faz para o índice ba2, que captou as variações no perfil Fil02. Este índice demonstrou que os elementos Ca e Mg são adequados para serem utilizados como elementos mobilizáveis nos três perfis estudados, uma vez que diminuíram suas concentrações

da rocha pouco alterada para a rocha muito alterada. Porém, ele é apropriado apenas nos casos em que o Al_2O_3 permanece praticamente constante, como ocorreu no perfil Fil02. Os índices químicos baseados no conteúdo de silício também não foram apropriados até o filito W4, pois a sílica liberada até este estágio provém de minerais acessórios, e não da mineralogia principal da rocha, sendo, portanto, pouco expressivos.

Pela avaliação dos perfis de filito, observou-se que as alterações químicas e mineralógicas impostas pelo intemperismo até o filito muito alterado (W4) não foram profundas, tendo sido verificadas reduzidas quantidades de argilominerais.

Referências

Alkmim FF, Marshak S (1998) Transamazonian Orogeny in the southern São Francisco Craton region, Minas Gerais, Brazil: evidence for Paleoproterozoic collision and collapse in the Quadrilátero Ferrífero. *Precambrian Research* 90: 29-58

Aspandiar MF, Eggleton RA (2002) Weathering of chlorite: I. reactions and products in microsystems controlled by the primary mineral. *Clays and Clay Minerals* 50:685–698.

Aspandiar MF, Eggleton RA (2002) Weathering of chlorite: ii. reactions and products in microsystems controlled by solution avenues. *Clays and Clay Minerals* 50: 699–709

Chadwick AO, Brimhall GH, Hendricks DM (1990) From a black to a gray box a mass balance interpretation of pedogenesis. *Geomorphology*

Chittleborough DJ (1991) Indices of weathering for soils and paleosols formed on silicate rocks. *Australian Journal of Earth Sciences* 38: 15-20

Colman SM (1982) Chemical weathering of basalts and andesites: evidence from weathering rinds. *US Geol. Surv. Prof. Pap*, n. 1246: 51 p

Da Silva WG, França AVM, Sampaio JLD (2005) Folha Mariana, SF.23-X-B-I-3 e SF.23-X-B-IV-1, escala 1:50.000: projeto geologia do Quadrilátero Ferrífero - integração e correção cartográfica em SIG/ editores. CODEMIG, Belo Horizonte

Dobereiner L, Durville JL, Restituto J (1993) Weathering of the massiac gneiss (Massif Central, France). *Bull Int Assoc Eng Geol* 47:79–96. doi:10.1007/BF02639596

Duzgoren-Aydin NS, Aydin A, Malpas J (2002) Re-assessment of chemical weathering indices: case study on pyroclastic rocks of Hong Kong. *Engineering Geology* 63: 99-119

- Fedo CM, Nesbitt HW, Young GM (1995) Unraveling the effects of potassium metasomatism in sedimentary rocks and paleosols, with implications for paleoweathering conditions and provenance. *Geology* 23: 921-924
- Gardner LR (1980) Mobilization of AL and Ti during weathering - isovolumetric geochemical evidence. *Chemical Geology* 30: 151-165
- Gardner LR (1992) Long-term isovolumetric leaching of aluminum from rocks during weathering: implications for the genesis of saprolite. *Catena* 19: 521-537
- Gupta AS, Rao KS (2001) Weathering indices and their applicability for crystalline rocks. *Bull Eng Env* 60: 201-221. Doi 10.1007/s100640100113
- Harnois L (1988) The CIW index: a new chemical index of weathering. *Sedimentary Geology* 55: 319-322
- Harnois L, Moore JM (1988) Geochemistry and origin of the ore chimney formation, a transported paleoregolith in the Greenville Province of Southeastern Ontario, Canada. *Chemical Geology* 69: 267-289
- Harrassowitz H. Laterit (1926) Material und Versuch erdgeschichtlicher Auswertung. *Fortschritte der Geologie und Paläontologie* 4: 14
- Holanda CEF, Bueno GT (2010) Comportamento de elementos químicos em ambiente supergênico e pedogênese – Parque Municipal das Mangabeiras, Quadrilátero Ferrífero (MG). *Rev. de Geografia* 3
- Hu R, Oyediran IA, Gao W, Zhang X, Li HL (2014) “Plagioclase solution degree index”: a new index to evaluate the weathering degree of granite. *Bull Eng Geol Environ* 73: 589–594
- ISRM (2015) The IRSM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring: 2007–2014. Springer, Cham.
- Jayawardena U, Izawa E (1994) A new chemical index of weathering for metamorphic silicate rocks in tropical regions. *Engineering Geology* 36: 303-310
- Jenny H (1941) *Factors of soil formation*. New York, McGraw-Hill, 281 p
- Khanlari GR, Heidari M, Momeni AA (2012) Assessment of weathering processes effect on engineering properties of Alvand granitic rocks (west of Iran), based on weathering indices. *Environ Earth Sci* (2012) 67:713–725. [https://doi: 10.1007/s12665-011-1518-6](https://doi.org/10.1007/s12665-011-1518-6)

- Khanlari GR, Naseri F (2016) Investigation of physical deterioration of Malayer granitic rocks using a new weathering coefficient (Kr4). *Environ Earth Sci* 75:414. [https://doi: 0.1007/s12665-015-5046-7](https://doi.org/10.1007/s12665-015-5046-7)
- Lana MS (2014) Numerical modeling of failure mechanisms in phyllite mine slopes in Brazil. *Int J Min Sci Technol* 24:777–782. [https://doi:10.1016/j.ijmst.2014.10.007](https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2014.10.007)
- Le Pera E, Sorriso-Valvo M (2000) Weathering, erosion and sediment composition in a high-gradient river, Calabria, Italy. *Earth Surface Processes and Landforms* 25: 277-292
- Leão MF (2017) Comportamento geomecânico de frente de intemperismo em filito da região do Quadrilátero Ferrífero. Tese, Departamento de Geologia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil, 177 p
- Licht OAB (1998) Prospecção Geoquímica: Princípios, técnicas e métodos. Rio de Janeiro: CPRM, pp 35
- Nesbitt HW, Young GM (1982) Early proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites. *Nature* 279: 715-717
- Price JR, Velbel MA (2000) Weathering of the Eaton Sandstone (Pennsylvanian), Grand Ledge, Michigan: geochemical mass balance and implications for reservoir properties beneath unconformities. *Journal of Sedimentary Research* 70: 1118– 1128
- Price JR, Velbel MA (2003) Chemical weathering indices applied to weathering profiles developed on heterogeneous felsic metamorphic parent rocks. *Chemical Geology* 202: 397–416
- Reiche P (1943) Graphic representation of chemical weathering. *J Sedim Pet* 13: 58-68
- Rocha Filho P, Antunes FS, Falcão MFG (1985) Quantitative influence of the weathering upon the mechanical properties of a Young gneiss residual soil. In: *First Int. Conf. Geomech. Trop. Lateritic Saprolitic Soils Brasilia Anais...* Brasil: 1, p. 281-294
- Romano AW, Rezende LFS, Macedo BOP (2017). Folha Ouro Preto, SF.23-X-A-III, escala 1:100.000: projeto Triângulo Mineiro. CODEMIG, Belo Horizonte.
- Ruxton BP (1986) Measures of the degree of chemical weathering of rocks. *J. Geol* 76: 518-527
- Schobbenhaus C, da Silva CR (2012) Geoparques do Brasil: propostas/organizadores. CPRM, Rio de Janeiro.

Taboada T, Cortizas AM, Garcia C, García-Rodeja E (2006) Particle-size fractionation of titanium and zirconium during weathering and pedogenesis of granitic rocks in NW Spain. *Geoderma* 131: 218-236

Thanachit S, Suddhiprakarn A, Kheoruenromne I, Gilkes RJ (2005) The geochemistry of soils on a catena on basalt at Khon Buri, northeast Thailand. *Geoderma*

Van Der Weijden CH, Van Der Weijden R (1995) Mobility of major, minor and some redox-sensitive trace elements and rare-earth elements during weathering of four granitoids in central Portugal. *Chemical Geology* 125: 149-167

Varajão CACH, Salgado AAR, Varajão AFDCH, Braucher R, Colin F, Nalini Jr. HA (2009) Estudo da evolução da paisagem do Quadrilátero Ferrífero (Minas Gerais, Brasil) por meio da mensuração das taxas de erosão (10be) e da pedogênese(1). *R. Bras. Ci. Solo*, 33:1409-1425

Vogt T (1972) Sulitjelmafeltets geologi og petrografi. *Norges Geologiske Undersøkelse* 121: 1 – 560 (in Norwegian, with English abstract)

CAPÍTULO 8

Artigo submetido:

Influência do intemperismo e correlações entre velocidade de propagação de ondas e durabilidade com parâmetros físicos e mecânicos em filitos

Influência do intemperismo e correlações entre velocidade de propagação de ondas e durabilidade com parâmetros físicos e mecânicos em filitos

Resumo:

A velocidade de propagação de ondas ultrassônicas (V_p) e a durabilidade são características amplamente determinadas em avaliações geotécnicas. Essas propriedades são úteis na análise de materiais geológicos intemperizados pelo fato de, em geral, apresentarem boas relações com propriedades físicas e mecânicas das rochas. Além disso, os testes utilizados para obtenção desses parâmetros são de fácil execução e tem baixo custo. Entretanto, poucos trabalhos tem sido conduzidos especificamente para rochas de baixo grau metamórfico. A proposta deste estudo consiste em avaliar a influência do intemperismo sobre esses parâmetros, bem como propor correlações entre: V_p e durabilidade; V_p e índices físicos; e V_p e resistência à compressão puntiforme. O estudo foi realizado em filitos amostrados em três perfis de intemperismo localizados ao longo da rodovia BR-356, no estado de Minas Gerais – Brasil. Os resultados revelam uma clara influência do intemperismo sobre a V_p e a durabilidade, particularmente devido ao aumento da porosidade. Entretanto, como a variação deste parâmetro não é homogênea, a relação entre V_p , durabilidade e intemperismo não é uniforme, embora apresentem tendências gerais. O comportamento exibido pela porosidade reflete a atuação complexa do intemperismo químico sobre fraturas e microfraturas. O padrão não uniforme da V_p e da durabilidade ao longo das classes de intemperismo é também consequência da heterogeneidade e anisotropia intrínseca a esses filitos. As relações empíricas estabelecidas entre V_p e durabilidade, V_p e índices físicos e V_p e o índice de resistência puntiforme ($I_{S(50)}$) exibem bons coeficientes de correlação.

