



Programa de Pós-Graduação em
Ciência dos Materiais



Universidade Federal de São Carlos – UFSCar

Programa de Pós-Graduação em Ciência dos Materiais - UFSCar - Campus Sorocaba

Rodovia João Leme dos Santos, SP-264 - Sorocaba - SP - BR

CEP: 18052-780 Telefone: (15) 3229-5941

Email: ppgcm@ufscar.br

Viabilização da Confecção de Moldes de Areia com Reaproveitamento da *black dross* de Alumínio

Orientador: Prof. Dr. Giovanni Pimenta Mambrini

Orientado: Raphael Oliveira da Silva

Sorocaba, 2026

RAPHAEL OLIVEIRA DA SILVA

**Viabilização da Confecção de Moldes de Areia com
Reaproveitamento da *black dross* de Alumínio**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências dos Materiais (PPGCM) Campus Sorocaba, para obtenção do título de Mestre na área de Ciências dos Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Giovanni Pimenta Mambrini

Sorocaba, 2026

Da Silva, Raphael Oliveira

Viabilização da confecção de moldes de areia com reaproveitamento da black dross de alumínio / Raphael Oliveira Da Silva -- 2026.
54f.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de São Carlos, campus Sorocaba, Sorocaba
Orientador (a): Prof. Dr. Giovanni Pimenta Mambrini
Banca Examinadora: Prof. Dr. Fenelon Martinho Lima Pontes, Prof. Dr. Francisco Trivinho Strixino
Bibliografia

1. black dross. 2. lixiviação. 3. molde de fundição. I. Da Silva, Raphael Oliveira. II. Título.

Ficha catalográfica desenvolvida pela Secretaria Geral de Informática
(SIn)

DADOS FORNECIDOS PELO AUTOR

Bibliotecário responsável: Maria Aparecida de Lourdes Mariano -
CRB/8 6979

Folha de Aprovação

Defesa de Dissertação de Mestrado do candidato Raphael Oliveira da Silva, realizada em 04/02/2026.

Comissão Julgadora:

Prof. Dr. Giovanni Pimenta Mambrini (UFSCar)

Prof. Dr. Fenelon Martinho Lima Pontes (UNESP)

Prof. Dr. Francisco Trivinho Strixino (UFSCar)

“Metade do mundo não consegue compreender os prazeres da outra metade.”

Jane Austen, (1.775-1.817)

“O caminho do progresso não é rápido, tão pouco fácil”

Marie Curie (1.867-1.934)

AGRADECIMENTOS

Às pessoas que me amaram e acreditaram em mim, mesmo quando eu ainda não podia retribuir ou entender, especialmente aos meus pais: Maria de Lourdes Oliveira Silva e Antônio da Silva, e à minha (avó/mãe) Adélia Nunes de Carvalho;

À minha amada esposa: Tatiane Habila Cantera, que me apoiou em cada etapa deste processo, incentivando-me a concluí-lo;

A todos os verdadeiros amigos e familiares, que vem tornando essa jornada, chamada vida, mais interessante;

Ao orientador Prof. Dr. Giovanni Pimenta Mambrini, por ter me orientado e colaborado para o desenvolvimento deste trabalho;

Aos colegas profissionais que me auxiliaram diretamente e indiretamente para o desenvolvimento deste trabalho (listados em ordem alfabética):

- Adriel de Brito Maciel Trindade (Fatec/Metso);
- Giovanni Miraveti Carriello (UFSCar);
- Jorge Luiz de Souza (Metso);
- João Gabriel Velo Danesi (Ibrafer);
- Igor Pereira Franco (Fatec);
- Renata Nascimento (Fatec);

À Faculdade de Tecnologia de Sorocaba (Fatec) pela disposição dos laboratórios;

À Universidade Federal de São Carlos de Sorocaba pela oportunidade e pela disposição dos laboratórios;

À Alux do Brasil pelo fornecimento da matéria-prima;

À Companhia Brasileira de Alumínio (projeto Ilumina) pela aceitação do projeto.

RESUMO

SILVA, Raphael Oliveira. VIABILIZAÇÃO DA CONFECÇÃO DE MOLDES DE AREIA COM REAPROVEITAMENTO DA *BLACK DROSS* DE ALUMÍNIO: Título, Dissertação de Mestrado em Ciências dos Materiais – Universidade Federal de São Carlos, Sorocaba, 2026.

Conhecido há mais de 200 anos, o alumínio tem dominado o mercado industrial, metalmeccânico, alimentício e aeroespacial, graças à sua notável capacidade estrutural e versatilidade. No setor automotivo, por exemplo, ele é altamente demandado por sua baixa densidade e alta resistência mecânica, o que permite a construção de chassis mais leves para veículos elétricos, compensando o peso das baterias. Contudo, os processos de obtenção de alumínio metálico geram uma quantidade significativa de resíduos. Enquanto a obtenção do alumínio primário resulta em uma escória chamada de *white dross*, a obtenção de alumínio secundário é responsável pela geração do resíduo de *black dross*. Este trabalho teve como objetivo viabilizar o reaproveitamento de *black dross* (BD) na fabricação de moldes para fundição de metal. As amostras de BD foram coletadas na empresa Alux do Brasil, em parceria com a Companhia Brasileira de Alumínio (CBA). Essas foram caracterizadas por microscopia eletrônica de varredura com espectroscopia de energia dispersiva (MEV/EDS) e difratometria de raio-X (DRX). Passaram por processos de lixiviação hidrometalúrgica em água destilada (ABD) ou glicerol anidro (GBD) para dissolver os sais de NaCl e KCl. Incorporou-se percentuais de ABD em areia de sílica em amostras chamadas de T10, T20, T25, T40, T50 e T50* na presença de resina alcalina e catalisador de piridina. Ensaio de tração uniaxial foram realizados nas amostras ABD. Para teste em campo modelou-se um produto no software de desenho 3D “Inventor”. Em seguida, um protótipo em polímero de acrilonitrila butadieno estireno (ABS) foi impresso utilizando o software CURA e impressora 3D. Foi confeccionado um molde de areia com amostra de melhor condição, a T25, onde uma liga de alumínio foi fundida e vazado. O produto obtido pelo processo de fundição em molde de areia de sílica com *black dross* incorporada demonstrou-se promissor, o molde se manteve estável e com boa resistência térmica e mecânica em relação a pressão metalostática, permitindo a possibilidade de aplicação deste método em processos fabris de fundição em ligas de alumínio.

Palavra-Chave: black dross, lixiviação, molde de fundição.

ABSTRACT

SILVA, Raphael Oliveira. FEASIBILITY OF MANUFACTURING SAND MOLDS WITH REUSED ALUMINUM BLACK DROSS: Title, Dissertation Master's in Materials Science – Federal University of São Carlos, Sorocaba, 2026.

For Known for over 200 years, aluminum has dominated the industrial, metalworking, food, and aerospace markets, thanks to its remarkable structural capacity and versatility. In the automotive sector, for example, it is highly demanded for its low density and high mechanical strength, which allows for the construction of lighter chassis for electric vehicles, offsetting the weight of the batteries. However, the processes for obtaining metallic aluminum generate a significant amount of waste. While the production of primary aluminum results in a slag called white dross, the production of secondary aluminum is responsible for generating *black dross*. This work aimed to enable the reuse of *black dross* (BD) in the manufacture of molds for metal casting. Samples of BD were collected at Alux do Brasil, in partnership with Companhia Brasileira de Alumínio (CBA). These were characterized by scanning electron microscopy with energy-dispersive spectroscopy (SEM/EDS) and X-ray diffractometry (XRD). They underwent hydrometallurgical leaching processes in distilled water (ABD) or anhydrous glycerol (GBD) to dissolve NaCl and KCl salts. Percentages of ABD were incorporated into silica sand in samples named T10, T20, T25, T40, T50, and T50* in the presence of alkaline resin and pyridine catalyst. Uniaxial tensile tests were performed on the ABD samples. For field testing, a product was modeled using the 3D design software "Inventor". Next, a prototype made of acrylonitrile butadiene styrene (ABS) polymer was printed using CURA software and a 3D printer. A sand mold was made with the best condition sample, T25, into which an aluminum alloy was melted and poured. The product obtained by the silica sand mold casting process with incorporated *black dross* proved promising; the mold remained stable and showed good thermal and mechanical resistance to metalostatic pressure, allowing the possibility of applying this method in manufacturing processes for casting aluminum alloys.

Keywords: black dross, leaching, mold.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - (A) FLUXOGRAMA DAS ETAPAS DE REDUÇÃO DA BAUXITA E (B) MINÉRIO DE BAUXITA E HIDRÓXIDO DE ALUMÍNIO E ALUMINA.	5
FIGURA 2 – ESQUEMA DE FUNCIONAMENTO DE UMA CUBA ELETROLÍTICA PARA OBTENÇÃO DE ALUMÍNIO METÁLICO.	7
FIGURA 3 - IMAGEM DE UMA BARRAGEM DE LAMA VERMELHA DA COMPANHIA BRASILEIRA DE ALUMÍNIO.	8
FIGURA 4 - (A) ESCUMADEIRA FIXADA NA EMPILHADERA, (B) ESCÓRIA SENDO REMOVIDA NO RECIPIENTE.	11
FIGURA 5 - IMAGEM SUPERIOR DA PLANTA DA ALUX DO BRASIL.	14
FIGURA 6 - IMAGENS DO PÁTIO DE DESCARTE DE <i>BLACK DROSS</i> NA VISITA A EMPRESA ALUX DO BRASIL. ..	15
FIGURA 7 - CAIXA DE AREIA COM ACESSÓRIOS DE FUNDIÇÃO E DESTAQUE PARA REGIÃO QUE CONTORNA O MODELO A SER FUNDIDO.	17
FIGURA 8 - ILUSTRAÇÃO DO ESQUEMA BIDIMENSIONAL PARA ESTRUTURA (A) DO DIÓXIDO DE SILÍCIO CRISTALINO (ORGANIZADO) E (B) DO DIÓXIDO DE SILÍCIO AMORFO (DESORGANIZADO).	18
FIGURA 9 - (A) REPRESENTAÇÃO DE UMA ESTRUTURA CRISTALINA CÚBICA DE FACE CENTRADA (CFC) DE CLORETO DE SÓDIO.	19
FIGURA 10- ILUSTRAÇÃO DA INCIDÊNCIA DA RADIAÇÃO E DIFRAÇÃO DE UM CRISTAL.	20
FIGURA 11 - DIFRATOGRAMAS PADRÕES DE AMOSTRAS DE <i>BLACK DROSS</i> ILUSTRANDO A PRESENÇA DOS PICOS DE ELEMENTOS CARACTERÍSTICOS.	21
FIGURA 12 - ESPECTRO "EDS" DE UM REJEITO (ESCÓRIA COM ALTA SALINIDADE) PROVENIENTE DA FUNDIÇÃO DE ALUMÍNIO SECUNDÁRIO.	22
FIGURA 13 - AMOSTRAS DE <i>BLACK DROSS in situ</i> RETIRADA DE CAÇAMBA DO PÁTIO DE REJEITOS.	23
FIGURA 14. (A) EQUIPAMENTO DE COMINUIÇÃO, (B) ESQUEMA DA MANDÍBULA E (C) FORNO MUFLA.	24
FIGURA 15 - EQUIPAMENTOS UTILIZADOS PARA DETERMINAR GRANULOMETRIA.	25
FIGURA 16 – REPRESENTAÇÃO DO SOLUTO SENDO DISSOLVIDO NO SOLVENTE, E A CONDIÇÃO ADOTADA COMO IDEAL PARA INÍCIO DA FILTRAGEM.	26
FIGURA 17 – SISTEMA COM BOMBA DE VÁCUO E FUNIL DE BUCHNER COM PAPEL FILTRO UTILIZADOS.	27
FIGURA 18 - (A) CAIXA MODELADORA DE CORPO DE PROVA PADRONIZADO E (B) EQUIPAMENTO UTILIZADO PARA ENSAIO DE TRAÇÃO	29
FIGURA 19 - À ESQUERDA TEM-SE O FLUXO DO PROCESSO DA PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA PARA ENSAIO DE TRAÇÃO EM AREIA E INCORPORAÇÃO DE BD (ESCURA) EM AREIA DE SÍLICA (CLARA) COM RESPECTIVO AGLOMERANTE DE RESINA ALCALINA (AVERMELHADO) E CATALISADOR (INCOLOR), À DIREITA, MOLDE NORMALIZADO CONFORME CEMP-E10.	29
FIGURA 20 – (A) CORPOS DE PROVA CONFORME NORMA CEMP E-10, (B) DISPOSITIVO DE ENSAIO DE TRAÇÃO EM AREIA E (C) CORPO DE PROVA SENDO ENSAIADO.	30
FIGURA 21 - MODELAGEM DE UM “LINGOTE” EM SOFTWARE 3D “INVENTOR”.....	30
FIGURA 22 - (A) INTERFACE DO SOFTWARE CURA, COM A PRÉVIA DE SIMULAÇÃO DA IMPRESSÃO E (B) IMPRESSÃO EM ANDAMENTO E (C) PROTÓTIPO FINALIZADO E IMPRESSO EM ACRILONITRILA BUTADIENO ESTIRENO “ABS”.	31

FIGURA 23 - (A) FORNO DE FUNDIÇÃO POR RESISTÊNCIA ELÉTRICA; METAL LÍQUIDO SENDO VAZADO NO MOLDE E (B) PREPARAÇÃO DA CAIXA DE FUNDIÇÃO COM AREIA INCORPORADA POR BD; PROTÓTIPO IMPRESSO EM 3D UTILIZADO COMO MODELO.....	31
FIGURA 24 - (A) MICROSCÓPIO ELETRÔNICO DE VARREDURA - MEV E (B) FIXAÇÃO DAS AMOSTRAS COM FITA DE CARBONO (CONDUTIVA) NO SUPORTE PARA ANÁLISE NO MEV/EDS.....	32
FIGURA 25 – EQUIPAMENTO DE DIFRATOMETRIA DE RAIOS – X (DRX).....	33
FIGURA 26 - (A) MEV DA AMOSTRA BD <i>IN SITU</i> , (B) DESTAQUE DE PONTOS ESPECÍFICOS DA ANÁLISE, (C) ESPECTRO EDS E (D) GRÁFICO EM BARRAS DOS ELEMENTOS ANALISADOS.	34
FIGURA 27 – (A) MEV DA AMOSTRA ABD, (B) DESTAQUE DE PONTOS ESPECÍFICOS DA ANÁLISE, (C) ESPECTRO EDS E (D) GRÁFICO EM BARRAS DOS ELEMENTOS ANALISADOS.	35
FIGURA 28 – (A) MEV DA AMOSTRA GBD, (B) DESTAQUE DE PONTOS ESPECÍFICOS DA ANÁLISE, (C) ESPECTRO EDS E (D) GRÁFICO EM BARRAS DOS ELEMENTOS ANALISADOS.	37
FIGURA 29 - CORPO DE PROVA DE ENSAIO DE RESISTÊNCIA A TRAÇÃO DE AREIA DE SÍLICA COM (A) BD INCORPORADA E RESINA ALCALINA E CATALISADOR E (B) GBD INCORPORADA E RESINA ALCALINA E CATALISADOR.	38
FIGURA 30 – (A) MOLDE PRONTO PARA REMOÇÃO DO MODELO, (B) RETIRADA DO MODELO, (C) VAZAMENTO DE METAL LÍQUIDO, (D) DESMOLDAGEM, (E) ANÁLISE VISUAL DA ESTRUTURA DO MOLDE E (F) PEÇA METÁLICA OBTIDA.....	46

LISTA DE TABELAS, QUADROS E GRÁFICOS

TABELA 1- QUANTIDADE DE RESÍDUO PRODUZIDO NA CADEIA DE PRODUÇÃO DE ALUMÍNIO PRIMÁRIO.	8
TABELA 2 - VALORES DA COMPOSIÇÃO DOS SUBPRODUTOS DO PROCESSO DE OBTENÇÃO DE ALUMÍNIO.	12
TABELA 3 - DISPOSIÇÃO DE PENEIRAS UTILIZADAS NO PROCESSO DE DETERMINAÇÃO DE TAMANHO DE GRÃO MÉDIO.	24
TABELA 4. DETERMINAÇÃO DA PROPORÇÃO DE ABD, SiO ₂ , RESINA E CATALISADOR PARA PRODUZIR MOLDES PARA FUNDIÇÃO.	28
TABELA 5 - DADOS DOS VALORES DE PARTICULADO RETIDO ENTRE AS PENEIRAS ASTM 30 E 200.	41
TABELA 6 - MÓDULO DE FINURA PARA MATERIAIS AGREGADOS CONFORME ABNT NBR NM248/03.	42
QUADRO 1 - REAÇÕES QUÍMICAS GLOBAIS MAIS COMUNS DA REAÇÃO DA BLACK DROSS DO PROCESSO DE HIDRÓLISE.....	16
QUADRO 2 - DENOMINAÇÃO DAS AMOSTRAS APÓS PROCESSO DE LIXIVIAÇÃO DOS SAIS COM SOLVENTES DISTINTOS.	26
GRÁFICO 1 - PAÍSES COM ALTA CONCENTRAÇÃO E PRODUÇÃO DE MINÉRIO DE BAUXITA EM MILHÕES DE TONELADAS.....	4
GRÁFICO 2 - PRODUÇÃO DE ALUMÍNIO PRIMÁRIO PARALELO À OBTENÇÃO DE ESCÓRIA DE ALUMÍNIO.....	10
GRÁFICO 3 - ANÁLISE DE GRANULOMETRIA DE AREIA DE SÍLICA (NOVA), CROMITA (NOVA), AREIA VERDE (SÍLICA RECUPERADA) E BLACK DROSS (BD).	41
GRÁFICO 4 - REPRESENTAÇÃO DOS VALORES DE RESISTÊNCIA A TRAÇÃO DAS AMOSTRAS DE SiO ₂ COM ABD INCORPORADA. A LINHA VERMELHA REPRESENTA O VALOR MÍNIMO ACEITÁVEL.....	44

Sumário

1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVO	3
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
3.1. Minério: a bauxita	3
3.2. A eletrólise e o alumínio	6
3.3. Resíduos dos processos.....	8
3.4. Escória de alumínio	9
3.5. Indústria de alumínio secundário	13
3.6. Processos de fundição com moldes de areia	16
3.7. Difratomia de Raio-X (DRX)	18
3.8. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).....	22
4. METODOLOGIA.....	23
4.1 Preparação das amostras	23
4.1.2. Lixiviação de sais da <i>black dross</i> em água destilada ou glicerol anidro	25
4.1.3 Determinação de incorporação de <i>Black dross</i> em areia de fundição	28
4.1.4. Incorporação de <i>Black dross</i> em areia de sílica	29
4.1.5. Modelagem e prototipagem 3D e confecção de moldes com areia de sílica e <i>Black dross</i> para obtenção de produto fundido	30
4.2. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).....	32
4.3. Difratomia De Raio-X (DRX)	32
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	33
5.1. Análise de microscopia eletrônica de varredura (MEV/EDS).....	33
5.2 Análise de difratometria de raio-X (DRX)	38
5.3. Análise de granulometria de agregados	40
5.4. Resistência mecânica a tração da areia de sílica com <i>Black dross</i> incorporada ..	43
5.4.1. Metal fundido em molde de areia de sílica com <i>Black dross</i> incorporada	45
6. CONCLUSÃO.....	46
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS	48

1. INTRODUÇÃO

Há cerca de 200 anos, desde sua descoberta em 1825, o alumínio e suas ligas vêm conquistando espaço com maestria nos mercados de construção civil, automobilístico, aeroespacial, naval, bem como em setores de menor demanda mecânica, como utensílios eletrodomésticos (PEIXOTO, 2001).

Essa ampla gama de aplicações ocorre devido às suas características físico-químicas, incluindo uma excelente relação entre densidade e resistência, elevado nível de resistência à corrosão. Quando na forma metálica, é 100% reciclável; quando na forma de óxido de alumínio (Al_2O_3), possui alta resistência às oscilações térmicas de grande amplitude (CALLISTER & RETHWISCH, 2008).

Para efeito de comparação, uma das ligas metálicas mais resistentes disponíveis atualmente no mercado de alumínio é o AA 7075, com resistência de 570 MPa e densidade aproximada de 2,8 g/cm³, enquanto o *Maraging Steel* (Fe-Ni) apresenta resistência de aproximadamente 2.000 MPa e densidade de 8,1 g/cm³. A relação entre densidade e resistência de ambos, é equivalente (COSTA E SILVA & MEI, 2010).

A versatilidade das ligas de alumínio, aliada à sua alta resistência e baixa densidade, faz com que o setor automobilístico, principalmente o de carros elétricos, tenha interesse em construir a estrutura veicular em alumínio. Essa substituição do aço visa diminuir o peso e, conseqüentemente, o consumo de combustível e a emissão de poluentes. Em fevereiro de 2021, a Tesla, por meio de seu CEO Elon Musk, anunciou na plataforma X (antigo Twitter) a aquisição da maior máquina de fundição sob pressão do mundo (LAVRADOR, 2022).

