



UFRJ

Veronica Dutra de Figueiredo

**CONTROLES GEOLÓGICOS NA
DURABILIDADE DE ROCHAS PELÍTICAS E
METAPELÍTICAS**

Trabalho de Conclusão de Curso

Geologia

UFRJ

Rio de Janeiro

Dezembro de 2017



UFRJ

Veronica Dutra de Figueiredo

CONTROLES GEOLÓGICOS NA DURABILIDADE DE ROCHAS PELÍTICAS E METAPELÍTICAS

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação em Geologia do Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, apresentado como requisito necessário para obtenção do grau de Bacharel em Geologia.

Orientadores:

Emílio Velloso Barroso
Márcio Fernandes Leão

UFRJ

Rio de Janeiro
Dezembro de 2017

DUTRA DE FIGUEIREDO, Veronica

**CONTROLES GEOLÓGICOS NA DURABILIDADE DE
ROCHAS PELÍTICAS E METAPELÍTICAS** / Veronica

Dutra de Figueiredo – Rio de Janeiro: UFRJ / IGEO, 2017.

56 p.

Trabalho Final de Curso (Bacharelado em Geologia) –
Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de
Geociências, Departamento de Geologia, 2017.

Orientadores: Emílio Velloso Barroso, Márcio Fernandes Leão

1. Geologia. 2. Geologia de Engenharia - Trabalho de
Conclusão de Curso. I. Emílio Velloso Barroso, Márcio
Fernandes Leão. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro,
Instituto de Geociências, Departamento de Geologia. III.
Controles Geológicos na Durabilidade de Rochas Pelíticas e
Metapelíticas.

Veronica Dutra de Figueiredo

Controles Geológicos na Durabilidade de Rochas Pelíticas e Metapelíticas

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação em Geologia do Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, apresentado como requisito necessário para obtenção do grau de Bacharel em Geologia.

Orientadores: Emílio Velloso Barroso
Márcio Fernandes Leão

Aprovada em: 18.12.2017

Por:

Orientador: Emílio Velloso Barroso (UFRJ)

Andrea Borges (UFRJ)

Helena Polivanov (UFRJ)

Dedico esta, bem como todas as minhas demais conquistas, aos meus amados pais Carlos Cesar e Lúcia Helena.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais e ao meu irmão, pelo amor, incentivo nas horas difíceis e apoio em todos os momentos dessa jornada. Esta conquista não seria possível sem vocês.

Agradeço a todos os meus amigos que pretendo levar para a vida e que contribuíram com momentos de estudos, risadas, companhias e trabalhos de campo. Agradeço em especial aos meus amigos Ana Clara Varca, Beatriz Caetano, Beatriz Fróes, Bianca Saraiva, Daniel West, Larissa Santana, Lucas Anjos, Lucas Arienti, Letícia Moura, Nina Torres, Rafael Martins, Renato Mafra, Taís Martins e Victor Inada.

Meus agradecimentos aos colegas de trabalho do LEMETRO, em especial aos meus orientadores Márcio e Emílio, por participarem do meu crescimento profissional/científico e por serem pessoas que admiro imensamente.

Obrigada as professoras Andrea e Helena por participarem da avaliação deste trabalho tão importante para mim.

A todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação acadêmica, o meu muito obrigada.

RESUMO

FIGUEIREDO, V. D. **Controles geológicos na durabilidade de rochas pelíticas e metapelíticas**. Ano 2017, p. 56, Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Geologia) – Departamento de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

Rochas pelíticas e metapelíticas ocorrem vastamente pela superfície terrestre e por serem consideradas rochas brandas, elas estão relacionadas a diversos casos de instabilidade de talude de corte, de mineração, enrocamentos de barragem e escavações subterrâneas. A durabilidade é a propriedade geológica mais relevante em projetos que envolvem a exposição de rochas a ação intempérica, pois o intemperismo leva a progressiva degradação das propriedades geomecânicas em um período de tempo relativamente curto se comparado a outros processos geológicos. No presente trabalho foram reunidos os dados de mineralogia por petrografia, índices físicos (porosidade, massa específica seca e capacidade de absorção de água) e durabilidade de *Slake* do filito da Formação Batatal do Quadrilátero Ferrífero, Brasil (resultados próprios de pesquisa). O objetivo do trabalho consiste em comparar esses dados próprios com os de outras rochas pelíticas e metapelíticas de diversas localidades (dados disponíveis na literatura), e assim traçar os controles que influenciam na durabilidade de rochas brandas. Conclui-se então que, de forma geral, a durabilidade dessas rochas está relacionada a perda da qualidade de propriedades índices pela progressão do grau intempérico; ao tipo e intensidade do intemperismo atuante; além de fatores geológicos tais como (1) mineralogia, principalmente a presença de argilomineral expansivo; (2) porosidade; (3) quantidade de argila na rocha; (4) presença de laminações e foliações em rochas; (5) capacidade de absorção de água; e (6) possível preenchimento mineral nas descontinuidades da rocha. Em especial, a durabilidade do filito ensaiado da Fm. Batatal está relacionada com o caráter heterogêneo marcado pela mineralogia e pela presença de foliações e suas descontinuidades.

Palavras-chave: Durabilidade; Pelito; Metapelito; Índice de Durabilidade de *Slake*; Índices Físicos.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
2.1 Conceitos sobre mecanismos de desagregabilidade	13
2.2 Ensaio de durabilidade (<i>Slake Durability</i>)	14
2.3 Desagregabilidade de rochas pelíticas e metapelíticas	15
2.3.1 Formação Gandarela	15
2.3.2 Grupo Jutogh	16
2.3.3 Grupo do Flysch do Baixo Alentejo.....	17
2.3.4 Grupo Beiras	18
2.3.5 Formação Patonga Claystone	19
2.3.6 Formação Pojuca	20
2.3.7 Formação Georgian Bay.....	21
2.3.8 Formação Sevier	22
2.3.9 Formação Himmetoglu	23
3. LOCALIZAÇÃO E CONTEXTO REGIONAL DOS FILITOS ENSAIADOS	24
3.1 Área de estudo: Formação Batatal – Quadrilátero Ferrífero	24
3.2 Estratigrafia do Quadrilátero Ferrífero	25
3.3 Evolução geotectônica do Quadrilátero Ferrífero	27
5. METODOLOGIA	30
5.1 Perfil de Intemperismo	30
5.2 Lâmina Petrográfica	31
5.3 Índices Físicos	31
5.4 Durabilidade de <i>Slake</i>	33
6. RESULTADOS E DISCUSSÕES	35
6.1 Classes de Alteração	35

6.2 Caracterização Mineralógica	36
6.3 Índices Físicos	40
6.4 Durabilidade das Rochas	44
6.4.1 Formação Batatal	44
6.4.2 Comparação com outras rochas	46
6.4.2.1 Formação Gandarela	46
6.4.2.2 Grupo Jutogh	46
6.4.2.3 Grupo Beiras	47
6.4.2.4 Grupo Flysch do Baixo Alentejo	47
6.4.2.5 Formação Patonga Claystone	47
6.4.2.6 Formação Pojuca	48
6.4.2.7 Formação Georgian Bay	48
6.4.2.8 Formação Sevier	49
6.4.2.9 Formação Himmetoglu	50
7. CONCLUSÕES	53
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	54

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Localização da Mina Pau Branco no QF (Silva, 2010)	15
Figura 2 Mapa da área de estudo próxima a barragem Chourah, o filito micáceo foi coletado no ponto 3, a 3 km a montante da barragem (Modificado de Ramamurthy <i>et al.</i> , 1993)	16
Figura 3 Mapa geológico de Portugal na escala 1:1600000 com destaque para as áreas de amostragem: (A) Santiago de Cacém; (B) Almogrove; (C) Almodôvar e Serra de Caldeirão e (D) Funcho (Pinho, 2003)	17
Figura 4 Mapa geológico de Portugal com destaque em vermelho para a área de coleta de amostra (modificado de LNEG, 2010)	18
Figura 5 Localização da Bacia de Sydney (Nunt-jaruwong, 2006)	19
Figura 6 Mapa de localização e estrutural da Bacia do Recôncavo (Milhomem <i>et al.</i> , 2013)	20
Figura 7 Mapa com a localização da amostragem de diversas rochas pelíticas estudadas. Destaque para a localização L-2 (em vermelho) representante do folhelho da Fm. Georgian Bay (modificado de Dick & Shakoor, 1992)	21
Figura 8 Mapa de localização das amostras do folhelho da Fm. Sevier (Nandi & Whitelaw, 2009)	22
Figura 9 Mapa de localização dos pontos de amostragem com destaque para as margas da Fm. Himmetoglu na área de Goynuk (modificado de Gokçeoglu <i>et al.</i> , 2000)	23
Figura 10 Imagem de satélite com a localização do ponto de amostragem (Google Earth, 2017)	24
Figura 11 Mapa geológico simplificado do QF com destaque em vermelho para a área de estudo (modificado de Zhelezinskaia <i>et al.</i> , 2014)	25
Figura 12 Coluna estratigráfica do QF (modificado de Alkmim & Marshak, 1998)	27
Figura 13 Mapa estrutural do QF exibindo as principais feições de dobras: 1 - Sinclinal Piedade, 2 - Homoclinal Serra do Curral, 3 - Anticlinal da Serra do Curral, 4 - Sinclinal Moeda, 5 - Sinclinal Dom Bosco, 6 - Anticlinal de Mariana, 7 - Sinclinal Santa Rita, 8 - Anticlinal Conceição, 9 - Sinclinal Gandarela, 10 - Sinclinal Vargem do Lima, 11 - Sinclinal dos Andaimes. Complexos granito-gnáissicos: 12 - Belo Horizonte, 13 - Bonfim, 14 - Bação, 15 - Santa Bárbara, 16 - Caeté. Falhas: 17 - Bem-Te-Vi, 18 - São Vicente, 19 - Raposos, 20 - Caeté, 21 - Cambotas, 22 - Fundão, 23 - Água Quente, 24 - Congonhas, 25 - Engenho. Cidades: BH - Belo Horizonte, CC - Cachoeira do Campo, IT - Itabirito, NL - Nova Lima, CA	

- Caeté, CG - Congonhas, OP - Ouro Preto (Baltazar & Zuchetti, 2007 modificado de Chemale Jr. <i>et al.</i> , 1994)	29
Figura 14 Perfil de intemperismo interpretado da área de estudo (Leão, 2017)	31
Figura 15 Amostras de cada nível de alteração do filito da Fm Batatal usadas para os ensaios de índices físicos	32
Figura 16 Fotos das amostras de filito da Fm. Batatal antes (A) e depois (D) do ensaio de durabilidade de <i>Slake</i>	33
Figura 17 Equipamento utilizado para o ensaio de durabilidade de <i>Slake</i>	34
Figura 18 (A) Muscovita fresca (alta cor de birrefringência) e quartzo estirado seguindo a foliação principal. (B) Fraturamento irregular não preenchido (Nicóis cruzados)	36
Figura 19 (A) Bandas micáceas e bandas quartzosas-micáceas marcadas pela foliação S2 preenchida por minerais opacos. (B) Detalhe do veio de quartzo com cianita (cor de interferência azul na imagem) (Nicóis cruzados)	37
Figura 20 (A) Detalhe de cianita parcialmente alterada. (B) Muscovita mais alterada (cor de birrefringência menos intensa na borda) (Nicóis cruzados)	37
Figura 21 (A) Muscovita mais alterada (cor de birrefringência menos intensa na borda). (B) Detalhe de bandas de quartzo e minerais opacos estirados (Nicóis cruzados)	38
Figura 22 Mineralogia por análise petrográfica do filito da Fm. Batatal	38
Figura 23 Gráfico de relação temperatura anual x precipitação anual e tipo/intensidade de ação intempérica (Peltier, 1950)	41
Figura 24 Gráfico exibindo a porosidade das rochas avaliadas, nota-se o aumento abrupto desse índice do nível W3 para o W4 no filito da Formação Batatal; o crescimento mais sensível da porosidade do filito dolomítico da Formação Gandarela; o contraste da porosidade em rochas de clima mais ameno e seco (Grupo Jutogh, Grupo FBA, Grupo Beiras, Formação Georgian Bay e Formação Sevier) e clima mais quente e úmido; por fim, a influência da mineralogia expansiva no folhelho da Formação Pojuca	43
Figura 25 Gráfico com os valores de massa específica seca para as rochas estudadas, observa-se um declínio sensível para o filito da Formação Batatal, enquanto o filito dolomítico da Formação Gandarela exibe um decréscimo mais acentuado; o filito micáceo do Grupo Jutogh apresentou o maior índice dentre os filitos avaliados; rochas em clima mais ameno e seco apresentam os maiores valores (Grupo Beiras) para esse índice quando comparados com as rochas de clima mais quente e úmido (Formação Batatal e Formação Patonga Claystone); por fim, a influência da mineralogia expansiva na massa específica seca do folhelho da Formação Pojuca	44

Figura 26 Gráfico que exhibe os resultados de capacidade de absorção para os filitos da Fm. Batatal e Gr. Jutogh e argilito da Formação Patonga Claystone. O aumento abrupto desse índice ocorre entre os níveis W3 e W4 no filito da Fm. Batatal, decorrente de um aumento na abertura entre as foliações. No nível W1, o menor índice pertence ao filito do Gr. Jutogh, estando relacionado com uma baixa porosidade; e o maior índice pertence ao argilito da Fm. Patonga Claystone, devido ao tamanho e conectividade dos poros 45

Figura 27 Gráfico do índice de durabilidade de Slake para o filito da Formação Batatal. Nota-se a progressão não gradual da durabilidade entre os níveis de alteração 45

Figura 28 Gráfico exibindo os índices de durabilidade para as rochas pelíticas e metapelíticas analisadas. A durabilidade do filito da Formação Batatal não seguiu a progressão intempérica. Os maiores índices pertencem as rochas de menor porosidade provenientes de um clima mais brando (Grupo Jutogh, Grupo Beiras, Grupo FBA, Formação Georgian Bay, Formação Sevier e Formação Himmetoglu); a durabilidade do argilito da Formação Patonga Claystone é condicionado pela média capacidade de absorção de água e pela presença de camada mista de illita-esmectita; o filito dolomítico da Formação Gandarela demonstrou uma queda abrupta com a intensificação do grau intempérico; por fim, o folhelho da Formação Pojuca, é a rocha de menor durabilidade para o nível W1, devido a sua abundância de argilomineral expansivo ... 52

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 Classificação de grau de intemperismo (Leão, 2017)	30
Quadro 2 Classificação da durabilidade (Franklin & Chandra, 1972. Adaptado)	34
Quadro 3 Classes de alteração de todas as formações abordadas no trabalho. O marco em “X” indica presença e o traço indica ausência	35
Quadro 4 Mineralogia das rochas estudadas	40
Quadro 5 Dados estatísticos dos índices de durabilidade correspondentes a dois, três e quatro ciclos (Gokçeoglu <i>et al.</i> , 2000)	51

1. INTRODUÇÃO

Materiais de baixa resistência à compressão uniaxial, no intervalo entre 0,5 e 25 MPa, e que exibem comportamento geomecânico entre rocha e solo, são chamados de rochas brandas, incluindo-se rochas pelíticas e metapelíticas (Moon & Beattie, 1995). As rochas brandas são materiais de difícil caracterização geotécnica dada a dificuldade de amostragem e na realização de ensaios, configurando assim limitações na previsão de seus comportamentos geotécnicos (Rodrigues, 1990). Por esse motivo, as rochas brandas pelíticas e metapelíticas são comumente associadas a instabilidade de taludes de corte (Tomazzoli *et al.*, 2009; Quinta-Ferreira *et al.*, 2015), escavações subterrâneas e em enrocamentos de barragens (Alarico, 1992). As rochas pelíticas (folhelhos, argilitos, lamitos e siltitos) por sua vez são de vasta ocorrência e correspondem a cerca de um terço da área terrestre do mundo, sendo frequentemente encontradas em obras de engenharia (Erguler & Shakoor, 2009).

A durabilidade é descrita pela vulnerabilidade da rocha sujeita a ação intempérica. Portanto, este é o parâmetro de engenharia mais relevante em projetos que envolvem a exposição de rochas de baixa resistência a ação do intemperismo (Dick & Shakoor, 1992). A durabilidade é uma propriedade intrínseca do material rochoso e está relacionada a propriedades físicas, mineralogia e alterações preexistentes da rocha (Silva, 2010).

O presente trabalho consiste em comparar dados próprios acerca do filito da Formação Batatal (Quadrilátero Ferrífero, MG) com dados disponíveis na literatura sobre rochas pelíticas e metapelíticas de diversas localidades (nacionais e internacionais) e, assim, traçar fatores que influenciam na durabilidade dessas rochas.

As amostras utilizadas do filito da Formação Batatal são provenientes de outra pesquisa (Leão, 2017). As litologias abordadas através de dados bibliográficos tratam-se do filito dolomítico da Formação Gandarela (Silva & Lana, 2012), filito micáceo do Grupo Jutogh (Ramamurthy *et al.*, 1993), xisto do Grupo Flysch do Baixo Alentejo (Pinho, 2003), xisto negro do Grupo Beiras (Quinta-Ferreira *et al.*, 2005), argilito da Formação Patonga Claystone (Nuntjaruwong, 2006), folhelho da Formação Pojuca (Marques *et al.*, 2005), folhelho da Formação Georgian Bay (Dick & Shakoor, 1992; Russell, 1981), folhelho da Formação Sevier (Nandi & Whitelaw, 2009) e marga da Formação Himmetoglu (Gokçeoglu *et al.*, 2000).

As rochas metapelíticas aqui tratadas (filitos e xistos) foram condicionadas a eventos de metamorfismo regional de baixo grau.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Conceitos sobre Mecanismos de Desagregabilidade

As rochas brandas são bem susceptíveis aos processos de intemperismo físico e químico que ocorrem conjuntamente na natureza, sendo que a desintegração física ocorre em intervalo de tempo menor que a desintegração química e produz mais superfícies livres (Marques *et al.*, 2005). O intemperismo acarreta na progressiva degradação das propriedades geomecânicas e os mecanismos associados a desagregação rochosa são diversos.

