

VALIDAÇÃO DE UMA METODOLOGIA INTEGRADA E DE BAIXO CUSTO PARA A AVALIAÇÃO DA APLICABILIDADE DE PRÉ-CONCENTRAÇÃO: UM ESTUDO DE CASO PARA MINÉRIO DE CROMO

METHODOLOGY FOR ASSESSING THE APPLICABILITY OF PRE-CONCENTRATION USING SMALL SAMPLE MASSES: A CASE STUDY FOR CHROMIUM ORE

Helena Freitas Norkus

Aluna de Graduação do 7º período Química Industrial
Universidade Federal do Rio de Janeiro
Período PIBIC ou PIBITI/CETEM: agosto de 2025
helenanorkus@eq.ufrj.br

Júlia Guimarães Sanches

Orientadora, Engenharia Mineral, M.Sc.
jsanches@cetem.gov.br

Maurício Guimarães Bergerman

Coorientador, Engenharia Mineral, D.Sc.
mbergerman@usp.br

RESUMO

A diminuição dos teores e a maior complexidade dos minérios têm levado à necessidade de circuitos de beneficiamento mais elaborados, resultando no aumento dos custos de implementação e operação. Uma das alternativas para redução desses custos é a pré-concentração, que busca eliminar material com pouco ou nenhum mineral de minério antes da moagem. Porém, não há uma metodologia capaz de avaliar a aplicação da pré-concentração utilizando pouca massa nos ensaios, de modo a ser aplicada em etapas iniciais de projetos e para pequenas mineradoras. Este trabalho visa caracterizar um minério de cromo apenas com técnicas não destrutivas, de modo a observar a viabilidade do uso de pré-concentração. Foram analisadas 100 partículas individualmente em duas amostras de alimentação de diferentes pontos do circuito industrial, uma de teor mais elevado e outra de teor mais baixo, avaliando massa específica, suscetibilidade magnética, mapeamento elementar por microfluorescência de raios X (μ FRX) e teor por fluorescência de raios X portátil (p-FRX). Nenhum parâmetro isolado foi suficiente para classificar as partículas, sendo necessária a avaliação conjunta e sequencial das técnicas realizadas. Essa abordagem resultou em 49 partículas classificadas como minério e 51 como estéril na amostra de maior teor, e 11 como minério e 89 como estéril na amostra de menor teor, mostrando o potencial da metodologia para a avaliação de pré-concentração.

Palavras chave: Pré-concentração; minério de cromo; técnicas não destrutivas.

ABSTRACT

The decline in ore grades and the increasing complexity of orebodies have led to the need for more elaborate beneficiation circuits, resulting in higher implementation and operational costs. One alternative for reducing these costs is pre-concentration, which seeks to eliminate material with little or no ore mineral content prior to grinding. However, there is no methodology capable of assessing the applicability of pre-concentration using small sample masses, so that it can be applied in early project stages and by small mining companies. This work aims to characterize a chromium ore using only non-destructive techniques, in order to assess the feasibility of applying pre-concentration. 100 particles were individually analyzed in two feed samples from different points of the industrial circuit, one of higher grade and one of lower grade, evaluating specific gravity, magnetic susceptibility, elemental mapping by X-ray

microfluorescence (μ XRF), and grade by portable X-ray fluorescence (p-XRF). No single parameter was sufficient to classify the particles, requiring a joint and sequential evaluation of the techniques performed. This approach resulted in 49 particles classified as ore and 51 as waste in the higher-grade sample, and 11 as ore and 89 as waste in the lower-grade sample, demonstrating the potential of the methodology for pre-concentration assessment.

Keywords: Pre-concentration; chromium ore; non-destructive techniques.

1. INTRODUÇÃO

Com o passar dos anos e o aumento populacional, houve um aumento do consumo de bens minerais. Esse fato somado à queda dos teores dos minérios, resultou no uso de materiais de processamento cada vez mais complexo com, por exemplo, liberação mais fina (NORGATE; HAQUE, 2013; BEARMAN, 2013), tornando o beneficiamento mais custoso.