Em dezembro de 2023, o canal oficial The Tesla Space apresentou o processo GIGAPRESS, que demonstra um veículo com a carroceria completamente injetada em alumínio, unificando o produto em uma única peça, dispensando processos de soldagem ou emendas, tornando o veículo mais simples, leve e barato (KOTHARI, 2023).

De acordo com dados da ABAL, o Brasil está classificado como o 11º maior produtor de alumínio primário do mundo, com 810 mil toneladas produzidas em 2022. No mesmo ano, foram recicladas 905 mil toneladas de alumínio, sendo 43% deste montante proveniente apenas de latinhas. Em 2023, foram exportadas cerca de 500 mil toneladas de alumínio primário, com um custo aproximado de US\$ 3.500 por tonelada. Esses dados destacam a importância dessa commodity para a economia nacional (ABAL "b", 2023).

Contrapartida, o processo de obtenção de alumínio metálico acarreta um impacto ambiental negativo, não apenas devido ao elevado consumo de energia elétrica, mas também pela alta emissão de dióxido de carbono (CO₂) proveniente do processo Hall-Héroult, estimada em cerca de 0,5 Gt por ano, além de gerar subprodutos como escória (BROUGH & JOUHARA, 2020).

A escória é um subproduto que pode ser classificado como escória ferrosa e não ferrosa, constituída por uma mistura de óxidos, silicatos e sulfetos metálicos, formada na superfície do banho metálico. Devido às suas características constitutivas, ela desempenha a função de proteger o banho de elementos externos com natureza reoxidativa (COSTA E SILVA & MEI, 2010).

Quando resfriada e solidificada, a escória pode ser processada para utilização como fertilizantes ou na pavimentação de estradas. A escória granulada é consumida pela indústria de produção de cimento, mas uma parte significativa da composição alcalina permanece em aterros (ÂNGULO & ZORDAN, 1996).

A escória de alumínio recebe subclassificações. Quando obtida na fundição de alumínio primário (proveniente do minério), é chamada de *white dross*. A escória obtida na fundição de alumínio secundário (proveniente de sucatas) é chamada de *black dross* (KULIK & DALEY, 1990).

A *white dross* é composta por óxido de alumínio com teor entre 15 e 80%, contendo um baixíssimo fluxo de sal. Além disso, é possível encontrar outros compostos em menores quantidades, como AlN e Al₄C₃ (reações de termite), e Na₃AlF₆ (proveniente da eletrólise) (BEHESHTI, 2014).

A *black dross* é formada por uma mistura de sal, óxidos e metais. Esse fluxo salino é proveniente do processo de recuperação de sucata de alumínio, sendo constituído por NaCl, KCl e Fluoretos. Em altas temperaturas, acima do ponto de fusão, o fluxo salino e a *black dross* tornam-se duas fases líquidas, de metal e sal, que não se misturam. O teor de alumínio metálico na *black dross* pode variar entre 7 e 35%, dependendo do tipo de sucata e das condições de processamento (BEHESHTI, 2014); (HWANG & HUANG, 2006).

A Alux do Brasil é uma empresa metalúrgica localizada em Nova Odessa, interior de São Paulo, que atua no setor de fundição de sucatas para a obtenção de alumínio secundário. Utilizando dois fornos rotativos, de combustão a oxigênio, a empresa produz cerca de 24 toneladas de alumínio secundário por corrida. Assim, uma quantidade de aproximadamente 600 toneladas por mês de *black dross* é gerada, sendo

tratada como rejeito. Esta *black dross* é estocada em caçambas e recolhida por outra empresa que trata esses rejeitos, para que possam ser descartados em aterros (ANASTACIO, 2024).

O tratamento desses rejeitos envolve equipamentos e técnicas de alto custo e o descarte incorreto deste resíduo acarreta, na presença de umidade, a emissão de gases tóxicos como amoníaco (NH_3) (HU, 2021); (MESHGRAM, 2018).

A empresa responsável pelo tratamento da *black dross* visa diminuir o impacto ambiental, de forma a atender às normas estabelecidas pela NBR 10.004, em conformidade com a Lei Federal 12.305 de 02/08/10, para o descarte de resíduos sólidos, além de fornecer garantia de recuperação de até 8% de alumínio metálico para a metalúrgica produtora desses rejeitos (CAROLINE, 2024).

Desta forma se faz necessário tratar esse rejeito para antes de destiná-lo às aplicações posteriores. Para isso, a matéria prima foi tratada por meio de um processo hidrometalúrgico de lixiviação com água destilada ou glicerol anidro e incorporada em areia de SiO_2 .

2. OBJETIVO

O objetivo deste trabalho consistiu em encontrar uma forma sustentável e preferencialmente de baixo custo em viabilizar o uso da escória de alumínio “*black dross*” no processo de confecção de moldes de areia para fundição de metal.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

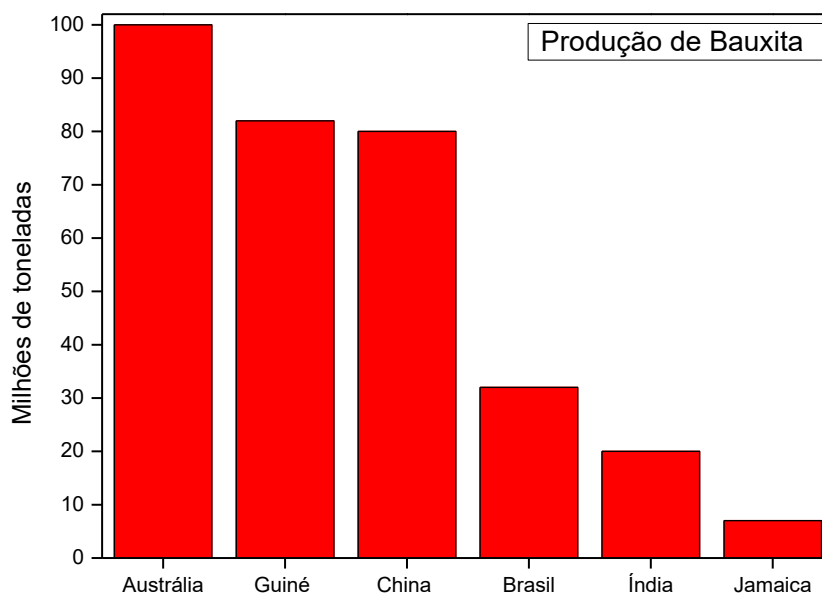
3.1. Minério: a bauxita

O alumínio é o elemento metálico mais abundante presente na crosta terrestre e pode ser encontrado em sua forma estável, chamada bauxita. A bauxita é uma rocha sedimentar com alto teor de alumínio, sendo também possível obter gálio a partir dela. Devido a esse fator, a bauxita torna-se uma fonte primária de produção de alumina, que é a matéria-prima necessária para a obtenção de alumínio metálico (MORDOR, 2023).

Os países tropicais são responsáveis por cerca de 57% da bauxita obtida no mundo, enquanto os mediterrâneos contribuem com aproximadamente 33% e os subtropicais com cerca de 10%, de acordo com informações da IAI - *International Aluminum Institute* (QUARESMA, 2009).

De acordo com a Agência Nacional de Mineração - ANM e o Instituto Brasileiro de Mineração - IBRAM, a Austrália e o Brasil são os países que mais exportam minérios, liderados pelo minério de ferro no ranking, seguido pelo minério de alumínio (IBRAM¹, 2022). O gráfico 1 destaca os maiores produtores de bauxita do mundo.

Gráfico 1 - Países com alta concentração e produção de minério de bauxita em milhões de toneladas.



Fonte: Adaptado (USGS , 2025)

Alguns países da Europa como Grécia e a França, possuem jazidas de bauxita mono-hidratada " $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ". Já o Brasil, China e Austrália, o minério de bauxita possui características físico-químicas tri-hidratadas, com a fórmula " $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ". Esse pequeno detalhe molecular confere ao minério uma qualidade superior, atendendo aos padrões exigidos pelo mercado (MÁRTIRES, 2011).

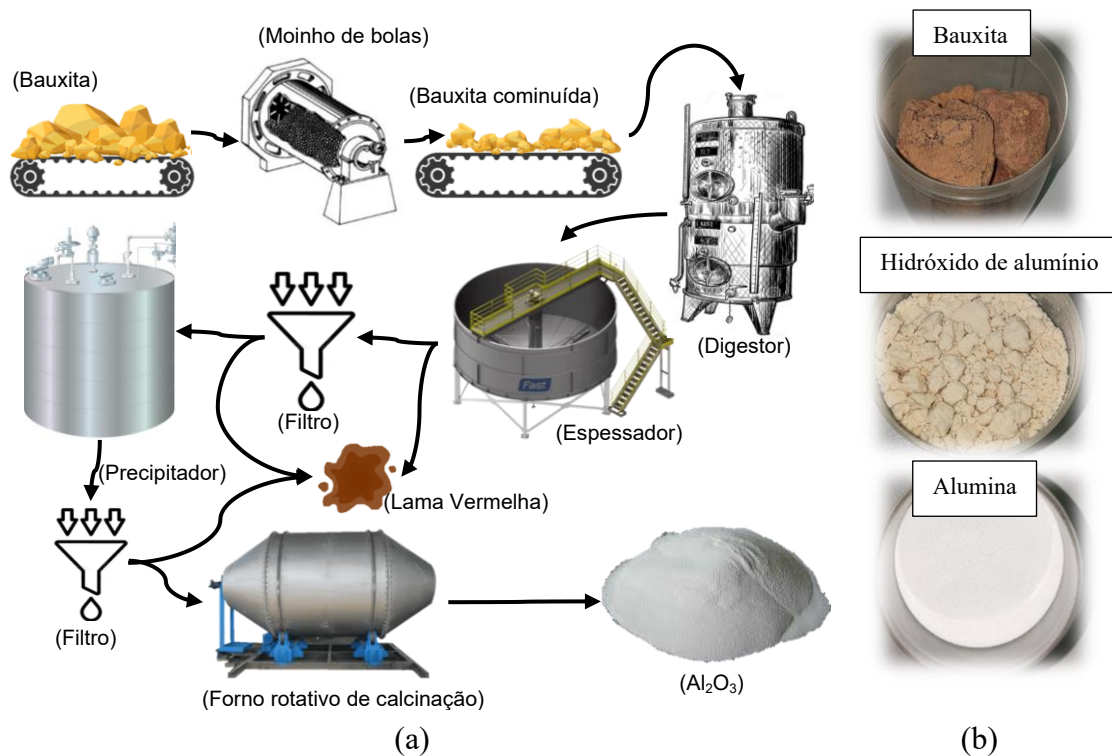
A bauxita quando misturada e aquecida com calcário a altas temperaturas $\sim 1550^\circ\text{C}$ em fornos rotativos pode originar cimento de alta alumina para o setor de construção civil. A alumina, produto obtido após beneficiamento da bauxita, quando em suspensão (partículas dispersas em um solvente líquido), pode ser utilizado em processos de polimento de metais (metalografias). Essas aplicações demonstram versatilidade da bauxita e da alumina (FLORES & NEVES, 1997).

Estudo realizado pela CBA - Companhia Brasileira de Alumínio, de 1980 a 2007, revelou que 90% das reservas brasileiras de bauxita estão em app - áreas de preservação permanente (IBRAM², 2007).

Este imbróglio de interesses políticos causa morosidade, o que faz com que poucas empresas atuem no mercado nacional. A MRN - Mineração Rio do Norte, composta por outras empresas de mineração e produção de alumínio primário, como Vale, Billiton Metais, Rio Tinto Alcan, CBA, Alcoa, Norsk Hydrom e Abalco, comprometem a competitividade devido aos altos custos operacionais e licenças ambientais (HENRIQUES & PORTO, 2013); (MORDOR, 2023).

A transformação do minério de bauxita em alumina é um processo desenvolvido pelo químico Karl Bayer em 1888. O processo Bayer, que carrega o nome de seu criador, consiste na extração da bauxita, que posteriormente é lavada, gerando cerca de 30% de resíduo de uma mistura de sílica com argila, com um teor de 6% de Fe_2O_3 (DOS SANTOS, 2013); (MATOS, 2020); (RACANELLI, 2020). O processo Bayer, conforme ilustrado na Figura 1, apresenta um fluxograma no qual o minério de bauxita passa por diversos processos, deixando de ser uma rocha e se tornando um pó de alumina.

Figura 1 - (a) Fluxograma das etapas de redução da bauxita e (b) minério de bauxita e hidróxido de alumínio e alumina.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Conforme o fluxograma da Figura 1 (a), o minério de bauxita passa pelo processo de extração, seguido pela cominuição. Em seguida, ocorre a solubilização em

solução de hidróxido de sódio (soda cáustica) sob pressão (~30 atm) e temperatura (~150 até 220°C), originando o aluminato de sódio - NaAl(OH), que é chamado de processo de digestão (primeira etapa). Posteriormente, no processo de espessamento (segunda etapa), ocorre a decantação e filtração, onde há a separação da fase sólida “insolúvel” (SILVA FILHO E. B., 2007).

No precipitador (terceira etapa), o hidróxido de alumínio Al(OH)₃ é precipitado e, em seguida, calcinado em forno rotativo (quarta etapa) a cerca de 1.000°C para desidratação, formando então a alumina alfa - Al₂O₃. Assim, a bauxita deixa de ser uma rocha avermelhada, conforme ilustrado na Figura 1 (b), para se transformar em alumina extremamente branca (SOUZA, 2010).

3.2. A eletrólise e o alumínio

A teoria de eletrólise desenvolvida por Michael Faraday em 1.834, descreve a relação quantitativa entre a eletricidade que passa por uma solução e a quantidade de substância que é liberada nos eletrodos. Svante Arrhenius em 1.884, desenvolveu teoria eletrolítica da dissociação iônica e condução de eletricidade de que lhe rendeu um Prêmio Nobel em 1.903. Arrhenius propôs que a existência de íons, partículas responsáveis pela presença de condutividade elétrica em uma solução, é eficiente para explicar fenômenos de dissociação em meio aquoso através da dissociação iônica (RUSSELL, 1994).

Neste processo, um soluto (ácido, base ou sal) é dissolvido em um solvente (água), o que faz com que as partículas se dissociem, formando íons. Desta forma, são obtidas cargas de composição iônica, denominadas de ânions (-) e cátions (+). Embora haja cargas no eletrólito, a solução permanece eletricamente neutra (RUSSELL, 1994).

Os ânions (-), íons de carga negativa, são atraídos pelo ânodo (+), o pólo positivo, onde irão perder elétrons e sofrer oxidação. Os elétrons cedidos ao ânodo migram através do circuito externo até o cátodo (-), o pólo negativo, que sofrerá redução (CERQUEIRA, 2011).

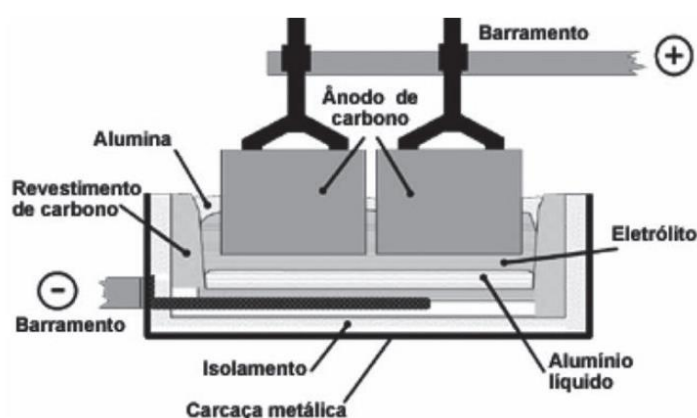
A eletrólise é uma reação de oxirredução não espontânea que necessita de uma fonte externa de corrente elétrica contínua. Arrhenius verificou que a passagem de corrente elétrica estava associada à existência de íons livres em solução, o recipiente no qual ocorre essa eletrólise é chamado de célula ou cuba eletrolítica. (CERQUEIRA, 2011).

Diante destas sólidas teorias e após diversas tentativas de aprimorar o processo desenvolvido pelo físico Hans Oersted e pelo químico Friederich Woehler, conhecidos

historicamente como os pais do alumínio metálico, simultaneamente, dois outros cientistas, o jovem engenheiro Charles Hall e o químico Paul Louis Héroult, tornaram o processo popular adotando técnicas de eletrólise, originando o processo Hall-Héroult (PRASAD, 2000).

No processo Hall-Héroult, ocorre a fusão via eletrólise da alumina-criolita através de um recipiente chamado célula ou cuba eletrolítica, como mostrado na Figura 2 (CNI, 2017).

Figura 2 – Esquema de funcionamento de uma cuba eletrolítica para obtenção de alumínio metálico.



Fonte: (CNI, 2017)

As cubas eletrolíticas operam a uma temperatura próxima de 1000°C e são configuradas com eletrodos de grafite que atuam como ânodo, e o recipiente (cuba) como cátodo. Quando aplicada uma diferença de potencial de baixa tensão, com cerca de 4,5V e alta corrente, por volta de 300 kA, promove-se a separação do oxigênio do alumínio, obtendo-se: $\text{Al}^{3+} + 3\text{e}^-$. O oxigênio produzido reage com o carvão do ânodo, formando misturas gasosas de dióxido de carbono - CO_2 e monóxido de carbono - CO (PRASAD, 2000).

O eletrólito tem a função de permitir a lixiviação da alumina e a separação das fases do eletrólito e do alumínio. A presença de um solvente chamado criolita, também conhecido como Fluoraluminato de Sódio (Na_3AlF_6), é utilizada com o propósito de diminuir a temperatura de fusão do óxido de alumínio de 2.000°C para cerca de 900°C (PEREIRA, 2006).

Com a obtenção do alumínio metálico no estado líquido, ele é retirado da cuba eletrolítica em determinados períodos e transferido para recipientes refratários chamados cadinhos ou para os chamados fornos de espera, e posteriormente são vazados em

lingoteiras, obtendo-se os lingotes. Na literatura, encontra-se uma composição generalista típica do eletrólito: cerca de ~8% de alumina, ~6% de fluoreto de alumínio, ~6% de fluoreto de cálcio e ~80% de criolita (LAZARINOS, 2007)

3.3. Resíduos dos processos

As jazidas de bauxita estão predominantemente localizadas em mata ciliar e reservas biológicas, de acordo com a Associação Brasileira do Alumínio – ABAL, a maior reserva de bauxita do Brasil está localizada no Pará (QUARESMA, 2009).

O Brasil foi o 3º maior produtor em 2022, produzindo 11 milhões de toneladas de alumina. De acordo com informações da AMN - Agência Nacional de Mineração, são necessárias 4 toneladas de bauxita seca, para produzir 2 toneladas de alumina a fim de obter 1 tonelada de alumínio metálico (ANTUNES, 2012); (HYDRO¹, 2022).

Na Tabela 1, é possível observar a quantidade de resíduo gerado para cada proporção de produto obtido na cadeia produtiva de alumínio.

Tabela 1- Quantidade de resíduo produzido na cadeia de produção de alumínio primário.

Produto	Proporção (mil t)	Resíduos (mil t)	Rendimento (%)
Bauxita	4	11	100
Alumina	2	5,5	50
Alumínio	1	0,4	25

Fonte: Adaptado (SIQUEIRA, 2022).

No processo Bayer, após a separação do aluminato de sódio, é gerada uma grande quantidade de resíduo sólido que é depositado em barragens, conforme mostrado na Figura 3, e chamado de *red mud* (lama vermelha) (SIQUEIRA, 2022).

Figura 3 - Imagem de uma barragem de lama vermelha da Companhia Brasileira de alumínio.



Fonte: (PÉRICLES RÉGIS, 2019).

Estima-se que, em média, sejam geradas duas toneladas de lama vermelha para cada tonelada de alumina produzida. Esta lama contém uma alta concentração de soda cáustica (NaOH) e tem um pH elevado de 13,5, sendo altamente alcalina. Além disso, é constituída por diversos tipos de óxidos, incluindo Fe, Ni, Si, Ti, P, V e Zn (SIQUEIRA, 2022).

Os principais constituintes observados na lama vermelha produzida pela Companhia Brasileira de Alumínio - CBA, na cidade de Alumínio/SP, são óxidos de alumínio, ferro e silício. Mesmo contendo um baixo teor de alumina, cerca de 50% são considerados como material industrial. Não é recomendada sua utilização para obtenção de sulfato de alumínio para a produção de refratários, devido ao teor de ferro ser de 8% (ANTUNES, 2012).

A exploração deste minério para obtenção de um metal considerado uma *commodity* estratégica para o país é economicamente importante. Isso gera empregos em diversos setores tanto direta, quanto indiretamente ao longo de toda a cadeia de utilização, desde o financiamento para estudos geológicos mapeando jazidas até as cooperativas que recuperam e destinam os metais para reciclagem (HENRIQUES & PORTO, 2013); (HYDRO¹, 2022); (LONDON METAL EXCHANGE, 2024).

Entretanto, para grupos ambientalistas, a prática de exploração é vista como uma aberração, pois, a curto prazo, destrói a biodiversidade da fauna e flora local. Mesmo que a indústria recupere o solo fértil previamente armazenado, isso muitas vezes se baseia no plantio de eucaliptos, uma atividade com impactos positivos na economia, mas negativos no meio ambiente (HENRIQUES & PORTO, 2013).

