

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
UNIDADE ACADÊMICA CENTRO DE TECNOLOGIA
CURSO DE ENGENHARIA QUÍMICA

ITAÍZA BRUNA DA SILVA COSTA

**CARACTERIZAÇÃO DA ESCÓRIA SALINA ORIUNDA DA RECICLAGEM DE
ALUMÍNIO PARA APLICAÇÃO NA ÁREA DE MATERIAIS**

Maceió

2024

ITAÍZA BRUNA DA SILVA COSTA

**CARACTERIZAÇÃO DA ESCÓRIA SALINA ORIUNDA DA RECICLAGEM DE
ALUMÍNIO PARA APLICAÇÃO NA ÁREA DE MATERIAIS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Química da Universidade Federal de Alagoas como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química.

Orientadora: Prof. Dr^a. Vânia de Lourdes das Graças Teles

Coorientadora: Prof. Dr^a. Cássia Vanessa Albuquerque de Melo

Maceió

2024

Catálogo na fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Central
Divisão de Tratamento Técnico
Bibliotecária: Taciana Sousa dos Santos – CRB-4 – 2062

C837c Costa, Itaíza Bruna da Silva.
Caracterização da escória salina oriunda da reciclagem de alumínio para aplicação na área de materiais / Itaíza Bruna da Silva Costa. – 2024.
60 f. : il. color.

Orientadora: Vânia de Lourdes das Graças Teles.
Coorientadora: Cássia Vanessa Albuquerque de Melo.
Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Química)
– Universidade Federal de Alagoas. Centro de Tecnologia. Maceió, 2024.

Bibliografia: f. 54-58.
Apêndices: f. 59-60.

1. Escória salina. 2. Resíduos – Metalurgia. 3. Alumínio – Reaproveitamento. I. Título.

CDU: 66.046.58


Folha de Aprovação

ITAÍZA BRUNA DA SILVA COSTA


Caracterização da escória salina oriunda da reciclagem de alumínio para aplicação na área de materiais

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à banca examinadora do curso de Engenharia Química da Universidade Federal de Alagoas e aprovada em 22 de fevereiro de 2024.


Banca Examinadora:

Documento assinado digitalmente
 **VANIA DE LOURDES DAS GRACAS TELES**
Data: 05/03/2024 19:30:59-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>


Orientadora: Profa. Dra. Vânia de Lourdes das Graças Teles
(Universidade Federal de Alagoas)

Documento assinado digitalmente
 **CASSIA VANESSA ALBUQUERQUE DE MELO**
Data: 05/03/2024 19:01:08-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Coorientadora: Profa. Dra. Cássia Vanessa Albuquerque de Melo
(Universidade Federal de Alagoas)

Documento assinado digitalmente
 **ALBANISE ENIDE DA SILVA**
Data: 05/03/2024 15:19:54-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. Albanise Enide da Silva
(Universidade Federal de Alagoas)

Documento assinado digitalmente
 **MARITZA MONTOYA URBINA**
Data: 05/03/2024 18:55:51-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. Maritza Montoya Urbina
(Universidade Federal de Alagoas)

Dedico este trabalho e essa conquista aos que mantiveram-se
ao meu lado e torceram por mim durante a trajetória.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aquele que nunca me desamparou nos muitos momentos difíceis em que me vi sem perspectiva de continuar. Deus, nós sabemos o quanto clamei por ti. Obrigada por não desistir de mim e mostrar que as coisas acontecem no seu tempo e se hoje estou te agradecendo é sabendo o futuro brilhante que terei por caminhar sempre ao seu lado, como tua serva.

Sem mais, agradeço de forma pontual a minha família, que nunca ousou soltar minha mão e ao que se submete a passar para dar a melhor educação. Vivenciamos momentos que jamais imaginaria trilhar sem vocês, essa conquista é nossa! Tem um pouco de todos vocês nesse diploma, por isso, dedico-o ao meu pai, Inaldo, que deu toda a assistência e resiliência nessa trajetória e obrigada por continuar dando seu melhor por nossa família e à minha mãe, Itanuzia, meu ser de luz que sempre me incentivou com sua perseverança e convicção, minha maior incentivadora. Ao meu irmão, Italo, que assim como ele é pra mim eu sei que continuarei sendo um exemplo pra ele. Ao meu esposo, José Márcio, onde compartilhamos momentos difíceis, únicos e revigorantes essenciais para tornar essa caminhada especial. Eu não sei o que seria de mim sem o apoio de vocês, muito obrigada, Deus me presenteou muito bem com vocês na minha vida.

Agradeço aos amigos que fiz na graduação, que tornaram meus dias mais leves, onde sorri e aprendi nesses anos compartilhados e que permanecem na minha vida. Meu agradecimento também vai à indústria e todos os colaboradores que me acolheram em um momento de muita aflição, e por me dar oportunidades de crescimento na mesma. Cabe aqui também meu agradecimento aos meus parentes que estiveram presentes quando possível ou ausentes, que não deixaram de torcer por mim.

Agradeço especialmente a minha orientadora, Vânia que esteve presente nas incertezas e resultados desse trabalho e como professora muito prestativa me fazendo ver tudo com otimismo, e nunca deixando me abater pelas dificuldades que encontrei. Meu agradecimento ao Rodrigo Viana por cooperar e me auxiliar na realização das análises, representando o LUMIAM (Laboratório de Materiais Luminescentes e Estudos Ambientais), mas também aos laboratórios LEMA (Laboratório de Estruturas e Materiais) e LABGEO (Laboratório de Geotecnia).

Além deles, de forma geral, agradeço a universidade ao qual me possibilitou muitas descobertas no meio acadêmico, e ressalvo a importância de um corpo docente o qual estive inserida durante esses anos, obrigada a vocês professores do Centro de Tecnologia da respectiva universidade.

RESUMO

A prática de reciclagem do alumínio a partir da sucata é considerada sustentável. Resultante de uma redução considerativa no consumo de energia durante o processo de transformação, além disso ocorre a eliminação das atividades de mineração. A escória, trata-se de um subproduto da indústria metalúrgica que vem despertando o interesse da comunidade científica devido às suas perspectivas sustentáveis e à possibilidade de reutilização em inúmeras áreas. Acarretando na redução de custos na fabricação de materiais, visto que esse tipo de resíduo demonstra aplicabilidade em diversas áreas de aplicações. No âmbito deste estudo, a escória salina proveniente do processo de alumínio secundário foi minuciosamente avaliada em relação ao teor de umidade, granulometria e determinação da massa específica da amostra bruta. A escória apresentou teor de umidade e densidade iguais a 0,33% e $2,566 \pm 0,050 \text{ g/cm}^3$, respectivamente. A análise granulométrica indicou a classificação deste resíduo como um agregado miúdo de fácil dispersão, enquanto por espectrometria de energia dispersiva de raios x (EDX) foram obtidos os teores de Al (35,03%), Cl (47,50%), K (6,35%), Ca (3,09%), Fe (2,90%) na escória bruta. Na escória lixiviada a predominância foi de K (12,25%), Ca (25,13%) e Fe (21,91%) e no sal lixiviado foi de Cl (84,71%) e K (11,28%) e no material imantado Fe (35,14%). Por DRX, todos os materiais analisados apresentaram a presença de Al_2O_3 , exceto o sal lixiviado, indicando que a escória contém alumínio que ainda possa ser reprocessado. Além disso, no material imantado a partir da escória lixiviada foi identificada a presença da magnetita (Fe_3O_4), uma fase de óxido de ferro de interesse tecnológico em processos oxidativos avançados. Diante dessas considerações, observou-se ao longo desta caracterização e estudo que a escória salina tem grande potencial para diferentes aplicações como reutilização no processo de recuperação do alumínio, adsorção, catalisadores, materiais de construção, materiais cerâmicos e processos oxidativos avançados. Portanto, este resíduo metalúrgico pode contribuir na perspectiva de simbiose industrial como proposta de implementação futura em empresa deste segmento.

Palavras-chave: Escória Salina. Caracterização. Reaproveitamento.

ABSTRACT

The practice of recycling aluminum from scrap is considered sustainable. It results in a significant reduction in energy consumption during the transformation process, and additionally, it eliminates mining activities. Slag, a byproduct of the metallurgical industry, has garnered interest from the scientific community due to its sustainable prospects and the possibility of reuse in various fields. This leads to cost reduction in material manufacturing, as this type of waste demonstrates applicability in diverse areas. In the scope of this study, salt slag from the secondary aluminum process was thoroughly evaluated concerning moisture content, particle size distribution, and determination of the bulk density of the raw sample. The slag exhibited moisture and density levels of 0.33% and 2.566 ± 0.050 g/cm³, respectively. Granulometric analysis classified this residue as a fine aggregate with easy dispersion. Energy-dispersive X-ray spectrometry (EDX) revealed Al (35.03%), Cl (47.50%), K (6.35%), Ca (3.09%), and Fe (2.90%) in the raw slag. In leached slag, the predominant elements were K (12.25%), Ca (25.13%), and Fe (21.91%), while in leached salt, Cl (84.71%) and K (11.28%) prevailed. The magnetic material showed Fe (35.14%). X-ray diffraction (XRD) indicated the presence of Al₂O₃ in all analyzed materials, except in leached salt, suggesting that the slag contains aluminum that can still be reprocessed. Moreover, the magnetized material from leached slag revealed the presence of magnetite (Fe₃O₄), an iron oxide phase of technological interest in advanced oxidative processes. Considering these findings, it was observed throughout this characterization and study that salt slag has great potential for various applications, such as reuse in aluminum recovery processes, adsorption, catalysts, construction materials, ceramics, and advanced oxidative processes. Therefore, this metallurgical residue can contribute to the perspective of industrial symbiosis, proposing future implementation in companies within this sector.

Keywords: Salt Slag. Characterization. Reuse.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Síntese do processo para obtenção de alumínio secundário.	15
Figura 2 – Resíduo de escória da fundição.	17
Figura 3 – Energia dispersiva de raios x.	22
Figura 4 – Difração de raios x.	24
Figura 5 – Fluxograma da metodologia desenvolvida.	25
Figura 6 – Escória salina quebrada.	26
Figura 7 – Escória bruta amostrada e coletada.	27
Figura 8 – Secagem das amostras de escória bruta em estufa.	28
Figura 9 – Escória moída em moedor de bolas.	29
Figura 10 – Representação da extração de ar nas amostras por meio da bomba de vácuo.	31
Figura 11 – Compilado do procedimento realizado na lixiviação.	32
Figura 12 – DRX.	33
Figura 13 – EDX.	33
Figura 14 – Amostra sendo preparada para a leitura no DRX.	34
Figura 15 – Amostra sendo preparada para a leitura no EDX.	34
Figura 16 – Escória salina após secagem em estufa por 24 h.	35
Figura 17 – Massa retida obtida em cada abertura de peneira. (a) 25 mm; (b) 19 mm; (c) 12,5 mm; (d) 9,5 mm; (e) 6,3 mm; (f) 4,75 mm; (g) 2,36 mm; (h) 1,18 mm; (i) 0,6 mm; (j) 0,3 mm; (k) 0,15 mm; (l) fundo.	37
Figura 18 - Comparação visual antes e após moagem.	38
Figura 19 – Pedacos metálicos obtidos após a moagem.	39
Figura 20 – Composição granulométrica da escória bruta antes e após moagem.	39
Figura 21 – Representação de bolhas na escória bruta em presença de água.	40
Figura 22 – Forno rotativo do processo de fundição da sucata para obtenção do alumínio secundário com diferentes densidades da escória e alumínio.	41
Figura 23 – Sal precipitado na amostra de escória após secagem em estufa.	42
Figura 24 – Cristais de sais formados.	43
Figura 25 – Espectro de EDX para escória salina bruta.	44
Figura 26 – Espectro de EDX da escória lixiviada.	45
Figura 27 – Espectro de EDX do sal lixiviado.	45
Figura 28 – Espectro de EDX do material imantado.	46
Figura 29 – Comparação de difratogramas entre a escória bruta e lavada.	48
Figura 30 – Difratograma do sal lixiviado.	49
Figura 31 – Difratograma do material imantado.	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Série de peneiras normal e intermediária caracterizadas pela abertura da malha.....	19
Tabela 2 – Massa ($X \pm s$) e teor de umidade (%) na escória salina bruta oriunda do processo de recuperação de alumínio em sucatas.	35
Tabela 3 – Composição granulométrica e módulo de finura da escória antes da moagem.	36
Tabela 4 – Composição granulométrica e módulo de finura da escória após moagem.....	38
Tabela 5 – Resultados obtidos para a massa específica da escória salina oriunda de indústria de alumínio secundário.	41
Tabela 6 – Pesagem inicial da escória após filtração e porcentagem de lixiviado.	43
Tabela 7 – Porcentagem dos elementos determinados por EDX em escória bruta, escória lavada, sal lixiviado e material imantado.	46
Tabela 8 – Fases cristalográficas de cada amostra analisada por DRX.....	50
Tabela 9 – Aplicações dos materiais caracterizados.	51

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
2 OBJETIVOS	13
2.1 Geral	13
2.2 Específicos	13
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
3.1 Processo de obtenção do alumínio secundário	14
3.2 Escória de alumínio secundário	15
3.3 Aplicação de escória na área de materiais	17
3.4 Métodos e técnicas de caracterização de materiais	18
3.4.1 Umidade	18
3.4.2 Granulometria.....	19
3.4.3 Massa específica.....	20
3.4.4 Análise instrumental por espectroscopia de raios x.....	21
3.4.4.1 Energia Dispersiva de Raios x (EDX).....	21
3.4.4.2 Difração de raios X (DRX).....	23
4 METODOLOGIA	25
4.1 Obtenção da amostra	25
4.2 Preparo da amostra.....	27
4.3 Caracterização granulométrica e físico-química da amostra.....	27
4.3.1 Teor de umidade	28
4.3.2 Análise granulométrica.....	28
4.3.3 Análise gravimétrica.....	30
4.4 Processo de lixiviação.....	32
4.5 Análise instrumental	32
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	35
5.1 Teor de umidade.....	35
5.2 Granulometria	36
5.3 Gravimetria.....	40
5.4 Lixiviação	42
5.5 Análise instrumental	43
5.6 Avaliação das potenciais aplicações dos materiais caracterizados.....	51
6 CONCLUSÃO	52
7 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS.....	53
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	54

APÊNDICE	59
APÊNDICE A	59
APÊNDICE B –	59
APÊNDICE C	60
APÊNDICE D	60

1 INTRODUÇÃO

Durante as últimas décadas, a preocupação com a reciclagem de materiais tornou-se parte da vida cotidiana. A reciclagem faz parte dos princípios de desenvolvimento sustentável, pois preserva os recursos naturais, apresenta fonte alternativa de matéria-prima, economiza recursos financeiros, contribui com a vida útil de aterros sanitários, bem como para a conscientização ambiental da população. No caso de recursos não renováveis, como metais, a reciclagem também prolonga o período necessário para esgotar este recurso (BLOMBERG; SÖDERHOLM, 2009).

Sendo assim, o alumínio (Al) é um dos metais mais amplamente utilizados com alto potencial de reciclagem devido à extração intensiva de energia do Al primário (NORGATE; JAHANSHAH; RANKIN, 2007) ao alto valor econômico e à grande escala de sucata produzida (LOGOŽAR; RADONJIĆ; BASTIČ, 2006). O alumínio primário é derivado da bauxita, um tipo de minério encontrado na superfície do solo em regiões tropicais e subtropicais. Esse minério é tratado quimicamente por um método chamado processo Bayer, produzindo alumina. Essa alumina é então fundida pelo processo Hall-Héroult, onde é dissolvida requerendo quantidades significativas de eletricidade transformando-se em alumínio líquido (AMC, 2024). Contudo, a crescente demanda global por Al levou à importância do manejo sustentável do Al secundário.

Sabe-se que existem mais de 450 ligas registradas com diferentes valores de composição (DAVIS, 1998). Essas ligas têm aplicações em diferentes indústrias, como transporte, embalagem, construção civil, condutores elétricos, etc. A quantidade limitada de ferro (Fe) que pode estar presente nos diferentes tipos de ligas de Al tornou uma das principais limitações para se obter Al secundário de alta qualidade (PARASKEVAS et al., 2015). Por serem metais secundários de forma processada tendem a ser mais baratos quando comparados ao metal primário, pois os custos de exploração, mineração, refino primário e energia são por ora inexistentes ou menores.

