



Faculdade de Ciências

Departamento de Química

Curso de Licenciatura em Química Ambiental

TRABALHO DE LICENCIATURA

TEMA

Aplicação do Método de Lixiviação Ácida na Separação e Purificação de Altos Teores de Alumínio a partir da Escória de Alumínio Resultante do Processamento dos Cabos Eléctricos na Empresa Midal Cables



AUTORA

Pondeca, Verónica Francisco

Maputo, Julho de 2025



Faculdade de Ciências

Departamento de Química

Curso de Licenciatura em Química Industrial

TRABALHO DE LICENCIATURA

TEMA

**Aplicação do Método de Lixiviação Ácida na Separação e
Purificação de Altos Teores de Alumínio a partir da Escória de
Alumínio Resultante do Processamento dos Cabos Eléctricos na
Empresa Midal Cables**

AUTORA

Pondeca, Verónica Francisco

SUPERVISOR

Mestre Esnaider Rodrigues Suarez

Maputo, Julho de 2025

DEDICATÓRIA

É com grande honra e alegria que dedico este trabalho de culminação de curso aos meus pais Orlando Francisco Pondeca e Salma Sebastião Condjo pelos ensinamentos, sacrifícios, amor e cuidados transmitidos dia após dia. Aos meus irmãos e amigos, em especial à Benilde, à Aurora, ao Valdo, à Neyma, ao Charifo e à Elsa por acreditarem no meu potencial, por darem apoio incondicional, por fazerem parte desta licenciatura e por serem a minha fonte de motivação para continuar e nunca desistir.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço ao meu bom Deus pelo dom da vida, saúde, protecção, sabedoria e pela força.

Aos meus pais Orlando Francisco Pondeca e Salma Sebastião Condjo por tudo que têm feito por mim. Pelo apoio incondicional, por serem a minha fortaleza, por lutarem sempre para dar uma vida melhor e por apoiarem e incentivarem o meu amor pela Química (gratidão eterna).

Ao meu supervisor Mestre Esnaider Rodrigues Suarez, à Lic. Nelda e ao Prof. Doutor Eutilério Chaúque pelo apoio incondicional durante a realização deste trabalho, por serem excelentes profissionais, pela disponibilidade, paciência, pelos ensinamentos e por cada conselho dado, muito obrigada.

Ao Lic. Juvêncio Custódio pela disponibilidade imediata, paciência, pelos ensinamentos e pela ajuda incondicional. Ao Eng. João José Macuacua, Sr. Ramiro Hobjane, Sr. Francisco e ao Mestre Hercílio Seda pela ajuda durante esta caminhada, muito obrigada.

Às minhas companheiras de estudo Salfina Mahiele, Hamina Abudo, Nádia Ussene, Miséria Flora e Sónia Baloi pelo apoio, motivação e por caminharem comigo desde o início até ao fim do trabalho laboratorial, obrigada.

Aos meus irmãos, por me motivarem e pelo amor incondicional. Por serem pessoas esforçadas inspiradoras e humildes que sempre fizeram de tudo para me verem bem na vida, pelos sábios ensinamentos. Faço votos que um dia possa retribuir tudo que têm feito por mim. À minha prima Marlene, agradeço pelo apoio e motivação.

Às minhas amigas Neyma, Lica, Viviane, Elsa, Valentina e ao meu amigo Charifo pelo apoio incondicional durante a minha carreira estudantil. À minha tia Aurora Pondeca por ter um coração lindo que sempre se disponibilizou a ajudar-me dando apoio moral, à minha avó Lúcia por orar sempre por mim, pelo apoio e incentivo incondicional, que Deus a abençoe, avózinha, sou grata por tudo.

Um especial agradecimento à família Pondeca por estar sempre presente na minha jornada académica e na vida: Pai e Mãe, meus irmãos Rafaela, Benilde, Aurora e Valdo pelo apoio incondicional e pela força durante este percurso o meu muito obrigada.

DECLARAÇÃO SOB COMPROMISSO DE HONRA

Eu, **Verónica Francisco Pondeca**, declaro por minha honra, que o presente trabalho de finalização do curso de Licenciatura em **Química Ambiental** é resultado da minha investigação e nunca foi apresentado para obtenção de qualquer grau académico para quaisquer fins e que foi elaborado com base nos meios que são referenciados ao longo do corpo do trabalho e realização das experiências ligadas com temda da investigação.

