

Caracterização física, química e mineralógica de rejeitos de minério de ferro

Camila da Silva Martinatto

Doutoranda, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil PPGEC/UFRGS, Porto Alegre, Brasil,
camilamartinatto@hotmail.com

Guilherme Schmitt Medina

Doutorando, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil PPGEC/UFRGS, Porto Alegre, Brasil,
guilhermemedina.sm@gmail.com

Helena Portela Farenzena

Doutoranda, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil PPGEC/UFRGS, Porto Alegre, Brasil,
helenapfarenzena@gmail.com

Maria Mariana de Sousa Rocha

Doutoranda, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil PPGEC/UFRGS, Porto Alegre, Brasil,
mariamarianasousa1@gmail.com

Nilo Cesar Consoli

Professor titular, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil PPGEC/UFRGS, Porto Alegre, Brasil,
consoli@ufrgs.br

RESUMO: O geossistema Quadrilátero Ferrífero – QF localiza-se na porção centro-sul de Minas Gerais e corresponde à principal unidade ferrífera e produtora de minério de ferro do país. Desta forma, os minérios de ferro ocorrem numa grande variedade de ambientes geológicos, por isto, existem variações nos teores e nas combinações químicas de metais contidos nas rochas, podendo determinar aplicações distintas e sua viabilidade como minério. Sendo assim, o objetivo deste estudo é analisar a caracterização física, química e mineralógica de dois rejeitos de minério de ferro, oriundos de plantas de beneficiamento distintas na região do QF. Para atingir os objetivos delimitados, os ensaios de caracterização geotécnica de granulometria, peso específico dos grãos e limites de Atterberg foram conduzidos. Ainda, visando a análise química e mineralógica, foram realizadas as análises de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), Difração de Raios – X (DRX) e Fluorescência de Raios – X (FRX). Os resultados comprovam a heterogeneidade dos rejeitos de mineração e evidenciam a importância das análises químicas físicas e mineralógicas de rejeitos de mineração de ferro.

PALAVRAS-CHAVE: Rejeito de mineração de ferro, caracterização física, caracterização química, caracterização mineralógica.

ABSTRACT: The Quadrilátero Ferrífero (QF) geosystem is situated in the central-southern portion of Minas Gerais and corresponds to the main iron-bearing unit and iron ore producer in Brazil. Therefore, iron ores occur in a wide variety of geological environments, leading to variations in the contents and chemical combinations of metals contained in rocks, which can determine distinct applications and their feasibility as ore. Thus, the aim of this study is to analyze the physical, chemical, and mineralogical characterization of two iron ore tailings from different beneficiation plants in the QF region. To achieve the defined objectives, geotechnical characterization tests including grain size distribution, specific gravity of grains, and Atterberg limits were conducted. Furthermore, for chemical and mineralogical analysis, Scanning Electron Microscopy (SEM), X-Ray Diffraction (XRD), and X-Ray Fluorescence (XRF) analyses were performed. The results confirm the heterogeneity of iron ore tailings and highlight the importance of physical, chemical, and mineralogical analyses of iron ore tailings.

KEYWORDS: Iron ore tailings, Physical characterization, Chemical characterization, Mineralogical characterization.

1 INTRODUÇÃO

Desde os primórdios da civilização, os minérios desempenharam um papel fundamental no progresso da sociedade, sendo indispensáveis em nossa vida cotidiana atual. No Brasil, a atividade de mineração assume um papel econômico crucial, gerando empregos, contribuindo para a arrecadação de impostos, impulsionando a exportação de produtos e fomentando o avanço tecnológico e o desenvolvimento do país. Apesar da relevância da mineração, suas atividades geram grandes volumes de rejeitos e estéréis, independentemente do tamanho das operações (MME, 2011). Os materiais sem valor econômico aparente, conhecidos como rejeitos de mineração, incluindo os de minério de ferro, apresentam desafios significativos de armazenamento devido à sua extensa produção, tornando-se uma preocupação para o setor (GOMES et al., 2017; IBRAM, 2016). Nos últimos anos, a região do Quadrilátero Ferrífero (QF) testemunhou dois grandes desastres relacionados ao rompimento de barragens de rejeitos: a tragédia da barragem de Fundão, em Mariana – MG, ocorrida em 2015, e o incidente na barragem da Mina do Feijão, em Brumadinho – MG, em 2019. Esses eventos resultaram em significativos danos ambientais e sociais na área (MORGENSTERN et al., 2016; ROBERTSON et al., 2019).