O Al reciclado é muitas vezes um substituto potencial para o metal primário, onde a sucata é fundida e o metal é purificado após a adição de sais escorificantes (NaCl e KCl), propiciando a recuperação do alumínio metálico presente, ou seja, livre de impurezas. Então propriedades metálicas (ou seja, ductilidade, condutividade, maleabilidade etc.) não são perdidas quando o metal é reutilizado (GAUSTAD; OLIVETTI; KIRCHAIN, 2012).

A indústria de fundição, ao mesmo tempo em que contribui para a sociedade atendendo

a demanda da reciclagem de sucata metálica, gera uma série de resíduos potencialmente contaminantes. Entre estes, está a escória de alumínio, um dos principais resíduos resultantes do processo de fusão do alumínio, oriunda da reação química que ocorre entre o metal líquido e a atmosfera inerte (MENDES MORAES et al., 2010), classificadas pela NBR 10004 como resíduo Classe IIA-não-inerte (ABNT NBR 10004, 2004).

Em geral, este resíduo representa mais de 4% da produção total de alumínio primário e 20% da produção secundária (GUTIERREZ et al., 2016). Embora a composição exata da escória de alumínio dependa da liga que está sendo fundida e dos parâmetros do processo de reciclagem, pode ser classificada em três tipos: escória branca, escória preta e torta de sal (GÓMEZ-GÓMEZ et al., 2018).

Apesar de ser um resíduo, a escória de alumínio é considerada um material de valor, principalmente devido ao seu alto teor de alumínio metálico, que pode ser ainda recuperado por diferentes processos (DAVID; KOPAC, 2013). Além disso, possui outros compostos que o tornam adequado para outras aplicações, tais como: fabricação de cimento de aluminato de cálcio (EWAIS et al., 2009), obtenção de materiais compósitos (IBARRA CASTRO et al., 2009), fabricação de refratários (YOSHIMURA et al., 2008) reforço de materiais compósitos (KEVORKIJAN, 1999), membranas cerâmicas (XAVIER, 2022) e síntese de diferentes compostos (KIM et al., 2009).

Dessa forma, este estudo apresenta o perfil da escória salina de uma indústria metalúrgica do estado de Alagoas, empregando análise granulométrica, massa específica e técnicas por difração de raios x (EDX) e por Energia dispersiva de raios x (EDX).

2 OBJETIVOS

2.1 Geral

Caracterizar a escória salina proveniente do processo de fundição de alumínio secundário para avaliação das potenciais aplicações na área de materiais.

2.2 Específicos

- Caracterizar e classificar a escória salina quanto à granulometria, massa específica, composição química e análise de fases cristalinas;
- Caracterizar o material obtido após processo de lixiviação da escória salina quanto à composição química e análise de fases cristalinas;
- Caracterizar o resíduo obtido da lixiviação da escória salina.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta sessão, serão abordados tópicos relativos ao processo de obtenção do alumínio secundário, o resíduo gerado no processo de fundição, denominado escória salina, e seus impactos ambientais, assim como os métodos e técnicas de caracterização dos materiais empregados neste estudo (análise granulométrica, DRX e EDX).

3.1 Processo de obtenção do alumínio secundário

O desenvolvimento sustentável passa a ser uma das principais preocupações no ambiente corporativo dos negócios, principalmente nas cadeias produtivas que causam maior impacto na oferta de condições básicas para a sobrevivência do planeta (NASCIMENTO, 2012). Logo, a redução do uso de recursos primários, a gestão e prevenção da poluição e as políticas de sustentabilidade tornaram-se pontos focais da civilização industrial moderna.

A produção de alumínio secundário configura-se pela reciclagem de fontes como sucatas de processo e comerciais, resíduos domésticos, folhas e revestimentos de alumínio, ou seja, vem de uma variedade de fontes, tornando-se ambientalmente e economicamente benéfica. Logo, essa reutilização pode ser vantajosa, resultando na conservação dos recursos naturais de alumínio e reduzindo os custos relacionados ao depósito de resíduos em aterros sanitários (PADAMATA; YASINSKIY; POLYAKOV, 2021), em consonância com os objetivos do desenvolvimento sustentável.

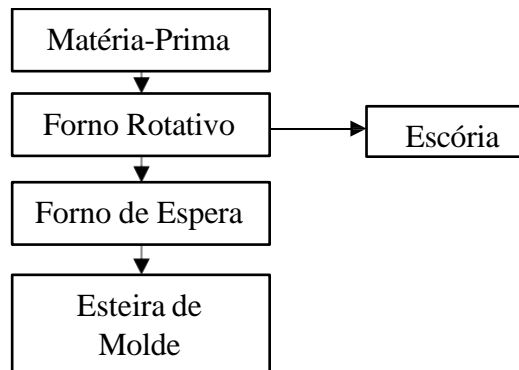
Os processos e gestões sustentáveis oriundos da produção de alumínio secundário envolvem, assim, a reciclagem de materiais pós-consumo e de pós-venda, com qualidade e preços competitivos, aliado a iniciativas de prevenção ao meio ambiente e em conformidade com a legislação ambiental. São consequências específicas da gestão de processos sustentáveis, que geram ganhos financeiros reais, a obtenção de materiais de qualidade com menores taxas de contaminações e a melhoria contínua dos processos produtivos de reciclagem (CALEGARI et al., 2023).

Esse tipo de produção tem duas operações essenciais: selecionamento de sucata e a fundição. A parte inicial de coleta é caracterizada pela seleção dos materiais ricos em alumínio, enquanto, o processo de fundição é composto pelas fases de fusão do metal, ou seja, transformação do metal sólido para o estado líquido, cujo produto é então bombeado para um forno de espera. Os fornos de espera são mais adequados para obter a liga final e para fazer quaisquer ajustes adicionais necessários para garantir que o alumínio atenda às especificações

do produto. Em seguida, ele é vazado para um molde pré-estabelecido e, quando o metal líquido se solidificar, tem-se uma peça em seu formato desejado (HERMENEGILDO, 2011).

A fundição é um processo simples e fácil, apresentado na Figura 1, sendo capaz de se obter formas diversas, até moldes complexos por diversos tipos de metais (BRADASCHIA, 1981).

Figura 1 – Síntese do processo para obtenção de alumínio secundário.



Fonte: Autora, 2023.

A empresa de fundição é de suma importância, pois ela representa o desenvolvimento de produtos como uma empresa de bens intermediários, fornecendo peças fundidas para diversas outras empresas (MACIEL, 2005) da área de metalurgia.

3.2 Escória de alumínio secundário

A geração de resíduos sólidos na indústria do alumínio está relacionada com seu desenvolvimento e demanda, assim como toda indústria. Esses rejeitos são, principalmente escórias, sobras de refratários, poeira e areia descartada (SOARES, 2003). A escória é um dos principais subprodutos produzidos durante a fabricação do alumínio e sua quantidade vai depender do tipo de material que será fundido. Nessa produção há também geração do pó de escória gerado por meio de uma poeira retida nos filtros de mangas, que compõe um sistema de extração de ar (GIL, 2005).

A escória branca vem da indústria primária, contém grande conteúdo de alumínio e sua cor é clara, o que dá origem ao seu nome. A escória negra é produzida durante a produção secundária de alumínio, ou seja, através da reciclagem em que são utilizados fluxos salinos como o cloreto de sódio (NaCl), cloreto de potássio (KCl) e criolita (Na_3AlF_6) que obscurecem a escória resultante. A torta de sal resulta da reciclagem da escória preta e branca, e neste processo também são usados sais que a tornam escura, ela tem menos quantidade de alumínio do que os outros

dois tipos de escória (GÓMEZ- GÓMEZ et al., 2018).

Estes aditivos químicos são utilizados para facilitar a formação da escória e sua retirada do forno (THOMAZI, 2022). O sal fundido forma uma camada na superfície do banho e protege o metal líquido da atmosfera reativa, facilitando a separação do metal, aumentando assim a recuperação do alumínio. Também aumenta a transferência de calor para o metal, evita a oxidação do metal e absorve contaminantes (TEIXEIRA, 2020).

Quanto maior for a presença dessas sujidades, mais rígida, pesada e de difícil remoção será esse produto, por outro lado, o contrário também é válido, quanto mais limpa for a matéria-prima menos escória será formada (THOMAZI, 2022). Outro fator preponderante na geração de escória é a composição química do metal, a presença de magnésio (Mg) na liga de alumínio facilita a geração de escória, pois o magnésio é sensível à oxidação. Outra observação nesse aspecto refere-se a área da fonte a ser fundida, pois a oxidação ocorre em maior grau quanto maior for a relação área/peso do material, ou seja, quanto menor a espessura do material a ser fundido, maior será a sua oxidação naquele banho e, conseqüentemente, maior será a geração de resíduos (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO, 2023).

Tecnologias como da oxi-combustão, pré-tratamento do material a ser carregado no forno, uso de fornos rotativos com capacidades elevadas (permite menor utilização de fundentes salinos) e beneficiamento da escória salina promovem uma redução de quase 50% da geração da escória no processo (GIL, 2007). Além disso, é preferível operar o forno em temperaturas de fusão na faixa de 700-750 °C (TSAKIRIDIS, 2012).

Após a fusão do alumínio e recuperação do metal, a escória salina é usualmente obtida no formato de um grande bloco (GIL, 2016), conforme mostrado na Figura 2. Trata-se de um material tóxico, rico em sais e óxidos, que demanda considerações ambientais quanto a sua destinação, podendo afetar diversos ecossistemas em caso de despejo ou manejo inadequado. Por ser um resíduo com alto teor de sais e alta reatividade com água, a destinação inadequada das escórias salinas pode acarretar diversos impactos ambientais, pois o resíduo remanescente, é considerado resíduo perigoso e uma rica fonte de alumínio (SOARES, et al., 2002, MAHINROOSTA, et al., 2018 , MATJIE, et al., 2005).

Figura 2 – Resíduo de escória da fundição.



Fonte: Autora, 2023.

3.3 Aplicação de escória na área de materiais

O sistema econômico atual, pautado na produção e consumo desenfreados, acarreta inúmeros impactos socioambientais. É preciso compreender e aceitar que o desenvolvimento sustentável é um caminho inovador e inteligente a se seguir. Para que a empresa seja ambientalmente responsável, é importante que invista em gestão ambiental, visando diminuir os impactos provocados pela produção, na forma de melhoria contínua.

Neste contexto, são desenvolvidas estratégias para minimizar a formação de escória durante a fusão de sucata de alumínio, como implementação de melhores práticas em fornos de produção, outrora usam-na em processos de reaproveitamento fazendo da produção de alumínio mais eficiente e sustentável, que são imprescindíveis para o futuro da indústria do alumínio.

Afim de evitar seu descarte excessivo ou danos drásticos aos ecossistemas, há estudos que trazem o beneficiamento da escória reagida com a argila tratada termicamente, podendo resultar em excelentes propriedades mecânicas, com a capacidade de manter uma alta porosidade, podendo vir a formar membranas cerâmicas com propriedades excelentes para aplicação em processos de separação de modo sustentável (XAVIER, 2022).

O grande número de pesquisas realizadas durante as últimas décadas com foco em encontrar uma solução eficaz para o tratamento de resíduos, permitiu que alguns desses resíduos se tornassem novas matérias-primas para outras indústrias (LÓPEZ-DELGADO, TAYIBI, 2012).

Uma dessas pesquisas incluem a utilização destes resíduos na fabricação de vidro, vitrocerâmica, boemita e aluminato de cálcio. Assim, os resíduos podem ser efetivamente recuperados como material de fonte secundária para várias indústrias (LÓPEZ-DELGADO, TAYIBI, 2012).

O tratamento da escória salina consiste na moagem e peneiramento da escória salina obtida para recuperação do alumínio metálico (HAZAR, et al., 2005). A fração mais fina é então submetida a um processo de lixiviação para dissolver e recuperar o teor de sal (LYSENKO, SEL'NITSYN, NALIVAIKO, 2017). O sal recuperado pode ser utilizado como fluxo para fusão de sucata de alumínio e em outros mercados (TSAKIRIDIS, 2012).

Em relação ao produto não metálico obtido da lixiviação de sal, a literatura reporta aplicação na indústria da construção (TSAKIRIDIS, 2012), na fabricação de membranas cerâmicas (XAVIER, 2022) e na obtenção de zeólita a partir da escória salina para remoção de metais por adsorção (PADILLA, et al., 2022).

3.4 Métodos e técnicas de caracterização de materiais

Na caracterização físico-química e composição química e cristalográfica de resíduos sólidos industriais são empregados métodos segundo as normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) e técnicas por DRX e EDX, respectivamente. Neste sentido, a análise dos parâmetros umidade e massa específica, bem como análise granulométrica e química são básicas na caracterização da escória salina oriunda de processo de fundição do alumínio secundário.

3.4.1 Umidade

Secagem é um método para avaliação da umidade de um material, definida por uma porcentagem em peso. Neste método, um forno ou estufa é usado para secar o material. Logo, através da pesagem a porcentagem do teor de umidade pode ser calculada (HALSAS, 2007).

Esse teor é comumente analisado pelo método gravimétrico que apresenta baixa dificuldade operacional e pode ser utilizado para múltiplos propósitos. Não se abstém em apenas quantificar o teor de umidade, mas também a capacidade de retenção de umidade (uma propriedade associada a outras propriedades, como textura, matéria orgânica, conteúdo ou estrutura e porosidade) em solos (FAO, 2023).

3.4.2 Granulometria

A composição granulométrica corresponde a proporção relativa das massas dos diferentes tamanhos dos grãos que constituem o agregado, conforme a ABNT NBR 17054 (2022). A porcentagem retida é a porcentagem em massa, com relação à amostra total do agregado, que fica retida numa determinada peneira, tendo passado pela peneira da série normal ou intermediária imediatamente superior (Tabela 1).

Tabela 1 – Série de peneiras normal e intermediária caracterizadas pela abertura da malha.

		Série Normal	Série Intermediária
Agregados Graúdos	↑	75 mm	-
		-	63 mm
		-	50 mm
		37,5 mm	-
		-	31,5 mm
		-	25 mm
		19 mm	-
		-	12,5 mm
		9,5 mm	-
		-	6,3 mm
Agregados Miúdos	↓	4,75	-
		2,36	-
		1,18	-
		600 μm	-
		300 μm	-
		150 μm	-

Fonte: ABNT NBR 17054 : 2022.

Ainda seguindo a norma brasileira, tem-se que a porcentagem retida acumulada compreende a soma das porcentagens retidas nas peneiras de abertura de malha maior e igual a uma determinada peneira, em que a curva granulométrica representa graficamente as porcentagens retidas acumuladas em cada peneira em relação à dimensão da abertura de sua

malha. A percentagem retida acumulada é representada em escala natural (ordenada) e a abertura da peneira em escala logarítmica (abscissa) (ABNT NBR 17054, 2022). A dimensão máxima característica é uma grandeza correspondente à abertura nominal, em milímetro, da malha da peneira da série normal ou intermediária, na qual o agregado apresenta uma percentagem retida acumulada, em massa, igual ou imediatamente inferior a 5%. Por fim, o módulo de finura representa a soma das percentagens retidas acumuladas em massa de agregado, em todas as peneiras da série normal, dividida por 100, trata-se de uma grandeza adimensional e deverá ser apresentado com aproximação de 0,01 (ABNT NBR 17054, 2022).

A literatura reporta que o alumínio se concentra na fração mais grosseira do material, enquanto os sais e a parcela não metálica se concentram na fração mais fina. Isso acontece já que o alumínio apresenta um comportamento plástico quando submetido à pressão e se mantém com granulometria superior; já os sais, devido ao seu comportamento frágil adquirem granulometria menores. Esse comportamento possibilita a recirculação deste material ao processo de reciclagem de alumínio, elevando-se a recuperação do alumínio e reduzindo-se o volume do rejeito a ser destinado a aterro (TSAKIRIDIS, 2012).