Maputo, Julho de 2025

A autora

(**Verónica Francisco Pondeca**)

RESUMO

O processo da gestão da escória de alumínio é um dos desafios da indústria de produção de alumínio secundário, tanto por questões de sustentabilidade como ambientais. As escórias produzidas contém, geralmente, grandes quantidades de alumínio em forma de óxidos, alguns elementos metálicos e sais como NaCl ou KCl, e o alumínio que poderia ser usado na produção de matérias de valor adicional. O presente trabalho tem como objectivo aplicar o método de lixiviação ácida para a separação e purificação de altos teores de alumínio contido no resíduo industrial resultante do processamento dos cabos eléctricos e barras de alumínio na empresa Midal Cables, Moçambique. Foi realizada a caracterização da composição química da escória do alumínio pelo método de Fluorescência de Raios-X (XRF). A recuperação do teor de alumínio presente na escória foi efectuada pelo método de lixiviação ácida em diferentes condições: a uma temperatura constante de 90°C, com concentrações de ácido sulfúrico (20%, 30% e 40%) e o tempo de lixiviação (30 min, 60 min, 90 min, 120 min e 150 min). Foram determinadas as composições químicas dos produtos principais da lixiviação ácida da escória. Avaliou-se o efeito do tempo e da concentração do ácido da lixiviação na recuperação do teor de alumínio pelo método de Fluorescência de Raios-X (XRF). Fez-se a caracterização térmica dos produtos (20% de ácido em 120 min de tempo de lixiviação e 40% de ácido em 120 min de tempo de lixiviação). Os resultados de caracterização da amostra da escória indicam que esta é principalmente constituída pelo alumínio (87,93%) e as composições químicas dos elementos principais que compõem os produtos foram enxofre (S) e alumínio (Al), para cada condição da lixiviação ácida. Os resultados relativos aos efeitos do tempo indicam que o tempo do máximo rendimento da extracção de alumínio foi de 120 min, obtendo-se 25,29%, 30,00% e 33,95% para 20%, 30% e 40% de ácido respectivamente. Os resultados dos efeitos da concentração do ácido indicam o aumento do rendimento da extracção do alumínio, com aumento na concentração do ácido de 20% para 30% e 30% para 40%. O Método de análise Termogravimétrico (TGA) dos produtos determinou aproximadamente 30% de massa de H₂O na molécula do sulfato de alumínio hidratado. O processo de recuperação do alumínio na forma de sulfato de alumínio hidratado a partir da lixiviação da escória com H₂SO₄ foi optimizado, tendo-se observado que 40% de ácido em 120 min recupera a máxima quantidade de alumínio. Portanto, torna-se necessária a investigação da performance da recuperação do alumínio na escória, quando o processo da lixiviação é realizado com diferentes ácidos em diferentes temperaturas.

Palavras-chave: Alumínio; Escória; Ácido sulfúrico; Sulfato de alumínio; Rendimento.

ÍNDICE

DEDICATÓRIA.....	i
AGRADECIMENTOS	ii
DECLARAÇÃO SOB COMPROMISSO DE HONRA	iii
RESUMO	iv
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS	vii
ÍNDICE DE FIGURAS	viii
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Objectivos da pesquisa.....	2
1.1.1. Objectivo geral.....	2
1.1.2. Objectivos específicos.....	2
1.2. Justificativa da escolha do tema.....	3
1.3. Metodologia usada no trabalho	4
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1. Definição, principais propriedades e cadeia de valor do alumínio	5
2.2. Produção de alumínio	5
2.3. Escória de alumínio	7
2.4. Mecanismos de formação da escória	8
2.4.1. Oxidação do metal líquido.....	9
2.4.2. Filme de oxidação do lingote/retalho.....	9
2.4.3. Transporte do metal líquido.....	9
2.5. Pré – processamento de resíduos da escória de alumínio	10
2.5.1. Rota pirometalúrgica para reciclagem da escória de alumínio	11
2.5.2. Rota hidrometalúrgica para reciclagem da escória de alumínio	12
2.6. Factores que influenciam a extracção de alumínio da escória.....	13
2.7. Geração de produtos valiosos a partir da escória de alumínio.....	14
2.8. Impactos ambientais da escória de alumínio	15
2.9. Lixiviação	15