O intemperismo físico, de acordo com Taylor & Smith (1986), é o processo que causa fraturamento *in situ* através de alternância de aquecimento/resfriamento, umedecimento/secagem e congelamento/derretimento de gelo sem que haja mudanças químicas. A presença de descontinuidades (laminações, acamamentos, fraturas e falhas), *slaking* e expansão de argilominerais (especialmente do grupo da esmectita) por absorção de água e consequente liberação de *stress* residual são considerados “agentes de colapso”: os principais controles do processo de desintegração física (Taylor, 1988).

Para o presente trabalho, considerou-se *slaking* (desagregabilidade) como a desagregação e dispersão de rochas causadas por ciclos de secagem e umedecimento. O mecanismo de *slaking* é a combinação do aumento da pressão de ar com a entrada de água em poros pequenos (ciclos de umedecimento) e colapso causado pela sucção de água dos poros (ciclos de secagem); acarretando na formação de microfraturas (Taylor, 1988).

Em materiais de argilominerais inativos, a desagregabilidade é causada pela perda de coesão da argila através da adsorção de lâmina de água na superfície argilosa. Esse mecanismo é mais eficiente em rochas muito argilosas, nas quais as argilas se dispersam facilmente e aceleram a fragmentação desses materiais. Com o enfraquecimento da rocha através da saturação, ocorre a formação de fraturas quando a liberação de *stress* residual supera a resistência da rocha. O fraturamento se dá pela propagação de microfraturas nas descontinuidades da rocha, tais como laminações ou foliações (Moon & Beattie, 1995).

No âmbito do intemperismo químico o principal fator condicionante é a mineralogia. A transformação em minerais de maior volume do que o mineral original, como no caso da oxidação de sulfetos (pirita e pirrotita), alteração da calcita em meio ácido e a subsequente decomposição dos produtos dessa reação contribuem para a desagregação da rocha (Taylor & Spears, 1981; Taylor & Cripps, 1987; Taylor, 1988; Franklin e Dusseault, 1989). Outro

relevante processo mineralógico que acarreta na redução da resistência rocha, é a dissolução de minerais solúveis, como carbonatos e sais; eles também atuam como cimento fazendo a ligação entre as partículas sedimentares.

Além da mineralogia, outro fator intrinsecamente ligado a resistência das rochas pelíticas é a sua microestrutura. A principal distinção de microestrutura é o tipo de matriz: contínua ou descontínua. Na matriz contínua predominam os ângulos de contato do tipo face a face e ponta-face entre as argilas, resultando em maiores resistências geomecânicas e maiores índices de *Slake*. Na matriz descontínua, as argilas se organizam em agregados e se concentram em volta dos grãos ou formando pontes entre os grãos (Moon & Beattie, 1995).

2.2 Ensaio de Durabilidade (*Slake Durability*)

A durabilidade é caracterizada pela desagregação/fragmentação do material rochoso devido a variação do teor de água na rocha em diversos ciclos de umedecimento e secagem (Pinho, 2003).

A durabilidade pode ser avaliada através de diversos ensaios, como o de alteração natural por exposição atmosférica e outros ensaios de alteração acelerada: ensaio de *Slake*, ciclagem água-estufa, lixiviação *Soxhlet*, imersão parcial contínua em solução de sulfato de sódio e alteração em câmara de névoa salina (Matos & Rocha, 2006).

Para o presente trabalho, a durabilidade será avaliada pelo ensaio de durabilidade de *Slake* e seu índice correspondente a dois ciclos de ensaio. No entanto, tal índice apresenta limitações na representatividade dos resultados para rochas argilosas, como notificado por alguns autores (Taylor, 1988; Moon & Beattie, 1995; Ulusay *et al.*, 1995; Bell *et al.*, 1997; Gokçeoglu *et al.*, 2000; Nandi & Whitelaw, 2009) que afirmam que diversos ciclos (terceiro, quarto e quinto) são melhor correlacionáveis e melhores indicativos da real durabilidade rochosa.

No caso de Moon & Beattie (1995), eles descobriram uma melhor correlação entre o conteúdo de argila na rocha e o índice de *Slake* no terceiro ciclo, pois perceberam que agregados de fragmentos se coalesceram e não passavam da malha metálica do tambor usado no ensaio. Para Ulusay *et al.* (1995), a realização do ensaio em cinco ciclos se mostrou ser mais representativa para as rochas estudadas, por ser nítido um decréscimo mais significativo na durabilidade conforme o aumento do número de ciclos. Bell *et al.* (1997) reportaram que o índice correspondente a três ciclos de ensaio é mais representativo para a durabilidade, e consequentemente, melhor correlacionável com outros parâmetros, como resistência da rocha a

compressão uniaxial. Para as rochas estudadas por Gokçeoglu *et al.* (2000), o declínio significativo do índice de durabilidade ocorreu nos ensaios de três e quatro ciclos, e no caso de Nandi & Whitelaw (2009), em quatro ciclos.

2.3 Desagregabilidade de rochas pelíticas e metapelíticas

Neste subitem é apresentado brevemente o contexto geológico, caracterização das rochas avaliadas, localização, forma de amostragem, além de informações adicionais das litologias que serviram de apoio para o trabalho na parte de dados disponíveis na literatura. Tais litologias foram escolhidas por serem bem diversificadas entre si, em termos de ocorrência e mineralogia. Cabe ressaltar a dificuldade de encontrar dados completos de caracterização física-mineralógica e durabilidade para as rochas brandas devido a difícil manipulação destas para ensaios.

2.3.1 Formação Gandarela (Brasil)

A formação corresponde a unidade do topo do Grupo Itabira, o grupo mais importante da região do Quadrilátero Ferrífero em valor econômico, e está em contato gradacional com Formação Cauê sotoposta e em discordância erosiva com o Grupo Piracicaba. A Formação Gandarela consiste de mármore predominantemente dolomítico, filito dolomítico (sendo este objeto de estudo do trabalho de Silva & Lana, 2012), formação ferrífera dolomítica e filito (Dorr, 1969). As amostras estudadas correspondem ao filito dolomítico coletado em talude na Mina do Pau Branco, localizada na Serra da Moeda, a 30 km de Belo Horizonte, Minas Gerais (Figura 1). Essa rocha altera-se rapidamente em um saprólito, estando envolvida em processos de instabilidade de talude a partir de ruptura do tipo planar, circular e flambagem (Silva & Lana, 2012).

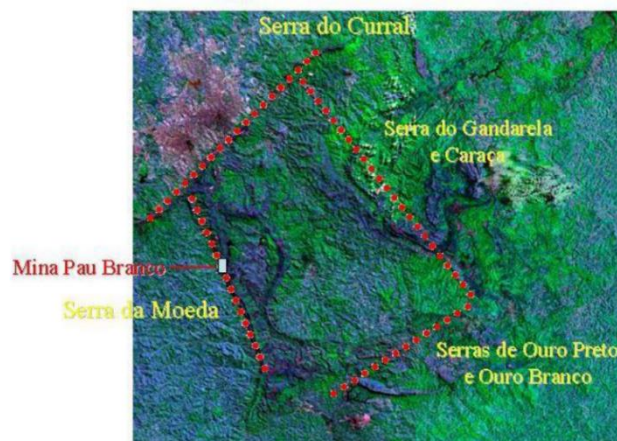


Figura 1 Localização da Mina Pau Branco no QF (Silva, 2010).

2.3.2 Grupo Jutogh (Índia)

O filito micáceo, estudado por Ramamurthy *et al.* (1993), pertence ao Grupo Jutogh de idade Pré-Cambriana. As amostras do filito micáceo foram retiradas próximas a barragem de concreto de Chourah, no distrito de Himachal Pradesh, Índia (Figura 2). Tal filito é descrito como uma rocha levemente esverdeada, possui foliação e quando são, apresenta um aspecto táctil sedoso.

A área de estudo se localiza em uma zona de cisalhamento entre as falhas de empurrão Jutogh e Shali, na região dos Himalaias. Litologicamente, a área é marcada por complexos granito-gnáissicos, ardósias, filitos e rochas metavulcânicas.

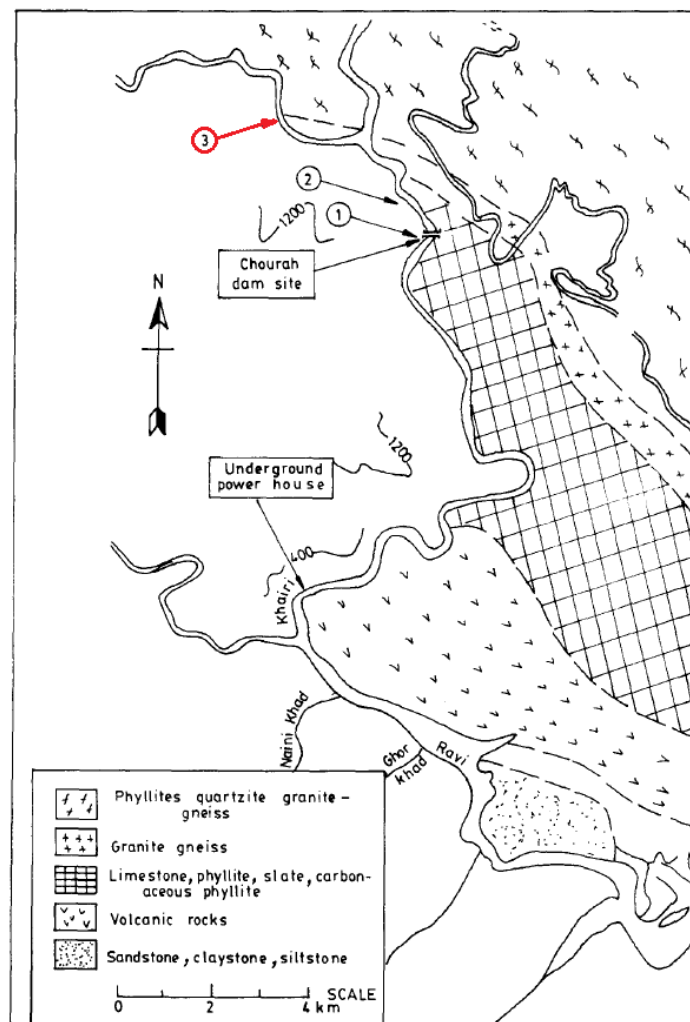


Figura 2 Mapa da área de estudo próxima a barragem Chourah, o filito micáceo foi coletado no ponto 3, a 3 km a montante da barragem (Modificado de Ramamurthy *et al.*, 1993).

2.3.3 Grupo do Flysch do Baixo Alentejo (Portugal)

Os xistos estudados nessa área por Pinho (2003) pertencem ao Grupo do Flysch do Baixo Alentejo (FBA) que correspondem a espessas sequências turbidíticas depositadas em ambiente marinho que sofreram um metamorfismo regional de baixo grau.

O Grupo FBA, que abrange parte da região de Alentejo e norte de Algarve (Portugal) em uma área total de 8000 km², é dividido em três formações: Formação Mértola, Formação Mira e Formação Brejeira; esta última não apresenta os xistos estudados, constitui-se de metagrauvaques e quartzitos com intercalações de pelitos argilosos.

A Formação Mértola, mais antiga de idade Viseano Superior, é formada por metagrauvaques, xistos e metaconglomerados com características de um depósito do tipo *flysch*. No topo, essa formação está em contato gradacional com a Formação Mira, de idade Namuriano, na qual predominam os xistos com baixa relação areia/argila. As amostras foram coletadas em taludes de escavação na área de Santiago de Cacém, Almogrove, Almodôvar, Serra de Caldeirão e área do Funcho (Figura 3).

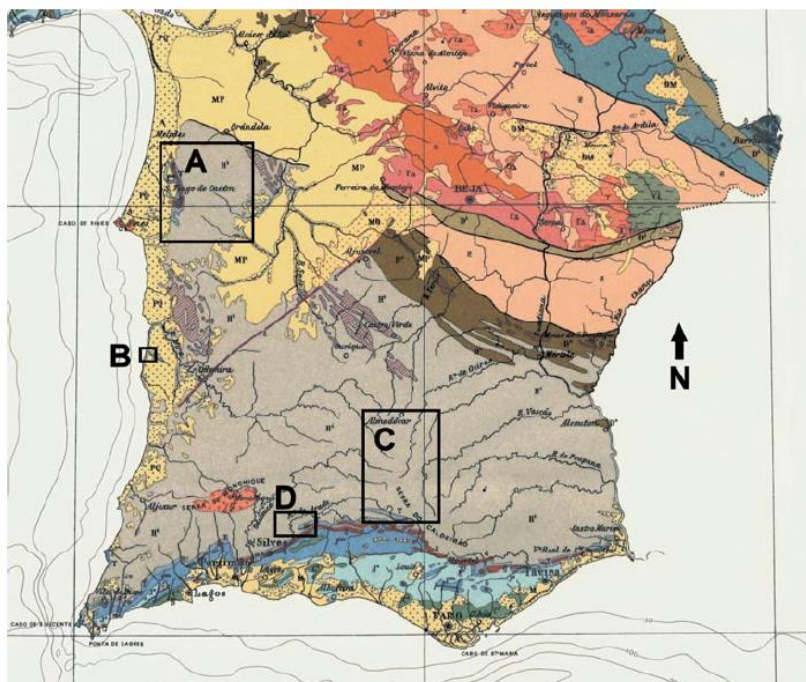


Figura 3 Mapa geológico de Portugal na escala 1:1600000 com destaque para as áreas de amostragem: (A) Santiago de Cacém; (B) Almogrove; (C) Almodôvar e Serra de Caldeirão e (D) Funcho (Pinho, 2003).

2.3.4 Grupo Beiras (Portugal)

O Grupo Beiras, pertencente ao Complexo Xisto-Grauváquico, consiste em formações com alternância de metagrauvaques, metassiltitos e metargilitos.

O objeto do estudo de Quinta-Ferreira *et al.* (2015) é um xisto negro muito foliado e tectonizado, de idade Devoniana ou Siluriana, que pertence ao Grupo Beiras, aflorando na faixa de cisalhamento Porto-Tomar e está relacionado a numerosos casos de instabilidade de talude na área. Foram coletadas amostras superficiais em dois taludes de escavação na estrada EN17 em Coimbra, Portugal (Figura 4).



Figura 4 Mapa geológico de Portugal com destaque em vermelho para a área de coleta de amostra (modificado de LNEG, 2010).

2.3.5 Formação Patonga Claystone (Austrália)

A Formação Patonga Claystone, aflorante em uma área de 150 km², é uma sequência triássica pertencente ao Grupo Narrabeen localizado na Bacia de Sidney, Austrália. Essa formação consiste primariamente de um argilito vermelho a marrom com pequenas proporções de siltito e arenito depositados em ambiente fluvial. Os siltitos e arenitos são apresentados com uma coloração verde a cinza e quando intemperizados, a coloração muda para um marrom pálido. As amostras do argilito foram retiradas em afloramentos e em testemunhos de sondagem (Figura 5).

O argilito dessa formação, alvo do estudo de Nunt-jaruwong (2006), é pouco utilizado na aplicação como fundações rochosas e é recorrente em diversos casos de instabilidade de taludes, já que essa rocha apresenta baixa resistência ao cisalhamento e facilidade a desagregação em água.

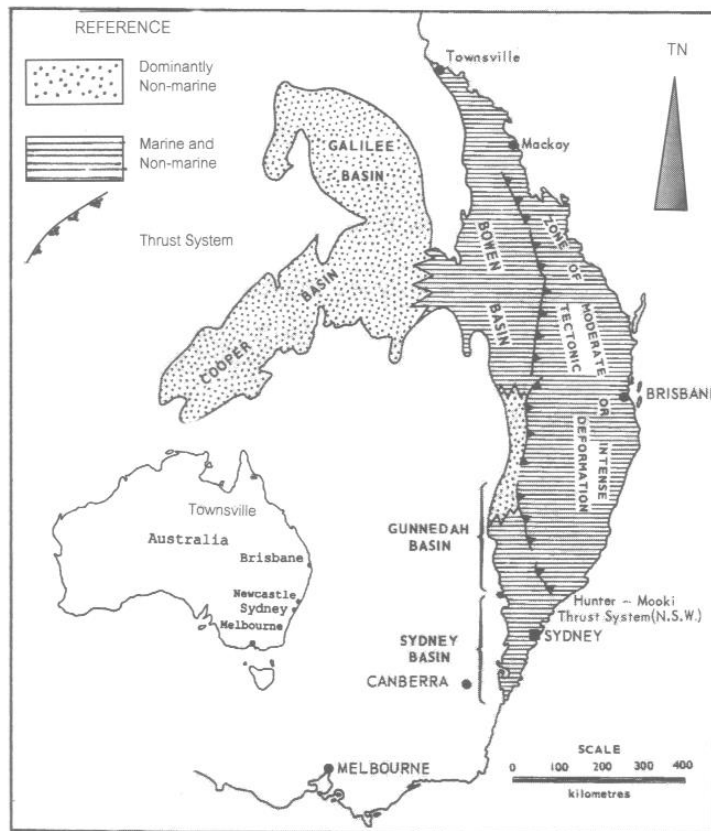


Figura 5 Localização da Bacia de Sydney (Nunt-jaruwong, 2006).

2.3.6 Formação Pojuca (Brasil)

A Formação Pojuca, formada por depósitos de ambiente flúvio-deltáico, é constituída por arenitos muito finos à médios, por vezes silticos ou calcíferos, e biocalcarenitos ostrocoidais, siltitos e folhelhos (Portela *et al.*, 2016); sendo este último, o objeto de estudo de Marques *et al.* (2005). A Formação Pojuca do Grupo Ilhas pertence a Bacia do Recôncavo, localizado no nordeste do Brasil (Figura 6).