Em resposta a essas catástrofes, tanto a população quanto às autoridades governamentais intensificaram a pressão sobre a indústria mineral, exigindo a implementação de procedimentos que reduzam os riscos associados a esses empreendimentos. Como resultado, a comunidade técnica tem buscado alternativas para o armazenamento de rejeitos e conduzido pesquisas para caracterizá-los, visando minimizar o potencial de risco das barragens. Um exemplo reside no conhecimento das propriedades dos rejeitos de mineração; Segundo Borges (2008), inicialmente a caracterização de rejeitos de usinas de beneficiamento de minérios era pouco explorada, resultando na sua disposição sem uma compreensão adequada de suas propriedades físicas, químicas e mineralógicas, bem como de sua reação aos processos de refinamento. Nos últimos anos, essa tendência tem se invertido, impulsionada não apenas pela crescente preocupação social e ambiental, mas também pela escassez de minérios e esgotamento das reservas, levando à diminuição dos teores nas minas (Borges, 2008).

Desta maneira, torna-se imperativo conhecer profundamente e diferenciar o comportamento de rejeitos de mineração. Nesse contexto, a presente pesquisa visa analisar a caracterização física, química e mineralógica de dois rejeitos de minério de ferro, oriundos de plantas de beneficiamento distintas na região do QF. Desta maneira, faz-se possível estabelecer diretrizes mais seguras para a construção e gestão da barragem, reduzindo assim os possíveis riscos de rompimento.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Rejeitos De Mineração De Ferro

O primeiro rejeito de mineração de ferro utilizado é filtrado e granular, gerado na cadeia produtiva de obtenção do minério de ferro, oriunda do estado de Minas Gerais, Brasil. O local de extração, lavra e tratamento do resíduo está localizado no Quadrilátero Ferrífero e foi denominado nesta pesquisa como Rejeito de Mineração de Ferro A (RMFA). Enquanto que o segundo material utilizado é o Rejeito de Minério de Ferro Ultrafino (Lama) produzido em uma planta de beneficiamento na região do Quadrilátero Ferrífero, centro-sul do estado de Minas Gerais – BR, será denominado nesta pesquisa como Rejeito de Mineração de Ferro B (RMFB).

2.2 Ensaios de Caracterização Física

A caracterização física dos materiais foi avaliada determinando sua distribuição granulométrica conforme a NBR 7181 (ABNT, 2018), limites de consistência NBR 6459 (ABNT, 2017) e NBR 7180 (ABNT, 2016a) e peso específico dos grãos NBR 6458 (ABNT, 2016b).

2.3 Ensaios de Caracterização Química

A composição química elementar foi obtida através do ensaio de fluorescência de raio X (FRX). Para as análises destas amostras, foram criadas pastilhas em pó do material misturada com o aditivo Wax Panalytical®, nas proporções médias de nove gramas de pó e uma grama de aditivo. As pastilhas foram confeccionadas com auxílio da Prensa Manual Fluxana a 25 ton. Após esta etapa, as pastilhas foram dispostas em um acondicionador de amostra padronizado, sendo utilizado para as análises o método Equa_Oxides na programação do equipamento de Fluorescência de raios-X. Para obtenção da análise química semiquantitativa, o espectro gerado a partir da amostra foi avaliado pelo software Spectra EDX sem curva de calibração específica.

2.4 Ensaios de Caracterização Mineralógica

A análise por difração de raios X (DRX) foi realizada em um difratômetro da marca Siemens (BRUKER AXS), modelo D-500 equipado com tubo de ânodo fíco de Cobre ($\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$) com amostra através do método do pó, em que o material pulverizado é depositado em um porta amostra específica para pó, procurando-se manter a desorientação das partículas em que todos os minerais ou estruturas cristalinas são analisados. Estes são identificados através da medida das distâncias interplanares e das intensidades relativas dos picos nos difratogramas. O método semi quantitativo utilizado foi o de RIR – *Reference Intensity Ratio*.

