

Caracterização Geotécnica de Rejeitos de Mineração de Cobre

Maria Mariana de Sousa Rocha

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

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

Nilo Cesar Consoli

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

RESUMO: A mineração é essencial para a economia global, destacando-se no Brasil pela produção de metais, com o cobre sendo um dos mais relevantes. No entanto, o processo de beneficiamento gera rejeitos de mineração que exigem gestão especial devido à possibilidade de presença de substâncias nocivas, tornando crucial conhecer e caracterizar esses resíduos para garantir a segurança do meio ambiente e das estruturas de disposição. Esta pesquisa aborda a caracterização física, química e microestrutural de dois rejeitos de mineração de cobre, RMC A e RMC B, provenientes de depósitos do tipo IOCG no Pará, Brasil. Ambos os materiais mostram comportamento não-plástico e massa específica real dos grãos semelhantes, sendo RMC A classificado como silto-arenoso e RMC B como silte de baixa compressibilidade. A composição mineralógica revela predominância de minerais silicatados, com RMC B apresentando clorito, indicativo de influência de processos hidrotermais. Resultados químicos corroboram com os mineralógicos, enquanto análises microscópicas evidenciam grãos com diferentes diâmetros e formas angulares, sugerindo intemperismo pouco intenso. Conclui-se que a caracterização é crucial para o desenvolvimento de estratégias de gestão visando minimizar impactos ambientais e garantir a sustentabilidade das operações de mineração de cobre.

PALAVRAS-CHAVE: Mineração, Rejeitos de minério de cobre, Caracterização física, Caracterização química, Caracterização microestrutural.

ABSTRACT: Mining is essential for the global economy, particularly in Brazil, where it stands out for metal production, with copper being one of the most relevant metals. However, the beneficiation process generates mining tailings that require special management due to the potential presence of harmful substances. It is crucial to identify and characterize these materials to ensure environmental safety and the integrity of disposal structures. This research focuses on the physical, chemical, and microstructural characterization of two copper mining tailings, RMC A and RMC B, from IOCG deposits in Pará, Brazil. Both materials exhibit non-plastic behaviour and have similar real grain specific mass. RMC A is classified as silty-sandy, while RMC B is categorized as low-compressibility silt. The mineralogical composition analysis reveals a predominance presence of silicate minerals, with RMC B showing chlorite, indicative of hydrothermal process influence. Chemical results support the mineralogical ones, while microscopic analyses show grains with different diameters and angular shapes, suggesting low-intensity weathering. It is concluded that conducting through characterization is crucial for developing management strategies that minimize environmental impacts and ensure the long-term sustainability of copper mining operations.

KEYWORDS: Mining, Copper mining tailings, Physical characterization, Chemical characterization, Microstructural characterization.

1 INTRODUÇÃO

A mineração desempenha um papel crucial na economia global, sendo responsável pela extração de uma vasta gama de recursos minerais essenciais para diversas indústrias. No contexto brasileiro, os metais representam uma parte significativa da produção mineral, com o cobre se destacando como um dos minerais mais importantes. Devido às suas propriedades únicas, especialmente como condutor elétrico, o cobre é amplamente utilizado em diversas aplicações industriais.

Entretanto, o processo de mineração resulta na geração de grandes volumes de resíduos conhecidos como rejeitos, que são subprodutos do beneficiamento do minério. Estes rejeitos apresentam características distintas em comparação com os solos naturais e exigem uma gestão cuidadosa devido à presença de metais pesados, radioatividade e produtos químicos.

