

AVALIAÇÃO DOS EFEITOS DA CICLAGEM ÁGUA-ESTUFA EM AMOSTRAS DE ROCHAS INTRUSIVAS DO QF

Lazaro Corrêa Marcellino¹; Eduardo Antonio Gomes Marques²; Carolina Cryssaf Santo Lemos³; Eurípedes do Amaral Vargas Junior⁴;

Resumo – Estudos da mecânica da fratura aplicada a rochas tem se tornado cada vez mais comuns, uma vez que na geologia de engenharia problemas relacionados ao fraturamento do maciço rochoso em função do aprofundamento das cavas de mineração, além de efeitos de detonação sobre a qualidade do maciço tem se tornando objeto de interesse. Um dos principais parâmetros para estudo da mecânica da fratura é a tenacidade. Este trabalho apresenta uma série de resultados dos estudos sobre uma rocha intrusiva metadiabásica, comumente encontrada no Quadrilátero Ferrífero, MG. As amostras de metadiabásio foram coletadas em furos de sondagem e submetidas a ciclagem natural água-estufa a fim de avaliar o comportamento da fratura através do ensaio CCNBD em diversos estágios de alterabilidade, para avaliar o efeito da carga em relação ao efeito da ciclagem sobre a tenacidade da rocha. Os efeitos da ciclagem água-estufa demonstram que as amostras tiveram maior processo de fissuramento nos ciclos iniciais e uma queda nos valores de resistência a propagação nas fraturas nos ciclos 85 e 105 de água estufa.

Abstract – Studies of fracture mechanics applied to rocks have become increasingly common, since in engineering geology problems related to rock mass fracturing due to the deepening of mining pits, in addition to the effects of detonation on the quality of the massif have become an object of interest. One of the main parameters for studying fracture mechanics is toughness. This work presents a series of results from studies on a metadiabasic intrusive rock, commonly found in the Quadrilátero Ferrífero, MG. The metadiabase samples were collected in boreholes and subjected to natural water-greenhouse cycling in order to evaluate the fracture behavior through the CCNBD test at different stages of alterability, to evaluate the effect of load in relation to the effect of cycling on toughness. from the rock. The effects of the water-greenhouse cycling demonstrate that the samples had a greater cracking process in the initial cycles and a drop in the values of resistance to propagation in the fractures in cycles 85 and 105 of greenhouse water.

Palavras-Chave – Alterabilidade; Metadiabásio; tenacidade a fratura; CCNBD.

¹ Geól., MSc, Universidade Federal de Viçosa: Viçosa – MG (27) 98152-4417, lazaro-sdp@hotmail.com

² Geól., PhD, Universidade Federal de Viçosa: Viçosa – MG (31) 99890-2812, eagmarques1965@gmail.com

³ Eng., MSc, Universidade Federal de Viçosa: Viçosa – MG (28) 99913-3836, carolinacrissafe@gmail.com

⁴ Eng., PhD, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro: Gávea - RJ, (21) 31141188, vargas@puc-rio.br

1. INTRODUÇÃO

As rochas intrusivas metadibásicas que cortam toda sequência estratigráfica do quadrilátero ferrífero em MG, apresentam grandes problemas quando expostas as intempéries nas regiões das cavas, seja devido ao fraturamento do maciço causado por detonação ou devido ao fato dos minerais se alterarem rapidamente que por sua vez ocasionam a desestabilização do maciço rochoso, sendo necessário conhecer melhor a mecânica da fratura nesse tipo de material.

O estudo da mecânica das fraturas em rochas vem sendo realizado por diversos pesquisadores como Dai et al. (2010), Wang (2010), Wang et al. (2012), Aliha & Ayatollahi (2014), Behraftar et al. (2017), especialmente no que se relaciona à determinação dos parâmetros geomecânicos, como a tenacidade à fratura. Porém, ainda não são encontrados na literatura muitos estudos que analisam a influência do intemperismo sobre a tenacidade. Desta forma, observou-se a importância da realização de pesquisas com foco na mecânica de fratura e sua correlação com o processo intempérico das rochas.

