

EFEITOS DO FOGO NA BASE PÉTREA DO MONUMENTO PÉTREO A PEDRO ÁLVARES CABRAL

FIRE'S EFFECTS AT THE BASE OF THE MONUMENT TO PEDRO ÁLVARES CABRAL

Julianna Machado de Souza Santos

Aluno de Graduação em Geologia, 5º período, Universidade Federal do Rio de Janeiro
Período PIBIC ou PIBITI/CETEM: setembro de 2022 a julho de 2023
jnmachado0211@gmail.com

Roberto Carlos Ribeiro

Orientador, Engenheiro Químico, D.Sc.
rcarlos@cetem.gov.br

Rosana Elisa Coppedê Silva

Co-orientadora, Engenheira Geóloga, D.Sc.
rosanacoppede@gmail.com

RESUMO

Os incêndios em monumentos pétreos no Brasil têm sido cada vez mais frequentes, como o incidente que afetou drasticamente o Museu Nacional em 2018 e no Monumento a Pedro Álvares Cabral, ambos no Rio de Janeiro, afetando diretamente a composição mineralógica dos mesmos. Baseado nisso, o presente trabalho teve como objetivo descrever e identificar as alterações físico-mecânicas do gnaiss facoidal presente no pedestal do monumento a Pedro Álvares Cabral que sofreu o incêndio e verificar o comportamento de leptinito são submetido à altas temperaturas. Para tal, foram realizadas análises de difração de raios-X, microscopia eletrônica de varredura- MEV, determinação dos índices físicos, determinação da dureza, avaliação da velocidade ultrassônica e determinação colorimétrica da rocha do monumento e em amostras de leptinito são, antes e após serem submetidos à altas temperaturas (800°C, 1.000°C, 1.200°C), em diferentes tempos de exposição (1, 2, 3 e 4h) e também com diferentes métodos de resfriamento (em água e ao ar). Os resultados indicam que o facoidal foi quebrado pela dilatação/pressão da alta temperatura, assim como no Leptinito, com mudança de cor nos feldspatos contra mudança de cor da biotita e granada, fraturas não penetrantes e aumento da rugosidade, nas amostras frescas. Além disso, a densidade aparente foi de 2.692kg.m⁻³ nas amostras são para 2.625kg.m⁻³ nas amostras do monumento, a porosidade aparente aumentou de 0,71% para 1,38%, e absorção de água, aumentou de 0,26% para 0,52% e o resultado da dureza média reduziu-se de 800HLD nas amostras são para 450HLD nas queimadas. A velocidade ultrassônica reduziu-se de 3000m.s⁻¹ para 500 m.s⁻¹ paralelo à foliação e 600m.s⁻¹ perpendicular à foliação. Tais resultados, indicam alterações substanciais na rocha após serem submetidas à altas temperaturas.

Palavras-chaves: incêndios, gnaiss facoidal, altas temperaturas.

ABSTRACT

Fires in stone monuments in Brazil have been increasingly frequent, such as the incident that drastically affected the National Museum in 2018 and the Monument to Pedro Álvares Cabral, both in Rio de Janeiro, directly affecting their mineralogical composition. Based on this, the present work aimed to describe and identify the physical-mechanical alterations of the facoidal gneiss present on the pedestal of the monument to Pedro Álvares Cabral that suffered the fire and to verify the behavior of leptinite when subjected to high temperatures. For this, analyzes were carried out X-ray diffraction analyzes, scanning electron microscopy - SEM, determination of physical indices, determination of hardness, evaluation of ultrasonic velocity and colorimetric determination of the monument rock and in samples of leptinite are, before and after being

subjected to high temperatures (800°C, 1,000°C, 1,200°C), in different exposure times (1, 2, 3 and 4h) and also with different cooling methods (in water and in air). The results indicate that the facoidal was broken by the dilation/pressure of the high temperature, as well as in the Leptinite, with color change in the feldspars against color change in the biotite and garnet, non-penetrating fractures and increased roughness, in the fresh samples. Furthermore, the apparent density went from 2,692kg.m⁻³ in the healthy samples to 2,625kg.m⁻³ in the monument samples, the apparent porosity increased from 0.71% to 1.38%, and water absorption increased from 0.26% to 0.52% and the average hardness result reduced from 800HLD in healthy samples to 450HLD in burned ones. The ultrasonic velocity was reduced from 3000m.s⁻¹ for 500 m.s⁻¹ parallel to foliation and 600m.s⁻¹ perpendicular to foliation. Such results indicate substantial changes in the rock after being subjected to high temperatures.