A pré-concentração surge como uma opção de viabilização de novos projetos ou prolongamento da vida útil de operações existentes. Trata-se da inserção de uma separação antes da moagem, de modo a rejeitar a parcela do material com nenhum ou quase nenhum teor do mineral de interesse, ainda em granulometria grossa. Diversas técnicas podem ser empregadas, como peneiramento, separação magnética ou densitária e sensores *ore sorters* (SANCHES; BERGERMAN, 2024).

A transição energética destacou os minerais críticos e estratégicos: substâncias de alta relevância econômica e tecnológica, cuja oferta é considerada vulnerável quanto ao fornecimento (IBRAM, 2025). No Brasil, o cromo é um mineral estratégico (ANM, 2025), e a FERBASA é a única produtora de ferroligas de cromo. Ela utiliza pré-concentração em sua operação industrial (SAMPAIO; LUZ; LINS, 2001; SARUBBI et al., 2024), tornando-se um relevante estudo de caso.

O uso da pré-concentração, contudo, demanda estudos técnicos e econômicos detalhados, que tradicionalmente requerem altos volumes de amostra e de investimentos (DUNCAN; DEGLON, 2022; NORTHERN MINER, 2022). Isso, muitas vezes, torna inviável sua avaliação em estágios iniciais de projeto. Diante disso, metodologias simplificadas, baseadas em técnicas não destrutivas de análise química, têm sido investigadas como forma de contornar essa limitação, permitindo o uso das mesmas partículas em múltiplos ensaios (SANCHES et al., 2025).

2. OBJETIVOS

O objetivo deste projeto de pesquisa foi validar uma metodologia simplificada e de baixo custo com o propósito de avaliar a aplicabilidade de operações de pré-concentração. Para tal, foi realizado um estudo de caso com um minério de cromita.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

O material de estudo é um minério de cromo do Complexo de Jacurici, tendo a cromita como mineral de interesse e silicatos e óxidos de ferro como ganga. As amostras foram coletadas na alimentação, concentrado e rejeito em duas etapas do circuito: RX03 e RX05/06. Foram seis pontos amostrados. As amostras da alimentação foram britadas de maneira estagiada em circuito fechado na faixa granulométrica de 22,4+19,1 mm e 100 partículas foram selecionadas por pilha alongada, lavadas com água deionizada, secas a 100°C e numeradas sequencialmente.

Como referência, uma alíquota de cada amostra foi pulverizada ($<75\ \mu\text{m}$) e analisada por FRX em equipamento PANalytical Axios Max (pastilhas fundidas). A mineralogia foi avaliada por DRX pelo método do pó (Bruker D4 Endeavor, radiação Co K α , 35 kV/40 mA, goniômetro de 5° a 80° 2 θ , passo de 0,02° e 1 s/passos), utilizando o software Bruker AXS DiffraC.Plus com a base PDF02 (ICDD, 2006).

A massa e massa específica foram medidas em triplicata em balança Shimadzu AY220 com kit hidrostático.

Para as 100 partículas de cada amostra foi realizada a fluorescência de raios X portátil (p-FRX) com espectrômetro Bruker Tracer 5i (ânodo de Rh, spot de 8 mm), operando no modo GeoMining OxideConcentrations (6–50 kV; 4,5–200 μ A). Quatro medidas foram realizadas em pontos distintos de cada partícula, sendo o teor final determinado pela média aritmética das leituras.

A suscetibilidade magnética das partículas foi medida com um Kappameter portátil (modelo KT-9, Exploranium G.S. Limited), equipado com um oscilador LC de 10 kHz e sensibilidade de leitura de 1×10^{-5} unidades SI (Exploranium G.S. Limited, 1997). Como o equipamento fornece a leitura em suscetibilidade volumétrica (valor adimensional), foi necessário convertê-la em suscetibilidade magnética específica (χ específica) para possibilitar a comparação com a mineralogia das partículas. Para isso, o valor lido foi multiplicado por um fator de 1000 e por 4π , ajustando-o à ordem de grandeza (10^{-6}) e ao sistema de unidades usados na literatura (PARFENOFF et al., 1970), e em seguida dividido pela massa específica de cada partícula, obtendo assim o valor normalizado por massa.