Nesse contexto, o presente estudo contempla a análise da alteração das propriedades de mecânicas de fraturas em rocha intrusivas de metadiabásios existente em diversas minas do QF quando submetida a ensaios de ciclagem acelerada (alterabilidade), a fim de simular o efeito do intemperismo. Para avaliação do comportamento mecânico da fratura é utilizado o ensaio CCNBD (*The Crack Chevron-Notched Brazilian Disk*), visando a obtenção da tenacidade à fratura no modo I (KIC).

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Preparação dos corpos de prova

Neste estudo foram utilizadas amostras de metadiabásios coletadas em uma mina localizada no Quadrilátero Ferrífero (MG). O litotipo em questão foi coletado em uma série de sondagens rotativas em campanhas de reconhecimento geológico-geotécnico com 63,0mm de diâmetro (D) e 20,7 a 22,8 mm de espessura (B). No total foram utilizados 66 (sessenta e seis) corpos de prova (CP's) de rocha, submetidos à ciclagem água-estufa e ao ensaio (*The Crack Chevron-Notched Brazilian Disk*) (CCNBD) a geometria do corpo de prova é representada na Figura 1.

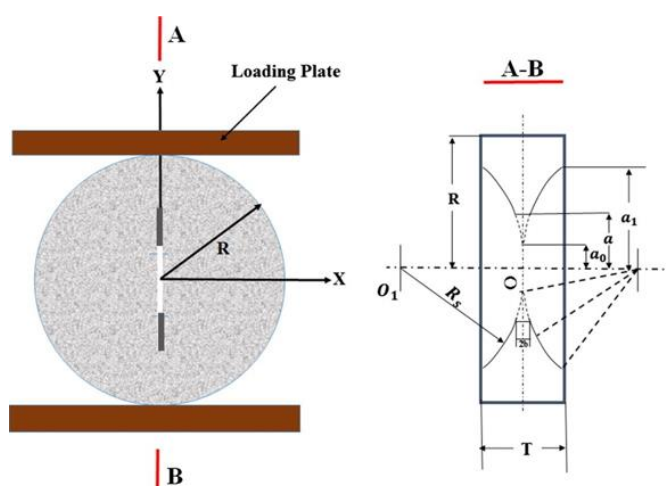


Figura 1. Geometria do ensaio CCNBD a direita mostra o entalhe em V da seção longitudinal interna do disco (Behraftar et al., 2017)

2.2. Ensaio de alterabilidade

Após a confecção dos discos de rocha com o entalhe chevron, estes foram submetidos ao ensaio de alterabilidade, de acordo com o proposto pela *ASTM- D5313 (Standard Test Method for Evaluation of Durability of Rock for Erosion Control Under Wetting and Drying Conditions)*, mas com algumas modificações, descritas a seguir.

Foram realizados um total de 105 ciclos nos corpos de prova com o auxílio do dessecador à vácuo e estufa. As amostras foram colocadas no dessecador à vácuo e cobertas com água por aproximadamente 4 ± 1 horas em temperatura controlada de 23 ± 2 °C, até que estivessem totalmente saturadas. Após verificação da saturação completa das amostras, estas foram levadas à estufa para secagem por 15 ± 1 horas em uma temperatura de 100 ± 5 °C. Após a secagem esperou-se 60 ± 5 minutos para iniciar o próximo ciclo. Alternaram-se os ciclos de modo que amostras foram selecionadas após 0, 20, 50, 85 e 105 ciclos para realização do ensaio CCNBD.

2.3. Ensaio CCNBD

Para determinação da tenacidade à fratura (K_{IC}) e a variação da liberação crítica de energia de deformação (G_{IC}) no modo I de rochas intactas, a ISRM recomenda a utilização do CCNBD (*Determining Mode I Fracture Toughness: Suggested Method Using Cracked Chevron Noched Brazilian Disc Specimens – ISRM, 2007*).

Esses ensaios foram realizados no Laboratório de Geotecnia da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-RIO), utilizando os métodos convencionais do ensaio CCNBD com medições de deformação de abertura do entalhe.