Palavras-Chave: Filito. Intemperismo. Velocidade de propagação de ondas. Durabilidade

1. Introdução

O teste de propagação de ondas ultrassônicas é não destrutivo, fácil de se aplicar e de baixo custo e, por isso, tem sido cada vez mais empregado na caracterização de rochas para fins de engenharia, inclusive na determinação dos efeitos da alteração intempérica em materiais rochosos.

Vários pesquisadores estudaram a relação entre a V_p e propriedades da rocha, verificando uma íntima relação entre elas (Gardner et al., 1974; Gaviglio, 1989; Souza et al., 2005; Çobanoğlu e Çelik, 2008; Sharma et al., 2011; Nefeslioglu, 2013; Jamshidi et al., 2016;

e Wen et al., 2018). Embora muitas tentativas tenham sido feitas para correlacionar a V_p com propriedades físicas e mecânicas das rochas, poucos trabalhos concentraram-se em rochas de baixo e médio grau metamórfico (Sharma e Singh, 2008; Sarkar et al., 2012; Khandelwal, 2013).

A V_p nas rochas é influenciada por uma série de fatores como litologia, densidade, porosidade, tamanho e forma dos grãos, anisotropia, pressão de confinamento, intemperismo, acamamento, características das juntas (material de preenchimento, água, direção e mergulho etc.) (Kahraman, 2001).

Sabe-se que o intemperismo pode levar a rápidas mudanças nas propriedades dos materiais rochosos. A alteração de um determinado tipo de rocha e a taxa de ocorrência dessas mudanças (alterabilidade) são frequentemente descritas por um parâmetro de durabilidade (Crosta, 1998), conhecido como índice de durabilidade (I_d) e obtido por meio do *slake durability test*.

O *slake durability test* é empregado para avaliação da resistência à alteração de rochas, em função da desagregação e desintegração resultantes de um ciclo padrão de umedecimento e secagem (Franklin e Chandra, 1972). A durabilidade é uma característica amplamente afetada pela mineralogia, textura, porosidade, teor de água e está fortemente relacionada à história de alteração após a sua formação (Koncagül e Santi, 1999; Cetin et al., 2000; Dhakal et al., 2002; Yilmaz e Karacan, 2005; Gupta e Ahmed, 2007 e Ioanna et al., 2009).

Nesse sentido, este trabalho apresenta os efeitos do intemperismo sobre a V_p e a durabilidade, bem como a correlação entre estas propriedades e parâmetros físicos e mecânicos em filitos da região de MG – Brasil.

Os filitos foram coletados em taludes rodoviários localizados no estado de Minas Gerais – Brasil. Estes taludes estão inseridos no contexto geológico do Quadrilátero Ferrífero - importante província mineral do Brasil, constituindo-se de cinco principais unidades litoestratigráficas (Alkmim & Marshak, 1998): embasamento cristalino, complexos metamórficos de idade arqueana; Supergrupo Rio das Velhas, composto por sequência vulcano-sedimentar arqueana (*greenstone belt*); Supergrupo Minas, formado por sedimentos proterozóicos, metamorfisados e dobrados; intrusões pós-Minas; e Grupo Itacolomi, constituído por metassedimentos clásticos proterozóicos. Conforme se observa na Figura 3.1, os filitos estudados pertencem ao Supergrupo Minas.

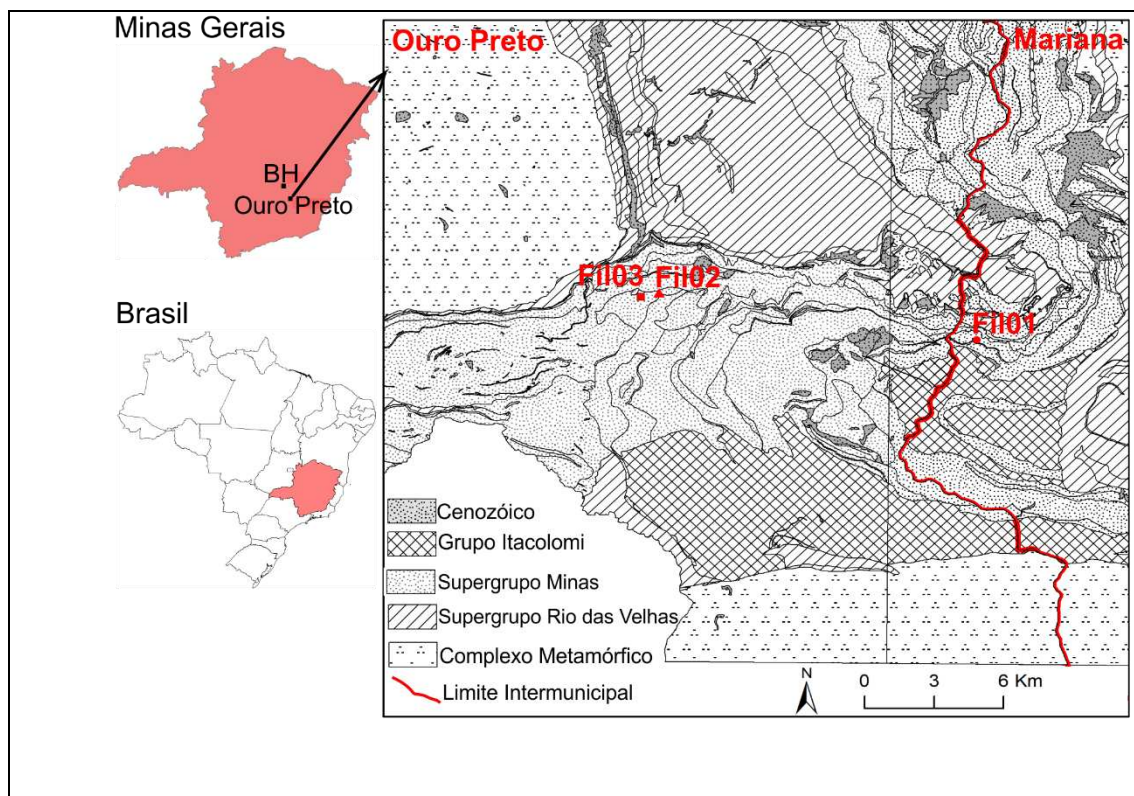


Figura 3.1 - Mapa geológico (adaptado de da Silva et.al, 2005; Romano et. al, 2017) com a localização dos perfis de intemperismo estudados, situados nos municípios contíguos de Mariana (Fil01) e Ouro Preto (Fil02 e Fil03). Ouro Preto está localizada a, aproximadamente, 100 km da capital do estado de Minas Gerais (Belo Horizonte - BH), Brasil.

2. Metodologia

Amostras de filito em diferentes graus de alteração intempérica foram retiradas de três taludes rodoviários localizados ao longo da BR-356, no estado de Minas Gerais – Brasil (Tabela 3.1). Os graus de alteração foram identificados em cada perfil a partir da classificação proposta pela Sociedade Internacional de Mecânica das Rochas - ISRM (2015).

Tabela 3.1 – Graus de intemperismo dos filitos amostrados para realização dos testes em laboratório. A classificação foi feita de acordo com as diretrizes da ISRM (2015).

Perfil	Grau de intemperismo dos filitos amostrados	Nomenclatura
Fil01	Levemente intemperizado	W2
	Medianamente intemperizado	W3
	Altamente intemperizado	W4
Fil02	São a levemente intemperizado	W1/W2
	Levemente intemperizado	W2
	Levemente a medianamente intemperizado	W2/W3
	Medianamente intemperizado	W3
	Medianamente a altamente intemperizado	W3/W4

Fil03	Medianamente intemperizado	W3*
	Altamente intemperizado	W4

* No perfil Fil03 foram escolhidos três pontos distintos de coleta do filito medianamente alterado (W3), de maneira a se avaliar a influência de possíveis diferenças texturais e mineralógicas.

As amostras foram levadas para testes em laboratório para obtenção dos índices físicos, velocidade de propagação de ondas, índice de resistência à compressão puntiforme, durabilidade e para análises mineralógicas. Fazem parte do escopo deste artigo apresentar e discutir os dados referentes à V_p e à durabilidade, para materiais em diferentes níveis de intemperismo, bem como correlacionar as seguintes propriedades: V_p e durabilidade; V_p e índices físicos; e V_p e $I_{S(50)}$. Os testes foram realizados de acordo com as sugestões da ISRM (2007).

2.1. Teste da velocidade de propagação de ondas nas amostras de rocha

A V_p foi determinada utilizando um *Portable Ultrasonic Non-destructive Digital Indicating Tester* (PUNDIT) (Figura 3.2). O teste foi realizado em amostras de rocha de formato aproximadamente retangular, preparadas para o teste de compressão puntiforme, contemplando todos os graus de intemperismo identificados em todos os três perfis. Para obtenção do formato retangular das amostras a partir dos blocos rochosos coletados em campo, foi necessário o uso de serra diamantada à úmido. As amostras tiveram suas extremidades ligeiramente polidas para garantir um melhor ajuste dos transdutores - responsáveis pela emissão e recepção das ondas ultrassônicas (ver Figura 3.2). Fez-se também o uso de vaselina no local de fixação dos transdutores para garantir um melhor acoplamento destes. Para a realização dos testes, a amostra acoplada aos transdutores era ligeiramente elevada da mesa de ensaios, não permanecendo apoiada a nenhuma superfície. A V_p é calculada a partir do tempo gasto para que a onda sonora se propague de um transdutor a outro. Conhecendo-se o tamanho da amostra, determina-se a velocidade, conforme as recomendações da ISRM (2007). Abaixo estão listados o número de amostras utilizadas de cada classe de intemperismo contemplada no presente estudo:

- (a) 13 do filito W1/W2.
- (b) 19 do filito W2.
- (c) 20 do filito W2/W3.
- (d) 38 do filito W3.
- (e) 23 do filito W3/W4.
- (f) 19 do filito W4.

