

ENSAIOS ÍNDICE NA CARACTERIZAÇÃO DE MACIÇOS INTEMPERIZADOS DE BAIXA RESISTÊNCIA

Marcio Fernandes Leão (Geólogo - UFV); marciotriton@hotmail.com.
Luís Felipe Barreto de Oliveira (Graduando em Geologia – LEMETRO - UFRJ)
Emílio Velloso Barroso (Geólogo – LEMETRO - UFRJ)

Resumo: A compreensão do comportamento geotécnico-geomecânico de perfis de intemperismo é desafiadora, principalmente em porções mais alteradas, comumente relacionadas a problemas de engenharia. Quando esses perfis são formados por rochas brandas como filitos, esses problemas se potencializam. Neste contexto, estudou-se um corte rodoviário entre as cidades de Ouro-Preto e Mariana (MG - Brasil), caracterizado por uma frente de intemperismo de filito com distintos graus de alteração. Após descrição morfológica e compartimentação geológica da frente de intemperismo, foram realizados testes na matriz da rocha e descontinuidades. Foram determinadas as propriedades físicas por índices-físicos e mecânicas, determinando o índice esclerométrico, a resistência à compressão puntiforme e à desagregação para quatro níveis de alteração. Os resultados permitiram definir a variação das propriedades físicas e mecânicas na frente de intemperismo, evidenciando grande heterogeneidade geológico-geotécnica.

Palavras-chave: Ensaio-índice, Maciços de Baixa Resistência, Filito, Quadrilátero Ferrífero.

INDEX TESTS ON THE CHARACTERIZATION OF ROCKY MASSIF WEATHERED

Abstract: The understanding of geotechnical-geomechanical rock mass behavior is challenging, mainly what concerns weathered parts, since it may trigger many stability problems. Soft Rocks as phyllite are known to enhance these problems. In this case, was studied a road cut on a highway between the cities of Ouro Preto and Mariana (MG – Brazil), showing a particular weathering zone with many change conditions. After morphological description and weathering zone geological fragmentation, were done tests on rock matrix

and rock mass in order to identify the discontinuity features. Were determined physicist properties by physicist-index also chemistry properties, through the Point Load Test and Slake Durability Test. The results are able to define the weathering zone, showing a huge anisotropy and heterogeneity rock properties.

Keywords: Index-tests, Soft Rock Massif, Phyllite, Quadrilátero Ferrífero.

1. INTRODUÇÃO

O grau de alteração é conhecidamente definido pelo conjunto de processos que levam à modificação das propriedades mecânicas das rochas, no sentido da diminuição de sua resistência, resultando, em seu desenvolvimento, na formação de solo. Por sua vez, o grau de alteração pode ser definido também pelo conjunto de exemplares do mesmo tipo litológico que apresentam propriedades petrográficas, tecnológicas e mecânicas variando dentro de certos limites (Leão, 2011).

A ocorrência dessas feições associadas a encostas naturais desencadeiam grandes problemas de estabilidade, muito comuns no Brasil e em particular, na região do Quadrilátero Ferrífero (MG), onde ainda são evidenciadas instabilidades em cortes rodoviários e taludes mineiros. Quando esses perfis são formados por rochas muito brandas como filitos, esses problemas se potencializam, principalmente em função da existência de planos de fraqueza ao longo da foliação e propriedades-índice da rocha, por exemplo.

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

Apesar do esforço de vários pesquisadores sobre o tema, ainda são escassos trabalhos acerca do comportamento geológico-geotécnico de perfis de alteração oriundos de rochas de baixo grau metamórfico. Além disso, um grande número de proposições e terminologias dificulta o entendimento e aplicabilidade de termos, principalmente porque a

classificação é dependente do processo intempérico atuante e não apenas das características da rocha de origem e seu contexto geológico e estrutural (Leão, 2011; Leão, 2017).

Assim, buscando auxiliar o mapeamento de maciços rochosos, demonstram-se aqui as vantagens da utilização de testes simples *in situ*, para uma avaliação preliminar da intensidade do intemperismo e desta forma subsidiar, projetos de engenharia e mineração, na região do Quadrilátero Ferrífero. Como objeto de estudo foi escolhida uma frente de intemperismo exposta em um corte rodoviário entre as cidades de Mariana e Ouro Preto, sendo selecionados quatro graus de alteração de filito, desde a porção sã (W1) até a porção de rocha muito alterada (W4).