Dada a quantidade significativa de rejeitos gerados, a gestão adequada torna-se fundamental para as operações de mineração. Neste contexto, a caracterização dos rejeitos de mineração, como os de cobre, é de extrema importância, uma vez que permite uma compreensão detalhada das propriedades físicas e químicas desses materiais, o que é essencial para o desenvolvimento de estratégias eficazes de gestão e disposição desses rejeitos. Compreender as características dos rejeitos de mineração de cobre é crucial não apenas para garantir a segurança e a sustentabilidade das operações mineradoras, mas também para minimizar os impactos ambientais e proteger as comunidades circundantes.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais

Os rejeitos de mineração abordados nesta pesquisa são provenientes do processo de beneficiamento de materiais extraídos de depósitos do tipo IOCG (*Iron Oxide Copper Gold*), situados em duas minas localizadas no estado do Pará, Brasil. O primeiro rejeito, designado como RMC A, foi coletado especificamente da área conhecida como *Lower Beach*, uma seção da barragem que corresponde à praia de rejeitos, localizada a uma distância aproximada de 1462 metros do ponto de descarte dos rejeitos. Já o segundo material, denominado RMC B, foi coletado diretamente das instalações de beneficiamento, antes de ser descartado no reservatório.

2.2 Métodos

2.2.1 Ensaios de caracterização física

A caracterização física dos rejeitos de mineração de cobre (RMC) foi conduzida por meio da determinação de parâmetros, cujas metodologias foram estabelecidas de acordo com as normativas específicas correspondentes. Estes parâmetros incluíram a análise da curva granulométrica, conforme a norma NBR 7181 (ABNT, 2018), a determinação dos limites de plasticidade, conforme a norma NBR 7180 (ABNT, 2016), a determinação da liquidez, seguindo a norma NBR 6459 (ABNT, 2017a), e a mensuração da massa específica real dos grãos de acordo com a norma NBR 6458 (ABNT, 2017b).

2.2.2 Ensaios de caracterização mineralógica

A composição mineralógica dos rejeitos provenientes da mineração de cobre foi determinada por meio de análise de difração de raios X (DRX), utilizando um difratômetro de raios X da marca Siemens (BRUKER AXS), modelo D-5000. Este equipamento estava equipado com um tubo de ânodo fixo de cobre (Cu) com comprimento de onda de 1.5406 Å, operando a uma tensão de 40 kV e corrente de 30 mA no feixe primário, e um monocromador curvado de grafite no feixe secundário.

O procedimento adotado baseou-se no método do pó, no qual o material pulverizado ou degradado foi depositado em um porta-amostras específico para pó, buscando-se preservar a aleatoriedade da orientação das partículas para garantir uma análise representativa de todos os minerais ou estruturas cristalinas presentes.

Dessa forma, os minerais e/ou fases cristalinas foram identificados por meio da medição das distâncias interplanares (valores de "d") e das intensidades relativas dos picos nos difratogramas. As amostras em pó foram submetidas à análise no intervalo angular de 5 a 70° 2θ, com um passo de 0.05°/1s, utilizando-se fendas de divergência e anti-escapes de 1° e 0.6 mm no detector.

2.2.3 Ensaio de caracterização química

A análise da composição química dos rejeitos de cobre foi conduzida por meio da técnica de espectrometria de fluorescência de raios-X (FRX), utilizando o espectrômetro de fluorescência de raios-X RIX 2000, fabricado pela Rigaku. Este equipamento é dotado de um tubo de raios-X de ródio (Rh) e opera com o método de dispersão de energia de raios-X (WDS). A composição química foi determinada por meio de uma análise quantitativa utilizando uma curva de calibração desenvolvida a partir de padrões de rochas catalogados na base de dados Geostandards (GOVINDARAJU, 1994).

2.2.4 Ensaio de caracterização microestrutural

Para a análise elementar dos grãos presentes nos rejeitos de mineração de cobre, empregou-se a técnica de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) no Centro de Microscopia e Microanálise (CMM) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Este método, amplamente utilizado em estudos microestruturais, possibilita a observação de características físicas e estruturais em escalas microscópicas.

No processo de MEV, feixes de elétrons são direcionados para a superfície da amostra, interagindo com ela e gerando informações que são utilizadas na criação de imagens detalhadas da sua topografia. Dessa forma, é possível visualizar minuciosamente rugosidades, porosidades, trincas e partículas, aspectos estes que muitas vezes escapam à observação por meio de microscopia óptica convencional.

