Análise de aspectos texturais de um gabro alcalino a partir da técnica de microtomografia computadorizada de raios X

Rebecca Oliveira Prado[1], Adriana Chatack Carmelo[1], Renato Borges Bernardes[1], Sylvia Maria de Araújo[1]; Alice Louzada da Costa Carvalhêdo[1]
[1]Universidade de Brasília, Instituto de Geociências

Copyright 2024, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

Este texto foi preparado para a apresentação no IX Simpósio Brasileiro de Geofísica, Salvador, 08 a 10 de outubro de 2024. Seu conteúdo foi revisado pelo Comitê Técnico do X SimBGf, mas não necessariamente representa a opinião da SBGf ou de seus associados. É proibida a reprodução total ou parcial deste material para propósitos comerciais sem prévia autorização da SBGf.

Resumo

A petrografia é o estudo e análise das rochas com foco em sua composição mineralógica, aspectos texturais e estruturais, fornecendo informações e descrições de suas características físicas e químicas, assim como do ambiente de formação e da ação de processos posteriores. Neste contexto, a técnica de microtomografia computadorizada de raios X, micro-CT, apresenta-se como técnica complementar à petrografia, possibilitando o estudo morfológico dos constituintes das rochas por meio da obtenção de imagens e de modelos tridimensionais, com enfoque nas feições texturais e estruturais. Este trabalho apresenta os resultados da aplicação bem-sucedida de micro-CT em duas amostras de um gabro alcalino fino proveniente de intrusões da Província Alcalina do Alto Paranaíba. Pôde-se discriminar fases minerais e identificá-las com minerais descritos no estudo petrográfico. Portanto, associa-se as diferentes atenuações das fases com a mineralogia da rocha, resultando em contribuição da micro-CT para a identificação de feições texturais e estruturas.

Introdução

Para a análise e investigação dos parâmetros petrofísicos, a determinação de dados quantitativos relacionados à porosidade, tamanho do poro e fases minerais em rochas é comumente realizada a partir do estudo de lâminas petrográficas e métodos indiretos, como injeção de gás e mercúrio em reservatórios. Entretanto, as técnicas analíticas apresentam limitações, necessitando com isso a utilização de outros métodos complementares para maior robustez e precisão na análise da amostra (Reis Neto et al., 2011).

As principais aplicações da técnica de microtomografia computadorizada de raios X, micro-CT, visam suprir algumas deficiências produzidas por outros métodos. A técnica permite a análise de centenas de seções microtomográficas e a visualização tridimensional de feições internas das amostras em alta resolução, sem a necessidade de danificá-las. Como indica o nome, a micro-CT utiliza raios X para produzir imagens detalhadas de amostras em escala micrométrica (µm). A amostra é posicionada em uma plataforma que rotaciona, enquanto feixes de raios X a atravessam, em diferentes ângulos de observação. Um detector registra a energia atenuada dos raios X e essas informações, denominadas projeções, são processadas a partir de softwares para reconstruí-las em imagens e modelo tridimensional (ver Appoloni et al., 2007; Reis Neto et al., 2011; Cnudde & Boone, 2013).

As províncias alcalinas de Goiás (PAGO) e Alto Paranaíba (PAAP) estão associadas ao Lineamento Az. 125° (Figura 1). Ambas resultam de intensa atividade magmática de caráter máfico-alcalino ocorrida no Cretáceo Superior (Dutra et al., 2012; Rocha et al, 2014). O Lineamento Az 125° abrange extensa área do Brasil (Figura 2), com realce em dados magnéticos. Rocha et. al. (2014) apresentam lineamentos magnéticos, oriundos do produto Derivada Inclinada (TILT), esses associados à cronologia de eventos tectônicos, caracterizando o Lineamento em três subsistemas denominados L1, L2 e L3.