Ao considerar a escória salina removida do forno e resfriada adquire-se uma forma de bloco, e então é direcionada para o processo de cominuição. É nesse momento que o material tem sua granulometria reduzida, possibilitando a separação dos componentes, e então, posteriormente o material é selecionado a seco por peneiras, possibilitando, assim, a separação e recuperação da parcela concentrada em alumínio do material. Para haver uma liberação satisfatória do mineral é necessário que o minério seja reduzido a uma granulometria suficientemente fina. Nestas condições a fragmentação desenvolve-se por meio de três estágios, isto é, grossa, intermediária e fina ou moagem. Nos dois primeiros estágios, a fragmentação é realizada em britadores e no último estágio, em moinhos (LUZ et al., 2010). O material não concentrado é direcionado a lavagem para dissolução e separação dos sais, gerando uma polpa (GIL, KORILI, 2016).

3.4.3 Massa específica

Massa específica ou densidade é a razão entre o peso de um fluido e seu volume (PADILLA, et al., 2022). O ensaio para determinação da massa específica é padronizado no Brasil pela norma ABNT NBR 6508/84. Esse ensaio tem o objetivo de determinar a massa específica das partículas do solo e tem sido adotado para estudos de escória (THOMAZZI, 2022). Refere-se ao volume de sólidos de uma amostra de solo, sem levar em conta a sua

porosidade, uma vez que a norma estabelece para realizar esse ensaio o uso da massa de solo que passa na peneira de 4,8 mm (ABNT NBR 6508, 1984). A massa específica real do solo corresponde à massa dos grãos presentes no solo, desconsiderando os vazios. Ela é fundamental para o cálculo de índice de vazios, massa específica, umidade e demais índices físicos do solo.

3.4.4 Análise instrumental por espectroscopia de raios x

A espectroscopia de raios X, assim como a espectroscopia óptica, baseia-se em medidas de emissão, absorção, espelhamento, fluorescência e difração de radiação eletromagnética. Os métodos de fluorescência de raios x e de absorção de raios x são largamente utilizados para determinação qualitativa e quantitativa de todos os elementos da tabela periódica que possuem número atômico maior que o sódio (HOLLER, SKOOG e CROUCH, 2009).

Os raios x são constituídos por radiação eletromagnética de comprimento de onda curto, produzida pela desaceleração de elétrons de alta energia ou pela transição eletrônica de elétrons dos orbitais internos dos átomos. Embora seja possível excitar um espectro de emissão de raios x pela incorporação da amostra no alvo de um tubo de raios x, esta abordagem é extremamente inconveniente para muitos tipos de materiais. Assim, a excitação é geralmente provocada por irradiação da amostra com um feixe de raios x de um tubo de raios x ou de uma fonte radioativa. Os elementos presentes na amostra são excitados pela absorção do feixe primário e emitem suas próprias linhas características de fluorescência de raios x. Este procedimento é, então, apropriadamente chamado de método da fluorescência de raios x ou da emissão de raios x (HOLLER, SKOOG e CROUCH, 2009). Há dois tipos primários de espectrômetros: instrumentos de fluorescência de raios x de comprimento de onda dispersivo e de fluorescência de raios x de energia dispersiva (POTTS, ELLISB, KREGSAMERC, 2005).

Outra técnica de raios x amplamente aplicada na área de materiais é a difração de raios x, cujas medições são resultados da interferência construtiva entre os raios x e uma amostra cristalina (HOLLER, SKOOG e CROUCH, 2009).

3.4.4.1 Energia Dispersiva de Raios x (EDX)

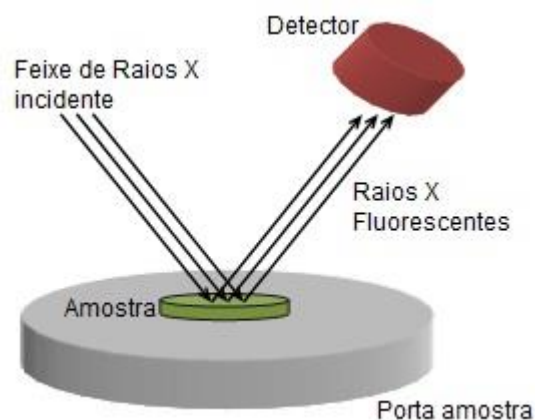
Um espectrômetro de raios x dispersivo de energia consiste de uma fonte policromática – que pode ser um tubo de raios x ou um material radioativo – um porta-amostras, um detector semicondutor e os vários componentes eletrônicos necessários à discriminação de energia, de acordo com a Figura 3 (JENKINS, 1999).

Uma vantagem dos sistemas dispersivos de energia é a simplicidade e ausência de partes

móveis nos componentes de excitação e de detecção do espectrômetro. Além disso, a ausência de colimadores e de um cristal difrator, bem como a proximidade entre o detector e a amostra, resultam em um aumento de energia que chega ao detector de 100 vezes ou mais. Essas características permitem o uso de fontes mais fracas, como os materiais radioativos ou os tubos de raios x de baixa potência, que são mais baratos e causam um menor dano à amostra. Geralmente, os instrumentos de energia dispersiva custam cerca de 20 a 25% do valor dos sistemas de comprimento de onda dispersivo. Sua principal desvantagem é sua baixa resolução em comprimentos de ondas mais longos do que 1\AA (HOLLER, SKOOG, CROUCH, 2009).

Este equipamento é usado para a determinação de um grande número de elementos, desde o sódio até o urânio, em amostras de muitos processos industriais, como exemplo a escória salina. Essa técnica também foi usada em trabalhos que visaram a caracterização da escória (TEIXEIRA, 2020) e (THOMAZZI, 2022).

Figura 3 – Energia dispersiva de raios x.



Fonte: Chemistry LibreTexts, 2024.

O espectro obtido nesse equipamento tem a abscissa expressa pelo número dos canais ou energia em keV. Cada ponto representa o número de contagens acumulada em uma das centenas de canais. Isso se trata de informações qualitativas e estas podem ser transformadas em dados quantitativos através da medida cuidadosa das alturas dos picos (HOLLER, SKOOG, CROUCH, 2009).

Esses instrumentos mais modernos são capazes de produzir análises quantitativas de materiais complexos com precisão maior ou igual àquela dos métodos químicos clássicos por via úmida (VAN GRIEKEN, MARKOWICZ, 2002).

Geralmente, o método de raios x não é destrutivo e são largamente aplicados para o

controle de qualidade na produção de metais e ligas, em análise de pinturas, moedas e outros objetos valiosos sem danificar a amostra. Além disso, essas análises podem ser feitas em amostras com tamanhos variáveis, a velocidade de análise em minutos. Em caso de aplicações nas análises durante a produção de metais e ligas, apresenta a vantagem de rapidez de resposta, sendo possível corrigir a composição da liga durante o processamento (HOLLER, SKOOG, CROUCH, 2009).

3.4.4.2 Difração de raios X (DRX)

Os métodos de absorção são análogos aos procedimentos de absorção ópticos, nos quais a atenuação de uma banda ou uma linha de raios x é a variável analítica. A seleção do comprimento de onda é feita com um monocromador ou por uma técnica que utiliza um filtro, alternativamente, pode ser usada a radiação monocromática da fonte radioativa. Devido à largura dos picos de absorção de raios x, os métodos diretos de absorção geralmente são úteis apenas quando se quer determinar um único elemento, que possui um número atômico alto, em uma matriz que contém apenas elementos leves (HOLLER, SKOOG, CROUCH, 2009).

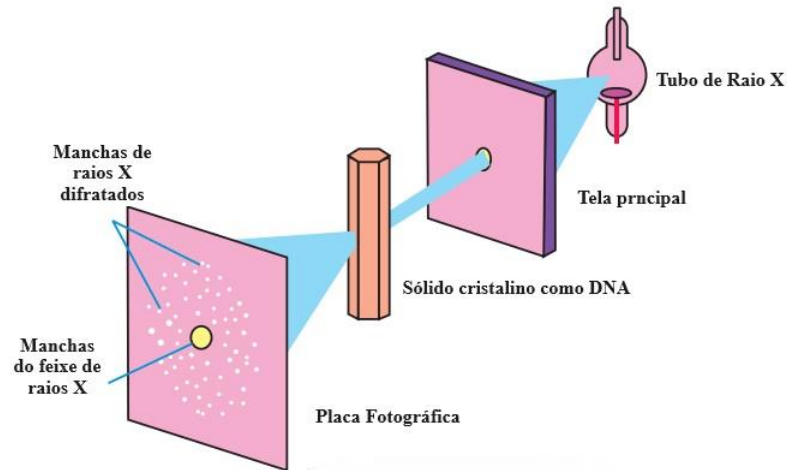
Desde a sua descoberta, em 1912, por von Laue, a difração de raios X tem fornecido informações muito importantes para a ciência e para a indústria. Por exemplo, muito do que se conhece sobre o arranjo e a distribuição dos átomos em materiais cristalinos foi determinado a partir de estudos de difração. Além disso, esse tipo de estudo leva a uma melhor compreensão das propriedades físicas dos metais, materiais poliméricos, materiais compósitos e outros sólidos (HOLLER, SKOOG, CROUCH, 2009).

A difração de raios x também é uma maneira prática e conveniente para a identificação qualitativa de compostos cristalinos. O método de difração de raios x de sólidos é o único método analítico capaz de fornecer informações qualitativas e quantitativas sobre os compostos presentes em uma amostra sólida de diferentes complexidades (HOLLER, SKOOG, CROUCH, 2009).

Nas análises (DRX) os raios x costumam incidir na amostra e eles são difratados pelos átomos na estrutura da amostra que virão a formar os difratogramas. Eles são essenciais para interpretação da estrutura cristalina dos materiais. Sua representação gráfica é composta pelo eixo horizontal que geralmente representa o ângulo de difração e o eixo vertical a intensidade dos raios difratados. A altura deles está relacionada à quantidade de difração em cada ângulo. A identificação de fases é característica do difratograma, como cada substância cristalina possui um padrão único de difração de raios x, os métodos de raios x de sólidos são recomendados

para identificação qualitativa. Assim, se for encontrado um padrão coincidente entre uma amostra desconhecida e uma amostra conhecida, a identificação está confirmada (HOLLER, SKOOG, CROUCH, 2009). A técnica empregada nesse tipo de análise pode ser vista na Figura 4 a seguir.

Figura 4 – Difração de raios x.



Fonte: Letstalkacademy, 2024.

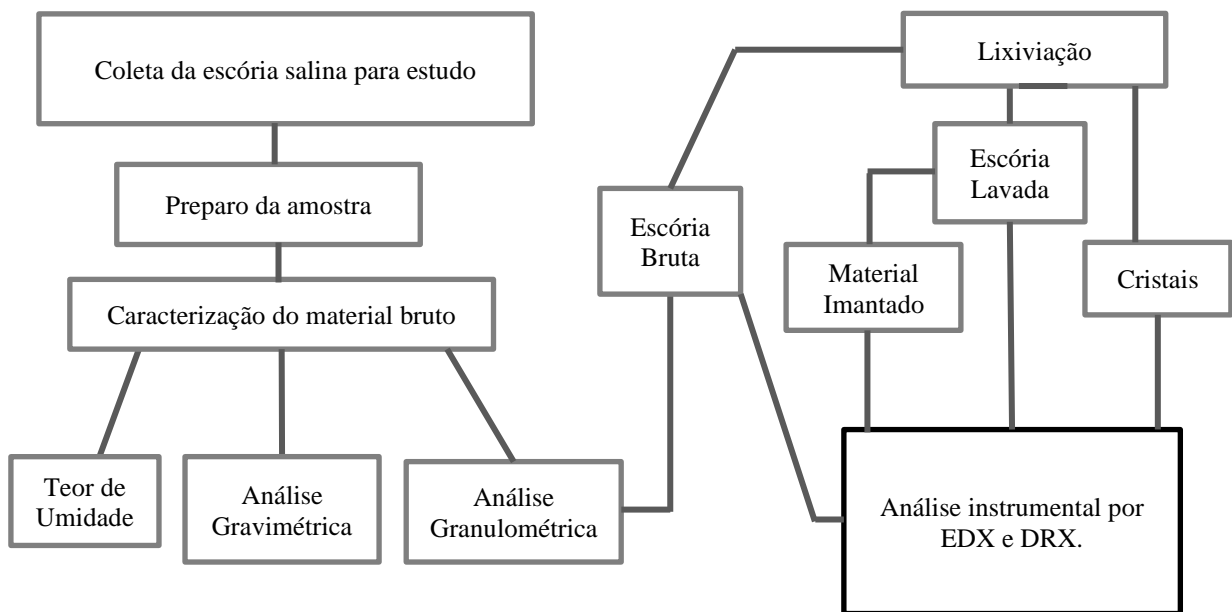
4 METODOLOGIA

A escória salina foi coletada em uma empresa de fundição de alumínio secundário do estado de Alagoas e armazenada até preparo da amostra para as análises.

Todos os ensaios de umidade, massa específica e granulometria foram realizados no Laboratório de Estruturas e Materiais (LEMA) e no Laboratório de Geotecnia (LABGEO), ambos do Centro de Tecnologia da UFAL (CTEC). As análises por DRX e EDX foram realizadas em parceria com o LUMIAM (Laboratório de Materiais Luminescentes e Estudos Ambientais) do Instituto de Química e Biotecnologia da UFAL.

A Figura 5 a seguir mostra o fluxograma da metodologia empregada neste estudo de caracterização da escória salina do processo de produção de alumínio secundário.

Figura 5 – Fluxograma da metodologia desenvolvida.



Fonte: Autora, 2023.

4.1 Obtenção da amostra

A escória analisada é proveniente da purga do forno rotativo que sempre é direcionada a uma caixa metálica por um dia para resfriamento. Em seguida, este material é removido dessa caixa e quebrada adquirindo uma forma mais triturada semelhante a pedregulhos, como pode ser visto na Figura 6 que, por fim, é transferida à caçamba de descarte em aterro sanitário. Assim, a amostra foi de uma caçamba no mês de setembro de 2023.

Figura 6 – Escória salina quebrada.



Fonte: Autora, 2023.

Tratando-se de todo o material adentrado no forno durante o processo de refusão do alumínio, abrangendo os lotes 636/23, 637/23, 638/23 e 639/23, visto que essa numeração é designada a cada procedimento operacional realizado no processo diário, que culminou na soma de 37.680 kg de material indo desde os sais a sucata, que veio a gerar 11.248 kg de escória salina, ou seja, praticamente 30% de geração semanal, quando comparada a quantidade usada no processo para se obter 26 t de produto acabado. As matérias-primas usadas nesses lotes que vieram originar a escória em estudo foram chaparia de alumínio, borra terceiros, lata de alumínio, perfil com ferro, limalha, bloco selecionado, cloreto de sódio (NaCl), cloreto de potássio (KCl) e criolita (Na_3AlF_6).

Sabendo-se disso, realizou-se a coleta por meio de uma amostragem composta (Figura 7, a) numa caçamba armazenadora com o auxílio de EPI's e pás. No fim, essa coleta resultou em 7 kg de amostra bruta (Figura 7, b), ou seja, aquela proveniente do forno sem nenhum tratamento específico. Essa amostra foi armazenada em um recipiente hermético de polipropileno para que não ocorresse nenhuma alteração em sua composição ao longo do transporte e estudo.

Figura 7 – Escória bruta amostrada e coletada.



Fonte: Autora, 2023.

4.2 Preparo da amostra

O pré tratamento da escória salina bruta consistiu das operações de homogeneização e quartejamento, até a obtenção da amostra final, com massa e granulometria adequadas para a realização dos ensaios necessários.

Repetindo essa operação três vezes e descartando parte desse material bruto, obteve-se por fim 2,515 kg de amostra laboratorial. A partir desta amostra homogênea preparada, essa massa foi dividida em três denominadas por amostras de escória bruta (EB1, EB2 e EB3).

4.3 Caracterização granulométrica e físico-química da amostra

Inicialmente, a amostra laboratorial separada foi analisada quanto à umidade e granulometria. Cominuindo toda a amostra seca e descartada realizou-se a moagem e uma nova caracterização quanto a granulometria para obtenção da massa específica. E dessa mesma escória reunida outras análises foram realizadas após processo de lixiviação pelas técnicas analíticas de DRX e EDX . A seguir, são descritos métodos adotados em cada ensaio e análise de caracterização da escória salina.