Para viabilizar a análise, as amostras foram previamente fixadas em suportes metálicos e submetidas a um processo de metalização com uma fina camada de ouro paládio, tornando-as condutoras. A análise foi realizada em diferentes ampliações: 500x, 2000x e 5000x, proporcionando uma investigação abrangente das características morfológicas dos grãos presentes nos rejeitos de mineração de cobre.

3 RESULTADOS

A caracterização física do rejeito de mineração de cobre denominado RMC A indicou um material com granulometria areno-siltosa (SM), conforme classificação do Sistema Unificado de Classificação – SUCS (ASTM, 2017). Além disso, devido à ausência de valores significativos para seus limites de consistência, constatou-se que o rejeito estudado possui um comportamento não-plástico. Em relação ao RMC B, observou-se que este apresenta uma composição mais fina em comparação com o primeiro. Sendo assim, pode ser classificado como um silte de baixa compressibilidade (ML). Entretanto, quanto à plasticidade, ambos os rejeitos foram categorizados como não-plásticos. Na análise da massa específica real dos grãos, verificou-se valores semelhantes, com o RMC A apresentando uma densidade de 2,91 g/cm³ e o RMC B, 2,81 g/cm³. As curvas granulométricas e os parâmetros obtidos na caracterização física são apresentados na Figura 1 e Tabela 1, respectivamente.

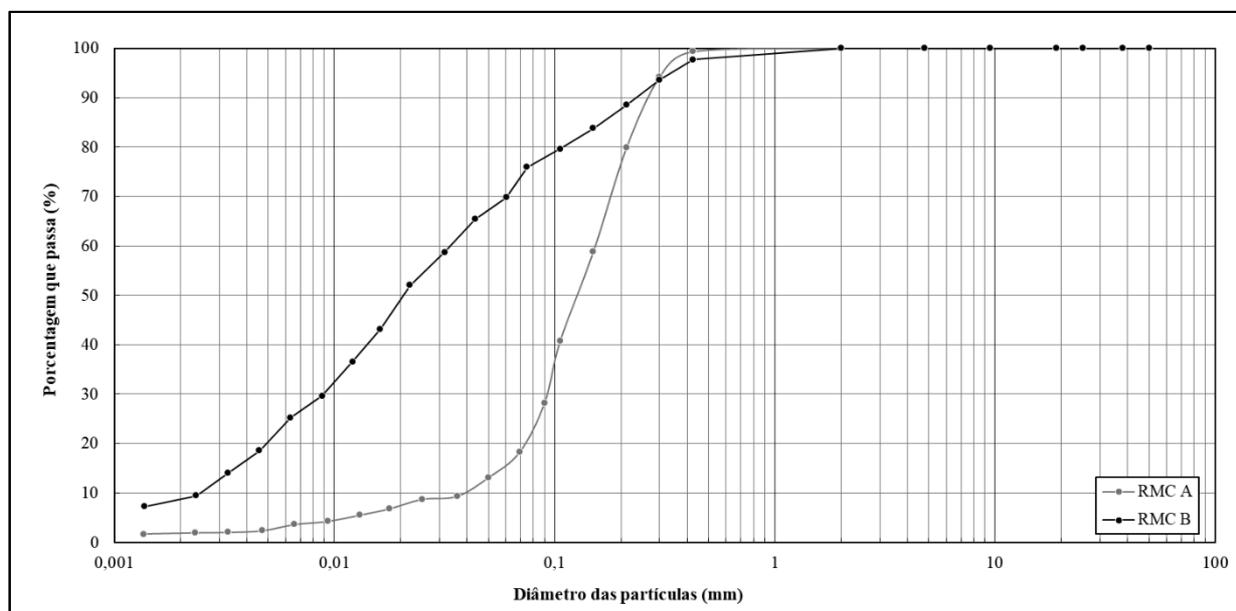


Figura 1. Curvas granulométricas dos rejeitos de mineração de cobre.

Tabela 1. Propriedades físicas dos rejeitos de mineração de cobre.