Keywords: fire, facoidal gneiss, leptinito gneiss.

1. INTRODUÇÃO

O Monumento a Pedro Álvares Cabral (Figura 1) localizado na cidade do Rio de Janeiro representa a tríade que “oficializou” a descoberta do Brasil, com uma escultura composta por Pedro Álvares, Pero Vaz e o Frei Henrique Soares, inaugurado em 1900 para comemorar o quarto centenário da chegada do navegador luso e foi confeccionada por Rodolfo Bernadelli, composta por embasamento em gnaiss Facoidal de 10 m de altura onde está fincada a escultura de bronze. Após ser incendiada (Figura 2) por protestos políticos, a rocha do monumento sofreu alterações que precisavam ser identificadas e mapeadas, para conhecer a profundidade dos danos causados ao patrimônio e orientar futuras ações de restauração (SILVA et al., 2023).

2. OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é identificar e descrever as alterações das propriedades físico-mecânicas da rocha do monumento exposta ao incêndio e amostras de leptinitos são submetidas à altas temperaturas.

3. METODOLOGIA

Foram estudadas em laboratório amostras de rochas desprendidas do monumento de Pedro Álvares Cabral (Figura 3A) e vinte e quatro amostras cúbicas de um leptinito são do acervo do CETEM (figura 3B). Foram realizadas análises de difração de raios-X (DRX), microscopia eletrônica de varredura- MEV em equipamento Hitachi TM3030Plus com detetor EDS (Bruker Quantax 70), determinação da densidade aparente, porosidade aparente e absorção de água por meio da norma ABNT NBR 15845-2, determinação da dureza superficial por meio de aparelho Equotip 3, Proceq, avaliação da velocidade ultrassônica de ondas p – UPV utilizando-se um PUNDIT PL-200 da Proceq e determinação colorimétrica com colorímetro CieLab, Spectroguide Sphere Gloss, BYK Gardner.

As amostras cúbicas de leptinito foram aquecidas em mufla em diferentes temperaturas (800°C, 1.000°C, 1.200°C), com quatro tempos de permanência (1, 2, 3 e 4 horas) e dois métodos de resfriamento diferentes, ar e água fria, realizando-se as mesmas avaliações realizadas com as amostras de Pedro Álvares Cabral.



Figura 1: Monumento Pedro Álvares Cabral.



Figura 2A: Monumento pós-incêndio **2B** detalhe da esfoliação da rocha.



Figura 3: (A) Amostras Pedro Álvares Cabral e (B) Amostras cúbicas de Leptinito.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os principais danos observados por meio de lupa estereoscópica foram fissuras, alterações de cor e perda de minerais, observados leptinito e na amostra de Cabral devido à exposição a altas temperaturas. Na amostra de facoidal do monumento, foram observadas fraturas, esfoliação, perda de material, depósitos negros e manchas de óleo. Os grandes cristais de feldspato apresentam fissuras. A parte interna apresenta algumas manchas na frente, mas sem alterações aparentes no verso (Figura 4). Já nas amostras de Leptinito submetidas a 800 °C, a rocha se dilatou, mas, quando esfriou, contraiu-se, e foi possível observar algum afrouxamento nos contatos. As rochas que permaneceram por quatro horas nessa temperatura apresentaram maior desenvolvimento de trincas. A cor da biotita mudou para dourado e as amostras ficaram avermelhadas, pela oxidação térmica de minerais com ferro, e mais branca, devido ao intenso fraturamento do quartzo (SIPPEL et al., 2007; VAZQUEZ et al., 2016; SCIARRETA et al., 2021).

