

CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA DAS FORMAÇÕES FERRÍFERAS DE CARAJÁS (PA) E URUCUM (MS)

MINERALOGICAL CHARACTERIZATION OF IRON FORMATIONS FROM CARAJÁS (PA) AND URUCUM (MS)

Maria Luiza Vieira dos Santos

Aluno de Graduação de Geofísica da UFF, 5º período
Período PIBIC/CETEM: maio de 2026 a agosto de 2026
mluiza.vds@gmail.com

Gabriella Fazio

Orientadora, Geóloga, D.Sc.
gfazio@cetem.gov.br

RESUMO

As Formações Ferríferas da Província Mineral de Carajás (PA) e do Distrito de Urucum (MS), formadas, respectivamente, no Arqueano–Paleoproterozoico e no Neoproterozoico, registram importantes diferenças nos processos geológicos e paleoambientais do Pré-Cambriano. Este trabalho investigou os contrastes mineralógicos e geoquímico entre amostras dessas duas ocorrências. Para isso, foram realizadas análises por micro-fluorescência de raios X, difratometria de raios X e microscopia eletrônica de varredura. Os resultados geoquímicos mostram que ambas as formações são dominadas por Fe e Si, enquanto as amostras de Urucum apresentam também teores de Ca, Mg e Mn, indicando associação com carbonatos e com o ciclo biogeoquímico do manganês. As análises mineralógicas revelaram predominância de hematita, acompanhada por magnetita e quartzo, além de goethita identificada em Carajás. Esses resultados foram corroborados por análises de mineralogia magnética realizadas complementarmente ao estudo.

Palavras chave: Mineralogia, formações ferríferas, minério de ferro.

ABSTRACT

The iron formations from Carajás Mineral Province (PA) and Urucum District (MS), formed, respectively, in the Archean-Paleoproterozoic and Neoproterozoic, record important differences in the geological and paleoenvironmental processes of the Precambrian. This work investigated the mineralogical and geochemical contrasts between samples from these two occurrences. For this purpose, analyses were performed using X ray microfluorescence, X ray diffraction, and scanning electron microscopy. Geochemical results show that both formations are dominated by Fe and Si, while the Urucum samples also present Ca, Mg, and Mn contents, indicating an association with carbonates and the biogeochemical manganese cycle. Mineralogical analyses revealed a predominance of hematite, accompanied by magnetite and quartz, as well as goethite in Carajás. These results were corroborated by magnetic mineralogy analyses performed as a complement to the study.

Keywords: Mineralogy, iron formations, iron ore.

1. INTRODUÇÃO

As Formações Ferríferas (FFs) são unidades estratigráficas predominantemente pré-cambrianas compostas por rochas em camadas ricas em ferro, geralmente intercaladas por quartzo, chert ou carbonato (Bekker & Kovalick, 2020). Sua formação está diretamente relacionada às condições redox dos oceanos primitivos, à disponibilidade de ferro dissolvido e às mudanças na composição da atmosfera ao longo da evolução da Terra (Klein, 2005).

No Arqueano–Paleoproterozoico, o surgimento da fotossíntese oxigênica e o consequente Great Oxidation Event (GOE) promoveram a oxidação do ferro dissolvido (Fe^{2+}), favorecendo a precipitação de óxidos de ferro e a deposição das FFs (Kasting, 2013). Já no Neoproterozoico, a deposição dessas formações esteve associada às glaciações globais e ao Neoproterozoic Oxidation Event (NOE), que possibilitaram a acumulação de ferro em ambientes anóxicos e sua posterior precipitação durante o degelo (Klein, 2005; Ye et al., 2024).

Esses distintos contextos paleoambientais resultaram em diferenças genéticas, mineralógicas e geoquímicas entre as FFs de diferentes idades. No Brasil, destacam-se as formações da Província Mineral de Carajás (PA), de idade arqueana-paleoproterozoica, e do Distrito de Urucum (MS), de idade neoproterozoica, que constituem importantes depósitos de minério de ferro e representam registros fundamentais para a compreensão da evolução dos oceanos e da atmosfera terrestre durante o Pré-Cambriano.