O folhelho desta formação apresenta uma coloração amarelada, com camadas ricas em ferro, concreções ferruginosas e fraturas preenchidas por óxido de ferro. As amostras foram coletadas em talude rodoviário e na área da barragem de Pedra do Cavalo, Bahia.

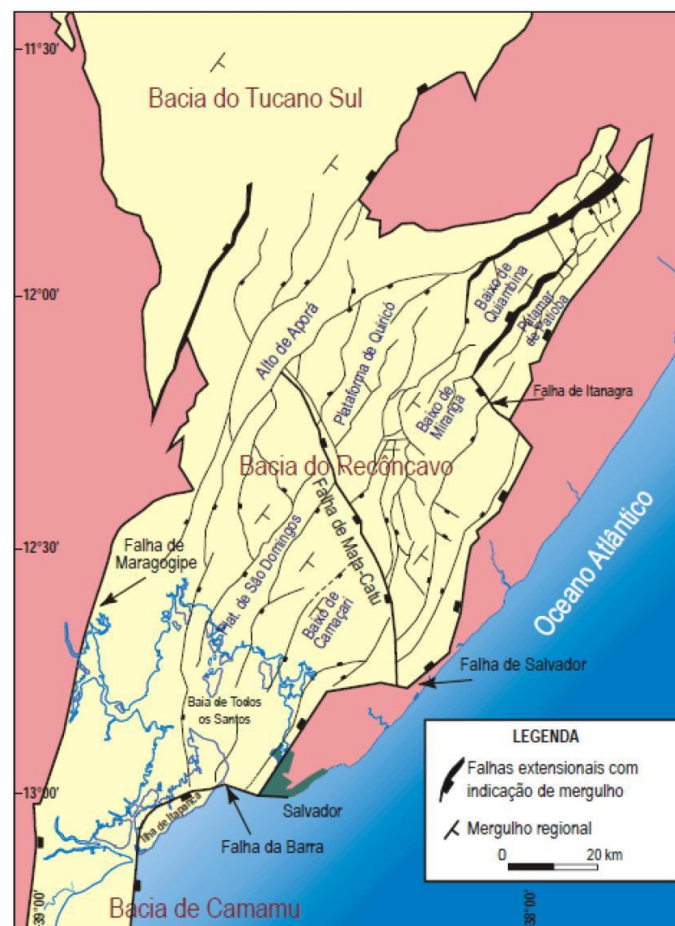


Figura 6 Mapa de localização e estrutural da Bacia do Recôncavo (Milhomem *et al.*, 2013).

2.3.7 Formação Georgian Bay (Canadá)

A Formação Georgian Bay, cuja idade corresponde ao Ordoviciano Superior, localiza-se no sul de Ontário (Canadá), compreendendo os folhelhos Meaford-Dundas e outras litologias similares. Ao aflorar na área de Toronto, muitas construções são realizadas sobre as rochas dessa formação.

Tal formação, estudada por Dick & Shakoor (1992) e Russell (1981), consiste principalmente em folhelhos de coloração azul/cinza e verde/cinza que intercalam com rochas mais duras, tais como arenitos, siltitos, calcários argilosos e folhelhos calcários. As amostras do folhelho foram retiradas de taludes rodoviários, cavas a céu aberto e exposições naturais (Figura 7).

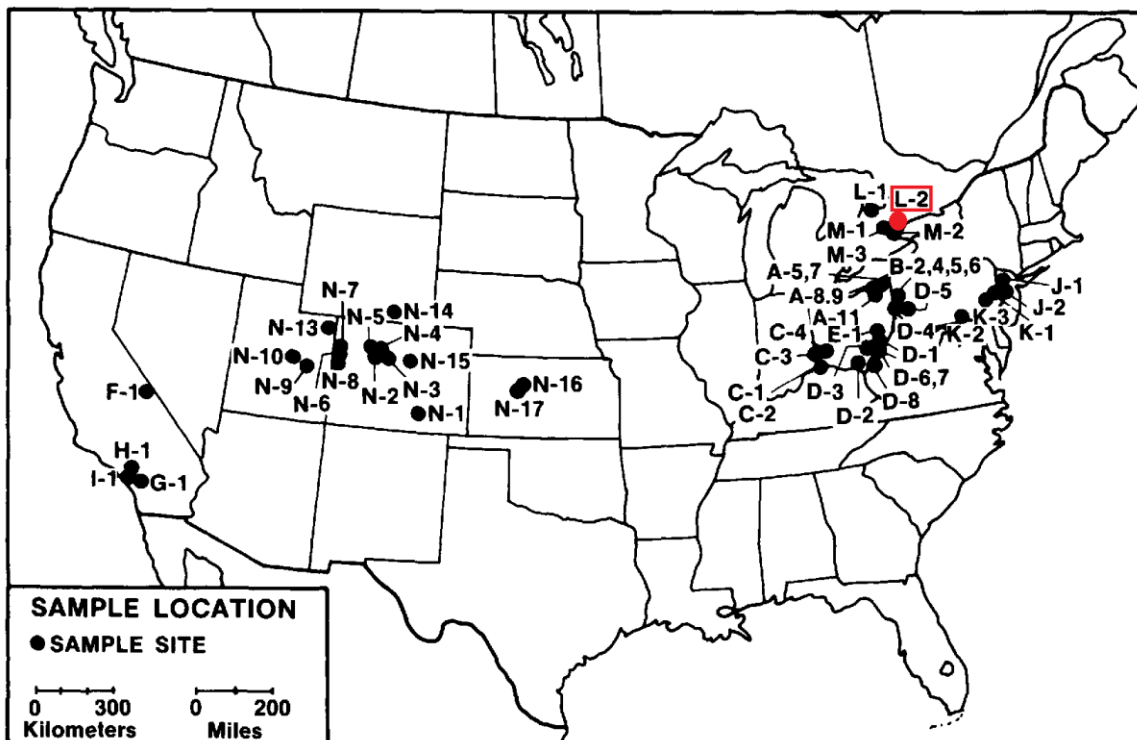


Figura 7 Mapa com a localização da amostragem de diversas rochas pelíticas estudadas. Destaque para a localização L-2 (em vermelho) representante do folhelho da Fm. Georgian Bay (modificado de Dick & Shakoor, 1992).

2.3.8 Formação Sevier (Estados Unidos)

A Formação Sevier, de idade Ordoviciano, aflora na área de rápido desenvolvimento urbano no leste do estado de Tennessee (EUA), consiste em folhelhos calcários silteosos a arenosos e de coloração azulada a acinzentada. A interpretação paleoambiental indica a deposição dos sedimentos em ambiente marinho profundo em zona de bacia de *forearc*. Estratigraficamente, tal formação encontra-se sobreposta aos carbonatos do Grupo Knox e sotoposta à Formação Bays. Estruturalmente, o folhelho Sevier funciona como uma superfície de descolamento (*décollement*) para diversas falhas de empurrão da região.

O folhelho, objeto de estudo por Nandi & Whitelaw (2009), foi coletado em blocos em estado inalterado a partir de pedreiras e cortes de estrada da região (Figura 8).

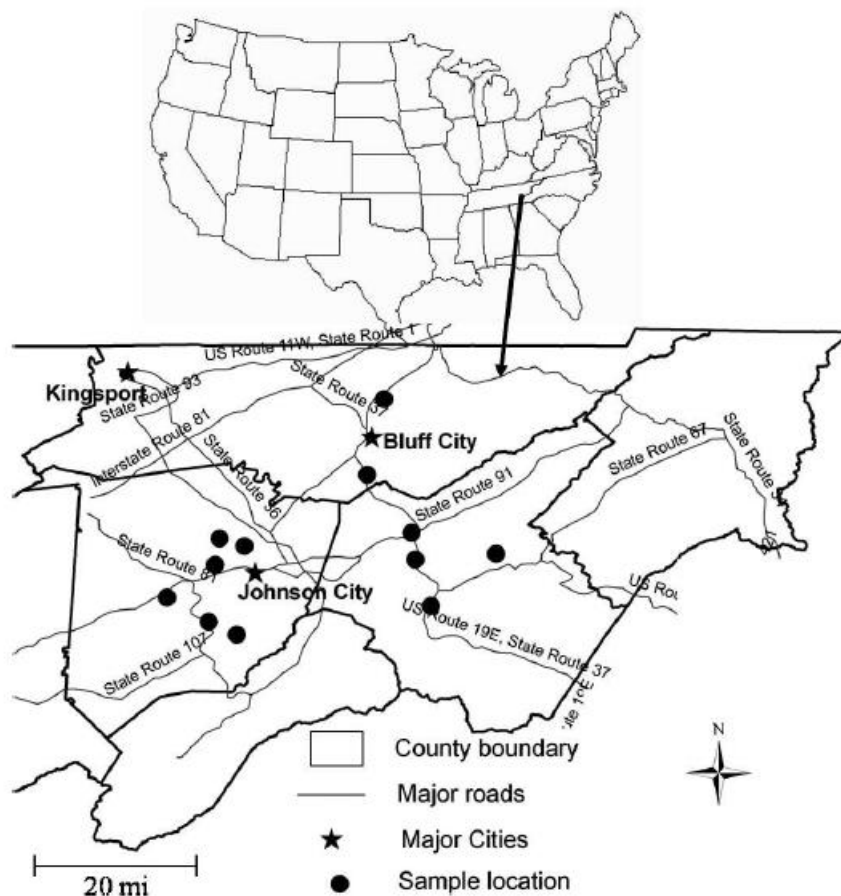


Figura 8 Mapa de localização das amostras do folhelho da Fm. Sevier (Nandi & Whitelaw, 2009).

2.3.9 Formação Himmetoglu (Turquia)

A cerca de 200 km de Istambul, a Formação Himmetoglu, representativa de uma sequência lacustre de idade do Mioceno Superior, aflora na região de Goynuk, Turquia (Figura 9). Tal formação é constituída por lignitos e lignitos argilosos com níveis superiores de folhelho betuminoso; a sequência na parte superior é formada por arenitos finos, siltitos, calcários e margas (Aydogdu *et al.*, 2010).

As rochas amostradas no trabalho de Gokçeoglu *et al.* (2000) são margas levemente esverdeadas e com planos de acamamento pouco espaçados com aberturas de 0 a 0,5 mm; conforme o avanço aos níveis superiores da sequência, particularmente em margas laminadas, esses planos se separam mais facilmente e ocorre a desagregação da rocha. O método de amostragem seguido foi a retirada de blocos inalterados do afloramento.

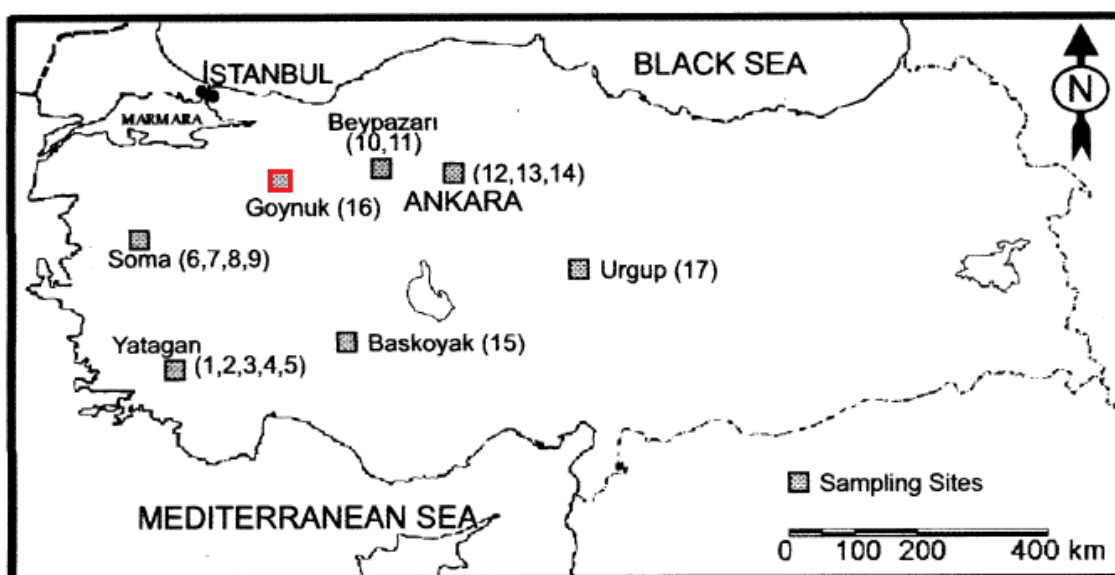
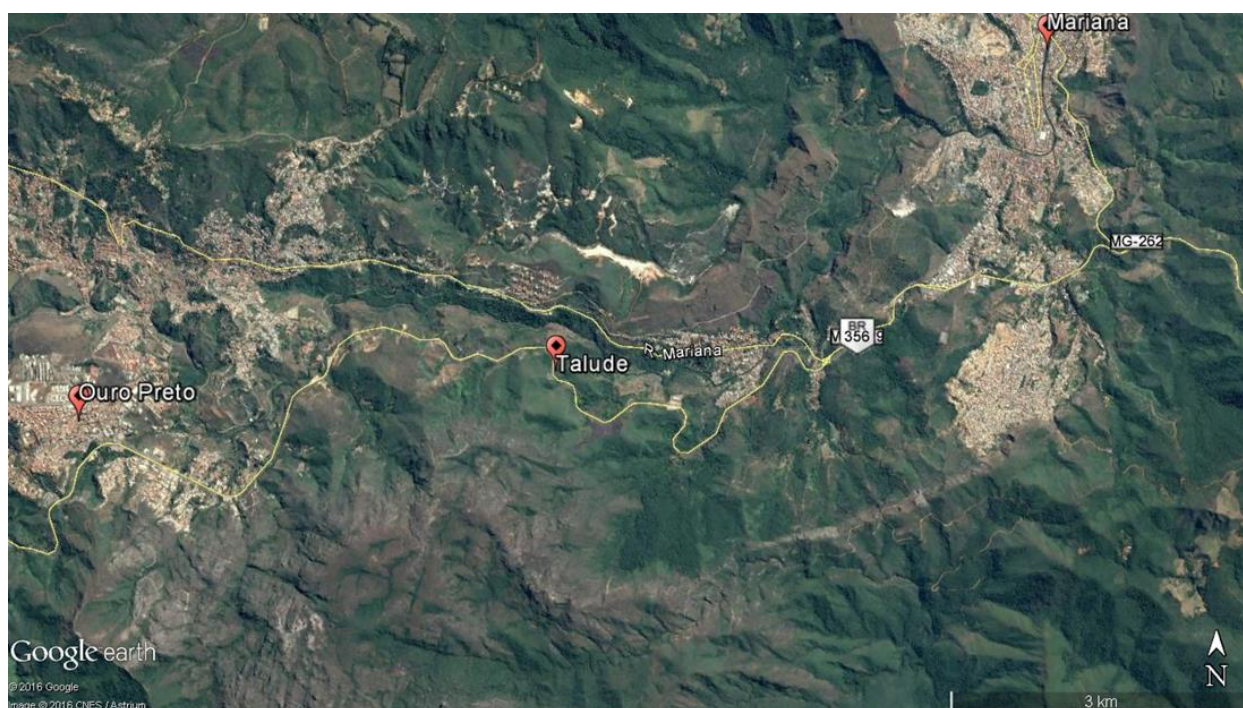


Figura 9 Mapa de localização dos pontos de amostragem com destaque para as margas da Fm. Himmetoglu na área de Goynuk (modificado de Gokçeoglu *et al.*, 2000).

4. LOCALIZAÇÃO E CONTEXTO GEOLÓGICO DOS FILITOS ENSAIADOS

4.1 Área de estudo: Formação Batatal – Quadrilátero Ferrífero

As amostras do filito da Formação Batatal foram coletadas por Leão (2017) em um talude de estrada de coordenadas UTM (Datum WGS 1984) 0660375E e 7743974S na zona 23K, próximo ao km 140 da BR-356 que liga as cidades históricas de Ouro Preto e Mariana, Minas Gerais (Figura 10). Essa rocha altera-se rapidamente pela ação do clima tropical da região e está associada a instabilidade de taludes rodoviários, de mineração e de barragens de rejeito na



região.

Figura 10 Imagem de satélite com a localização do ponto de amostragem (Google Earth, 2017).

4.2 Estratigrafia do Quadrilátero Ferrífero

O Quadrilátero Ferrífero (QF) ocupa uma área de aproximadamente 7000 km² na região centro-sudeste de Minas Gerais, porção sul do Cráton São Francisco (Dorr, 1969) (Figura 11). Apresenta depósitos de classe mundial de ouro e ferro, além de depósitos de minérios de manganês, bauxita e pedras preciosas (Thorman & Ladeira, 1986).

Sua geologia compreende um embasamento de gnaisses tonalítico-graníticos de idade arqueana; acima destas, as rochas arqueanas supracrustais do Supergrupo Rio das Velhas e

sequências metassedimentares de idade paleo e mesoproterozóicas do Supergrupo Minas, Grupo Itacolomi e Supergrupo Espinhaço (Roeser & Roeser, 2010).