As amostras resfriadas ao ar mostraram uma tonalidade mais vermelha em comparação com as resfriadas com água, que eram mais brancas.

Fraturas foram observadas nas superfícies das amostras resfriadas a ar e na água, principalmente seguindo os planos de foliação, e fraturas propensas ao desprendimento de material foram observadas, principalmente nas amostras resfriadas ao ar.

Após o resfriamento das amostras a 1.200 °C (Figura 5), danos foram visíveis em todas as amostras, sendo que as resfriadas ao ar pareciam estar em pior estado. Fraturas e perda de minerais também foram observadas nas amostras resfriadas com água, embora as fraturas tenham sido menos extensas em comparação com as amostras resfriadas ao ar, indicando uma maior redução na rigidez aparente. As análises de difração de raios X na Facoidal identificaram a presença de diferentes minerais, como quartzo, k-feldspato, microclina, sanidina, anortita e biotita. A presença de diversos tipos de minerais indica a ocorrência de uma temperatura muito alta durante o incêndio. Na Figura 6 observa-se no MEV a propagação de microfissuras no facoidal e fissuras intragranulares (grãos de quartzo-quartzo e feldspato-feldspato), além de fissuras intergranulares (contatos quartzo-feldspato). Na Figura 7 observa-se o detalhe do contato granada-quartzo com uma fratura e granada-biotita-quartzo sem fratura da amostra de leptinito submetida a 1.200°C por duas horas e resfriada naturalmente

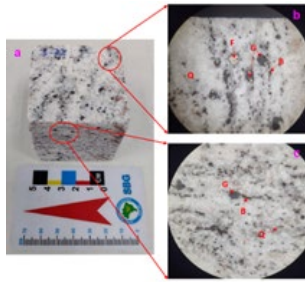


Figura 4: Corte normal da superfície queimada, depósitos externos de fumaça e cinzas (a); zona de oxidação térmica (b); e fissuras no feldspato (c). B: biotita, Q: quartzo e F: feldspato.

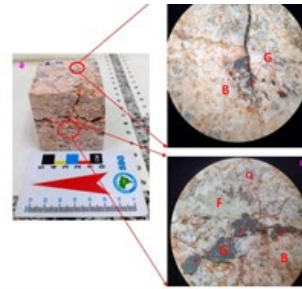


Figura 5: Amostra submetida a 1200 °C e resfriado naturalmente: a) Ruptura da amostra, b) e c) granadas ficaram cinza e biotita dourada, intensificando a formação de fissuras.

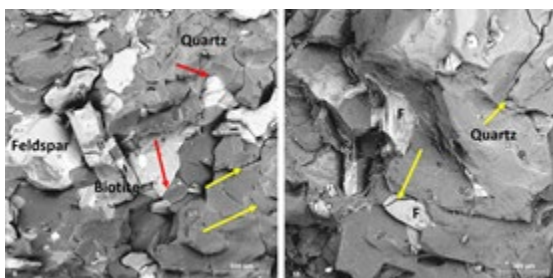


Figura 6: Imagens de MEV das microfissuras intragranulares (setas amarelas) e intergranulares (setas vermelhas) de Facoidal. F: feldspato.

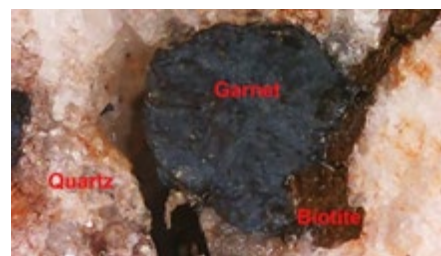


Figura 7: Detalhe do contato granada/quartzo no leptinito a 1.200°C (2h).

Em relação aos resultados colorimétricos, todas as amostras apresentaram deslocamento nos eixos colorimétricos a^* e b^* após o aquecimento, resultando em uma coloração avermelhada devido à oxidação térmica de minerais com ferro. Nas amostras resfriadas ao ar a 1.000 e 1.200°C, ocorreu um clareamento significativo na cor.