2. OBJETIVOS

O escopo deste projeto encontra-se na caracterização mineralógica dessas duas ocorrências de FF's. A partir da integração dos resultados obtidos, busca-se realizar uma análise comparativa entre elas e integração desses resultados com análises de mineralogia magnética, realizados previamente no Observatório Nacional.

3. METODOLOGIA

Três amostras previamente coletadas foram analisadas: duas amostras de Carajás (CFF, rocha fresca, e CFF-A, alterada por processos intempéricos) e uma amostra de Urucum (UFF). As rochas foram primeiro fragmentadas com o auxílio de um martelo e depois pulverizadas no moinho planetário com jarro e esferas de carbeto de tungstênio por cerca de 5 minutos a 300 rpm, para garantir uma amostra homogênea com grãos menores que $16\mu\text{m}$. Para reduzir uma fração ao tamanho máximo de $10\mu\text{m}$ foi realizado mais um processo de moagem, dessa vez, usando o moinho de ágata McCrone. Por 10 minutos, cerca de 4g da amostra foram colocadas no moinho com 12ml de água deionizada, resultando em uma mistura que foi despejada em uma placa de Petri de teflon e seca em uma estufa a 60°C (Porphírio; Barbosa; Bertolino, 2010). Após a evaporação de toda a fase líquida, a amostra foi acomodada e prensada em um porta-amostras de aço inox, formando uma pastilha para análise por Difração de Raios-X (DRX; Neumann, Schneider, Alcover Neto, 2010). Vale ressaltar que os preparos e as análises foram realizadas no no Setor de Caracterização Tecnológica (SCT) do Centro de Tecnologia Mineral (CETEM/MCTI).

A análise por DRX foi realizada em equipamento Bruker-AXS D4 Endeavor, radiação de cobalto $K\alpha$ e a interpretação qualitativa foi realizada por comparação com padrões contidos no banco de dados PDF 2 em software Bruker-AXS Diffraction EVA. Também foram realizadas análises quantitativas pelo método de Rietveld (Neumann, Schneider, Alcover Neto, 2010), em software Bruker-AXS Diffraction Topas v.6.

As amostras também foram preparadas para seção polida, em que as amostras de rocha foram cortadas usando uma serra diamantada para obter uma face plana. Essa foi embutida em resina epóxi, esse conjunto foi desbastado em disco diamantado metálico com cristais de diamante de $6\mu\text{m}$ de diâmetro e polido com panos de polimento e suspensão de diamante de 3 e $1\mu\text{m}$.

As seções polidas foram mapeadas por micro-fluorescência de raios-X (μ -FRX) utilizando-se um equipamento Bruker M4 Tornado plus. Este método se destaca pela capacidade de realizar o mapeamento geoquímico qualitativo ou quantitativo em 2D da superfície de amostras com alta resolução espacial ($<20 \mu\text{m}^2$) e de forma não-destrutiva (Barker et al., 2021). As seções polidas também foram analisadas por microscópio eletrônico de varredura (MEV) FEI Quanta 400 com Espectrômetro de Dispersão de Energia (EDS) Bruker Nano Quantax 800 acoplado.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As respostas das análises químicas de FRX seguiram conforme previsto para FF's: altas concentrações de Fe e Si. O mapeamento geoquímico feito por μ -FRX mostrou que CFF é formada pela intercalação de lâminas desses dois elementos (Figura 1B), padrão também observado milimetricamente por MEV-EDS (Figura 1C). Além de Si, UFF conta com a presença de Ca, Mn e Al em finas camadas intercaladas com bandas espessas de Fe (Figura 1F). Milimetricamente, os elementos não se distribuem em limites bem definidos, com Si e C dispersos na parte rica em Fe, além de sutis camadas de Fe em meio a faixa de Si e C (Figura 1G).