2.5 Ensaios de Caracterização Microestrutural

Os ensaios de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) foram realizados no Laboratório Central de Microscopia e Microanálise (LabCEMM) da PUCRS. A técnica MEV permite observar e caracterizar a superfície (análise morfológica) em escala nanométrica de um material sólido, pois produz imagens de alta ampliação e resolução através da varredura da superfície do material com feixe de elétrons irradiados.

3 RESULTADOS

A Figura 1 apresenta os resultados da distribuição granulométrica para os dois rejeitos, bem como a Tabela 1 abrange os resultados da caracterização física. Quanto à granulometria, o RMFA é classificado como areia siltosa, enquanto o RMFB é um silte arenoso, de acordo com NBR 7181 (ABNT, 2018). Para o Sistema Unificado de Classificação D2487 (ASTM, 2020), ambos enquadraram-se como Areia Siltosa (SM). A distribuição granulométrica apresentada para os materiais está dentro dos limites encontrados na literatura para rejeitos de minério de ferro similares.

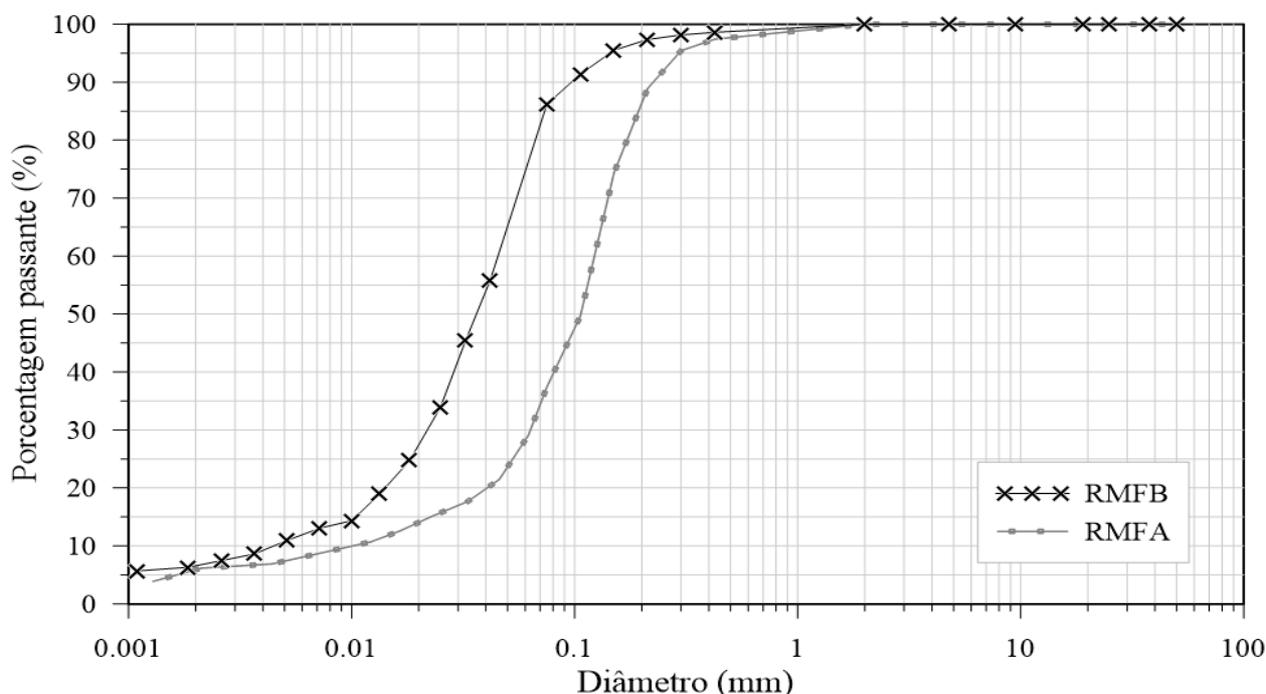


Figura 1 – Caracterização granulométrica dos rejeitos RMFA e RMFB.