Para medição das deformações de abertura do entalhe, utilizou-se clip-gauges da marca MTS que foram acoplados na borda do mesmo (Figura 2). Cabe ressaltar que anteriormente essas amostras passaram por diversos ensaios de ciclagem água-estufa para avaliação do efeito de alterabilidade da rocha.

O equipamento utilizado para a realização dos carregamentos foi uma prensa cervo-controlada (Figura 2), na qual o corpo de prova foi colocado com uma inclinação de 0° entre o prato da máquina e o entalhe. A exatidão do ângulo de inclinação foi feita com o auxílio de um transferidor. A taxa de carregamento utilizada foi de 0,1 N/s.

O ensaio foi realizado sob controle da taxa de carregamento, de modo que a ruptura ocorresse em, no máximo, 20 segundos após o início do ensaio e requerendo somente o registro da carga máxima. As taxas de carregamento utilizadas foram estimadas em amostras teste para medir a força de carregamento necessária antes de iniciar os ensaios a serem considerados na análise os dados dos resultados são apresentados nos itens subseqüentes.

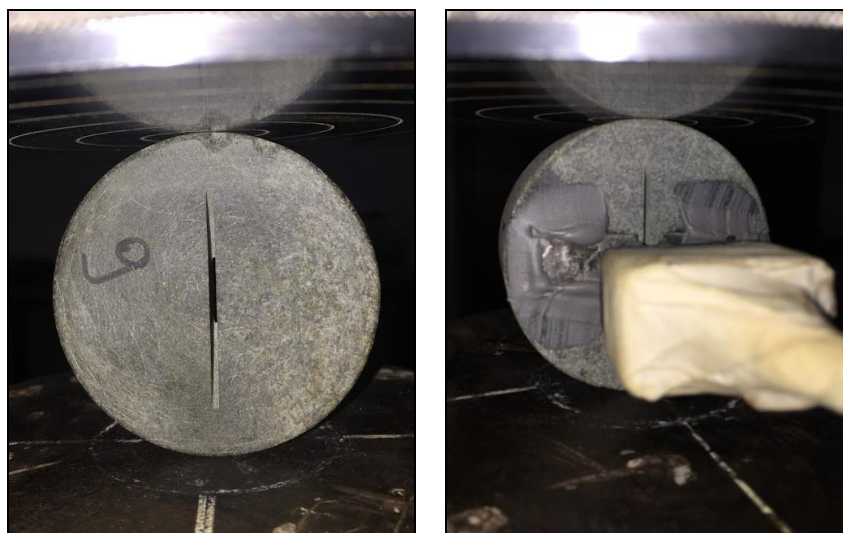


Figura 2. - Ensaio CCNBD antes de depois da montagem com clip-gauge.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Ensaio de alterabilidade

Os resultados de ciclagem foram executados de acordo com a exigência da norma *ASTM - D5313*, uma vez que todas as normas brasileiras para esse tipo de ensaio foram descontinuadas.

No total foram feitos 105 ciclos de alteração água-estufa. A cada 5 ciclos efetuou-se a caracterização dos índices físicos de porosidade aparente e massa específica seca aparente.

No decorrer do ensaio de ciclagem notou-se que alguns corpos de prova, à medida em que foram submetidos aos ciclos de imersão em água e secagem em estufa começaram a apresentar fissuras e lascas nas bordas dos corpos de prova, como mostrado na Figura 3. Desta forma para efeitos de esclarecimento fez uma análise qualitativa das amostras durante os ciclos, quantificando a quantidade de fissuras e lasqueamento que foram surgindo de acordo a ciclagem, cujos resultados serão mostrados na Figura 4.



Figura 3 - Amostras representando os efeitos do processo ocorridos durante a ciclagem. A) Rachadura; B) Fissuramento; C) Lasqueamento.

De acordo com a Figura 4 é possível observar um predomínio do processo de fissuramento desde os ciclos iniciais, sendo assim o processo mais expressivo do ponto de vista de

intemperismo físico. O fissuramento ocorre de forma mais efetiva no ciclo 20 onde se tem maior valor de amostras afetadas por tal processo, reduzindo-se a partir daí.