2.9.1. Lixiviação em leito estático	16
2.9.2. Lixiviação em tanques agitados.....	16
2.9.3. Factores que influenciam a velocidade de lixiviação	16
3. PARTE EXPERIMENTAL.....	19
3.1. Descrição das principais operações unitárias do processo de produção de barras de alumínio até à produção da escória.....	19
3.2. Colheita das amostras de Escória de Alumínio na Empresa MIDAL CABLES Lda	26
3.3. Metodologia experimental.....	28
3.3.1. Análises laboratorias.....	29
3.3.2. Processo de lixiviação da escória usando ácido sulfúrico	29
3.3.3. Procedimento para Análise por XRF	31
3.3.4. Procedimento para Análise por TGA.....	31
3.3.5. Determinação do rendimento da extracção do alumínio na escória	31
4. RESULTADOS, ANÁLISE E DISCUSSÃO	32
4.1. Caracterização química da escória.....	32
4.2. Rendimento da extracção do alumínio.....	33
4.3. Caracterização química dos produtos da lixiviação.....	34
4.4. Efeito do tempo de lixiviação na extracção do alumínio.....	36
4.5. Efeito da concentração de lixiviação na extracção do alumínio	37
4.6. Caracterização dos produtos através do método de análise termogravimétrica (TGA).38	
5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	41
5.1. Conclusões.....	41
5.2. Recomendações	42
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	43
Apêndice.....	A

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

- **Al**- Alumínio
- °C- Grau Celsius
- **g**- grama
- **h**- hora
- **L**- Litros
- **mL**- Mililitros
- **min**- minutos
- **TGA**- Método de análise termogravimétrico
- **XRF**- Fluorescência de raios-X
- **M.S**- Milímetro de espessura (mild steel)
- **TF1**- Forno basculante (Tilting furnace)
- **OTT**- Sistema de enrolamento
- **TF's**- Tanques de fusão
- **CS**- Cristais sólidos
- **AC**- Ácido (H_2SO_4)

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Formação da escória por oxidação e arraste mecânico de alumínio líquido Fonte: Santos (2013). a) Oxidação do metal líquido; b) Filme de óxido inerente ao lingote/retalhos; c) Movimentação e transporte do metal líquido; d) Conglomerado de partículas de óxido; e) Interface aglomerada de alumínio metálico; f) Oxidação do alumínio disperso; g) Desnatação de escória da superfície de banho a derreter; h) O alumínio metálico escorre e acompanha a oxidação de sólido durante a formação da escória.	8
Figura 2: Influência do tempo e da temperatura na oxidação do alumínio Fonte: Santos (2013).	9
Figura 3: Formação de escória por cascata Fonte: Santos (2013).	10
Figura 4: Localização geográfica da área de estudo. Fonte: Monjan e Suarez (2024).	19
Figura 5: Principais equipamentos usados para obtenção do varão do alumínio. a) Painela metálica. b) Forno secundário. c) Caneletes metálicas. d) Roda de fundição. e) Tesoura principal. f) Roda de fundição. g) Máquina de indução de calor. h) Máquina de extrusão secundária.	23
Figura 6: Forno HF1.	24
Figura 7: Forno TF1.	25
Figura 8: Representação dos pontos de recolha, fornos TF1 e TF2. 1. Recolha da amostra no forno TF1, 2- recolha da amostra no forno TF2.	26
Figura 9: Retirada da escória do forno e armazenagem: a) Formação da escória no forno. b) Transporte da escória para o armazém. c) Armazenamento do resíduo de alumínio. d) Emissão de pó ao ambiente.	27
Figura 10: Local de colecta da amostra de escória.	27
Figura 11: Processo de preparação das soluções. a) Preparação dos materiais e escórias. b) Soluções de ácido sulfúrico preparadas.	29
Figura 12: Processo de lixiviação da escória usando ácido sulfúrico. a) Copos de precipitação na manta de aquecimento. b) Escórias secas em pó. c) Escórias adicionadas na solução do ácido sulfúrico. d) Filtração da escória dissolvida no ácido sulfúrico. e) Os sólidos em suspensão dos filtrados ricos em sulfatos de alumínio. f) Secagem dos cristais no dessecador. g) Após a secagem no dessecador. h) Secagem dos sulfatos de alumínio na estufa. i) Após a secagem na estufa e preparação para análises de XRF e TGA.	30
Figura 13: Rendimento da extracção em função do tempo de lixiviação para AC-20%.	36
Figura 14: Rendimento da extracção em função do tempo de lixiviação para AC-30%.	37
Figura 15: Rendimento da extracção em função do tempo de lixiviação para AC-40%.	37
Figura 16: Comparação do rendimento da extração em função das concentrações de H ₂ SO ₄	38
Figura 17: Curva de TGA para o produto de AC-20% e 120 min de tempo de lixiviação.	39
Figura 18: Curva de TGA para o produto de AC-40% e 120 min de tempo de lixiviação.	40