Os rejeitos não são exclusividade do processo de mineração da bauxita ou da redução da alumina em alumínio. Na Tabela 1 deste capítulo, é apresentada uma informação referente ao resíduo de alumínio metálico. Este valor está relacionado à produção de um rejeito chamado escória, sendo que, para cada tonelada de alumínio metálico primário produzido, cerca de 0,4 tonelada de escória é gerada (ANTUNES, 2012).

3.4. Escória de alumínio

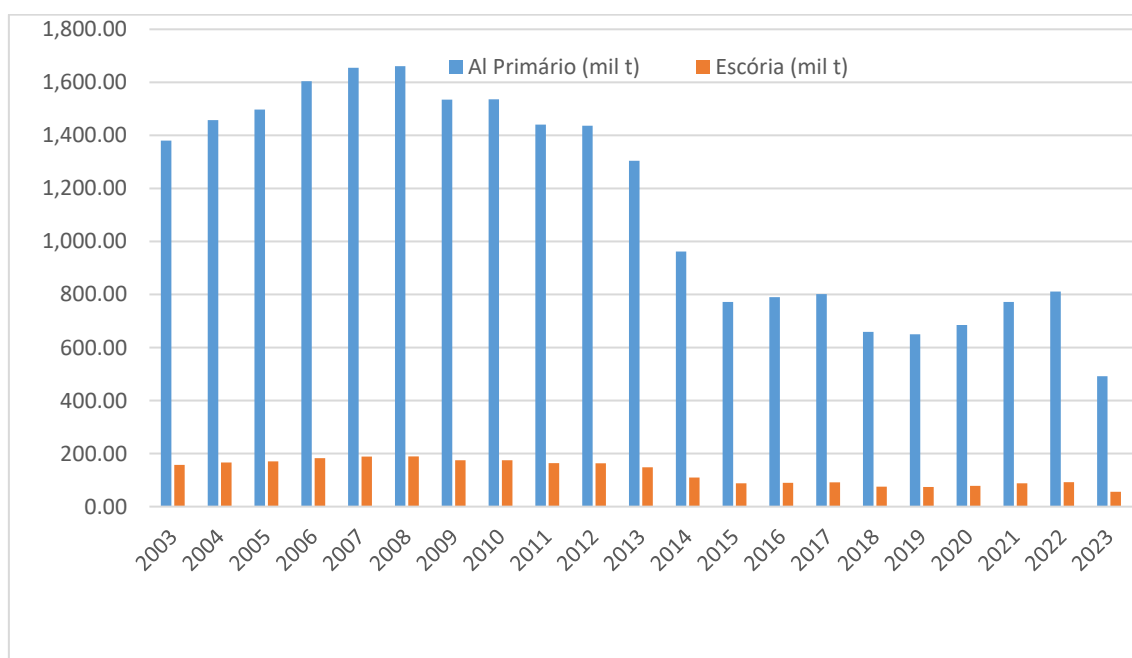
Escória é definida como uma camada sólida que flutua sobre o banho metálico e tem características cerâmicas, formada por óxidos, sulfetos e silicatos. Sua principal função é proteger o metal líquido de agentes externos como o oxigênio, embora se forme justamente pela presença deste. As altas temperaturas de fusão, combinadas com sucata

de baixa espessura, contribuem para o aumento da escória reduzindo a quantidade de alumínio primário produzido (ABAL"a", 2007).

Dados da ABAL - Associação Brasileira do Alumínio, constataram que em 2005 o Brasil produziu cerca de 170 mil toneladas de escória, o que representa aproximadamente 11,4% do valor total de alumínio primário produzido. Em 2008, ano recorde de produção de alumínio primário, foram produzidas 1.497 mil toneladas, levando em consideração o mesmo índice, então, 191 mil toneladas foram de escória (ABAL"b", 2023).

Os dados do Gráfico 2, demonstram como foi a dinâmica de produção de alumínio nos últimos 20 anos.

Gráfico 2 - Produção de alumínio primário paralelo à obtenção de escória de alumínio

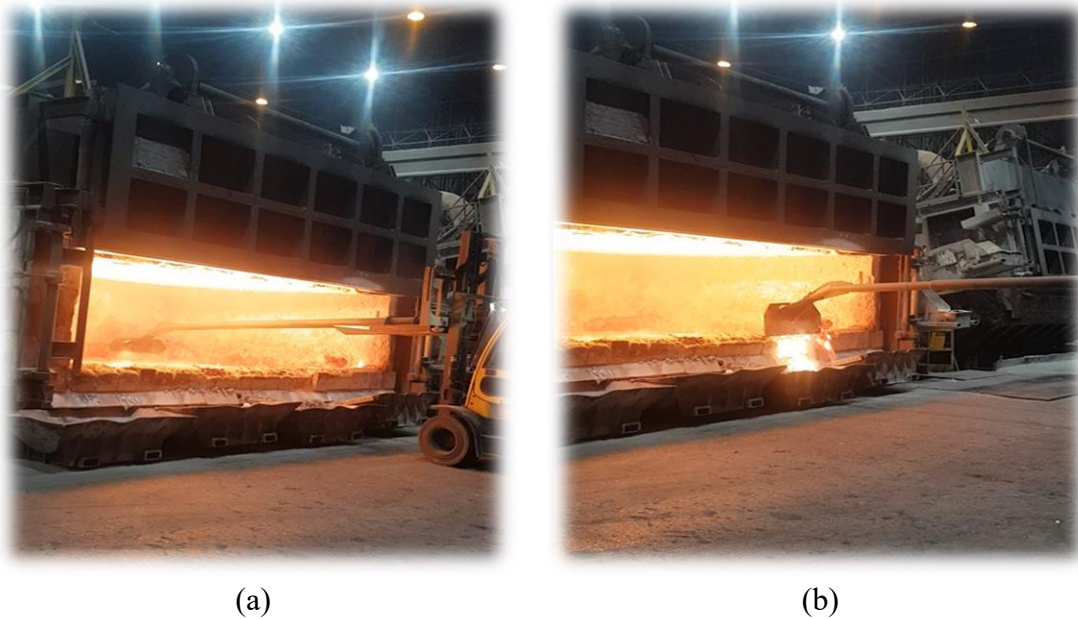


Fonte: adaptado (ABAL"b", 2023).

O Gráfico 2 aponta que a produção de alumínio no Brasil em 2023 foi 29,6% menor que no auge em 2008, mantendo a proporção de produção primária com geração de rejeitos “escória” (ABAL"b", 2023).

Como subproduto, a escória deve ser separada do metal fundido, e essa separação pode ocorrer de maneira manual em fornos horizontais, conforme mostrado na Figura 4.

Figura 4 - (a) escumadeira fixada na empilhadeira, (b) escória sendo removida no recipiente.



Fonte: Elabora pelo autor

Na Figura 4 (a) é possível observar um forno vertical com a porta frontal erguida, de modo que o operador utilizando uma escumadeira acoplada em uma empilhadeira com intuito de remover grande parte de escória de alumínio primário. Na borda do forno a escória é captada por caçambas posicionadas estrategicamente, conforme Figura 4 (b).

A crise global econômica imobiliária que ocorreu entre 2007 e 2009 não foi suficiente para prejudicar o setor da indústria nacional de produção de metal, como mostrado no Gráfico 1. Na verdade, esse foi o período em que o setor alcançou os maiores resultados de produção de alumínio primário. A dificuldade de produção sempre esteve ligada ao preço e à oneração da energia elétrica (ABAL"b", 2023).

Neste mesmo período, o Brasil foi líder mundial em reciclagem, reciclando cerca de 90% das latas de alumínio, ou 165 mil toneladas, e reaproveitando-as para produzir alumínio secundário, obtido através de sua sucata, conforme a Associação Brasileira de Fabricantes de Latas de Alumínio (ABRALATAS, 2024).

Há comercialização de escória com empresas de reciclagem que possuem processos de reaproveitamento de sólidos, com o objetivo de neutralizá-los para posterior descarte no meio ambiente em aterros. Em alguns casos, é possível retirar alumínio primário da escória através de processos térmicos. Entretanto, a classificação do tipo de escória é feita com base na quantidade de teor de alumínio (TSAKIRIDIS, 2012).

A escória de alumínio possui classificação em função da quantidade de teor de alumínio e são chamadas de *white dross* (escória branca), *black dross* (escória negra) e *salt cake* (saís de cloretos). A Tabela 2 apresenta dados referentes à presença de % de alumínio metálico em cada componente citado (XING, 2017).

Tabela 2 - Valores da composição dos subprodutos do processo de obtenção de alumínio.

Subproduto	%Alumínio metálico	% Óxido de Alumínio	%Sal
<i>white dross</i>	15 – 80	20 – 85	0 – 1
<i>black dross</i>	7 – 35	30 – 50	30 – 50
<i>salt cake</i>	3 – 10	20 – 60	20 – 80

Fonte: (XING, 2017).

A *white dross* é obtida através do processo de produção do alumínio primário, onde a oxidação do banho resulta em escória dessa natureza com alto teor de alumínio. Geralmente, a *black dross* se forma na superfície durante o processo de fusão na recuperação do alumínio presente na *white dross* através da técnica de pirometalurgia (BEHESHTI, 2014).

Entretanto, as indústrias do setor metalúrgico utilizam sucata de alumínio, reaproveitando esses refugos (produtos defeituosos) para produzir novas ligas de alumínio secundárias. Deste modo, a escória originada desse processo é a *black dross* (CINARLY, 2021); (XING, 2017).

A fundição comercial é realizada em fornos rotativos com o uso de sal. O sal tem a função de melhorar a solubilidade da sucata de alumínio e promover uma camada de proteção entre a parede do refratário e o metal líquido, além de auxiliar na aglomeração e separação de óxidos (BEHESHTI, 2014). Operações desta natureza levam o nome de 'bolo de sal', contendo de 3 a 5% de resíduo metálico, que são posteriormente descartados em aterros (KULIK & DALEY, 1990).

Ocorre que o descarte desta *black dross*, embora realizado em aterros, não atende aos requisitos ideais para este destino, uma vez que a presença de cloretos neste subproduto resulta em gases tóxicos, como nitrogênio e hidrogênio, formando amoníacos, que em grandes quantidades, dispersos em lençóis freáticos, podem causar danos aos seres humanos se houver a ingestão desta água (TSAKIRIDIS, 2012).

Estudos vêm sendo realizados ao longo dos anos com o intuito de destinar este rejeito para uso na construção civil, no recapeamento de asfalto ou na indústria de cimento (YOSHIMURA, 2008).

3.5. Indústria de alumínio secundário

De acordo com o *International Aluminium Institute* (IAI) em 2023, o mundo produziu cerca de 70,5 milhões de toneladas de alumínio primário, representando um aumento de 3% em relação ao ano anterior (REVISTA ALUMÍNIO, 2023).

O Brasil, com algumas das maiores empresas de produção de alumínio, como Albras - Alumínio Brasileiro (PA), Alcoa Alumínio (MG e MA), Novelis (MG e BA), Billiton Metais (MA) e CBA - Companhia Brasileira de Alumínio (SP), produziu cerca de ~800 mil toneladas em 2023. Embora a China lidere e contribua com uma boa parcela da produção mundial de alumínio primário, com mais de 10 milhões de toneladas por ano, o Brasil continua sendo o líder mundial de produção de alumínio secundário, alcançando a marca histórica de 905 mil toneladas de alumínio reciclado, ultrapassando sua própria produção de alumínio primário (ABAL "b", 2023); (REVISTA ALUMÍNIO, 2023).

Embora o consumo de alumínio primário tenha uma alta demanda, o Brasil ainda possui poucas empresas responsáveis pela cadeia de transformação do minério até o metal, principalmente devido ao alto custo da energia elétrica (FERREIRA A. C., 2014).

Um estudo realizado entre 2011 e 2021 revelou que o custo de energia elétrica para o setor industrial é de 113 U\$\$/MWh (629 R\$/MWh), considerando o valor do dólar na época, de R\$ 5,57. Deste valor, cerca de 45% são impostos (31% tributos + 13% encargos). De acordo com a Agência Internacional de Energia, os valores praticados em solo brasileiro são 50% maiores que a média mundial (215,5 R\$/MWh). Entre os países emergentes do BRICS, o valor médio brasileiro no período citado é ainda mais expressivo, cerca de 134% maior que os demais (ANEEL, 2021).

A produção de alumínio secundário consome aproximadamente 5% da energia elétrica necessária para obter alumínio primário. Esses dados destacam a importância estratégica das empresas de produção de alumínio secundário, especialmente no contexto nacional, tanto em termos econômicos quanto sustentáveis (FERREIRA A. C., 2014).

A Alux do Brasil é uma empresa do ramo metalúrgico fundada em 2002 com o objetivo de fundir sucata de alumínio para obter alumínio secundário. Possuindo tecnologia e equipamentos específicos, ela refunde as sucatas geradas por terceiros e as fornece novamente na forma de lingotes ou até mesmo no estado líquido, conforme necessário (ALUX DO BRASIL, 2024).

Situada às margens da Rodovia Chico Xavier, na cidade de Nova Odessa, entre Campinas/SP e Limeira/SP, a empresa está estabelecida dentro de um condomínio de

empresas que inclui a KS Pistões conforme ilustrado na Figura 5. Inicialmente, a empresa foi criada para trabalhar com matéria-prima proveniente da própria indústria de pistões de alumínio.

Figura 5 - Imagem superior da planta da Alux do Brasil.



Fonte: Adaptado (Maps/Alux do Brasil, 2025)

É uma empresa com capacidade de produção de alumínio secundário de ~1.300 Toneladas/mês, com uma área total de aproximadamente 20 mil m². Possui um pátio com uma variedade de sucatas de alumínio, que vão desde carcaças de motores e pistões até latas de bebidas e cavacos metálicos (ANASTACIO, 2024).

Com certificação ISO 9001 e ISO 14001 e clientes líderes de segmento, como a Honda e a KS Pistões, a Alux do Brasil atraiu um amplo espectro de clientes. Uma das maiores indústrias do segmento metalúrgico de alumínio primário, a Companhia Brasileira de Alumínio - CBA, adquiriu a empresa em 2012. Com isso, a Alux do Brasil tornou-se parte do portfólio do grupo Votorantim (CAROLINE, 2024).

A *black dross* ou escória negra, é um resíduo de cor escura com aspecto arenoso formado por diversos compostos, entre óxidos de Al, Ca, Si, Ti, Mg e Fe, além de sais de KCl e NaCl (NGUYEN, 2020).

Estes materiais são devidamente armazenados em caçambas e destinados para tratamento por uma empresa que trata rigorosamente este subproduto tóxico, e posteriormente são descartados em aterros que devem ser devidamente controlados por órgãos estaduais e municipais, como por exemplo a Agência do Estado de São Paulo, a Companhia Ambiental do Estado de São Paulo - CETESB (ANASTACIO, 2024).

No processo realizado na Alux do Brasil, são geradas cerca de 600 toneladas mensais de *black dross* e armazenada em caçambas até o descarte, conforme Figura 6.

Figura 6 - Imagens do pátio de descarte de *black dross* na visita a empresa Alux do Brasil.



Fonte: Elaborado pelo autor.

O processo de reciclagem da *white dross* é relativamente fácil, com apenas um processo de fusão, é possível extrair alumínio metálico. Entretanto, a reciclagem da *black dross* é mais complexa devido à alta presença de sais e compostos inorgânicos, sendo necessário um processo adicional de separação (KANG, 2018).

Existem processos de recuperação da escória salina, como por exemplo, a separação por correntes parasitas (ECS), por via mecânica de britagem ou por lixiviação via úmida. Embora alguns óxidos não sejam solúveis em água, os sais são, dessa forma, eles podem ser filtrados, evaporados e sujeitos a tratamento de cristalização (KANG, 2018). O conglomerado de países da União Europeia já considera o resíduo de *black dross* como sendo um subproduto nocivo há cerca de 25 anos. Em contato com a pele por um período prolongado ou com os olhos em um curto prazo, pode causar irritações, e pesquisas levantam suspeitas de possibilidade de câncer se os particulados presentes no ar forem inalados (HU, 2021).

Existem duas rotas distintas para que o processo de tratamento da *black dross* possa ser realizado: pirometalurgia e hidrometalurgia (MESHRAM, 2018). A pirometalurgia envolve a necessidade de altas temperaturas, geralmente alcançadas em fornos rotativos. No processo de hidrometalurgia, ocorrem reações de lixiviação de óxidos em meio aquoso. Envolvendo alta energia consumida, a pirometalurgia possui desvantagens se comparada à hidrometalurgia, onde, por lixiviação alcalina ou ácida em temperatura ambiente, é possível obter íons de alumínio da *black dross* (NGUYEN, 2020).

Devido à sua alta reatividade com água no processo de hidrólise, a *black dross*, em contato com a água, produz NH_3 , CH_4 , PH_3 e H_2S , conforme Quadro 1, onde estão

representadas as reações químicas globais. Desta forma, esses produtos devem ser tratados para que, ao serem descartados, não entrem em contato com a água presente nos lençóis freáticos e causem poluição (NGUYEN, 2020); (BEHESHTI, 2014);

Quadro 1 - Reações químicas globais mais comuns da reação da *black dross* do processo de hidrólise

Gases gerados	Reagentes	Produtos
Amônia	$\text{AlN(s)} + 3\text{H}_2\text{O(l)} \rightleftharpoons$	$\text{Al(OH)}_3\text{(s)} + \text{NH}_3\text{(g)}$
Amônia	$2\text{Al}_5\text{O}_6\text{N(s)} + 3\text{H}_2\text{O(l)} \rightleftharpoons$	$5\text{Al}_2\text{O}_3\text{(s)} + 2\text{NH}_3\text{(g)}$
Fosfina	$\text{AlP(s)} + 3\text{H}_2\text{O(l)} \rightleftharpoons$	$\text{Al(OH)}_3\text{(s)} + \text{PH}_3\text{(g)}$
Sulfeto de H	$\text{Al}_2\text{S}_3\text{(s)} + 6\text{H}_2\text{O(l)} \rightleftharpoons$	$2\text{Al(OH)}_3\text{(s)} + 3\text{H}_2\text{S(g)}$
Metano	$\text{Al}_4\text{C}_3\text{(s)} + 12\text{H}_2\text{O(l)} \rightleftharpoons$	$4\text{Al(OH)}_3\text{(s)} + 3\text{CH}_4\text{(g)}$

Fonte: (HU, 2021).

Como mencionado anteriormente, a lixiviação aquosa para recuperação de sais existentes na *black dross* geram gases. Em busca de novas alternativas para o processo de hidrólise da *black dross*, alguns artigos indicam o pré-tratamento à base de glicerol em substituição à água (HU, 2021).

O glicerol livre de água e o etanol anidro atuam, respectivamente, como separador e removedor, evitando a geração dos gases nocivos pela não reação de hidrólise envolvendo a fase AlN. Resultados evidenciam que essa técnica de pré-tratamento remove cerca de 80% dos sais existentes na *black dross*, (HU, 2021).

3.6. Processos de fundição com moldes de areia

A fundição em molde de areia é um dos métodos mais antigos e versáteis para produzir peças metálicas. O processo começa com a criação de um molde, que é feito compactando uma mistura de areia especial, argila e água ao redor de um modelo (uma réplica da peça a ser produzida) (BALDAM & VIEIRA, 2012); (CAMPBELL, 2004).

A versatilidade deste processo de confecção de molde de areia faz com que o processo tenha uma dinâmica não encontrado em outros processos de fabricação. Dentre os mais conhecidos, a confecção pode ser realizada através de: fundição em areia verde (*Green Sand Casting*); fundição em casca (*Shell Molding*); processo em caixa fria (*Cold Box*); fundição em espuma perdida (*Lost Foam Casting*); fundição por cera perdida ou microfusão (*Lost Wax Casting*) e fundição com resina fenólica uretânica (*Pep-Set*) (VALÉRIO, 2009); (CAMPBELL, 2004).

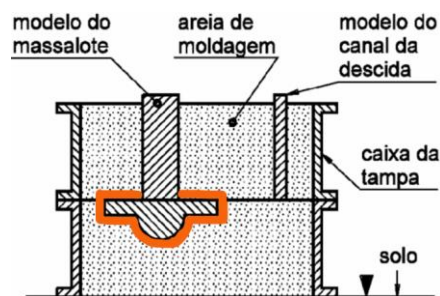
Outro processo não elencado, mas muito utilizado, é o processo “*alpha-set*”, é um processo parecido com “*pep-set*”, porém o molde é confeccionado com resina alcalina, por não conter nitrogênio em sua composição, essa resina emite menos gases nocivos durante o vazamento do metal e suporta uma alta variação de temperatura mantendo-se estável termicamente (HEINE & LOPER, 1976).

A areia para moldagem pode ser classificada de acordo com sua função dentro da caixa de moldagem. A distinção mais comum é entre a areia que entra em contato direto com o metal fundido (*Facing Sand*) e a areia que serve como suporte estrutural (*Backing Sand*) (BALDAM & VIEIRA, 2012).

A areia de faceamento atua como uma camada fina e especial de areia que entra em contato direto com a superfície do modelo e posteriormente do metal líquido, esta tem a função de proporcionar bom acabamento superficial e estabilidade térmica com inércia química, evitando aderir no metal criando defeitos de rugosidade e inclusões. Essa areia pode ser classificada através da *American Foundry Society* (AFS) (AMERICAN FOUNDRY SOCIETY, 2017).