Propriedades	RMC A	RMC B
Limite de liquidez (%)	-	-
Limite de plasticidade (%)	-	-
Índice de plasticidade (%)	NP	NP
Massa específica real dos grãos (g/cm ³)	2,91	2,81
Areia (0,06mm < diâmetro < 2 mm) (%)	81,8	30,2
Silte (0,002mm < diâmetro < 0,06 mm) (%)	16,3	60,4
Argila (diâmetro < 0,002 mm) (%)	1,9	9,4
Classificação SUCS (ASTM, 2017)	SM	ML

Os resultados da caracterização física dos dois rejeitos estão em conformidade com os dados encontrados na literatura. Exemplo disto são as faixas de valores apresentados por Bedin (2010). Devido à sua origem no processo de beneficiamento, é comum que esses rejeitos sejam classificados como materiais de granulometria siltosa ou areno-siltosa (DALIRI, 2013). Quanto ao peso específico real dos grãos, que é uma propriedade intrínseca das partículas sólidas, desconsiderando a porosidade da amostra, é determinado pela relação entre a massa e o volume das partículas. Sendo assim, em solos convencionais, o peso específico real dos grãos varia de 25 a 28 kN/m³, dependendo dos minerais presentes (LAMBE & WHITMAN, 1979). Nos rejeitos de mineração, esse parâmetro é influenciado principalmente pelos minérios, resultando frequentemente em valores superiores aos observados em solos convencionais (VICK, 1990).

A análise mineralógica, cujos resultados foram apresentados na Tabela 2 e Figura 2, indicam similaridades na composição dos dois rejeitos, uma vez que ambos são compostos por minerais silicatados (quartzo, plagioclásio, anfibólio, mica e clorito), que contêm silício e oxigênio em sua composição química. No que diz respeito ao RMC A, este é composto majoritariamente por quartzo (21,1%), plagioclásio (38,3%) e anfibólio (24,5%). Essa composição indica o tipo de rocha mineralizada, visto que a presença desses minerais é comumente encontrada em rochas ígneas. Já o RMC B é composto em sua maior porcentagem de quartzo (29,3%), plagioclásio (41,5%) e clorito (20,3%). A presença de clorito pode indicar a influência de processos hidrotermais, uma vez que esse mineral é frequentemente associado a veios hidrotermais em rochas metamórficas de baixo grau. Sendo assim, entende-se que em ambos rejeitos, a parte predominante do material é correspondente aos minerais constituintes das rochas e solos presentes no processo de beneficiamento do minério de cobre.

