
Caracterização tecnológica de rejeitos finos gerados no beneficiamento de itabiritos compactos

Technological characterization of fine tailings from compact itabirites processing

Juscelino Mendes PradoORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9937-2899>

Universidade Federal de Ouro Preto - UFOP, Brasil

E-mail: jmpmetalurgica@gmail.com**Diego de Souza Arenare**

ArcelorMittal Mineração Brasil - AMB, Brasil

E-mail: diego.s.arenare@arcelormittal.com.br**Tamiris Fonseca de Souza**ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9319-6713>

Universidade Federal de Ouro Preto - UFOP, Brasil

E-mail: tamiris.souza@aluno.ufop.edu.br**José Aurélio Medeiros da Luz**ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7952-2439>

Universidade Federal de Ouro Preto - UFOP, Brasil

E-mail: jaurelio@ufop.edu.br

RESUMO

A busca por processos mais limpos com a redução de emissão de gases de efeito estufa já traz um grande desafio para a indústria de mineração e de produção de aço. Somado a isso, tem-se a escassez de minérios de altos teores de ferro e a necessidade de maiores recuperações metalúrgicas visando a redução do volume de rejeitos gerados. Isso tudo mostra que é cada vez mais importante o desenvolvimento de tecnologias disruptivas que consigam maximizar os processos de beneficiamento mineral. Assim, esse trabalho apresenta a caracterização física, química e mineralógica de uma amostra de rejeito de minério de ferro. Além disso, esse estudo mostra comparações entre os resultados de três processos de concentração mineral sendo eles: as novas tecnologias por concentração magnética VPHGMS (*Vertically Pulsating High-gradient Magnetic Separator*), matrizes *Bigflux*® e o tradicional processo de flotação.

Palavras-chave: Emissão de CO₂; Rejeitos; Slon®; Bigflux®; Pegada de carbono; Efeito estufa

ABSTRACT

The search for cleaner processes with the reduction of greenhouse gas emissions already poses a great challenge for mining and steel industries. Added to this, there is a shortage of ores with high iron content and the need for greater metallurgical recoveries to reduce tailings volume. This all shows the importance of the development of disruptive technologies that can maximize mineral processing. Thus, this work presents the physical, chemical, and mineralogical characterization of a sample of iron ore tailings. In addition, this study shows comparisons between the results of three mineral concentration processes: the recent technologies Vertically Pulsating High-gradient Magnetic Separator VPHGMS, Bigflux® matrices and the traditional flotation process.

Keywords: CO₂ emission; Tailings; Slon®; Bigflux®; Carbon footprint; Greenhouse effect

INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, estudos estão avançando no sentido da obtenção de equipamentos que minimizem a emissão de CO₂ durante a produção de ferro e aço. Nesse sentido, tecnologias disruptivas estão se mostrando viáveis como alternativa aos consolidados dispositivos utilizados para reações químicas de redução de minérios de ferro (KURUNOV, 2010) (Li *et al.*, 2021). Entretanto, essas tecnologias trazem também a necessidade de se produzir concentrados de minérios com altos teores de ferro (>68%) (Li *et al.*, 2021). Aliado a isso, é cada vez mais comum a lavra de minérios de baixo teor de ferro (< 25%) e com grau de liberação em frações finas (Xinran *et al.*, 2022). Nesse sentido, é esperado que ocorra uma redução considerável na recuperação mássica das plantas de beneficiamento mineral, o que, por sua vez, levará ao aumento do volume de rejeitos gerados, que é um grande problema que tem sido discutido por diversos autores (Fagundes, *et al.*, 2022) (Mendes *et al.*, 2019) (Mendes *et al.*, 2018) (Fontes *et al.*, 2019) (Silva *et al.*, 2018) (Guimarães *et al.*, 2012). Assim sendo, é de extrema importância a otimização dos processos de concentração de minérios de ferro com o objetivo de se obter a máxima recuperação mássica, com a manutenção da qualidade do produto final e com o menor teor do metal de interesse no rejeito final.