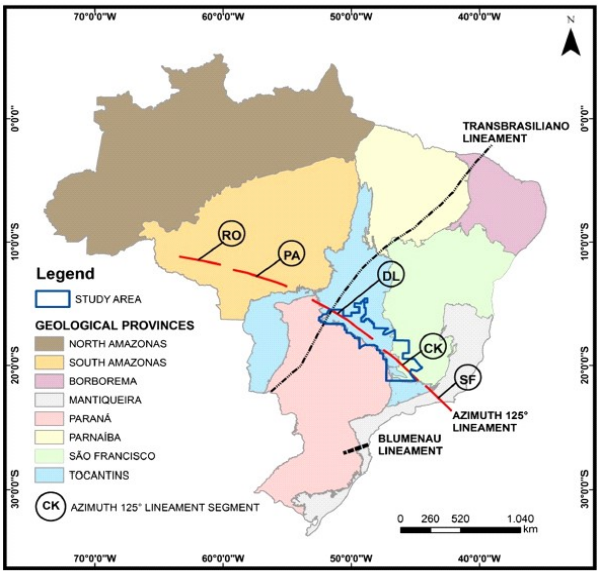

Figura 1 - Mapa das províncias geológicas e principais lineamentos estruturais do Brasil com a localização da área de estudo e do Lineamento Az. 125°. Esse se estende como RO: Rondoniense; PA, Parguaense; DL: Brasiliano (Dunitos e Lampróficos); CK: Brasiliano (Carbonatitos e Kimberlitos); SF: Brasiliano (Sienitos e Fonolitos). Fonte: Rocha *et al*. (2014).

A Figura 2 mostra a abrangência do Az. 125º, com base em imagens magnéticas, no produto Derivada Inclinada (*TILT*), associada à cronologia dos eventos que caracterizam a estrutura segmentada e definida como subsistemas L1, L2 e L3 (Rocha *et al*., 2014).

Neste trabalho serão analisadas a partir da aplicação da técnica de Microtomografia Computadorizada de Raios X duas amostras de um gabro alcalino fino proveniente do subsistema L3.

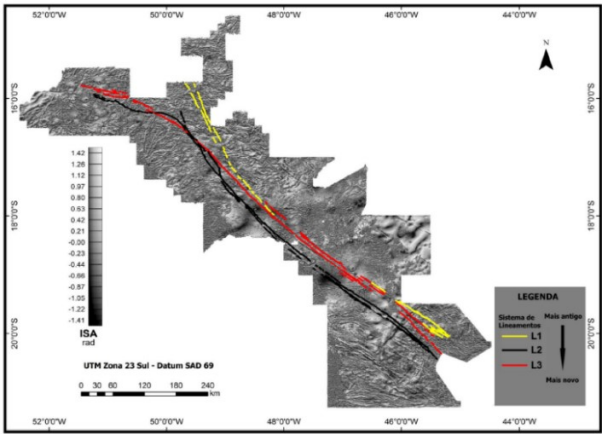

Figura 2 - Interpretação geofísica do sistema de lineamentos AZ 125° no produto TILT: L3 em vermelho; L2 em preto; e L1 em amarelo. Fonte: Rocha *et al*. (2014).

Metodologia

A microtomografia computadorizada baseia-se na equação dos raios X que estabelece uma relação entre a intensidade da radiação e o coeficiente de atenuação do material (Eq.1). Essa relação mostra que quanto maior a energia do feixe de radiação incidente, maior a sua capacidade de penetração. Por outro lado, quanto mais espesso ou denso é o material, menor será a energia da radiação resultante após atravessá-lo. Tal relação é descrita pela equação (Okuno & Yoshimura, 2011):

$$I = I_0 \, e^{-\mu x} \qquad \text{(Eq. 1)}$$

onde I é a intensidade do feixe emergente, I_0 é a intensidade do feixe incidente, x é a espessura do objeto atenuador e μ é o coeficiente de atenuação linear (Lopes *et al*., 2012; Eisberg, 1979). Portanto, quando os raios X atravessam a amostra, eles são atenuados de acordo com os coeficientes de atenuação linear das fases contidas na amostra e suas respectivas densidades (d).