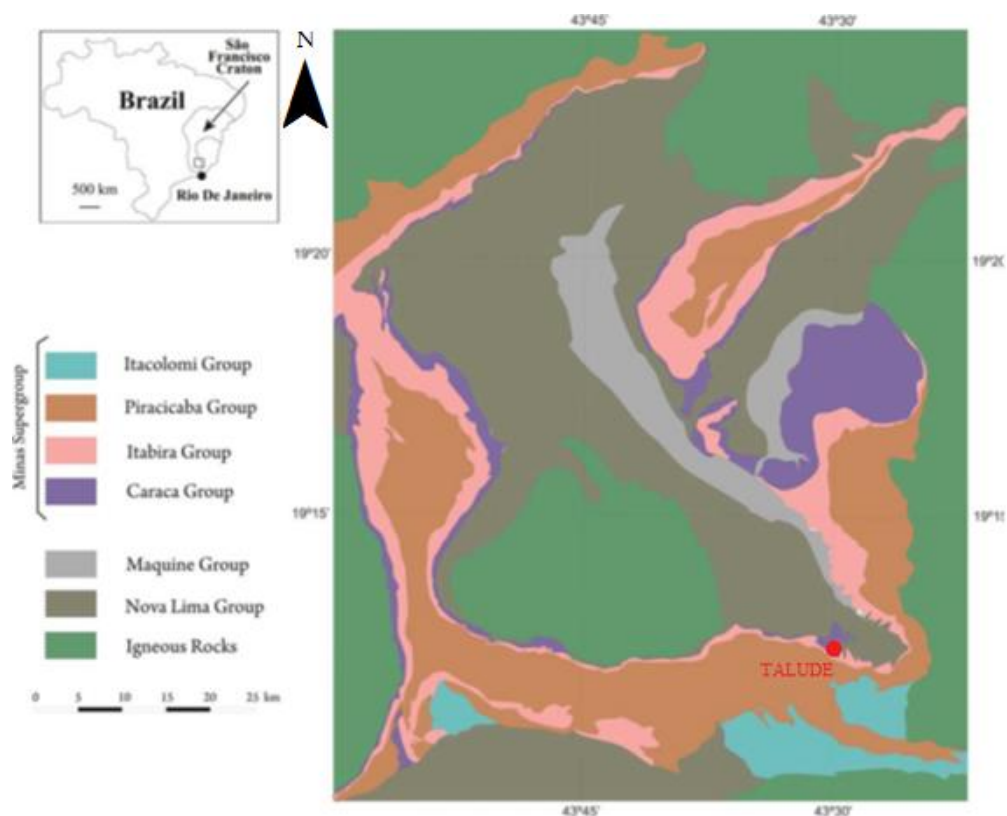


Figura 11 Mapa geológico simplificado do QF com destaque em vermelho para a área de estudo (modificado de Zhelezinskaia *et al.*, 2014).

O embasamento arqueano tem estrutura em domos e é composto por gnaisses de composição tonalítica a granítica, e subordinadamente, por granitos, granodioritos, anfibolitos e metaultramafitos.

O Supergrupo Rio das Velhas (SGRV), uma sequência do tipo cinturão de rochas verdes (*greenstone belt*), é dividido nos grupos Nova Lima, basal, e Maquiné, topo. O Grupo Nova Lima é uma associação de rochas vulcanossedimentares constituído por filitos, filitos grafitosos, clorita-xistos, sericita-xistos, metagrauvas, rochas máficas, ultramáficas, formações ferríferas bandadas do tipo Algoma, metacherts e metadolomitos.

No topo do SGRV, o Grupo Maquiné é dividido em duas formações: Palmital, mais antiga, de origem clástica não marinha em facies litorânea, formada por filitos, quartzitos sericíticos e filitos quartzosos; e Casa Forte, mais nova, de origem fluvial, é constituída por quartzitos sericíticos, quartzitos cloríticos e filitos.

O Supergrupo Minas, unidade que se sobrepõe discordante às rochas do complexo metamórfico e do *greenstone belt* do Supergrupo Rio das Velhas, é compreendido por quatro grupos: Caraça, Itabira, Piracicaba e Sabará (Roeser & Roeser, 2010).

A unidade mais nova do Supergrupo Minas é o Grupo Caraça, compreendido pela Formação Moeda, inferior, e Formação Batatal, superior, de vasta ocorrência, mas raramente se preserva em afloramento, quando isto ocorre, a superfície encontra-se muito intemperizada. A Formação Moeda é constituída por quartzitos com intercalações de filito e níveis conglomeráticos. A Formação Batatal, material de estudo do presente trabalho, é caracterizada por filitos sericíticos, por vezes carbonosos ou ferruginosos (Ruchkys, 2007). O contato entre as duas formações é geralmente abrupto, salvo em áreas nas quais a Formação Moeda é argilosa, as duas formações são intergradacionais e podem não ser separadas (Dorr, 1969).

A unidade sobrejacente é o Grupo Itabira, formado por sequências metassedimentares químicas, divide-se em Formação Cauê, inferior, e Formação Gandarela, superior. A Formação Cauê é caracterizada pela ocorrência de itabirito, itabirito dolomítico, dolomito ferruginoso e filito; a Formação Gandarela é composta por dolomitos, filitos dolomíticos e dolimitos silicosos (Ruchkys, 2007). O contato entre a Formação Batatal e Cauê é concordante e gradacional, geralmente marcado pela ocorrência de hematita na Formação Batatal, que aumenta quantitativa e gradualmente em direção as formações ferríferas bandadas do tipo Lago Superior da Formação Cauê (Dorr, 1969).

Posteriormente, ocorre o Grupo Piracicaba que é dividido da base para o topo em quatro formações: Cercadinho, Fecho do Funil, Taboões e Barreiro. A Formação Cercadinho, mais velha, é formada por quartzitos e filitos, por vezes ferruginosos. A Formação Fecho do Funil é composta por filitos quartzosos, filitos dolomíticos e lentes dolomíticas. De maneira restrita, ocorrem as formações Taboões (ortoquartzitos) e Barreiro (filitos grafitosos).

No topo do Supergrupo Minas, ocorre o Grupo Sabará constituído por clorita xistos, filitos, metagrauvascas, metaconglomerados, quartzitos e raras formações ferríferas. Esse grupo aflora em todo o QF, exceto no Sinclinal Moeda.

O Grupo Itacolomi, de ocorrência restrita a sudeste e sul do QF, recobre o Supergrupo Minas em discordância angular, sendo composto por quartzitos, quartzitos conglomeráticos e lentes de conglomerados.

O Supergrupo Espinhaço, caracterizado pelo quartzito da Serra de Cambotas, ocorre restritamente na parte nordeste do QF. A figura 12 representa a coluna estratigráfica do QF.

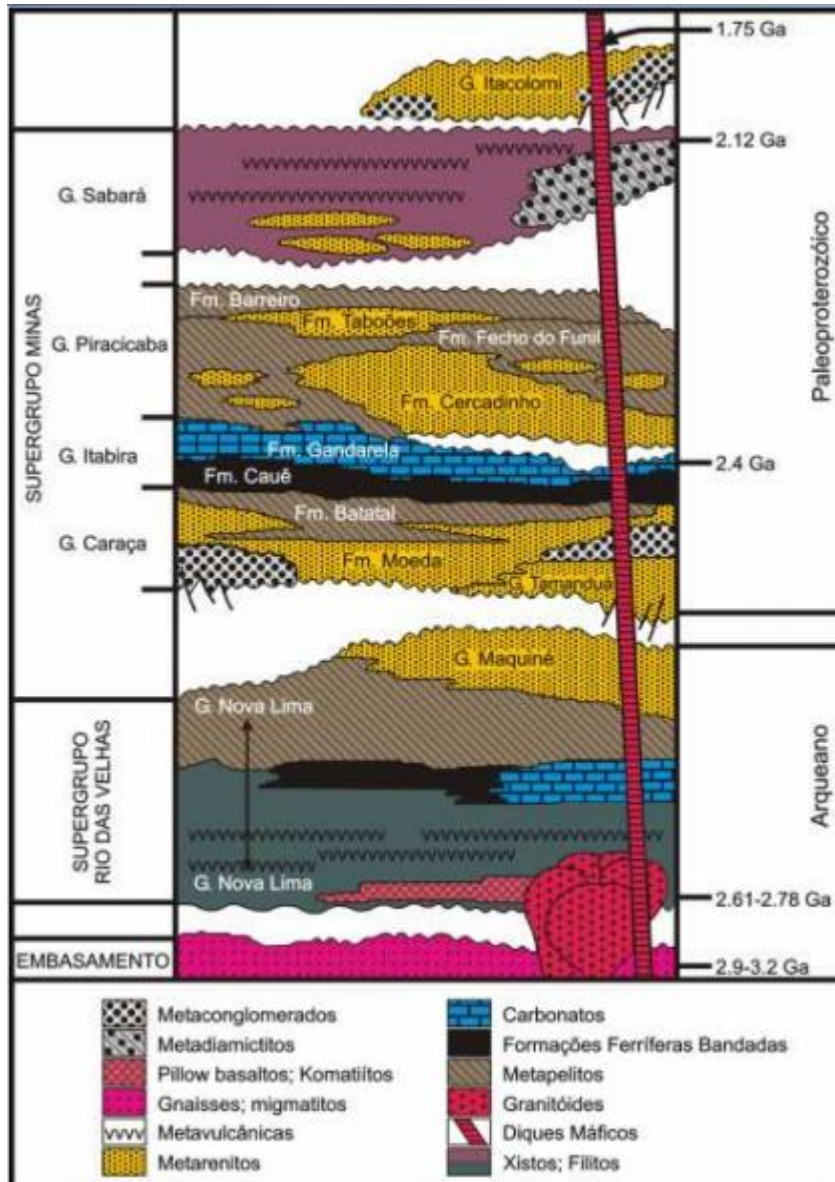


Figura 12 Coluna estratigráfica do QF (Alkmim & Marshak, 1998).

4.3 Evolução Geotectônica do Quadrilátero Ferrífero

Segundo Alkmim & Marshak (1998), o padrão da arquitetura geométrica do QF é caracterizado pelo embasamento arqueano na forma de domos (Complexos granito-gnáissicos do Bonfim, Bação, Caeté, Santa Rita, Florestal e Itaúna) cercados por quilhas contendo o Supergrupo Rio das Velhas e o Supergrupo Minas. As quilhas incluem grandes sinclinais (Moeda, Dom Bosco e Pitangui-Pequi) e homoclinal (Serra do Curral) (Figura 13).

A evolução geotectônica do QF pode ser separada em seis etapas responsáveis por quatro fases de deformação:

(1) Formação dos terrenos granito-*greenstone* arqueanos: o embasamento mais antigo da região tem cerca de 3,2 Ga. Entre 2,8 e 2,7 Ga, depositaram-se em margem convergente as sequências vulcanossedimentares do Supergrupo Rio das Velhas.

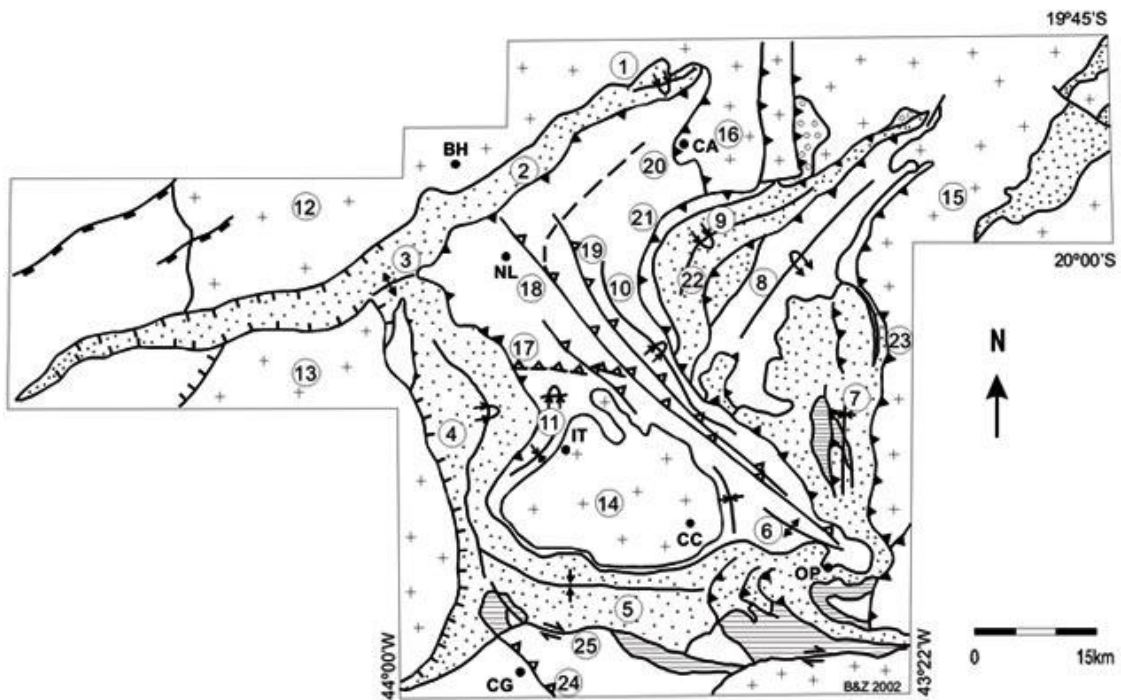
(2) Formação da Bacia Minas: entre 2,6 e 2,4 Ga, a região do QF passou de uma porção plataformal continental para uma bacia de margem passiva. O início desta bacia representa um evento distensivo, caracterizado pela deposição do Grupo Caraça.

(3) Evento Transamazônico (D1): em cerca de 2,1 Ga, a região do QF é cercada por um cinturão de dobramentos e cavalgamentos com vergência para noroeste, resultando na formação de zonas de cisalhamento e dobras em escala regional, assim como dobras subordinadas, do tipo parasíticas.

(4) Colapso Orogênico Transamazônico (DC): entre 2,09 e 2,05 Ga, estabeleceu-se em escala regional, um regime distensivo com a formação dos terrenos em domos e quilhas.

(5) *Rift* do Espinhaço (DE): a formação da Bacia Espinhaço se reflete no QF com a intrusão de diques de diabásio há cerca de 1,75 Ga. Entre 1 e 0,9 Ga, um evento distensional acarretou no desenvolvimento de uma bacia oceânica.

(6) Brasileiro (D2): este segundo evento compressivo, relacionado a aglutinação do paleocontinente Gondwana, ocorreu entre 0,7 e 0,43 Ga e criou um sistema de dobramentos e cavalgamentos com vergência para oeste que reativou antigas estruturas do QF.



LEGENDA

	Supergrupo Espinhaço		Falha de empurrão D1		Anticlinal, anticlinal invertido
	Grupo Itacolomi		Falha de empurrão D2		Sinclinal, sinclinal invertido
	Supergrupo Minas		Falha de empurrão D3		
	Supergrupo Rio das Velhas		Falha normal D4		
	Complexos Granito-gnáissicos		Falha de empurrão D5		
			Falha transcorrente		

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

5. METODOLOGIA

5.1 Perfil de Intemperismo

A identificação dos graus de alteração do filito da Formação Batatal foi realizada por Leão (2017) que utilizou a classificação da ISRM (2015). Posteriormente, o autor conduziu uma descrição *in situ* e macroscópica da mineralogia, cores da rocha, testes simples da matriz (risco do canivete e golpes do martelo geológico) e identificou as famílias de fraturas, assim como aspectos tais como abertura, espaçamento, persistência e estimativa J_v (número de fissuras/m³) (Quadro 1).

Os níveis de alteração W1, W2, W3 e W4 foram os identificados no talude rodoviário da BR-356, sendo considerado o contato entre eles como abrupto, não gradacional (Figura 14). A partir desse talude, foram coletadas em cada grau de alteração amostras de bloco de rocha para posteriores ensaios.

Quadro 1 Classificação de grau de intemperismo (Leão, 2017).

Grau de Alteração	W1	W2	W3	W4
Descrição tátil-visual	Rocha de granulometria fina, com mudança na cor e brilho, partindo de prata intenso no nível W1 para cinza amarelado/azulado e fosco no nível W4, mais sedoso com desprendimento de argila e areia fina por abertura da foliação. Não há diferenças mineralógicas evidentes em escala macro para as classes. A diferenciação das classes é feita principalmente pela mudança de coloração e da caracterização física e mecânica simples. No nível W2, é observado um subtipo denominado como "W2 Foliação", marcado por preenchimentos máficos com passagens silicosas.			
Coerência	Rocha coerente	Rocha coerente a pouco coerente	Rocha pouco coerente	Rocha muito pouco coerente
Cor	Cinza prateado	Cinza escuro fosco	Cinza escuro avermelhado	Cinza escuro amarelado e azulado
Fratramento	Fratramento paralelo e ortogonal à foliação			
Abertura (cm)	0 a 0,2	0,2 a 0,5	0,5 a 0,8	0,8 a 2
Espaçamento (cm)	>100	100 a 50	50 a 5	<1
J_v (fraturas/m³)	1 a 3	1 a 3	3 a 10	3 a 10



Figura 14 Perfil de intemperismo interpretado da área de estudo (Leão, 2017).

5.2 Lâmina Petrográfica

As lâminas delgadas do filito da Fm. Batatal foram confeccionadas no Laboratório de Laminação do Departamento de Geologia da UFRJ com o objetivo de caracterizar a mineralogia da rocha, além de aspectos de grau de alteração, granulação, texturas e fissuras. Para cada nível de alteração, foram feitas duas lâminas delgadas: uma paralela e outra ortogonal à foliação Sn.

Em seguida, tais lâminas foram descritas com o auxílio do microscópio de luz transmitida da marca *Zeiss* modelo *Axio Scope.A1*, dotado de uma câmera digital *AxioCam ICc 1*, do Laboratório de Experimentos em Mecânica e Tecnologia de Rochas (LEMETRO) do Departamento de Geologia da UFRJ.

5.3 Índices físicos

As propriedades índices obtidas, tais como massa específica seca, porosidade e capacidade de absorção de água, são índices muito empregados na caracterização básica de rochas e também afetam o processo de alterabilidade das rochas. São índices calculados através de relações de massa seca, massa de água, volume total e volume de vazios que estão diretamente associados a mineralogia, textura e microestrutura da rocha. Foram utilizados para cada nível de alteração dez fragmentos de massa entre 40 e 60g (Figura 15).

Durante a progressão da alteração/intemperismo na rocha, ocorre perda do material por dissolução ou erosão interna e aumento do grau de fissuração, resultando consequentemente no aumento da porosidade, da permeabilidade e no decréscimo na massa específica.