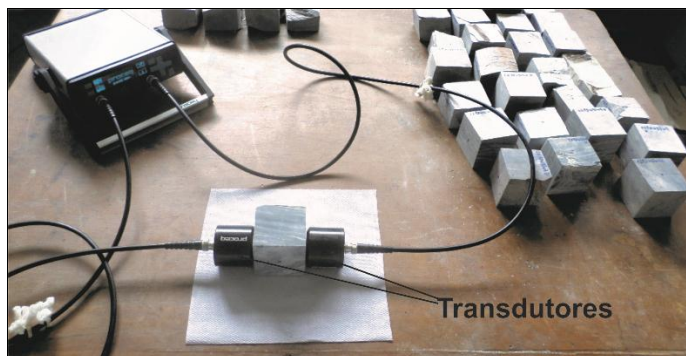


Figura 3.2 - PUNDIT utilizado para medição da velocidade de propagação de ondas nos filitos.

2.2. Ensaio de durabilidade

O teste mede a resistência de uma amostra de rocha à desintegração resultante de ciclos de umedecimento e secagem. O ensaio foi realizado segundo a norma da ISRM (2007). Dez fragmentos de cada classe de alteração observada em todos os perfis tiveram suas arestas previamente aparadas, para obtenção de extremidades aproximadamente arredondadas, e levados para estufa até a obtenção de uma massa constante. Posteriormente, os fragmentos de cada amostra de filito foram colocados em tambores cilíndricos, formados por uma malha metálica com abertura de 2mm, e imersos em um tanque com água, submetidos a uma velocidade de 20 rpm durante 10 minutos. Cada amostra foi submetida a dois ciclos de umedecimento e secagem (I_{d1} e I_{d2} , respectivamente). O índice de durabilidade é definido como a razão entre o peso seco da fração de amostra retida no cilindro após o ensaio e o peso seco inicial da amostra.

2.3. Análise de Regressão

Foram aplicadas análises de regressão por mínimos quadrados entre a V_p e a durabilidade, entre a V_p e os índices físicos e entre a V_p e o $I_{s(50)}$, com o objetivo de verificar as possíveis relações entre essas propriedades. A reta de melhor ajuste e os coeficientes de correlação foram determinados. Diferentes relações foram testadas (linear, exponencial, logarítmica e potência) para obtenção dos maiores valores do coeficiente de correlação.

3. Resultados e Discussões

3.1. Principais características dos filitos estudados

Os filitos estudados são compostos por muscovita, quartzo, minerais opacos e clorita. Como principais produtos do intemperismo sobre os minerais primários ocorrem óxido/hidróxido de ferro e caulinita. A foliação é penetrativa, milimetricamente espaçada,

formada pela alternância de finas bandas micáceas, bandas quartzo-micáceas e veios de quartzo. Há também veios constituídos por clorita e minerais opacos, paralelos à foliação metamórfica.

Um dos principais efeitos da exposição dessas rochas às condições atmosféricas consiste na formação de fraturas paralelas à foliação metamórfica que, com o avanço do intemperismo, se intensificam (Figura 3.3). Há também o aumento da abertura dessas discontinuidades que se tornam mais degradadas nos membros mais alterados. Essa característica marcante observada nos perfis estudados é perceptível também em lâmina petrográfica, pela presença de microfraturas, especialmente transgranulares e intragranulares (Figura 3.4). À medida que o intemperismo físico se processa, criando espaços preferenciais para a entrada de água na rocha, ocorre a dissolução dos minerais opacos e precipitação de óxidos de ferro. Esses resultados estão de acordo com estudos realizados em filitos sob clima tropical (Leão et al., 2017) e subtropical (Marques et al., 2017). As Figuras 3.5, 3.6 e 3.7 mostram as principais implicações do intemperismo sobre a matriz dessa rocha.

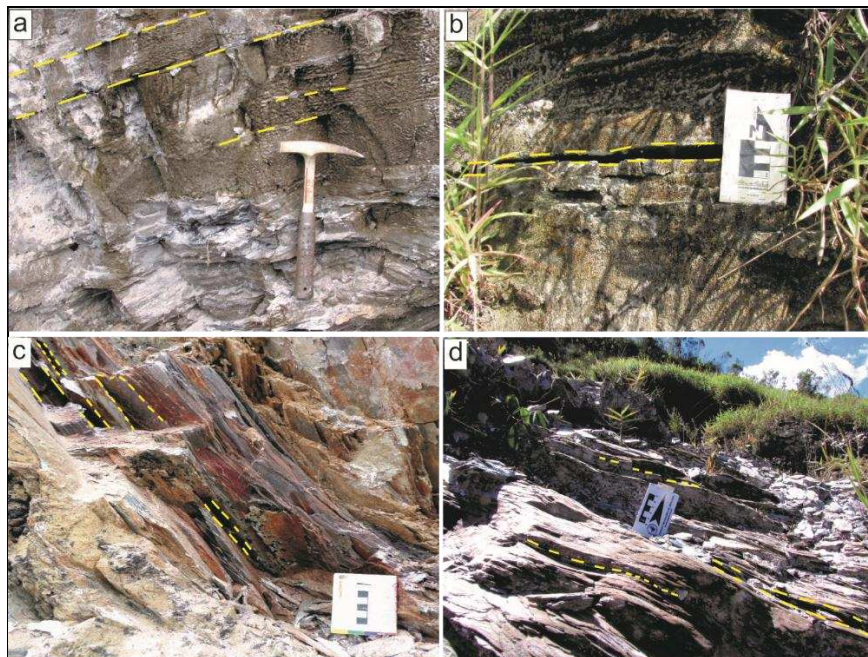


Figura 3.3 – Afloramentos de filito W3 (a) e W4 (b) do perfil Fil01, W3/W4 do perfil Fil02 (c) e W3 do perfil Fil03(d), com destaque para discontinuidades paralelas à foliação, resultantes da exposição dessas rochas ao intemperismo.

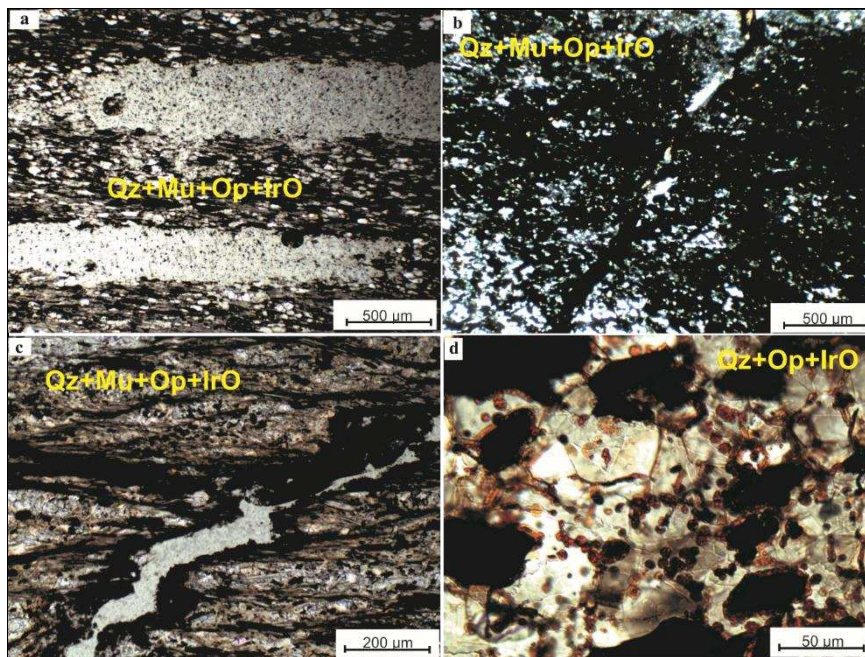


Figura 3.4 – Aspectos texturais e mineralógicos de filitos em lâminas petrográficas. As lâminas são de amostras coletadas do perfil Fil03. As siglas significam: *IrO* óxidos/hidróxidos de ferro; *Mu* muscovita; *Op* opacos; *Qtz* quartzo. Em (a) tem-se fratura paralela à foliação metamórfica (filito W3). Em (b e c) mostra-se fratura transgranular e precipitação de óxidos/hidróxidos de ferro devido ao intemperismo de opacos (filito W3 e W4, respectivamente). Em (d) precipitação de óxidos/hidróxidos de ferro na matriz e em fraturas intragranulares em grãos de quartzo (filito W3).

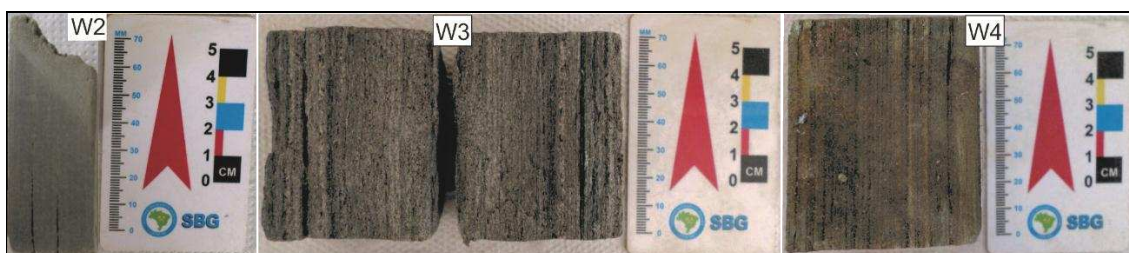


Figura 3.5 – Aspectos da matriz dos filitos em diferentes graus de intemperismo do perfil Fil01.