As duas amostras estudadas (Figura 3) foram escaneadas no microtomógrafo *SkyScan* 1172 (Bruker) e apresentam dimensões distintas, portanto foi possível obter diferentes resoluções de aquisição. Para a aquisição dos dados foram testadas diferentes combinações de parâmetros como tensão, corrente, filtros, magnificações e tempos de exposição com o objetivo de obter produtos mais aprimorados para cada amostra, conferido-lhe maior robusez na análise. A Amostra 2 (resolução de 2,37 µm), é de uma porção de tamanho reduzido da Amostra 1 (resolução de 4,21 µm). A análise da Amostra 2 foi realizada com o objetivo de detalhar alguns aspectos texturais observados na Amostra 1 com uma maior resolução. Os dados foram pré-processados após a aquisição, incluindo a reconstrução das seções e a correção dos artefatos, utilizando o *software NRecon* (Bruker). Nas etapas de processamento, foram produzidas imagens microtomográficas e realizadas análises estatísticas, com os *softwares CTAnalyser* e *CTVol* (Bruker), respectivamente.

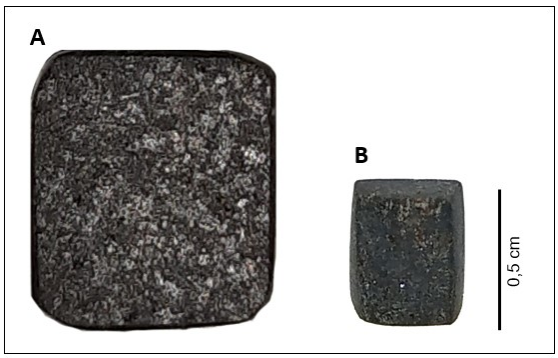

Figura 3 – Amostras de gabro alcalino analisadas. A) Fotografia da Amostra 1. B) Fotografia da Amostra 2.

Também foram utilizadas informações obtidas por análises de petrografia microscópica (de luz transmitida e de luz refletida) com o objetivo de balizar as análises microtomográficas, trazendo mais informações sobre composição mineralógica, aspectos texturais e estruturais das amostras.

Resultados

Como as imagens microtomográficas são arquivos em formato BMP, com 8 bits por pixel e uma paleta de 256 níveis de cinza, ao extrair um perfil dessas imagens, obtêm-se informações que indicam diferentes níveis de atenuação de raios X, esses associados aos valores dos 256 níveis de cinza (NC; eixo das ordenadas). Os perfis obtidos mostram as diferenças de atenuação entre os materiais constituintes da Amostra 1 (Figura 4B). Com prévio conhecimento obtido por meio das análises petrográficas, observa-se assinaturas de menores densidades (~ 50 NC) associadas à ganga. As regiões com assinaturas de densidade intermediária (~ 100 NC) estão relacionadas às bordas reabsorvidas dos óxidos pela ganga. As regiões de densidade mais elevadas (~ 130 NC) são referentes à ilmenita. As regiões com densidade mais alta (~ 150 NC) associam-se a magnetita. O pico que atinge o ponto mais elevado (NC = 256)

atribui-se ao material de alta densidade detectado pela micro-CT, porém não observado nas análises petrográficas.

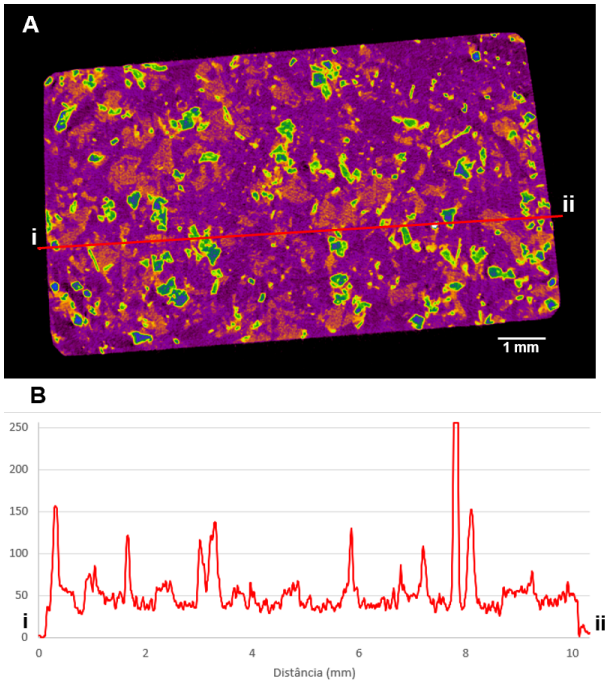

Figura 4 – Representação do perfil de atenuação traçado na seção microtomográfica 766 da Amostra 1. A) Direção do perfil traçado e B) perfil de atenuações.