A flotação é o método de concentração mais utilizado para beneficiamento de minérios de ferro finos (Zhang *et al.*, 2021). Entretanto, esse processo tem se mostrado limitado para tratar certos tipos de minérios de ferro, principalmente minérios com partículas ultrafinas (< 5 µm) (Valadão e Araújo, 2007). Isso ocorre devido a um importante fenômeno conhecido como slime coating, com isso as partículas dos minerais maiores, são recobertas pelas partículas ultrafinas (Totou *et al.*, 2011). Isso dificulta o contato entre os reagentes e/ou bolhas de ar e os minerais, reduzindo assim a eficiência do processo de flotação.

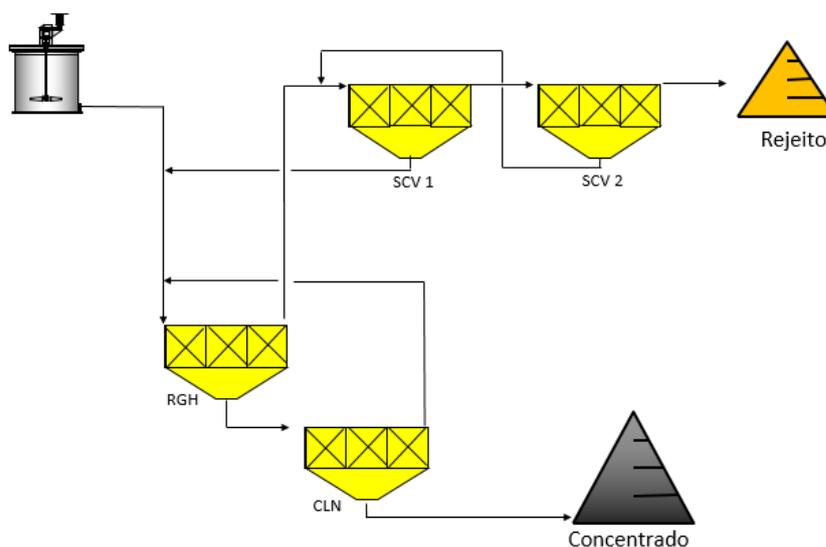
Nesse sentido, algumas técnicas têm se revelado adequadas para serem utilizadas como alternativa ou combinadas ao processo de flotação, para concentração de minérios de ferro ultrafinos. Dentre essas técnicas pode-se citar a separação magnética VPHGMS (*Vertically Pulsating High-gradient Magnetic Separator*) (Menezes *et al.*, 2022). Ademais, alguns fornecedores de equipamentos já consolidados como os concentradores WHIMS (*Wet High Intensity Magnetic Separator*), têm desenvolvido matrizes (Ribeiro,

Ribeiro e Vieira, 2022) que melhoram a performance desses dispositivos quando utilizados para concentração de minérios finos.

MATERIAIS E MÉTODOS

Primeiramente, coletou-se amostras de minérios de ferro provenientes de uma mina no Quadrilátero Ferrífero da região do complexo minerário Serra Azul. Essas amostras foram cominuidas em britadores de mandíbulas e prensa de rolos até que todo material estivesse com as partículas menores que 1 mm. Posteriormente, esse material foi pré concentrado em separação magnética e, em seguida, moído em moinho de bolas até atingir granulometria com P90 de 45 μm . Finalmente, esse material foi processado em planta piloto de flotação. O fluxograma da última etapa de concentração por meio de etapas de flotação pode ser observado na Figura 1. Como pode ser observado (Figura 1), a etapa final do processo de concentração por flotação é composta de uma etapa rougher (RGH), duas etapas scavenger (SCV) e uma etapa Cleaner (CLN). O fluxo gerado no rejeito final da flotação, rejeito SCV2, é o material de estudo apresentado nesse trabalho.