Não foram observadas diferenças aparentes na variação de cor entre os métodos de resfriamento a 800°C. A partir de 1.000°C, houve um grande aumento no parâmetro L^* , resultando em mudanças perceptíveis ao olho humano com uma variação total de cor (ΔE^*) de 4,9 a 11,1.

Os resultados de porosidade e absorção de água estão apresentados respectivamente, nas Figuras 8 e 9. Pode-se verificar um aumento dessas propriedades, em todas as amostras, principalmente no leptinito, devido a diferentes condições de aquecimento, composição e estrutura mineralógica e pela maior presença de quartzo, resultando em expansão térmica que gerou fraturas visíveis. O facoidal, com menor teor de quartzo e estrutura diferente, apresentou menos fraturas, o que leva a menor índice de porosidade e absorção de água, comparado com o leptinito. Estudos anteriores mostraram que o coeficiente de expansão térmica é maior em rochas com maior teor de quartzo e granulometria média. O tempo de exposição ao calor também contribuiu para o aumento das rachaduras. Também é possível observar que para o leptinito, a densidade diminuiu com o aumento da temperatura, refletindo o desenvolvimento de trincas e fraturas. A densidade aparente do facoidal foi um pouco inferior ao valor de referência (2.692 kg/m^3), mas não pode ser atribuída apenas ao fogo, devido à condição prévia desconhecida da rocha.

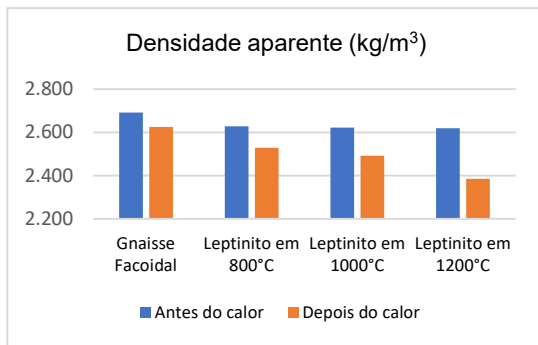


Figura 8: Densidade aparente das amostras antes e depois do aquecimento.

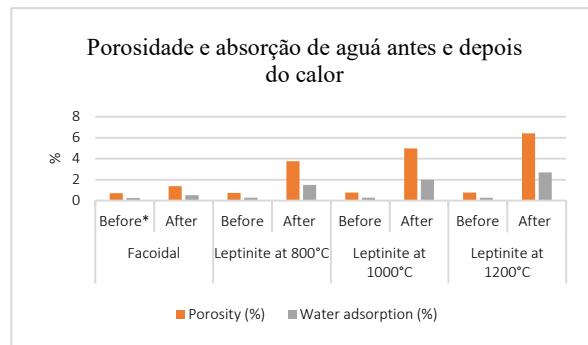


Figura 9: Porosidade e adsorção de água das amostras antes e após o aquecimento

*Valor de referência do Facoidal de Castro et al., 2020.

Em termos de dureza, o valor de referência, segundo Castro et al (2020) de superfície Leeb para o facoidal é 800 ± 100 HLD. As medições da amostra do monumento resultaram em 331 ± 153 (escala externa) e 428 ± 90 (escala interna). Para as amostras de leptinito, a dureza da superfície caiu de 802 ± 22 para 331 ± 76 HLD e após o aquecimento, uma redução de mais de 50% desse parâmetro. Németh et al. (2021) também verificaram uma redução de 60% no valor de dureza do resalto após um tratamento de aquecimento de 750°C . Os valores de dureza individuais obtidos não permitiram a identificação de nenhuma diferença significativa entre os grupos por tempo de residência ou método de resfriamento.