Na Amostra 2, foram identificadas as mesmas fases mineralógicas encontradas na Amostra 1. No perfil (Figura 5), as regiões com valores próximos de 50 NC estão associadas à ganga, os valores próximos de 100 NC representam as bordas reabsorvidas, aqueles em torno de 130 NC indicam a ilmenita e os próximos de 150 NC são cristais de magnetita. A Amostra 2 mostra a fase de minerais com mais alta densidade, assim como na primeira. Os minerais constituintes da ganga (na micro-CT, fase com resposta de densidade relativa baixa) mostram formas distintas (ver regiões em tons arroxeados, Figura 5A).

Por meio de análise histogrâmica (Figura 6), foi realizada a separação das classes de atenuação das amostras após a definição de regiões de interesse (ROI), gerando informações dos constituintes da rocha, como medidas relativas de densidade e aspectos texturais.

Como as informações de atenuação de raios X obtidas pela micro-CT podem ser diretamente associadas às densidades relativas entre os componentes mineralógicos da rocha, resultando a análise em cinco classes de atenuação para cada uma das amostras.

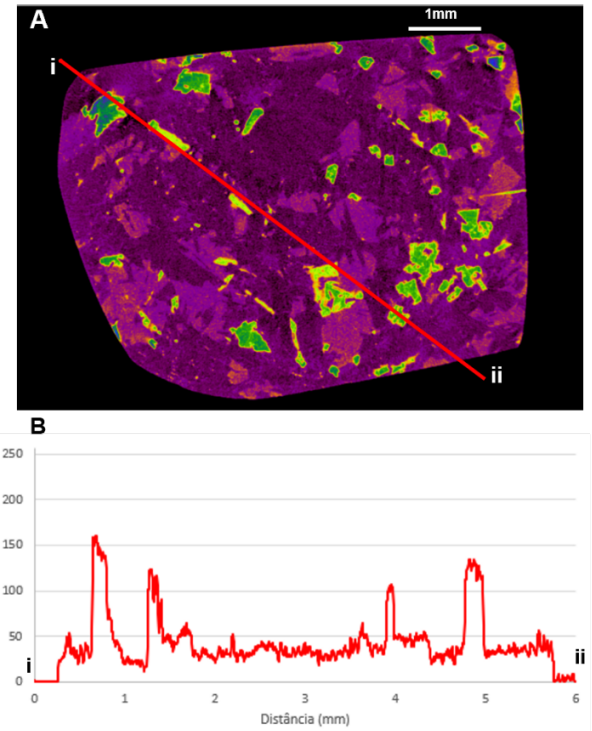

Figura 5 - Representação do perfil de densidade traçado na seção microtomográfica 733 da Amostra 2. A) Direção do perfil traçado e, B) perfil de atenuações.

Essas classes se correlacionam aos seguintes minerais identificados na petrografia: i) três diferentes minerais silicáticos constituintes da ganga que, na petrografia, são plagioclásio, clinopiroxênio e quartzo (2,6 < d < 3,6 g/cm³); ii) fase que representa as bordas reabsorvidas dos óxidos pela ganga, com densidade relativa intermediária (3,7 < d < 4,6 g/cm³); iii) ilmenita (d = 4,7 g/cm³), mineral que ocorre principalmente como cristais prismáticos, ou esqueléticos devido a sua reabsorção pela ganga; iv) magnetita (d = 5,2 g/cm³), mineral que ocorre como cristais subédricos a anédricos (< 0,5 mm) disseminados, apresentando bordas parcialmente reabsorvidas pela ganga; e v) fases com alta densidade (i.e., d >> 5,2 g/cm³, mais elevada que aquela apresentada pela magnetita), mas fases que não foram identificadas no estudo petrográfico.