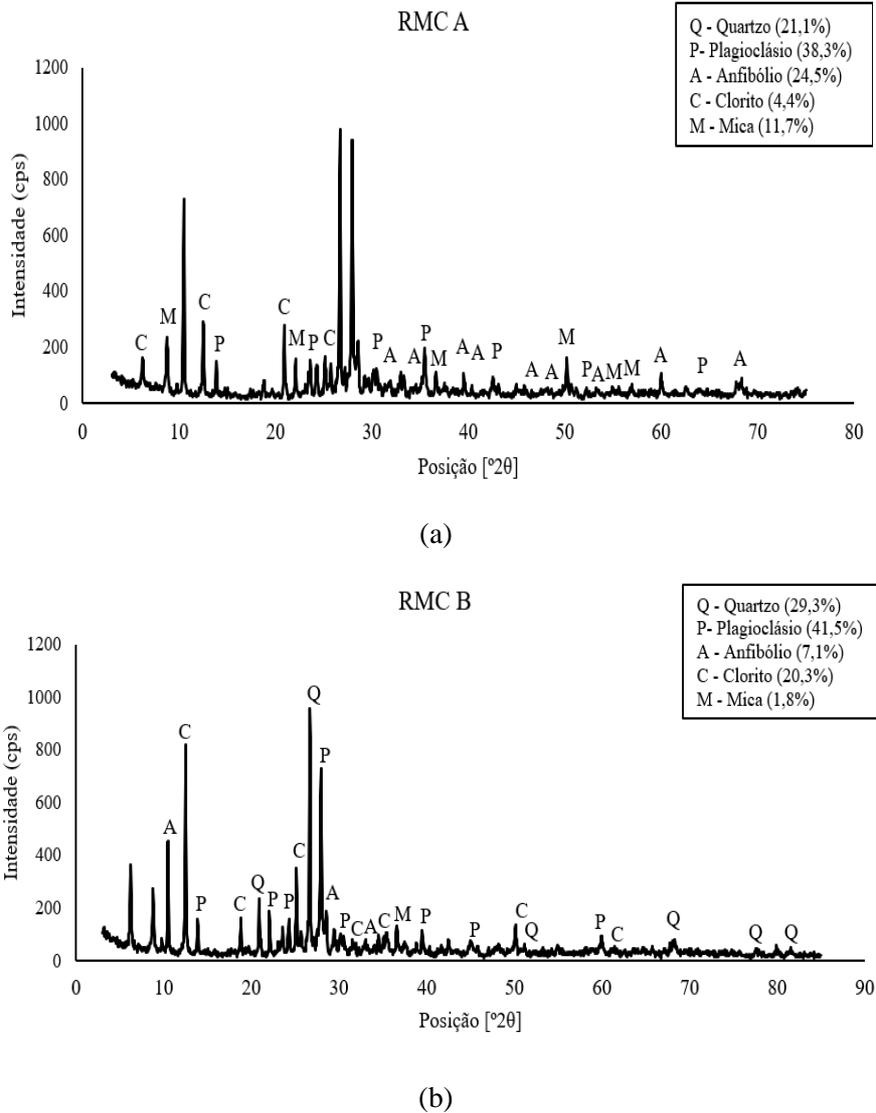


Figura 2. DRX (a) RMC A (b) RMC B.

Tabela 2. Composição mineralógica dos rejeitos de mineração de cobre.

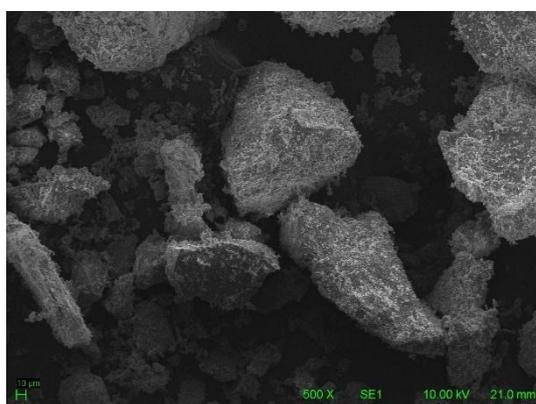
	RMC A	RMC B
Quartzo (%)	21,1	29,3
Plagioclásio (%)	38,3	41,5
Anfibólio (%)	24,5	7,1
Clorito (%)	4,4	20,3
Mica (%)	11,7	1,8

Os resultados do ensaio de Fluorescência de Raios X (FRX), para o qual foram empregados o método de ORE1 (método adaptado) para a análise dos elementos maiores, são demonstrados na Tabela 3. As concentrações obtidas indicam que os rejeitos de mineração de cobre são predominantemente constituídos por Silício, Alumínio e Ferro. Esta composição química é consistente com a análise mineralógica, uma vez que o plagioclásio, que é a parte mineralógica majoritária de ambos os rejeitos, é comumente composto de silicato de alumínio (Al_2SiO_5). Assim como, o restante dos minerais que podem ser caracterizados como silicatados.

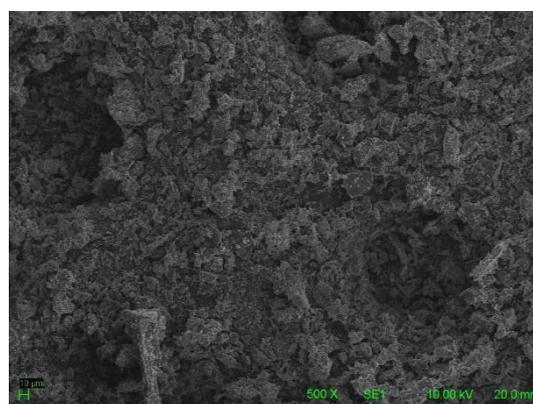
Tabela 3. Concentração dos elementos químicos dos rejeitos de mineração de cobre.