Figura 1: Representação esquemática do fluxo de processamento da etapa de flotação



Fonte: Autores (2023)

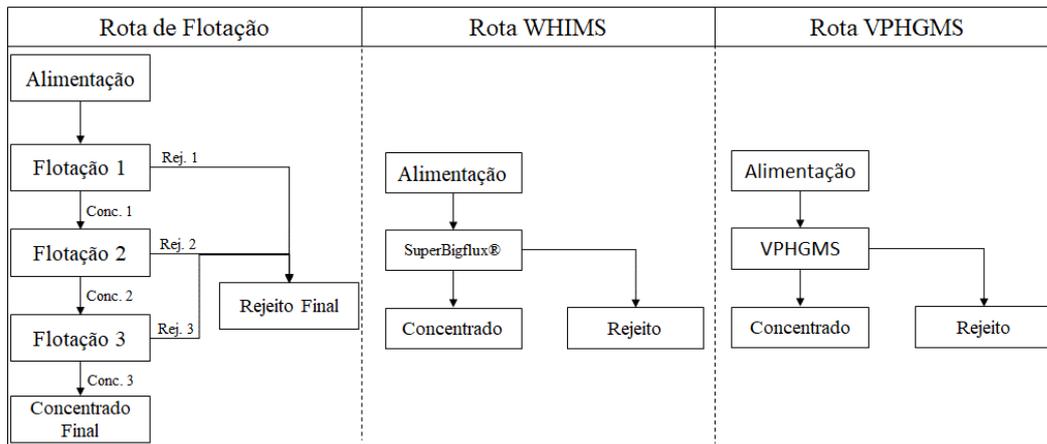
O rejeito da flotação foi secado e devidamente homogeneizado. Após essas etapas, foram retiradas alíquotas do rejeito para análise química e granulométrica. Para as análises químicas, utilizou-se a técnica de fluorescência de raios X. Além disso, realizou-se análise granulométrica pelo método do *cyclosizer* e, posteriormente, cada faixa granulométrica foi analisada quimicamente. Ademais, foi realizada análise mineralógica

por microscopia ótica e por difração de raios X, além disso na etapa de caracterização realizou-se o grau de liberação (GL) dos óxidos de ferro e quartzo pelo método de Gaudin, que é dado pela Equação 1.

$$GL = \frac{\text{área mineralizada das partículas livres}}{100\% \text{ da área mineralizada das partículas livres} + \text{partículas mistas}} \quad (1)$$

Foram avaliadas três rotas de concentração (Figura 2), sendo elas: flotação em bancada, separação magnética com separador do tipo Jones (WHIMS) e concentração magnética com VPHGMS, ambas em escala piloto.

Figura 2: Rotas de processamento testadas



Fonte: Autores (2023)

Para o teste de flotação foi utilizada célula CDC, com volume de cuba igual a 2,5 litros, com rotação de 1200 rpm. Nesse processo, utilizou-se o reagente amido, como depressor de óxidos de ferro (1200 g/t) com tempo de condicionamento de 5 minutos e o reagente amina como coletor de quartzo (250 g/t). Além disso, manteve-se o pH da polpa em 10,5. Salienta-se entretanto, que a dosagem descrita acima foi feita com base nos teores da alimentação dos processos de concentração. Para isso, utilizou-se as Equações 2 e 3 para o cálculo da dosagem dos reagentes.

$$\text{Dosagem de amina} = \frac{\%SiO_2}{100} \times 250 \text{ g/t} \quad (2)$$

$$\text{Dosagem de amido} = \frac{\%Fe}{100} \times 1200 \text{ g/t} \quad (3)$$

No processamento em separação magnética, feito em escala piloto, com equipamento WHIMS, utilizou-se: matriz *Super bigflux*® (GAP de 0,5mm), campo magnético de 2,2 T e polpa com 30% de sólidos. No processo de concentração magnética por meio do equipamento VPHGMS, por sua vez, também em escala piloto, foram utilizados os seguintes parâmetros: pulsação 100 Hz, GAP 1,5 mm, polpa com 30% de sólidos na alimentação.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Pela análise química, da amostra de rejeito tal qual, obteve-se os seguintes teores: 22,74% Fe; 66,87% de SiO₂; 0,20% Al₂O₃; 0,015% Mn; 0,011% P; 0,10% PPC. A Tabela 1 mostra a distribuição granulométrica e os teores químicos por faixa. Nesse caso, observa-se que há predominância de teores maiores de ferro nas faixas maiores que 23 µm e menores que 5 µm.