Uma areia fina, utilizada no faceamento é classificado entre ~80-100 AFS, este dado significa que ela apresenta uma média ponderada de: 0,150~ 0,200 mm de diâmetro. A aplicação correta dessas areias visa otimizar o custo-benefício do processo, garantindo a integridade do molde e a qualidade da peça. Uma areia grossa, utilizada no enchimento apresenta um valor entre ~50-70 AFS com média ponderada de: 0,300~0,500 mm (AMERICAN FOUNDRY SOCIETY, 2017). A areia de enchimento é geralmente um produto já recuperado esta areia perde parte das propriedades de refratariedade e se torna uma areia proveniente do reaproveitamento do processo de desmoldagem, tornando-se podendo ser utilizada no restante do processo de confecção do molde, sob a areia de faceamento conforme, Figura 7.

Figura 7 - Caixa de areia com acessórios de fundição e destaque para região que contorna o modelo a ser fundido.



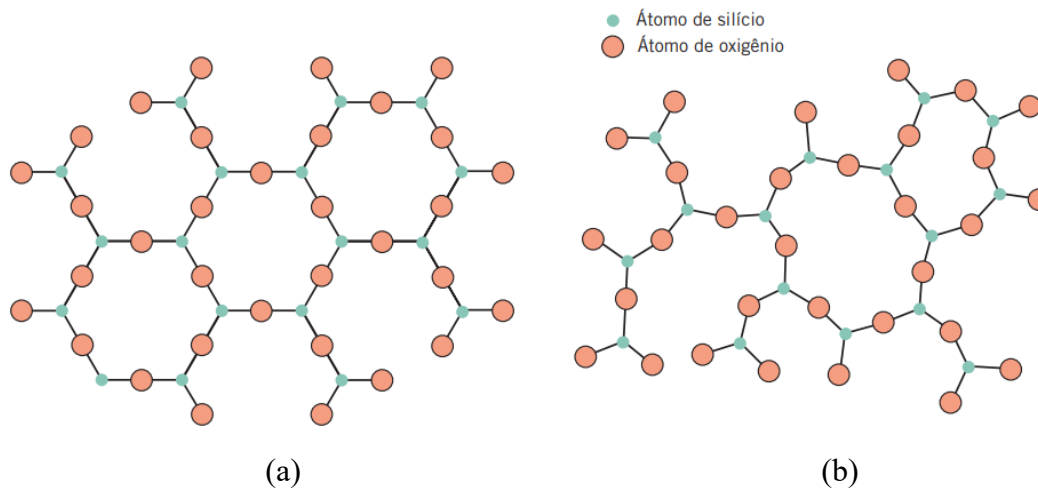
Fonte: (BALDAM & VIEIRA, 2012)

A Figura 7 ilustra uma caixa de fundição montada, com uma vista em corte. O "modelo" é contornado pela areia de faceamento, e o restante da caixa é preenchido com areia de enchimento. Após utilizada, esta areia perde parte das propriedades de refratariedade e se torna uma areia recuperável proveniente do reaproveitamento do processo de desmoldagem.

3.7. Difratometria de Raio-X (DRX)

Os materiais sólidos possuem átomos ou íons que estão arranjados de forma ordenada ou não. Um cristal é representado como um material onde seus átomos se posicionam ao longo deste arranjo de forma repetitiva com longas distância atômicas. Os metais, polímeros e cerâmicas e podem se apresentar com características cristalinas (átomos organizados) ou amorfas (átomos desorganizados) conforme Figura 8 (CALLISTER & RETHWISCH, 2008).

Figura 8 - Ilustração do esquema bidimensional para estrutura (a) do dióxido de silício cristalino (organizado) e (b) do dióxido de silício amorfo (desorganizado).



Fonte: (CALLISTER & RETHWISCH, 2008).

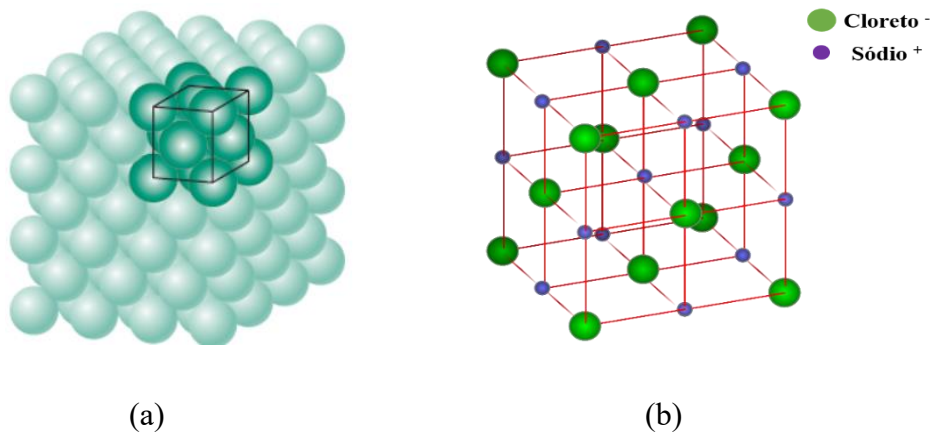
A estrutura cristalina, que define as propriedades mecânicas dos materiais, é a organização tridimensional dos átomos em uma rede cristalina. Essa estrutura é descrita por meio da célula unitária, sua unidade de repetição fundamental (CALLISTER & RETHWISCH, 2008).

Para padronizar essa descrição, o mineralogista W. H. Miller criou em 1839 os índices de Miller, um sistema de notação que permitiu aos cientistas definirem com precisão as direções e planos atômicos (FERREIRA V. G., 2015).

A união dessa linguagem teórica com uma ferramenta prática veio com a descoberta dos raios X por W.C. Rontgen no final do século XIX. A capacidade dos raios X de interagirem com os cristais, em um fenômeno chamado difração, abriu caminho para a visualização e a análise detalhada da disposição atômica dos materiais, combinando-se perfeitamente com o sistema de Miller para avançar a cristalografia (BLEICHER & SASAKI, 2000).

A descoberta dos raios X, por Rontgen, e a sistematização da cristalografia, por Miller, prepararam o terreno para uma revolução no estudo dos materiais. Em uma época de ouro para a física, e com o conhecimento desses conceitos já estabelecidos, Sir W. Henry (pai) e W. Lawrence (filho), conhecidos na literatura como os Braggs, conseguiram aplicar suas técnicas para descrever as estruturas cristalinas. Inicialmente, eles decifraram a estrutura do cloreto de sódio (NaCl), conforme ilustrado na Figura 9 e posteriormente, do sulfeto de zinco (ZnS) (CANEVAROLO JR. & BAUMHARDT, 2003).

Figura 9 - (a) Representação de uma estrutura cristalina cúbica de face centrada (CFC) de cloreto de sódio.



Fonte: (CALLISTER & RETHWISCH, 2008).

Essas descobertas renderam-lhes o prêmio Nobel em 1.915. Com o Nobel em mãos os Braggs não apenas validaram a teoria, mas também abriram caminho para a técnica que determina a cristalinidade de determinados elementos e se tornaria um dos pilares da ciência de materiais e da física do estado sólido: a Difração de Raios X (DRX) (CANEVAROLO JR. & BAUMHARDT, 2003).

Quando um feixe de raios X atinge um cristal, os átomos em seus planos de clivagem agem como pequenas fontes de difração. Se o feixe incide no cristal em um

ângulo específico (θ), as ondas refletidas por diferentes planos atômicos podem se somar, num fenômeno de interferência construtiva, criando um pico de intensidade que é captado por um detector (CULLITY, 1956).

Essa relação é descrita pela Lei de Bragg, que utiliza a ordem de difração (n), o comprimento de onda do raio X (λ), a distância entre os planos atômicos do cristal (d) e o ângulo de difração (θ), conforme ilustrado na Equação 1, esta descreve a condição necessária para que a difração ocorra e seja detectada:

$$2. d \sin \theta = n. \lambda \quad \text{Equação 1}$$

Sendo:

d = distância entre dois planos cristalográficos

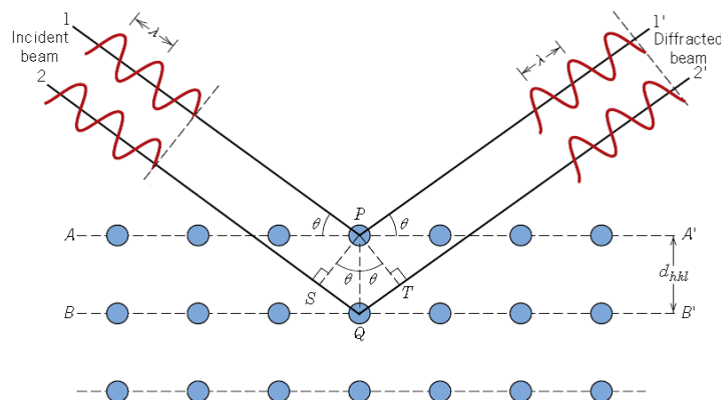
θ = ângulo de incidência da onda entre os planos cristalográficos

n = é dado por um número inteiro e representa a ordem de reflexão

λ = comprimento de onda

A ordem de difração é correspondida pelo (n), o comprimento de onda que interage com a matéria é representado por (λ), o (d) é a distância do plano superior (A e A') e do plano inferior (B e B'). O ângulo de difração é representado por (θ) conforme observado na Figura 10.

Figura 10- Ilustração da incidência da radiação e difração de um cristal.



Fonte: (CALLISTER & RETHWISCH, 2008)

Nos equipamentos de Difração de Raios X (DRX), a radiação é gerada por uma fonte que emite elétrons de alta energia, criando um feixe monocromático que incide sobre a amostra. Os fótons difratados, resultantes dessa interação, são detectados. Para

essa análise, são utilizados elementos difratores, ou cristais analisadores, como cloretos de sódio e fluoretos de lítio, entre outros (CALLISTER & RETHWISCH, 2008); (CULLITY, 1956).

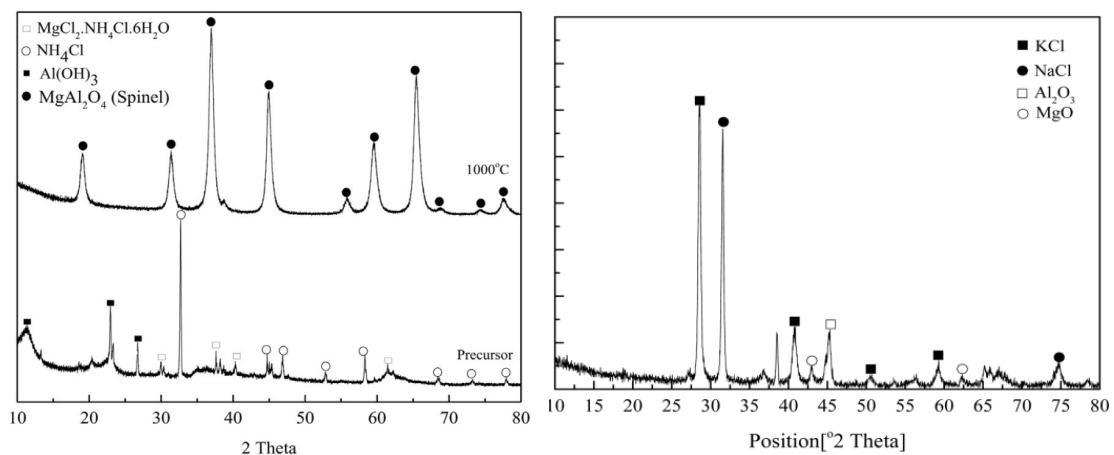
Essa análise resulta em um difratograma, um gráfico que fornece dados cruciais sobre o material. Além de permitir a determinação da distância interplanar $d[hkl]$, outros parâmetros importantes podem ser observados, como o tamanho do cristalito e a intensidade relativa dos picos. (CULLITY, 1956).

O tamanho médio do cristalito pode ser calculado por meio da equação de Scherrer, baseada na teoria cinemática do DRX. Essa teoria, que considera a difração como um processo geométrico, assume que os efeitos de absorção e espalhamento dos raios X são desprezíveis, uma condição que é válida dependendo da geometria da amostra analisada (CARRIELO, 2024).

Por outro lado, a intensidade relativa é calculada dividindo a intensidade de cada pico (I) pela intensidade do pico de maior valor conforme (I/I_1). No difratograma, o eixo das abscissas indica os ângulos 2θ em que os picos estão localizados, enquanto o eixo das ordenadas mostra a intensidade do pico, cuja forma é definida pela sua largura na metade da altura. A forma de um pico no difratograma é definida pela sua largura na metade da altura, uma medida importante para análises mais aprofundadas, como o cálculo do tamanho do cristalito (CANEVAROLO JR. & BAUMHARDT, 2003).

Na Figura 11 está representado um difratograma característico de uma amostra de *black dross*, sendo possível observar picos de intensidade referente aos elementos presentes (NGUYEN, 2020).

Figura 11 - Difratogramas padrões de amostras de *black dross* ilustrando a presença dos picos de elementos característicos.



Fonte: (NGUYEN, 2020); (XING, 2017); (HU, 2021).

3.8. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

As propriedades mecânicas de um material têm uma relação intrínseca com sua microestrutura. A análise microestrutural, nesse sentido, revela informações pertinentes, permitindo identificar defeitos, analisar interfaces e, com base nessas informações, correlacionar as propriedades do material (DEDAVID, 2007).

Diferente do microscópio óptico convencional, que ilumina a amostra com luz visível e tem sua capacidade limitada pelo efeito de difração, no Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) são esses elétrons que, ao interagirem com a amostra, geram sinais que são processados para formar a imagem. Portanto, são os elétrons, e não os fótons, os responsáveis pela geração da imagem (DEDAVID, 2007); (LEAL L. H., 2000).

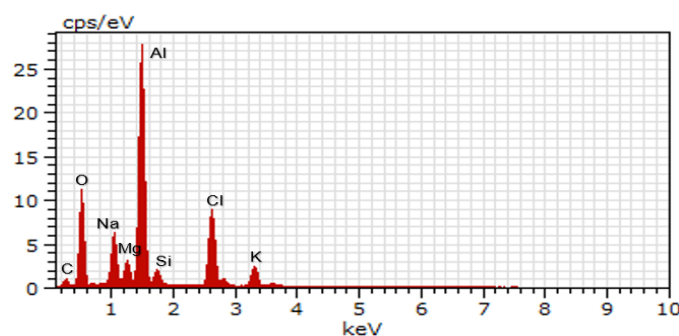
O feixe de elétrons, quando possui energia suficiente para ionizar camadas mais profundas, pode produzir a emissão de raios X. Muitos equipamentos de MEV possuem detectores capazes de captar esses raios X característicos, permitindo a análise por meio da espectrometria por energia dispersiva (EDS) (VIERA, 2021); (DEDAVID, 2007).

O uso do EDS acoplado ao MEV é recorrente para obter informações elementares qualitativas e semiquantitativas sobre a superfície da amostra, fornecendo uma estimativa dos elementos presentes (VIERA, 2021).

As principais exigências para a análise de amostras no MEV/EDS são que elas sejam preferencialmente sólidas, devido ao vácuo gerado pelo processo, e que apresentem condutividade elétrica para manter o fluxo de elétrons que geram a imagem. Caso a amostra não seja condutiva, é necessário aplicar um revestimento, por exemplo, de ouro, para torná-la adequada à análise (ONOE, 2017).

Na figura 12 é possível observar um “espectro” de EDS onde cada pico representa a energia de um determinado elemento.

Figura 12 - Espectro "EDS" de um rejeito (escória com alta salinidade) proveniente da fundição de alumínio secundário.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

No eixo das ordenadas (eixo Y), temos os valores de *counts per second* (cps) ou *electron volts* (eV), que descrevem a taxa de contagem de fótons de raios X em função da energia. Isso nos ajuda a entender como a intensidade dos raios X varia com a energia. Já no eixo das abcissas (eixo X), temos os valores de energia em keV, que se referem à energia do fóton emitido por um determinado elemento (VIERA, 2021).

O maior pico encontrado é o de alumínio, seguido pelo de oxigênio. Como se trata de uma escória (óxido) de alumínio secundário, é evidente que o oxigênio, como principal elemento formador de óxido, está presente em maior quantidade, sendo representado por picos de intensidade acentuada. Por utilizar diversos sais como elementos fundentes no processo de fundição secundário, também é possível visualizar picos de sódio (Na), cloro (Cl) e potássio (K) — os principais sais, como cloreto de potássio e cloreto de sódio. Outros elementos, como silício (Si) e magnésio (Mg), são comumente encontrados em diversas ligas de alumínio, sendo os principais responsáveis por conferir propriedades de resistência mecânica a essas ligas, entre outras funções (CALLISTER & RETHWISCH, 2008); (HWANG & HUANG, 2006).

4. METODOLOGIA

4.1 Preparação das amostras

A matéria prima utilizada para realização deste estudo foi retirada em janeiro de 2024 do pátio de resíduos da metalúrgica Alux do Brasil, cedidas através da parceria do programa de pesquisa da CBA em conjunto com a UFSCar conforme Figura 13.

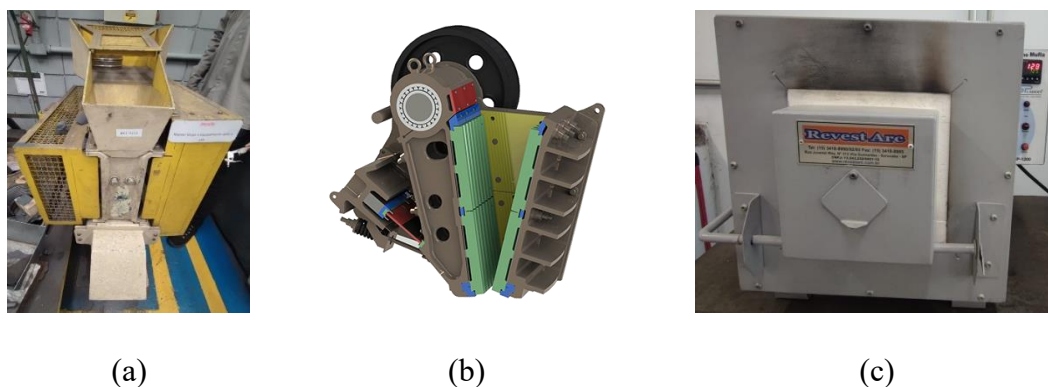
Figura 13 - Amostras de *black dross in situ* retirada de caçamba do pátio de rejeitos.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

A amostra de *black dross in situ* foi denominada de (BD) a partir deste capítulo. Para iniciar os estudos, necessitou realizar a fragmentação dessas amostras em um equipamento de cominuição por mandíbula conforme Figura 14 (a), (b) e (c). Procedimento que foi realizado no laboratório de análise da empresa metalúrgica METSO MINERALS na planta de Sorocaba.

Figura 14. (a) equipamento de cominuição, (b) esquema da mandíbula e (c) forno mufla.



Fonte: Elaborado pelo Autor

Já fragmentada, a amostra ficou em 120°C por 60 minutos para retirada de umidade em um forno mufla de marca SPLabor e modelo SP-1200. O forno mufla utilizado, Figura 14 (c), está localizado no laboratório de tratamento térmico e ensaios mecânicos da Faculdade de Tecnologia de Sorocaba.

Para determinar o tamanho médio das partículas das amostras realizou-se análise de granulometria de determinação com auxílio de separador granulométrico que possui peneiras com malhas padronizadas conforme Tabela 3, seguindo a norma ABNT NBR ISO 3310-1.

Tabela 3 - Disposição de peneiras utilizadas no processo de determinação de tamanho de grão médio.

Número	1°	2°	3°	4°	5°	6°	7°	8°	9°	10°	11°
ASTM	6	12	20	30	40	50	70	100	140	200	270
mm	3,4	1,7	0,85	0,60	0,425	0,30	0,212	0,15	0,106	0,063	0,053

Fonte: adaptado da norma NBR NM 248/ 2003.

O equipamento utilizado é idêntico ao da Figura 15, sendo da marca Solotest, e as peneiras da marca Bertel e está localizado no laboratório de fundição da Faculdade de Tecnologia de Sorocaba.

Figura 15 - Equipamentos utilizados para determinar granulometria.



Fonte: (SP LABOR, 2025).

A análise consistiu em colocar uma quantidade de 300g da amostra BD na primeira peneira ASTM 6, e através da vibração provocada por uma frequência de 5 hz por um período de 5 minutos, por gravidade o material cominuído fora peneirado até a última peneira ASTM 270, acumulando a maior quantidade na peneira que então determinou o tamanho médio do particulado. O ensaio foi realizado conforme norma ABNT NBR NM 248/2003.

4.1.2. Lixiviação de sais da *black dross* em água destilada ou glicerol anidro

As amostras de BD passaram por um processo de preparação onde foram submetidas a maceração por almofariz e pistilo para criar maior área de contato e sais aprisionados nos óxidos pudessem ser desprendido e diluídos em solvente com maior facilidade.