O mapeamento elementar superficial foi executado em espectrômetro de microfluorescência de raios X (μ FRX) M4 Tornado Plus – Bruker (50 kV, 600 μ A, 10 ms/pixel, pixel de 200 μ m), em grupos de 33–34 partículas fixadas com massa adesiva de polibutileno. Os mapas elementares de cromo gerados pelo μ FRX foram processados no ImageJ: cada partícula foi delimitada com a ferramenta Freehand (ROI manager) e, sobre o mapa de Cr, foi usada a função Color Threshold (Hue 0–20, Saturation 100–255, Brightness 50–255) para segmentar seletivamente o a cor referente ao cromo. A área foi quantificada e convertida em teor químico pelo fator estequiométrico da cromita.

A análise dos dados foi realizada com o auxílio de programação a partir de linguagem Python por meio do software Jupyter Notebook, para a geração de gráficos de correlações e outras ferramentas estatísticas dos resultados.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 1 apresenta os teores médios de Cr nas três técnicas utilizadas - FRX Clássico, Microfluorescência da raios X/ImageJ e FRX Portátil.

Tabela: Informações de teores das técnicas utilizadas.

	RX03			RX05/06		
	μ FRX	p-FRX	FRX	μ FRX	p-FRX	FRX
Teor mínimo (%)	0,00	0,02	-	0,00	0,00	-
Teor máximo (%)	45,80	23,42	-	45,43	20,73	-
Teor médio calculado (%)	21,26	9,01	-	4,57	1,94	-
Teor analisado (%)	-	-	12,11	-	-	4,04

Como mostra a Tabela 1, a μ FRX superestima os teores em relação à p-FRX, tanto no valor médio quanto no máximo. Para quantificar o Cr a partir das imagens do ImageJ, os percentuais de cromita foram convertidos por estequiometria (fator 0,46459). Em ambas as amostras, a razão entre o teor médio de Cr obtido por μ FRX e por p-FRX foi de 2,36, sugerindo uma relação proporcional constante entre os dois métodos.

Para avaliar a relação entre o teor de Cr no p-FRX e as demais variáveis não destrutivas, foram construídos os gráficos de dispersão da: Figura 1: suscetibilidade magnética específica, Figura 2: massa específica e Figura 3: teor de Cr por μ FRX/ImageJ.

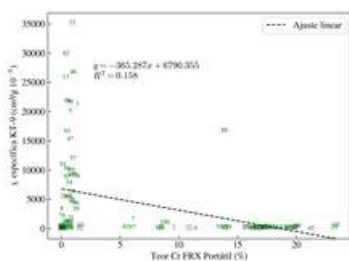


Figura 1: Gráfico de dispersão suscetibilidade magnética e teor de Cr determinado por FRX portátil na amostra RX03.

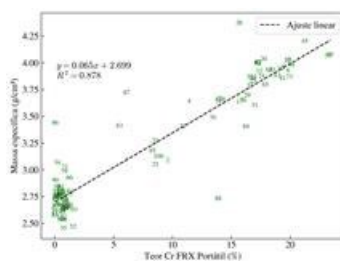


Figura 2: Gráfico de dispersão massa específica e teor de Cr determinado por FRX portátil na amostra RX03.

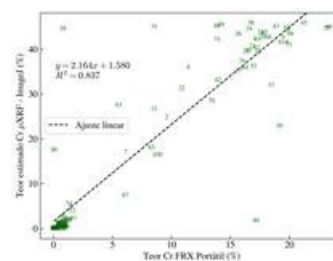


Figura 3: Gráfico de dispersão pFRX x μFRX para amostra RX03.

A classificação das partículas em minério e estéril foi construída a partir da avaliação conjunta e sequencial de três critérios: suscetibilidade magnética, massa específica e teor de Cr (p-FRX e μFRX).