Tabela 1 - Caracterização física dos rejeitos RMFA e RMFB.

Característica	RMFA	RMFB	Norma
Limite de Liquidez	-	-	NBR 6459/2017
Limite de Plasticidade	-	-	NBR 7180/2016a
Índice de Plasticidade	NP	NP	-
Peso Específico real dos grãos (Gs)	2,92	3,92	NBR 6458/2016b
% Pedregulho (d>2 mm)	0%	0%	
% de Areia Grossa (0,6 <d<2 mm)	0%	0%	
% de Areia Média (0,2 <d< 0,6 mm)	11%	2,65%	NBR 7181/2018
% de Areia Fina (0,06 <d< 0,2mm)	60%	41,62%	
% de Silte (0,002 <d< 0,06 mm)	23%	49,42%	
% de Argila (d<0,002)	6%	6,31%	
SUCS	SM	SM	ASTM D2487/2020

De acordo com a caracterização química apresentada na Tabela 2, o RMFB é composto por percentual significativo de óxidos de ferro (Hematita), isto é esperado dada a origem do rejeito estudado, resultante dos processos de deslamagem sendo uma das etapas iniciais do processo de beneficiamento. O resíduo gerado do processo são as partículas mais finas nas quais há certa dificuldade de extração dos minerais de interesse (ferro), por isso tais minerais ainda se encontram em maior concentração neste rejeito. Também são em parte responsáveis pelo maior valor de peso específico dos grãos obtidos para o ultrafino-RMFB. O material RMFA é constituído por teor significativo de óxidos de silício. Este material apresenta uma redução de quantidade de ferro quando comparado ao RMFB, já que durante seu beneficiamento uma maior parcela de ferro é possível de ser extraída. Para ambos os materiais, por serem um RMF, altas concentrações de sílica, óxido férrico e óxido de alumínio podem estar relacionadas à presença de minerais do tipo quartzo e feldspato. O óxido de silício e de alumínio são os principais formadores de silicatos. Já o óxido férrico e óxido de titânio estão, provavelmente, relacionados a minerais gerados a partir da formação ferrífera (KLEIN & HURLBUT, 1993).

Tabela 2 - Composição química elementar dos rejeitos RMFA e RMFB.

Elemento		Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MnO	MgO	P ₂ O ₅	K ₂ O	TiO ₂	SO ₃
Concentração (%)	RMFA	22,02	69,84	6,26	0,46	0,40	0,44	0,23	0,10	0,07
	RMFB	45,83	36,25	14,66	1,11	0,60	0,52	0,35	0,24	-

A Figura 2 apresenta os difratogramas de raios X dos materiais. Conforme esperado, o RMFB é composto majoritariamente por ferro, sílica e alumínio. Este resultado corrobora a composição mineralógica encontrada na análise por DRX, nos quais os minerais de hematita, quartzo e caulinita foram identificados. Assim como para o RMFB, o material RMFA relata a presença de três minerais principais na composição do material, o quartzo, a hematita e a caulinita. A presença das fases quartzo, hematita e caulinita, já eram esperadas por se tratar de amostras de resíduos da mineração do ferro. Ambos resultados apresentados na Tabela 2 é confirmada pelo DRX e literatura (CPRM, 2005; DUARTE, 2019; OLIVEIRA; FABRIS; PEREIRA, 2013), uma vez que foi encontrado óxido de ferro relacionado aos picos de hematita, óxido de alumínio relacionado a caulinita e óxido de silício, presentes no quartzo e na caulinita.