A porosidade, indicativo do volume de vazios da rocha, é a razão entre o volume de vazios de uma amostra e o seu volume total, sendo normalmente expressa em porcentagem. O ensaio consiste em colocar a amostra de rocha seca em recipiente fechado com água (para reter possíveis fragmentos desagregados) por um período de 48 horas e depois pesá-la.

A capacidade de absorção de água indica a quantidade de água que pode ser absorvida pela rocha por unidade de massa. Considera-se absorção de água como a água retida em fraturas e poros, assim como a água envolta a argilominerais (Nunt-jaruwong, 2006). O ensaio consiste em colocar a amostra de rocha seca em recipiente fechado com água por um período de 48 horas e depois pesá-la. Calcula-se através da razão entre a massa de água da amostra e a sua massa seca, também sendo comumente expressa em porcentagem.

A massa específica seca, sendo expressa normalmente em g/cm^3 , é calculada através da razão da massa seca da amostra e seu volume total. Esse índice depende da mineralogia constituinte da rocha e sua porosidade.

Para o cálculo do volume, as amostras foram cortadas de forma mais regular possível e suas dimensões foram medidas com uso de paquímetro digital. Anteriormente foi proposto o cálculo do volume através do peso submerso, mas as amostras se fragmentavam facilmente em presença de água, principalmente no nível W4, comprometendo essa metodologia.

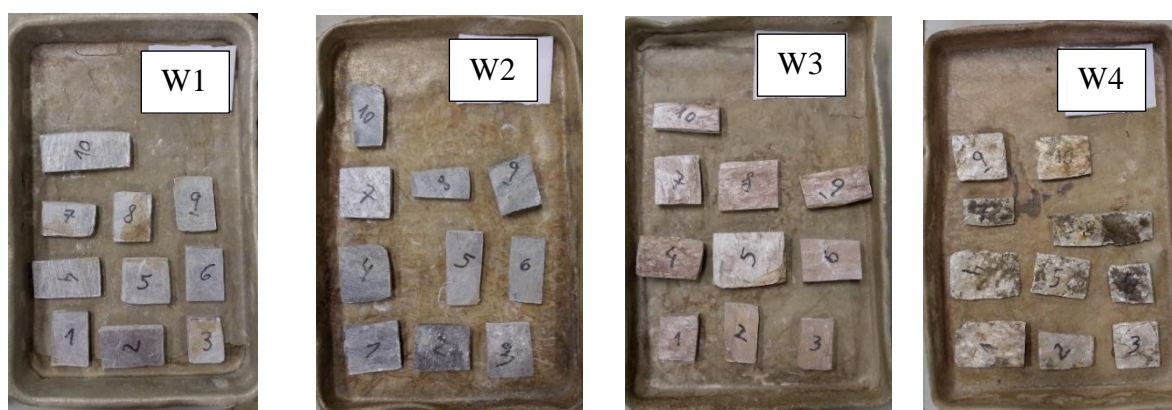


Figura 15 Amostras de cada nível de alteração do filito da Fm. Batatal usadas para os ensaios de índices físicos.

5.4 Durabilidade de *Slake*

O ensaio de durabilidade de *Slake* testa a desagregação do material rochoso em pequenos fragmentos através da variação do teor de água em ciclos de umedecimento e secagem. A metodologia seguiu a proposta de Franklin & Chandra (1972). Dez amostras (cada uma entre 40 e 60 g) previamente secas e desbastadas (sem arestas) de cada nível de alteração são colocadas em um recipiente metálico com aberturas de 2 mm, parcialmente submerso rotacionando em uma velocidade de 20 rpm durante 10 minutos. Em seguida, o material retido no recipiente metálico é colocado para secar na estufa (24 horas a 105°C) e sua massa seca é medida. Este ciclo padronizado de secagem, umedecimento e ação mecânica é repetido em seguida (Figuras 16 e 17).

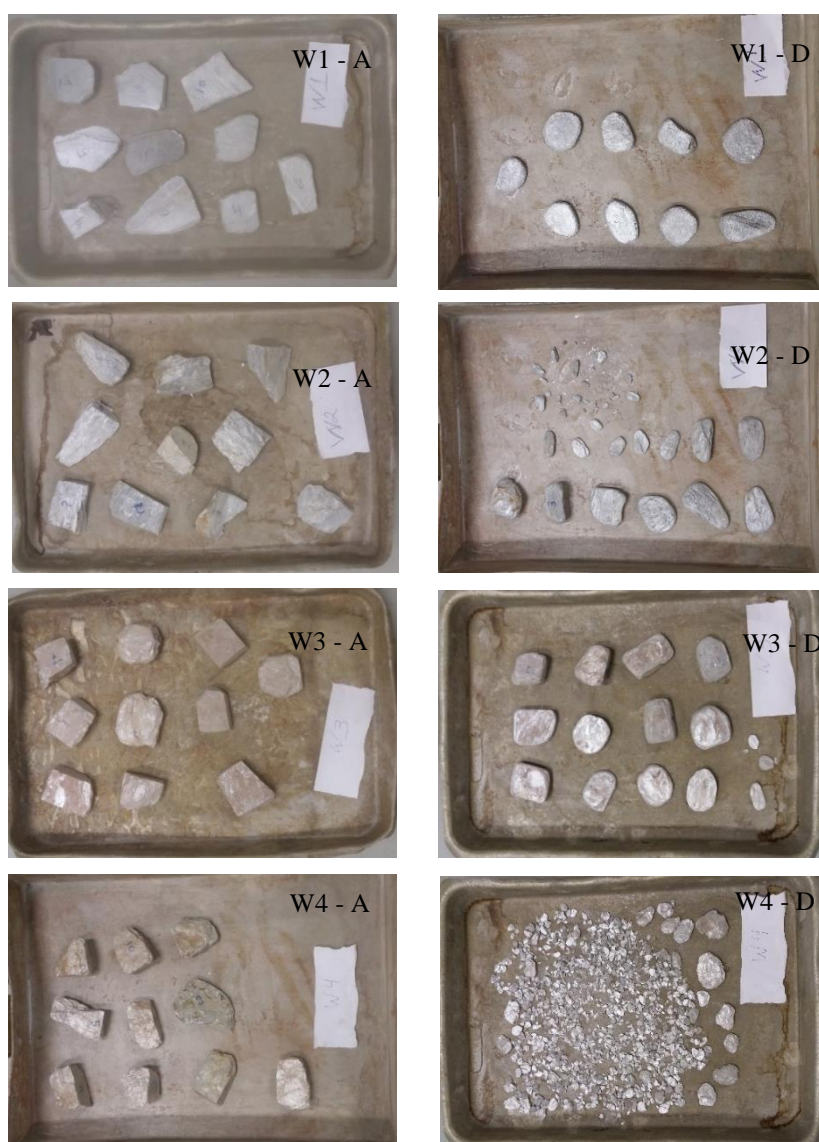


Figura 16 Fotos das amostras de filito da Fm. Batatal antes (A) e depois (D) do ensaio de durabilidade de *Slake*.



Figura 17 Equipamento utilizado para o ensaio de durabilidade de *Slake*.

O índice de durabilidade de *Slake* (Id_2) é calculado através da razão entre a massa seca do material retido após o ensaio e a sua massa seca inicial (Equação 1). No qual, A é a massa seca inicial das amostras mais massa do cilindro; B é a massa seca das amostras após o segundo ciclo mais o cilindro; e C é a massa do cilindro. O índice de *Slake* segue a classificação em questão de durabilidade exibida no quadro 2.

$$\text{Índice de Durabilidade de } Slake (Id_2) = \frac{B-C}{A-C} \times 100\% \quad (\text{Equação 1})$$

Quadro 2 Classificação da durabilidade (Franklin & Chandra, 1972. Adaptado).

Id_2 (%)	Classificação da Durabilidade
0-25	Muito baixa
26-50	Baixa
51-75	Média
76-90	Alta
91-95	Muito alta
96-100	Extremamente alta

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1 Classes de Alteração

A classificação dos graus de alteração para o filito da Formação Batatal foi, em parte, adaptada a proposta pela ISRM (2015). Por se tratar de uma rocha branda, todos os níveis de alteração encontrados estariam classificados como W4 (altamente intemperizado) e esse filito apresenta particularidades não aplicáveis a classificação da ISRM (2015), por exemplo: é riscado pela unha, não produz sons metálicos quando golpeado por martelo geológico e não sofre descoloração, e sim mudança de cor conforme a progressão do intemperismo (Leão, 2017).

Para as demais formações geológicas de rochas pelíticas e metapelíticas, seus estados de alteração encontram-se reunidos no quadro 3. Para efeito de discussão de resultados, todas as rochas pelíticas encontram-se na classe W1 (rocha sã) e as metapelíticas possuem diferentes níveis de intemperismo, exceto pelo filito micáceo do Grupo Jutogh.

Não há detalhamento da caracterização das classes de alteração, se houve e/ou qual foi o tipo de adaptação necessária para classificar essas rochas brandas de acordo com ISRM (2015).

Quadro 3 Classes de alteração de todas as formações abordadas no trabalho. O marco em “X” indica presença e o traço indica ausência.

Autor	Litologia	Formação/Grupo	W1	W2	W3	W4
Leão (2017)	Filito	Fm. Batatal	X	X	X	X
Silva & Lana (2012)	Filito dolomítico	Fm. Gandarela	-	X	X	X
Ramamurthy <i>et al.</i> (1993)	Filito micáceo	Grupo Jutogh	X	-	-	-
Pinho (2003)	Xisto	Grupo do FBA	-	X	X	X
Quinta-Ferreira <i>et al.</i> (2005)	Xisto negro	Grupo das Beiras	-	-	X	X
Nunt-jaruwong (2006)	Argilito	Fm. Patonga Claystone	X	-	-	-
Marques <i>et al.</i> (2005)	Folhelho	Fm. Pojuca	X	-	-	-
Dick & Shakoor (1992)	Folhelho	Fm. Georgian Bay	X	-	-	-

Nandi & Whitelaw (2009)	Folhelho	Fm. Sevier	X	-	-	-
Gokçeoglu <i>et al.</i> (2000)	Marga	Fm. Himmetoglu	X	-	-	-

6.2 Caracterização Mineralógica

O filito da Fm. Batatal apresenta uma assembleia mineralógica composta por muscovita, quartzo, minerais opacos, sericita e minerais acessórios (cianita e turmalina). A partir dessa assembleia, o protólito desse filito é um pelito metamorfizado em condições de pressão e temperatura de fácies xisto verde a granulito.

No geral, esse filito é descrito por bandas de muscovita lepidoblásticas submilimétricas com cristais de quartzo granoblásticos milimétricos em conjunto crenulado, no qual a foliação S1 marcada pela muscovita é paralela ao S0.

O nível W1 apresenta poucos traços de alteração, como a formação de sericita nas bordas da muscovita. Os minerais opacos encontram-se inalterados. Observa-se a ocorrência de fraturas não preenchidas e a presença de veios de quartzo na rocha (Figura 18 A e B). A composição modal é formada por 60% de muscovita, 20% de quartzo, 16% de minerais opacos e 4% de sericita.

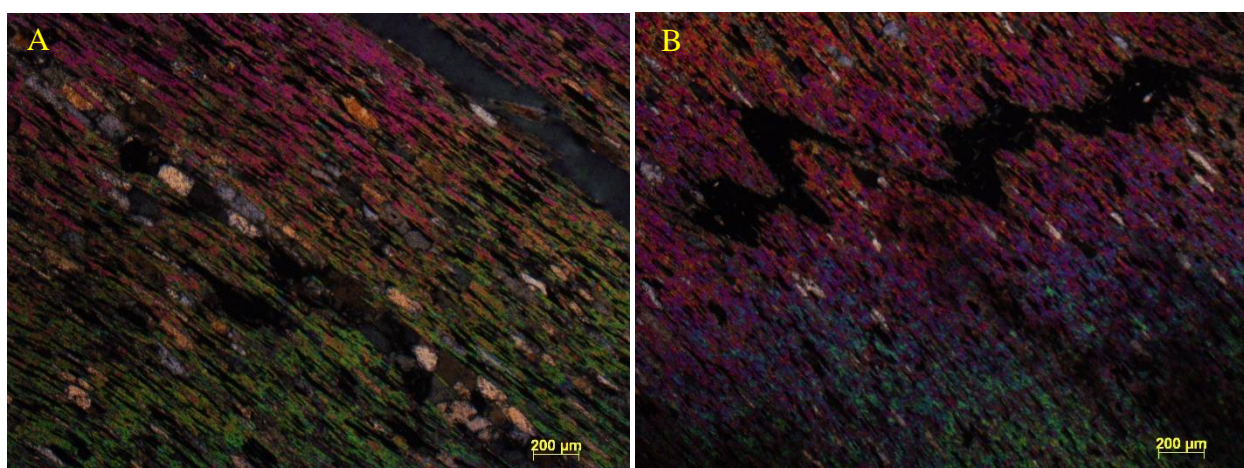


Figura 18 (A) Muscovita fresca (alta cor de birrefringência) e quartzo estirado seguindo a foliação principal. (B) Fraturamento irregular não preenchido (Nicóis cruzados).

No nível W2, a foliação S1 marcada pela muscovita é paralela ao S0 e a foliação S2 é marcada pelo preenchimento de minerais opacos que sofreram alteração e os seus produtos migraram e depositaram nas bordas dos quartzos em bandas quartzosas-micáceas. As bandas de

muscovita apresentam leve alteração que forma sericita. Veios de quartzo granulares foram encontrados contendo cianita (Figura 19 A e B). A rocha é composta por 46% de muscovita, 27% de quartzo, 20% de minerais opacos, 5% de sericita e 2% de cianita.

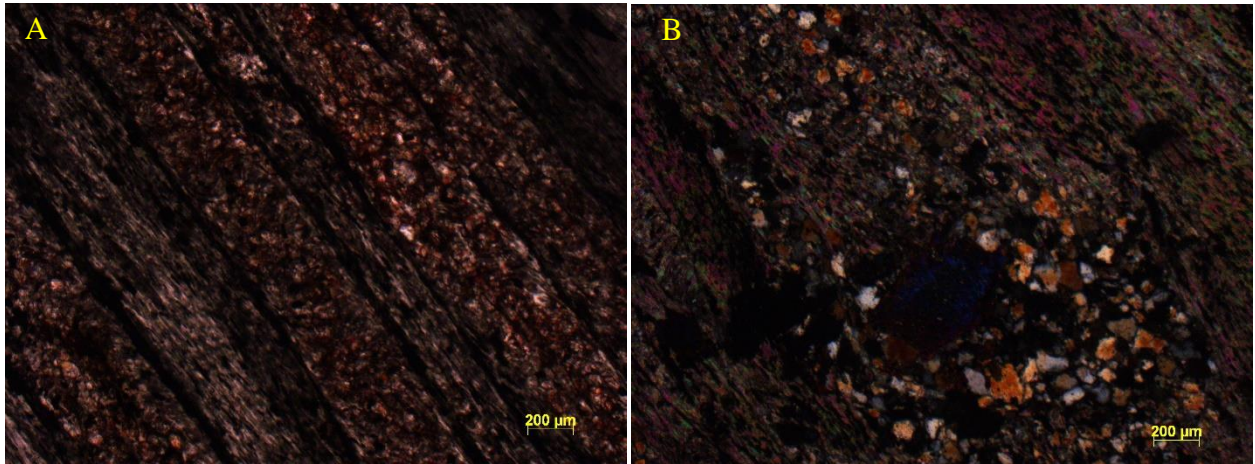


Figura 19 (A) Bandas micáceas e bandas quartzosas-micáceas marcadas pela foliação S2 preenchida por minerais opacos. (B) Detalhe do veio de quartzo com cianita (cor de interferência azul na imagem) (Nicóis cruzados).

No nível W3, os veios de quartzo granular possuem porfiroblastos intertectônicos de cianita parcialmente alteradas. Os minerais opacos alteram-se para minerais de coloração avermelhada. Parte da muscovita continua sua alteração para sericita (Figura 20 A e B). Os cristais de turmalina encontram-se inalterados e seguindo a foliação S1. A rocha apresenta fraturamento não preenchido. Sua composição modal é 40% de muscovita, 20% de quartzo, 18% de minerais opacos, 10% de sericita, 10% de cianita e 2% de turmalina.

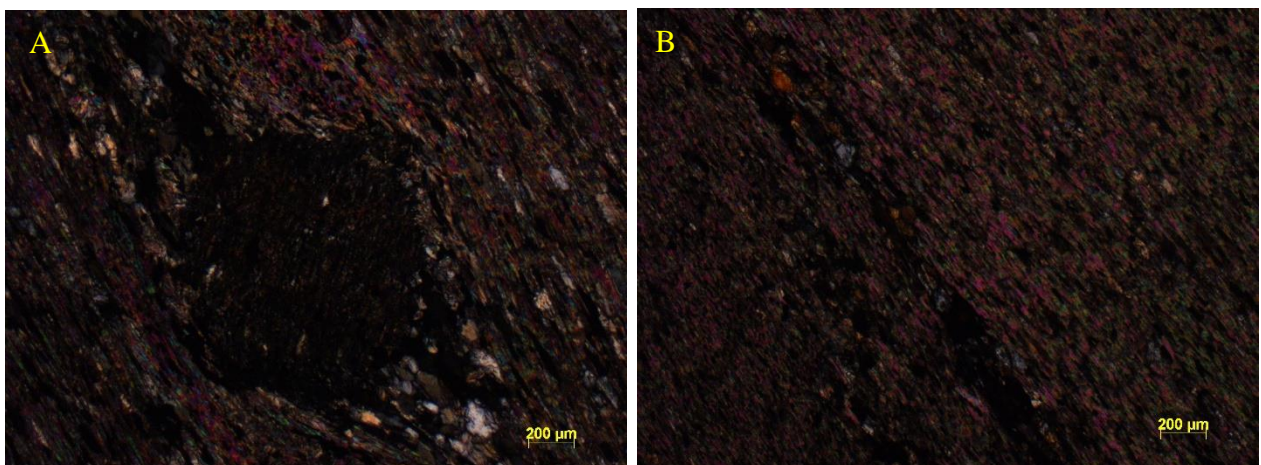


Figura 20 (A) Detalhe de cianita parcialmente alterada. (B) Muscovita mais alterada (cor de birrefringência menos intensa na borda) (Nicóis cruzados).