Como primeiro critério, avaliou-se a suscetibilidade magnética, que apresentou correlação baixa com o teor de Cr ($R^2 = 0,158$) (Figura 1), provavelmente pela presença de magnetita, mineral que compõe a ganga e possui resposta magnética muito maior que a da cromita. A cromita apresenta suscetibilidade magnética média de $100 \text{ cm}^3/\text{g } 10^{-6}$, enquanto a magnetita varia entre $20.000 \text{ cm}^3/\text{g } 10^{-6}$ e $80.000 \text{ cm}^3/\text{g } 10^{-6}$. Observou-se no gráfico uma faixa específica onde partículas com alta suscetibilidade magnética também apresentaram baixa massa específica e menor teor de Cr, indicando a presença de magnetita associada à ganga. Com base nesse padrão, adotou-se um corte em $7.500 \text{ cm}^3/\text{g } 10^{-6}$ na suscetibilidade magnética: valores acima desse limite foram considerados estéril.

Como segundo critério, aplicou-se a massa específica sobre as partículas classificadas como minério pela suscetibilidade: aquelas com massa específica abaixo de 3 g/cm^3 foram consideradas estéril. Esse critério é consistente com a diferença de densidade entre a cromita ($\sim 4,8 \text{ g/cm}^3$) (WEBMINERAL, 2026) e os principais minerais de ganga da amostra, como quartzo e serpentina ($\sim 2,6\text{--}2,7 \text{ g/cm}^3$): partículas mais densas tendem a apresentar maior teor de Cr, o que se confirma na correlação entre massa específica e teor de Cr por p-FRX (Figura 2), de $R^2 = 0,878$ na RX03 e $R = 0,761$ na RX05/06.

Por fim, como terceiro critério, o teor de Cr foi avaliado por p-FRX e μFRX, técnicas que apresentaram boa correlação entre si (Figura 3): $R^2 = 0,837$ na RX03 e $R^2 = 0,875$ na RX05/06), consistente com a razão proporcional identificada na Tabela 1. A partir do mapeamento superficial de Cr por μFRX, em conjunto com o teor de p-FRX, aplicou-se o critério de classificação por teor ($< 3\%$ estéril; $3\text{--}7\%$ intermediário; $> 7\%$ minério reprocessável): partículas com detecção de Cr na superfície mapeada e teor de p-FRX de acordo com o critério adotado foram consideradas minério.

Essa análise conjunta resultou em 49 partículas classificadas como minério e 51 como estéril na RX03, e 11 como minério e 89 como estéril na RX05/06, amostra de teor consideravelmente mais baixo. Na RX03, foi rejeitada uma massa de 42,5%, elevando o teor do concentrado de 9,01% para 15,07% de Cr, com recuperação metalúrgica de 96,16%. Já na RX05/06, foi rejeitada uma massa ainda maior, de 87,1%, e mesmo com uma recuperação metalúrgica mais baixa (68,78%), explicada pelo teor de alimentação já ser baixo, o teor do concentrado subiu de 1,94% para 10,33% de Cr.

Os resultados indicam que as técnicas não destrutivas avaliadas apresentam potencial para serem utilizadas de forma complementar ou substituível entre si na etapa de avaliação de pré-concentração, permitindo a escolha do método mais acessível ou mais adequado às condições do material estudado.

5. CONCLUSÕES

Os resultados apresentaram boa identificação das propriedades intrínsecas das partículas por meio de técnicas não destrutivas. Observou-se, porém, que nenhum parâmetro isolado foi suficiente para classificar as partículas em minério e estéril, sendo necessária uma avaliação conjunta das técnicas. Essa abordagem combinada resultou em 49 partículas classificadas como minério e 51 como estéril na RX03, e 11 como minério e 89 como estéril na RX05/06, com recuperação metalúrgica de 96,2% e 68,8%, respectivamente, reforçando o potencial da metodologia.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer à FERBASA pela doação das amostras utilizadas na pesquisa, ao SCT/COAMI e ao CORON do CETEM pela parceria e pelo fornecimento dos equipamentos necessários para os ensaios experimentais. Os autores também agradecem aos pesquisadores Dr. Carlos Oba e Prof. Dr. Weslei Ambrós pelo apoio acadêmico durante o desenvolvimento deste estudo. Os autores agradecem à CAPES pela bolsa de doutorado (Processo nº 88887.842560/2023-00) e ao CNPq pela bolsa PIBIC (Processo nº 185899/2025-0). Este trabalho também foi apoiado pelo CNPq por meio de bolsa DT (nº 313411/2019) e bolsa de pós-doutorado (nº 200298/2022-4), bem como pela FAPESP por meio de bolsa BPE (nº 2021/11923-9).