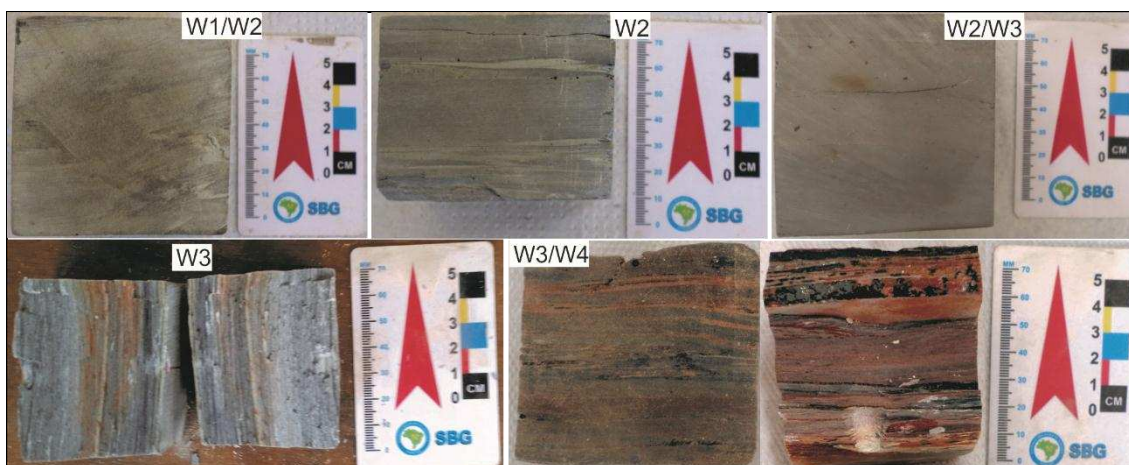


Figura 3.6 – Aspectos da matriz dos filitos em diferentes graus de intemperismo do perfil Fil02.



Figura 3.7 – Aspectos da matriz dos filitos intemperizados do perfil Fil03. As amostras do filito W3 foram coletadas de três pontos diferentes do perfil, demonstrando a heterogeneidade da rocha.

3.2. Índices Físicos

Os resultados da massa específica aparente seca, saturada, da porosidade aparente e capacidade de absorção de água aparente são apresentados na Tabela 3.2. Os parâmetros físicos sofrem uma clara influência dos processos intempéricos. Entretanto, nos materiais de transição solo-rocha (W3, W3/W4 e W4) a variação desses parâmetros não é homogênea. Isso deve-se principalmente ao aumento da quantidade de microfraturas e ao alargamento de discontinuidades pré-existentes paralelas à foliação metamórfica. Esse incremento da porosidade com o avanço do intemperismo é também acompanhado por uma maior precipitação de soluções ricas em óxidos/hidróxidos de ferro, conforme tratado anteriormente. Essas características ocorrem mais acentuadamente a partir do filito W3. Sousa et al. (2005) verificaram que, diferentemente do que ocorria em granitos são ou levemente alterados, em granito muito alterado a variação da porosidade não era homogênea. Isto se deve, de acordo com os autores, à ação do intemperismo sobre microfraturas, tornando sua atuação cada vez mais complexa, refletindo-se nas características físicas da rocha.

Tabela 3.2 – Média (M) e desvio padrão (DP) dos valores de massa específica aparente seca (ρ_{sec}), saturada (ρ_{sat}), porosidade aparente (n) e absorção de água aparente (abs) para as diferentes classes de intemperismo de filito dos três perfis de intemperismo.

Classes de intemperismo		ρ_{sec} (g/cm ³)	DP	ρ_{sat} (g/cm ³)	DP	n (%)	DP	abs (%)	DP
Fil01	W2	2.79	0.03	2.85	0.03	6.06	0.25	2.18	0.11
	W3	2.38	ND*	2.53	ND	14.29	ND	6	ND
	W4	1.95	ND	2.09	ND	14.07	ND	7.23	ND
Fil02	W1/W2	2.8	0.01	2.84	0.01	4.17	0.19	1.49	0.07
	W2	2.72	0.02	2.78	0.02	6.14	0.43	2.26	0.17
	W2/W3	2.75	0.05	2.83	0.04	8.57	0.29	3.12	0.16
	W3	2.44	0.03	2.59	0.03	14.89	0.52	6.09	0.29
	W3/W4	2.14	0.14	2.36	0.10	22	4.11	10.35	2.59
Fil03	W3	2.38	0.03	2.54	0.01	15.76	1.6	6.63	0.75
	W3	2.3	0.06	2.48	0.04	17.99	1.76	7.84	0.98
	W3	2.4	0.09	2.55	0.07	15.12	2.26	6.32	1.18
	W4	2.37	0.07	2.54	0.05	16.2	2.17	6.84	1.11

*ND Não determinado

3.3. Durabilidade

O menor índice de durabilidade obtido corresponde ao filito W3 do perfil Fil01 (Tabela 3.3). Isto pode ser explicado pela reduzida coesão interna de sua matriz, que também foi apontada por Leão et al. (2017a) em filitos sericíticos alterados da mesma localidade. Esses filitos são caracterizados por níveis de minerais máficos e silicosos que preenchem a foliação (Figura 3.5). Leão (2017b) realizou estudos de durabilidade nos filitos localizados no perfil Fil01, obtendo comportamento não linear dos valores de I_{d2} entre os filitos com graus de intemperismo distintos. O autor atribuiu esse comportamento à presença de níveis cimentados, cuja origem não seria resultado da atuação intempérica. Estes níveis estão distribuídos de forma não homogênea ao longo do perfil, causando heterogeneidades na rocha. A conclusão a que este autor chegou está em acordo com aquelas resultante do presente estudo, uma vez que esses mesmos níveis também foram identificados nesta pesquisa, o que explicaria o aumento da durabilidade encontrada no filito W4 em relação ao W3 do perfil Fil01.

Tabela 3.3 – Índice de durabilidade (I_{d1} e I_{d2}) e velocidade de propagação de ondas (V_p) dos filitos em diferentes estados de alteração dos três perfis de intemperismo.

Perfis	Classes de intemperismo	I_{d1} (%)	I_{d2} (%)	V_p perpendicular (m/s)	V_p paralela (m/s)
Fil01	W2	88.19	76.76	445.14	4795
	W3	8.19	1.66	126	3474.25
	W4	11.67	7.44	ND*	ND
Fil02	W1/W2	98.18	96.82	2040.1	5382.42
	W2	97.32	95.52	969.71	4601.33
	W2/W3	95.18	91.75	1011.42	4716.65
	W3	95.49	91.81	742	4243.79
Fil03	W3/W4	76.47	60.34	501.92	4415.32
	W3	61.34	44.08	394.67	4011.83
	W3	85.51	73.83	366	3802.14
	W3	71.94	55.05	523.43	3830.78
	W4	75.56	65.65	945.78	3588.21

ND* Não determinado

No perfil Fil02, os valores de I_{d2} obtidos para os filitos levemente alterados (W1/W2; W2; W2/W3) estão acima de 90%. Durabilidades semelhantes foram encontradas por Ramamurthy et al. (1993) (97.56% para filitos micáceos sãos), Andrade e Saraiva (2010) (90.7% – 98.9% para filitos W1 e W2), Marques et al. (2010) (durabilidades > 95% para gnaisses W1 e W2) e Silva e Lana (2012) (90.36 - 91.56% para filitos sericíticos W2).

A durabilidade obtida dos filitos W3 é bastante variável. Com exceção do filito W3 do perfil Fil01, que apresenta coesão interna muito baixa (peculiar deste perfil), o I_{d2} oscilou entre 91,81 % (perfil Fil02) e 44,08% (perfil Fil03). Variações elevadas em filitos medianamente intemperizados são também relatadas por Andrade e Saraiva (2010) (entre 59.6% – 98.2%) e Silva e Lana (2012) (entre 86,18% - 54,32%).

A variação da durabilidade encontrada para os filitos W3 parece estar relacionada às seguintes mudanças impostas pelo intemperismo, que aumentam sensivelmente neste grau de alteração: aumento no volume de poros, e presença significativa de minerais opacos alterados, ou seja, que tiveram sua forma cristalina modificada (Figura 3.4d). De forma semelhante ao presente estudo, Dhakal et al. (2002) verificaram uma estreita relação entre a durabilidade e o intemperismo em rochas clásticas, uma vez que este propiciou mudanças no volume e distribuição dos poros e provocou mudanças cristalinas em esmectitas, o que coincide com os resultados do presente estudo.

Nos gráficos das Figuras 3.8 e 3.9 são comparados os valores médios de I_{d2} e da porosidade e I_{d2} e quantidade de óxidos, respectivamente, nas diferentes classes de intemperismo, sendo possível observar a influência destes fatores na durabilidade. A elevação da porosidade, associada à permeabilidade, propicia uma maior área de superfície da rocha disponível para entrar em contato com a água (superfície específica), que atua no sentido de diminuir a durabilidade como, por exemplo, enfraquecendo as ligações químicas, alterando as propriedades dos constituintes minerais e causando instabilidade ao longo dos planos de fraqueza (devido à pressão da água nos poros) (Koncagül e Santi, 1999).

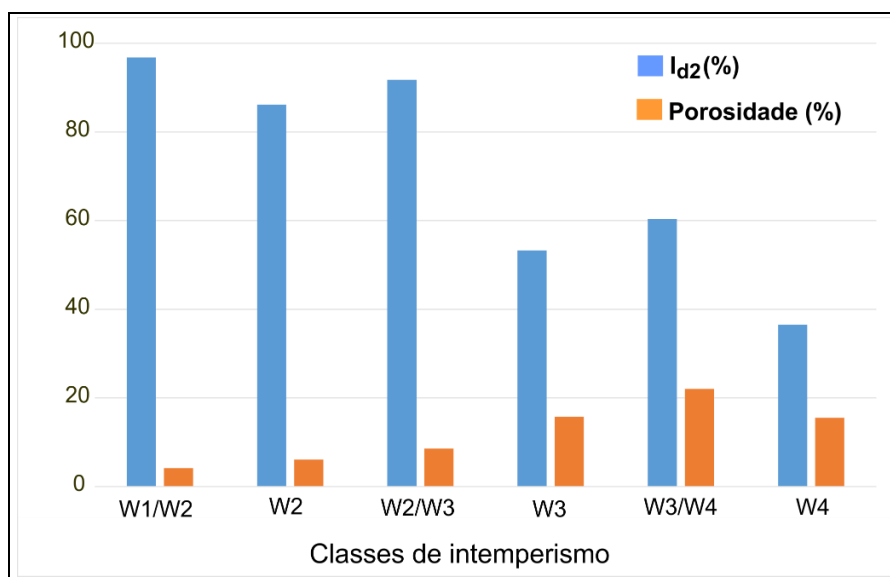


Figura 3.8 - Valores médios de I_{d2} e da porosidade de cada classe de intemperismo. Observa-se redução mais significativa na durabilidade à medida que ocorre um aumento mais expressivo na porosidade a partir do filito medianamente alterado (W3)