Em escala micrométrica, o contraste entre os tons de cinza de CFF mostrou que as partículas claras têm hábito cristalino e estão dispersas na matriz escura (Figura 1D). Já a UFF possui dois grandes domínios contrastantes sem uma variedade tonal na escala de cinza capaz de possibilitar a caracterização morfológica (Figura 1H).

Seguindo nessa escala, a química pontual por EDS da fase clara de CFF possui média de 75,09% de Fe e 1,07% de Si. Já a fase escura tem em média 10,82% de Fe e 46,97% de Si. UFF, revelou 0,17% de Mg, 0,45% de Al, 46,11% de Si, 0,11% de Ca, 1,27% de Ti e 9,26% de Fe para a porção escura e 0,96% de Al, 0,29% de Si, 0,27% de Mn e 75,95% de Fe para a porção clara.

Uma vez investigados os aspectos químicos e morfológicos, procedeu-se a investigação mineralógica por DRX e quantificação de Rietveld. Em ambas amostras de CFF foi identificada a presença de quartzo, hematita e magnetita, com adição de goethita em CFF-A, que possui frações de 0,35% de quartzo, 56,82% de hematita, 2,71% de magnetita e 40,12% de goethita (muito provavelmente relacionada à alterações intempéricas; Figura 2). Já a UFF demonstrou uma alta presença de hematita, com 84,29%, seguida por 14,09% de quartzo e 1,62% de magnetita (Figura 3).

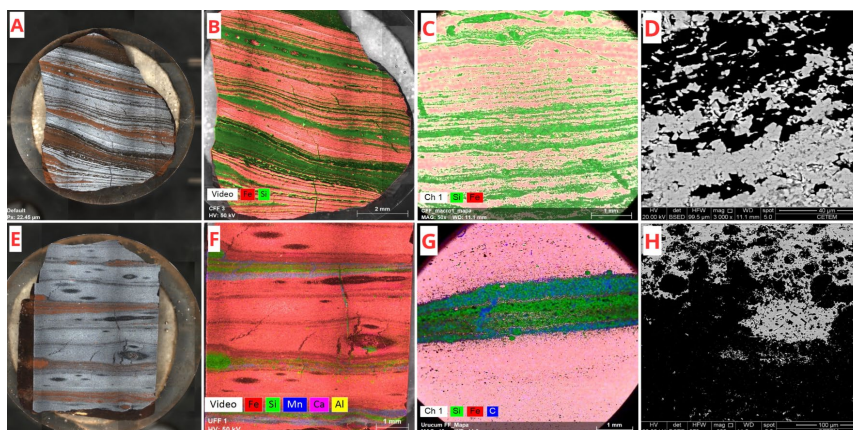


Figura 1: Análises de μ -FRX e MEV-EDS de uma seção polida das amostras CFF e UFF.

A e E) Mosaicos microscópico evidenciando o bandamento típico de FFs bandadas.

B e F) Mapeamento geoquímico qualitativo de μ -FRX ilustrando a alternância entre

Fe (em vermelho) e Si (em verde). C e G) Mapeamento geoquímico feito em escala milimétrica com EDS acoplado ao MEV ilustrando a alternância entre Fe e Si, com algumas ocorrências de C em UFF. D e H) Microanálises em MEV usadas como base para a análise de química pontual por EDS.