4.3.1 Teor de umidade

Para a determinação de umidade nas amostras EB1, EB2 e EB3, foi adotado o método de secagem até massa constante, de acordo com o emprego da Equação 1 a seguir (XAVIER, 2022).

$$Umidade (\%) = \frac{M_i - M_f}{M_f} \times 100 \quad (\text{Equação 1})$$

Onde,

M_i – Massa inicial das amostras denominadas por x, y e z; e

M_f – Massa final, decorrido um tempo de secagem na estufa.

As amostras de escória bruta laboratorial foram acondicionadas em papel alumínio dentro de uma forma retangular metálica, conforme apresentado na Figura 8. Estas amostras permaneceram na estufa da marca Lucadema e modelo luca-82/480 a 93°C por um período mínimo de 24 h até massa constante. Para as pesagens das amostras foi empregada a balança de precisão da marca Marte científica no modelo AD3300.

Figura 8 – Secagem das amostras de escória bruta em estufa.



Fonte: Autora, 2023.

4.3.2 Análise granulométrica

As amostras EB1, EB2 e EB3 foram empregadas na determinação da composição granulométrica após processo de secagem, referindo-se a escória antes da moagem em três ensaios distintos (Ensaio 1, Ensaio 2 e Ensaio 3). Em virtude da pouca quantidade de material com granulometria pretendida, resolveu-se cominuir toda a escória salina seca resultante do quartamento inicial, para 4 ensaios distintos (Ensaio 1, Ensaio 2 e Ensaio 3 e Ensaio 4). Essa amostra foi cominuída em moinho de bolas da marca Solab modelo SL-36/I20 operado para desagregar os torrões resistentes, e posteriormente avaliar a tendência granulométrica da escória

moída, denominada escória após moagem. Ambas utilizou-se a norma ABNT NBR 17054 : 2022 para agregados e metodologia utilizada por Thomazi (2022), com algumas adaptações, para escórias, devido a alta resistência a quebra, conforme mostrado na Figura 9 abaixo.

Figura 9 – Escória moída em moedor de bolas.



Fonte: Autora, 2023.

Na análise granulométrica de ambas as amostras, foi adotado o método baseado no descrito por Thomazzi (2022). Para isso, foi empregado um agitador elétrico de peneiras Tyler mesh com malha da peneira de série normal e intermediária, tais como: 25,4; 19,1; 12,5; 9,52; 6,30; 4,76; 2,38; 1,19; 0,59; 0,297 e 0,149 mm. A fração retida foi pesada em uma balança de precisão da marca Marte científica no modelo AD3300. Vale ressaltar que a escória após moagem encontrava-se muito fina e nesse caso foram usadas: 2,36 mm; 1,18 mm; 0,6 mm; 0,3 mm; 0,15 mm e o fundo.

O procedimento consistiu na pesagem da escória seca e fria e diposta no sistema de peneiras, em triplicata. Como o agitador de peneiras não suportava o encaixe de 12 peneiras, cada amostra ficou sob agitação por 24 minutos. A cada ciclo encerrado, o material retido nas malhas foi pesado para posterior avaliação da porcentagem de massa retida a cada abertura de peneira, bem como a variação das porcentagens retidas, massa retida acumulada, média das massas retidas e o módulo de finura.

Para o cálculo da porcentagem de massa retida realizado em cada abertura da peneira para ambos os casos de antes e pós moagem, usou-se a Equação 2 de acordo com a norma ABNT NBR 17054/22, disposta abaixo.

$$\text{Massa Retida (\%)} = \frac{\text{Massa Retida Peneira}}{\text{Massa Total Trabalhada}} \times 100 \quad (\text{Equação 2})$$

O cálculo da variação das porcentagens retidas consiste no módulo das diferenças das massas retidas de cada ensaio realizado. Por exemplo, em um estudo em triplicata a diferença será o módulo calculado das diferenças desses ensaios. A média das massas retidas foi calculada por meio de média simples, como demonstrado na Equação 3.

$$\text{Média Massas Retidas (\%)} = \frac{\sum \text{Massa Retida dos Ensaios}}{\text{Quantidade de Ensaios}} \quad (\text{Equação 3})$$

Já com a massa retida acumulada, o cálculo foi baseado em valores acumulativos ao longo das massas retidas nas peneiras, e o módulo de finura foi calculado conforme determina a norma ABNT 17054 : 2022.

4.3.3 Análise gravimétrica

O ensaio de massa específica foi realizado seguindo protocolo do LABGEO, que segue padrão da norma NBR 6508/84 de determinação da massa específica dos grãos de solo. Para esse ensaio, foram necessários picnômetros de 500cm³ calibrado a 20°C; termômetro graduado; balança; bomba de vácuo; estufa; aparelho de dispersão com hélices substituíveis e copo munido de chicanas, ou outro dispositivo capaz de produzir dispersão eficiente da amostra; cápsulas e espátulas.

As amostras para análise gravimétrica consistiram em um *pool* de amostra da escória moída, ou seja, 50g dos passantes das peneiras de 0,59 mm; 0,297 mm; 0,149 mm e o fundo. Obtendo-se uma amostra de 200 g.

O ensaio de massa específica foi procedido pesando-se 50,0 g de escória proveniente do *pool*, realizou-se em triplicata. Às amostras foi adicionado água destilada em quantidade satisfatória para obtenção de uma pasta fluida, deixando-a descansar por 24h. Em seguida, cada recipiente contendo essa mistura foi mantida em um dispensor por 15 minutos. Após sua dispersão esse conteúdo foi direcionado para o picnômetro, onde juntou-se água até metade do seu volume. Por conseguinte, para extrair o ar ainda contido na amostra e não interferir nos resultados, foi necessário a realização do vácuo no picnômetro (Figura 10).

Figura 10 – Representação da extração de ar nas amostras por meio da bomba de vácuo.



Fonte: Autora, 2023.

Como parte da verificação de ar presente, ainda nas partículas, foi adicionado água destilada até o gargalo e fez-se o vácuo novamente. Após isso, o picnômetro foi posto em repouso e mais uma vez foi preenchido com água destilada até próximo da marca de calibração, enxugando a parte externa do picnômetro. Assim sendo, pesou-se o picnômetro, escória e água, ou seja, a mistura preparada e, em seguida, aferiu-se sua temperatura por meio do termômetro mergulhado na mistura.

Com esse valor conhecido, o peso do picnômetro com água foi obtido anteriormente. A cápsula usada, para cada amostra, foi pesada e ao transferir a solução contida no picnômetro para essa cápsula a mesma foi pesada novamente, onde passou pelo processo de secagem em estufa a 105°C até evaporação completa da água, durando 36h. Com isso pesou-se a cápsula novamente para resultar no valor obtido de seco. E para o cálculo da massa específica usou-se a Equação 4, abaixo.

$$\delta = \frac{P_s}{P_s + P_a - P_{as}} \times \gamma_a \quad (\text{Equação 4})$$

Onde:

δ – massa específica dos grãos de amostra, em g/cm³;

P_s – peso em g da amostra seca em estufa a 105 °C;

P_a – peso em g do picnômetro cheio d'água à temperatura do ensaio;

P_{as} – peso em g do picnômetro com a amostra e água;

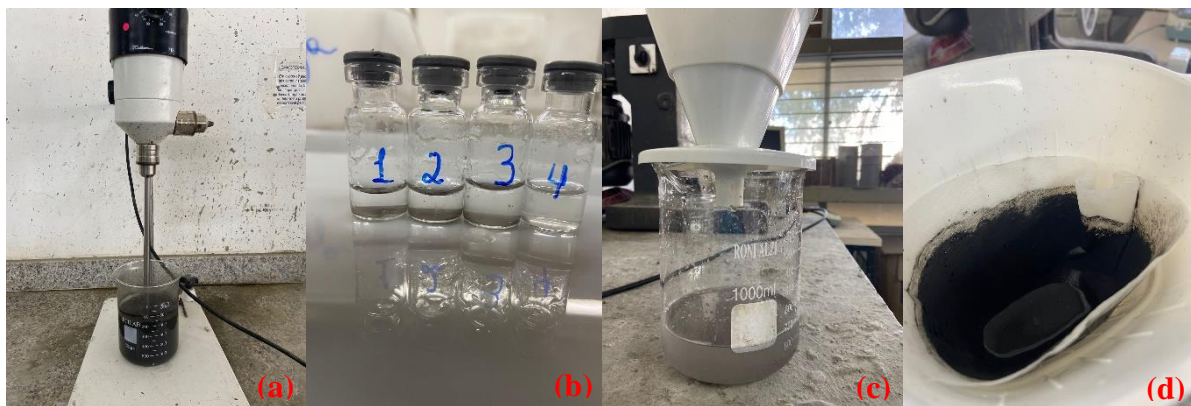
γ_a – massa específica da água (g/cm³) à temperatura do ensaio.

4.4 Processo de lixiviação

O mesmo *pool* de amostras obtido pelas granulometrias inferiores a 0,59 mm foi empregado para ensaio de lixiviação, conforme adaptação da metodologia descrita por Teixeira (2020). Pesou-se 50,0 g, em triplicata, e adicionou-se 250 mL de água destilada sob agitação por 30 minutos em um agitador de bancada do modelo 713, marca Fisatom, a 50 rpm, (Figura 11 a). Foram coletadas alíquotas do sobrenadante a cada 10 minutos (Figura 11 b), com um auxílio de uma pipeta de Pasteur. Cada 1 mL coletado foi transferido para *vials* previamente rotulados. Decorrido o tempo de agitação, a mistura foi filtrada em papel de filtro (Figura 11, c e d) e outra alíquota final foi retirada do sobrenadante. No total, foram 12 alíquotas coletadas e acondicionadas, sem tampa, na estufa, por um período de 4h a 100°C aproximadamente. O material retido no filtro de papel (escória lavada) foi coletado e também destinado a estufa para secagem por 30 minutos.

Os materiais obtidos após o processo de evaporação resultaram em cristais que foram cominuídos, macerados e armazenados para análise (sal lixiviado). A partir da escória lavada, foi separado um material por imantação com ímã de neodímio, denominado material imantado para posterior análises por espectroscopia.

Figura 11 – Compilado do procedimento realizado na lixiviação.



Fonte: Autora, 2023.

4.5 Análise instrumental

Para as análises por difração de raios x (DRX) foi empregado o equipamento difratômetro de raios x de modelo XRD-7000 da Shimadzu (Figura 12). Já para o espectrômetro de fluorescência de raios x, por dispersão de energia (EDX) o modelo usado foi EDX-7000 da Shimadzu (Figura 13).

Figura 12 – DRX.



Fonte: Autora.

Figura 13 – EDX.

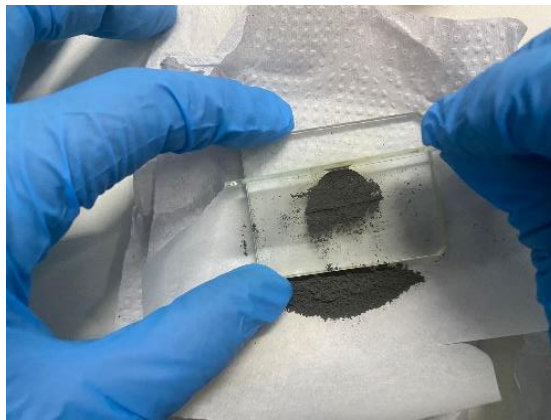


Fonte: Autora, 2023.

Para ambos os ensaios uma amostra de cada matriz (escória bruta, escória lavada, sal e material removido por imantação) foi acondicionada num porta amostra e no filme de polipropileno para as análises por DRX e EDX, respectivamente, como demonstrado nas Figuras 14 e 15.

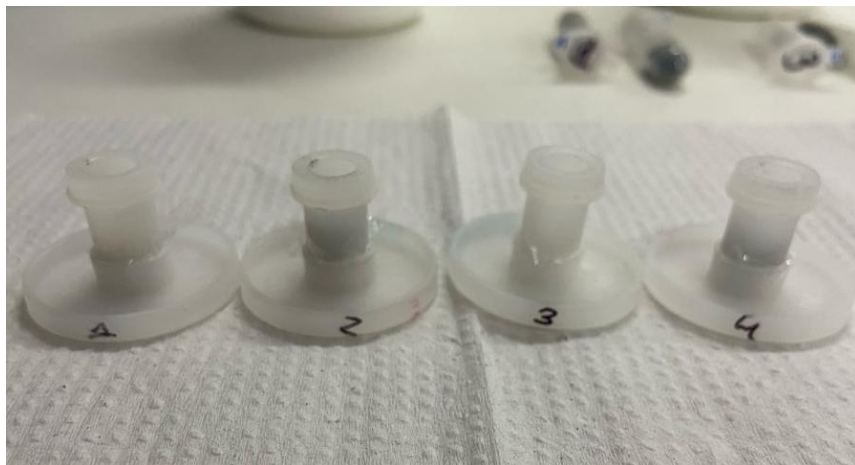
As análises de cada matriz foram realizadas de forma única, pois o equipamento suporta várias amostras, concomitantemente.

Figura 14 – Amostra sendo preparada para a leitura no DRX.



Fonte: Autora, 2023.

Figura 15 – Amostra sendo preparada para a leitura no EDX.



Fonte: Autora, 2023.

Para o tratamento dos dados obtidos por DRX e EDX, foram empregados os softwares *Xpert High Score* e *Pcedx*, respectivamente. Na estética dos gráficos plotados usou-se o *Origin*.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O desenvolvimento dos métodos descritos na metodologia proporcionou a caracterização da escória salina proveniente da fundição de alumínio secundário. Esse conhecimento foi obtido por meio da avaliação de parâmetros como umidade, granulometria e massa específica, além de análises da composição química e fases presentes empregando as técnicas analíticas por energia dispersiva e difração de raios x.

5.1 Teor de umidade

A Tabela 2 apresenta o teor de umidade na escória salina bruta.

Tabela 2 – Massa ($\bar{X} \pm s$) e teor de umidade (%) na escória salina bruta oriunda do processo de recuperação de alumínio em sucatas.

Escória salina Bruta	Amostras (g)			Média	Desvio padrão	Umidade (%)
	EB1	EB2	EB3			
Antes secagem	849,89	889,53	812,34	850,59	38,60	0,33
Após secagem	843,97	888,4	811,05	847,81	38,82	

Fonte: Autora, 2023.

Como já era de se esperar houve uma redução no peso das amostras, mas o teor de umidade foi praticamente a mesma que a encontrada por Oliveira (2018), 0%, ainda assim trata-se de uma amostra seca. A Figura 16 apresenta a imagem da escória salina após secagem em estufa.

Figura 16 – Escória salina após secagem em estufa por 24 h.



Fonte: Autora, 2023.

5.2 Granulometria

Após secagem da escória salina, foi realizada a análise granulométrica de acordo com a norma ABNT 17054/22, para caracterizar a distribuição do tamanho das partículas do resíduo da indústria de alumínio secundário.

Durante o procedimento, o foco estava na determinação da porcentagem de massa retida em cada abertura do conjunto de peneiras. Esse valor indicou a quantidade de material que permaneceu em cada malha após o peneiramento realizado durante 24 minutos no agitador de peneiras. A Tabela 3 mostra a composição granulométrica e módulo de finura da escória salina. Esse módulo visa quantificar as diferentes quantidades de partículas em uma amostra granular de material.

Tabela 3 – Composição granulométrica e módulo de finura da escória antes da moagem.

Abertura da Peneira (mm)	Massa Retida (%)			Desvio Padrão	Variação das porcentagens retidas ≤ 4%	Média das Massas Retidas (%)	Massa Retida Acumulada (%)
	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3				
25	4,81	0,00	2,86	2,42	1,95	2,56	2,56
19	5,24	8,27	11,40	3,08	2,12	8,30	10,86
12,5	7,67	6,61	11,21	2,41	3,07	8,50	19,36
9,5	5,68	6,60	6,27	0,47	6,01	6,18	25,54
6,3	12,52	13,79	11,34	1,22	14,97	12,55	38,09
4,75	8,66	8,65	7,39	0,73	9,93	8,23	46,33
2,36	14,15	16,03	12,46	1,79	17,73	14,21	60,54
1,18	0,35	0,78	0,58	0,22	0,55	0,57	61,11
0,6	17,17	16,24	13,43	1,95	19,99	15,62	76,72
0,3	6,97	6,29	6,04	0,48	7,22	6,43	83,15
0,15	7,35	6,78	5,54	0,92	8,58	6,56	89,71
Fundo	9,01	7,92	9,70	0,90	7,23	Módulo de Finura: 4,54	

Fonte: Autora, 2023.