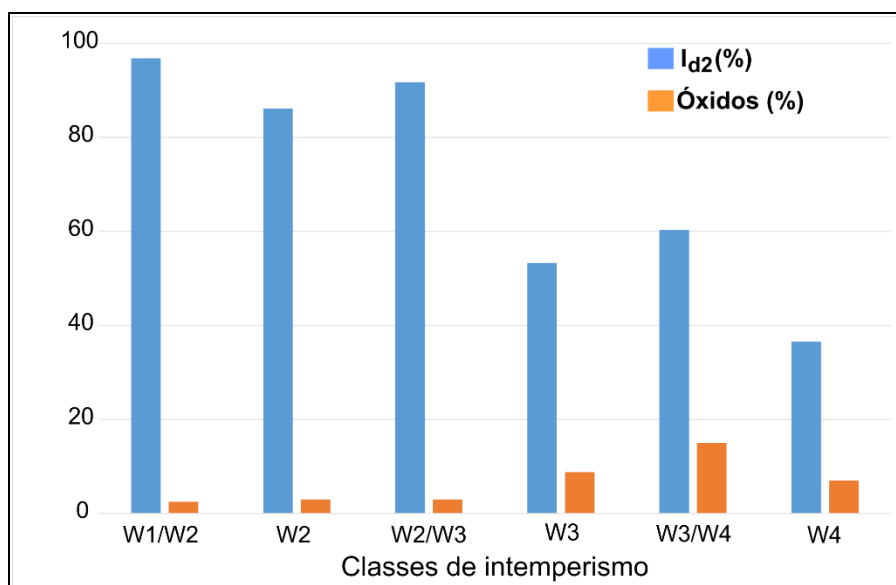


Figura 3.9 - Valores médios de I_{d2} e da concentração de óxidos de cada classe de intemperismo. Verifica-se uma diminuição mais acentuada da durabilidade ao mesmo tempo em que ocorre um aumento mais significativo da precipitação de óxidos a partir do filito medianamente intemperizado (W3). A elevação da concentração de óxidos indica uma maior alteração dos minerais opacos

As Figuras 3.10 e 3.11 mostram, respectivamente, os valores de I_{d2} com a progressão do intemperismo e as amostras de filitos após serem submetidas a dois ciclos de umedecimento e secagem. Como pode ser observado, apesar do I_{d2} não acompanhar de maneira uniforme a evolução da alteração, verifica-se uma tendência geral de redução deste parâmetro com o intemperismo.

A variabilidade encontrada na durabilidade entre filitos da mesma classe de alteração, é também atribuída à heterogeneidade da rocha, inclusive do mesmo perfil. É o que aconteceu, por exemplo, nos filitos W3 coletados em pontos distintos do perfil Fil03 (Figura 3.4). Dependendo da posição no perfil, a rocha pode conter maior ou menor teor de opacos e consequentemente de óxidos, assim como também pode apresentar variações no conteúdo de quartzo. Dessa forma, a durabilidade é influenciada não só por processos secundários, oriundos do intemperismo, mas também pela própria heterogeneidade intrínseca à variação composição mineralógica desses filitos.

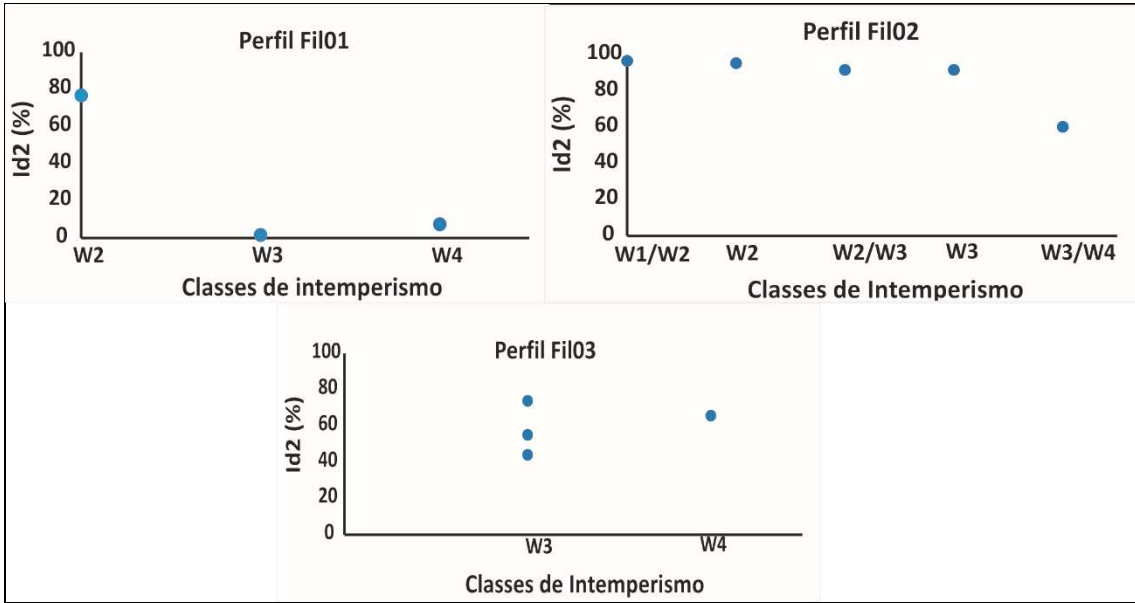


Figura 3.10 - Relação entre Id2 e diferentes graus de alteração de amostras de filitos coletadas em três perfis de intemperismo distintos (Fil01, Fil02 e Fil03).

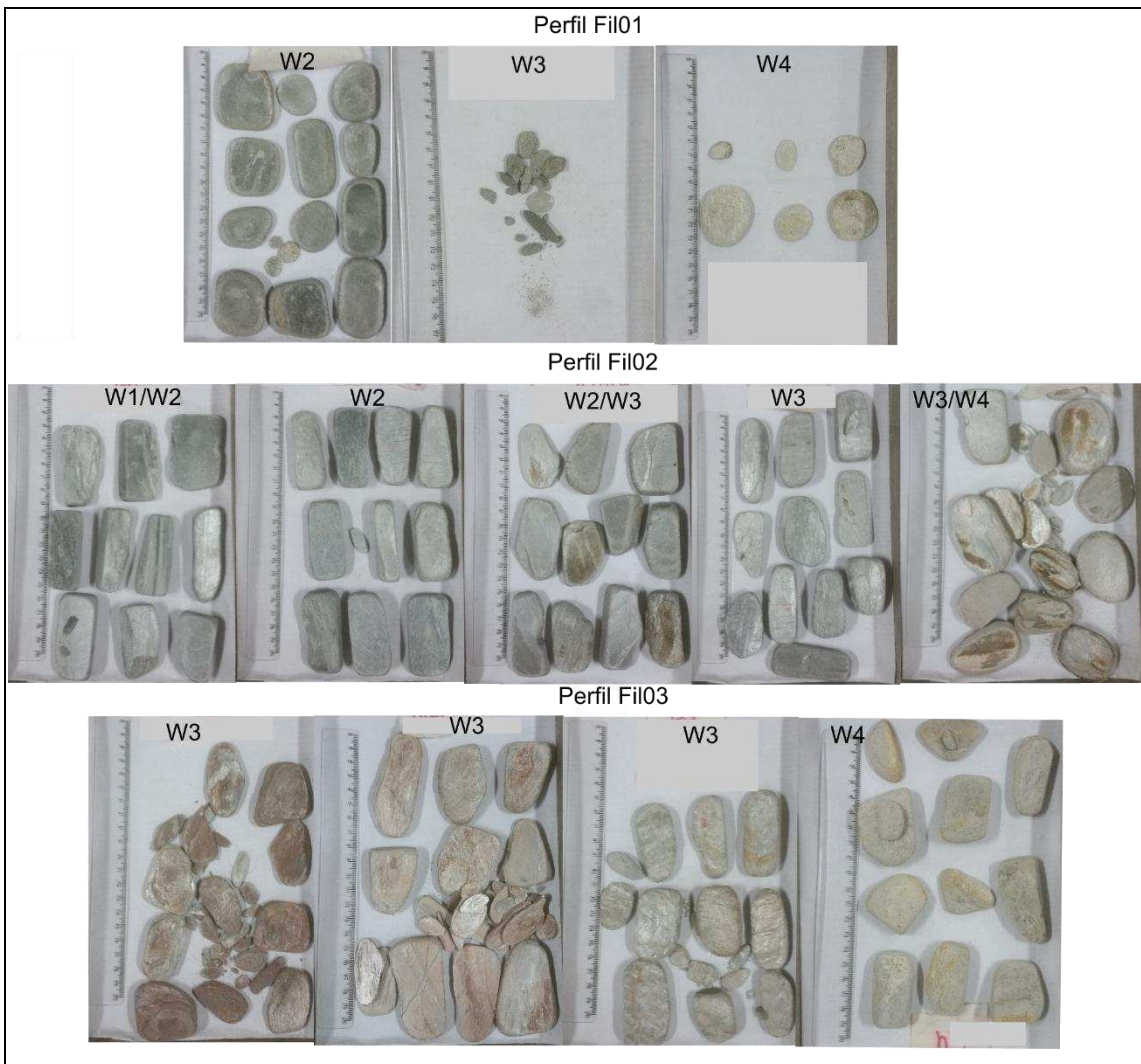


Figura 3.11 - Resultado das amostras dos filitos alterados após dois ciclos de umedecimento e secagem.

3.4. Velocidade de Propagação de Ondas

Os resultados mostrados na Tabela 3.3 correspondem à V_p obtida na direção perpendicular e paralela à foliação metamórfica. Em algumas amostras não houve detecção de sinal da V_p medida perpendicular à foliação, enquanto na maior parte dessas o sinal obtido foi muito baixo, raramente 100%. A atenuação da V_p na direção perpendicular tem como causa a presença de fraturas paralelas à foliação que tornam a rocha descontínua, afetando-a significativamente. É frequente, na literatura, o relato de diferenças na V_p na direção perpendicular e paralela à foliação em rochas que apresentam propriedades anisotrópicas (Ramamurthy et al., 1993; Marques et al., 2010; Kurtulus et al., 2012; Nikrouz et al., 2016). Jensen e Elming (2013) relatam como causas potenciais da anisotropia sísmica: microfissuras, juntas, falhas, foliação macroscópica, estratificação e intemperismo. Estes autores encontraram anisotropia na V_p em metariolitos com microfoliação, obtendo os maiores valores na direção paralela a esta.

