

# INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL APLICADA À CARACTERIZAÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO

## ARTIFICIAL INTELLIGENCE APPLIED TO IRON ORE CHARACTERIZATION

**Samuel Andrade Pinto**

Aluno de Graduação de Engenharia Metalúrgica, 8º período  
Universidade Federal do Rio de Janeiro  
Dezembro de 2023 a julho de 2024  
samuelandrdep@poli.ufrj.br

**Otávio da Fonseca Martins Gomes**

Orientador, Eng. Químico, D.Sc.  
ogomes@cetem.gov.br

### RESUMO

O estudo desenvolveu um sistema automático para caracterização de minério de ferro, utilizando técnicas de inteligência artificial, principalmente aprendizagem de máquina e aprendizagem profunda. O sistema foi treinado com imagens de microscopia ótica de seções polidas do minério e alcançou exatidão global superior a 95% no reconhecimento das fases (hematita, magnetita, quartzo e outros minerais de ganga). O método proposto demonstra ser uma ferramenta promissora para avaliação rápida do minério de ferro, com potencial para otimizar o controle de qualidade e a eficiência das operações de beneficiamento na indústria mineral.

**Palavras chave:** minério de ferro; caracterização; análise de imagens; inteligência artificial; microscopia.

### ABSTRACT

The study developed an automatic system to characterize iron ore using artificial intelligence techniques, primarily machine learning and deep learning. The system was trained with optical microscopy images of polished sections of the ore and achieved an overall accuracy of over 95% in recognizing phases (hematite, magnetite, quartz, and other gangue minerals). The proposed method proves to be a promising tool for the rapid assessment of the iron ore composition, with the potential to optimize quality control and the efficiency of beneficiation operations in the mineral industry.

**Keywords:** iron ore, characterization; image analysis; artificial intelligence; microscopy.

## 1. INTRODUÇÃO

A caracterização microestrutural do minério de ferro contribui para o projeto, controle e otimização das operações de processamento mineral e de seu comportamento nos processos subsequentes de redução. O microscópio ótico de luz refletida é tradicionalmente usado na caracterização de minérios de ferro e seus aglomerados. De fato, a microscopia ótica de luz refletida e a análise digital de imagens são ferramentas bastante úteis para a caracterização destes materiais, particularmente na determinação de sua mineralogia e textura (GOMES et al., 2013; IGLESIAS et al., 2018).

## 2. OBJETIVOS

O presente projeto visa o desenvolvimento de modelos de aprendizado de máquina para caracterização de minério de ferro, envolvendo especificamente:

- a) Construção de bases de imagens óticas anotadas de minérios de ferro.
- b) Treinamento de modelos de aprendizagem de máquina e aprendizagem profunda para a segmentação de fases minerais em imagens de minérios de ferro.
- c) Validação dos modelos treinados.

## 3. METODOLOGIA

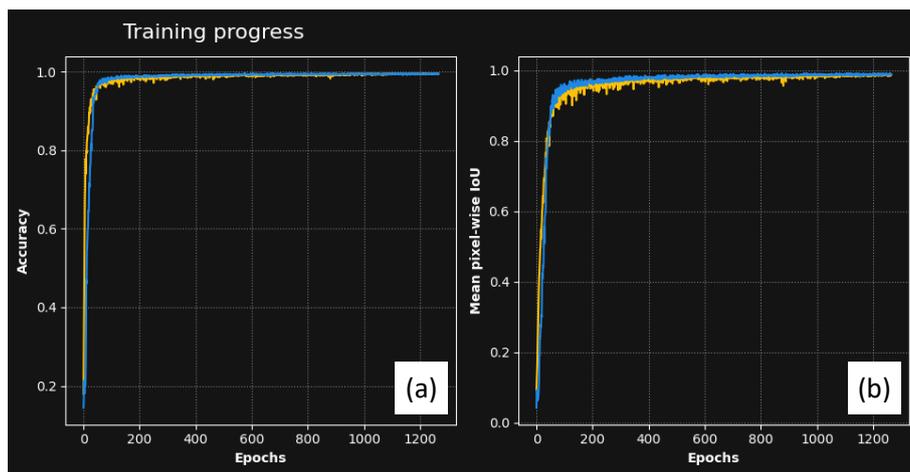
O presente trabalho foi realizado em quatro etapas:

- a) Estabelecimento de protocolo de preparação de seções polidas de minérios de ferro.
- b) Aquisição automática de imagens em microscópio ótico de luz refletida.
- c) Construção de bases de imagens anotadas de fases minerais em minérios de ferro.
- d) Desenvolvimento de modelos de aprendizagem profunda para o reconhecimento e segmentação semântica (técnica de *Deep Learning* que atribui rótulos semânticos a cada pixel de uma imagem) de fases em imagens óticas de minério de ferro utilizando o sistema arivis Cloud (Carl Zeiss Microscopy GmbH., 2023).

O minério de ferro utilizado veio de uma amostra da jazida Serrote do Breu. A mineralogia desse minério de ferro, conforme descrita por Neumann et al. (2014), compreende quartzo, magnetita, hematita, anfibólio (hastingsita), albita, biotita, calcita, goethita e caulinita, com menor clorita. A magnetita é o principal mineral de ferro, seguida pela hematita e por rara goethita. Uma seção polida de 30 mm de diâmetro da fração +212-300 µm foi empregada para a construção da base de dados.

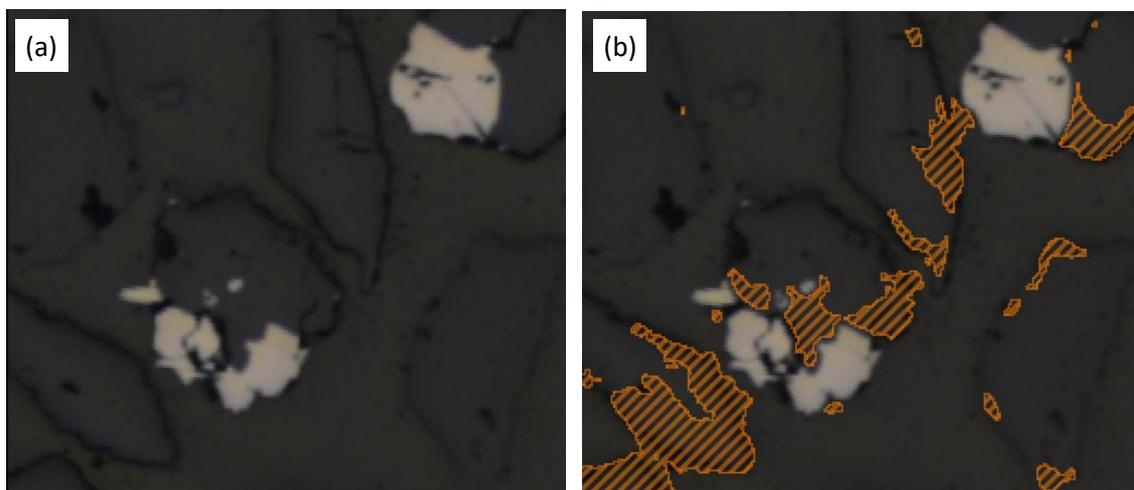
## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O modelo de Inteligência Artificial treinado para a segmentação semântica de fases em imagens óticas de minério de ferro obteve exatidão global superior a 95% no reconhecimento das fases (hematita, magnetita, quartzo e outros minerais de ganga), conforme mostrado na Figura 1. A Figura 1 apresenta a evolução da exatidão (*accuracy*) e do IoU médio, métricas utilizadas para avaliar os modelos treinados, durante as épocas do treinamento. Esse resultado destaca o potencial da técnica para auxiliar na avaliação rápida e precisa da composição mineralógica de amostras de minério de ferro.



**Figura 1:** Métricas de avaliação do modelo: (a) evolução da exatidão (*accuracy*) e (b) do IoU médio durante as épocas do treinamento.