2. REFERENCIAL TEÓRICO

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

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

Além destes testes, Lee e Freitas (1988) propuseram o uso do “*slake durability test*” como marcador da transição da matriz da rocha mais intensamente intemperizada para o estado de solo.

Outro ensaio importante e expedito é a esclerometria pelo martelo ou esclerômetro de Schmidt. Devido à sua simplicidade, permite uma medida “*in situ*” sem necessidade de preparação de amostras. A presença de rugosidades nas superfícies ensaiadas e a proximidade de descontinuidades pode gerar dispersão nos valores, sendo ainda muito sensível em rochas muito brandas (com o valor de R – “*Rebound*” inferior a 10) (Pinho, 2003).

O esclerômetro de Schmidt, segundo Brown (1981), bem como o ensaio de carga pontual (“*point Load Test*” – PLT) tem uma aplicação reduzida para rochas de resistência muito baixa, porém em algumas rochas brandas mais resistentes, podem ser obtidas boas correlações com a resistência à compressão simples. A resistência à compressão simples

também pode ser obtida em relação à dureza do material, não havendo uma única correlação genérica para todos os tipos de rocha (Xu et al., 1990). Leão e Marques (2016) obtiveram bons resultados para a avaliação do intemperismo em filitos, utilizando esclerometria, todavia a estimativa do RQD (“Rock Quality Designation”) pelo índice volumétrico de juntas (J_v), proposto por Palmstrom (2005), não foi tão representativa.

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

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

3. DESCRIÇÃO DO MÉTODO

A metodologia foi dividida em duas etapas. A primeira refere-se à identificação e classificação adaptada dos níveis de alteração (ISRM, 2015), descrição do perfil de intemperismo, execução de esclerometria de Schmidt, testes com martelo geológico e canivete e coleta de blocos. A segunda parte é referente à determinação das propriedades-índice, tais como massa específica seca, saturada, absorção d’água e porosidade, determinação da resistência à compressão puntiforme (PLT) e de durabilidade (“Slake Durability Test”).

3.1 Classificação do Perfil de Intemperismo

A classificação dos graus de alteração teve como base o Quadro 1. A descrição e classificação dos estados de alteração basearam-se em testes simples na matriz (risco do canivete e golpes de martelo geológico) e esclerometria de Schmidt, caracterizando as discontinuidades em termos de abertura, preenchimento, espaçamento e persistência e estimativa do índice J_v , conforme sugerido por Palmstrom (2005).

Quadro 1 - Classes de alteração (ISRM, 2015) (adaptada).

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

3.2 Caracterização Física

Para a determinação das propriedades-índice, utilizou-se procedimento segundo a ISRM (2015). Foram confeccionados dez corpos de prova para cada nível de alteração (W1 a W4), entre 40 e 60 g e com uma geometria regular, submetidos à secagem em estufa (105 °C) por 24 h e tomada a massa seca. A massa saturada foi obtida após 24 h em submersão total das amostras em água destilada, sendo ainda submetidas ao vácuo, quando ainda

submersas, na tentativa de garantia de saturação total das amostras. A porosidade e absorção d'água foram determinadas com base nos volumes das amostras.

A durabilidade foi determinada pelo slake durability test (ISRM, 1981). Conforme recomendação foram colocados dez fragmentos de W1 a W4, em dimensões aproximadamente arredondadas (sem arestas), sendo submetidas em ciclos de umidecimento e secagem em uma razão de 200 rpm/10 min. Após o primeiro e segundo ciclo, são determinados os índices de slake (I_{d1} e I_{d2}).

3.3 Caracterização Mecânica

O índice esclerométrico, obtido pelo valor adimensional R (rebound), foi determinado in situ por meio da adaptação da norma NBR 7584 (ABNT, 2012). Foram aplicados 20 golpes em uma área de 20 cm por 20 cm, sempre com a preocupação de direcionamento ortogonal da haste do esclerômetro à superfície ensaiada, no caso os planos de foliação.