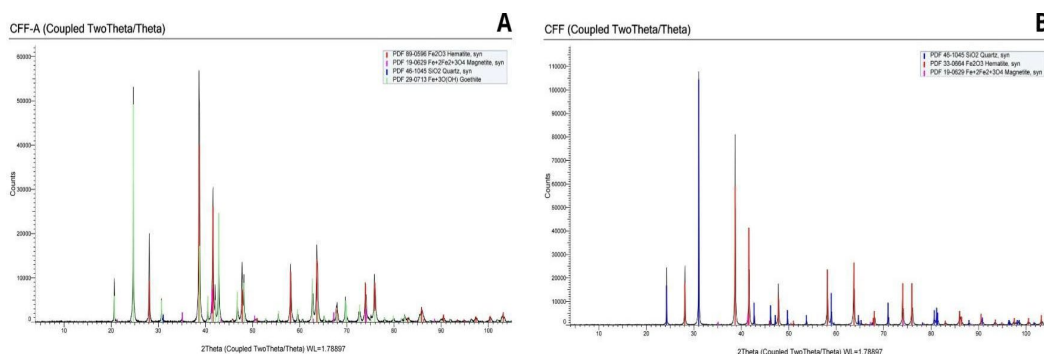


Figura 2: Difratoograma de raios X das amostras de Carajás. A) CFF-A. B) CFF.

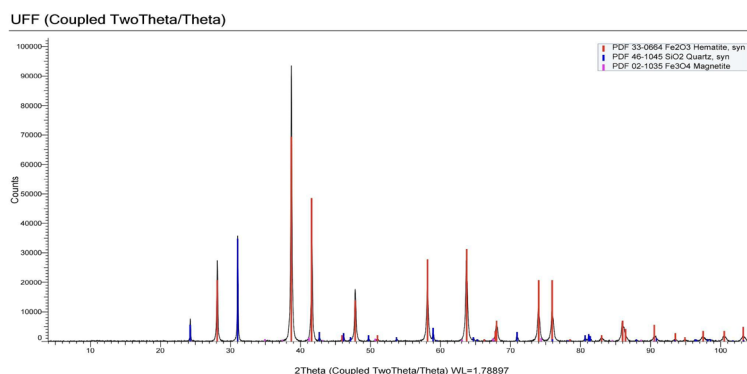


Figura 3: Difratoograma de raios X da amostra UFF.

5. CONCLUSÕES

A partir da aquisição, análise e caracterização dos aspectos químicos e mineralógicos, é possível integrar informações para investigar os contrastes e as semelhanças entre CFF/CFF-A e UFF. As análises químicas mostraram que a principal diferença entre as camadas de cada rocha vem da concentração de seus principais constituintes, Fe e Si. UFF, porém, apresenta maior variedade química, incluindo frações de Ca, Mn e Mg. A caracterização e a quantificação mineralógica revelaram a predominância de hematita e frações menores de magnetita e quartzo em ambas as amostras. No entanto, CFF-A também exibiu uma grande concentração de goethita, mineral que não foi detectado por DRX na UFF.

De forma complementar, foram realizadas análises de mineralogia magnética no Laboratório de Paleomagnetismo, Cicloestratigrafia e Mineralogia Magnética do Observatório Nacional (ON/MCTI). As amostras diferem-se por susceptibilidade magnética em ordens de grandeza, onde CFF exibe maiores valores, corroborado pela presença em maior porcentagem de magnetita, nos resultados de DRX. As curvas termomagnéticas de baixa temperatura evidenciaram para ambas amostras as transições de Morin ($\sim 10^\circ\text{C}$) e Verwey ($\sim 150^\circ\text{C}$), confirmando a presença de hematita e magnetita, respectivamente. Por fim, as curvas de magnetização remanente isotérmica (IRM) indicaram ainda uma fase de alta coercividade, responsável pela não saturação das amostras em um campo magnético aplicado com máximo 1,8 T, atribuída à altíssima coercividade da goethita.

Mesmo sendo classificadas como o mesmo tipo de rocha, CFF/CFF-A e UFF podem ser diferenciadas do ponto de vista químico, mineralógico e magnético. As diferenças químicas podem ser explicadas pelos diferentes paleoambientes dado o intervalo de formação existente entre as amostras. As aquisições mineralógicas revelaram similaridades composicionais com flutuações nos índices de concentração. Já as análises magnéticas permitiram caracterizar a assembleia mineral magnética e identificar a goethita que, pela sua provável falta de cristalinidade, não pôde ser identificada por análises por DRX.