No nível W4, os veios de quartzo não possuem cianita. A muscovita continua alterando progressivamente para sericita e os minerais opacos estão parcialmente alterados. A rocha apresenta fraturas não preenchidas (Figura 21 A e B). A rocha é composta por 35% de muscovita, 30% de quartzo, 20% de minerais opacos e 15% de sericita.

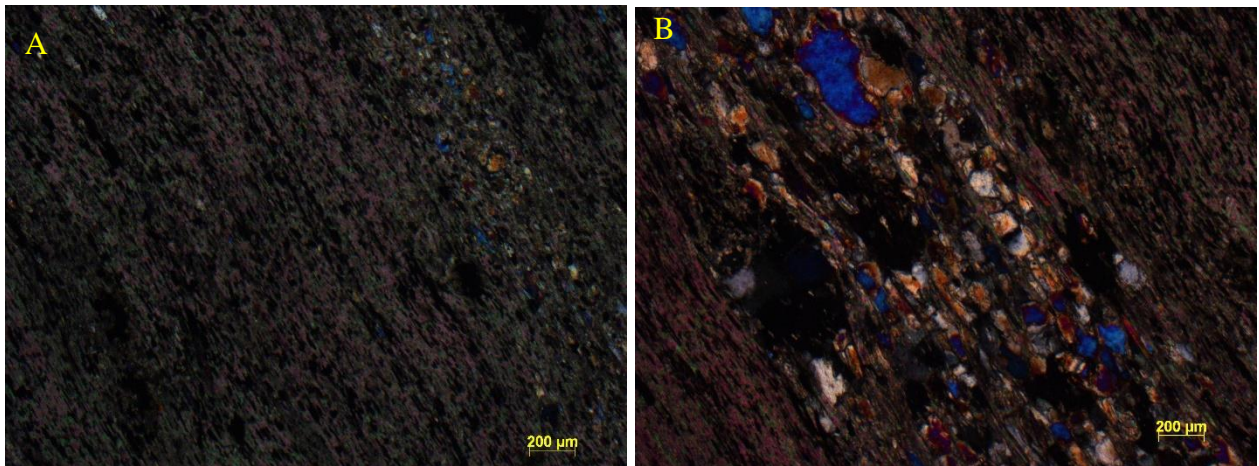


Figura 21 (A) Muscovita mais alterada (cor de birrefringência menos intensa na borda). (B) Detalhe de bandas de quartzo e minerais opacos estirados (Nicóis cruzados).

Conforme a progressão do intemperismo, é possível notar o decréscimo de muscovita e o aumento de sericita, que é identificada na borda da muscovita, evidenciando um processo secundário de alteração mineral. Observa-se também que minerais resistentes, como quartzo e turmalina, são mais presentes nos níveis mais alterados W3. De forma mais sensível, a quantidade de minerais opacos aumenta com o grau intempérico (Figura 22).

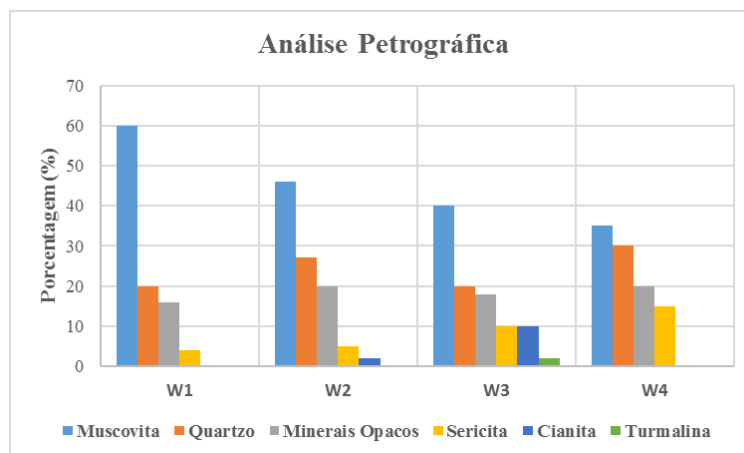


Figura 22 Mineralogia por análise petrográfica do filito da Fm. Batatal.

Não foram encontrados dados específicos de mineralogia tanto por petrografia quanto por DRX no trabalho Silva (2010). Então nesse caso, iremos considerar a descrição mineralógica de Johnson (1962) na área de Dom Bosco (MG), que caracteriza o filito dolomítico da Formação Gandarela como composto por sericita, clorita, dolomita, quartzo, magnetita e epidoto.

A mineralogia do filito micáceo do Grupo Jutogh foi descrita por petrografia de lâmina delgada e confirmada por DRX; trata-se de um filito composto por quartzo, feldspato, clorita, muscovita, biotita, óxido de ferro, grafita, turmalina e epidoto (Ramamurthy *et al.*, 1993).

O xisto do Grupo do Flysch do Baixo Alentejo (FBA), apresenta em todos os níveis de alteração, uma mineralogia composta majoritariamente de micas e argilominerais, sendo a caulinita mais abundante, seguida por illita e clorita. Em menor quantidade, identifica-se a ocorrência de quartzo e feldspatos, por fim, em porcentagens ainda menores, ocorrem calcita, siderita e hematita. Em níveis W4 percebe-se um aumento de caulinita e illita (Pinho, 2003).

O xisto negro do Grupo das Beiras é constituído mineralogicamente por quartzo, caulinita, clorita, vermiculita, muscovita e rara pirita. No nível W4 os picos de vermiculita e caulinita são mais evidentes (Quinta-Ferreira *et al.*, 2005).

O argilito são da Formação Patonga Claystone é caracterizado por partículas de tamanho silte de quartzo e feldspato, inseridos em uma matriz de illita, com interestratificações de illita-esmectita, caulinita e clorita (Nunt-jaruwong, 2006).

O folhelho inalterado da Formação Pojuca é constituído por uma mineralogia composta por quartzo, clorita e argilominerais (caulinita e grupo da esmectita) (Marques *et al.*, 2005).

O folhelho da Formação Georgian Bay, descrito por Dick e Shakoor (1992), é composto por illita, caulinita, clorita e em menor quantidade, interestratificações de illita-esmectita.

O folhelho da Formação Sevier é formado por quartzo, calcita, gipsita, pirita, clorita, illita e caulinita-esmectita (Nandi & Whitelaw, 2009).

A marga da Formação Himmetoglu é composta mais abundantemente por argilominerais, entre eles esmectita, illita e caulinita, além de calcita, dolomita, feldspato e em menor porcentagem, quartzo (Gokçeoglu *et al.*, 2000). O quadro 4 exhibe os dados da mineralogia obtidos para as rochas estudadas, para a Fm. Gandarela, na qual optou-se por uma descrição de campo.

Quadro 4 Mineralogia das rochas estudadas.

Autor	Litologia	Formação/Grupo	Mineralogia
Leão (2017)	Filito	Formação Batatal	Muscovita, quartzo, minerais opacos e sericita
Silva & Lana (2012)	Filito dolomítico	Formação Gandarela	Sericita, clorita, dolomita, quartzo, magnetita e epidoto
Ramamurthy <i>et al.</i> (1993)	Filito micáceo	Grupo Jutogh	Quartzo, feldspato, clorita, muscovita, biotita, óxido de ferro, grafita, turmalina e epidoto
Pinho (2003)	Xisto	Grupo do Flysch do Baixo Alentejo	Mica, caulinita, illita, quartzo, feldspato, calcita, siderita e hematita
Quinta-Ferreira <i>et al.</i> (2005)	Xisto negro	Grupo das Beiras	Quartzo, caulinita, clorita, vermiculita, muscovita e rara pirita
Nunt-jaruwong (2006)	Argilito	Formação Patonga Claystone	Quartzo, feldspato, illita, illita-esmectita, caulinita e clorita
Marques <i>et al.</i> (2005)	Folhelho	Formação Pojuca	Quartzo, clorita, caulinita e grupo da esmectita
Dick & Shakoor (1992)	Folhelho	Formação Georgian Bay	Illita, caulinita, clorita e illita-esmectita
Nandi & Whitelaw (2009)	Folhelho	Formação Sevier	Quartzo, calcita, gipsita, pirita, clorita, illita e caulinita-esmectita
Gokçeoglu <i>et al.</i> (2000)	Marga	Formação Himmetoglu	Calcita, dolomita, feldspato, quartzo, esmectita, illita e caulinita

6.3 Índices físicos

Os índices físicos obtidos foram a massa específica seca, porosidade e capacidade de absorção de água do filito da Formação Batatal. A massa específica seca variou de 2,67 g/cm³ (W1), 2,56 g/cm³ (W2), 2,5 g/cm³ (W3) a 2,43 g/cm³ (W4), um decréscimo sensível que é

explicado pela formação de minerais menos densos em ações de intemperismo e está coerente com o aumento da porosidade por abertura da foliação.

A porosidade e a capacidade de absorção de água estão intimamente relacionadas com o grau de alteração; percebe-se um aumento brusco desses índices físicos especialmente nos níveis mais alterados (W3 e W4) condicionados pela maior abertura de foliação. A porosidade variou de 16,9% (W1 e W2), 19,9% (W3) a 44,3% (W4) e a capacidade de absorção de água variou de 6,3% (W1), 6,9% (W2), 7,9% (W3) a 18,2% (W4).

Esse filito ambientado em um clima quente e úmido sofre com a ação intempérica de alta intensidade (Peltier, 1950) (Figura 23). De acordo com o gráfico de Peltier (1950), o intemperismo atuante é do tipo químico, porém ele não leva em consideração a reatividade da rocha à água. De acordo com Leão (2017), a alteração física é o principal processo de desagregabilidade do filito da Formação Batatal. O gráfico foi utilizado para estabelecer a intensidade do intemperismo que age sobre as demais litologias, de acordo com a localização e dados pluviométricos e de temperatura.

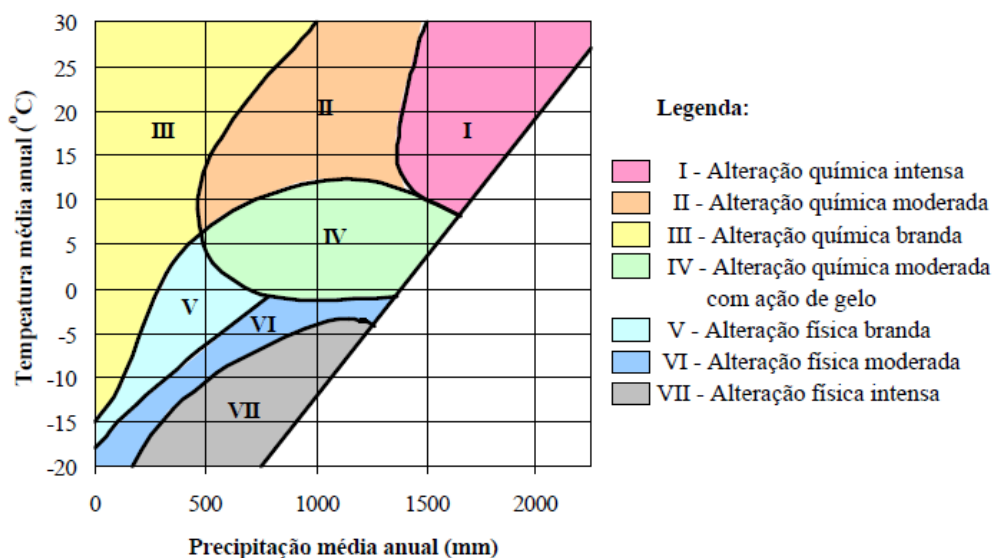


Figura 23 Gráfico de relação temperatura anual x precipitação anual e tipo/intensidade de ação intempérica (Peltier, 1950).

O filito dolomítico da Formação Gandarela, classificado de acordo com o seu grau de alteração, em W2, W3 e W4, apresentou a mesma tendência de um decréscimo na sua massa específica seca e aumento da porosidade conforme a progressão do intemperismo. A dissolução de minerais solúveis de carbonato é responsável pela diminuição da massa específica seca que

variou de 2,24 g/cm³ (W2), 2 g/cm³ (W3) a 1,85 g/cm³ (W4). A porosidade aumentou de 21,3% (W2), 29,6% (W3) a 32,9% (W4), um acréscimo mais pronunciado na passagem do nível W2 para W3 e no geral, um aumento mais discreto se comparado com o filito da Formação Batatal.

O filito micáceo do Grupo Jutogh, rocha sã, apresentou os seguintes valores de índices físicos: massa específica seca (2,72 g/cm³), porosidade (2,9%) e capacidade de absorção de água (1,05%). O valor da sua massa específica é maior que a rocha sã do filito de regime tropical da Fm. Batatal, além da porosidade ser a menor quando comparado a esse filito. Esses índices físicos estão diretamente relacionados a uma mineralogia relativamente resistente ao intemperismo moderado que atua na região.

O xisto negro do Grupo Beiras no nível W3 (rocha moderadamente alterada) obteve índices físicos de massa específica seca de 2,78 g/cm³ e porosidade de 2,8%; já no nível W4 (rocha muito alterada), a massa específica seca diminuiu significativamente para 2,58 g/cm³ e a porosidade aumentou para 10,1%. Apesar da rocha se apresentar muito alterada, sua porosidade é considerada média, sendo menor que a maioria da porosidade das rochas metapelíticas sãs. A ocorrência dessa litologia em Coimbra, região de clima temperado quente, indica que a rocha é alterada predominantemente por ação química e de intensidade moderada. Desse modo, o intemperismo e conseqüentemente a perda das propriedades físicas nas rochas dessa região são mais brandas se comparados a rochas ambientadas em regiões de maior precipitação e temperatura, como nos casos do filito da Formação Batatal e do filito dolomítico da Formação Gandarela.

O xisto do Grupo Flysch do Baixo Alentejo apresentou a massa específica aparente de 2,55 g/cm³ (W2); 2,19 g/cm³ (W3) e 2,10 g/cm³ (W4). A porosidade aumentou de 7,6% (W2), 16% (W3) a 23,9% (W4); mesmo nos níveis mais alterados a porosidade mostrou-se próxima aos valores das rochas metapelíticas sãs ou levemente alteradas oriundas de clima tropical.

Para as rochas pelíticas, no caso o argilito da Formação Patonga Claystone, o ensaio de índices físicos foi realizado em amostras inalteradas, resultando em uma capacidade de absorção de água de 10,89% e massa específica seca de 2,52 g/cm³. O valor de sua capacidade de absorção de água é próximo do resultado desse índice para a rocha moderadamente alterada (W3) do filito da Formação Batatal; isso pode estar relacionado com o tamanho maior e a conectividade dos poros do argilito sã.

O folhelho da Formação Pojuca, rocha sã, exibiu o maior valor de porosidade (22,7%) e o menor de massa específica seca (2,09 g/cm³) comparando-se com o nível W1 de todas as

rochas pelíticas e metapelíticas avaliadas. A porosidade está condicionada a mineralogia abundante em argilomineral expansivo do grupo da esmectita, que ao passar por ciclos de umedecimento (expansão da estrutura mineral) e secagem (contração da estrutura mineral) cria um microfraturamento propagante ao acamamento e a consequente criação de descontinuidades na rocha. Esse processo também influencia na menor massa específica seca.

O folhelho nível W1 da Formação Georgian Bay apresentou uma porosidade baixa a média de 8,2% e outros ensaios de propriedades índices não foram realizados (Dick e Shakoor, 1992). Pela área de ocorrência dessa litologia, ela sofre alteração moderada com ação de gelo. Assim como no argilito da Formação Patonga Claystone, os argilominerais expansivos ocorrem em menor proporção através de interstratificações de illita-esmectita na matriz da rocha, influenciando na porosidade da rocha.

O folhelho inalterado da Formação Sevier exibiu uma porosidade baixa a média de 6,3% e massa específica seca de 2,50 g/cm³. Pela área de estudo, o intemperismo atuante é do tipo químico de intensidade moderada. Esses índices físicos estão diretamente relacionados a presença de calcita e gipsita como material de preenchimento nas fissilidades e microfraturas da rocha. Transformações minerais ocorrem quando a calcita reage com água levemente ácida e forma bicarbonato de cálcio, que é volumetricamente maior e causa maior porosidade no folhelho; a gipsita é de origem secundária formada pela oxidação da pirita na presença de calcita, o que provoca a expansão ao longo dos planos de fissilidade e maior porosidade (Nandi & Whitelaw, 2009).

Não foram realizados ensaios de caracterização física para a marga da Formação Himmetoglu. As figuras 24, 25 e 26 reúnem os valores de porosidade, massa específica seca e capacidade de absorção de água das litologias avaliadas.