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1: Materiais, reagentes e equipamentos utilizados.....	28
Tabela 2: Resultados da análise XRF mostrando a composição elementar da escória de alumínio.	32
Tabela 3: Sulfato de alumínio produzido nas diferentes condições de extração de alumínio a partir da escória.....	33
Tabela 4: Rendimentos da extração do alumínio.....	33
Tabela 5: Resultados da análise XRF mostrando a composição elementar das amostras dos CS-20%.	34
Tabela 6: Resultados da análise XRF mostrando a composição elementar das amostras dos CS-30%.	35
Tabela 7: Resultados da análise XRF mostrando a composição elementar das amostras dos CS-40%.	35

1. INTRODUÇÃO

O alumínio é um dos metais mais relevantes para o desenvolvimento moderno, não apenas por sua ampla disponibilidade na natureza, mas também pela variedade de aplicações industriais e domésticas. Com uma produção global de 64 milhões de toneladas, o alumínio é utilizado em diversas áreas, nomeadamente na produção de utensílios, latas de bebidas e na geração de ligas metálicas de alta tecnologia (Meshram, 2019).

No entanto, o crescimento acelerado dessa produção tem como consequência o aumento expressivo da geração de resíduos e sucata de alumínio. Esse cenário é resultado, principalmente, da expansão das indústrias que operam tanto na produção primária quanto na secundária do metal (Meshram, 2019). Ambas as rotas industriais, embora fundamentais para atender à demanda global, geram subprodutos sólidos que apresentam riscos ambientais e à saúde humana, como a escória branca, escória preta e escória salina (Jiménez *et al.*, 2022).

A quantidade de escória produzida depende do tipo e qualidade das matérias-primas e das condições de operação (Mahinroosta e Allahverdi, 2018), mas em média, para cada tonelada de alumínio fundido, entre 300 e 600 kg de escória de alumínio é gerada (Gil e Korili, 2016). A formação da escória é inevitável quando o metal fundido entra em contacto com a atmosfera, resultando numa mistura de alumínio metálico, sais e óxidos (Jiménez *et al.*, 2022).

Diante desse problema, diferentes métodos de recuperação de alumínio a partir da escória têm sido estudados. Os processos pirometalúrgicos, embora eficientes em recuperar altas percentagens de alumínio, demandam tecnologia avançada e elevadas temperaturas, o que implica em custos operacionais elevados e maior impacto ambiental (Meshram e Singh, 2018; Zuo *et al.*, 2021). Já os processos hidrometalúrgicos apresentam vantagens como menor consumo de energia, simplicidade de operação e também altos índices de recuperação de alumínio (Mahinroosta e Allahverdi, 2018). Baseando-se na característica anfotérica do alumínio, esses processos utilizam técnicas de lixiviação ácida ou alcalina (Feng *et al.*, 2020; Meshram e Singh, 2018), sendo que os resíduos sólidos gerados após o tratamento não são perigosos e podem ser reaproveitados, por exemplo, na construção civil (Tsakiridis *et al.*, 2014).

Devido à grande quantidade total de alumínio produzida em todo o mundo e ao crescimento da indústria do alumínio, pode-se facilmente compreender que a geração de escória de alumínio aumentará nos próximos anos, assim como a perda geral de alumínio metálico (Meshram,

2019). Não é apenas o crescimento da produção de alumínio (primário e secundário) e aplicações que atraem a atenção deste trabalho; O crescimento na geração dos resíduos industriais de alumínio é também alarmante. Este trabalho, portanto, propõe uma metodologia para a extração de alumínio a partir da escória, promovendo a recuperação do metal e a valorização dos resíduos em novas aplicações industriais. O alumínio recuperado é reutilizado na indústria automobilística, construção civil e eléctrica, enquanto a fracção não metálica pode ser usada na produção de cimento, cerâmica, fertilizantes e na estabilização de resíduos (Meshram, 2019).

1.1. Objectivos da pesquisa

1.1.1. Objectivo geral

Aplicar o método de lixiviação ácida para a separação e purificação de altos teores de alumínio contido no resíduo industrial resultante do processamento dos cabos eléctricos e barras de alumínio na empresa Midal Cables, Moçambique.

1.1.2. Objectivos específicos

1. Descrever as principais operações unitárias no processo de produção de barras de alumínio e cabos eléctricos, até à formação de resíduos industriais de alumínio;
2. Caracterizar a composição química da escória do alumínio e produto de lixiviação pelo método de Fluorescência de Raios-X (XRF);
3. Separar e purificar as amostras do resíduo da escória pelo método da lixiviação ácida;
4. Estudar os efeitos do tempo e concentração do ácido da lixiviação na recuperação do teor de alumínio;
5. Caracterizar os produtos da lixiviação usando o método de análise Termogravimétrica (TGA);
6. Fornecer um meio acessível que reduza a poluição ambiental.