Os valores da V_p obtidos na direção paralela para os filitos levemente alterados (W1/W2, W2 e W2/W3) estão na faixa de 4601-5382 (m/s), os quais são compatíveis com os resultados de filitos com composição mineralógica semelhante considerados são ou pouco alterados por outros pesquisadores (Ramamurthy et al., 1993; Andrade e Saraiva, 2010).

Como pode ser observado na Figura 3.12, os filitos medianamente a muito alterados (W3, W3/W4 e W4) são aqueles que transmitem as ondas ultrassônicas com menor eficiência. Particularmente para o filitos medianamente intemperizados, os valores obtidos estão na faixa entre 3474 - 4415 (m/s). O resultado assemelha-se com aqueles obtidos por Dobereiner et al. (1993) em gnaisses classificados como medianamente intemperizados, em que o autor encontrou valores entre 3498-4160 (m/s). A V_p é sensível ao estado de alteração das rochas estudadas, mostrando uma tendência geral de redução com o aumento do intemperismo.

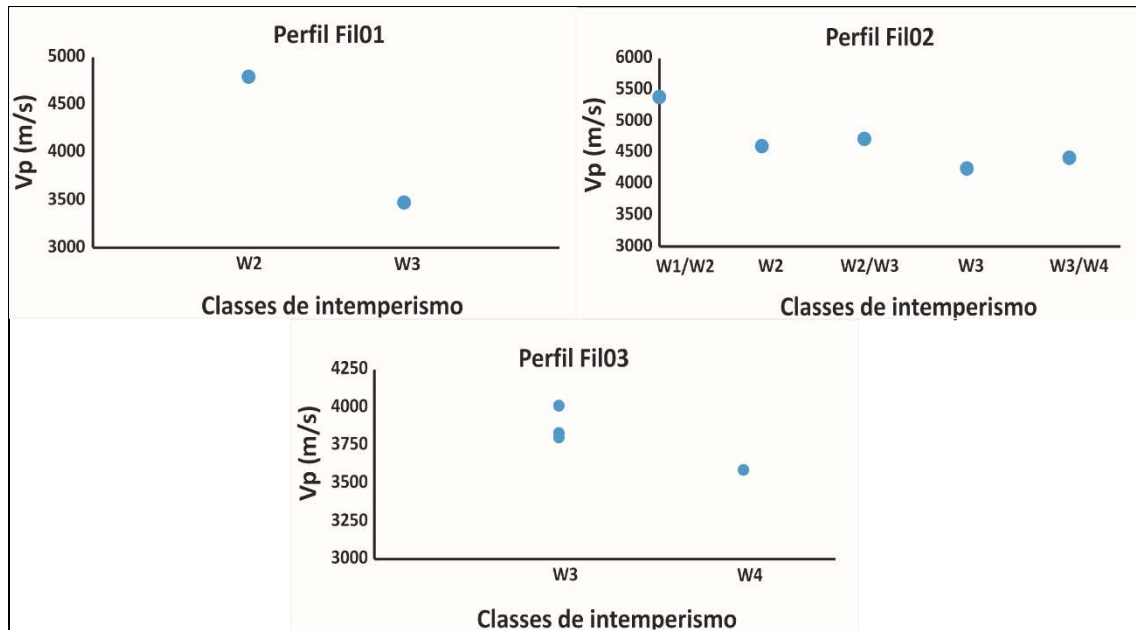


Figura 3.12 - Relação entre a velocidade de propagação de ondas ultrassônicas medida paralela à foliação e o grau de alteração de amostras de filitos coletadas em três perfis de intemperismo (Fil01, Fil02 e Fil03).

3.5. Correlações

3.5.1. Correlação entre I_{d1} e I_{d2} com V_p

Em virtude do baixo sinal detectado no recebimento do sinal da V_p medida na direção perpendicular à foliação (relatado anteriormente), esses valores não foram considerados nas correlações estabelecidas.

São apresentadas, na Figura 3.13 as correlações entre I_{d1} e V_p e entre esta e I_{d2} . Nas Figuras 3.13a e 3.13b, as correlações foram efetuadas entre as médias dos valores de cada classe de alteração, enquanto em 3.13c e 3.13d não foram utilizados os valores médios, obtendo-se um coeficiente de correlação muito menor. Os valores dispersos apresentados em 3.13c e 3.13d são resultantes da influência do intemperismo e da própria anisotropia dos filitos estudados.

Com base nos resultados obtidos, a utilização de valores médios mostrou-se adequada para correlacionar a durabilidade e a velocidade de propagação de ondas. Khandelwal (2013) obteve boa correlação entre V_p e I_{d1} para diferentes tipos de rocha, dentre elas xistos, para valores de V_p na faixa de 1682 a 4657 m/s. Sharma e Singh (2008) também encontraram boa correlação entre esses dois parâmetros ao avaliar sete diferentes tipos de rocha, incluindo filitos e xistos.

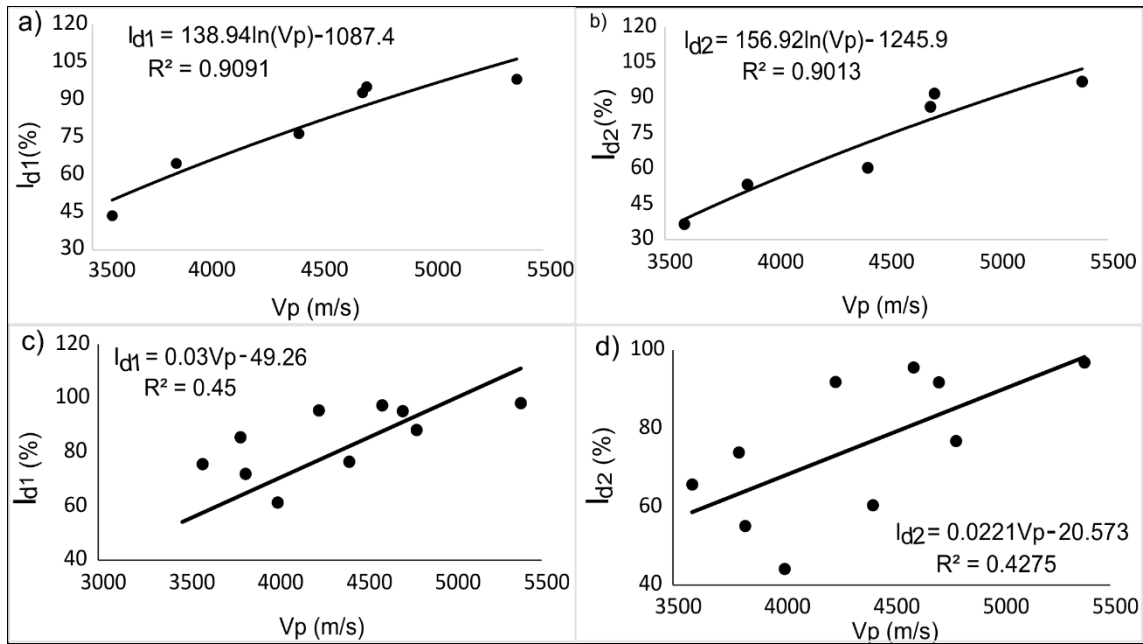


Figura 3.13 - Correlações entre I_{d1} e V_p (paralela à foliação) e I_{d2} e V_p (paralela à foliação). Em a e b correlação entre os valores médios de cada uma das classes de alteração. Em c e d correlação entre os valores obtidos de todas as classes de alteração dos três perfis estudados.

3.5.2. Correlações entre V_p e índices físicos

A Figura 3.14 mostra que os índices físicos possuem, todos, uma forte relação com a V_p : houve uma redução na V_p com a diminuição da densidade (aumento da porosidade e da absorção de água). Os resultados estão de acordo com Gaviglio (1989), Turğrul e Zarif (1999), Yasar e Erdogan (2004), Kurtulus et al. (2010), Diamantis et al. (2011), Sarkar et al. (2012), Khandelwal (2013) e Azimian e Ajalloeian (2015), os quais estudaram a relação entre propriedades físicas e V_p , obtendo boas correlações entre esses parâmetros.

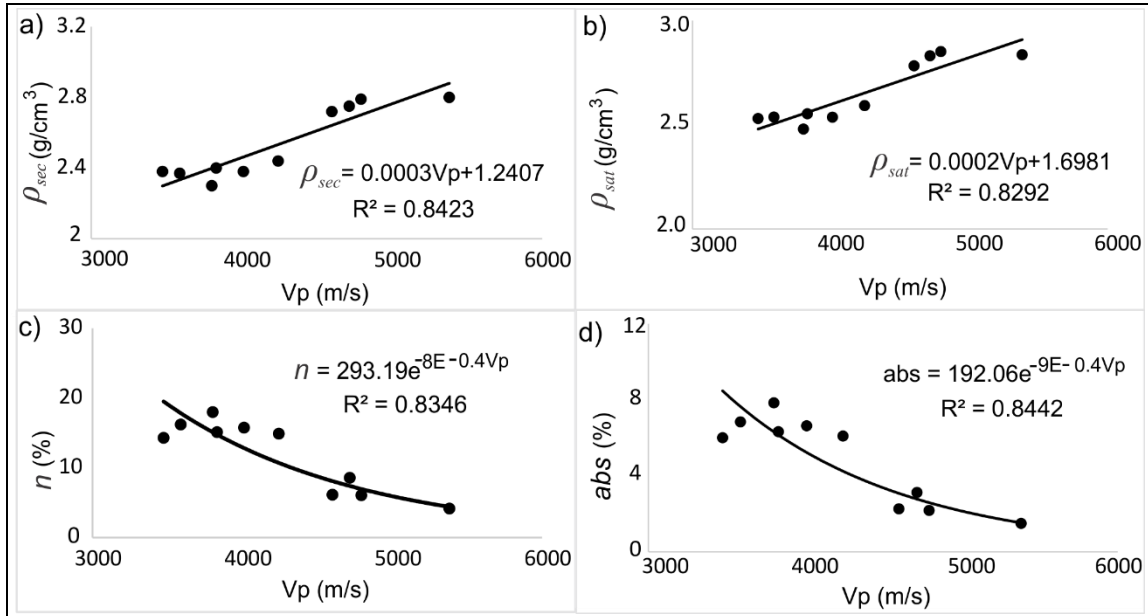


Figura 3.14 - Correlações entre Vp (paralela à foliação) e os índices físicos: massa específica aparente seca (a), saturada (b), porosidade (c) e capacidade de absorção de água (d).