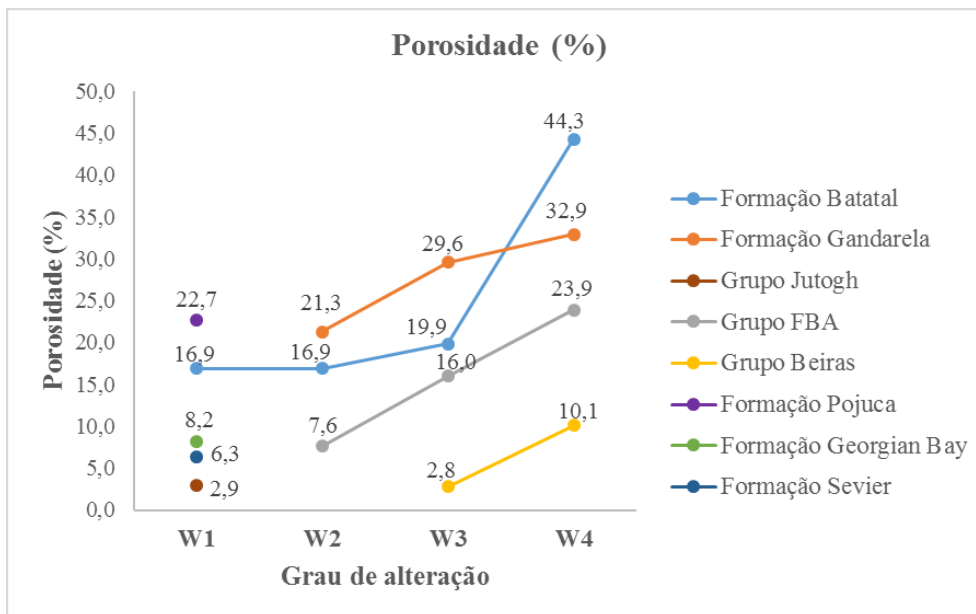


Figura 24 Gráfico exibindo a porosidade das rochas avaliadas, nota-se o aumento abrupto desse índice do nível W3 para o W4 no filito da Formação Batatal; o crescimento mais sensível da porosidade do filito dolomítico da Formação Gandarela; o contraste da porosidade em rochas de clima mais ameno e seco (Grupo Jutogh, Grupo FBA, Grupo Beiras, Formação Georgian Bay e Formação Sevier) e clima mais quente e úmido; por fim, a influência da mineralogia expansiva no folhelho da Formação Pojuca.

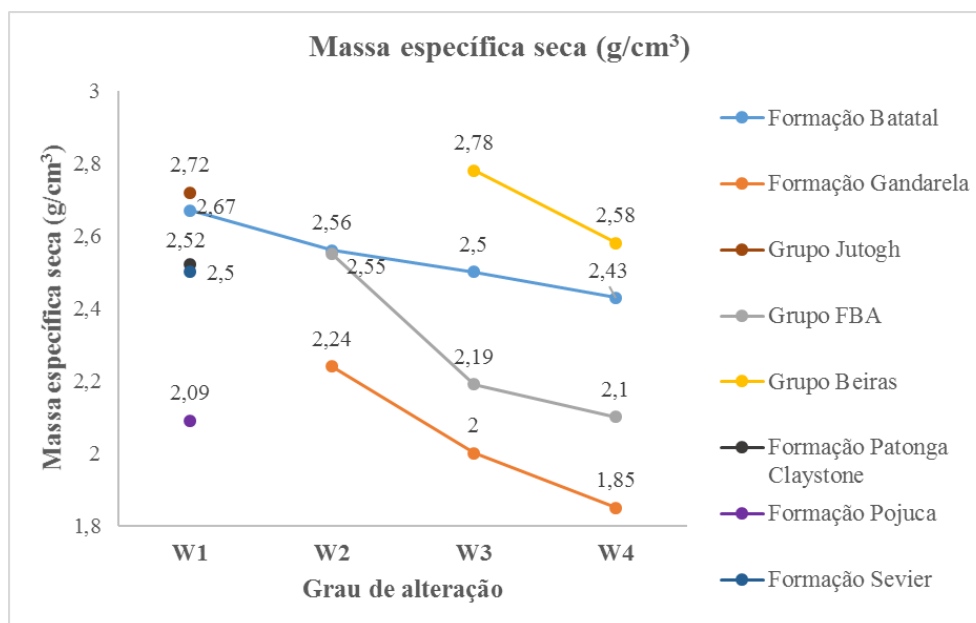


Figura 25 Gráfico com os valores de massa específica seca para as rochas estudadas, observa-se um declínio sensível para o filito da Formação Batatal, enquanto o filito dolomítico da Formação Gandarela exibe um decréscimo mais acentuado; o filito micáceo do Grupo Jutogh apresentou o maior índice dentre os filitos avaliados no nível W1; rochas em clima mais ameno e seco apresentam os maiores valores (Grupo Beiras) para esse índice quando comparados com as rochas de clima mais quente e úmido (Formação Batatal e Formação Patonga Claystone); por fim, a influência da mineralogia expansiva na massa específica seca do folhelho da Formação Pojuca.

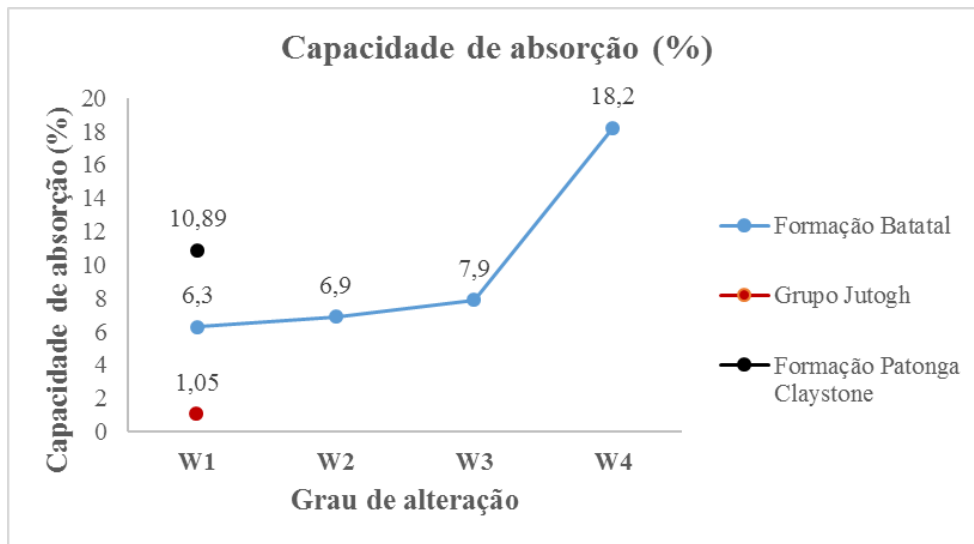


Figura 26 Gráfico que exibe os resultados de capacidade de absorção para os filitos da Fm. Batatal e Gr. Jutogh e argilito da Formação Patonga Claystone. O aumento abrupto desse índice ocorre entre os níveis W3 e W4 no filito da Fm. Batatal, decorrente de um aumento na abertura entre as foliações. No nível W1, o menor índice pertence ao filito do Gr. Jutogh, estando relacionado com uma baixa porosidade; e o maior índice pertence ao argilito da Fm. Patonga Claystone, devido ao tamanho e conectividade dos poros.

6.4 Durabilidade da Rocha

6.4.1 Formação Batatal

O ensaio de durabilidade de *Slake* foi realizado para cada nível de alteração do filito da Formação Batatal, no entanto, os índices calculados não seguiram um decréscimo conforme a progressão do intemperismo, como foi observado para as demais litologias avaliadas. Para o filito da Formação Batatal, a durabilidade seguiu de 66,8% no nível W3, 48,1% no nível W2, 26,7% no nível W1 e 13,6% no nível W4 (Figura 27).

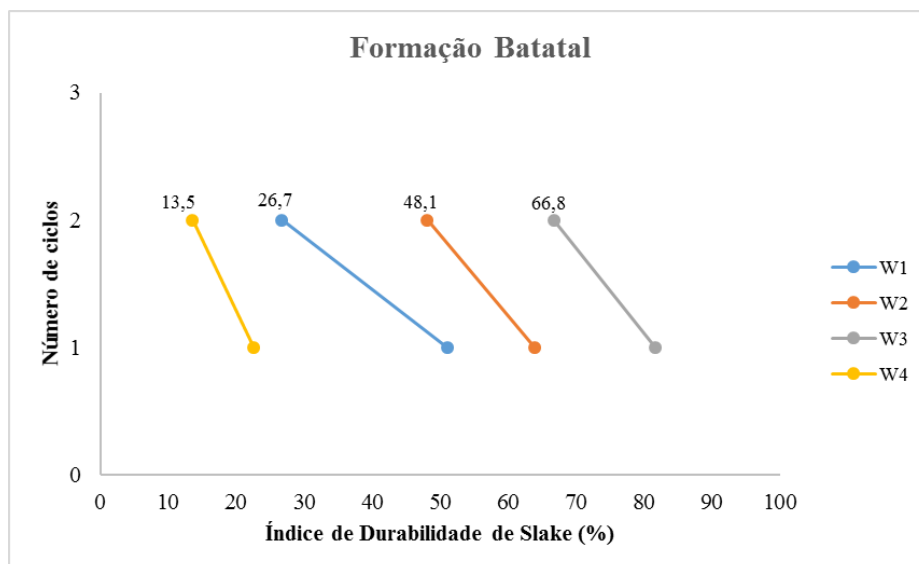


Figura 27 Gráfico do índice de durabilidade de Slake para o filito da Formação Batatal. Nota-se a progressão não gradual da durabilidade entre os níveis de alteração.

Em observações de lâmina petrográfica, torna-se nítido o caráter heterogêneo desse filito, conferindo-lhe um comportamento pouco previsível. A rocha de grau W3 exhibe veios de quartzo, muscovita e os minerais opacos encontram-se relativamente alterados, é possível notar também a presença de turmalina, mineral resistente ao intemperismo, como mineral traço. Na lâmina do nível W2 exhibe níveis micáceos e níveis quartzosos-micáceos com traços de alteração de minerais opacos, além da presença de veios de quartzo com cianita. É possível perceber que os minerais opacos e minerais resistentes (quartzo e turmalina) conferem uma maior durabilidade no filito.

No nível W1, a muscovita e os minerais opacos estão levemente alterados, sem sinal de turmalina e os planos de foliação são bem próximos, por esse motivo, a durabilidade é condicionada pela matriz rochosa composta basicamente de muscovita fresca. Por fim, no nível W4, a muscovita encontra-se mais alterada na borda, assim como os minerais opacos; seus planos de foliação encontram-se bem abertos, a rocha desse grau intempérico é facilmente desagregada.

De acordo com a classificação de Franklin & Chandra (1972), o nível de maior durabilidade (W3) apresenta uma durabilidade média, seguida por uma durabilidade baixa (W2 e W1) e muito baixa (W4). A durabilidade do filito e sua problemática no uso em projetos geotécnicos está intimamente relacionada com o intemperismo intenso que age sobre ele e suas características geológicas, tais como mineralogia, textura e presença de descontinuidades.

6.5.2 Comparação com outras rochas

6.5.2.1 Formação Gandarela

O índice de durabilidade de *Slake* do filito dolomítico da Formação Gandarela seguiu um decréscimo bem pronunciado conforme a progressão do intemperismo; variou de 88% do nível W2, 47,8% no nível W3 e 26,8% no nível W4. Classifica-se, portanto, como uma rocha de alta durabilidade no nível W2 e de baixa durabilidade para os níveis W3 e W4.

Nos níveis W2 e W3, a porosidade do filito dolomítico é superior a porosidade dos mesmos níveis de alteração do filito da Formação Batatal, curiosamente, o filito da Formação Gandarela apresenta maior durabilidade.

Assim como filito da Formação Batatal, a durabilidade do filito dolomítico relaciona-se fortemente com o intemperismo de alta intensidade, mineralogia e alta porosidade. Destaca-se a dissolução de mineral carbonático (dolomita) pela percolação de água na rocha altamente porosa, como a principal condicionante para a desagregabilidade da rocha. De acordo com Silva & Lana (2012), o filito dolomítico é relacionado a ruptura cinemática do tipo planar, circular e por flambagem em taludes de mineração, causados por controle estrutural e pela durabilidade do material.

6.5.2.2 Grupo Jutogh

O filito micáceo apresentou uma durabilidade extremamente alta com índice de *Slake* de 97,6%, a maior apresentada dentre os filitos estudados; tal resultado está intimamente correlacionado com sua mineralogia relativamente resistente e suas propriedades físicas de porosidade e capacidade de absorção de água, cujos os valores são os menores para todos os filitos avaliados, pois tal rocha sofre com a atuação de intemperismo mais brando.

Contrapõe-se com o intemperismo de alta intensidade atuante na região do filito da Formação Batatal e consequente aumento de sua porosidade conforme a progressão da ação intempérica.

6.5.2.3 Grupo Beiras

O xisto negro do Grupo Beiras foi a litologia que apresentou os maiores índices de *Slake*, variando apenas de 98,8% no nível W3 a 96,2% no nível W4, uma rocha de durabilidade extremamente alta. O controle climático da região de ocorrência de tal xisto condiciona um intemperismo de ação moderada, portanto, mais brando que o intemperismo atuante no filito da Formação Batatal e Formação Gandarela.

A combinação de uma mineralogia relativamente resistente (quartzo, caulinita, clorita, vermiculita, muscovita e rara pirita) ao intemperismo de intensidade moderada e a baixa porosidade da rocha, acarretam em resultados elevadíssimos de durabilidade do xisto negro. No

entanto, associados a propriedades de resistência mecânica, esses xistos são recorrentes em casos de instabilidade de taludes na região (Quinta-Ferreira *et al.*, 2005).

6.5.2.4 Grupo Flysch do Baixo Alentejo

O xisto do Grupo FBA exibiu índices de durabilidade de *Slake* menores e uma variação mais pronunciada ao comparar-se com os resultados do xisto negro do Grupo Beiras, mas ainda assim, é uma rocha de durabilidade alta no nível W4 (86,2%) e extremamente alta nos níveis W3 (95,3%) e W2 (98,6%).

Está ambientada em uma região que o intemperismo moderado é atuante, afetando a porosidade da rocha, que varia de 7,6% no nível W2, 16% no nível W3 e 23,9% no nível W4, valores superiores ao xisto negro do Grupo Beiras (2,8% no nível W3 e 10,1% no nível W4), acarretando em menores durabilidades. A sua mineralogia formada por illita, quartzo, calcita, siderita e hematita confere relativa resistência ao intemperismo.

6.5.2.5 Formação Patonga Claystone

O argilito são apresentou um índice de durabilidade de 78%, considerado como uma rocha altamente durável. Em relação as amostras de argilito ensaiadas, há uma boa correlação entre capacidade de absorção de água e durabilidade de *Slake*: amostras com absorção de água menor que 10%, entre 10 e 15%, e superiores a 15%, são considerados materiais altamente durável, intermediário e menos durável, respectivamente (Nunt-jaruwong, 2006).

As camadas mistas de illita-esmectita perfazem cerca de 21% da mineralogia da rocha, ou seja, esses são os minerais mais abundantes da rocha após o quartzo (37% do total). Com a entrada de água na rocha, a esmectita da camada mista expande, destruindo a textura grão a grão dos minerais da rocha, acarretando na redução da resistência ao cisalhamento e consequentemente, facilita a desagregação rochosa.

Apesar de apresentar uma alta durabilidade de *Slake*, esta rocha se desagrega em fragmentos de dois tipos, que ficaram retidos no ensaio: tipo 2, consiste de fragmentos grandes e pequenos; e tipo 3, consiste exclusivamente de fragmentos pequenos. Ou seja, o ensaio de *Slake* que considera os fragmentos retidos maiores que 2 mm como duráveis, pode mascarar a real durabilidade da rocha, pois esta rocha se desagrega em muitos fragmentos pequenos de 5 mm. Sendo assim, o argilito é considerado indesejável para algumas aplicações de engenharia,

tais como *rip-rap* ou controle de erosão, sendo objeto recorrente em casos de instabilidade de talude na região de ocorrência (Nunt-jaruwong, 2006).

Ao comparar sua durabilidade com a do filito da Formação Batatal, é necessário manter em mente que se trata de uma rocha pelítica sã.

6.5.2.6 Formação Pojuca

O folhelho sã da Formação Pojuca é um material de muito baixa durabilidade com um índice de Slake de 41,1%, o menor entre o nível inalterado das rochas avaliadas. A desagregação dessa rocha é causada principalmente pela presença de argilominerais expansivos do grupo da esmectita, que possuem grande capacidade de trocas catiônicas e absorção de água. Os minerais desse grupo são formados por duas camadas de tetraedros de sílica envolvendo uma camada octaédrica de alumínio; entre o espaço lamelar, as ligações químicas não são fortes, possibilitando a entrada de água nesse espaço e a consequente expansão da estrutura mineral. Com a retirada dessa água através da secagem da rocha, a estrutura mineral se retrai, voltando as condições iniciais (Marques *et al.*, 2005).

Esse processo de expansão e contração mineral ocasionados em ciclos repetidos de umedecimento e secagem, causa um microfraturamento que leva a propagação de fraturas concordantes ao acamamento da rocha e o aumento da porosidade (22,7%), afetando fortemente a durabilidade do material. Assim como no caso do filito da Formação Batatal, o folhelho também está localizado em uma área de clima quente e úmido; a diferença está na mineralogia expansiva que afeta fortemente a durabilidade do folhelho mesmo no nível considerado inalterado.

6.5.2.7 Formação Georgian Bay

O folhelho inalterado da Formação Georgian Bay trata-se de uma rocha de durabilidade muito alta, por apresentar um índice de durabilidade de Slake de 91%. A laminação sedimentar formada pela orientação paralela a subparalela de argilominerais, cria um arranjo textural que diminui relativamente a porosidade da rocha (Haneberg *et al.*, 1995); o intemperismo moderado

com ação de gelo também afeta na porosidade; tal índice físico correlaciona fortemente com o índice de durabilidade de *Slake*.

Outros fatores são levados em consideração: o folhelho conta com uma mineralogia de illita (13,5%), caulinita (7,3%), clorita (3,8%) e illita-esmectita (2,4%), este último influencia na diminuição da durabilidade da rocha. A illita parece não se correlacionar com o índice de durabilidade. O conteúdo de argilomineral é um fator controlador do índice de durabilidade de *Slake*; a rocha possui 44% de argila e 27% de silte. A presença de bandas de calcários intercalados com o folhelho influencia no índice de durabilidade, pois essas são partes duras, resistentes ao intemperismo (Dick & Shakoor, 1992; Russell, 1981).