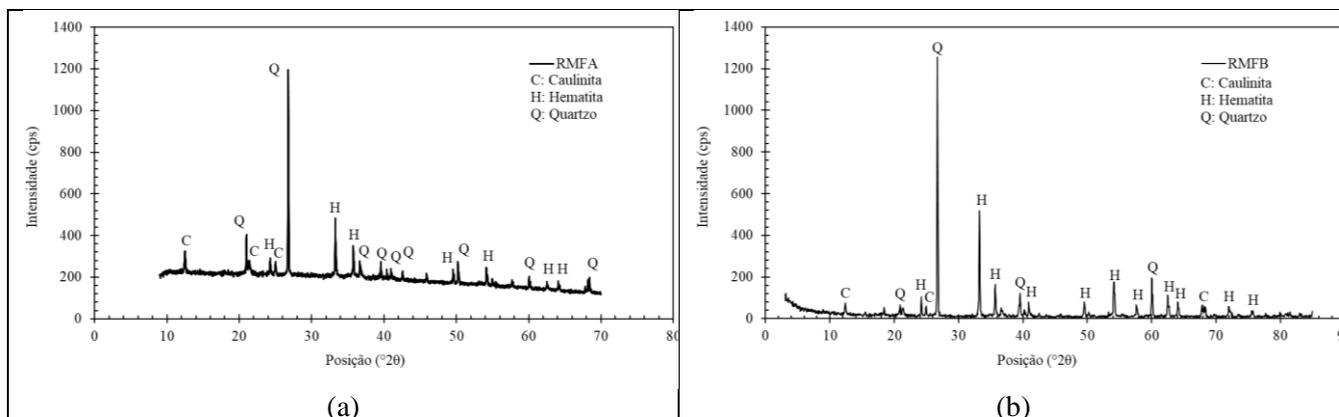
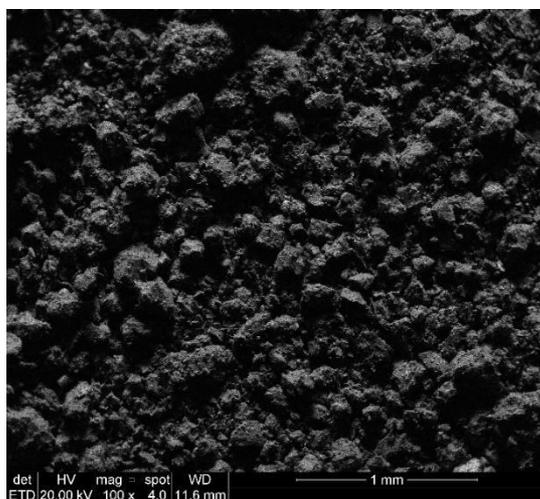


Figura 2 – DRX dos rejeitos: (a) RMFA e (b) RMFB.

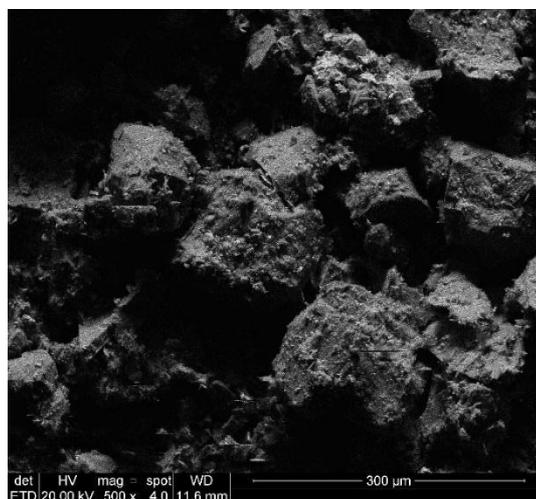
Os resultados comprovam que mesmo que ambos denominados rejeitos de mineração de ferro, o processo de beneficiamento e obtenção do material são primordiais para características desses materiais, evidenciando a heterogeneidade dos rejeitos de mineração de ferro. Geralmente, o material que deixa o hidrociclone pela parte superior (overflow) apresenta granulometria fina compondo os rejeitos finos e ultrafinos incorporados com água, e o material que deixa o hidrociclone pela parte inferior (underflow) compõe o rejeito granular, de granulometria mais grossa e com pouca quantidade de água. Cada porção separada pelo hidrociclone tem características e formas de disposição distintas. O rejeito granular (underflow) pode ser reprocessado novamente na planta de beneficiamento ou utilizado como material para futura construção estrutural de barragens, enquanto o rejeito fino e ultrafino (overflow), ou lama, é lançado diretamente nas barragens de rejeitos.