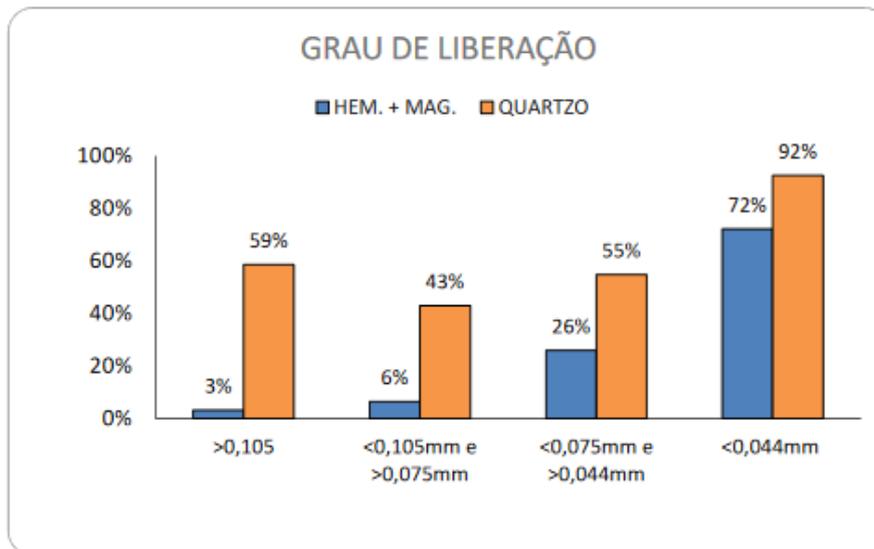
Tabela 1 – Resultados da análise granuloquímica do rejeito in natura. Fonte: Autores (2023)

Abertura da malha (µm)	Distribuição (%)		Análise Química (%)					
	Retido Simples	Retido Acumulado	Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Mn	P	PPC
37	24	24	36,31	47,44	0,13	0,009	0,013	0,12
23	12	36	27,04	60,97	0,15	0,011	0,009	0,02
17	14	50	19,03	72,20	0,13	0,008	0,011	0,04
8	15	64	13,89	79,86	0,15	0,009	0,009	0,02
5	16	80	13,31	80,23	0,16	0,007	0,008	0,00
<5	20	100	22,05	67,19	0,50	0,020	0,016	0,39
Teores calculados			23,08	66,31	0,21	0,011	0,011	0,12

A análise mineralógica (Figura 3) mostra um grau de liberação de 72% para os minerais portadores de ferro, na fração menor que 44 µm. Na Figura 4 podem ser vistas algumas partículas mistas, entretanto, observa-se que a maior parte está liberada. Ainda

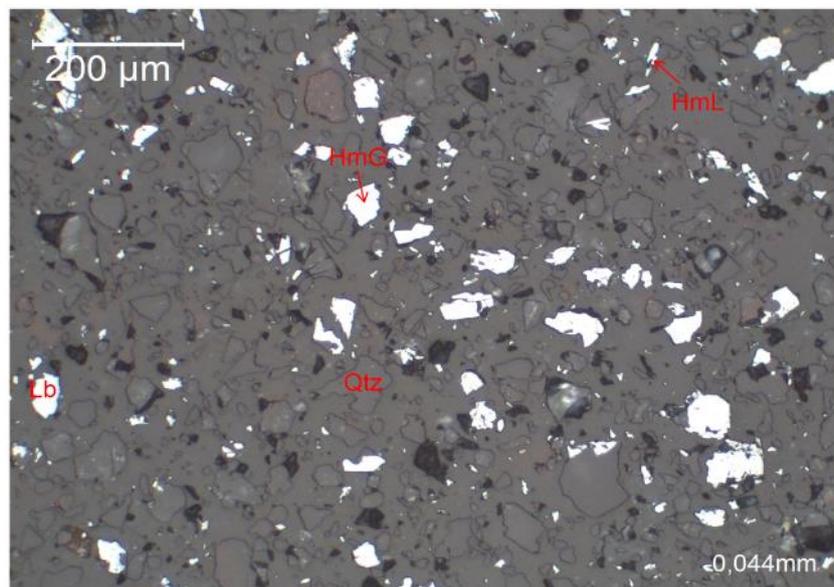
na Figura 4 , observa-se a presença de hematita lamelar (HmL) e hematita granular (HmG).