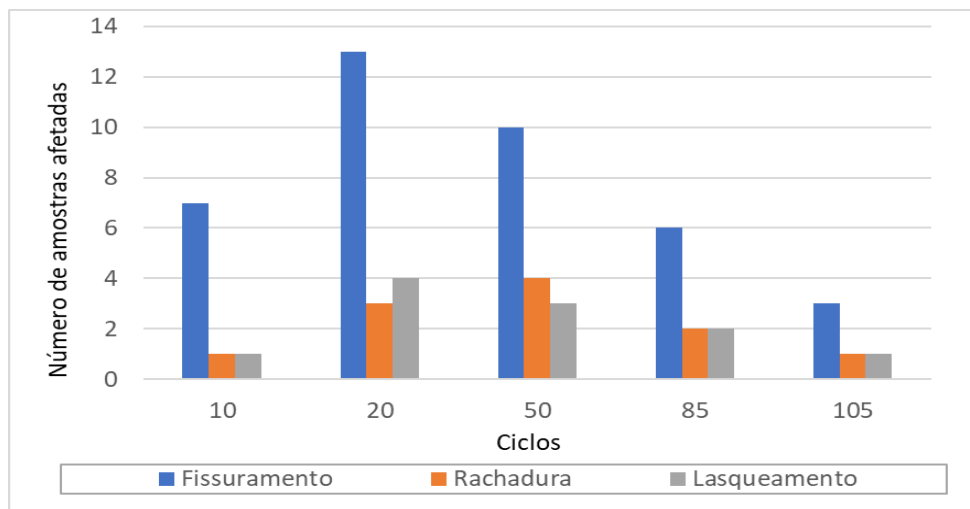


Figura 4 - Exame qualitativo com a quantidade de amostras afetadas pela ciclagem água estufa.

O processo de rachadura e lasqueamento das amostras se assemelha ao processo de fissuramento, porém ocorre de forma menos intensa. O processo de rachadura apresenta uma maior intensidade no ciclo 50 onde se percebe uma maior frequência de rachaduras das amostras. O lasqueamento ocorre de forma mais intensa nos ciclos 20 e se torna menos expressivo nos ciclos finais. Esse comportamento também é observado nos outros processos descritos acima.

Acredita-se que esse processo ocorra assim como no campo, respeitando uma sequência. Primeiramente acontece a fissuração, que evolui para rachadura e por fim, acontece o lasqueamento e/ou desintegração da rocha. Outro fato observado na Figura 5, após a ciclagem água-estufa foi a descoloração das amostras com o avanço dos ciclos. Essa descoloração se deve a alteração dos minerais de biotita, clorita, anfibólio e epidoto que compõe a matriz da rocha.



Figura 5 - Amostras após ciclagem água-estufa. Da esquerda para direita, a primeira fileira indica ciclo 20, segunda fileira ciclo 50, terceira fileira ciclo 85 e quarta fileira ciclo 105.

3.2. Ensaio CCNBD

De maneira a permitir a determinação dos valores diretos de abertura e fechamento das fissuras fez-se ensaios em amostras de CCNBD utilizando um clip-gauge da MTS com controle de carga e deslocamento de abertura do entalhe, conhecido como *crack mouth opening displacement* (CMOD). Os gráficos comparativos com os resultados de ensaios realizados utilizando o clip-gauge estão apresentados na Figura 6.