Atrelado a isto, observou-se também a divergência na composição mineralógica. A amostra de rejeito fino, silte arenoso, é composta majoritariamente por Hematita - Fe_2O_3 (50,6%), enquanto a amostra de rejeito granular, areia siltoso, é composta majoritariamente por Quartzo - SiO_2 (69,84%). O percentual significativo de óxidos de ferro (Hematita) é esperado dada a origem do rejeito fino, resultante dos processos de deslamagem sendo uma das etapas iniciais do processo de beneficiamento, enquanto o rejeito arenoso é resultado da etapa final do processo de beneficiamento.

A Figura 3 e Figura 4 apresentam as imagens de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) para o RMFA e RMFB, respectivamente:



(a)



(b)

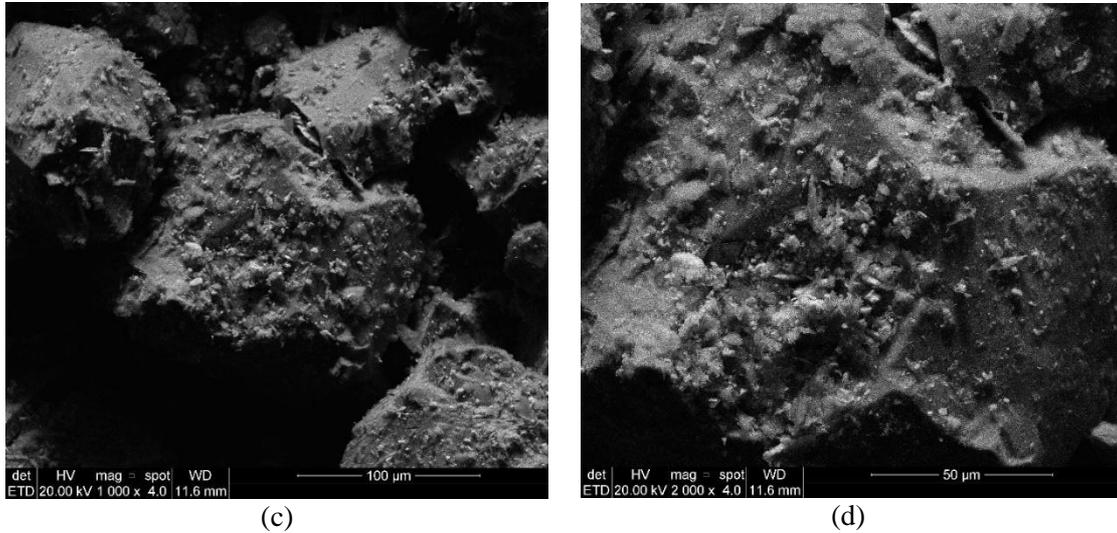


Figura 3 - Microscopia Eletrônica de Varredura do RMFA, nas magnificações: (a) 100x, (b) 500x, (c) 1000x e (d) 2000x.