1.2. Justificativa da escolha do tema

Durante o processo de fundição do alumínio fornecido pela Mozal para a produção de barras de alumínio e cabos eléctricos à MIDAL CABLES, há geração de grandes quantidades de resíduos industriais, na ordem das cinco mil (5000) toneladas mensais, conhecidas como escória de alumínio. Até então, a empresa não aplica nenhum método para a extracção e purificação do alto teor de alumínio presente na escória, o que abre uma janela de oportunidades para pesquisar sobre o tema.

Neste sentido, o grande desafio do tratamento da escória gerada a partir do processo de produção dos cabos eléctricos de alumínio está relacionado com os princípios de sustentabilidade, responsabilidade social corporativa e razões ambientais. A escória, resíduo gerado no processo de fabricação de cabos eléctricos, contém uma quantidade significativa de alumínio que, se recuperado, pode ser reutilizado na produção, e reduzir os custos de matéria-prima e minimizar a necessidade de exploração de novos recursos naturais (Meshram, 2019; Tsakiridis *et al.*, 2014).

Portanto, tendo em consideração a reutilização do alumínio recuperado, que pode diminuir a pegada ambiental e promover práticas mais sustentáveis da empresa, tornou-se conveniente pesquisar sobre a recuperação do teor de alumínio a partir da escória do resíduo de processamento dos cabos eléctricos na MIDAL CABLES pelo método de lixiviação, com o objectivo de fornecer um meio acessível e viável que reduza a poluição ambiental e concilie com a excelência produtiva.

1.3. Metodologia usada no trabalho

O presente trabalho foi realizado em duas etapas: a primeira consistiu na revisão bibliográfica dos aspectos relacionados com o desenvolvimento e otimização do processo de separação, recuperação e purificação a partir da escória de alumínio. A segunda etapa compreendeu o trabalho de campo na empresa Midal Cables, para a socialização com o processo de produção, a recolha e preparação das amostras; caracterização química da escória; ensaios de lixiviação ácida da escória (em 20%, 30% e 40% de ácido para 30 min, 60 min, 90 min, 120 min e 150 min de tempo); caracterização química e térmica dos produtos da lixiviação e por fim apresentação e discussão dos resultados e elaboração do relatório.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Definição, principais propriedades e cadeia de valor do alumínio

O alumínio, identificado pelo símbolo químico Al e número atômico 13, é um metal de cor cinza-prateada, leve e relativamente macio, apresenta dureza de 2,75 na escala de Mohs (Georgitzikis *et al.*, 2021). Com um peso específico de 2,7 g/cm³, o alumínio é um terço do peso do aço, o que contribui para sua ampla utilização em aplicações onde a leveza é essencial. Além da baixa densidade, destaca-se pela elevada condução de calor e electricidade, a sua maleabilidade superior e o baixo ponto de fusão de 660°C tornam-no altamente funcional e versátil. Outra característica relevante é a capacidade de formar diversas ligas, o que expande ainda mais suas possibilidades de uso. Notavelmente, o alumínio apresenta uma excelente relação resistência/peso (Georgitzikis *et al.*, 2021).

Com a adição de elementos como zinco e cobre e mediante processos térmicos específicos, é possível produzir ligas de alumínio com resistência comparável, ou até superior, à de aços convencionais (Aluminum Association, 2021). Além disso, sua resistência natural à corrosão, devido à formação de uma camada de óxido protectora, somada à não toxicidade e à alta reflectividade, faz com que o alumínio seja, actualmente, o segundo metal mais utilizado no mundo, atrás apenas do ferro, e o principal metal não ferroso em volume de produção (Georgitzikis *et al.*, 2021).

2.2. Produção de alumínio

Existem três rotas para a produção de alumínio metálico: produção primária de alumínio a partir de minério de bauxite através de uma série de processos estabelecidos há muito tempo; produção secundária a partir de resíduos de alumínio e escória branca; e uma fonte terciária a partir de escória preta e escória salina (Georgitzikis *et al.*, 2021; Ali e Yassen, 2018).

- **Alumínio primário**

A principal matéria-prima para a produção de alumínio primário é a bauxita. Este minério é processado para obtenção da alumina, a qual, posteriormente, é fundida para gerar o alumínio metálico (Georgitzikis *et al.*, 2021). A bauxite é um minério heterogêneo composto principalmente de minerais contendo alumínio (hidróxidos de alumínio ou hidróxidos de óxido de alumínio) de gibbsite, boemite e diásporo, além de conter impurezas como sílica e óxidos de ferro (Georgitzikis *et al.*, 2021; Hill e Sehnke, 2006). Essa rota de produção é a única aceita

para aplicações que exigem alta pureza, como na fabricação de cabos elétricos (Grimaud *et al.*, 2018).