Para dissolver os sais da BD, foi necessário pré-determinar as condições de solvente e soluto. A metodologia para dissolver os sais de BD (soluto) em solvente (água ou glicerol) foi obtida através do artigo de (HU, 2021) onde em um béquer de 350 mL foram diluídos 50g de BD em solvente.

As amostras tiveram suas massas mensuradas em uma balança analítica de marca Sartorius com precisão de 0,01 g, localizado no laboratório de polímeros da Fatec Sorocaba.

O processo de lixiviação por via úmida foi realizado utilizando duas condições de solventes distintos: amostras denominadas de ABD para água destilada e amostras denominadas GBD para glicerol anidro. As nomenclaturas adotadas seguiram sendo utilizadas conforme mostrado no Quadro 2.

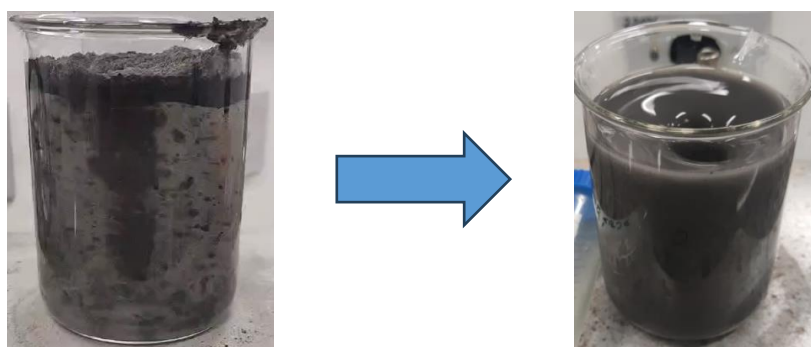
Quadro 2 - Denominação das amostras após processo de *lixiviação* dos sais com solventes distintos.

Não lixiviado “ <i>in situ</i> ”	BD
Lixiviado em Água destilada	ABD
Lixiviado em Glicerol anidro	GBD

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Montou-se um aparato no qual um agitador mecânico movimentou o solvente, e quando adicionado o soluto, ocorria a mistura. Notou-se através de métodos visuais, que após 10 minutos de procedimento, o soluto estava totalmente permeado pelo solvente e pronto para ser filtrado conforme pode ser observado na Figura 16.

Figura 16 – Representação do soluto sendo dissolvido no solvente, e a condição adotada como ideal para início da filtração.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Na sequência, realizou-se a filtração das amostras ABD e GBD , com auxílio de uma bomba de vácuo de marca Prismatec e modelo 121 com potência de $\frac{1}{4}$ cv à 1.750 rpm e com capacidade de deslocamento de ar de 2,2 m³/h, fora acoplado em um kitasato e um funil de buchner em porcelana. O período de filtração foi de 10 minutos para cada amostra. Utilizou-se papel filtro da marca Melita modelo 103 (filtro de pó de café).

A elevada viscosidade do glicerol anidro, se comparada à da água em temperatura ambiente, deve-se à presença de três hidroxilas em sua molécula. Essas formam numerosas ligações de hidrogênio, que mantêm as moléculas de glicerol firmemente unidas. Devido a essa característica, foi utilizado o artifício de aquecer o solvente da amostra GBD em uma base de aquecimento da marca Nova, modelo NI1103. Esse aquecimento forneceu ao glicerol temperaturas próximas a 75°C com a finalidade

de diminuir a viscosidade do meio. Ao aquecer, a energia cinética das moléculas aumenta, rompendo parcialmente as ligações de hidrogênio e permitindo que as moléculas se movam com mais facilidade, o que facilitou e acelerou o processo de filtração (ALMEIDA & OLIVO, 2023); (MATTOS, 2014).

O dispositivo no qual desenvolveu-se o processo de filtração pode ser observado na Figura 17.

Figura 17 – Sistema com bomba de vácuo e funil de Buchner com papel filtro utilizados.



Fonte: Elaborado pelo Autor

Com as amostras filtradas, os resíduos no papel de filtro foram retirados cuidadosamente e transferidos para uma placa de Petri. As amostras foram conduzidas individualmente ao forno mufla, onde as amostras ABD e GBD foram mantidas por 60 minutos a 320°C para a evaporação da umidade residual. Embora a água presente na amostra ABD evapore a temperaturas bem menores que 320°C, diferentemente do glicerol na amostra GBD, essas condições foram mantidas para reduzir possíveis variáveis, além da eliminação do solvente. Nestas amostras foram realizadas análises de DRX.

Gases tóxicos são emitidos no processo de lixiviação dos sais e nitreto de alumínio quando utilizado água no processo de lixiviação (HU, 2021); (MESHRAM, 2018). Autores sugerem que sejam gerados no mínimo 53 cm³ de gases por grama de ABD tratada (SCHARF & DITZE, 2015). Há um consenso que há riscos ambientais potenciais da emissão de gases proveniente do tratamento, a remoção do gás seria um pré-requisito para qualquer processo de lixiviação em alta escala (LUCHEVA. B, 2005); (XIAO, 2002).

4.1.3 Determinação de incorporação de *black dross* em areia de fundição

No intuito de proporcionar uma aplicação de baixo custo para resíduos de ABD, destinou-se parte destes para fabricação de moldes de fundição com uso de areia de sílica com resina fenólica alcalina (Fenoester CCS) e catalisador (triacetina) da Marca Comil Cover Sand em proporções pré-determinada conforme Tabela 4.

Tabela 4. Determinação da proporção de ABD, SiO₂, resina e catalisador para produzir moldes para fundição.

Amostras	Proporção de Sílica	Proporção de ABD	Nº corpos de prova	Proporção de Resina (sob peso da Areia)	Proporção de Catalisador (sob peso da Resina)
T0	100%	0%	12		
T10	90%	10%	12		
T25	75%	25%	12	3%	30%
T40	60%	40%	12		
T50	50%	50%	12		
T50*	50%	50%	12	6%	60%

Fonte: Elaborado pelo Autor.

O modo de preparo para incorporação de BD na areia, nas amostras T10 à T50 consistiu em pesar ±400 gramas de areia de dióxido de silício (SiO₂) misturados a 3% de resina alcalina sob peso da areia (12g) e 30% de catalisador sob peso da resina alcalina (3,6g) obtendo a amostra T0. Na amostra T50* foi dobrado o percentual com 6% (24g) resina e 30% (7,2g) de catalisador, conforme Tabela 4. A confecção dos corpos de prova foi realizada no laboratório de fundição da Faculdade de Tecnologia de Sorocaba.

Testes de tentativa de confecção e polimerização (endurecimento dos corpos de prova de tração) previamente realizados com resíduos de BD *in situ* e da amostra GBD incorporado em areia de fundição de SiO₂ na presença de resina e catalisadores, determinaram a impossibilidade de serem utilizadas devido à presença de sais, por tanto todas as condições apresentadas na Tabela 4 foram realizadas na amostra ABD.

A presença de sais na areia de fundição pode interferir na cura de resinas, dificultando sua capacidade de endurecer adequadamente. Os sais podem absorver umidade ou reagir com os componentes da resina, alterando suas propriedades e desempenho. Se houver uma quantidade significativa de sais, pode ser necessário tratá-la ou escolher outro tipo de areia para garantir a eficácia da resina (KOLLEK, 1986); (NAGARAJAN, 1992).

Seguiu-se a recomendação das normas da Associação Brasileira de Fundição (ABIFA) e a comissão de estudos de matéria prima (CEMP – 162) em consonância com a (CEMP – E10 Figura 2) que prescreve método de ensaio para determinação da resistência à tração da mistura padrão de areia aglomerada para processo de cura à frio, o equipamento e o tipo de corpo de prova padronizado conforme Figura 18.

Os ensaios de tração ocorreram no laboratório de fundição da empresa METSO Sorocaba, em uma máquina ensaio DAP, modelo Tecnofund cod. 13-16.

Figura 18 - (a) caixa modeladora de corpo de prova padronizado e (b) equipamento utilizado para ensaio de tração

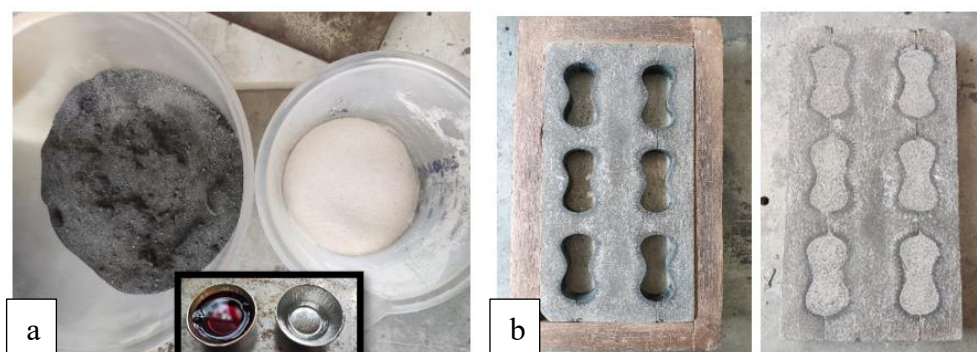


Fonte: (TECNOFUND, 2025).

4.1.4. Incorporação de *black dross* em areia de sílica

Os corpos de provas para tração em areia, foram confeccionados de acordo com a norma da ABIFA – CEMP E-10, seguindo Figura 19.

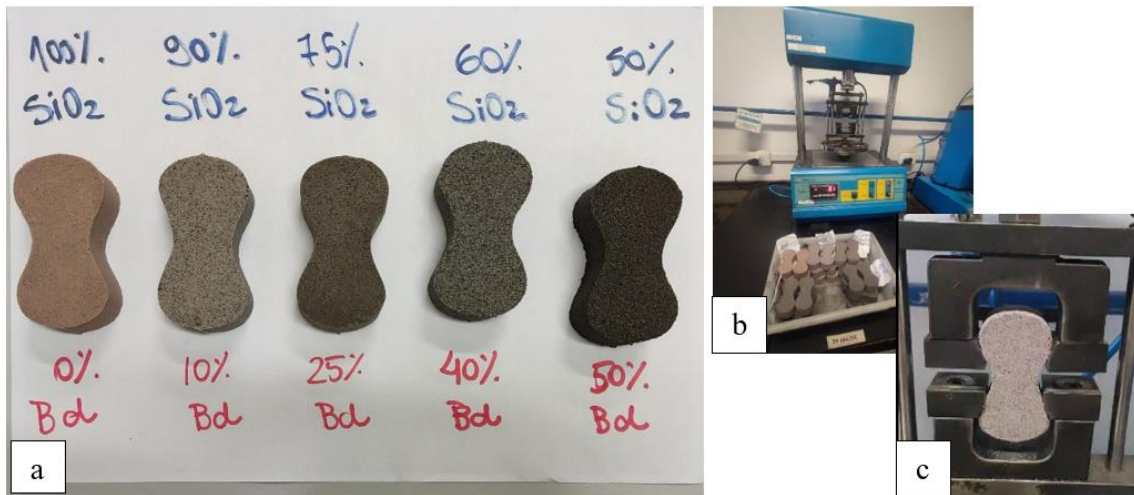
Figura 19 – (a) Tem-se o fluxo do processo da preparação dos corpos de prova para ensaio de tração em areia e incorporação de BD (escura) em areia de sílica (clara) com respectivo aglomerante de resina alcalina (avermelhado) e catalisador (incolor) e (b) molde normatizado conforme CEMP-E10.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Os corpos de provas confeccionados foram ensaiados após 24 horas de permanecerem em repouso. É possível observar a mudança de coloração dos corpos de provas quando submetido a uma carga (%) maior de BD incorporada à areia de sílica, conforme Figura 20.

Figura 20 – (a) Corpos de prova conforme norma CEMP E-10, (b) dispositivo de ensaio de tração em areia e (c) corpo de prova sendo ensaiado.

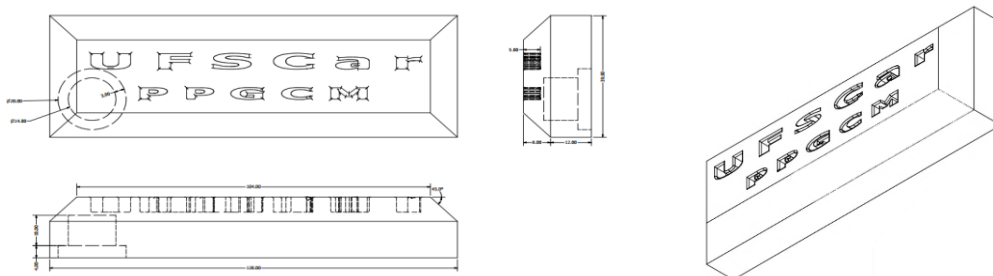


Fonte: Elaborado pelo Autor.

4.1.5. Modelagem e prototipagem 3D e confecção de moldes com areia de sílica e *black dross* para obtenção de produto fundido

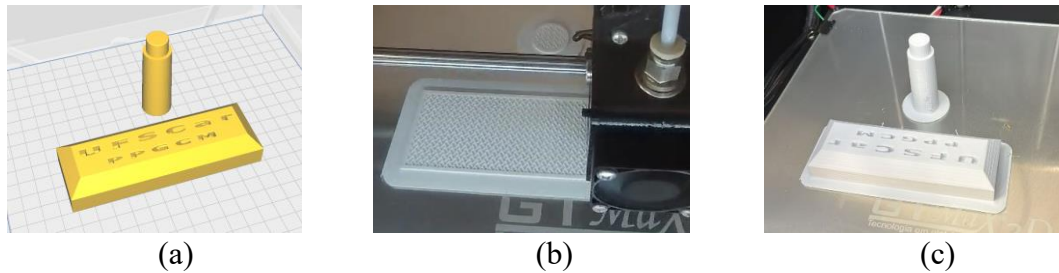
Com intuito de realizar um teste em campo optou-se por modelar em um software Autodesk Inventor de modelagem 3D, um produto em forma de lingote, conforme Figura 21. Para prototipagem foi utilizado o software CURA, esta ferramenta é *open source* e muito utilizada por profissionais deste segmento. A impressão 3D foi realizada em uma impressora de marca GTMax 3D e modelo Core A2V2 conforme Figura 22, localizada no laboratório “Maker” da Faculdade de Tecnologia de Sorocaba.

Figura 21 - Modelagem de um “lingote” em software 3D “Inventor”.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 22 - (a) Interface do software CURA, com a prévia de simulação da impressão e (b) impressão em andamento e (c) protótipo finalizado e impresso em acrilonitrila butadieno estireno “ABS”.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Em posse do modelo (protótipo impresso em ABS) para fundição, os moldes de areia com ABD incorporada foram confeccionados levando em consideração a melhor condição de resistência mecânica em função do percentual de incorporação encontrada pós testes de resistência à tração apresentado no capítulo 4.1.3. na Tabela 4.

Caixas de madeiras foram utilizadas para delimitar a região da areia, o modelo foi utilizado para criar a cavidade negativa na areia, onde o metal líquido permeou e se solidificou. O teste foi realizado com a utilização de lingote de alumínio puro fundido fornecido pela empresa CBA, em um forno à resistência elétrica da marca Fortelab com potência de 9.000W com capacidade máxima de ~20Kg, conforme Figura 23. Este forno está localizado no laboratório de fundição da faculdade de tecnologia de Sorocaba.

Figura 23 - (a) Forno de fundição por resistência elétrica; metal líquido sendo vazado no molde e (b) preparação da caixa de fundição com areia incorporada por BD; protótipo impresso em 3D utilizado como modelo.



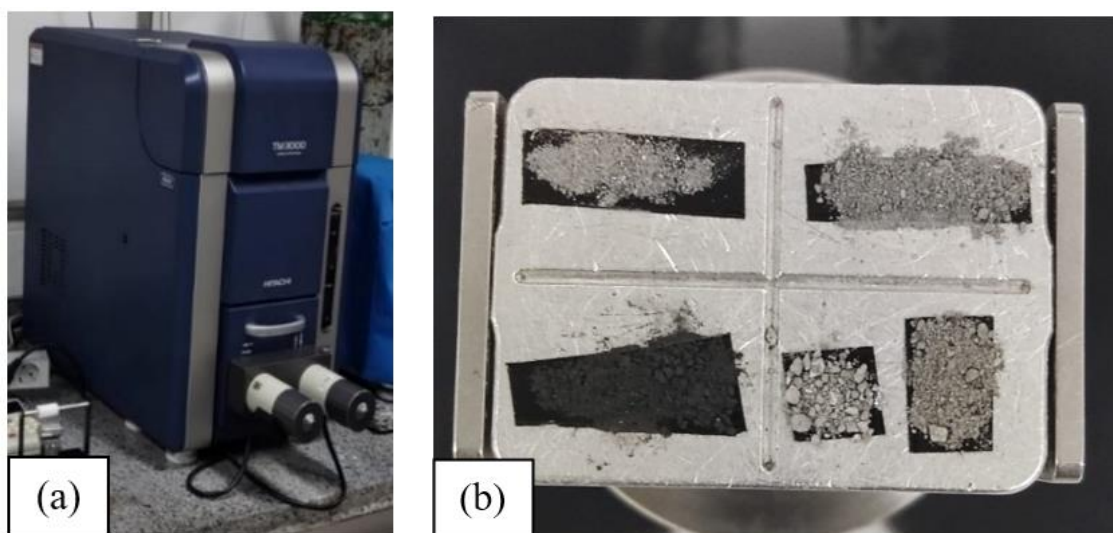
Fonte: Elaborado pelo Autor.

4.2. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

As análises de microscopia eletrônica de varredura – MEV, foi realizada com intuito de investigar a morfologia e composição química das amostras através das emissões de raios-x emitido pela BD. Com o uso da condição de elétrons retroespalhados (alta energia) foi possível obter imagem da composição química elementar das amostras através de espectroscopia por energia dispersiva – EDS (MALISKA, 2024).

Utilizou-se o equipamento da marca Hitachi e modelo TM300, presente no laboratório de pesquisa de bioenergia e materiais lignocelulósicos da UFSCar de Sorocaba conforme Figura 24 (a). Os parâmetros de resolução utilizados no MEV foram de 15kV tensão para todas as amostras. As amostras foram dispostas em um suporte coladas com fita dupla face de carbono (condutora) conforme Figura 24 (b).

Figura 24 - (a) Microscópio eletrônico de varredura - MEV e (b) fixação das amostras com fita de carbono (condutiva) no suporte para análise no MEV/EDS.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

4.3. Difratometria De Raio-X (DRX)

A fim de identificar as fases responsáveis que constituem a BD, foi realizado análises de difratometria de raio-X (DRX), utilizando um difratômetro de marca Shimadzu e modelo XRD-6100 Lab X com tubo de radiação de cobre 40 kV e 30 mA. Os passos de varreduras das amostras foram realizados a uma taxa de 1 grau por minuto (1°/min), abrangendo a faixa de 15 a 65°. Este equipamento está localizado no laboratório de física da UFSCar – Sorocaba conforme Figura 25.

Figura 25 – Equipamento de difratometria de raio – x (DRX)



Fonte: Elaborado pelo Autor.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. Análise de microscopia eletrônica de varredura (MEV/EDS)

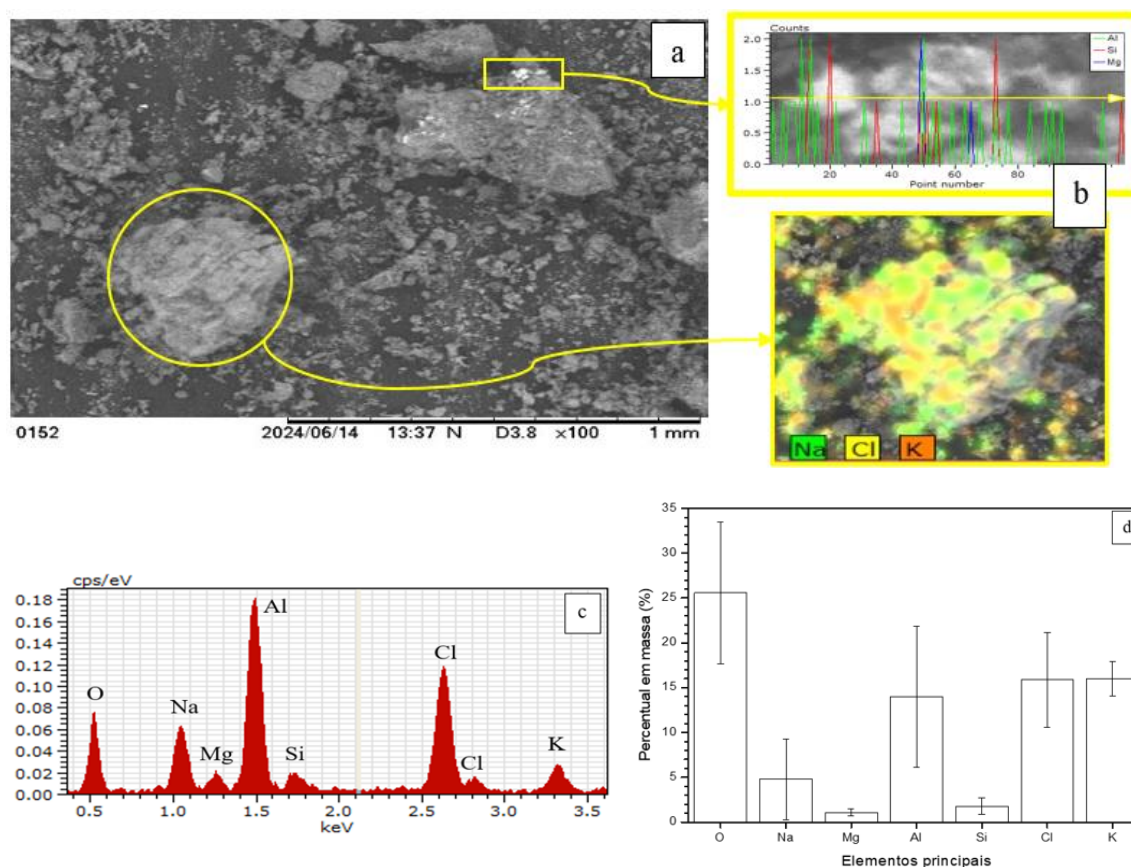
A espectroscopia por energia dispersiva de raios-X (EDS), frequentemente acoplada a um microscópio eletrônico de varredura (MEV), é uma técnica de análise elementar. Ela utiliza os raios-X característicos emitidos por uma amostra quando bombardeada por elétrons para identificar os elementos químicos presentes (VIEIRA, 2021).