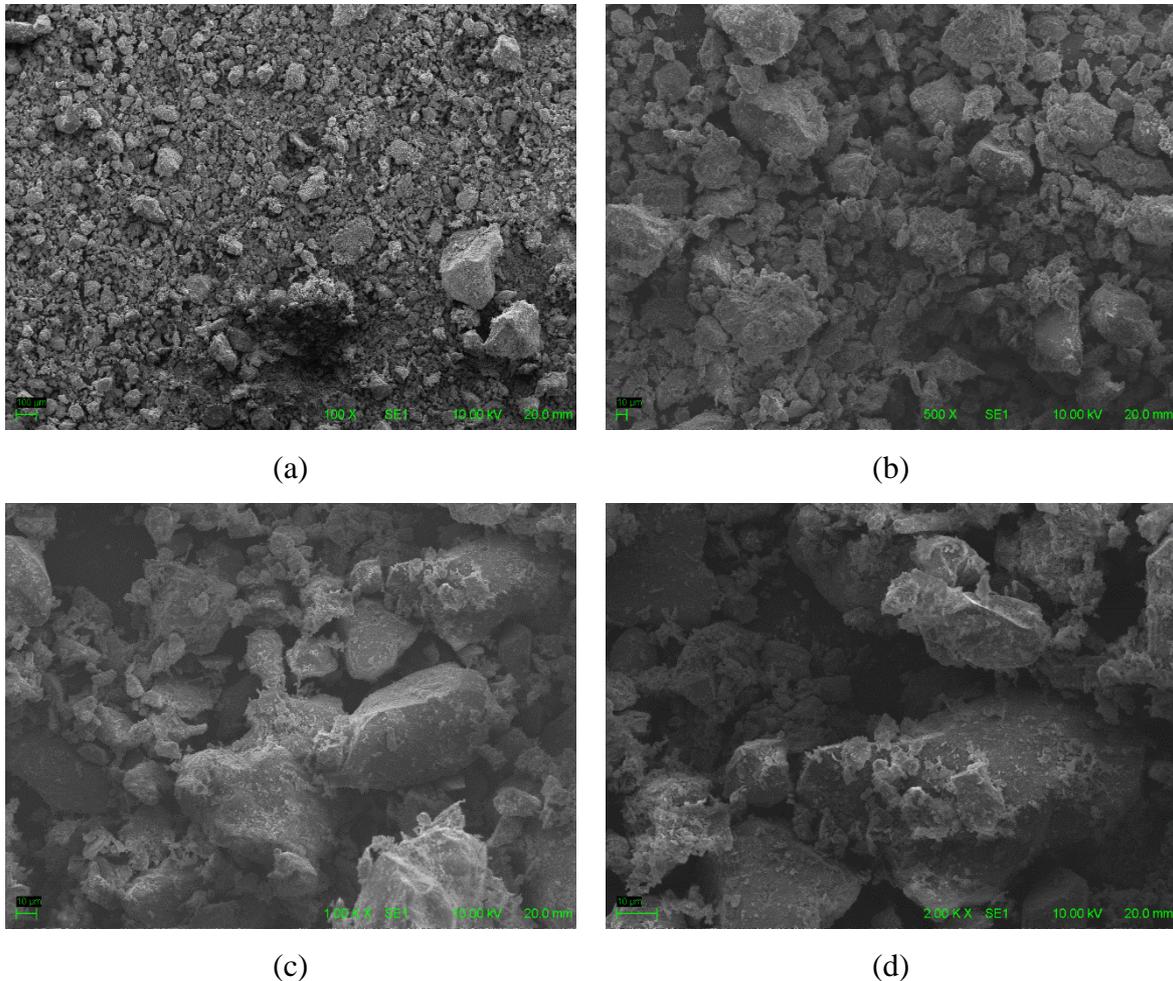


Figura 4 - Microscopia Eletrônica de Varredura do RMFB, nas magnificações: (a) 100x, (b) 500x, (c) 1000x e (d) 2000x.

As imagens obtidas por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), na Figura 3, revelam que o RMFA é caracterizado, em sua maioria, por partículas de contornos angulares e uma superfície aparentemente rugosa. Esse padrão observado corrobora com achados similares reportados por Zhao et al. (2021). Entretanto, é

importante ressaltar que inferências acerca da distribuição e tamanho dos poros não podem ser conclusivas devido ao fato de o material analisado não se encontrar em seu estado natural, ou seja, não estava intacto durante os ensaios realizados. Analisando as imagens apresentadas na Figura 4, evidencia-se que a morfologia do RMFB é predominantemente constituída por partículas de quartzo de contornos angulares, acompanhadas por aglomerados de partículas de hematita com formato laminar, que envolvem a superfície dos grãos de quartzo. Uma análise mais aprofundada revelaria discrepâncias adicionais em relação às características morfológicas e estruturais entre os dois tipos de ralos mencionados, mas é possível observar o RMFB como um material com poros preenchidos por mais finos em comparação ao RMFA. No entanto, é essencial reiterar que considerações definitivas sobre a distribuição e tamanho dos poros devem ser abstidas, dadas as condições não naturais do material avaliado durante o estudo.