A velocidade da onda ultrassônica (UPV, onda p) para o Facoidal e o Leptinito de referência é de cerca de 4.000 m/s. O efeito da rachadura nas amostras de Facoidal queimadas e Leptinito aquecidas foi demonstrado pelas baixas UPVs medidas: 500 m/s paralela à foliação e 600 m/s ortogonal à foliação para o Facoidal, e 800 m/s paralela à foliação e 600 m/s ortogonal à foliação para o Leptinito.

5. CONCLUSÕES

A exposição ao fogo no facoidal no monumento a Pedro Álvares Cabral no Largo da Glória claramente gerou danos em sua estrutura. Macroscopicamente, eles se refletem em rachaduras visíveis (fraturas), esfoliação, perda de material (arredondamento das bordas), depósitos (fumaça e cinzas) e manchas (óleo). Nas amostras estudadas em laboratório, foi possível identificar rachaduras intragranulares e intergranulares nas imagens de MEV-EDS. A densidade aparente foi um pouco menor do que a da rocha sã, e a porosidade e a adsorção de água foram um pouco maiores, mas com valores semelhantes para as peças externas e internas. A identificação de sanidina por DRX aponta para uma alta temperatura do incêndio. A condição dessa pedra antes do incêndio é desconhecida, portanto, serão necessárias mais investigações.

A exposição do leptinito a altas temperaturas no forno mufla resultou em mudanças intensas de cor em todos os espécimes. Todas as amostras ficaram manchadas de vermelho devido à oxidação do ferro, pelo menos até certo ponto, e embranqueceram. Essas mudanças de cor foram mais acentuadas com o aumento da temperatura. Também foi observado que as amostras resfriadas a ar eram mais vermelhas do que as resfriadas a água, que se tornaram mais brancas.

A densidade e a intensidade das rachaduras aumentaram com o aumento da temperatura: foram observadas rachaduras intragranulares e intergranulares em todas as amostras, e fraturas visíveis se desenvolveram a 1.000°C e 1.200°C . A biotita tinha uma aparência estufada e sua cor ficou dourada. A cor das granadas ficou cinza-escuro, e alguns cristais se quebraram na temperatura máxima. O quartzo estava intensamente fraturado e até parecia vitrificado. As transformações minerais e as diferenças na expansão térmica causaram um aumento volumétrico e iniciaram rachaduras na pedra, ativando planos de clivagem e foliação. A densidade aparente diminuiu em até 10%, e a porosidade e a absorção de água aumentaram em 900%. A dureza da superfície foi reduzida para menos da metade o que significa que, após um incêndio, essas pedras podem colocar em risco a estabilidade de edifícios históricos se tiverem uma função estrutural.

6. AGRADECIMENTOS

Ao CETEM pela infraestrutura e ao CNPq pela bolsa.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

NÉMETH, A., ANTAL, Á., TÖRÖK, Á. Physical Alteration and Color Change of Granite Subjected to High Temperature. *Appl. Sci.* 2021, 11, 8792. <https://doi.org/10.3390/app11198792>.

SCIARRETTA, F.; ESLAMI, A.L.; BEAUCOUR, J.; NOUMOW'E, A. (2021). State-of-the-art of construction stones for masonry exposed to high temperatures, *Constr. Build. Mater.* 304 (2021) 124536.

SILVA, R.E.C.; CASTRO, N. F.; PIACESI, B.F.C.; RIBEIRO, R.C.C.; SANTOS, J.M.S. (2023). Investigation of the effects of fire on stone materials: the rio de janeiro case, 7th Global Stone Congress 2023, Batalha, Portugal, June 18 - 23, 2023.

SIPPEL, J.S.; SIEGISMUND, T.; WEISS, K.H. Nitsch, and M. Korzen. 2007. Decay of natural stones caused by fire. *Geological Society, London, Special Publications* 271:139-51. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.2007.271.01.15>.

VAZQUEZ, P.; BENAVENTE, D.; MONTIEL, D.; GOMEZ-HERAS, M. Mineralogical Transformations in Granitoids during Heating at Fire-Related Temperatures. *Appl. Sci.* 2022, 12, 188. <https://doi.org/10.3390/app12010188>.