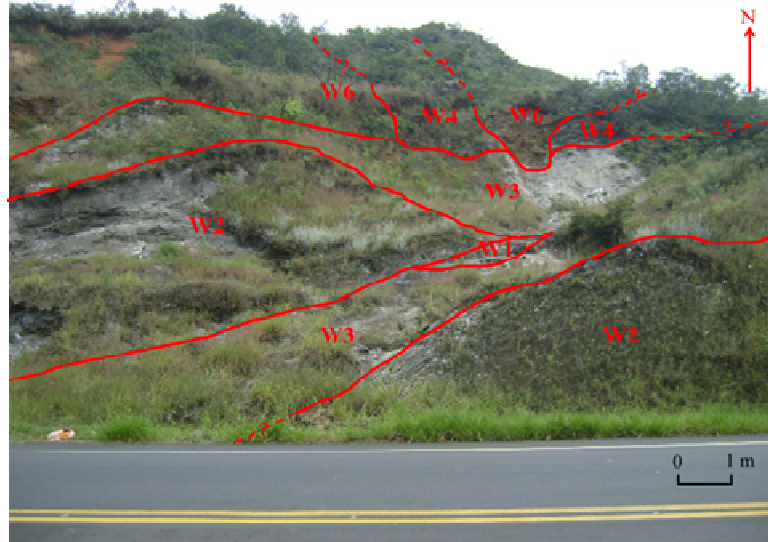
Para o ensaio de resistência à compressão puntiforme (PLT) foi utilizada a norma da ISRM (1981). Foram selecionados dez corpos de prova de W1 a W4, que obedeceu a relação entre as dimensões comprimento, largura (aresta superior e inferior) e espessura, adequadas à condição irregular. A rocha foi carregada pontualmente entre dois cones, sendo obtido o índice de resistência à carga pontual I_s , que é normalizado para um diâmetro de 50 mm ($I_{s(50)}$).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Caracterização do Perfil de Intemperismo

A Figura 1 apresenta o perfil de intemperismo após definição das classes de alteração. A rocha apresenta uma granulometria muito fina, sem possibilidade de determinação da mineralogia com auxílio de lupa de campo 10 x. Os graus de alteração são distinguidos principalmente pela variação na cor (W1 - cinza prateado, W2 - cinza prateado menos intenso, W3 - cinza avermelhado e W4 - cinza amarelado/esverdeado). Testes realizados com o canivete e martelo geológico evidenciam redução das propriedades físicas e mecânicas conforme evolução do intemperismo. As principais famílias de fratura ocorrem principalmente paralela aos planos de foliação e secundariamente ortogonais aos mesmos. Conforme evolução do intemperismo, ou seja, de W1 até W4, ocorre um aumento da abertura, persistência e do índice J_v e em contrapartida uma redução do espaçamento das discontinuidades.

Figura 1. Definição das classes de alteração na frente de intemperismo.



3.2 Propriedades Físicas

As Figuras 2 a 5 apresentam os resultados obtidos para a massa específica seca, saturada, porosidade e absorção d'água, respectivamente.

Figura 2. Massa específica seca (g/cm^3) para os graus de alteração. Os números em destaque correspondem aos valores médios.

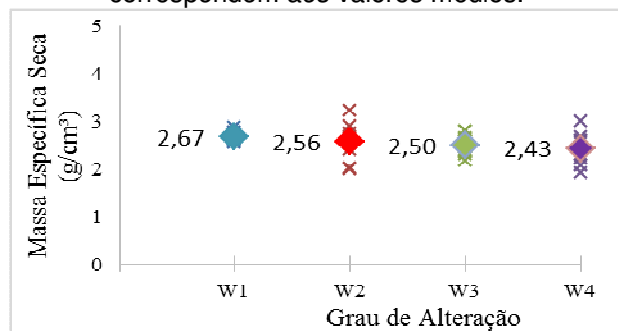


Figura 3. Massa específica saturada (g/cm^3) para os graus de alteração. Os números em destaque correspondem aos valores médios.

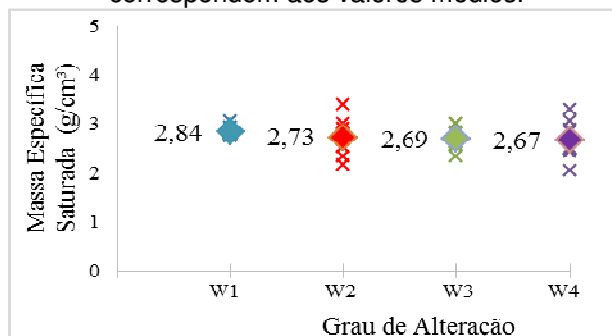


Figura 4. Porosidade (%) para os graus de alteração. Os números em destaque correspondem aos valores médios.