6. AGRADECIMENTOS

Agradeço a Dra. Gabriella Fazio pelo tempo dedicado, conhecimento compartilhado, constante incentivo e, principalmente, por acreditar no meu potencial e me conceder uma oportunidade inédita em minha vida. Expresso minha eterna gratidão aos meus pais por tudo o que fizeram para que eu pudesse ter oportunidades como essa. Agradeço também, ao Dr. Plínio Jaqueto pelo apoio técnico, ao ON e ao CETEM pela disponibilização dos laboratórios, ao CNPq pela bolsa, a professora Evanizis Dias Frizzera Castilho e a todos que ajudaram de alguma forma para a elaboração deste trabalho.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BARKER, R.D.; BARKER, S.L.L.; Wilson, S.A.; SROCK, E.D. Quantitative Mineral Mapping of Drill Core Surfaces I: a Method for mu XRF Mineral Calculation and Mapping of Hydrothermally Altered, Fine-Grained Sedimentary Rocks from a CarlinType Gold Deposit. *Economic Geology*, v.116 (4), p.803–819, 2021.

BEKKER, A.; KOVALICK, A. Ironstones, Iron Formations, and Iron Ore. In: ELIAS, S. A.; ALDERTON, D. (Ed.). *Encyclopedia of Geology*. 2. ed. Academic Press, 2020. v. 3, p.914-921.

BIRKS, L. S. X-ray spectrometry: historical perspective and projections for the future. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*. v.40 (9), p.1161-1166, 1985.

DUNLOP, D. J.; ÖZDEMİR, Ö. *Rock Magnetism: Fundamentals and frontiers*. 1.ed. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1997. 595p.

EVANS, M. E.; HELLER, F.. *Environmental Magnetism: Principles and Applications of Enviromagnetics*. 1.ed. New York, NY, USA: Academic Press, 2003. 299p.

KASTING, J.F. What caused the rise of atmospheric O₂?. *Chemical Geology*, v.362, p.13-25, 2013.

KLEIN, C. Some Precambrian Banded Iron-Formations (BIFs) from around the World: Their Age, Geologic Setting, Mineralogy, Metamorphism, Geochemistry and Origin. *American Mineralogist*, v.90, p.1473-1499, 2005.

KONHAUSER, K. O.; PLANAVSKY, N. J.; HARDISTY, D. S.; ROBBINS, L. J.; WARCHOLA, T. J.; HAUGAARD, R.; LALONDR, S. V.; PARTIN, C. A.; OONK, P. B. H.; TSIKOS, H.; LYONS, T. W.; BEKKER, A.; JOHNSON, C. M. Iron formations: A global record of Neoproterozoic to Palaeoproterozoic environmental history. *Earth-Science Reviews*, v.172, p.140-177, 2017.

NEUMANN, R.; SCHNEIDER, C.L.; ALCOVER-NETO, A. Caracterização Tecnológica de Minérios. In: LUZ, A.B. et al. (Eds). *Tratamento de Minérios*. 5 ed. Rio de Janeiro, RJ, Brasil: Centro de Tecnologia Mineral, 2010, p.85-139.

PORPHÍRIO, N. H.; BARBOSA, M. I. M.; BERTOLINO, L. C. Caracterização Tecnológica de Minérios. In: LUZ, A.B. et al. (Eds). *Tratamento de Minérios*. 5 ed. Rio de Janeiro, RJ, Brasil: Centro de Tecnologia Mineral, 2010, p.57-84.

YE, H.; WU, C.Z.; LI, W.; LEI, R.X.; SUN, X.; HAO, W.; KONHAUSER, K.O. Deposition and termination of Neoproterozoic iron formations (NIFs): New insights from NIFs in China. *Earth-Science Reviews*, v.256, p.1-22, 2024.