A técnica permite a obtenção de mapas de distribuição elementar e análises quantitativas. É amplamente usada em ciências dos materiais, geologia e biologia.

Por meio de análises de MEV, foi possível determinar a morfologia e a dispersão dos aglomerados. Uma análise semiquantitativa de EDS, realizada em conjunto, forneceu a composição química de pontos específicos, com um gráfico de barras detalhando a variação em percentual de massa de cada elemento presente na superfície (LEAL E. , 2000).

Para além da morfologia, a pesquisa também comparou a composição química de amostras que foram submetidas à dissolução de sais em água e glicerol. O propósito foi avaliar a eficiência de cada solvente em relação à amostra original (*in situ*). Os resultados dessa análise estão detalhados na Figura 26.

Figura 26 - (a) MEV da amostra BD *in situ*, (b) destaque de pontos específicos da análise, (c) espectro EDS e (d) gráfico em barras dos elementos analisados.



Fonte: Elaborado pelo Autor

A Figura 26 (a) está representada a morfologia superficial da BD. Foi possível observar aspectos de formação heterogênea com aglomerados de óxidos de tamanho variado, com cerca de 70 a 500 μm através da ferramenta *Manual Measurement*, permitindo que uma linha seja traçado entre dois pontos da imagem da partícula estimando um tamanho médio. Artigos indicam que tamanho de partícula média de BD encontrado no MEV sejam entorno de $\pm 100 \mu\text{m}$ (BEHESHTI, 2014).

É possível visualizar na Figura 26 (b) o destaque de regiões com alto teor dos elementos Al-Si-Mg, evidenciam que há resquícios de liga metálico em meio a escória de BD, uma vez combinados, esses elementos formam ligas de alumínio conhecidas da série AA 6XXX (COSTA, 2018).

Para que possa ser considerado de fato uma amostra de BD, além de apresentar traços de óxido de alumínio é necessário que a amostra possua um alto teor de sais do tipo NaCl e KCl, e a Figura 26 (b) evidencia a alta concentração destes elementos, estas análises foram realizadas pela função de *mapping* (CINARLY, 2021); (KANG, 2018).

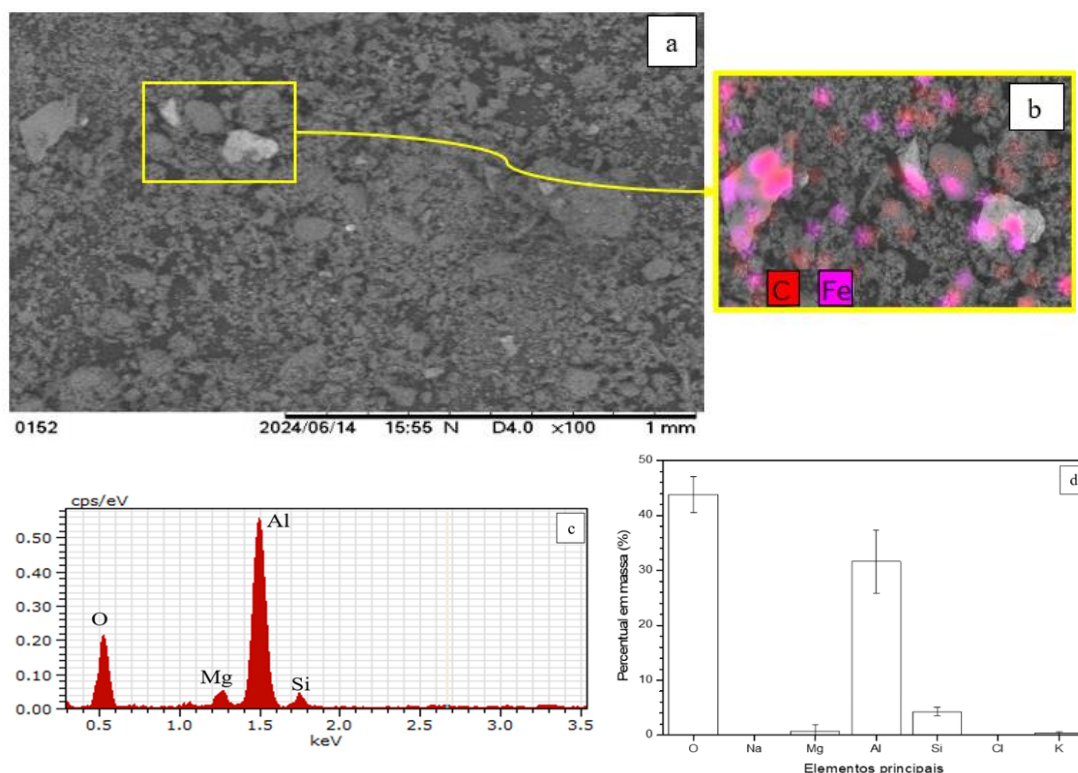
A Figura 26 (c) representa o espectro de distribuição dos elementos na superfície da amostra, obtido por EDS. Notou-se a forte presença de oxigênio, que é o principal elemento formador de óxido quando combinado com silício, magnésio e alumínio. O cloro é altamente eletronegativo e tem uma forte tendência a formar compostos químicos com outros elementos, principalmente com sódio e potássio, originando os sais de NaCl e KCl (BEHESHTI, 2014).

Em uma análise semiquantitativa foi possível avaliar a composição química superficial da BD na Figura 26 (d), evidenciando através de gráfico de barras, a presença dos elementos em percentual com teores elevados (HWANG & HUANG, 2006).

Sabe-se que a maioria dos sais de metais alcalinos e de amônio, bem como nitratos e cloretos são solúveis em água, alguns fatores como: tamanho molecular ou fator iônico, forças dispersivas e polares, ligação de H, polaridade, além da temperatura do sistema são considerados para determinar a solubilidade de um composto em água (SILVA, 2004).

Na Figura 27, está representado a análise da amostra de ABD após lixiviação dos sais em água destilada.

Figura 27 – (a) MEV da amostra ABD, (b) destaque de pontos específicos da análise, (c) espectro EDS e (d) gráfico em barras dos elementos analisados.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

A Figura 27 (a) evidenciou alteração morfológica promovido pelo procedimento de lavagem, com uma severa diminuição dos particulados de aglomerados metálicos.

A Figura 27 (b) destaca, a presença de alguns elementos identificado através do EDS de:Fe e C (Aço), estes podem estar presente em função da natureza e contaminação da sucata fundida que originou a BD ou até mesmo o descarte indevido deste material na caçamba no pátio onde as amostras foram coletadas.

O espectro da ABD, mostrado na Figura 27 (c), é o resultado da lixiviação dos sais. Esses sais são dissolvidos em água e, em seguida, o fluido é aquecido para vaporizá-los. Desse modo, é possível capturar os cristais de sal para reutilização, um método também descrito por outros autores (HU, 2021); (KANG, 2018).

A Figura 27 (d), quando comparado com a Figura 26 (d), demonstra a eficiência de redução da presença dos sais e como a análise por EDS é sensível as mudanças superficiais. O feixe primário de elétrons do EDS, quando em contato na superfície da amostra analisada, é capaz de obter informações semiquantitativa sobre composição química até determinada profundidade (GIANNUZZI, 2018); (WILLIAMS & CARTER, 2009).

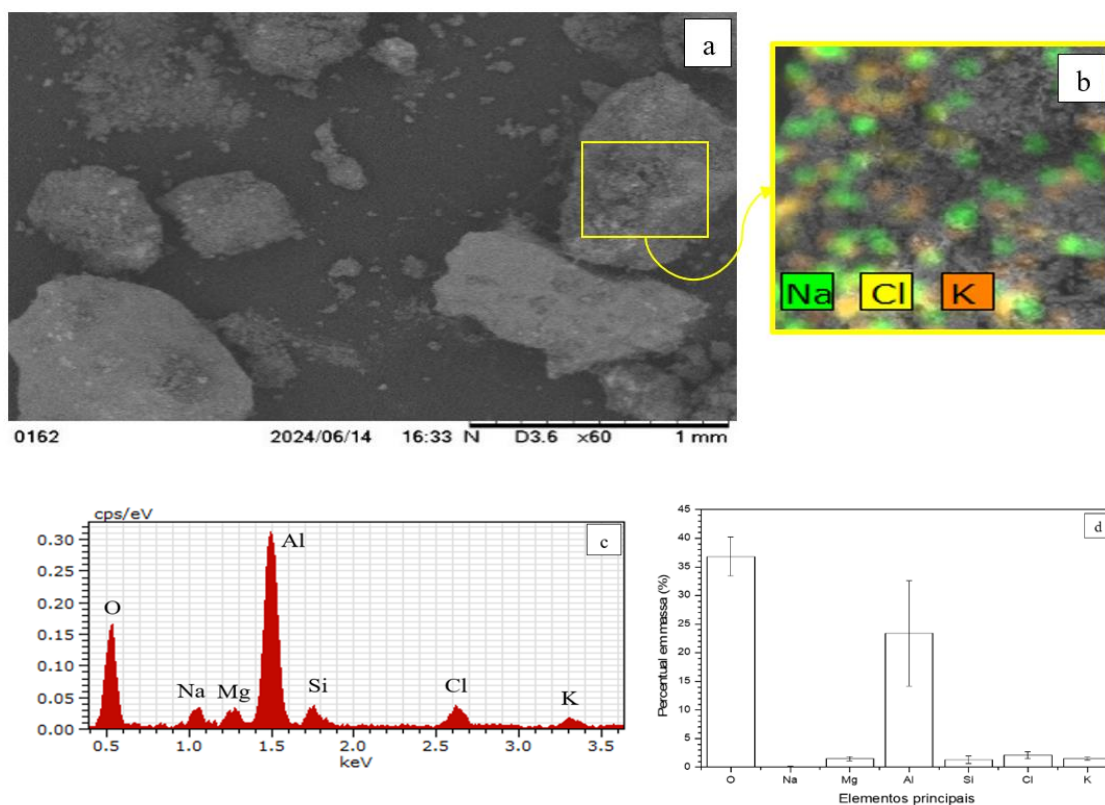
Com os sais dissolvidos aumenta-se a área de percepção da presença de outros elementos, como consequência deste fenômeno, a diminuição do percentual de elementos como Cl, Na e K corrobora com o aumento de O, Al que são os elementos que formam o composto de Al_2O_3 (RINALDI & LOVET, 2017); (REIME, 2008).

Embora haja maior eficácia em dissolver os sais presente com o solvente água, neste processo ocorre emissão de gases tóxicos como: amônia, fosfina, sulfeto de hidrogênio entre outros (NGUYEN, 2020). Esses compostos gerados são nocivos aos seres vivos em gerais, e o desafio da indústria diz respeito em como qualificar e quantificar esses percalços proveniente da manipulação de BD.

Novos métodos de pré-tratamento surgem na intenção de mitigar esse problema, desta forma, foram realizados testes com glicerol combinado com etanol, ambos anidros, para remover esses componentes dos sais, com intuito de evitar as fases geradora de gás tóxico. Os resultados na literatura indicaram que 80% dos sais existentes são removidos com sucesso (HU, 2021).

Diante do exposto adotou-se a alternativa na lixiviação dos sais em Glicerol anidro, os resultados estão apresentados conforme na Figura 28.

Figura 28 – (a) MEV da amostra GBD, (b) destaque de pontos específicos da análise, (c) espectro EDS e (d) gráfico em barras dos elementos analisados.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Observou-se na Figura 28 (a) que a dissolução da *black dross* em glicerol promoveu a aglomeração dos particulados. A alta viscosidade do glicerol, maior que a da água, é atribuída à sua estrutura com três grupos hidroxila (-OH), um para cada átomo de carbono, que formam fortes ligações de hidrogênio entre as moléculas (FERREIRA ET AL, 2017)

Na Figura 28 (b) notou-se uma quantidade reduzida abaixo de 3% (percentual em massa) de presença de sais de NaCl e KCl se comparado com a Figura 26 (b), que foi corroborada pelo EDS da Figura 28 (c) e o gráfico de barras da Figura 28 (d). Este resultado demonstra que o solvente glicerol pode ser uma alternativa para lixiviação do sais.

A incorporação de BD e GBD na areia de fundição de sílica resultou em corpos de prova instáveis e sem enrijecimento, inviabilizando seu uso em processos de fundição, conforme Figura 29. O problema reside nos sais presentes nesses materiais, que inibem a aglomeração e o enrijecimento, etapas cruciais para a resistência mínima do molde. Este tópico será aprofundado na seção 5.3.

Figura 29 - Corpo de prova de ensaio de resistência a tração de areia de sílica com (a) BD incorporada e resina alcalina e catalisador e (b) GBD incorporada e resina alcalina e catalisador.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Embora a lixiviação com glicerol anidro resolva o problema da geração de gases de amônia — que ocorre na presença de água — ela se mostra ineficiente para a remoção dos sais. Por isso, a técnica não é viável para preparar a escória para os processos seguintes.

5.2 Análise de difratometria de raio-X (DRX)

Os difratogramas foram analisados utilizando o software *Match!4* com auxílio das informações obtidas no banco de dados de estrutura cristalinas inorgânicas (*ICSD*). Com intuito de complementar e corroborar com as informações obtidas através destas ferramentas supracitadas, dados foram comparados com a literatura.

A técnica DRX permite avaliar de forma detalhada o tipo de substância inorgânica abordada na amostra estudada. No difratograma apresentado no Gráfico 6 da análise BD, ABD e GBD é possível observar diversas misturas complexas e heterogênea de óxidos, com as nomenclaturas de cada fase bem como os números das fichas catalográficas destes materiais: Coríndon- Al_2O_3 [71-1128]; Spinélio- MgAl_2O_4 [77-438]; Halita- NaCl [1-994]; Silvina- KCl [1-790]; Criolita- Na_3AlF_6 [8-73]; Óxido de magnésio- MgO [1-1235]; Nitreto de alumínio- AlN [25-1133] essas nomenclaturas são adotadas por outros autores em seu artigo (CINARLY, 2021); (HU, 2021); (NGUYEN, 2020); (XING, 2017). (VITOR, 2016); (BEHESHTI, 2014).

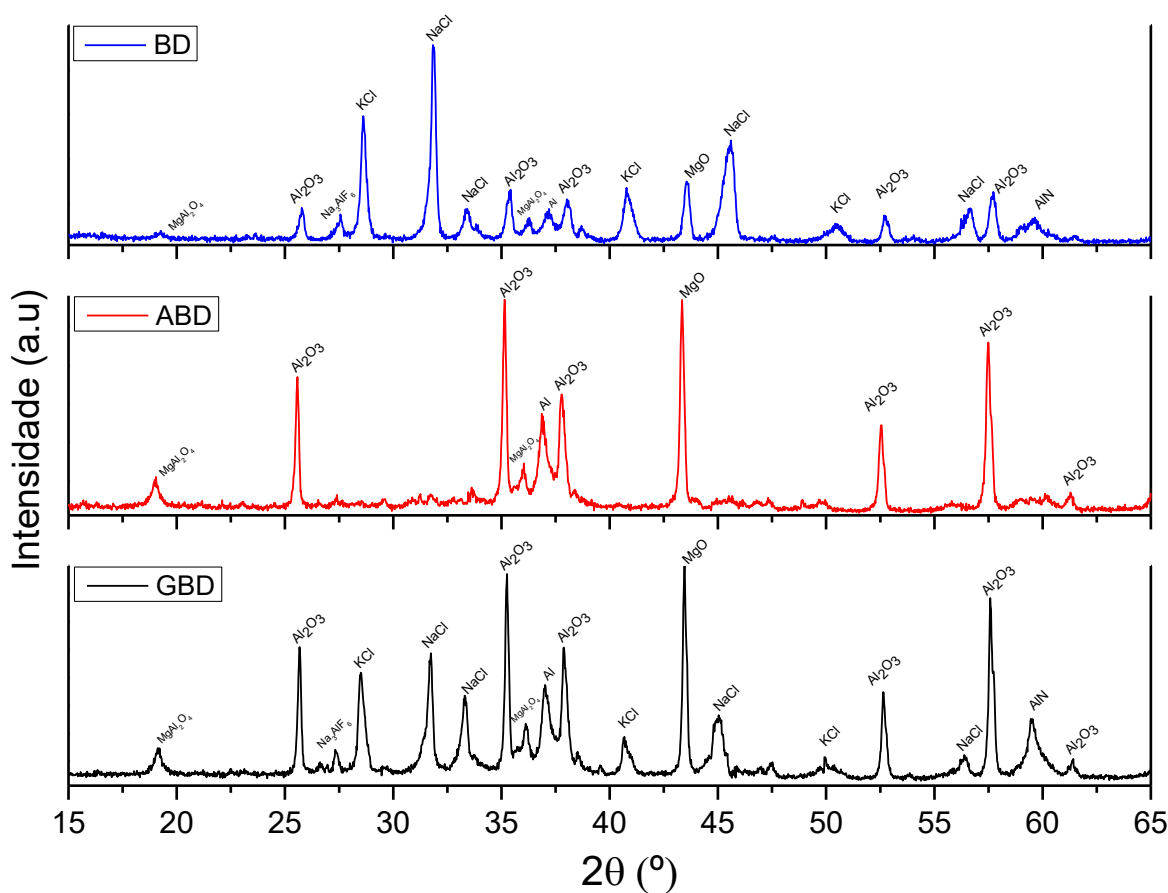
Alumina, Óxido de magnésio e o Spinélio de alumínio magnésio são provenientes da oxidação dos elementos primários presentes na sucata de latas de alumínio predominantemente pelas ligas AA5XXX (Al-Mg) e AA6XXX (Al-Mg-Si), e possui excelente estabilidade térmica a altas temperaturas $\sim 2.100^\circ\text{C}$ e capacidade de acomodar resíduos de cerâmicas enclausurados (MARTINS, 2019); (VITOR, 2016).

É notável a presença de Halita nas posições: 27,56; 31,84; 33,42; 40,78 e 45,60 (°) e Silvina nas posições: 28,52; 43,56; 50,42 e 59,64 (°) estes compostos foram reportados por outros autores, confirmando que a amostra é caracterizada como uma *black dross* quando há forte presença de sais e óxidos (CINARLY, 2021); (BEHESHTI, 2014).

A criolita é uma substância empregada na eletrólise do alumínio primário e, durante o processo, pode se incorporar à escória. Na reciclagem do alumínio, fluxos contendo fluoretos, com aproximadamente 5% de criolita em peso, são utilizados para aprimorar a eficiência da camada protetora do banho fundido. Isso reduz a tensão superficial do óxido de alumínio e, ao aderir à superfície metálica da sucata, contribui para um maior rendimento metálico (GRAMBÁLOVÁ & VADÁSZ, 2013); (VALENTIM, 2011); (XIAO, 2002).

O difratograma das amostras BD, ABD e GBD estão apresentadas no Gráfico 6.

Gráfico 6 - Difratoimetria de raio X das amostras de BD (*in situ*), ABD (água destilada) e GBD (glicerol anidro).



Fonte: Elaborado pelo Autor.

O autor Schimdtz tipifica e classifica outros fluxos possíveis a serem utilizados além da criolita (Na_3AlF_6) que possui excelente rendimento. O Fluoreto de cálcio (CaF_2) uma boa alternativa de fluxo fluoratado, o Fluoreto de alumínio (AlF_3), um fluxo de rendimento moderado e Cloreto de lítio (LiCl) classificado como de baixo rendimento (SCHMITZ, 2006).

As fases salinas de Halita e Silvina possuem cerca de 0,25 vezes mais solubilidade em glicerol do que em água com retenção de espécies gasosas, o que foi obtido no experimento realizado. A difratometria das amostras ABD conforme Gráfico 6, revela a alta capacidade do solvente água dissolver os sais (HU, 2021).