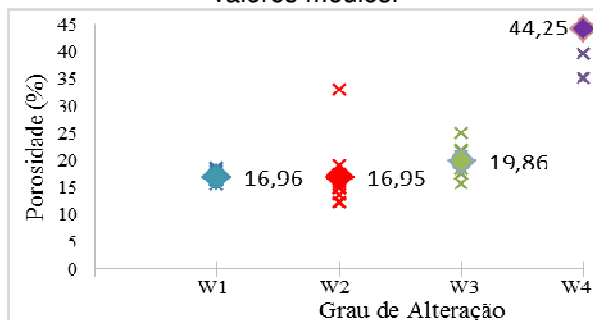
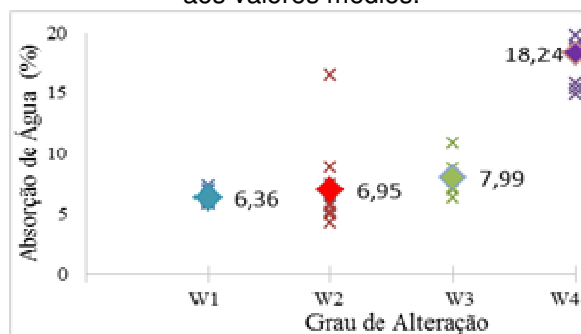


Figura 5. Absorção d'água (%) para os graus de alteração. Os números em destaque correspondem aos valores médios.



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

A Figura 6 e a Tabela 1 apresentam os resultados do ensaio de durabilidade.

Figura 6. Índices de “slake” (I_{d1} e I_{d2}) apresentados para W1 a W4.

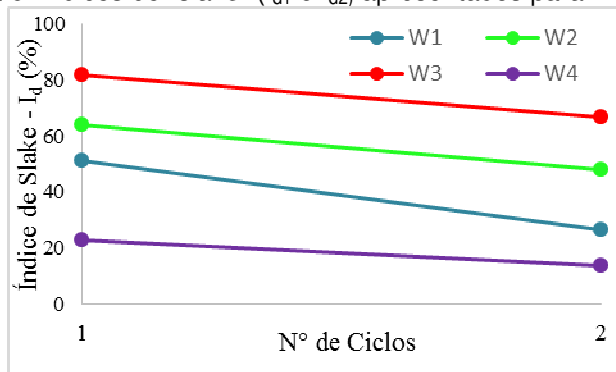


Tabela1 - Valores de I_d (%) para os níveis de alteração W1 a W4.

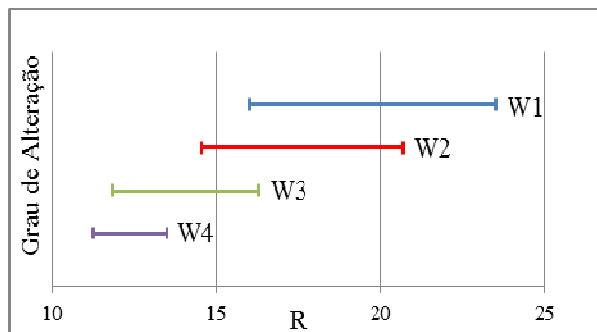
Grau de Alteração	Massa Inicial (g)	Massa Final (g)	I_{d1} (%)	I_{d2} (%)
W1	563,20	150,27	51,11	26,68
W2	540,72	260,15	63,97	48,11
W3	572,12	381,88	81,70	66,75
W4	546,97	74,12	22,59	13,55

Baseado nos resultados nota-se que a durabilidade não acompanha diretamente a evolução do intemperismo. Excetuando o nível W4, que apresentou baixa durabilidade esperada, o nível W3 apresentou a maior durabilidade (durabilidade média), seguido de W2 e W1 (ambos de durabilidade baixa). Os planos de foliação facilitam a degradação física das rochas durante o ensaio devido a elevadas aberturas e persistências, descritas anteriormente. Considerando apenas este aspecto o nível mais são (W1) deveria apresentar a maior durabilidade em relação aos demais, tendo em vista que seus planos de foliação são pouco marcantes apesar de visíveis. Todavia, a presença de níveis cimentados, oriundos de processos paralelos ao intemperismo, e concordantes com os planos de foliação, em W2 e W3, denotam maior durabilidade em relação a W1 que representado pela durabilidade da matriz.