- **Alumínio secundário**

A reciclagem de sucata de alumínio envolve a colecta, triagem, pré-tratamento, fusão e fundição de lingotes (Georgitzikis *et al.*, 2021). A produção secundária de alumínio é caracterizada pela diversidade de tipos de sucata antiga disponíveis, ou seja, uma grande variedade de ligas, tamanho, tipo e grau de contaminação por tintas ou plásticos, o que determina correspondentemente a técnica de pré-tratamento necessária (por exemplo, separação mecânica) e o processo de fusão a ser aplicado (por exemplo, forno rotativo com fluxo de sal) (European Aluminium, 2016). A produção de Al secundário gera anualmente em todo o mundo uma quantidade considerável de escória (mais de 3,5 milhões de toneladas de escória e escória salina), que apresenta variabilidade de composição química e mineralógica (Ali e Yassen, 2018). É importante observar que, apesar de ambientalmente vantajosa, a sucata reciclada nem sempre atende aos padrões de qualidade exigidos em aplicações de alta performance.

- **Alumínio semi-acabado**

Produtos semi-acabados de alumínio (ou 'semis') são definidos como produtos que foram submetidos a algum processamento e são fornecidos para posterior processamento mecânico (por exemplo, formação, usinagem, união) em uma forma acabada antes de serem usados (Georgitzikis *et al.*, 2021). Os produtos de alumínio forjado (ou produtos «moídos») e as peças vazadas de alumínio pertencem ao amplo grupo «semi-produtos» (Georgitzikis *et al.*, 2021). O material de entrada para produtos forjados é o metal de alumínio em bruto (primário ou secundário) que é trabalhado mecanicamente a quente ou a frio por laminação, extrusão, trefilação ou forjamento em múltiplas formas (Georgitzikis *et al.*, 2021).

Os produtos de alumínio forjado incluem produtos laminados planos, produtos extrudados, como barras, vergalhões e perfis, bem como fios, tubos e tubulações de alumínio (European Aluminum, 2018). As peças fundidas de alumínio são produzidas em fundições por processos de fundição, incluindo fundição sob pressão, fundição em areia ou molde permanente e fundição de precisão (European Aluminum, 2018).

- **Alumínio terciário**

A escória de alumínio é um subproduto da indústria de produção de alumínio que contém quantidades significativas de metal recuperável (até cerca de 70%) (Pasley, 2003). A maioria das escórias é uma mistura heterogênea de grandes pedaços, óxidos finos e pequenos pedaços de metal (Pasley, 2003). Tsakiridis *et al.*, (2014) estudaram um processo para a recuperação de alumínio através do tratamento da escória preta de alumínio, um resíduo formado durante a fundição de sucata de alumínio. Jinping *et al.*, (2007), investigaram a recuperação de alumínio e ferro de escórias de caldeiras retiradas de fábricas que utilizam carvão.

2.3. Escória de alumínio

A escória de alumínio é um resíduo inevitável da fusão do alumínio, a quantidade produzida da mesma depende do processo utilizado. A formação da escória ocorre devido à oxidação do alumínio durante a fusão. Ela forma-se quando as impurezas são separadas e removidas do metal líquido onde ficam retidas grandes quantidades de componentes contaminantes, juntamente com sais ou demais produtos adicionados ao processo (Freti *et al.*, 1982). A presença de outros elementos metálicos é comum em escória de alumínio. Foi observado que elementos como magnésio, zinco e ferro podem estar presentes em escória de alumínio em pequenas quantidades. Isto deve-se principalmente à interferência dos elementos de liga presentes na matéria-prima das sobras retiradas durante a fusão e refusão de alumínio (Meshram, 2019). Geralmente, a escória de Al é uma mistura de óxido de Al, metais, cloreto, fluoreto, elementos de liga e sais do fundente, nitreto, carboneto, sulfetos e outras substâncias, que são o resultado de reações de Al fundido com outros elementos presentes no sistema de fusão (Ali e Yassen, 2018).

A escória produzida pela indústria de alumínio, apesar de descartada, contém alumínio na forma metálica, desde as frações maiores, até às menores frações onde ele se encontra dividamente fina (Petavratzki, 2007). Em termos de características, a escória branca, formada em processos primários, é clara e rica em alumínio metálico, enquanto a escória preta, proveniente da reciclagem, é mais escura e contém maior quantidade de sais e menos alumínio (Santos, 2013).