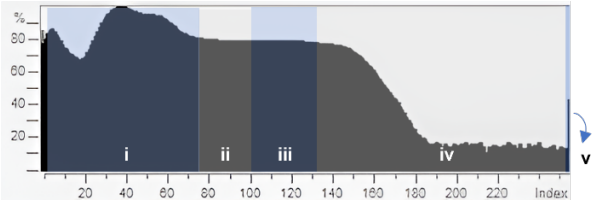

Figura 6 – Histograma com demarcação dos intervalos referentes às classes minerais identificadas. Os intervalos foram definidos como: i) silicatos ii) bordas reabsorvidas: iii) ilmenita; iv) magnetita; v) material mais denso.

A Figura 7 apresenta os modelos tridimensionais gerados a partir da separação das classes de atenuação resultante da análise histogrâmica para as amostras 1 e 2, respectivamente.

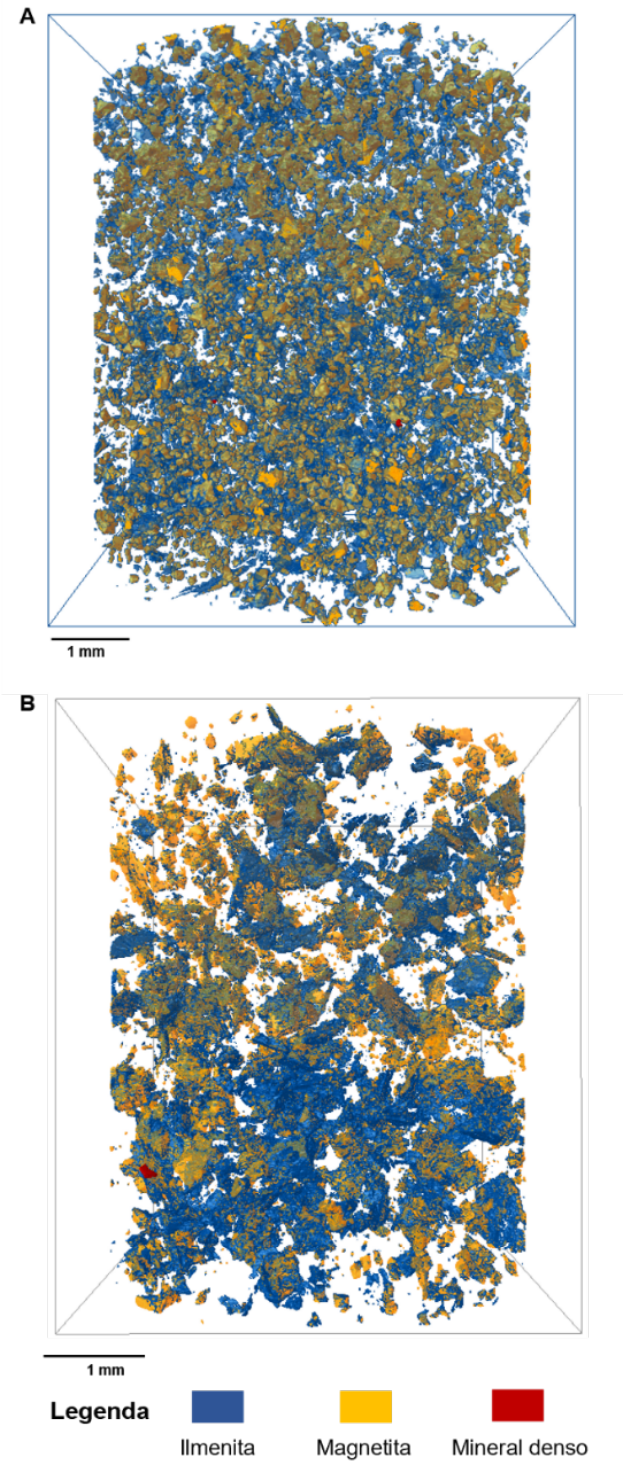

Figura 7 - Modelos tridimensionais gerados. A) Amostra 1 e B) Amostra 2.