Figura 3 – Análise de liberação de faixas granulométricas do rejeito *in natura*



Fonte: Autores (2023)

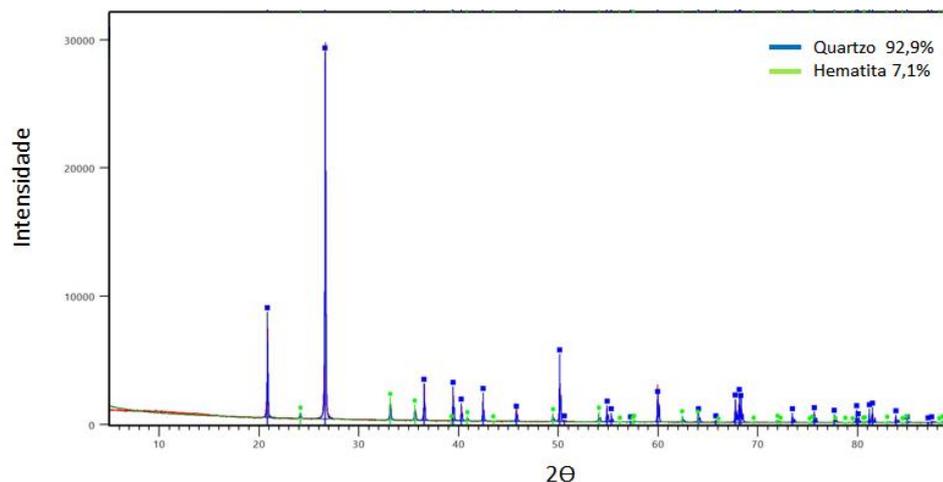
Figura 4 – Mineralogia do rejeito *in natura* (fração < 45µm)



Fonte: Autores (2023)

Os resultados indicados no difratograma (Figura 5) corroboram a análise de microscopia ótica, indicando a presença apenas de quartzo e hematita, ou seja, a amostra estudada não apresenta quantidade significativa de outros minerais.

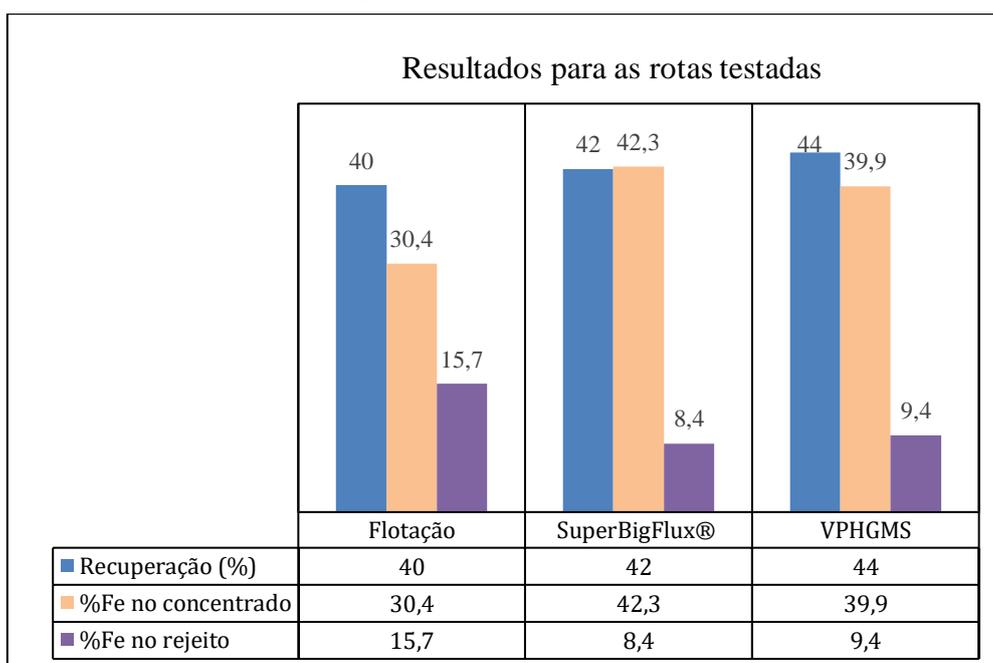
Figura 5 – Difratoograma da amostra in natura