A composição química desta camada varia grandemente, pois depende basicamente da liga que está sendo produzida e da manipulação das matérias-primas necessárias para o processo, mas basicamente a escória é composta por: óxido de alumínio (25 a 30%), alumínio metálico (65 a

75%), carbeto de alumínio (2 e 3%), nitreto de alumínio (3 a 5%), óxido de ferro (0,5 a 2%) e óxido de silício (0,5 e 1,5%) (ABAL, 2007).

As partículas de escória tendem a formar grânulos quando o teor de alumínio metálico é superior a 53%. Por outro lado, quando esse teor é menor, é mais comum a formação de óxidos. (Manfredi *et al.*, 1997). Uma alternativa interessante para a recuperação é a moagem em moinhos de bolas e a separação por tamanho: as frações mais grossas (acima de 4 mm) são enviadas para refusão, enquanto as partículas menores são utilizadas, por exemplo, na produção de pó exotérmico e cimento (Tenório, 2001).

2.4. Mecanismos de formação da escória

A escória de alumínio é um mal inevitável nos processos de fundição de alumínio, e ocorre devido à oxidação do metal líquido, à presença de filme de óxidos presente no lingote/retalhos, movimentação e transporte do metal líquido, conglomerado de partículas de óxidos, interface aglomerada de alumínio metálico, oxidação do alumínio disperso. Estes mecanismos são ilustrados na **Figura 1**:

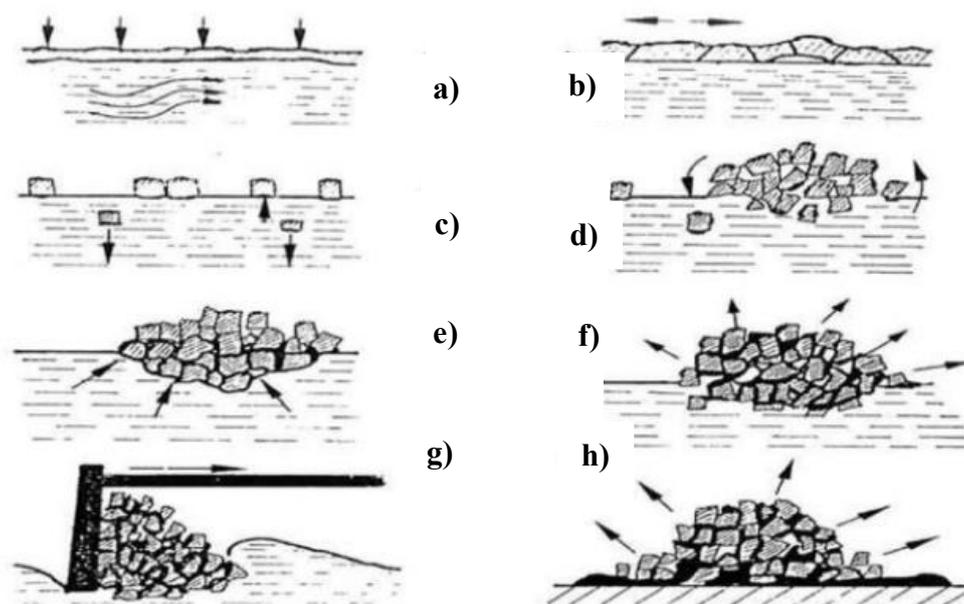


Figura 1: Formação da escória por oxidação e arraste mecânico de alumínio líquido Fonte: Santos (2013). **a)** Oxidação do metal líquido; **b)** Filme de óxido inerente ao lingote/retalhos; **c)** Movimentação e transporte do metal líquido; **d)** Conglomerado de partículas de óxido; **e)** Interface aglomerada de alumínio metálico; **f)** Oxidação do alumínio disperso; **g)** Desnatação de escória da superfície de banho a derreter; **h)** O alumínio metálico escorre e acompanha a oxidação de sólido durante a formação da escória.

2.4.1. Oxidação do metal líquido

A oxidação ocorre logo após a fusão do material, que forma uma camada delgada de óxido de alumínio (Al_2O_3), esta oxidação é gerada pela reacção do metal líquido com o oxigénio oriundo do vapor d'água e da humidade presente no ambiente. A camada formada é directamente proporcional à temperatura do banho e temperaturas mais elevadas resultam em camadas de óxidos mais espessas. A **Figura 2** apresenta o efeito da temperatura e do tempo à acção oxidante na camada de escória formada no forno. Para ligas puras Al 99,5% e liga com 3% de Mg, nota-se a influência da temperatura do metal na camada de escória nas temperaturas de 700°C e 800°C, comprovando que as temperaturas acima de 700°C são determinantes em termos de geração de escória. A curva da liga com 3% de Mg mostra que realmente ligas de Mg apresentam uma formação de camada de óxido superior à liga 99,5% de Al (Santos, 2013).