Elementos (%)	RMC A	RMC B
Si	51,26	48,89
Al	10,92	11,30
Ti	0,49	0,54
Fe	14,63	15,31
Mn	0,04	0,06
Mg	5,26	6,79
Ca	6,60	6,81
Na	5,34	4,15
K	1,22	1,61
P	1,40	0,96
Cl	1,13	0,66
S	0,07	Nd
LOI: "Loss on Ignition"	1,50	2,8

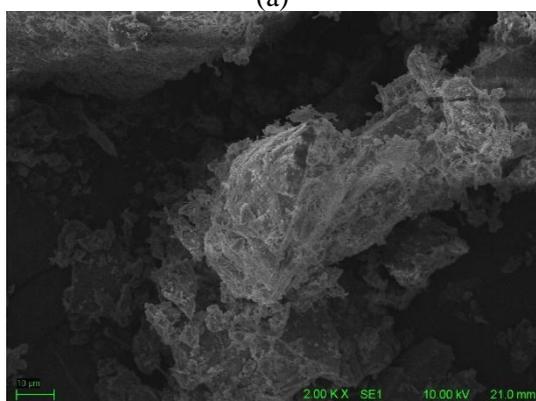
Na análise mineralógica, foram adquiridas as imagens ilustradas na Figura 3. Em uma magnificação menor (200x), é perceptível que o rejeito de mineração de cobre identificado como RMC A exibe grãos com um diâmetro maior, o que se alinha com a classificação granulométrica do material. Quanto à morfologia dos grãos, destaca-se a presença de formas angulares em ambos os rejeitos, característica comum em solos cujos processos de intemperismo não foram tão intensos ou em áreas de deposição recentes. Além disso, é importante destacar que a morfologia das partículas dos rejeitos de mineração reflete o conjunto dos processos mecânicos envolvidos na extração e beneficiamento do minério. Isso contrasta com os solos naturais, cuja morfologia é influenciada principalmente pela formação original e pelos processos pedogenéticos.



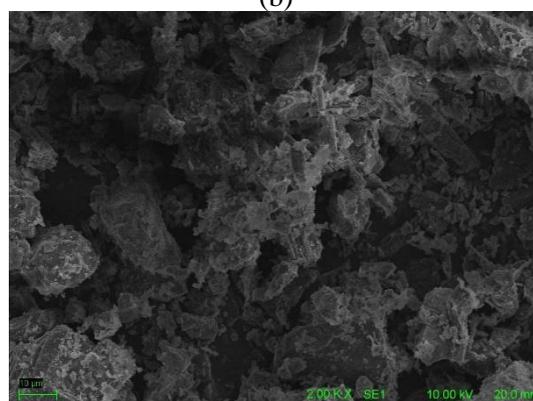
(a)



(b)



(c)



(d)

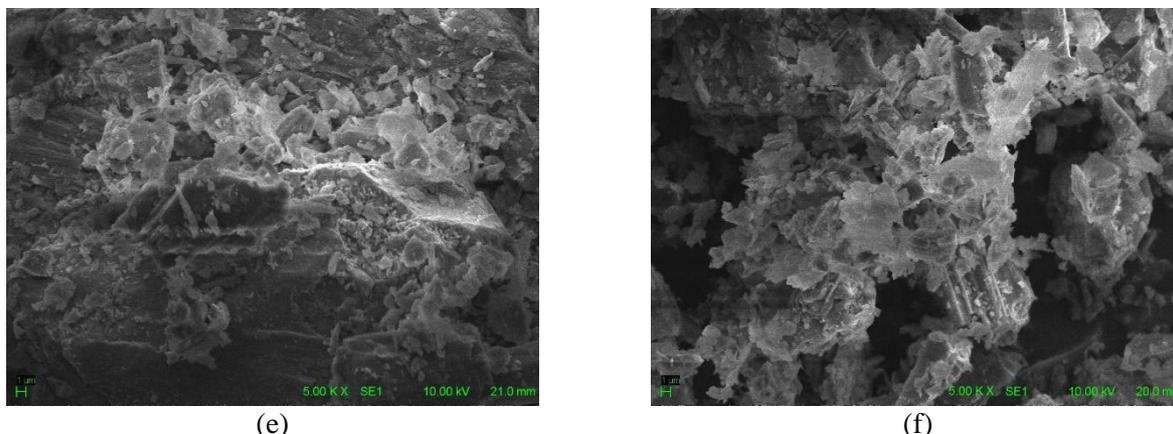


Figura 3. Resultados MEV (a) RMC A – 500x (b) RMC B – 500x (c) RMC A – 2000x (d) RMC B – 2000x (e) RMC A – 5000x (f) RMC B – 5000x