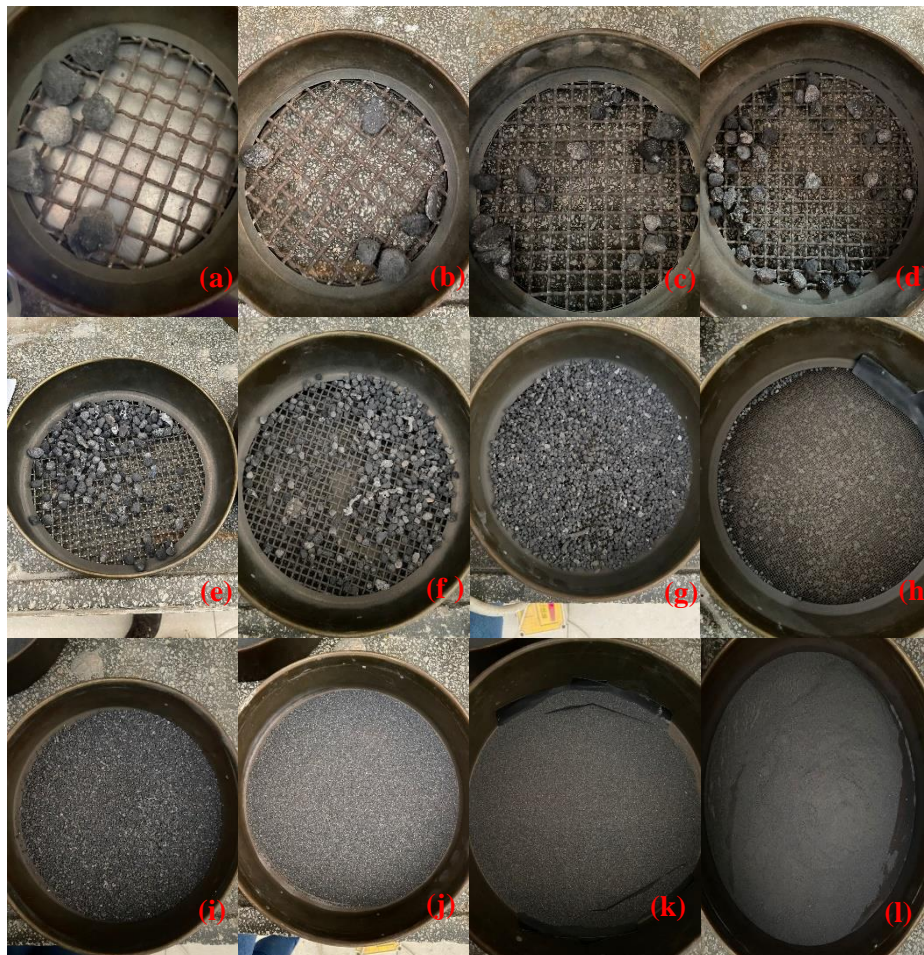
Neste contexto, o cálculo do desvio padrão foi realizado para avaliar a precisão do ensaio conduzido. Conforme esperado, o desvio padrão foi maior para as maiores aberturas de peneira, mostrando a heterogeneidade do material.

O módulo de finura é um parâmetro essencial para descrever a finura global de uma amostra de agregado. Embora o módulo de finura seja tradicionalmente empregado em caracterizações de materiais como areia ou brita (ABNT NBR 7211, 2022), a sua aplicação à

escória foi realizada visando compreender o comportamento peculiar desse material. A relevância desse estudo é evidente, uma vez que a finura da escória pode exercer uma influência direta na resistência e durabilidade em potenciais aplicações na área de materiais.

Essa abordagem permitiu demonstrar que a escória pode ser classificada com uma finura elevada, assemelhando-se a uma areia mais fina, de alta porosidade. A Figura 17 apresenta a massa retida em cada ensaio realizado nas suas respectivas peneiras.

Figura 17 – Massa retida obtida em cada abertura de peneira. (a) 25 mm; (b) 19 mm; (c) 12,5 mm; (d) 9,5 mm; (e) 6,3 mm; (f) 4,75 mm; (g) 2,36 mm; (h) 1,18 mm; (i) 0,6 mm; (j) 0,3 mm; (k) 0,15 mm; (l) fundo.



Fonte: Autora, 2023.

Para as etapas subsequentes do trabalho, tornou-se necessário obter granulometrias menores. Para alcançar esse objetivo, foi imprescindível desagregar os torrões presentes na escória bruta. Dado que a escória não se quebrava facilmente, o material foi cominuído em um moinho de bolas. O primeiro impacto notável foi a evidente diferença visual na composição

granulométrica antes e após o processo de moagem. Os resultados obtidos foram organizados na Tabela 4, a qual representa essa transformação granulométrica.

Tabela 4 – Composição granulométrica e módulo de finura da escória após moagem.

Abertura da Peneira (mm)	Massa Retida (%)				Desvio Padrão	Variação das porcentagens retidas $\leq 4\%$	Média das Massas Retidas (%)	Massa Retida Acumulada (%)
	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Ensaio 4				
2,36	6,77	9,10	29,22	35,13	14,23	9,97	20,06	20,06
1,18	0,45	0,21	0,48	0,81	0,25	0,32	0,49	20,55
0,6	4,99	9,54	12,79	21,85	7,13	5,47	12,29	32,84
0,3	2,30	4,77	5,54	9,58	3,02	3,04	5,55	38,38
0,15	2,42	5,25	4,90	9,68	3,02	2,89	5,56	43,95
Fundo	3,56	7,05	9,18	15,93	5,21	3,86	Módulo de Finura: 1,55	

Fonte: Autora, 2023.

Ao comparar os mesmos valores de abertura de malha antes (Figura 18, a) e após a moagem (Figura 18, b), observou-se um aumento significativo no módulo de finura, passando de 1,39 para 1,55. Esse aumento indica uma alteração na textura e tamanho das partículas, evidenciada abaixo, onde apresenta essa comparação visual.

Figura 18 - Comparação visual antes e após moagem.



Fonte: Autora, 2023.

A justificativa para esse aumento no módulo de finura pode ser associada à massa retida acumulada de partículas na amostra após o processo de moagem. Além disso, a obtenção de uma maior uniformidade nas partículas é outro fator indicativo, sugerindo uma distribuição

mais equilibrada ao longo das peneiras. A moagem desempenhou um papel crucial ao facilitar a remoção manual de fragmentos ferrosos que não se fundem durante o processo e estavam aglomerados no bolo de escória, conforme ilustrado na Figura 19.

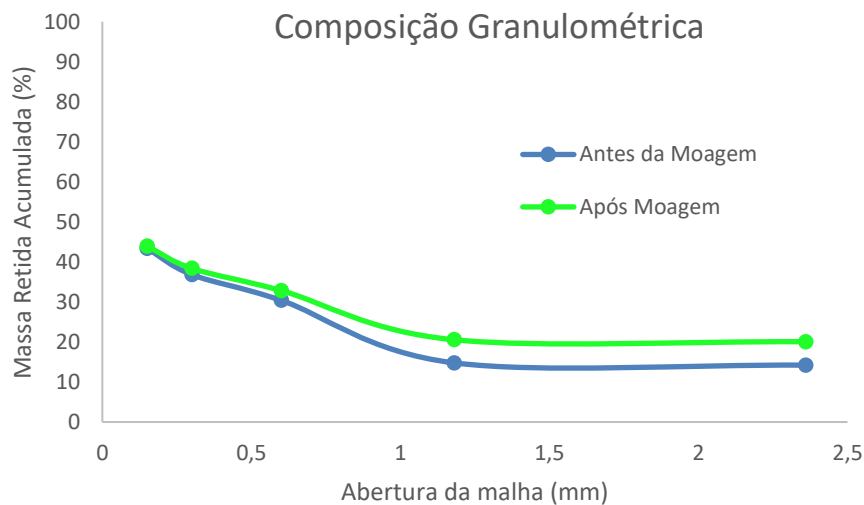
Figura 19 – Pedacos metálicos obtidos após a moagem.



Fonte: Autora, 2023.

Os resultados discutidos são corroborados pela Figura 20, que traz uma representação visual dessa comparação entre a operação de moagem e suas consequências. Essa imagem destaca as mudanças vistas na granulometria nas últimas peneiras, gerando percepções sobre o impacto do processo de moagem nas características físicas do material.

Figura 20 – Composição granulométrica da escória bruta antes e após moagem.



Fonte: Autora, 2023.

Essa análise comparativa foi fundamental para compreender como as mudanças na granulometria acabam influenciando na aplicabilidade e desempenho do material em contextos diferentes.

5.3 Gravimetria

Conforme a norma ABNT NBR 6508/84, para o ensaio da massa específica devem ser adotados materiais passantes na peneira de 4,8 mm. O *pool* de amostra de escória foi interessante, pois ao trabalhar com os passantes e retidos nas peneiras com granulometrias distintas, abrangeu uma melhor possibilidade de eficiência do ensaio procedido, em caso negativo o seu resultado poderia ser implicado por essa razão.

Durante a adição de água destilada para o ensaio de massa específica, foi observada a formação de muitas bolhas nos recipientes, Figura 21. Ao analisar escórias salinas e os processos atuais de beneficiamento, Gil e Korili (2016) apontaram que a composição do material rejeitado no forno de fundição e a atmosfera oxidante presentes em locais de estocagem propiciam componentes do rejeito passíveis de reagir com a água e produzir gases. As possíveis emissões gasosas oriundas das escórias salinas que resultam do contato com água, são de grande preocupação ambiental. Os componentes nas escórias reagem com a água e geram gases odoríferos, venenosos e/ou desagradáveis. Segundo Xiao (2005) onde afirma que o alumínio metálico libera hidrogênio (H_2) quando em contato com água; metano é produzido a partir da reação de carboneto (CH_4); nitretos geram amônia (NH_3); e fosfetos desenvolvem gás fosfina (PH_3).

Figura 21 – Representação de bolhas na escória bruta em presença de água.



Fonte: Autora, 2023.

Os resultados obtidos nos ensaios da massa específica são apresentados na Tabela 5 a seguir. A massa específica obtida para a escória salina foi de $2,566 \pm 0,050 \text{ g/cm}^3$.

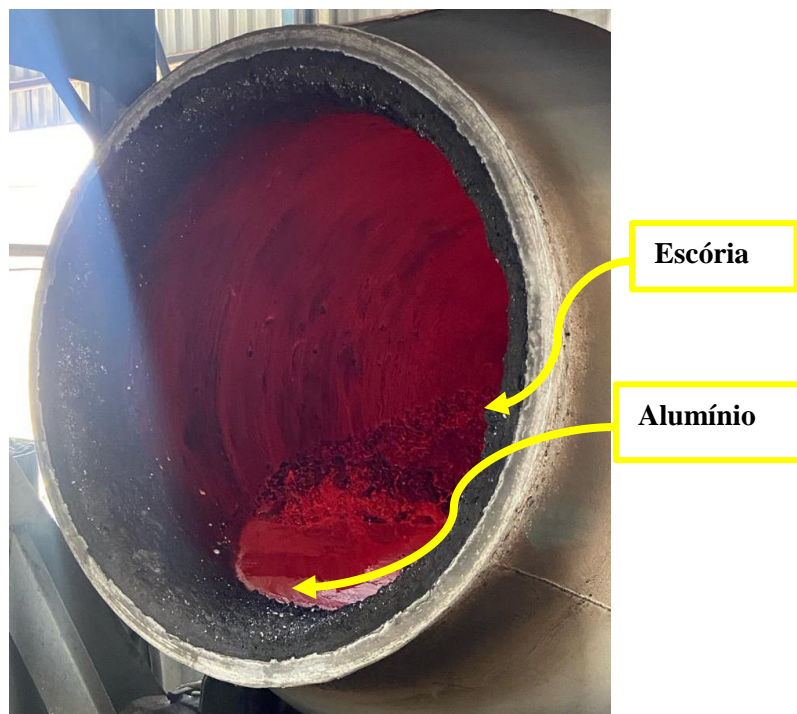
Tabela 5 – Resultados obtidos para a massa específica da escória salina oriunda de indústria de alumínio secundário.

AMOSTRAS	P_{as} (g)	T (°C)	P_a (g)	P_c (g)	P_s (g)	δ (g/cm ³)
1	672,68	26	640,02	501,28	52,89	2,614
2	670,85	28	638,62	414,99	52,79	2,568
3	669,92	28	638,68	397,53	51,86	2,515

Fonte: Autora, 2023.

Vale ressaltar que a escória apresenta uma densidade menor que o alumínio, e isso pode ser visualizado no processo de fundição, onde a escória fica submersa ao alumínio de densidade $2,7 \text{ g/cm}^3$ no banho metálico, justamente com a finalidade de proteção térmica do alumínio. Esta observação é ilustrada na Figura 22, abaixo. Portanto, esse cálculo de massa específica é importante para avaliar o consumo de materiais utilizados na produção das misturas adentradas no forno.

Figura 22 – Forno rotativo do processo de fundição da sucata para obtenção do alumínio secundário com diferentes densidades da escória e alumínio.



Fonte: Autora, 2023.

Nesse ensaio também foi observada a presença de sais precipitados nas amostras secas, já que no processo é adicionado uma grande quantidade de NaCl, pois trata-se de um dos produtos escorificantes que auxiliam na formação e concentração do resíduo gerado ao longo da fusão. Esta observação reflete a grande quantidade de sal visto na amostra estudada (Figura 23).

Figura 23 – Sal precipitado na amostra de escória após secagem em estufa.

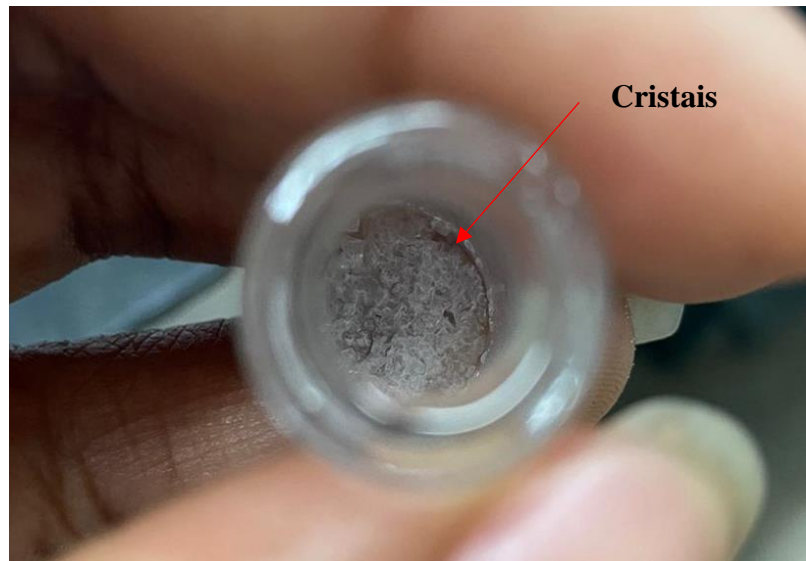


Fonte: Autora, 2023.

5.4 Lixiviação

A definição de lixiviação segundo a norma ABNT NBR 10005/2004, que trata do procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos é “processo para determinação da capacidade de transferência de substâncias orgânicas e inorgânicas presentes no resíduo sólido, por meio de dissolução no meio extrator” (ABNT NBR 10005, 2004). Neste caso, o objetivo é a determinação das substâncias lixiviáveis em determinado resíduo.

As alíquotas coletadas durante o processo de lixiviação mostraram que o lixiviado era rico em fases cristalinas, conforme apresentado na Figura 24. A partir da 9ª alíquota, o teor de sal cristalizado manteve-se constante, o que demonstra a saturação da solução.

Figura 24 – Cristais de sais formados.

Fonte: Autora, 2023.