4 CONCLUSÕES

Em síntese, a análise dos rejeitos de mineração de ferro, em Minas Gerais, revela nuances significativas. O RMFB, classificado como Silte Arenoso, exibe comportamento não plástico e concentração expressiva de óxidos de ferro, especialmente hematita. Em contraste, o RMFA, classificado também como silte arenoso, destaca-se pela presença marcante de sílica, ferro e alumínio, predominando quartzo. A diversidade mineralógica, com a identificação de hematita, quartzo e caulinita, está em consonância com as expectativas associadas à mineração de ferro.

Os resultados reforçam a heterogeneidade dos rejeitos, atribuível aos processos de beneficiamento. O RMFB, originado da deslamagem, revela a complexidade do processo, com partículas finas contendo minerais de interesse (ferro) e dificuldades de extração. A presença de óxidos de ferro, relacionados aos picos de hematita na análise por DRX, confirma a origem do rejeito. Além disso, as imagens de MEV permitiram observar o RMFB como um material com poros mais preenchidos por finos em comparação ao RMFA, entretanto não é possível inferir conclusões sobre a distribuição e tamanho dos poros devido às condições não naturais do material analisado.

Apesar de semelhantes classificações, sendo ambas silte arenoso, observa-se uma maior quantidade de finos no RMFB, atribuída ao hidrociclone no beneficiamento, onde o overflow contribui para os rejeitos finos e ultrafinos (RMFB), enquanto o underflow compõe o rejeito granular (RMFA). Essa distinção na composição e forma de disposição dos rejeitos destaca a importância de estratégias diferenciadas para o gerenciamento sustentável.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). D 2487 -17: Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System). , 2020.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 6458: Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm — Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água. Rio de Janeiro, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 6459: Solo - Determinação do Limite de Liquidez. , 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 7180: Solo - Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 7181: Solo - Análise Granulométrica. Rio de Janeiro, 2018.
- BORGES, A. A.; LUZ, J. A. M. DA; FERREIRA, E. E. Caracterização da parcela magnética de minério fosfático de carbonatito. Rem: Revista Escola de Minas, v. 61, n. 1, p. 29–34, mar. 2008.
- CPRM - COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS. Projeto APA Sul RMBH Estudos do meio físico. , 2005.
- DUARTE, H. FERRO – Um elemento químico estratégico que permeia História, Economia e Sociedade. Química Nova, 2019.

- IBRAM. Gestão e Manejo de Rejeitos da Mineração. Instituto Brasileiro de Mineração, 2016. Disponível em:
<http://www.ibram.org.br/sites/1300/1382/00006222.pdf>
- KLEIN, C.; HURLBUT Jr., C.S. Manual of Mineralogy. 21. Ed. New York, John Wiley & Sons. 681p. 1993.
- MANSUR GOMES, M. et al. Disposal of tailings and the mining industry perspective: a case study of the Cuiabá Mine. 2019.
- MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME). Plano Nacional de Mineração 2030 – Geologia, Mineração e Transformação Mineral (PNM – 2030). Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral – SIGM. Brasília, 2011.
- MORGENSTERN, N. et al. Report on the Immediate Causes of the Failure of the Fundao Dam. Fundão Tailings Dam Review Panel, p. 88, 2016.
- OLIVEIRA, L. C. A.; FABRIS, J. D.; PEREIRA, M. C. Óxidos de ferro e suas aplicações em processos catalíticos: uma revisão. Química Nova, v. 36, n. 1, p. 123–130, 2013.
- ROBERTSON, P. K. et al. Report of the expert panel on the technical causes of the failure of Feijão dam I. Commissioned by Vale, p. 81, 2019.
- ZHAO, J., NI, K., SU, Y., & SHI, Y. (2021). An evaluation of iron ore tailings characteristics and iron ore tailings concrete properties. Construction and Building Materials, 286, 122968. doi:10.1016/j.conbuildmat.2021.122968