O EDS analisou a superfície dos aglomerados formados pelo glicerol, amostra GBD. Como o glicerol é viscoso, pode ter criado uma "película" ou aprisionado cristais de sais no interior dos aglomerados, tornando-os menos visíveis ao feixe de elétrons do MEV, que só penetra alguns microns. O DRX confirma a existência da fase estrutural. O fato de os picos ainda estarem presentes na amostra GBD corrobora que o glicerol não dissolveu os sais completamente, apenas os removeu parcialmente da superfície ou os redistribuiu.

A divergência entre os picos intensos no DRX e o baixo teor elementar no EDS da amostra GBD justifica-se pela elevada cristalinidade dos sais remanescentes frente à matriz de óxido, que gera um sinal de difração desproporcional à sua massa. Além disso, a aglomeração morfológica observada no MEV sugere que o glicerol aprisionou cristais no interior dos aglomerados, limitando a detecção superficial pelo mapeamento de EDS.

Autores ainda afirmam que a fase AlN é facilmente evidenciada quando as amostras tem seus sais dissolvidos em glicerol (HU, 2021). O nitrato de alumínio quando em decomposição a altas temperaturas liberam gases, formando óxidos de nitrogênio e dióxido de nitrogênio e outra parte formam óxido de alumínio (MAHINROOSTA, 2018); (GRAMBÁLOVÁ & VADÁSZ, 2013); (LUCHEVA. B, 2005).

5.3. Análise de granulometria de agregados

Ao realizar a análise de granulometria observou-se que o tamanho das partículas retidas em determinadas peneiras tinha valores semelhante aos valores de granulometria da areia mais comuns utilizados no processo de fundição em moldes de areia, conforme destaca Tabela 5. Optou-se por comparar valores obtidos de granulometria de areia de sílica e cromita nova e de sílica recuperada com a BD conforme apresentado no Gráfico 3 de acordo com ABNT/NBR 7211/05; NBR 248/03 e NBR 6592/05.

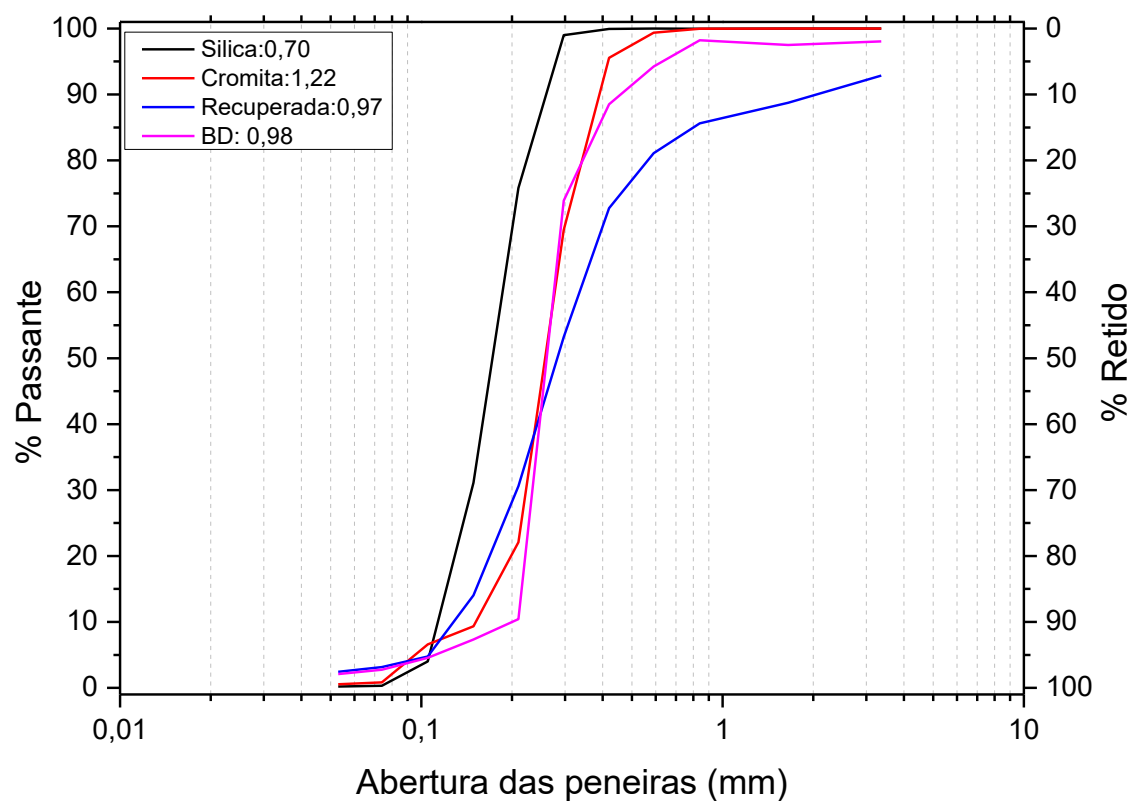
Tabela 5 - Dados dos valores de particulado retido entre as peneiras ASTM 30 e 200.

Peneira (ASTM)	Peneira (mm)	Sílica retida (%)	Cromita retida (%)	Sílica recuperada retida (%)	Black dross retida (%)
30	0,84	0,0025	0,051	14,41	55,95
40	0,59	0,005	3,29	20,77	59,9
50	0,42	0,03249	23,67	35,67	64,64
70	0,297	0,07448	59,13	52,92	67,16
100	0,21	18,13137	71,51	65,53	69,48
140	0,149	51,66467	73,2	72,61	71,56
200	0,105	71,96811	74,82	73,82	72,91

Fonte: Elaborado pelo Autor.

A tabela 5 apresenta os valores de percentual de particulado retido para cada tipo de areia utilizado no processo de fundição convencional e para o BD. A distribuição granulométrica conforme Gráfico 3, demonstrou resultado promissor e com boa probabilidade de se incorporar BD em processos fabris que utilizam areia para construção de molde de sílica (areia verde), cromita (cura à frio), ou fabricação de machos para fundição de metais, em geral para ligas ferrosas, mas podendo ser para ligas não ferrosas (ROSARIO, 2021); (BRAGAGNOLO, 2018).

Gráfico 3 - Análise de granulometria com respectivos módulo de finura: areia de sílica (0,7), cromita (1,22), areia verde recuperada (0,97) e black dross (0,98).



Fonte: Elaborado pelo Autor.

No gráfico 3 foi possível observar um padrão de distribuição onde as curvas representam a distribuição do tamanho dos grãos. Um material com a curva mais à esquerda como a Sílica “preto” é mais fino, pois a maior parte de suas partículas é retida em peneiras com aberturas menores entre 0,1 e 0,3 mm. Quanto mais à direita forem as curvas, significa que os grãos são mais grossos, com partículas maiores que são retidas em peneiras de maior diâmetro, variando entre 0,2 e 1mm.

A amostra de areia verde (sílica recuperada) apresentou um comportamento distinto da amostra de sílica e cromita, pois ela possui em sua composição bentonita, dextrina que são particulados heterogêneos da matriz. A curva da amostra BD demonstra que os grãos são heterogêneo e ficam muitos dispersos nas peneiras.

Outra informação importante é o módulo de finura, este é determinado por um índice numérico que é obtido quando é somado os percentuais retidos em peneiras específicas sendo: ASTM 4, 8,16, 30, 50 e 100, utilizado para classificar a granulometria de agregados, como areias, quanto maior o MF , mais grossa será areia. O MF é classificado conforme tabela 6.

Tabela 6 - Módulo de finura para materiais agregados conforme ABNT NBR NM248/03.

Módulo de Finura	Valor pré-definido	Variação (mm)
Areia Fina	<2,4	0,0750 – 0,420
Areia Média	2,4 ~ 3,9	0,421 – 1,25
Areia Grossa	>3,9	1,25 – 2,01

Fonte: Adaptado NBR NM 248/03 e NBR7211/05.

Materiais finos são ideais para a produção de peças com um acabamento de superfície melhores. No entanto, sua permeabilidade pode ser menor, exigindo um controle rigoroso do processo para evitar defeitos. Materiais mais grossos tendem a oferecer maior permeabilidade, facilitando a saída de gases e reduzindo a probabilidade de porosidade na peça, mas podem resultar em um acabamento mais áspero. O resultado apresentado pela BD se mostrou promissor uma vez que o módulo de finura atendeu os requisitos para ser definida como um material entre o fino e médio, muito embora haja uma heterogeneidade na distribuição.

5.4. Resistência mecânica a tração da areia de sílica com *black dross* incorporada

A areia de sílica pura, possui uma resistência à tração muito baixa. No entanto, a incorporação de um ligante melhora significativamente essa propriedade. A resistência final é resultado da interação entre a superfície das partículas de areia e o ligante, que cria pontes de adesão e coesão, distribuindo as forças de tração e impedindo a separação das partículas. O uso de resíduos de ABD visou reduzir o uso de SiO₂ no processo em que foi incorporado um percentual gradual buscando otimizar a composição do molde obtendo resistência mecânica desejada. Essa combinação é fundamental em aplicações como a produção de moldes para fundição, onde a capacidade de resistir às tensões é essencial para a integridade da peça. Os valores de tensão (N/cm²) obtidos no ensaio de tração de cada corpo de prova estão representados na Tabela 7.

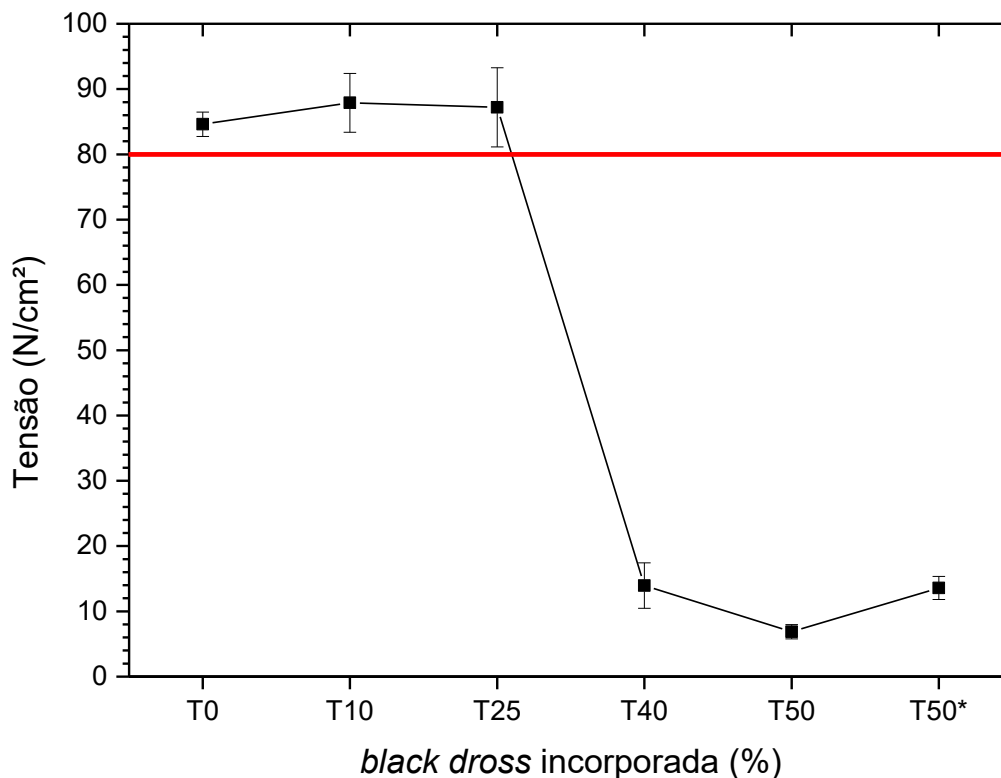
Tabela 7 - Teste de tração em corpos de prova de SiO₂ com ABD incorporada.

Amostras	Tensão: N/cm ²											
T0	86,7	86,4	83,6	86,4	83,9	85	85,5	86,2	85,5	82	81,1	83
T10	85	81	84,1	98,3	84,5	91,1	87,7	85,2	88,8	88	90	91
T25	80	93,1	94,1	85,9	99,1	86,7	81,1	82,5	92	87	82	83
T40	10	11	11,2	13,8	10	18,2	20	17,9	17	12	12,4	14
T50	7	5,9	8,4	6,6	7,8	5,2	5,4	7,6	7	8,50	6	7
T50*	10,3	10,5	15,4	14,9	14,4	12,8	13,7	15	14,7	15,5	12,8	13

Fonte: Elaborado pelo Autor

A determinação de carga suportada pelo corpo de prova seguiu a norma CEMP-175 da ABIFA e sugere que a resistência a tração surgiu da relação de divisão entre carga da ruptura (C) e o produto da espessura (E) e largura (L) do corpo de prova, resultando em um valor expresso em N/cm². Os dados foram apresentados em forma de Gráfico 4.

Gráfico 4 - Representação dos valores de resistência a tração das amostras de SiO₂ com ABD incorporada. A linha vermelha representa o valor mínimo aceitável.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

As amostras T10 e T25 exibiram uma resistência à tração ligeiramente superior à amostra T0 (100% SiO₂), que não continha BD em sua composição. No entanto, essa diferença não é considerada significativa, visto que amostras com resistência mínima de 80 N/cm² já são aprovadas para uso na fabricação de moldes e machos de areia (PEIXOTO & GUESSER, 2003). O desvio padrão, por sua vez, sugere que as amostras T0, T10 e T25 possuem resistências equivalentes.

Apesar disso, a amostra T25 é a mais vantajosa, pois utiliza menos areia de sílica em sua composição, consumindo uma maior quantidade de BD sem comprometer a resistência. Por outro lado, as amostras T40 e T50 apresentaram valores de resistência à tração muito abaixo do mínimo exigido pela norma CEMP 175. A amostra T50*, onde as quantidades de resina alcalina e catalisador foram duplicadas, mostrou um resultado similarmente ruim.

A queda drástica de resistência à tração da condição T25 para T40 pode estar atrelado ao fato de que a resina disponível no sistema consegue “molhar” os grãos de sílica que são mais homogêneos em baixas concentrações de BD incorporada. A partir do

momento que o percentual da *black dross* aumenta, há mais heterogeneidade no sistema, a resina não é suficiente para criar “ponte de ligação” contínuas, o sistema passa de grãos aderidos, para grãos apenas molhados, sem adesão.

Outra possibilidade é a interferência na cura da resina, a piridina é um catalisador volátil que precisa difundir através da mistura para encontrar a resina. A *black dross* pode estar atuando como um filtro poroso e adsorvendo as moléculas de resina e piridina em seus poros e sítios superficiais. Na amostra T40 a área heterogênea é tão vasta que acaba não permitindo que haja a estabilização e o total recobrimento de resina com catalisador na superfície de cada grão de areia ou *black dross*.

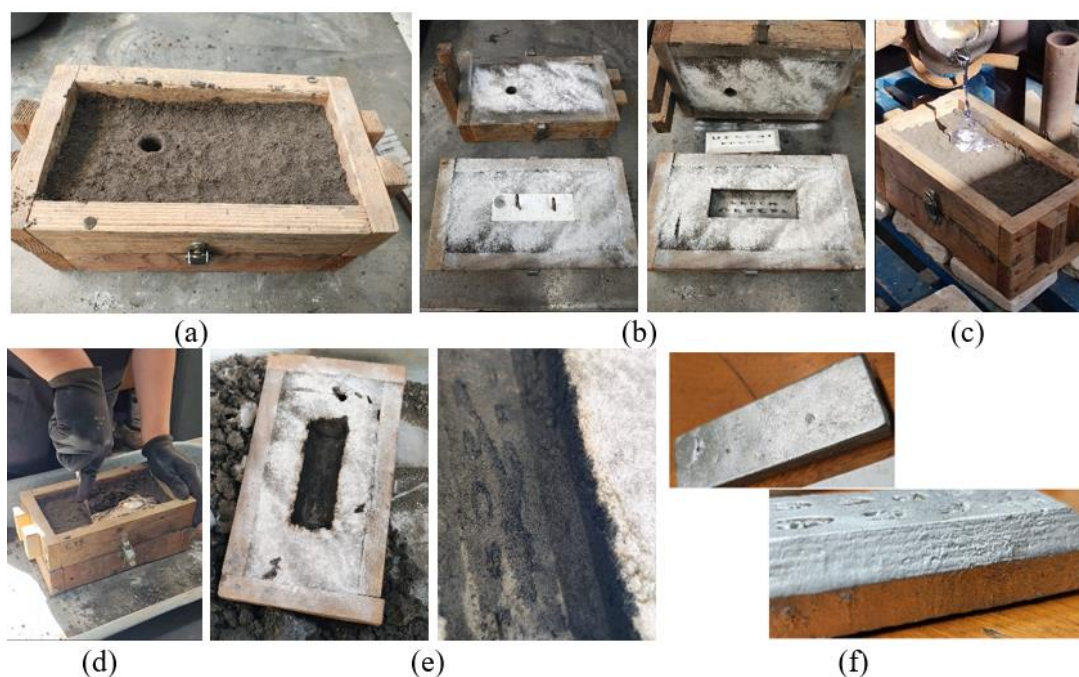
Embora o aumento da quantidade de resina alcalina e catalisador possa parecer uma estratégia viável para elevar a resistência do molde/macho, essa prática não é recomendada. Aumentar esses percentuais pode gerar uma quantidade significativamente maior de gases quando o metal líquido entra em contato com os grãos de areia. Esses gases são os principais responsáveis pela formação de defeitos no fundido, como bolhas internas e imperfeições superficiais (SPRING, 2007).

5.4.1. Metal fundido em molde de areia de sílica com *black dross* incorporada

Para obter uma peça metálica pelo processo de fundição é necessário ter primeiramente um metal na fase líquida e um molde no qual este metal será vazado e posteriormente solidificado.

O ciclo de fundição e preparação do processo consiste na: montagem da caixa de fundição e vazamento do metal sob o molde, desmoldagem até a obtenção do lingote metálico de alumínio. A Figura 30 apresenta a cronologia do processo de fundição, desde a montagem e apiloamento (socagem) da areia de sílica incorporada com BD de acordo com a Figura 30 (a), seguindo com a retirada do modelo que originou o vazio no qual o metal preencherá Figura 30 (b). Após fechado, o molde permanece com as cavidades livres para recebimento do metal líquido. O metal líquido desce pelo canal de alimentação, preenche as cavidades e se solidifica Figura 30 (c). Na sequência ocorre a desmoldagem, Figura 30 (d).

Figura 30 – (a) Molde pronto para remoção do modelo, (b) retirada do modelo, (c) vazamento de metal líquido, (d) desmoldagem, (e) análise visual da estrutura do molde e (f) peça metálica obtida.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Nas Figuras 30 (e) é possível avaliar visualmente a estabilidade térmica das paredes do molde se mantiveram paralelas, não cederam com a temperatura e pressão metalostática, inclusive as regiões mais finas (ponto crítico deste modelo), foram capazes de suportar as variações térmicas e tensões.

O material fundido obtido “alumínio puro” apresentou-se com qualidade estética similar a processos de fundição já amplamente utilizado no setor conforme Figura 30 (f). Essa prática foi realizada no laboratório de fundição da Faculdade de Tecnologia de Sorocaba, e sua relevância foi de comprovar o teste em campo, e a possibilidade de obter metal através da areia de sílica com ABD incorporada.

6. CONCLUSÃO

O estudo realizado propiciou, através das técnicas de MEV/EDS entender a morfologia das partículas e composição química sendo possível confirmar que se trata de da *black dross* (BD).

A BD tratada foi utilizado como matéria prima para produção de moldes para fundição, nas condições de uso com resina alcalina e catalisador piridina. Para isto se fez

necessário remoção dos sais com solvente de maior eficiência (Água); **Problema: Geração de amônia;**

A lixiviação de amostras de escória de *black dross* em água (ABD), sob condições controladas e com massa conhecida, pode produzir NH_3 (gás de amônia), quando neutralizada com H_2SO_4 em um sistema de captação pode gerar ~14g de $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ (sulfato de amônio) em cada 50g de BD. Desta forma é sugerido que a cada 3,57 kg de *black dross* possam gerar 1kg de sulfato de amônia.