Outro resultado satisfatório alcançado se deu através da pesagem final do sólido retido no filtro, cuja porcentagem de sais lixiviáveis no ensaio variou de 27 a 29%. Esses resultados estão dispostos na Tabela 6.

Tabela 6 – Pesagem inicial da escória após filtração e porcentagem de lixiviado.

Peso Inicial (g)	Peso Final (g)	Lixiviado (%)
50,0	35,5	29
50,4	37,0	27
50,1	36,6	27

Fonte: Autora, 2023.

A eficiência do processo de lixiviação foi calculada de acordo com a relação dos valores obtidos a partir das pesagens (considerado 100% de lixiviação), logo a quantidade lixiviada é muito grande, principalmente se levar esse experimento a grande escala na recuperação dos sais, conforme proposto por Teixeira (2020). Após essa análise do processo de lavagem da escória salina, a escória lixiviada (lavada), bem como o material cristalizado após a evaporação da água do líquido de lavagem foram caracterizados por EDX e DRX.

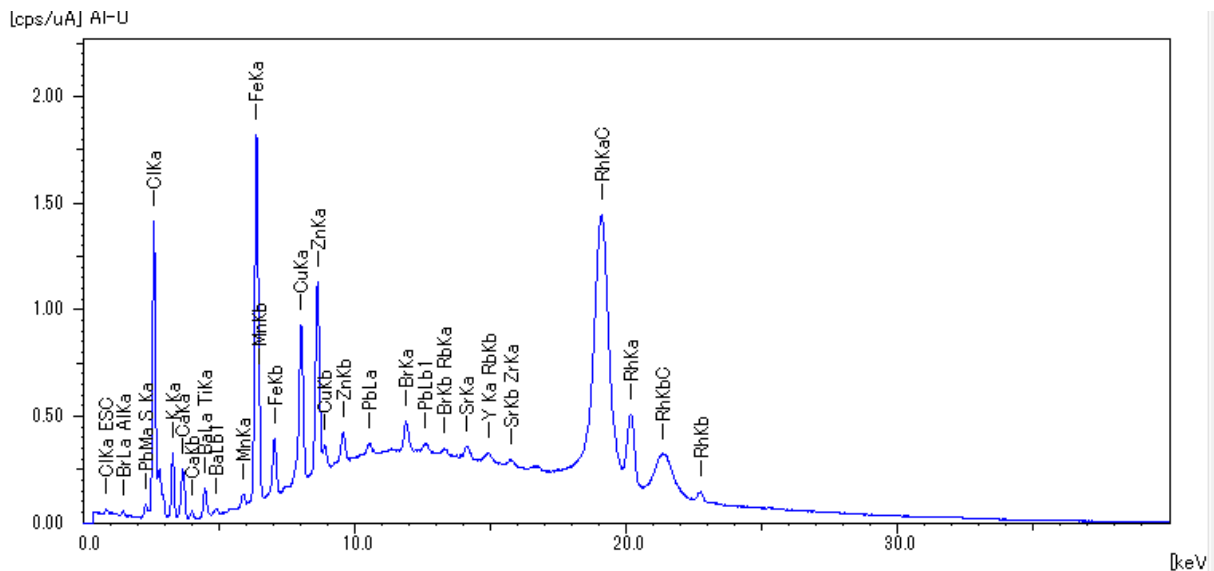
5.5 Análise instrumental

A técnica por EDX foi aplicada na determinação da composição elementar, na quantificação e mapeamento de elementos presente nos diferentes materiais (escória salina

bruta, escória lixiviada, sal lixiviado e material separado por imantação).

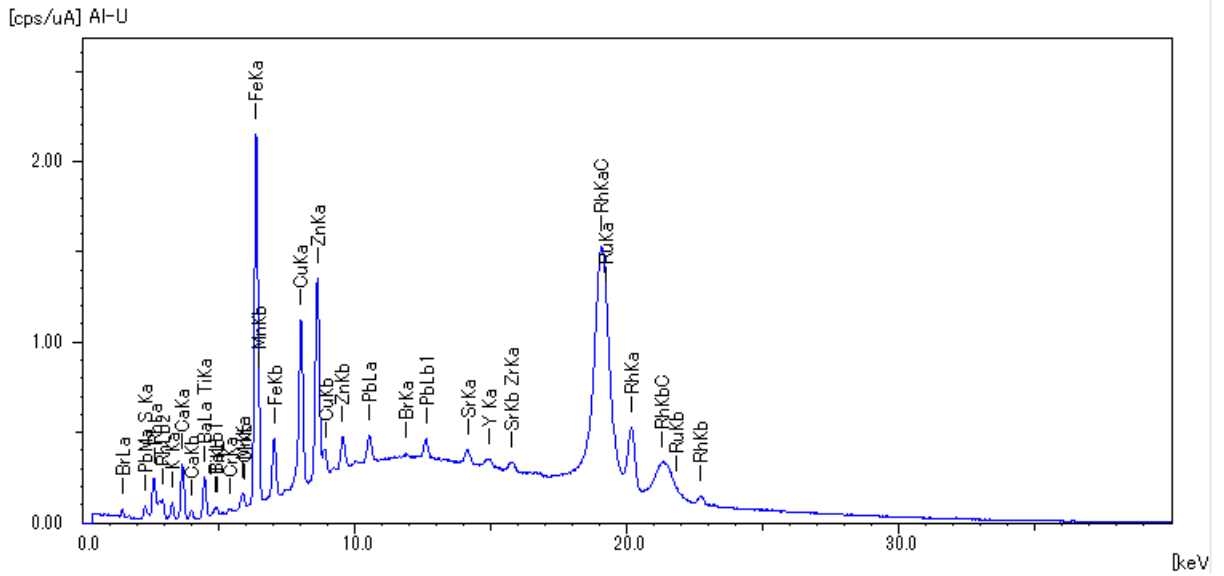
As Figuras 25, 26, 27, 28 apresentam os espectros obtidos por EDX para os materiais supracitados. Para cada elemento há níveis de energia específicos, associados aos seus elétrons durante a excitação, emitindo raios x característicos durante o processo de relaxamento, finalizada a análise o espectro é gerado. As principais observações notadas ao interpretar o gráfico foi a presença de vários picos $K\alpha$, pico mais eminente no espectro, representando a transição de elétrons da camada L para a camada K. São neles que também ocorrem a identificação e quantificação dos elementos na amostra. Já o pico $K\beta$ de menor intensidade compreende também a transição de elétrons da camada M para a camada K. Essas camadas referem-se às camadas eletrônicas ou orbitais que compõem um átomo.

Figura 25 – Espectro de EDX para escória salina bruta.



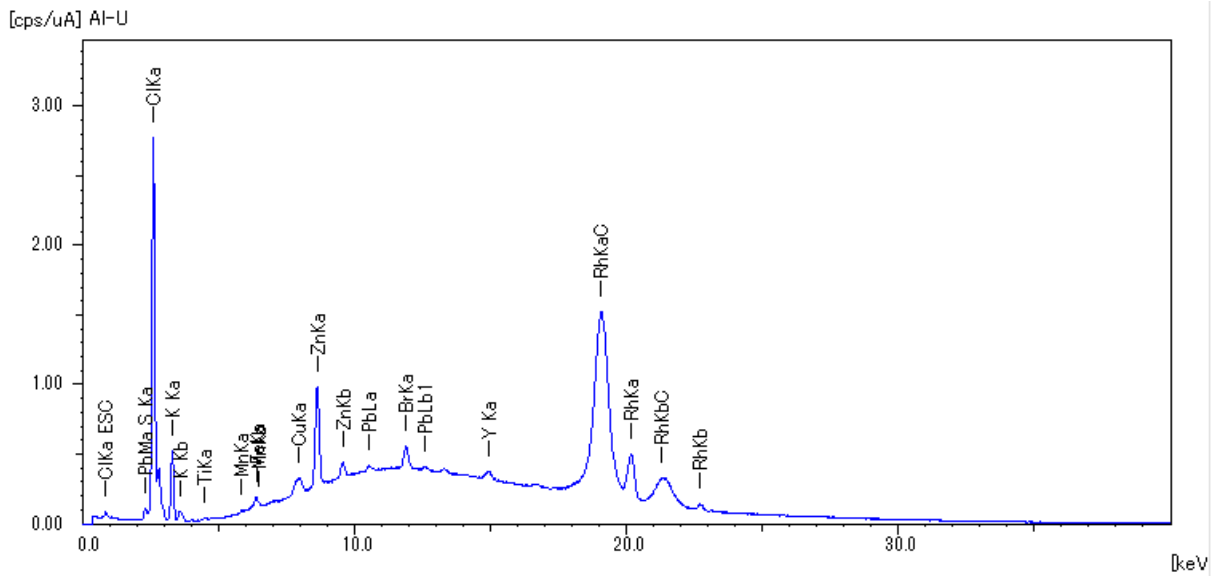
Fonte: Autora, 2023.

Figura 26 – Espectro de EDX da escória lixiviada.

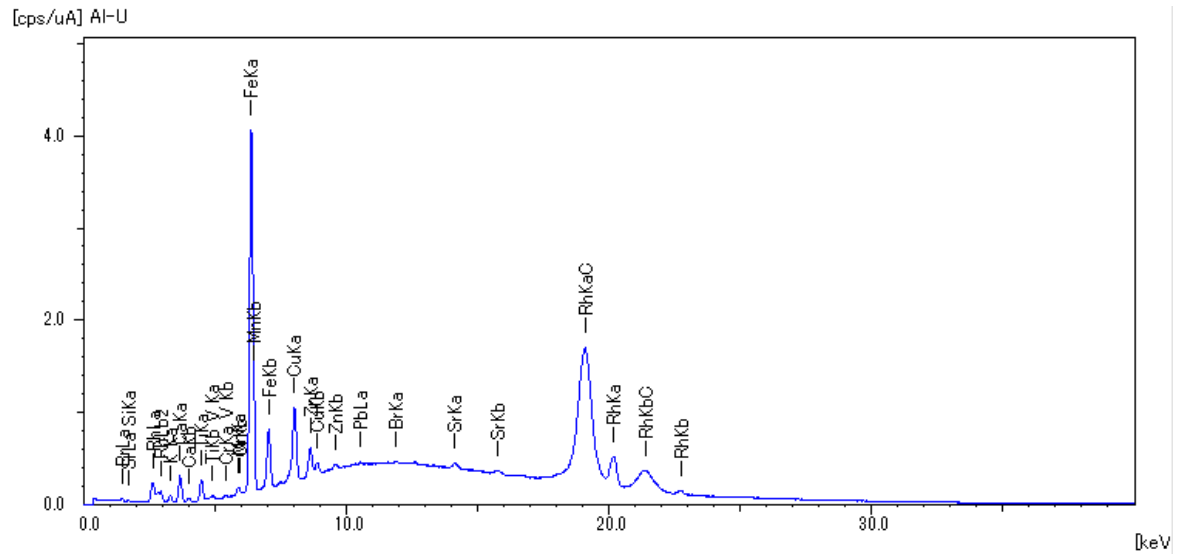


Fonte: Autora, 2023.

Figura 27 – Espectro de EDX do sal lixiviado.



Fonte: Autora, 2023.

Figura 28 – Espectro de EDX do material imantado.

Fonte: Autora, 2023.

A Tabela 7 apresenta a porcentagem de distribuição dos elementos nos distintos materiais analisados.

Tabela 7 – Porcentagem dos elementos determinados por EDX em escória bruta, escória lavada, sal lixiviado e material imantado.

Analito	Escória Bruta	Escória Lixiviada	Sal Lixiviado	Material Imantado
Cl	47,50	-	84,71	-
Al	35,03	-	-	-
K	6,35	12,25	11,28	9,20
Ca	3,09	25,13	-	19,70
Fe	2,90	21,91	0,15	35,14
S	1,90	3,84	2,75	-
Zn	0,80	6,44	0,63	1,64
Cu	0,80	6,33	0,12	4,76
Ba	0,70	7,27	-	-
Ti	0,54	6,13	0,07	7,72
Mn	0,13	1,25	0,04	0,99
Pb	0,09	1,56	0,08	-
Br	0,09	0,10	0,12	0,16
Sr	0,03	0,42	-	0,33
Y	0,02	0,21	0,04	-
Zr	0,01	0,21	-	-
Ru	-	6,54	-	-
Cr	-	0,42	-	0,33
Si	-	-	-	19,54
V	-	-	-	0,49
Cr	-	-	-	0,33

Fonte: Autora, 2023.

Para a amostra de escória salina bruta, o Cl, Al, K, Ca e Fe destacaram-se como os elementos mais predominantes. A significativa presença de Cl e K é atribuída à introdução dos sais escorificantes durante o processo de fusão da sucata. Além disso, é notória a grande quantidade de alumínio perdido no descarte da escória. Diante desse cenário, justifica-se a viabilidade de reutilização desse material no processo industrial, o que acaba reduzindo o volume de resíduos destinados a aterros e diminuindo os custos associados ao material utilizado no processo de reciclagem do alumínio.

Ao analisar os dados obtidos para a escória lavada, destaca-se a ausência quantitativa de cloro (Cl), evidenciando a eficácia do processo de lavagem na remoção dos sais presentes na escória bruta. Notavelmente, observou-se a predominância de Ca, um elemento suscetível a permanecer na escória lavada, como Teixeira (2020) também avaliou em seu trabalho.

Segundo Teixeira (2020) ao analisar a escória bruta de alumínio secundário, subproduto da fundição de alumínio, a escória após o processo de lavagem, e o material cristalizado após a evaporação da água do líquido de lavagem os principais elementos químicos passíveis de se encontrar foram: Al, Cl, K, Si, Fe, Ca, Mg, O, Cu, Zn e Ag.

Teixeira (2020) percebeu que o material não apresentou forma ou tamanhos homogêneos, apresentando predominância de Al e O na forma de óxido (Al_2O_3). O material apresentou, também Cl, Na e K, representativos dos sais lixiviáveis (NaCl e KCl) presentes no material se apresentando-se de forma homogênea em toda a superfície da amostra. Foram detectados, também, elementos como: Fe, Si, Mg e Ca.

O Fe, por sua vez, é característico da matéria-prima usada, e isso contribuiu significativamente nos teores apresentados de ferro na escória. A depender do processo de separação, alguns elementos podem ser mais retidos ou removidos durante a lavagem, no caso em estudo, as partículas ficaram retidas. Por isso, seu alto teor mensurado. Essa mesma justificativa pode ser usada nos outros metais identificados na amostra lavada. Outro fato curioso foi a quantidade de S quantificada ao compará-la com a escória bruta. Sua presença justifica o odor gerado ao diluir a escória em água destilada.

Observado o fato da remoção de Cl após a lavagem, foi realizada a coleta dos cristais formados na evaporação das alíquotas colhidas. Essa coleta resultou numa pequena quantidade em massa de material, mas foi o suficiente para realização das análises. Em detrimento disso, esses cristais foram macerados e conduzidos ao equipamento responsável para realização das análises qualitativas e quantitativas.

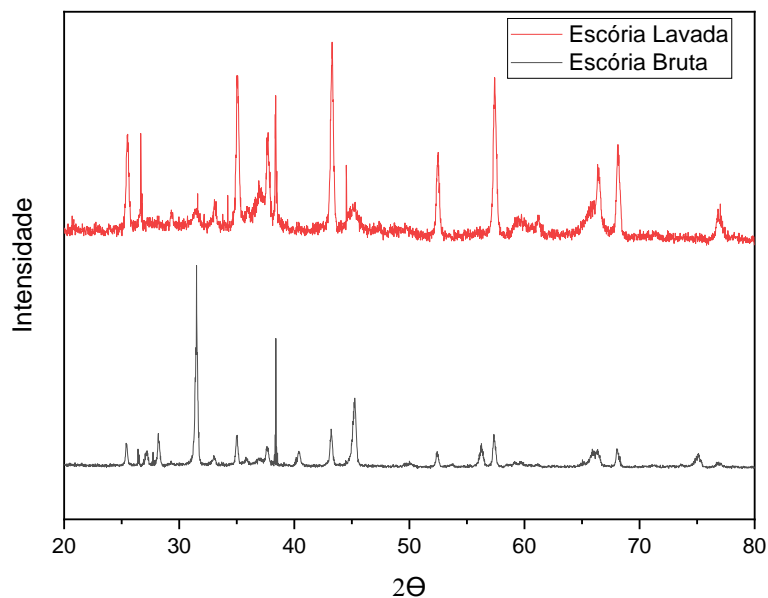
E como resultado, a presença percentual de Cl foi quase 50% da escória bruta, o que pode ter sido um interferente na análise por EDX. Este fato corrobora com a eficiência da

remoção de sais presentes na escória por meio da lixiviação. Sabendo-se disso, é observada a recuperação dos sais usados ao longo do processo industrial reduzindo os custos de insumos na obtenção do alumínio secundário.