A elevada durabilidade é conferida pela presença de bandas de calcário, pouco conteúdo de mineral expansivo e baixa porosidade; fatores que diferem fortemente aos que controlam a durabilidade do filito da Formação Batatal.

6.5.2.8 Formação Sevier

O folhelho inalterado da Formação Sevier é uma rocha de durabilidade muito alta, por apresentar o índice de *Slake* de 95,6%, apesar do preenchimento mineral de calcita e gipsita nas fissilidades e microfraturas.

Em geral, observa-se que o aumento do conteúdo de minerais de calcário (calcita e gipsita) acarreta na desagregação e queda na durabilidade do folhelho. Resultados de ensaio de microscopia eletrônica de varredura e espectrometria de raios X de energia dispersiva demonstram que calcita, encontrada mais abundantemente, e gipsita, ambas de origem secundária por interação com água meteórica, ocorrem como precipitados entre os planos de fissilidade e microfraturas.

A calcita quando reage com água levemente ácida é convertida em bicarbonato de cálcio, de maior volume, o que provoca desagregação da rocha; a gipsita, formada pela reação de oxidação da pirita em presença de calcita, causa a expansão ao longo dos planos de fissilidade e também promove a desagregação da rocha (Nandi & Whitelaw, 2009).

O caso dessa litologia é interessante pois demonstra o papel do preenchimento mineral nas descontinuidades aliado as reações químicas de intemperismo moderado. Essa rocha sã e de baixa porosidade apresenta uma durabilidade muito maior que a do filito da Formação Batatal.

6.5.2.9 Formação Himmetoglu

A margem da Formação Himmetoglu possui uma durabilidade média de 88,1%, sendo classificada como alta durabilidade. No entanto, os resultados do índice de durabilidade de Slake (Id_2) mostraram uma variação entre 48% e 98% com desvio padrão de 14,52%.

Gokçeoglu *et al.* (2000) preocuparam-se com a representatividade do teste de Slake em dois ciclos, e por este motivo, foram realizados quatro ciclos de ensaio. Conforme a progressão dos ciclos, a durabilidade diminui e o desvio padrão entre os resultados do índice aumenta (Quadro 5). Notou-se também que o conteúdo de minerais de carbonato nos fragmentos, os quais passam na rede metálica, aumenta de forma uniforme após cada ciclo; já o conteúdo de argilominerais nos fragmentos que passam na rede metálica aumenta abruptamente após o terceiro ciclo. Isso demonstra que o conteúdo de argilomineral afeta diretamente a durabilidade e que repetidos ciclos de umedecimento e secagem são mais representativos para os casos de rochas argilosas por refletirem uma durabilidade mais próxima da realidade (Gokçeoglu *et al.*, 2000).

Apesar da diminuição da durabilidade em dois ciclos (88,1%), três ciclos (82,6%) e quatro ciclos (78,4%), esses valores caem na mesma faixa de classificação: material de alta durabilidade.

Quadro 5 Dados estatísticos dos índices de durabilidade correspondentes a dois, três e quatro ciclos (Gokçeoglu *et al.*, 2000).

	Id₂	Id₃	Id₄
Média (%)	88,1	82,6	78,4
Desvio Padrão (%)	14,52	20,16	24,17
Intervalo (%)	48 - 98	38 - 97	25 - 96

A durabilidade nesse caso parece ser controlada por dois fatores: (1) Mineralogia, já que os argilominerais perfazem 47,3% da rocha, dos quais 20% são referentes ao mineral expansivo esmectita, 18,4% são de illita e 8,9% são de caulinita; além de abundante minerais de carbonatos que conferem uma maior durabilidade (calcita (24%) e dolomita (10,4%)), feldspato

(11,7%) e pouco quartzo (6,5%); (2) Aumento de laminações nas sequências superiores de marga, que se abrem mais facilmente quando expostos a ação intempérica moderada da região. Não há dados de caracterização física para correlacionar com a durabilidade (Gokçeoglu *et al.*, 2000).

A marga da Formação Himmetoglu difere do filito da Formação Batatal por sofrer ação de intemperismo de intensidade moderada e pela sua mineralogia rica em mineral expansivo que contribuem para a desagregação rochosa, no entanto, a durabilidade da marga é bem superior a do filito da Formação Batatal.

A figura 28 abaixo reúne os dados de durabilidade de *Slake* das rochas pelíticas e metapelíticas estudadas.

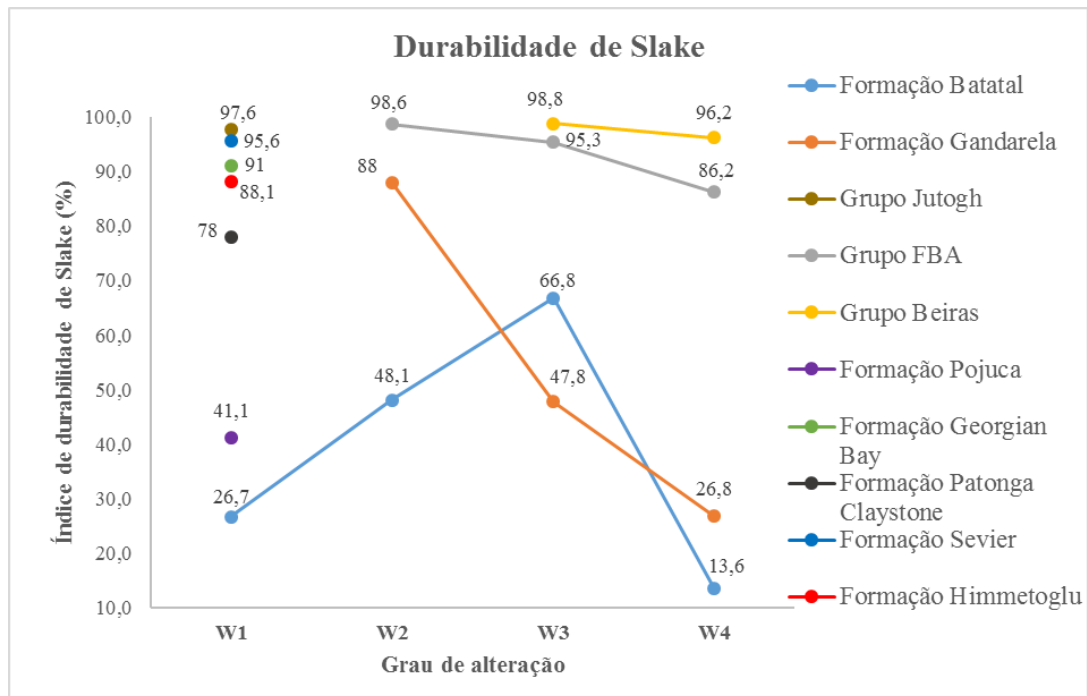


Figura 28 Gráfico exibindo os índices de durabilidade para as rochas pelíticas e metapelíticas analisadas. A durabilidade do filito da Formação Batatal não seguiu a progressão intempérica. Os maiores índices pertencem as rochas de menor porosidade provenientes de um clima mais brando (Grupo Jutogh, Grupo Beiras, Grupo FBA, Formação Georgian Bay, Formação Sevier e Formação Himmetoglu); a durabilidade do argilito da Formação Patonga Claystone é condicionado pela média capacidade de absorção de água e pela presença de camada mista de illita-esmectita; o filito dolomítico da Formação Gandarela demonstrou uma queda abrupta com a intensificação do grau intempérico; por fim, o folhelho da Formação Pojuca, é a rocha de menor durabilidade para o nível W1, devido a sua abundância de argilomineral expansivo.

7. CONCLUSÕES

As rochas brandas, pelíticas e metapelíticas, que ocorrem de forma abrangente na superfície terrestre, são comumente relacionadas a problemas geotécnicos em projetos de engenharia civil, como instabilidade em escavações, em talude de corte, de mineração e barragem. Devido a dificuldade de amostragem, realização de ensaios e a conseqüente falta de dados geotécnicos disponíveis na literatura, a previsão de seus comportamentos geotécnicos ainda é limitada. A durabilidade/alterabilidade da rocha as intempéries é o parâmetro de engenharia mais relevante em projetos, tais como estabilização de talude, aterragem e suporte de fundação, que envolvem a exposição de rochas de baixa resistência a ação do intemperismo.

Conclui-se então que, de forma geral, a durabilidade dessas rochas está relacionada a perda da qualidade de propriedades índices pela progressão do grau intempérico; ao tipo e intensidade do intemperismo atuante; além de fatores geológicos tais como (1) mineralogia, principalmente a presença de argilomineral expansivo; (2) porosidade; (3) quantidade de argila na rocha; (4) presença de laminações e foliações em rochas; (5) capacidade de absorção de água; e (6) possível preenchimento mineral nas discontinuidades da rocha.

Em especial, a durabilidade do filito ensaiado da Fm. Batatal está relacionada com o caráter heterogêneo marcado pela mineralogia e pela presença de foliações e suas discontinuidades.

É possível também criticar o uso de índice de durabilidade de *Slake* relativo a dois ciclos (Id_2) para o caso de rochas argilosas. Como foi observado, valores altos de Id_2 podem mascarar a real durabilidade da rocha, pois durante o ensaio, as amostras podem se fragmentar em muitas partes pequenas, porém maiores que 2 mm; ou os fragmentos podem se coalescer durante o ensaio e ficarem retidos no recipiente metálico.

O uso de diversos ciclos como meio de avaliação da durabilidade parece ser ideal para as rochas argilosas pois o índice de durabilidade diminui bruscamente após o terceiro ciclo, como conseqüência a perda/fragmentação dos argilominerais que são removidos do recipiente metálico durante o ensaio.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AYDOĞDU, O. *et al.* 2010. Goynuk (Bolu) Çatak Hammami-Ihca-Karacalar Fields: Geothermal Geology Investigation in Turkey. World Geothermal Congress, Bali, Indonesia.
- ALARICO, A.C. 1992. Contribuição ao Estudo de Alterabilidade de Rochas Argilosas do Grupo Trombetas– Rio Xingu, PA.
- ALKMIM, F.F. & MARSHAK, S. 1998. Transamazonian orogeny in the Southern São Francisco Craton region, Minas Gerais, Brazil: evidence for Paleoproterozoic collision and collapse in Quadrilátero Ferrífero. *Precambrian Research*, v. 90, pp. 29-58.
- BALTAZAR, O.F. & ZUCCHETTI, M. 2007. Lithofacies associations and structural evolution of the Archean Rio das Velhas greenstone belt, Quadrilátero Ferrífero, Brazil: a review of the setting of gold deposits *Ore Geology Reviews*. *Ore Geology Reviews*, v. 32, pp. 471-499.
- DICK, J.C. & SHAKOOR, A. 1992. Lithological controls of mudrock durability. *Quarterly Journal of Engineering Geology*, v. 25, pp. 31-46.
- DORR, J.N. 1969. Physiographic, stratigraphic and structural development of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. *U.S. Geol. Surv. Pap 641-A*: 1-110.
- ERGULER, Z.A. & SHAKOOR, A. 2009. Quantification of Fragment Size Distribution of Clay-Bearing Rocks after Slake Durability Testing. *Environmental & Engineering Geoscience*, Vol. XV, No. 2, pp. 81–89.
- FRANKLIN, J.A. & CHANDRA, R. 1972. The Slake-Durability Test. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* Vol 9, pp. 325-341.
- FRANKLIN, J.A. & DUSSEAULT, M.B. 1989. Viscous, Thermal and Swelling Behavior. *Rock Engineering*, McGraw-Hill Publishing Company, Chapter 10.
- GOKÇEOĞLU, C., ULUSAY, R., SONMEZ, H. 2000. Factors Affecting the Durability of Selected Weak and Clay-Bearing Rocks from Turkey, with Particular Emphasis on the Influence of the Number of Drying and Wetting Cycles. *Engineering Geology*, v. 57, pp. 215-237.
- HANEBERG, W.C. & ANDERSON, S.A. 1995. Clay and Shale Slope Instability. *Geological Society of America. Reviews in Engineering Geology Volume I*.
- JOHNSON, R.F., 1962. Geology and ore deposits of the Cachoeira do Campo, Dom Bosco, and Ouro Branco quadrangles, Minas Gerais, Brazil: *U.S. Geol. Survey Prof, Paper 341-B*, 39.
- LEÃO, M.F., 2017. Comportamento Geomecânico de Frente de Intemperismo em Filito da Região do Quadrilátero Ferrífero. Tese de Doutorado, UFRJ.
- LNEG, 2010. Mapa Geológico de Portugal. Laboratório Nacional de Energia e Geologia.
- MATOS, L.F.S & ROCHA, J.C. 2006. Metodologia Experimental para Previsão da Durabilidade de Pedras de Revestimento. XI Encontro Nacional de Tecnologia no Ambiente Construído, Florianópolis, SC, Brasil.

- MARQUES, E.A.G., VARGAS JR., E., ANTUNES, F.S. 2005. A study of the durability of some shales, mudrocks and siltstones from Brazil. *Geotechnical and Geological Engineering*, v. 23, pp. 321–348.
- MILHOMEM, P.S., DE MAMAN, E.J.; OLIVEIRA, F.M.; CARVALHO, M.S.S.; SOUZA-LIMA, W. 2003. Bacias sedimentares brasileiras: Bacia do Recôncavo. *Phoenix*. Ano 5, n. 11.
- MOON, V.G. & BEATTIE, A.G. 1995. Textural and microstructural influences on the durability of Waikato Coal Measures mudrocks. *Quarterly Journal of Engineering Geology*, v. 28, pp. 303-312.
- NANDI, A. & WHITELAW, M. 2009. Effect of Physical-Chemical Factors on the Disintegration Behavior of Calcareous Shale. *Environmental & Engineering Geoscience*, Vol. XV, No. 4, pp. 273-285.
- NUNT-JARUWONG, S. 2006. Engineering Geology of The Patonga Claystone, Central Coast, New South Wales, with Particular Reference to Slaking Behaviour. M.App.Sc. University of New South Wales.
- PELTIER, L.C. 1950. The Geographical Cycle in Periglacial Regions as it is Related to Climatic Geomorphology. *Annals of the Association of American Geographers*, v. 40, pp. 214-236.
- PINHO, A.B. 2003. Caracterização Geotécnica de Maciços Rochosos de Baixa Resistência – O Flysch de Baixo Alentejo. Dissertação. Universidade de Évora.
- PORTELA, H.A., ANTONIOLI, L., DE OLIVEIRA, R.M.A.G., AMARAL, P.F., DINO, R. 2016. Análise de Palinofácies na Avaliação do Potencial Gerador da Formação Pojuca, Bacia do Recôncavo. *Revista Brasileira de Paleontologia*, 19, 2.
- QUINTA-FERREIRA, M., FERNANDES, I., LOUREIRO, F., ALVES, J., PERDIGÃO, R., RIBEIRO, M.A., SANTARÉM, P.A., NEVES, J. 2015. Geologia de Engenharia de rochas xistosas: os xistos negros da EN17 em Coimbra e os filitos de Vila Velha de Ródão. *Comunicações Geológicas*, 102, 1.
- RAMAMURTHY, T., VENKATAPPA RAO, G., SINGH, J. 1993. Engineering Behaviour of Phyllites. *Engineering Geology*, v. 33, pp. 209-225.
- RODRIGUES, J.D. 1990. Problem Materials. Defining and studying problem materials, a tentative approach. *Proc. 6th Int. Congress, Int. Assoc. Engineering Geology*, Amsterdam, vol. 5, pp. 3645-3651.
- ROESER, H.M.P. & ROESER, P.A. 2010. O Quadrilátero Ferrífero - MG, Brasil: Aspectos sobre sua história, seus recursos minerais e problemas ambientais relacionados. *GEONOMOS* 18(1): 33 – 37.
- RUCHKYS, U.A. 2007. Patrimônio Geológico e Geoconservação no Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais: Potencial para a Criação de um Geoparque da UNESCO. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências da UFMG, 211 p.

- SILVA, C.H.C. 2010. Comportamento Geotécnico dos Filitos do Talude Oeste da Mina do Pau Branco. Dissertação de Mestrado. UFOP.
- SILVA, C.H.C & LANA, M.S. 2012. Influência da durabilidade no comportamento geotécnico dos filitos da Mina Pau Branco. REM: R. Esc. Minas, Ouro Preto, 65(3), pp. 413-418.
- TAYLOR, R.J.K. 1988. Coal Measures Mudrocks Composition, Classification and Weathering Processes. Quarterly Journal of Engineering; London, v. 21, pp. 85-99.
- TAYLOR, R.K. & CRIPPS, J.C. 1987. Mineralogical Controls on Volume Change, pp. 268-301.
- TAYLOR, R.K. & SPEARS, D.A. 1981. Laboratory Investigation of Mudrock. Quarterly Journal of Engineering Geology; London, v. 14, pp. 291-309.
- TAYLOR, R.K. & SMITH, T.J. 1986. The engineering geology of clay minerals: swelling, shrinking and mudrock breakdown. In: Proc. Conference Clay Minerals, Durham, 21, 235–260.
- THORMAN, C.H. & LADEIRA, E. 1986. Introduction to a Workshop on Gold Deposits Related to Greenstone Belts in Brazil. Belo Horizonte, Brazil. U.S. Geological Survey Bulletin.
- TOMAZZOLI, E.R.; FLORES, J.A.A; BAUZYS, F. 2009. Movimento de massa ocorridos no evento de novembro de 2008, no entorno do Morro do Baú, Vale do Itajaí (SC): caracterização geológico-geomorfológica. COBRAE, São Paulo.
- ZHELEZINSKAIA, I.; KAUFMAN, A.J.; FARQUHAR, J.; CLIFF, J. 2014. Large Sulfur Isotope Fractionations Associated with Neoproterozoic Microbial Sulfate Reduction. Science 346, pp. 742.