A manipulação da *black dross* com glicerol anidro (GBD) comprovou ter eficiência em reter o gases (por meios de percepção ofativa). Mas a quantidade de sais remanescentes impede a aplicação no processo de fabricação de moldes de fundição;

A Incorporação de até 25% de *black dross* (ABD) em areia de sílica para confecção de caixa de areia para fundição, apresentou resistência mecânica necessária à mínima determinada por norma, de 80 N/cm^2 em testes de tração;

A amostra de alumínio fundida em areia de sílica com *black dross* apresentou boa qualidade superficial (**importância da granulometria**): Bolhas de gases → Molde respirável; Capilaridade → Metal líquido permeando a areia por heterogeneidade de tamanho grãos; Inclusões exógenas → Defeitos pontuais advindo de partículas presentes na areia;

Diante do exposto é possível afirmar que o uso da *black dross* neste processo se torna uma alternativa sustentável e de baixo custo com tendência promissora de se tornar viável em larga escala e posterga os impactos ambientais.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABAL"a". (2007). Guia técnico do alumínio geração e tratamento de escória. *Associação Brasileira de Alumínio*, v. 11,, 1 - 17. Fonte: “Associação Brasileira de Alumínio”, v. 11, p. 1–17, 2007. .
- ABAL"b". (2023). *Estatísticas da Produção mensal de alumínio primário entre os anos 2022 e 2023*. Fonte: Abal.Org: <https://abal.org.br/estatisticas/nacionais/aluminio-primario/producao-mensal/?mes=1&ano=2023&BUSCAR=BUSCAR#> acessado em: 20 de fevereiro de 2024
- ABRALATAS. (2024). *Associação Brasileira dos Fabricantes de Latas de Alumínio*. Fonte: Dados do setor de Alumínio: <<https://www.abralatas.org.br/#lata-de-aluminio>>. Acesso em: 20 jan. 2024.
- ALMEIDA, E. L., & OLIVO, J. E. (2023). Production of Biofuels from Glycerol from the Biodiesel Production Process—A Brief Review. Maringá, Brazil, Department of Chemical Engineering, State University of Maringá, doi.org/10.3390/fermentation9100869.
- ALUX DO BRASIL. (2024). *Parcerias tão duradoras quanto o alumínio*. Fonte: ALUX DO BRASIL: <https://aluxdobrasil.com.br/> Acessado em: 19 fev. 2024.
- AMERICAN FOUNDRY SOCIETY. (2017). *Molding Methods and Materials*. 10^a ed. AFS.
- ANASTACIO. (2024). Informações sobre processos de produção da empresa Alux do Brasil. (R. O. Silva, Entrevistador)
- ANEEL. (2021). *Custo da energia elétrica no Brasil para o setor industrial*. Fonte: Agência Nacional de Energia Elétrica: <https://noticias.portaldaindustria.com.br/noticias/inovacao-e-tecnologia/custo-da-energia-eletrica-para-industria/>. Acessado em: 25 mar. 2024.
- ÂNGULO, S., & ZORDAN, S. (1996). Desenvolvimento sustentável e a reciclagem de resíduos na construção civil. *São Paulo: Escola Politécnica, EPUSP*.
- ANTUNES, M. L. (2012). Bauxita e resíduo, caracterização e estudo por microscopia eletrônica. . *56º Congresso Brasileiro de Cerâmica IX Brazilian Symposium on Glass and Related Materials*,, 2066 - 2074.
- BALDAM, R. L., & VIEIRA, E. A. (2012). *Fundição: Processos e tecnologias correlatas*, 2ª Ed. ISBN-13: 978-8536504469: Érica sob demanda.
- BEHESHTI, R. (2014). Black Dross: Processing Salt Removal from Black Dross by Thermal Treatment. *JOM*, v. 66, n. 11, pp. 2243 - 2252.
- BLEICHER, J. L., & SASAKI, M. (2000). *Introdução à difração de Raios-X em cristais*. Fonte: raioXufc: <http://www.raiosx.ufc.br/site/wp-content/uploads/downloads/2013/01/apostila.pdf> Acessado em: 07/08/2025

- BRAGAGNOLO, L. e. (2018). Caracterização de resíduos da fundição de ferro e avaliação de possíveis aplicações na construção civil. *Revista Brasileira de Ciências Ambientais (Online)*, n. 50,, pp. 61–77.
- BROUGH, D., & JOUHARA, H. (2020). The Aluminium industry: A review on state-of-the-art technologies, environmental impacts and possibilities of waste heat recovery. *International Journal of Thermofluids*, v.1-2,, p. p. 100007.
- CALLISTER, J. W., & RETHWISCH, D. G. (2008). *Ciências e Engenharia dos Materiais: uma introdução*. Utah: 7ª Ed. LTC ed. páginas, 270-273.
- CAMPBELL, J. S. (2004). *Castings Practice: The Ten Rules of Castings*. Butterworth-Heinemann.
- CANEVAROLO JR., S. V., & BAUMHARDT, R. N. (2003). Técnicas de Caracterização de Polímeros . Em .. v. ABPol, *Técnicas de caracterização de polímeros*. (pp. 42 - 56). São Carlos: : Artiliber ed.
- CAROLINE. (2024). Informação fornecida em reunião pela engenheira de processos da empresa Alux do Brasil. (R. O. Silva, Entrevistador)
- CARRIELO, G. M. (2024). Síntese de Nd₂Zr₂O₇ pelo método de co-precipitação em meio aquoso com amônia e aplicação na catálise de reações de esterificação. *UFSCar; Universidade Federal de São Carlos, Dissertação de Mestrado em Ciências dos Materiais* .
- CERQUEIRA, A. (2011). Avaliação do processo eletrolítico em corrente alternada no tratamento de água de produção. pp. 59–63. .
- CINARLY, U. (2021). Investigation of Alumina-Based Ceramic Production from Aluminum Black Dross. . *Mining, Metallurgy & Exploration*, v. 38, n. 1,, 257 - 267.
- CNI. (2017). A sustentabilidade da indústria brasileira de alumínio. *Confederação Nacional da Indústria - CNI*,.
- COSTA E SILVA, A., & MEI, P. R. (2010). *Aços e ligas especiais, 2ª Ed.; página 244*. Sumaré / SP: Eletrometal S.A.
- COSTA, M. I. (2018). Influence of the Aluminium Alloy Type on Defects Formation in Friction Stir Lap Welding of Thin Sheets. *Universidade de Coimbra – UC, Centro de Engenharia Mecânica, Materiais e Processos – CEMMPRE, Departamento de Engenharia Mecânica*,. Coimbra, Portugal: <https://doi.org/10.1590/0104-9224/SI2301.04>.
- CULLITY, B. D. (1956). *Elements of X-Ray Diffraction*. Addison-Wesley Publishing Company.
- DEDAVID, A. B. (2007). Microscopia eletrônica de varredura.
- DOS SANTOS, D. H. (2013). Característica do resíduo de lavagem de bauxita para utilização de cerâmica vermelha. *57º Congresso Brasileiro de Cerâmica, 5º Congresso Iberoamericano de Cerâmica Natal, RN, Brasil*.

- FERREIRA ET AL. (2017). The viscosity of glycerol. *The Journal of Chemical Thermodynamics*, v. 113., pp. 162 - 182.
- FERREIRA, A. C. (2014). Reciclagem de alumínio e estimativa de poupança de energia no Brasil. *Universidade de Salvador - UNIFACS*, n. 1, 75 - 88.
- FERREIRA, V. G. (2015). Índices cristalográficos de Miller: uma proposta em Educação a Distância. *Instituto de Pesquisas energéticas e nucleares - IPEN/SP*,.
- FLORES, S. M., & NEVES, R. F. (1997). Alumina para utilização cerâmica, obtida a partir do rejeito de beneficiamento de caulim. *Cerâmica*, v. 43, n. 283–284., pp. 175–179.
- GIANNUZZI, L. (2018). Scanning electron microscopy and x-ray microanalysis. *4th Edition, 2018.*, p. 768.
- GRAMBÁLOVÁ, E., & VADÁSZ, P. (2013). Interaction of molten salts in the systems SiO₂-Al₂O₃. *Cerâmica*, v. 59, n. 352, p. 570–575., pp. 570 - 575.
- HEINE, R. W., & LOPER, C. R. (1976). *Principles of Metal Casting*. 2^a ed. McGraw-Hill.
- HENRIQUES, A. B., & PORTO, M. F. (2013). A insustentável leveza do alumínio: impactos sócio ambientais da inserção do Brasil no mercado mundial de alumínio primário. *Ciência & Saúde Coletiva*, v. 18 n. 11., pp. 3223–3234.
- HU, K. (2021). Characterisation of aluminium black dross before and after stepwise salt-phase dissolution in non-aqueous solvents. *Journal of Hazardous Materials*, v. 401.
- HWANG, J. Y., & HUANG, X. (2006). Recovery of metals from aluminium dross and salt cake. *Nova Técnica*.
- HYDRO¹. (2022). *Especial alumina: Brasil é o 3º maior produtor mundial da matéria-prima*. Fonte: Revista Alumínio: <https://revistaaluminio.com.br/especial-alumina-brasil-e-o-3o-maior-produtor-mundial-da-materia-prima/> Acessado em: 2 jan. 2024.
- IBRAM¹. (2022). *Brasil: um dos países que mais exporta minérios no mundo*. Fonte: Geolnova: <https://geoinova.com.br/brasil-um-dos-paises-que-mais-exporta-minerios-no-mundo/> acessado em: 02 de Janeiro de 2024
- IBRAM². (2007). 90% das reservas de bauxita estão em Áreas de Preservação Permanente. *Portal da Mineração*, pp. [https://ibram.org.br/noticia/90-das-reservas-de-bauxita-estao-em-areas-de-preservacao-permanente /](https://ibram.org.br/noticia/90-das-reservas-de-bauxita-estao-em-areas-de-preservacao-permanente/) acessado em: 02 de janeiro de 2024.
- KANG, Y. (2018). A study of recycling process to recovery valuable resources from aluminum black dross. *Journal of Korean Inst. of Resources Recycling*, v. 27, n. 5, , 61–68.
- KOLLEK, H. (1986). Chemistry of curing and adhesion properties of phenolic resins. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, v. 6, n. 1., pp. 37 - 41.

- KOTHARI, S. (2023). *insideevs uol*. Fonte: Tesla: Prensa GigaPress: <https://insideevs.uol.com.br/news/673552/gigapress-tesla-producao-carros-eletricos/> acessado em: 20 de fevereiro de 2024
- KULIK, G., & DALEY, J. (1990). Aluminium dross processing in the 90's . 2º *Internacional Symposium - recycling of metals and Engineered Materials*, p. 427.
- LAVRADOR, A. (2022). *Elon Musk - mostra máquina que vai produzir a cybertruck*. Fonte: Observador: <https://observador.pt/2022/06/05/elon-musk-mostra-maquina-que-vai-produzir-a-cybertruck/> acessado em: 20 de março de 2024.
- LAZARINOS, J. G. (2007). Tratamento de Revestimentos gastos de cuba. . 62º *Congresso anual da Associação Brasileira Metalurgia, Materiais e Mineração*,.
- LEAL, E. (2000). *Introdução aos fundamentos da microscopia eletrônica de varredura (MEV)*. Curitiba, Paraná, Universidade Federal Paraná (UFPR) - Departamento de Química: Universidade Federal Paraná (UFPR) - Departamento de Química.
- LEAL, L. H. (2000). Fundamentos da microscopia;
- LONDON METAL EXCHANGE. (2024). *London Metal Exchange*. Fonte: YVY RECICLAGEM.: <https://www.yvyreciclagem.com.br/cotacao-lme.>>. Acessado em: 19 fev. 2024.
- LUCHEVA, B. (2005). Non-waste aluminium dross recycling. *Journal of the University of Chemical Technology and Metallurgy*, v. 40, n. 4, , pp. 335–338.
- MAHINROOSTA, M. (2018). Hazardous aluminum dross characterization and recycling strategies: A critical review. *Journal of Environmental Management*, v. 223,, pp. 452–468.
- MALISKA, A. M. (2024). Apostila de microscopia eletrônica de varredura e microanálises. *Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC; Departamento de Engenharia Mecânica - EMC; Laboratório de Materiais - LABMAT e LCMAI .PDF*, pp. 06 - 97.
- Maps/Alux do Brasil. (2025). *Google Maps <endereço Alux do Brasil>*. Fonte: [https://www.google.com/maps/place/ALUX+\(CBA\)/@-22.7659947,-47.252767,17.91z/data=!4m6!3m5!1s0x94c8973dbf95ccdd:0xb59893bd4acc8e8b!8m2!3d-22.7662108!4d-47.2505776!16s%2Fg%2F11shjxgcmr?entry=ttu&g_ep=EgoyMDI1MDgwMy4wIKXMDSOASAFQAw%3D%3D](https://www.google.com/maps/place/ALUX+(CBA)/@-22.7659947,-47.252767,17.91z/data=!4m6!3m5!1s0x94c8973dbf95ccdd:0xb59893bd4acc8e8b!8m2!3d-22.7662108!4d-47.2505776!16s%2Fg%2F11shjxgcmr?entry=ttu&g_ep=EgoyMDI1MDgwMy4wIKXMDSOASAFQAw%3D%3D). Acessado em 6/8/25
- MARTINS, A. L. (2019). Crystallographic Texture Evolution of Aluminum Alloy 3104 in the Drawn and Wall Ironing (DWI) Process. . *Materials Research*, v. 22, n. suppl 1.
- MÁRTIRES, R. A. (2011). *Balanço Mineral Brasileiro de 2001 - Alumínio*. Fonte: Agência Nacional de Mineração: www.anm.gov.br/dnpm/publicacoes-economia-mineral/arquivos/balancomineral-brasileiro-2001-aluminio.pdf/view>. Acessado em: 28 maio. 2025

- MATOS, A. C. (2020). Processo produtivo da bauxita e da alumina: impactos socioambientais, formas de mitigação e o caso de barcarena. *Brazilian Journal of Development*, v. 6, n. 5,, pp. 29644–29654,.
- MATTOS, A. P. (2014). Caracterização termoquímica do glicerol bruto e aproveitamento energético da queima do glicerol de produção de biodiesel. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica , Itajuba / MG .
- MESHAM, A. &. (2018). Recovery of valuable products from hazardous aluminum dross: A review. *Resources, Conservation and Recycling. Elsevier B.V.*
- MORDOR, I. (. (2023). *Tamanho do mercado de bauxita e análise de ações*. Fonte: Tendência e previsões de crescimento (2023 – 2028):: <https://www.mordorintelligence.com/pt/industry-reports/bauxite-market>. Acessado em: 2 jan. 2024.
- NAGARAJAN, N. M. (1992). Newer methods of testing resin bonded sand in shell moulding. *Mechanical Behaviour of Materials V*, pp. 681 - 686.
- NGUYEN, T. T. (2020). Development of a hydrometallurgical process for the recovery of pure alumina from black dross and synthesis of mg spinel. *Journal os materials research and technology*, , 2568 - 2577.
- ONOE, A. T. (2017). Microscopia eletrônica de varredura. . *WORKSHOP OF INORGANIC MASS SPECTROMETRY*.
- PEIXOTO. (2001). *OBSERVADOR*. Fonte: Química Nova Escola: <https://qnesc.sbq.org.br/online/qnesc13/13-aluminio.pdf>. Acessado em: 06 de agosto de 2025
- PEIXOTO, F., & GUESSER, W. L. (2003). *Reutilização de areia regenerada termicamente*. Fonte: Tupy : https://www.tupy.com.br/wp-content/uploads/2021/06/reutilizacao_areia_regenerada_termicamente.pdf. Acessado em: 17 nov. 2024.
- PEREIRA, L. F. (2006). *Fovest*. Fonte: Alumínio: um metal precioso: <https://www1.folha.uol.com.br/fsp/fovest/fo2111200612.htm#:~:text=O%20alum%C3%ADnio%20%C3%A9%20o%20metal,mas%20suas%20t%C3%A9cnicas%20eram%20car%C3%ADssimas>. Acessado em 4 de março de 2024
- PÉRICLES RÉGIS. (2019). *Jornal Cruzeiro do Sul*. Fonte: Barragem da CBA em Alumínio aguarda plano de emergência desde 2017: <https://www.jornalcruzeiro.com.br/sorocaba/barragem-da-cba-em-aluminio-aguarda-plano-de-emergencia-desde-2017/> Acessado em 06 de agosto de 2025
- PRASAD, S. (2000). Studies on the hall-heroult aluminium electrowinning process. *Journal of the Brazilian Chemical Society*, v. 11, n. 3,, pp. 245-251.
- QUARESMA, L. F. (2009). Desenvolvimento de estudos para elaboração do plano duodecenal (2010-2030) de geologia, mineração e transformação mineral. In: *J.MENDO CONSULTORIA*.

- RACANELLI, L. (2020). Uso de rejeito de lavagem de bauxita para a fabricação de ligantes geopoliméricos. *Matéria (Rio de Janeiro)*, v. 25, n. 1,.
- REIME, L. (2008). Transmission Electron Microscopy. *Springer US*, Vol. 36, DOI:10.1007/978-0-387-40093-8.
- REVISTA ALUMÍNIO. (2023). *Produção global de alumínio primário tem leve queda em julho de 2023*. Fonte: Revista Alumínio: <https://revistaaluminio.com.br/producao-global-de-aluminio-primario-tem-leve-queda-em-julho-de-2023/>. Acessado em: 24 mar. 2024.
- RINALDI, R., & LOVET, X. (2017). Electron Probe Microanalysis: A Review of the Past, Present, and Future. *Microscopy and Microanalysis Journal*, Vol. 21, DOI: 10.1017/S1431927615000409, pp. 1053 - 1069.
- ROSARIO, L. A. (2021). Propriedades em areias a verde com caulim para moldes de fundição. *Matéria (Rio de Janeiro)*, v. 26, n. 4, .
- RUSSELL, J. B. (1994). Química Geral - Vol.1.
- SCHARF, C., & DITZE, A. (2015). Recycling of black dross containing rare earths originating from melting and recycling of magnesium alloys. *Hydrometallurgy*, v. 157, pp. 140 - 148.
- SCHMITZ, C. (2006). Handbook of aluminium recycling. Em *fundamentals, mechanical preparation, metallurgical processing e plant design*, Ed. 11, Vol.47 (pp. 52-55). Vankal-Vergan GmbH.
- SILVA FILHO, E. B. (2007). Lama vermelha da indústria de beneficiamento de alumina: produção, características, disposição e aplicações alternativas. *Matéria (Rio de Janeiro)*, v. 12, n. 2., pp. 322 - 338.
- SILVA FILHO, E. B., & ALVES, M. C. (2007). Lama vermelha da indústria de beneficiamento de alumina: produção, características, disposição e aplicações alternativas. *Matéria (Rio de Janeiro)*, v. 12, n. 2., pp. 322 - 338.
- SILVA, L. A. (2004). Por que todos os nitratos são solúveis? *Química Nova*, v. 27, n. 6,, pp. 1016 - 1020.
- SIQUEIRA, M. V. (2022). Processamento e recuperação sustentável e econômica de metal das escórias geradas na produção de alumínio e suas ligas com a eliminação da geração de salta cake. *Trabalho de Conclusão de Curso: Bacharel em Engenharia de Materiais, São José dos Campos : Universidade Federal de São Paulo*,. Fonte: Trabalho de Conclusão de Curso: Bacharel em Engenharia de Materiais. São J.
- SOUZA, J. (2010). Estudo e avaliação do uso de resíduos do processo bayer como matéria-prima na produção de agregados sintéticos para a construção civil. *Tese em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia (Doutorado) - PRODERNA/ITEC, Belém: Universidade Federal do Pará*.

- SP LABOR. (2025). *SP Labor Equipamentos para laboratórios*. Fonte: <https://www.splabor.com.br/produtos/peneiras-granulometricas-e-mesa-vibratoria/peneiras-granulometricas-redondas/> Acessado em: 07/08/25
- SPRING, T. (2007). *Técnica de fundição em casca*. Fonte: Curitiba: UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ (UFPR), Apresentação sobre técnica de fundição.
- TECNOFUND. (2025). *TecnoFund equipamentos para ensaios, testes e automação industrial*. Fonte: <https://www.tecnofund.com.br/port/dap/> Acessado em: 07/08/25
- TSAKIRIDIS, P. E. (2012). Aluminium salt slag characterization and utilization – A review. . *Journal of Hazardous Materials*, v. 217–218,, 1–10.
- USGS . (2025). *Mineral Commodity Summaries 2025*. Fonte: Science for a changing world: <https://www.usgs.gov/centers/national-minerals-information-center/mineral-commodity-summaries>. Acessado em: 06 de agosto de 2025
- VALENTIM, A. R. (2011). Reciclagem de folhas de alumínio em forno à indução. *Revista Gestão Industrial*, v. 7, n. 2,.
- VALÉRIO, O. (2009). *Tecnologia da Fundição*. ABM, 2009. Associação Brasileira de Metalurgia, Materis e Mineração (ABM).
- VIEIRA, M. S. (2021). Espectroscopia de energia dispersiva de raios-X (EDS) acoplada ao microscópio eletrônico de varredura (MEV): fundamentos e aplicações em produtos lácteos. *Research, Society and Development*. V.10, n. 10, pp. DOI: <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v10i10.18622>.
- VIERA, M. E. (2021). Espectroscopia de energia dispersiva de raios-X (EDS) acoplada ao microscópio eletrônico de varredura (MEV): fundamentos e aplicações em produtos lácteos. *Research, Society and Development*, v. 10, n. 10,, pp. 2525 – 3409.
- VITOR, P. A. (2016). Preparação e caracterização de espinélio MgAl₂O₄ nanoestruturado através de síntese por combustão em solução. *Cerâmica*, v. 62, n. 363,, pp. 230 – 236.
- WILLIAMS, D., & CARTER, C. (2009). Transmission Electron Microscopy. Em B. M. In: *Transmission Electorn Microscopy*, Doi: 10.1007/978-1-4757-2519-3.
- XIAO, Y. (2002). Recycling of distributed aluminium turning scrap. *Minerals Engineering*, v. 15, n. 11,, pp. 963–970.
- XING, W. D. (2017). Treatment of Black Dross with Water and NaOH Solution. . *J. of Korean Inst. of Resources Recycling*, v. 26, n. 3, , 53–60.
- YOSHIMURA, H. N. (2008). Evaluation of aluminum dross waste as raw material for refractories. . *Ceramics International*, v. 34, n. 3, , 581 - 591.