3.3 Propriedades Mecânicas

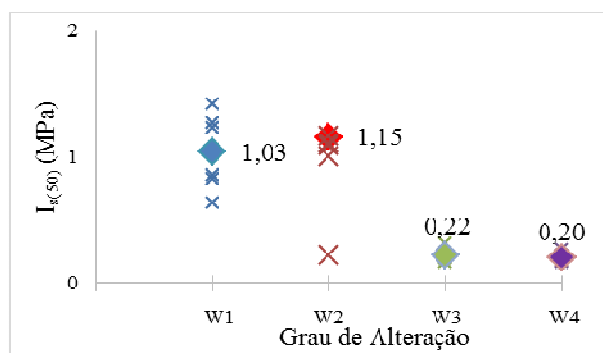
A Figura 7 apresenta os dados obtidos por esclerometria de Schmidt. Os valores médios de R foram: 19,78 (W1), 17,63 (W2), 14,08 (W3) e 12,38 (W4), sofrendo redução em relação ao aumento progressivo do intemperismo. A dureza superficial das classes de alteração está intimamente ligada aos processos intempéricos e conseqüentemente à mineralogia da rocha.

Figura 7. Esclerometria executada, ortogonalmente à foliação, para os níveis de alteração.



A Figura 8 mostra os resultados obtidos para os ensaios de compressão puntiformes. Com base nos valores de $I_{s(50)}$ nota-se um decréscimo de resistência à medida que o grau de alteração avança. Marques e Williams (2015) obtiveram, para diversos graus de alteração dos filitos Bunya (Austrália), níveis W2 a W4 (ISRM, 2015), de semelhantes características físicas, valores 20% maiores comparados ao presente estudo, evidenciando a grande heterogeneidade dos filitos.

Figura 8. Valores de $I_{s(50)}$ do ensaio de PLT em relação aos níveis de alteração.



Leão et al. (2017) demonstraram relações entre a porosidade e os índices esclerométrico (Figura 9) e de compressão puntiforme (Figura 10).

Com base nas Figuras 9 e 10 nota-se redução da resistência, seja da dureza da matriz (R), seja do valor de $I_{s(50)}$ com o aumento da porosidade, evidenciando a influência dos processos intempéricos nas propriedades mecânicas dos filitos.

Figura 9. Relação entre os valores de porosidade com resultados de R para os graus de alteração.

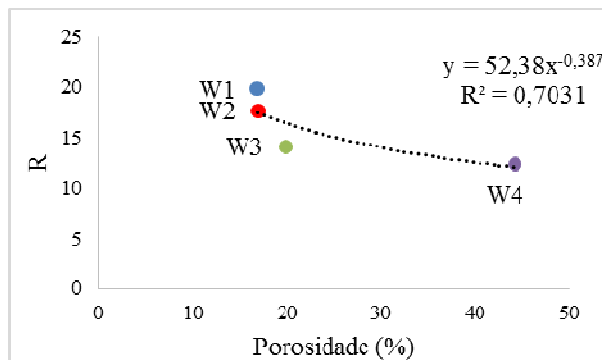
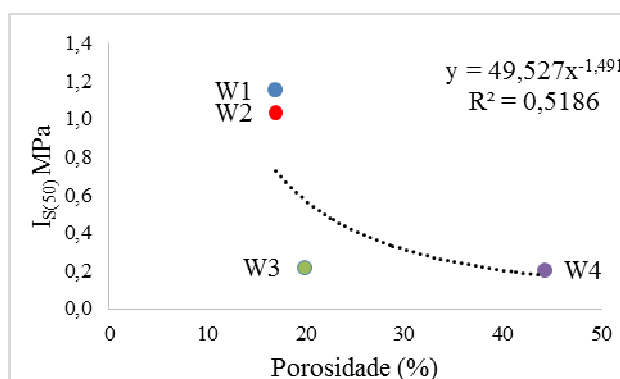


Figura 10. Relação entre os valores de porosidade com resultados de $I_{sg(50)}$ para os graus de alteração.