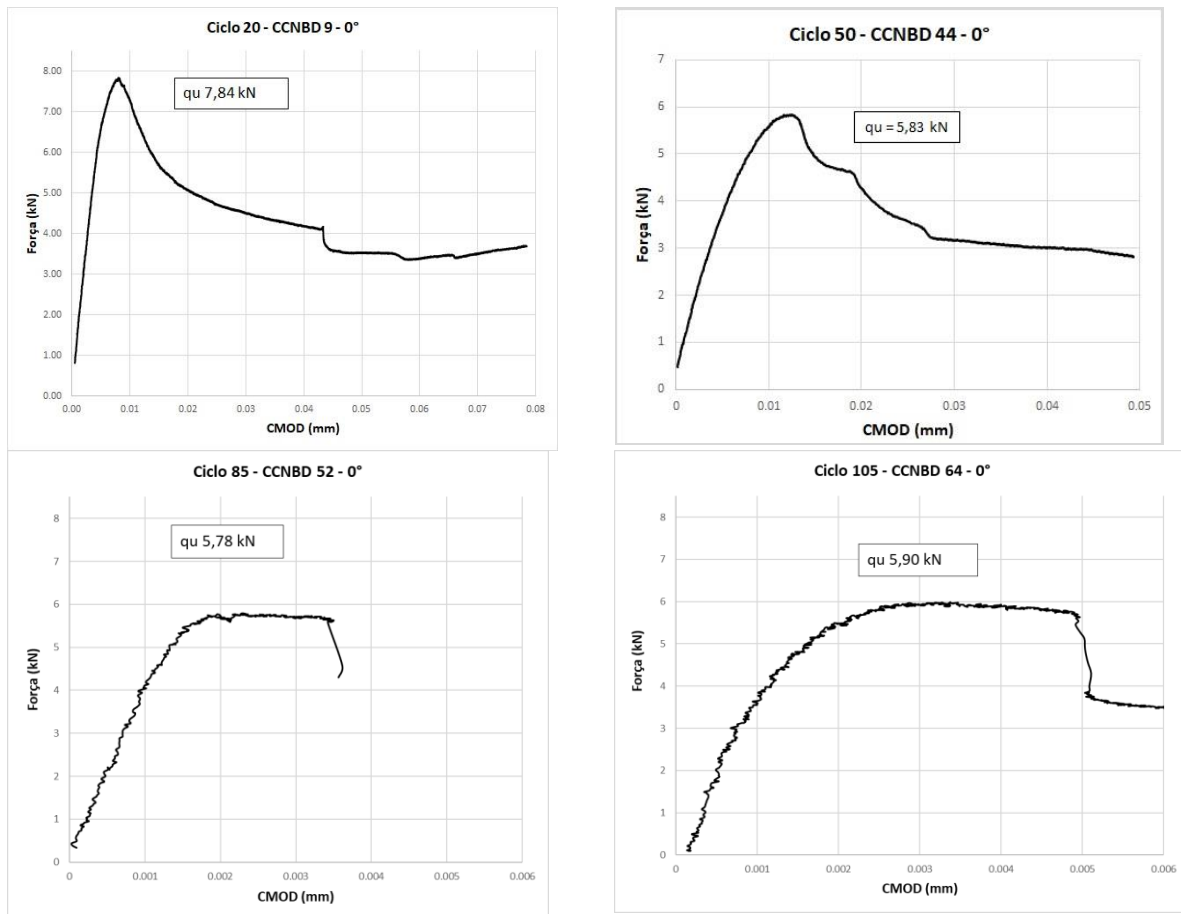


Figura 6 - Gráfico de carregamento versus o deslocamento de abertura do entalhe para os ciclos de água- estufa de 20, 50, 85 e 105, em um ângulo de 0°.

Comparando os gráficos obtido utilizando clip-gauge, foi possível confirmar o comportamento frágil das amostras. Pode-se observar que o valores de resistência máxima de ruptura (q_u) apresentada as figuras abaixo diminui com o aumento do efeito da ciclagem água-estufa.

Analisando o primeiro gráfico da Figura 6, nos primeiros valores de abertura da trinca temos uma alta carga, até atingir o valor máximo q_u de 7,84 kN, nesse primeiro trecho a fratura ocorre internamente no entalhe após atingir o valor máximo. Algumas vezes é possível observá-la na face do corpo de prova.

Após atingir o valor máximo a fratura passa a ter um comportamento instável apresentando um patamar de escoamento descendente. A trinca continua se propagando instavelmente fazendo surgir novas trincas, representadas pelos patamares secundários nos gráficos do ciclo 20 e ciclo 50. É possível observar também que em ambos os ciclos a reta inicial apresenta uma maior inclinação quando comparado com os ciclos 85 e 105.