3.5.3. Correlações entre Vp e Is

Os gráficos da Figura 3.15 mostram a relação entre a Vp e o $Is_{(50)}$. Como esperado, quanto menor o $Is_{(50)}$, menor é a Vp. Verifica-se uma boa relação entre Vp e o $Is_{(50)}$ medido perpendicular à foliação, com coeficiente de correlação de 0,7779 (Tabela 3.4), enquanto o coeficiente de correlação entre Vp e o $Is_{(50)}$ medido paralelo à foliação é menor ($R^2 = 0,6139$), diferentemente do esperado. A partir deste resultado, verifica-se que, apesar de exercer influência sobre a Vp e o $Is_{(50)}$, a foliação metamórfica não é suficiente para explicar a boa relação obtida entre estas propriedades.

Por outro lado, a porosidade apresenta uma íntima relação com a Vp (Figura 3.14) e influencia a resistência de rochas intemperizadas (Marques et al., 2010; Andrade e Saraiva, 2010; Leão et al., 2017), uma vez que a presença de poros torna a rocha menos contínua, diminuindo a Vp e aumentando a fragilidade da matriz quando submetida à compressão (Sousa et al., 2005). O aumento da porosidade, devido aos processos intempéricos, portanto, parece exercer papel preponderante na variação dessas propriedades (Vp e $Is_{(50)}$) nos filitos estudados.

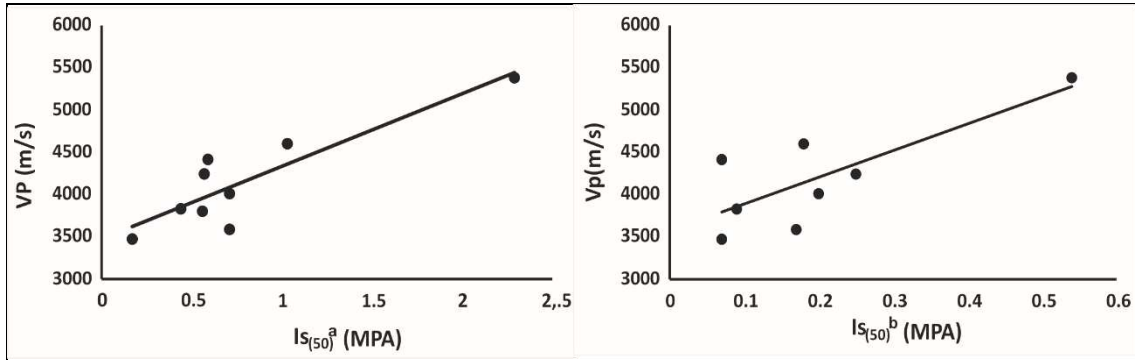


Figura 3.15 – Relação entre Vp (paralela à foliação) e $I_{s(50)}$ perpendicular à foliação ($I_{s(50)}^a$) e paralelo à foliação ($I_{s(50)}^b$).

Tabela 3.4 – Equações correlacionando Vp (paralela à foliação) e $I_{s(50)}$ em diferentes tipos de rocha

Equações	Coefficiente de correlação	Referências	Tipo de rocha
$I_{s(50)} = 6.67 \ln(Vp) - 51.9$	0.925	Jamshidi et al. (2016)	Travertino
$I_{s(50)} = 0.0018(Vp) - 1.9906$	0.95	Kurtulus et al. (2010)	Andesitos
$I_{s(50)} = 0.0042(Vp) - 14.602$	0,895	Kurtulus et al. (2012)	Rochas ultrabásicas serpentinizadas
$Vp = -16.784I_{s(50)} + 6078.9$	0.5533	Jensen e Elming (2013)	Meta-riolitos
$Vp = 859.02 I_{s(50)}^a + 3475.2$	0.7779	Presente estudo	Filito
$Vp = 3155.9 I_{s(50)}^b + 3574.1$	0.6139	Presente estudo	Filito

$I_{s(50)}^a$ Direção de carregamento perpendicular à foliação

$I_{s(50)}^b$ Direção de carregamento paralela à foliação

4. Conclusões

O *slake durability test* realizado nos filitos estudados mostrou que o intemperismo tem clara influência sobre esta propriedade geotécnica, afetando a textura e a composição mineralógica dessas rochas. Como esperado, o aumento progressivo da porosidade e da alteração mineral, devido ao intemperismo, foi acompanhado pela redução da durabilidade.

A Vp diminuiu com o avanço do intemperismo e está intimamente relacionada com os índices físicos, apresentando coeficientes de correlação significativos. A Vp e a resistência da rocha intacta são influenciadas pela foliação metamórfica. Apesar disso, a boa correlação estabelecida entre Vp e $I_{s(50)}$ parece sofrer maiores efeitos dos processos intempéricos, que causam o aumento da porosidade, do que da anisotropia intrínseca aos filitos, resultante do alinhamento mineral.

A Vp e a durabilidade, apesar de apresentarem tendências gerais, não evoluem de forma uniforme com a progressão do intemperismo, uma vez que a porosidade, principal parâmetro responsável pela variabilidade dessas propriedades, não possui comportamento homogêneo.

Este comportamento atribuído à porosidade está, provavelmente, associado à atuação do intemperismo químico, aumentando o espaçamento de descontinuidades pré-existentes e formando redes de microfraturas. Portanto, a ação do intemperismo sobre fraturas e microfraturas torna seus efeitos cada vez mais complexos, refletindo nas características físicas da rocha.

Além da influência dos processos secundários, oriundos do intemperismo, sobre a variabilidade dos parâmetros físicos e mecânicos, há também a própria heterogeneidade mineralógica intrínseca à esses filitos, observada entre amostras com mesmo grau de alteração no mesmo perfil, porém retiradas de pontos distintos. Tanto a heterogeneidade, como a anisotropia, são também reveladas na correlação estabelecida entre V_p e I_{d1} e V_p e I_{d2} , quando são incorporados todos os valores relativos a cada uma das amostras de todos os três taludes. A utilização de valores médios de cada uma das classes de alteração melhora a correlação entre estas propriedades e permite concluir que os parâmetros físicos avaliados devem ser utilizados com cautela em projetos geotécnicos, sendo importante que estejam associados a um controle de campo, contemplando descrições do maciço rochoso (incluindo características de descontinuidades), análises petrográficas e micropetrográficas, bem como outros tipos de ensaios físicos e mecânicos.

Referências

Alkmim FF, Marshak S (1998) Transamazonian Orogeny in the southern São Francisco Craton region, Minas Gerais, Brazil: evidence for Paleoproterozoic collision and collapse in the Quadrilátero Ferrífero. *Precambrian Research* 90: 29-58

Andrade PS, Saraiva AA (2010) Physical and mechanical characterization of phyllites and metagreywackes in central Portugal. *Bull Eng Geol Env* 69:207–214. <https://doi:10.1007/s10064-009-0251-9>

Azimian A, Ajalloeian R (2015) Empirical correlation of physical and mechanical properties of marly rocks with P wave velocity. *Arab J Geosci* 8:2069–2079. DOI 10.1007/s12517-013-1235-4

Andrade PS, Saraiva AA (2010) Physical and mechanical characterization of phyllites and metagreywackes in central Portugal. *Bull Eng Geol Env* 69:207–214. <https://doi:10.1007/s10064-009-0251-9>

- Cetin H, Laman M, Ertune A (2000) Settlement and slaking problems in the world's fourth largest rock-fill dam, the Ataturk Dam in Turkey. *Eng Geol* 56(3–4):225–242
- Çobanoğlu İ, Çelik SB (2008) Estimation of uniaxial compressive strength from point load strength, Schmidt hardness and P-wave velocity. *Bull Eng Geol Env* 67(4):491–498. <https://doi.org/10.1007/s10064-008-0158-x>
- Crosta G (1998) Slake durability Vs ultrasonic treatment for rock durability determinations. *Int J Rock Mech Min Sci* 35 (6): 815-824
- Da Silva WG, França AVM, Sampaio JLD (2005) Folha Mariana, SF.23-X-B-I-3 e SF.23-X-B-IV-1, escala 1:50.000: projeto geologia do Quadrilátero Ferrífero - integração e correção cartográfica em SIG/ editores. CODEMIG, Belo Horizonte
- Dhakal G, Yoneda T, Kato M, Kaneko K (2002) Slake durability and mineralogical properties of some pyroclastic and sedimentary rocks. *Eng Geol* 65:31–45
- Diamantis K, Bellas S, Migiros G, Gartzos E (2011) Correlating wave velocities with physical, mechanical properties and petrographic characteristics of peridotites from the Central Greece. *Geotech Geol Eng* 29(6):1049–1062. DOI 10.1007/s10706-011-9436-7
- Dobereiner L, Durville JL, Restituto J (1993) Weathering of the massiac gneiss (Massif Central, France). *Bull Int Assoc Eng Geol* 47:79–96. doi:10.1007/BF02639596
- Franklin JA, Chandra R (1972) The slake durability test. *Int J Rock Mech Min Sci* 9:325–341
- Gardner GHF, Gardner LW, Gregory AR (1974) Formation velocity and density: the diagnostic basis for stratigraphy. *Geophysics* 39:770–780
- Gaviglio P (1989) Longitudinal wave propagation in a limestone: the relationship between velocity and density. *Rock Mech Rock Eng* 22: 299–306
- Gökçeoğlu C, Ulusay R, Sönmez H (2000) Factor 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. *Eng Geol* 57:215–237
- Gupta V, Ahmed I (2007) The effect of pH of water and mineralogical properties on the slake durability (degradability) of different rocks from the Lesser Himalaya, India. *Eng Geol* 95:79–87. doi:10.1016/j.enggeo.2007.09.004
- ISRM (2007) In: R. Ulusay, J. Hudson (eds) *The complete ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring: 1974–2006*. ISRM. p 628