5. CONCLUSÕES/CONSIDERAÇÕES FINAIS

Considerando os graus de alteração notam-se grandes discontinuidades das propriedades físicas e mecânicas, especialmente entre W2 e W3. Entretanto, comparando os níveis mais extremos (W1 e W4) observa-se em todos os sentidos, o efeito do intemperismo sobre a rocha é mais bem definido. Neste sentido a presença de discontinuidades é determinante para a atuação do intemperismo, não apenas por proporcionar acesso às porções mais internas do maciço, como permite a percolação de fluidos que aceleração esse processo.

Da mesma forma, a estimativa preliminar do efeito do intemperismo com base em ensaios-índices mostrou-se eficaz, mesmo em maciços rochosos que tendem a exibir grande heterogeneidade. A avaliação com base nessa metodologia simples, expedita e de baixo custo mostra vantagem na determinação de propriedades físicas e mecânicas de maciços rochosos.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7584**: Concreto endurecido – avaliação da dureza superficial pelo esclerômetro de reflexão. Rio de Janeiro, 2012.

BROWN, R.T. **Rock Characterization Testing And Monitoring. ISRM Suggested Method.** Pergamon Press, 211 p., 1981.

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

GAMON, T.I. A Comparison of Schemes For Engineering Description And Classification Of Weathered Rocks In Hong Kong. **Bulletin of International Association of Engineering Geology**, n. 28, p. 225-232, 1983.

GEOTECHNICAL CONTROL OFFICE. **Guide to rock and soil descriptions.** Geotechnical Control Office, Hong Kong Government Printer, Hong Kong, 1988.

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

HENG, S; GUO, Y.; YANG, C.; DAEMEN, J.; Li, Z. Experimental and Theoretical Study Of The Anisotropic Properties Of Shale. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, v. 74, p. 58-68, 2015.

INTERNATIONAL SOCIETY OF ROCK MECHANICS. **Basic geotechnical description of rock masses.** Int. Society of Rock Mechanics. Commission on the Classification of Rock and Rock Masses. v. 18, p. 85-110, 1981.

INTERNATIONAL SOCIETY OF ROCK MECHANICS. **The ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 2007-2014**, 5 ed., R. Ulusay, 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 Anais...** Perth, WA, 2013, p. 12-14.

LEÃO, M.F. **Modelagem geológico-geomecânica da barragem San Juan, República Dominicana.** 2011. Dissertação (Mestrado em Geologia) - Programa de Pós-Graduação em Geologia, Departamento de Geologia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

LEÃO, M.F. e MARQUES, E.A.G. Morphology And Geotechnical Characterization Of A Phyllite Weathering Profile Developed Under Tropical Climate. In: **5 International Conference on Geotechnical and Geophysical Site Characterisation**, Anais...Queensland, 2016.

LEÃO, M.F. **Comportamento geomecânico de frente de intemperismo em filito da região do Quadrilátero Ferrífero.** 2017. 188 f. Tese (Doutorado em Geologia) - Programa de Pós-Graduação em Geologia do Departamento de Geologia, Universidade Federal do

Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.

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

LEE, S.G. e FREITAS, M.H. Quantitative Definition Of Highly Weathered Granite Using The Slake Durability Test. **Géotechnique**. v. 38, p. 635-640, 1988.

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

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

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

PINHO, A.B. **Caracterização geotécnica de maciços rochosos de baixa resistência – o flysch do baixo alentejo**. 2003. 283f. Tese (Doutorado em Geologia), Programa de Pós-Graduação em Geologia do Departamento de Geologia, Universidade de Évora, Évora, 2003.

RAJ, J.K. Characterization of Weathering Profiles Developed Over Granitic Bedrock In Humid Tropical Areas. In: **International Seminar on Laterite**, Anais... Kuala Lumpur, 1983, p. 355-374.

XU, S.; GRASSO, P.E.; MAHTAB, A. Use of Schmidt Hammer For Estimating Mechanical Properties Of Weak Rock. In: 6th **Int. Congress, Int. Assoc. Engineering Geology**, Anais... Amsterdam, 1990, p. 511-519.