Discussão e Conclusões

A micro-CT é uma técnica não destrutiva e auxiliar que possibilita a análise conjunta de centenas de imagens microtomográficas e produz modelos tridimensionais. Esses possibilitam análise mais detalhada das propriedades físicas e aspectos texturais das amostras. Quando combinada às técnicas petrográficas, a micro-CT mostra uma análise mais abrangente, como exemplificado para as amostras do gabro alcalino, utilizado neste trabalho. A técnica permitiu a discriminação de classes de atenuação que foram correlacionadas aos minerais descritos no estudo petrográfico. Amostras com dimensões diminutas, e consequentemente, com maior resolução de aquisição, possibilitam detalhamento na identificação de aspectos texturais e estruturas, como observado na Amostra 2, subamostra da Amostra 1, cujos cristais se apresentam com bordas mais precisas ou delimitadas. Por exemplo, os modelos tridimensionais mostram a ocorrência da ilmenita juntamente à magnetita, em muitos casos a envolvendo. Isso realça a relevância da resolução de aquisição na qualidade do produto gerado.

Os minerais mais densos encontrados pela técnica de microtomografia não foram identificados na petrografia, fato interpretado como resultado da baixa percentagem desses na amostra e na possível não amostragem em lâmina, indicando a limitação de análises bidimensionais e a necessidade de produção de outras lâminas e de mais investigação.

Portanto, a técnica de Microtomografia Computadorizada de Raios X mostrou sua relevância no mapeamento de feições texturais e estruturas, por meio da análise das amostras, principalmente a partir das diferentes densidades relativas de seus constituintes.

Por fim, ressalta-se que a micro-CT é uma técnica complementar aos estudos petrográficos, não excluindo a necessidade de integrar seus resultados com os de outras técnicas, a fim de gerar resultados mais robustos.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq – Brasil e Laboratório de Propriedades Físicas das Rochas do Instituto de Geociências da Universidade de Brasília (www.lpfr.igd.unb.br).

Referências

Appoloni, C. R.; Fernandes, C.P.; Rodrigues, C. R. O, 2007. X-ray microtomography study of a sandstone reservoir rock. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A, 580: 629-632.

Cnudde, V.; Boone, M. N, 2013. High-resolution X-ray computed tomography in geosciences: A review of the current technology and applications. Earth-Science Reviews, 123: 1-17.

Dutra, A. C., Marangoni, Y.R., Junqueira-Brod, T.C., 2012. Investigation of the Goiás Alkaline Province, Central

Brazil: application of gravity and magnetic methods. Journal of South American Earth Sciences, 33: 43-55.

Eisberg, R.; Resnick, R., 1979. Física Quântica, Ed. Campus, Rio de Janeiro.

Lopes, A.; Fiori, A. P.; Reis Neto, J. M.; Marchese, C.; Vasconcellos, E. M. G.; Trzaskos, B.; Secchi, R.; da Silva, G. F, 2012. Análise tridimensional de rochas por meio de microtomografia computadorizada de raios x integrada à petrografia. Geosciencies, v. 31, n. 1, p. 129-142.

Okuno, E.; Yoshimura, E, 2011. Raios X. In: Física das radiações. Ed. Oficina de Textos. 1ª edição. São Paulo.

Reis Neto, J. M. D., Fiori, A. P; Lopes, A. P.; Marchese, C.; Pinto-Coelho, C.V.; Vasconcellos, E. M.G.; da Silva, G. F.; Secchi, R, 2011. A microtomografia computadorizada de raios X integrada à petrografia no estudo tridimensional de porosidade em rochas. Brazilian Journal of Geology, 41: 498-508.

Rocha, L. G. M.; Pires, A. C. B.; Carmelo, A. C.; Filho, J. O. A, 2014. Geophysical characterization of the Azimuth 125° lineament with aeromagnetic data: Contributions to the geology of central Brazil. Precambrian Research, 249: 273-287.