A criação de classes separadas para o quartzo e outros minerais de ganga durante as anotações das imagens é uma estratégia que se justifica pela similaridade entre o quartzo e o fundo da imagem (resina de embutimento), que poderia levar a erros de classificação como mostrado na Figura 2. Ao separar esses minerais em classes distintas, o modelo pôde aprender as características específicas de cada material, aprimorando sua capacidade de distinção entre eles. Nesse contexto, vale ressaltar que a dificuldade em separar o fundo de minerais transparentes é um problema clássico na análise de imagens de minérios que já foi estudado de forma mais aprofundada em trabalhos anteriores (NEUMANN & STANLEY, 2008; GOMES & PACIORNIK, 2012).



**Figura 2:** Detalhe de uma imagem (a) em que alguns grãos de quartzo não são totalmente identificados (b) pelo modelo devido à sua semelhança com o fundo (resina de embutimento).

É importante ressaltar que este estudo se baseou em um conjunto de dados específico de imagens de minério de ferro. O desempenho do modelo em outros tipos de minérios ou com imagens de qualidade inferior pode variar. Para aprimorar a generalização do modelo, seria interessante realizar estudos com conjuntos de dados maiores e com maior variabilidade.

## 5. CONCLUSÕES

O presente trabalho apresentou o desenvolvimento de modelo de aprendizado profundo para a caracterização mineralógica de minério de ferro. O modelo foi treinado para a segmentação semântica de fases em imagens óticas de minério de ferro obteve exatidão global superior a 95% no reconhecimento das fases hematita, magnetita, quartzo e outros minerais de ganga. Esse

resultado demonstra o potencial da técnica para auxiliar na avaliação rápida e precisa da composição mineralógica de amostras de minério de ferro. Futuramente, essa ferramenta poderia ser integrada aos processos industriais, otimizando o controle de qualidade e a eficiência das operações de beneficiamento.

Entretanto, vale destacar que o desempenho do modelo pode variar ao ser aplicado a diferentes tipos de minérios ou imagens de qualidade inferior. Estudos futuros devem focar na ampliação e diversificação dos conjuntos de dados utilizados para o treinamento dos modelos, a fim de aprimorar sua capacidade de generalização e aplicação em um contexto mais amplo.

## **6. AGRADECIMENTOS**

Agradeço ao CNPq pela bolsa de iniciação tecnológica e à equipe do Laboratório Multiusuário de Caracterização Tecnológica do CETEM.

## **7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

GOMES, O.D.M.; IGLESIAS, J.C.A.; PACIORNIK S.; VIEIRA, M.B. (2013). Classification of hematite types in iron ores through circularly polarized light microscopy and image analysis. *Minerals Engineering* 52: 191-197.

IGLESIAS, J.C.A.; AUGUSTO, K.S.; GOMES, O.D.M.; DOMINGUES, A.L.A.; VIEIRA, M.B.; CASAGRANDE, C.; PACIORNIK, S. (2018). Automatic characterization of iron ore by digital microscopy and image analysis. *Journal of Materials Research and Technology* 7(3): 376-380.

Carl Zeiss Microscopy GmbH. (2023). arivis Cloud [software]. [www.apeer.com](http://www.apeer.com).

NEUMANN, R.; GOMES, O.D.M.; GALLART, R. (2014). Predicting iron ore products from core samples: integration of extended fields image analysis, automated mineralogy, and XRD/Rietveld method. In: *Process Mineralogy '14, 2014, Cape Town. Proceedings...* Falmouth: Minerals Engineering International, 2014. p. 1-17.

NEUMANN, R.; STANLEY, C.J. (2008). Specular reflectance data for quartz and some epoxy resins: implications for digital image analysis based on reflected light optical microscopy. In: *International Congress for Applied Mineralogy, 9, 2008, Brisbane. Proceedings...* Carlton: The Australasian Institute of Mining and Metallurgy, 2008, p. 703-706.

GOMES, O.D.M.; PACIORNIK S. Multimodal Microscopy for Ore Characterization. In: KAZMIRUK, V. (Ed). *Scanning Electron Microscopy*. London (UK): IntechOpen Ltd., 2012, p.313-335.