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO (ANM). *Anuário Mineral Brasileiro: principais substâncias metálicas*. Brasília, DF: ANM, 2025. 55p.

BEARMAN, R.A. Step change in the context of comminution. *Minerals Engineering*, v.43-44, p.2-11, 2013. DOI: 10.1016/j.mineng.2012.06.010.

DUNCAN, M.; DEGLON, D. A methodology to determine the potential for particulate ore sorting based on intrinsic particle properties. *Minerals*, v.12, n.5, art.630, 2022. DOI: 10.3390/min12050630.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO (IBRAM). *Minerais críticos e estratégicos no Brasil: um passaporte para o futuro*. Brasília, DF: IBRAM, 2025. 268p.

MURTHY, Y.R.; TRIPATHY, S.K.; KUMAR, C.R. Chrome ore beneficiation challenges & opportunities – A review. *Minerals Engineering*, v.24, p.375-380, 2011.

NORGATE, T.; HAQUE, N. The greenhouse gas impact of IPCC and ore-sorting technologies. *Minerals Engineering*, v.42, p.13-21, 2013. DOI: 10.1016/j.mineng.2012.11.012.

NORTHERN MINER STAFF. JV Article: SRK Consulting aims to help miners unlock hidden value through pre-concentration. *The Northern Miner*, 2022. Disponível em: <https://www.northernminer.com/joint-venture-article/jv-article-srk-consulting-aims-to-help-miners-unlock-hidden-value-through-pre-concentration/1003845391/>. Acesso em: 22 jul. 2026.

SAMPAIO, J.A.; LUZ, A.B. da; LINS, F.A.F. (Eds.). *Usinas de beneficiamento de minérios do Brasil*. Rio de Janeiro, RJ, Brasil: CETEM/MCT, 2001.

SANCHES, J.G.; BERGERMAN, M.G. Pré-concentração no Brasil: uma revisão das práticas brasileiras. In: SEMINÁRIO DE MINERAÇÃO, 23., 2024, São Paulo, SP. *Anais da ABM Week 8ª edição*. São Paulo: ABM, 2024.

SANCHES, J.G.; MILAGRES, I.O.; ESTEVES, P.M.; QUEIROZ, H.A.; ULSEN, C.; BRAGA, P.F.A.; BERGERMAN, M.G. Methodology for assessing the applicability of pre-concentration using small sample masses: A case study of a Brazilian sulphide copper ore. In: INTERNATIONAL MINERAL PROCESSING CONGRESS, 30., 2026, Cape Town, South Africa. *Proceedings of the XXX International Mineral Processing Congress*. Cape Town, South Africa, 2026.

SARUBBI, A.V.M.; ESTEVES, P.M.; SENNA, C.M.; CARVALHO NETO, D.B.; SILVA, A.C.; NAPOLI, L.B. Análise comparativa entre um jig e sensor-based-sorting na concentração de cromita na mina de Ipueira. In: SEMINÁRIO DE MINERAÇÃO, 23., 2024, São Paulo, SP. *Anais da ABM Week 8ª edição*. São Paulo, SP, Brasil: Editora Blucher, 2024. p.545-558. DOI: 10.5151/2594-357X-41134.

WEBMINERAL. Chromite Mineral Data. Disponível em: <https://www.webmineral.com/data/Chromite.shtml>. Acesso em: 20 jul. 2026.