Avaliando-se o alto teor de ferro ao comparar a escória bruta e lavada, e ao consultar trabalhos que abordaram essa temática, nos quais é discutida a presença de minerais férricos, logo foi realizada mais uma análise. Por tratar-se de ferro, alguns óxidos de interesse em nanotecnologia apresentam magnetismo e, portanto, podem ser separados por imantação. Com base na resposta obtida, é compreensível que o material extraído por imantação da escória lavada consista em Fe. Levando-se em consideração a dissertação de Teixeira (2020) que aborda a presença de minério férrico em três diferentes fases nas suas análises, conjecturou-se a possibilidade de hematita ou magnetita na amostra. A utilização de um ímã neodímio para extração sugeriram que o material recolhido é, provavelmente, magnetita devido à sua notável propriedade magnética. Estes dados puderam ser confirmados com a técnica de DRX.

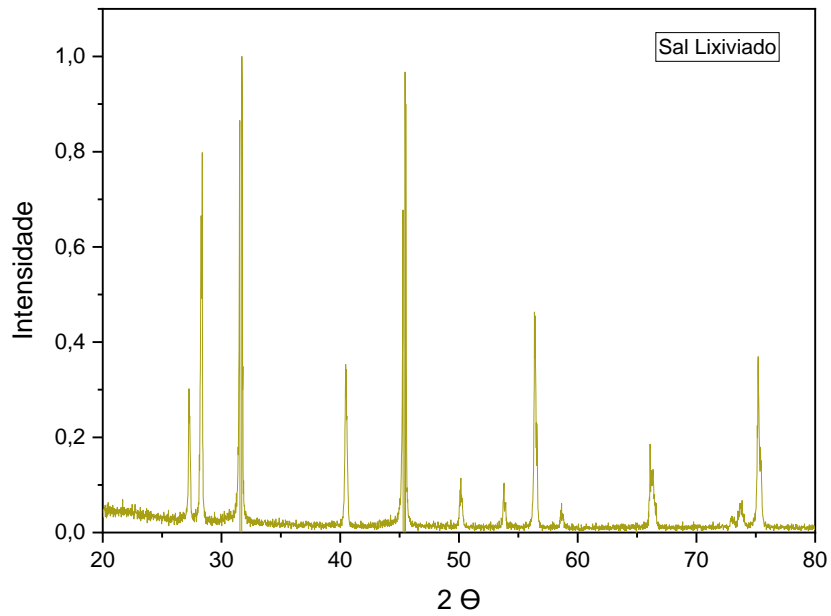
Como resultado as Figuras 29, 30 e 31, corroboram com a técnica empregada nessa caracterização através dos difratogramas plotados no software *Origin*.

Figura 29 – Comparação de difratogramas entre a escória bruta e lavada.



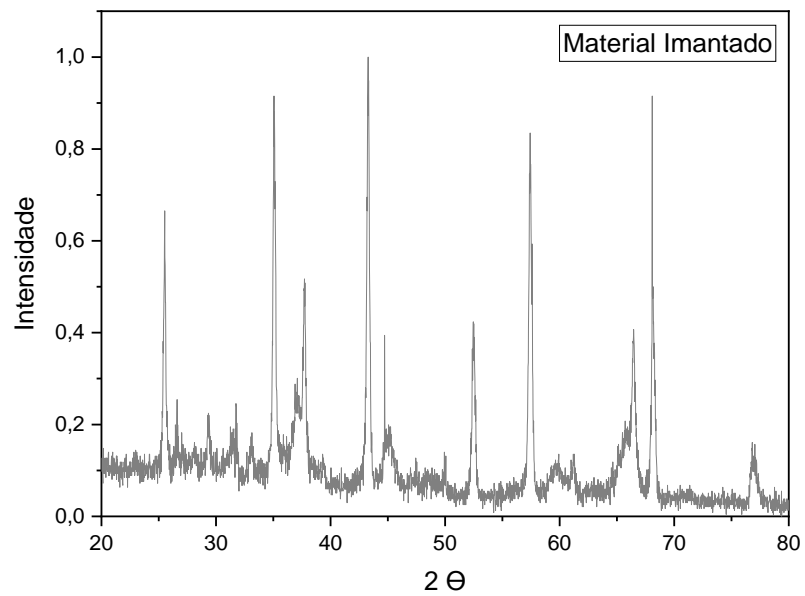
Fonte: Autora, 2023.

Figura 30 – Difratoograma do sal lixiviado.



Fonte: Autora, 2023.

Figura 31 – Difratoograma do material imantado.



Fonte: Autora, 2023.

As interpretações passíveis dos difratogramas gerados evidenciam a natureza cristalina das amostras de escória bruta e sal lixiviado. A comparação desses picos com referências literárias, alinhada à análise de Teixeira (2020), revela uma semelhança marcante nas fases identificadas, destacando-se a predominância de sais, alumínio e ferro no material bruto. Essas observações foram corroboradas pelas análises realizadas por EDX, conforme previamente mencionado.

Ao analisar a escória lavada, observou-se uma redução nos picos relacionados aos sais (NaCl e KCl). No entanto, surpreendentemente, foi notado um comportamento peculiar com uma presença significativa de picos indicativos de minérios férricos. A existência de compostos distintos de alumínio e sais pode ser explicada pelos materiais inseridos no forno, conforme explicado por Xiao. (2005), onde diferentes sucatas podem resultar na formação de compostos diversos.

Os resultados de Difração de raios x (DRX) obtidos a partir das análises nos cristais formados corroboraram com as investigações conduzidas por Davies et al. (2008). Nesses resultados, os sais estão presentes predominantemente na forma de NaCl e KCl, indicando que o material é essencialmente composto por sais hidrolisáveis e diversos óxidos metálicos. Esta caracterização é evidenciada de forma notável nos gráficos dispostos no apêndice, onde os picos correspondentes reforçam essas conclusões com a identificação das fases, e a Tabela 8 reúne as fases cristalográficas obtidas nas análises realizadas de cada amostra.

Tabela 8 – Fases cristalográficas de cada amostra analisada por DRX.

Elemento Químico	Escória Bruta	Escória Lavada	Sal Lixiviado	Material
				Imantado
Fases Cristalográficas				
Al ₂ O ₃	00-010-0173	00-010-0173	-	00-010-0173
NaCl	00-005-0628	00-005-0628	00-005-0628	00-005-0628
CaF ₂	00-035-0816	-	00-035-0816	-
Fe ₂ O ₃	00-024-0072	00-024-0072	-	00-024-0072
Fe ₃ O ₄	00-033-0664	00-033-0664	-	00-033-0664
CaCO ₃	00-005-0586	00-005-0586	-	00-005-0586
Si	00-027-1402	-	00-027-1402	-
SiO ₂	00-033-1161	00-046-1045	00-033-1161	00-046-1045

Fonte: Autora, 2023.

Finalmente, ao analisar os resultados obtidos do material extraído por imantação, confirma-se a presença significativa de fases contendo compostos férricos, com destaque para a predominância de magnetita (Fe_3O_4), composto este de interesse em processos de oxidação avançados. Em todos os difratogramas, observou-se uma acentuada sobreposição de picos, dificultando a interpretação dos resultados. Além disso, foi identificada a presença de picos mal cristalizados, com baixas intensidades, características típicas de materiais que possuem uma concentração considerável de fase amorfa em sua composição.

5.6 Avaliação das potenciais aplicações dos materiais caracterizados

Potenciais aplicações para escórias salinas de alumínio como matéria-prima estão sendo estudadas nos últimos anos. A Tabela 9 resume algumas possíveis aplicações desse rejeito bruto e do material obtido após processo de lixiviação, com base nas análises e caracterizações.

Tabela 9 – Aplicações dos materiais caracterizados.

Material	Aplicações	Referências
Sal Lixiviado	Reutilização no processo industrial	MESHGRAM <i>et al.</i> , 2020
Escória Lavada	Adsorção, catalisadores (zeólitas)	YOLDI <i>et al.</i> , 2020
Escória Bruta	Materiais Construção Membranas cerâmicas	XAVIER, 2022; MAHINROOSTA, <i>et al.</i> , 2018, MESHGRAM, <i>et al.</i> , 2018.
Material Imantado	Adsorção, processos oxidativos avançados	ZAKI <i>et al.</i> , 2022; MACINOWSKI <i>et al.</i> , 2020

Fonte: Autora, 2023.

6 CONCLUSÃO

Ao longo deste estudo, procurou-se aprofundar a compreensão sobre o resíduo de escória salina gerado pela empresa de fundição, por meio de análises que permitiram identificar suas características físicas e químicas. A partir dos ensaios realizados, constatou-se que a escória apresenta comportamento de resíduo seco, evidenciado pela análise de sua umidade. Além disso, a análise granulométrica apontou que este resíduo pode ser classificado como agregado miúdo, semelhante a partículas fina com fácil dispersão no ar. Adicionalmente, foi possível comprovar experimentalmente a massa específica da escória, alinhando-se com a realidade observada nos fornos rotativos de separação de fases da escória e alumínio.

A análise por EDX apontou que a escória salina bruta possui altos teores de Cl e alumínio e que processo de lavagem da escória salina foi eficiente na remoção de cloretos. O sal lixiviado é rico em Cl e K e o material imantado apresenta altos teores de Fe. Enquanto por DRX foi evidenciado a estrutura cristalina e amorfa na amostra de escória lavada, presença majoritária de NaCl e KCl na amostra de sal lixiviado e óxido de alumínio e magnetita no material imantado.

Dessa maneira, esta pesquisa possibilitou uma compreensão mais aprofundada do resíduo, proporcionando percepções que foram corroborados por observações práticas e confirmados pelo comportamento evidenciado em diversos testes executados. Esses resultados estabeleceram uma base sólida para a potencial aplicação do resíduo em processos de reaproveitamento na área de materiais e nanotecnologia.

Assim, surge a perspectiva de encontrar uma solução eficaz para o resíduo de escória gerado pela empresa de fundição analisada, contribuindo para evitar os custos associados ao descarte desse resíduo em aterros industriais, simbiose industrial e potenciais alternativas de aplicação.

7 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

- Avaliar a lavagem da escória com maiores granulometrias, e conseqüentemente verificar as possíveis etapas seguintes de caracterização;
- Aplicar a escória lixiviada na fabricação de membranas cerâmicas;
- Propor método de recuperação dos sais como processo de reciclo na indústria;
- Modificar o processo de filtração realizada da escória lavada com a água destilada para que possa ser retido mais particulados, diferentemente dos que foram encontrados;
- Realização de uma aplicação para o material obtido por imantação em processo de adsorção e oxidação aplicados ao tratamento de efluentes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10005 – Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos**. Maio, 2004, 16 p.
- ABNT- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004 - Resíduos sólidos - Classificação**. Maio, 2004, 77 p.
- ABNT- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 17054 - Agregados - Determinação da composição granulométrica**. Junho, 2022, 5 p.
- ABNT- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6508 – Grãos de solo que passam em peneira de 4,8 mm – Determinação de massa específica**. Outubro, 1984, 8 p.
- ABNT- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211 – Agregados para concreto – Especificação**. Outubro, 2022, 10 p.
- AMC Aluminum. **Primary vs secondary aluminum**. Disponível em: <<https://amcaluminum.ph/primary-vs-secondary-aluminum/>>. Acesso em: 06 de janeiro de 2024.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO. **Guia Técnico do Alumínio: geração e tratamento de escória**. 2023.
- BLOMBERG, J.; SÖDERHOLM, P. **The economics of secondary aluminium supply: An econometric analysis based on European data**. Resources, Conservation and Recycling, v. 53, n. 8, p. 455–463, 1 jun. 2009.
- BRADASCHIA, C. **Fundição de ligas não ferrosas**. 3ª ed. São Paulo: Édile Serviços Gráficos e editora LTDA, 1981.
- CALEGARI, C. L., TEIXEIRA, R. L. P., SILVA, P. C. D. **Produção de alumínio secundário: uma revisão sistemática da literatura**. p. 1–21, 2023.
- DAVID, E.; KOPAC, J. **Aluminum recovery as a product with high added value using aluminum hazardous waste**. Journal of Hazardous Materials, v. 261, p. 316–324, 15 out. 2013.
- DAVIES, M., SMITH, P., BRUCKARD, W.J., e WOODCOCK, J.T. **Treatment of salt cakes by aqueous leaching and Bayer-type digestion**, Minerals Engineering; 21; 605–612; 2008.
- DAVIS, J. **Manual de Metais**. ASM Internacional, 1998.
- EWASIS, E. M. M., KHALIL, N. M., AMIN, M. S., AHMED, Y. M. Z., BARAKAT, M. A. **Utilization of aluminum sludge and aluminum slag (dross) for the manufacture of calcium aluminate cement**. Ceramics International, v. 35, n. 8, p. 3381-3388, dez. 2009.

FAO. **Standard operating procedure for soil moisture content by gravimetric method.** Rome, 2023.

GAUSTAD, G.; OLIVETTI, E.; KIRCHAIN, R. **Improving aluminum recycling: A survey of sorting and impurity removal technologies.** Resources, Conservation and Recycling, v. 58, p. 79–87, 1 jan. 2012.

GIL, A. **Management of the salt cake from secondary aluminum fusion processes,** 44, 23 Ind. Eng. Chem. Res. 8852–8857, 2005.

GIL, A. **Management of Salt Cake Generated at Secondary Aluminum Melting Plants by Disposal in a Controlled Landfill: Characteristics of the Controlled Landfill and a Study of Environmental Impacts.** Environmental Engineering Science, v. 24, 6 nov. 2007.

GIL, A., KORILI, S. A.; **Management and valorization of aluminum saline slags: Current status and future trends;** Chemical Engineering Journal 289, 74–84, 2016.

GÓMEZ-GÓMEZ, A., VINASCO-ISAZA, E. L., LIMA, N. B., TENORIO, S. A. J. **Relationship between the particle size and the crystalline phases amount of an aluminum dross.** DYNA (Colombia), v. 85, n. 206, p. 348–354, 1 jul. 2018.

GRACZYK, D. G., ESSLING, A. M., HUFF, E. A.; **Analytical, Chemistry Of Aluminum Salt Cake;** Light Metals 1997; Proceedings of the 126th Annual Meeting of the Minerals, Metals, and Materials Society, Symposium on Aluminum Dross and Salt Cake Processing, 9–13, 1997.

GUTIERREZ, A. MIRÓ, L., GIL, A., RODRÍGUEZ-ASEGUINOLAZA, J. **Advances in the valorization of waste and by-product materials as thermal energy storage (TES) materials.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 59, p. 763–783, 1 jun. 2016.

HALSAS, E. **Comparison of humidity measurement methods.** Kuopio: University of Kuopio. 2007.

HAZAR, A.B.Y.; SARIDEDE, M.N.; ÇİĞDEM, M. **A study on the structural analysis of aluminium drosses and processing of industrial aluminium salty slags.** Scand. J. Metall. 34, 213–219, 2005.

HERMENEGILDO, M. K. **Determinação da concentração de metais presentes em areia verde de fundição: estudo de caso de fundição Tupy S.A. 2011.** Florianópolis, SC, 2011.

HOLLER, F. J., SKOOG, D. A., CROUCH, S. R. **Princípios de análise instrumental.** Bookman, 2009.

IBARRA CASTRO, M. N., ALMANZA ROBLES, J. M., CORTES HERNANDEZ, D. A., ESCOBEDO BOCARDO, J. C., TORRES, J. **Development of mullite/zirconia composites from a mixture of aluminum dross and zircon.** Ceramics International, v. 35, n. 2, p. 921–

924, 1 mar. 2009.