Fonte: Autores (2023)

Os resultados indicam valores similares para recuperação mássica para as três rotas testadas, entretanto, o processo de flotação não se mostrou efetivo devido ao menor teor de ferro no concentrado e maior teor de ferro no rejeito (Figura 5). Ainda na Figura 5, comparando as rotas de concentração magnética, observa-se que o processo WHIMS com matrizes especiais - SuperBigflux® - apresentou vantagens com maior teor de ferro no concentrado (42,3%) e menor teor de ferro no rejeito (8,4%), contra 39,9% e 9,4%, respectivamente, do processo VPHGMS.

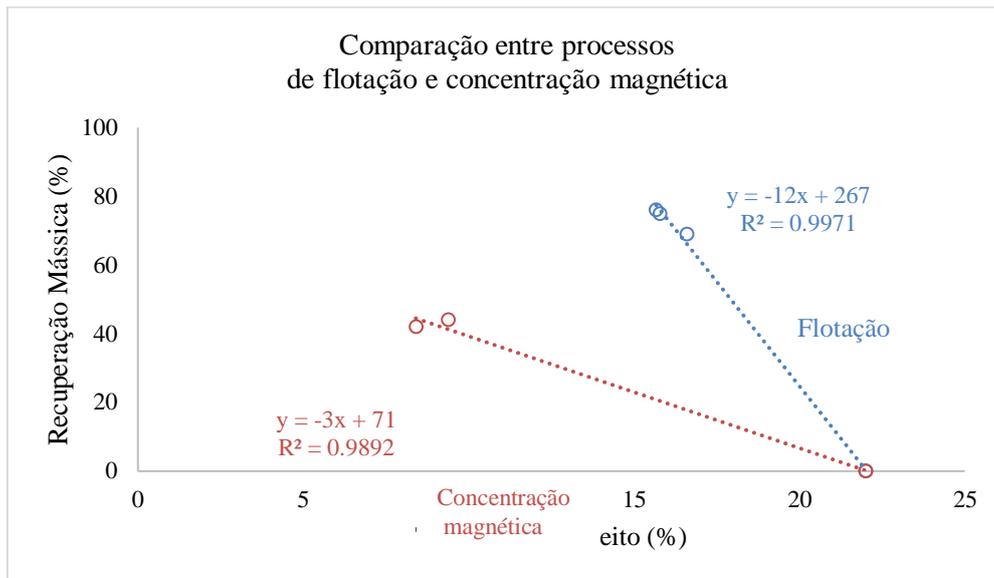
Figura 1 – Resultados de recuperação mássica e teores de Fe no concentrado e rejeito



Fonte: Autores (2023)

Comparando-se as curvas de tendências, dos resultados de teores de ferro no rejeito *versus* recuperação mássica dos processos de flotação e de concentração magnética (Figura 6), verifica-se que, mesmo para grandes recuperações mássicas, o processo de flotação não atingiu teores de ferro no rejeito comparável com os processos de concentração magnética, mesmo para elevadas recuperações mássicas (>75%).

Figura 2 – Comparação entre os processos testados e tendências



CONCLUSÕES

Os métodos de concentração magnética de finos, em escala piloto, se mostraram eficazes para o material estudado, uma vez que, os resultados para teores de ferro nos concentrados e teores de ferro nos rejeitos, foram melhores que os resultados da flotação bancada. Ou seja, foram alcançados teores de ferro menores que 10% nos rejeitos e teores de ferro da ordem de 40% nos concentrados, isso com recuperações em massas equivalentes.