4 CONCLUSÕES

Com base no estudo desenvolvido, que avaliou e comparou a resposta física, química e mineralógica de dois rejeitos de mineração de cobre, denominados RMC A e RMC B, pode-se inferir as seguintes conclusões:

- No que concerne à caracterização física, o rejeito de mineração de cobre denominado RMC A revelou-se como um material com granulometria areno-siltosa (SM), enquanto o RMC B foi caracterizado por uma composição mais fina, sendo classificado como um silte de baixa compressibilidade (ML). Ambos os rejeitos exibiram um comportamento não-plástico, e apresentaram valores semelhantes de massa específica real dos grãos, com densidades de 2,91 g/cm³ e 2,81 g/cm³ para RMC A e RMC B, respectivamente. Valores esses que estão em consonância com os dados disponíveis na literatura especializada.
- No contexto da análise química, ambos os materiais revelaram a predominância de minerais silicatados, tais como quartzo, plagioclásio, anfíbólio e mica, característicos de rochas ígneas e metamórficas associadas ao processo de beneficiamento do minério de cobre. A detecção de clorito no RMC B sugere a influência de processos hidrotermais, possivelmente relacionados a veios hidrotermais em rochas metamórficas de baixo grau. Os resultados do ensaio de Fluorescência de Raios X (FRX) corroboram com a análise de Difratomia de Raios-X (DRX) e indicam os principais elementos constituintes dos rejeitos como sendo o Silício, Alumínio e Ferro, em concordância com a composição mineralógica dos materiais, já que o plagioclásio, parte mineralógica majoritária de ambos os rejeitos, é comumente composto de silicato de alumínio (Al₂SiO₅).
- No que diz respeito à análise microestrutural, as imagens microscópicas evidenciam a presença de grãos com diferentes diâmetros e formas angulares, sugerindo que os processos de intemperismo não foram intensos, o que é comum em áreas de deposição recente de rejeitos de mineração. Adicionalmente, o rejeito de mineração de cobre identificado como RMC A exibe grãos com um diâmetro maior, em conformidade com a classificação granulométrica do material. No entanto, apesar das tendências apontadas, destaca-se que as variações morfológicas dos rejeitos podem ser atreladas ao processo de beneficiamento do minério.

Em suma, os resultados desta análise enfatizam a importância da caracterização física, mineralógica e química dos rejeitos de mineração de cobre para uma compreensão abrangente de suas propriedades e comportamentos. Essa compreensão é fundamental para o desenvolvimento de estratégias eficazes de gestão e tratamento desses materiais, visando mitigar potenciais impactos ambientais e maximizar o aproveitamento de recursos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASTM (2017). D72847: *Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes*. ASTM International. 2017.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016). NBR 7180 – *Solo - Determinação do limite de plasticidade*.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2017a). NBR 6459 – *Solo - Determinação do limite de liquidez*.
- Associação Brasileira De Normas Técnicas (2017b). 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*.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2018). NBR 7181 – *Solo - Análise Granulométrica*.
- Bedin, J. (2010). Estudo do comportamento geomecânico de resíduos de mineração. 2010. Tese de Doutorado - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- Govindaraju, K. (1994) *Compilation of Working Values and Sample Description for 383 Geostandards. Geostand Newsl.*
- Lambe, T. W.; Whitman, R.V. (1969) *Soil Mechanics*. [S. l.]: John Wiley & Sons, Inc.
- Vick, S. G. (1990) *Planning, Design, and Analysis of Tailings Dams*. BiTech Publishers Ltd.