Nos ciclos 85 e 105 é possível notar uma mudança de comportamento dos gráficos, já que em ambos é possível observar que para um maior deslocamento da abertura da trinca, tem-se uma menor variação da carga, o que não ocorre nos dois primeiros ciclos demonstrados na Figura

6. É possível observar nos ciclos 20 e 50 que o a abertura do notch ocorre até aproximadamente 0,01mm, já nos ciclos 85 e 105 esse deslocamento máximo é de aproximadamente 0,002mm representando um aumento cinco vezes em relação aos ciclos 20 e 50. Isso deve ser efeito do intemperismo causado pelos ciclos de umedecimento e ciclagem que faz com que o comportamento da fratura mude de regime.

Outro fato que deve ser observado é que nos ciclos 85 e 105 a força aplicada para abrir uma fissura é menor que nos dois primeiros ciclos da Figura 6. Uma vez que nesses dois últimos gráficos, ambos, apresentaram um único patamar de escoamento, porém maior que nos dois gráficos iniciais. De novo, interpreta-se esse resultado como sendo influenciado pelo intemperismo originado pela ciclagem realizada nas amostras.

Esse maior patamar escoamento dos ciclos 85 e 105 indica que com o avanço da ciclagem a rocha passou a ter um comportamento mais dúctil do que frágil gerando menos fissuras no entalhe previamente à ruptura.

4. CONCLUSÕES

Os resultados dos ensaios de executados nas amostras de metadiabásio mostraram a influência da ciclagem água-estufa. Com aumento do número de ciclos de água estufa pode-se observar um aumento do número de fissuramento, lasqueamento e rachadura entre o ciclo 20 e 50. Pode-se também notar uma leve alteração na cor das amostras derivada do processo de alteração da matriz da rocha.

Nos ensaios de tenacidade a fratura executado pelo método CCNBD, pode-se perceber um efeito da ciclagem na resistência (q_u) da propagação das fraturas no corpo de prova. Pode-se notar também que nos ciclos entre 50 e 105 as amostras apresentaram um comportamento mecânico diferente das amostras do ciclo 0 e 20.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a CAPES e CNPq pelo fomento à pesquisa e às bolsas de pesquisa, a o laboratório de mecânica de rochas da PUC-RIO e da UFV.

REFERÊNCIAS

ASTM D5313 / D5313M-12, Standard Test Method for Evaluation of Durability of Rock for Erosion Control Under Wetting and Drying Conditions, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2013.

BEHRAFTAR, S.; TORRES, S. A. G.; SCHEUERMANN, A.; WILLIAMS, D. J.; MARQUES, E. A. G.; AVARZAMAN, H. J. A calibration methodology to obtain material parameters for the representation of fracture mechanics based on discrete element simulations. *Computers and Geotechnics*, 2017.

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

ISRM – International Society Of Rock Mechanics. The complete ISRM suggested methods for characterization, testing and monitoring: 1974-2006. In: Ulusay, R. & Hudson, J.A. (eds.), suggested methods prepared by the Commission on Testing Methods, ISRM. Ankara, Turkey. 2007.

LEÃO, M. F; BARROSO, E. V, POLINOV. H., MARQUES, E. A. G, VARGAS, E. A Weathering of metapelites from the Quadrilátero Ferrífero mineral province, southeastern Brazil. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, [s.l.], p.1-15, 6 abr. 2017. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/s10064-017-1036-1>

MARQUES, E. A. G., WILLIAMS, D. J., ASSIS, I.R. E LEÃO, M. F. Effects of weathering on characteristics of rocks in a subtropical climate: weathering morphology, in situ, laboratory and mineralogical characterization. *Environmental Earth Sciences*, Springer Nature. v. 76, n. 17, pp.1-17, 2017. <http://dx.doi.org/10.1007/s12665-017-6936-7>.

MARQUES, E. A. G. Caracterização geomecânica de um perfil de intemperismo em Kinsigitos. Tese de Doutorado, Dep.de Geologia, IGEO/UFRJ, RJ, 261p. 1998.