O processo de flotação se mostrou ineficaz para atingir teores de ferro menores que 10% no rejeito. Provavelmente, isso ocorreu devido ineficiência desse processo para atuar em materiais com granulometrias finas, menores que 5 μm , o que nesse estudo era extremamente importante devido ao alto teor de ferro na fração citada, maior que 22%. Além disso, essas partículas finas podem ter contribuído negativamente, à flotação, causando o efeito *slime coating*, o que dificulta a concentração desse minério por meio dessa operação.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a FAPEMIG (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado Minas Gerais) pelo apoio financeiro e ao departamento de engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP, em especial à coordenação do Laboratório de microscopia ótica e difração de raios X. Os autores são gratos à empresa ArcelorMittal Mineração pela seção dos dados presentes nesse trabalho. O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001

REFERÊNCIAS

Fagundes, J.T., Cheloni, L.M.M.S, Prado, J.M., Santos, F.R.T.C., Alves, V.K **Reutilização de rejeitos de minérios de ferro no brasil: uma revisão.** XXIX Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa Armação dos Búzios-RJ, 25 a 28 de Setembro de 2022. ISBN: 978-65-89463-34-4

Fontes WC, Franco de Carvalho JM, Andrade LCR, Segadães AM, Peixoto RAF. **Assessment of the use potential of iron ore tailings in the manufacture of ceramic tiles: From tailings-dams to “brown porcelain.”** Constr Build Mater. 2019; 206:111–21. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.02.052>

Gaudin, A. M. **Principles of Mineral Dressing.** MacGraw-Hill Publishing Company, 1971.

Guimarães NC, Valadão GES, Peres AEC. **Filtragem de rejeitos de minério de ferro visando à sua disposição em pilhas.** REM. 2012;65(4):543–8.

KURUNOV, I. F. (NLMK). **The direct production of iron and alternatives to the blast furnace in iron ore metallurgy for the 21st century.** Metallurgist, 2010.

Li, S.; Zhang, H.;Nie, J.;Dewil, R.;Baeyens, J.;Den G, Y. **The Direct Reduction of Iron Ore with Hydrogen,** Sustainability. 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/su13168866>>

Menezes, K. B. *et al.* **Development of innovation routes for iron ore using high intensity magnetic separators.** REM - International Engineering Journal, v. 75, n. 2, p. 167–175, abr. 2022.

Mendes BC, Pedroti LG, Fontes MPF, Ribeiro JCL, Vieira CMF, Pacheco AA, et al. **Technical and environmental assessment of the incorporation of iron ore tailings in construction clay bricks.** Constr Build Mater. 2019; 227:116669.

Mendes, Júlia Castro, Galvão, José, Andrade, Humberto, Brigolini, Guilherme, Peixoto RAF. 2018JMP - **Reuse of iron ore tailings from tailings dams as pigment for sustainable paints.** Journal Clean Prod. 2018; 200:412– 22.

Ribeiro, J. P.; Ribeiro, C. H. T.; Vieira, E. G. The BigFLUX Magnetic Matrix Technology. **REM - International Engineering Journal.**, v. 75, n. 3, p. 275–278, 2022.

Silva DL, Ferreira MC, Scotti MR. **O maior desastre ambiental brasileiro: de Mariana (MG) a Regência (ES)**. Arquivo do Museu de História Natural e Jardim Botânico - UFMG. 2018;24(2525–6084):136–58.

Totou, A. R. *et al.* **Mineração**. v. 64, n. 2, p. 227–232, 2011.

Valadão, G. E. S.; Araújo, A. C. DE. **Introdução ao tratamento de minérios**. Belo Horizonte: Editora da UFMG. 2007, 234p

Vasconcelos JA, Roberto P, Brandão G, Lemos LN. **Studies of Characterization and Concentration of Compact Itabirite of the Serra Azul Complex, MG**. Tecnologia em Metalurgia Materis e Mineração. 2012;9(2):89–94.

Xinran, Z. *et al.* **Novel Technology for Comprehensive Utilization of Low-Grade Iron Ore** Basel Minerals, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/min12040493>>

Zhang, X. *et al.* **Flotation of Iron Ores: A Review**, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/08827508.2019.1689494>>