JENKINS, R. **X-ray fluorescence spectrometry**. 2nd ed., New York: Wiley, 1999.

KEVORKIJAN, V. M. **The quality of aluminum dross particles and cost-effective reinforcement for structural aluminum-based composites**. *Composites Science and Technology*, v. 59, n. 11, p. 1745–1751, 1 ago. 1999.

KIM, J. BISWAS, K., JHON, K., JEONG, S., AHN, W. **Synthesis of $AlPO_4$ -5 and $CrAlPO_5$ using aluminum dross**. *Journal of Hazardous Materials*, v. 169, n. 1–3, p. 919–925, 30 set. 2009.

LOGOŽAR, K.; RADONJIČ, G.; BASTIČ, M. **Incorporation of reverse logistics model into in-plant recycling process: A case of aluminum industry**. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 49, n. 1, p. 49–67, 1 nov. 2006.

LÓPEZ-DELGADO, A.; TAYIBI, H. **Can hazardous waste become a raw material? the case study of an aluminium residue: A review**. *Waste Manag. Res.* 30, 474–484, 2012.

LUZ, A. B.; SAMPAIO, J. A.; S. C. A. França; **Tratamento de Minérios - CETEM - 5^a edição**; Rio de Janeiro, 2010.

LYSENKO, A.P.; SEL’NITSYN, R.S.; NALIVAIKO, A.Y. **Comprehensive Processing of Saline Aluminum-Containing Slag**. *Metallurgist*, 61, 624–628, 2017.

MACIEL, C. **Avaliação Da Geração Do Resíduo Sólido Areia De Fundição Visando Sua Minimização Na Empresa Metalcorte Metalurgia-Fundição**. Porto Alegre, 2005.

MAHINROOSTA, M., ALLAHVERDI, A. **A promising green process for synthesis of high purity activated-alumina nanopowder from secondary aluminum dross**. *J. Clean. Prod.* 179, 93–102, 2018.

MAHINROOSTA, M., ALLAHVERDI, A. **Enhanced alumina recovery from secondary aluminum dross for high purity nanostructured γ -alumina powder production: kinetic study**. *J. Environ. Manag.* 212, 278–29, 2018.

MARCIONOWSKI, P., BURY, D., KRUPA, M., SCIWZYNSKA, D., PRABHU, P., BOGACKI, J. **Magnetite and hematite un advanced oxidation process application for cosmetic wastewater treatment**. MDPI, 2020.

MATJIE, R.H., BUNT, J.R., VAN HEERDEN, J.H.P. **Extraction of alumina from coal fly ash generated from a selected low rank bituminous South African coal**. *Miner. Eng.* 18, 299–310, 2005.

MENDES MORAES, C. A. KIELING, A. G., CALHEIRO, D., PIRES, D. C., AREND, C. 2^o Congresso Internacional de Tecnologias para o Meio Ambiente. **Elaboração de um plano de gerenciamento de resíduos sólidos em uma empresa de fundição**, 2010.

MESHARAM, A., SINGH, K.K. **Conservation & recycling recovery of valuable products from hazardous aluminum dross: A review**. *Resour. Conserv. Recycl.* 130, 95–108, 2018.

MESHARAM, A., GAUTAM, D., KUMAR, K. **Recycling of white aluminium dross: production of potash alum.** Trans. Indian Inst. Met. 73, 1239–1248, 2020.

NASCIMENTO, E. P. DO. **Trajecória da sustentabilidade: do ambiental ao social, do social ao econômico.** Estudos Avançados, v. 26, n. 74, p. 51–64, 2012.

NORGATE, T. E.; JAHANSHAH, S.; RANKIN, W. J. **Assessing the environmental impact of metal production processes.** Journal of Cleaner Production, v. 15, n. 8–9, p. 838–848, 1 jan. 2007.

OLIVEIRA, T.R.C de; **Caracterização para o beneficiamento da escória oriunda do processo de reciclagem de alumínio.** Porto Alegre, 2018.

PADAMATA, S. K.; YASINSKIY, A.; POLYAKOV, P. **A Review of Secondary Aluminum Production and Its Byproducts.** Springer, 1 set. 2021.

PADILLA, I., ROMERO, M., LÓPEZ-ANDRÉS, S., LÓPEZ-DELGADO, A., **Sustainable Management of Salt Slag.** Sustainability, 2022.

PARASKEVAS, D., KELLENS, K., DEWULF, W., DUFLOU, J. **Environmental modelling of aluminium recycling: a Life Cycle Assessment tool for sustainable metal management.** Journal of Cleaner Production, v. 105, p. 357–370, 15 out. 2015.

POTTS, P. J., ELLIS, A. T., KREGSAMER, P., STRELIC, C., VANHOOFD, C., WESTE, M., WOBRAUSCHEKE, P. **Atomic spectrometry.** 2005.

SOARES, J.A., ROMANO, D.C. **Effect of salt/oxide interaction on the process of aluminum recycling.** J. Light Met. 2, 89–93, 2002.

SOARES, J. R. **Escória granulada de fundição utilizada como substituição ao cimento em concretos: avaliação de propriedades relacionadas com a durabilidade.** Porto Alegre, 2003.

TEIXEIRA, A. B. **Caracterização de escória salina oriunda de reciclagem de alumínio para recuperação de NaCl e KCl.** Porto Alegre, 2020.

THOMAZI, G. **Avaliação De Um Potencial Reaproveitamento Para O Resíduo De Escória De Uma Empresa De Fundição De Ferro Para A Indústria Concreteira.** Santa Maria, RS, 2022.

TOTTEN, G. E., MACKENZIE, D. S. **Handbook of aluminum: Alloy production and materials manufacturing,** Vol. 2, Marcel Dekker, Inc, New York, 2003.

TSAKIRIDIS, P. E. **Aluminium salt slag characterization and utilization.** Journal of Hazardous Materials, 2012.

VAN GRIEKEN, R., MARKOWICZ, A. **Handbook of X-Ray Spectrometry,** 2nd ed., New York: Marcel Dekker, 2002.

XAVIER, L. A. **Membranas cerâmicas a base de escória de aço inoxidável para aplicação em pré-tratamento da água do mar.** Curitiba, 2022.

XIAO, Y, REUTER, M. A, U. Boin. **Aluminium recycling and environmental issues of salt slag treatment.** J. Environ. Sci. Health A 40, 1861–1875, 2005.

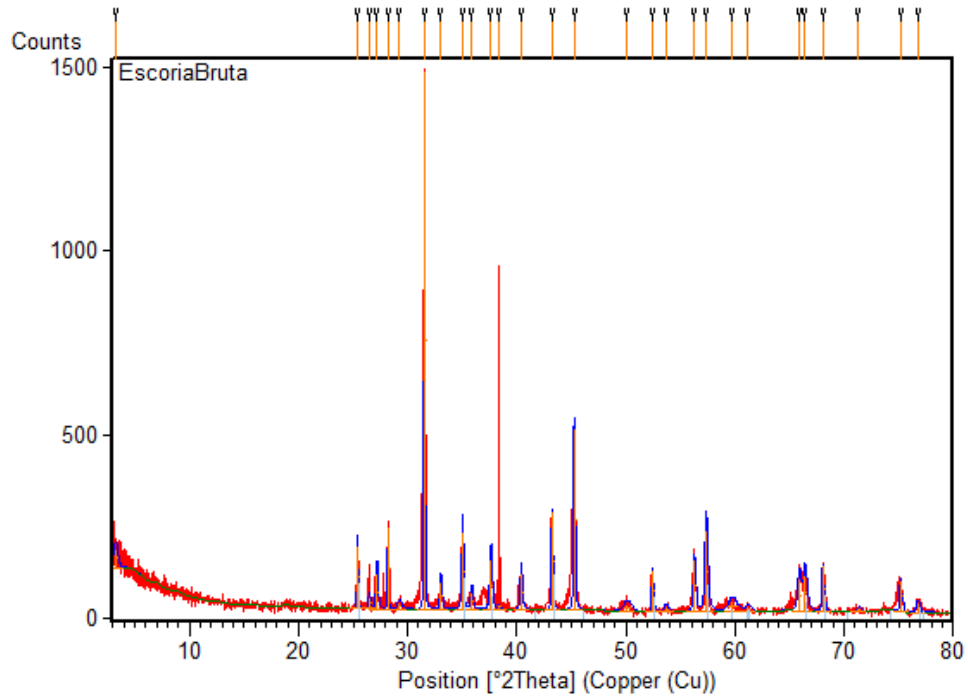
YOLDI, M., FUENTES-ORDOÑEZ, E. G., KORILI, S.A. GIL, A. **Zeolite synthesis from aluminum saline slag waste.** Powder Technology, v. 366, p. 175–184, 15 abr. 2020.

YOSHIMURA, H. N., ABREU, A. P., MOLISANI, A. L., CAMARGO, A. C., PORTELA, J. C. S., NARITA, N. E. **Evaluation of aluminum dross waste as raw material for refractories.** Ceramics International, v. 34, n. 3, p. 581–591, 1 abr. 2008.

ZAKI, E. R., AHMED, S. M., ALI, O. I., ABDALLA, M. S. **Adsorption properties of magnetite nanoparticles for the removal of heavy metals from aqueous solution.** Egypt. J. of Appl. Sci, 37 (5-6), 2022.

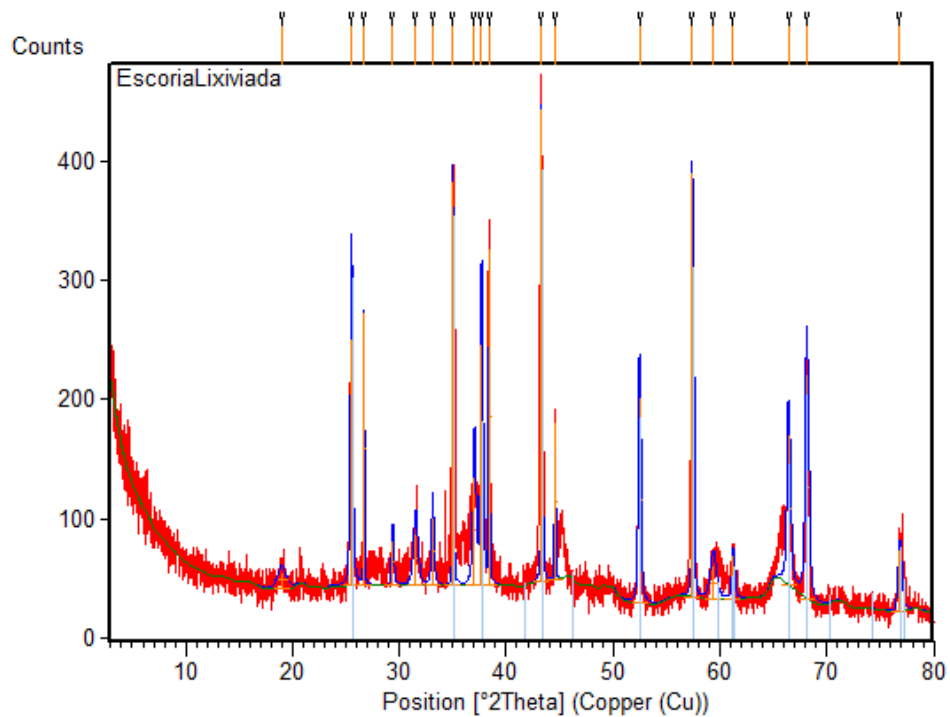
APÊNDICE

APÊNDICE A – Difratoograma da escória bruta.

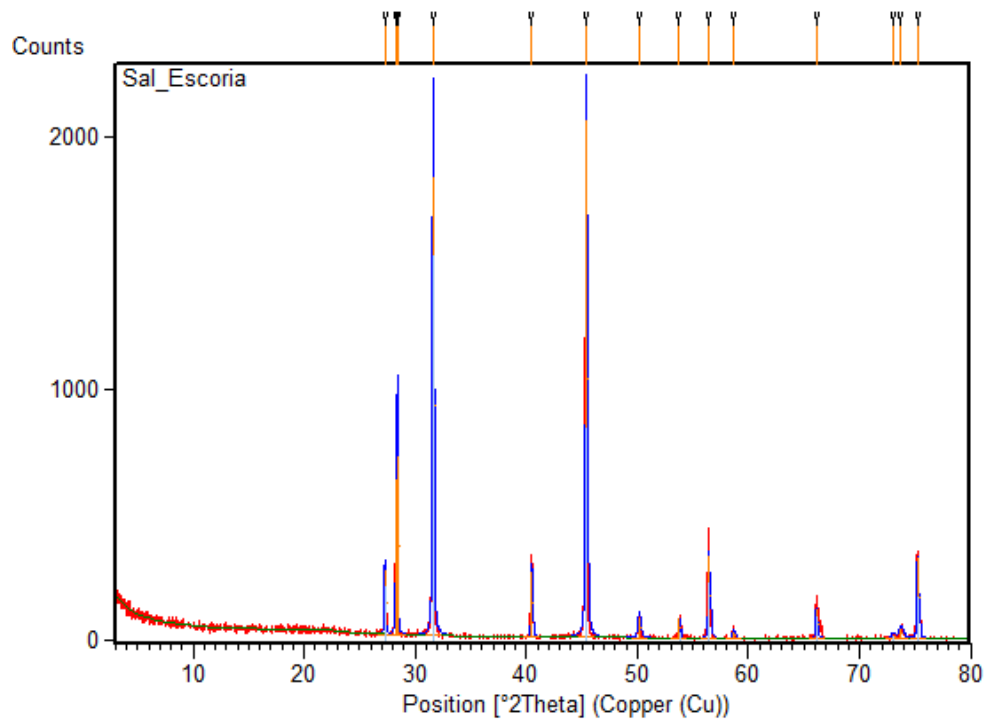


Fonte: Autora, 2023.

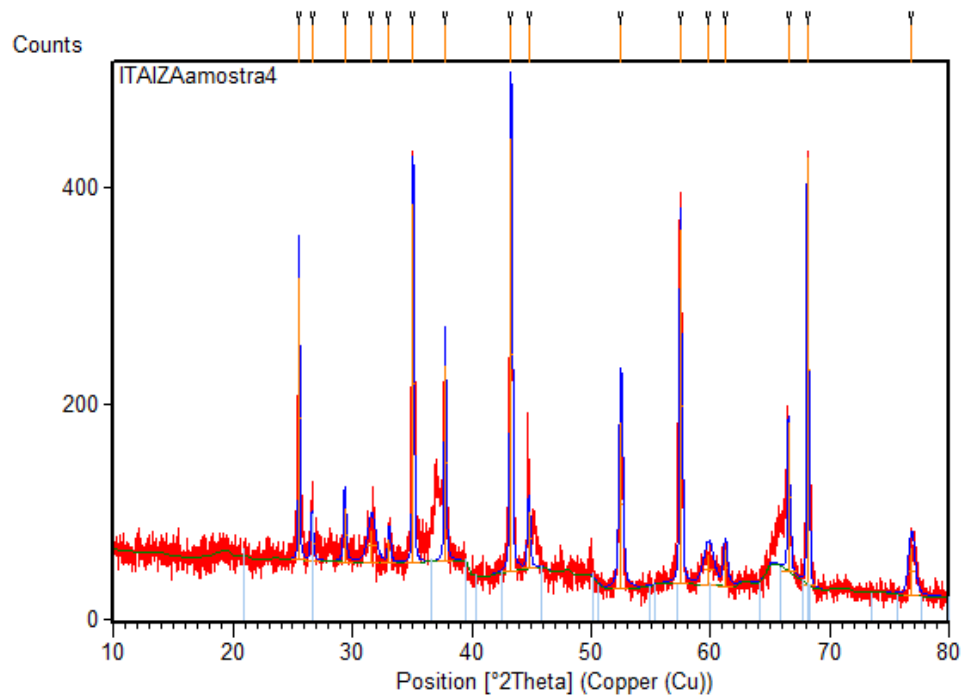
APÊNDICE B – Difratoograma da escória lavada.



Fonte: Autora, 2023.

APÊNDICE C – Difratoograma do sal lixiviado.

Fonte: Autora, 2023.

APÊNDICE D – Difratoograma do material imantado.

Fonte: Autora, 2023.