- ISRM (2015) The IRSM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring: 2007–2014. Springer, Cham.
- Jamshidi A, Nikudel MR, Khamehchiyan M, Sahamieh1 RZ, Abdi Y (2016) A correlation between P-wave velocity and Schmidt hardness with mechanical properties of travertine building stones. *Arab J Geosci* 9: 568. DOI 10.1007/s12517-016-2542-3
- Jensen MB, Elming SÅ (2013). Magnetic, seismic and mechanical properties of porphyritic meta-rhyolites — The effect of microscopic foliation on rock strength and P-wave velocity in drill cores. *Eng Geol* 157: 93–102. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enggeo.2013.01.008>
- Kahraman S (2001). A correlation between P-wave velocity, number of joints and Schmidt hammer rebound number. *Int. J. Rock Mech. Min Sci* 38: 729–733.
- Khandelwal M (2013) Correlating P-wave Velocity with the Physico-Mechanical Properties of Different Rocks. *Pure Appl. Geophys.* 170: 507–514. DOI 10.1007/s00024-012-0556-7
- Koncagul EC, Santi PM (1999) Predicting the unconfined compressive strength of the Breathitt shale using slake durability, shore hardness and rock structural properties. *Int J Rock Mech Min Sci* 36(2):139–153
- Kurtulus C, Serkan Irmak T, Sertçelik I (2010) Physical and mechanical properties of Gokceada: Imbros (NE Aegean Sea) Island andesites. *Bull Eng Geol Environ* 69:321–324. DOI 10.1007/s10064-010-0270-6
- Kurtulus C, Bozkurt A, Endes H (2012) Physical and mechanical properties of serpentinized ultrabasic rocks in NW Turkey. *Pure Appl Geophys* 169:1205–1215
- Leão MF, Barroso EV, Polivanovi H, Marques EAG, Vargas Jr EA (2017) Weathering of metapelites from the Quadrilátero Ferrífero mineral province, southeastern Brazil. *Bull Eng Geol Env.* [https://doi: 10.1007/s10064-017-1036-1](https://doi.org/10.1007/s10064-017-1036-1)
- Leão MF (2017) Comportamento geomecânico de frente de intemperismo em filito da região do Quadrilátero Ferrífero. Tese, Departamento de Geologia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil, 177 p
- Ioanna I, Dimitrios R, Theodora P, Paris T (2009). Geotechnical and mineralogical properties of weak rocks from Central Greece. *Cent Eur J Geosci* 4: 431-442. DOI: 10.2478/v10085-009-0029-0

- Marques EAG, Barroso EV, Menezes Filho AP, Vargas JR EA (2010) Weathering zones on metamorphic rocks from Rio de Janeiro – Physical, mineralogical and geomechanical characterization. *Engineering Geology* 111:1-18. <https://doi:10.1016/j.enggeo.2009.11.001>
- Marques EAG, Williams DJ, Assis IR, Leão MF (2017) Effects of weathering on characteristics of rocks in a subtropical climate: weathering morphology, in situ, laboratory and mineralogical characterization. *Environ Earth Sci.* 76:602. <https://doi:10.1007/s12665-017-6936-7>
- Nefeslioglu HA (2013) Evaluation of geo-mechanical properties of very weak and weak rock materials by using non-destructive techniques: Ultrasonic pulse velocity measurements and reflectance spectroscopy. *Eng Geol* 160: 8–20
- Nikrouz R, Moomivand H, Azad R (2016). Effect of foliation orientation on the P- and S-wave velocity anisotropies and dynamic elastic constants of the quartz-micaschists metamorphic rocks, Angouran mine, Iran. *Arab J Geosci* 9: 669. DOI 10.1007/s12517-016-2699-9
- Ramamurthy T, Rao GV, Singh J (1993) Engineering behavior of phyllites. *Engineering Geology* 33: 209-225.
- Romano AW, Rezende LFS, Macedo BOP (2017). Folha Ouro Preto, SF.23-X-A-III, escala 1:100.000: projeto Triângulo Mineiro. CODEMIG, Belo Horizonte.
- Silva CHC, Lana MS (2012) Influence of slake durability on geotechnical behavior of phyllites of Pau Branco Mine. *Rev Esc Minas* 65:413–418. <https://doi:10.1590/S0370-44672012000300019>
- Sarkar K, Vishal V, Singh TN (2012) An empirical correlation of index geo-mechanical parameters with the compressional wave velocity. *Geotech Geol Eng* 30(2):469–479. <https://doi.org/10.1007/s10706-011-9481-2>
- Sharma PK, Khandelwal M, Singh TN (2011) A correlation between Schmidt hammer rebound numbers with impact strength index, slake durability index and P-wave velocity. *Int J Earth Sci (Geol Rundsch)* 100:189–195. DOI 10.1007/s00531-009-0506-5
- Sharma PK, Singh TN (2008) A correlation between P-wave velocity, impact strength index, slake durability index and uniaxial compressive strength. *Bull Eng Geol Environ* 67:17–22. DOI 10.1007/s10064-007-0109-y

Sousa LMO, Río LMSD, Calleja L et al (2005) Influence of microfractures and porosity on the physico-mechanical properties and weathering of ornamental granites. *Eng Geol* 77(1):153–168. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2004.10.001>

Turgrul A, Zarif IH (1999) Correlation of mineralogical and textural characteristics with engineering properties of selected granitic rocks from Turkey. *Eng Geol* 51:303–317

Yasar E, Erdogan Y (2004). Correlating sound velocity with the density, compressive strength and Young's modulus of carbonate rocks. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* 41: 871–875. doi:10.1016/j.ijrmms.2004.01.012

Yilmaz I, Karacan E (2005). Slaking durability and its effect on the doline formation in the gypsum. *Environ Geol* 47: 1010–1016. DOI 10.1007/s00254-005-1234-1

Wen L, Luo Z, Yang S, Qin Y, Wang W (2018) Correlation of Geo-Mechanics Parameters with Uniaxial Compressive Strength and P-Wave Velocity on Dolomitic Limestone Using a Statistical Method. *Geotech Geol Eng*. <https://doi.org/10.1007/s10706-018-0665-x>

CAPÍTULO 9

CONCLUSÕES GERAIS

O desenvolvimento das frentes de alteração identificadas para os perfis de intemperismo de filito estudados exibe um forte controle estrutural, que implica em contatos abruptos entre diferentes classes de alteração. A disposição dos materiais geológicos ao longo dos perfis é também influenciada por características morfológicas. Fraturas, especialmente paralelas à foliação metamórfica, controlam o intemperismo físico e químico, constituindo-se nos principais direcionadores de fluxos de água e gerando porosidade secundária na rocha.

Os minerais que melhor marcaram o intemperismo foram os opacos e a clorita. Como consequência do intemperismo químico sobre os minerais opacos há precipitação de soluções ricas em óxidos/hidróxidos de ferro em poros secundários da rocha e em descontinuidades que se desenvolvem paralelamente à foliação, enquanto a alteração das cloritas resulta na formação de argila.

Os índices físicos e a resistência puntiforme mostram uma queda mais acentuada na rocha medianamente alterada (W3), devido ao aumento da porosidade. A precipitação de soluções ricas em óxidos de ferro pode cimentar partes da matriz da rocha e intensifica-se no filito W3, a partir do qual o intemperismo já não mostra um desenvolvimento uniforme para os índices físicos e a resistência. A durabilidade é também influenciada pela porosidade e a presença de níveis cimentados, não exibindo um padrão regular de alteração. A velocidade de propagação mostra-se um bom indicador nos filitos estudados.

Em termos químicos, embora o intemperismo tenha refletido tendências gerais entre os membros extremos dos perfis, os níveis transicionais não exibem um comportamento regular, o que reflete o próprio desenvolvimento do processo intempérico. Como consequência, os vários índices químicos testados foram pouco conclusivos. Isto ocorreu porque a alteração química se deu especialmente nos minerais acessórios até o filito medianamente intemperizado (W3). A mineralogia principal dos filitos parece começar a ser mais intensamente afetada pela alteração apenas a partir do filito muito alterado (W4).

A micropetrografia revelou que as principais modificações mineralógicas e texturais que ocorrem nos filitos iniciam-se especialmente a partir da rocha medianamente alterada e consistem na alteração dos minerais opacos que se precipitam como óxidos e hidróxido de ferro e o aumento da porosidade, mudanças intimamente relacionadas à resistência.

Verificou-se que a alteração de filitos sob clima tropical nos perfis estudados é melhor marcada pelas propriedades físicas e mecânicas em relação às mudanças mineralógicas e químicas, demonstrando a atuação mais intensa do intemperismo físico até o filito W4.

O aumento da porosidade, a alteração dos minerais opacos e a precipitação de óxidos de ferro mostraram ser as principais modificações resultantes dos processos intempéricos e responsáveis pela variabilidade dos parâmetros físicos e mecânicos avaliados no presente estudo. Além da influência dos processos secundários e suas consequências, a heterogeneidade e a anisotropia são características intrínsecas à esses filitos que contribuem para a variabilidade observada nesses parâmetros.

Conclui-se que os parâmetros físicos, mecânicos e químicos em perfis de intemperismo de filito sob clima tropical devem ser utilizados com cautela em projetos geotécnicos, não devendo ser tomados isoladamente, mas em conjunto e associados a um controle de campo, especialmente às características das descontinuidades do maciço rochoso. Torna-se, portanto, complexa a elaboração de modelos geomecânicos que representem adequadamente o meio geológico. Entretanto, é possível dividir os materiais que compõem o perfil em três grupos de comportamento geotécnico similar: os materiais W1/W2, W2, e W2/W3; os materiais W3 e W3/W4. Se considerar-se que os materiais W5 e W6 tem comportamento de solo, é possível agrupá-los em um terceiro grupo.

PERSPECTIVAS PARA TRABALHOS FUTUROS

Propõe-se a investigação mais detalhada dos minerais opacos alterados e da rede de microfraturas que se intensificam com o intemperismo, por meio de técnicas que propiciem a observação mais apurada dessas características, como por exemplo, a microscopia eletrônica de varredura.

Sugere-se também avaliar os efeitos do aumento do número de ciclos de umedecimento e secagem (*slake durability test*) sobre os filitos, com o intuito de investigar se o comportamento da durabilidade permanece sem um padrão uniforme ao longo das classes de intemperismo, como constatado no presente estudo em dois ciclos completos.