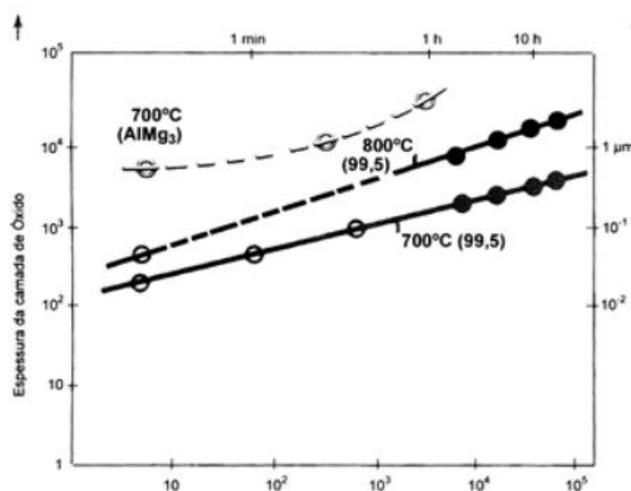


Figura 2: Influência do tempo e da temperatura na oxidação do alumínio Fonte: Santos (2013).

2.4.2. Filme de oxidação do lingote/retalho

O lingote, retalho ou sucata de alumínio, mesmo livre de contaminação, possui uma camada de óxido na sua superfície e que se incorpora a escória, após a fusão. A geração de escória por esse método é directamente proporcional a relação área dividida pelo peso, ou seja, quanto mais fino o material, maior será a participação da percentagem de óxido no seu peso (ABAL, 2007).

2.4.3. Transporte do metal líquido

Esse é o mais importante factor no mecanismo de formação de escória e o seu entendimento é fundamental para atenuar a geração de escória. A ruptura da camada (filme) de escória formada na superfície do metal líquido expõe novamente o metal às condições do ambiente (humidade),

proporcionando nova oxidação do metal aumentando assim a quantidade de escória em várias fases do processo e quando o metal está no estado líquido, esse distúrbio do metal pode ocorrer dependendo da forma como o metal é despejado dentro do forno, ocorrem distúrbios e formação de escória por cascata conforme observado no esquema da **Figura 3** (Santos, 2013).

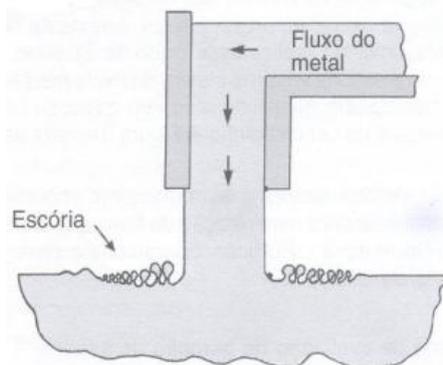


Figura 3: Formação de escória por cascata Fonte: Santos (2013).

2.5. Pré – processamento de resíduos da escória de alumínio

- **Etapas essenciais para sua reciclagem**

As etapas iniciais essenciais para o pré-processamento da escória de alumínio são: arrefecer a escória quente desnatada até a temperatura ambiente, enquanto se tritura, reduz-se o tamanho da partícula da escória fria. A libertação do alumínio metálico da escória quente obtida depois da escumação é possível se alguma agitação mecânica for fornecida. Os resíduos sólidos obtidos posteriormente podem ser triturados, moídos e classificados, este processo provocará uma separação mais precisa do alumínio metálico da escória em pó. Entre 30 à 50% do alumínio metálico fica presa na escória, mesmo após as operações mecânicas iniciais e separação física (Kevorkijan, 2002; Lorber e Antrekowitsch, 2010).

Para arrefecer a escória quente, são empregues recipientes de escória especiais e capelas de arrefecimento. O arrefecimento da escória é realizado para diminuir a formação de óxido na escória. Quando a escória quente (que contém quantidades consideráveis de alumínio metálico) chega directamente em contacto com a atmosfera, a maior parte do alumínio é oxidada. Isto é uma perda de valores metálicos que podem ser efectivamente extraídos da escória (Meshram, 2019).

A redução no tamanho das partículas pela trituração da escória de alumínio residual expõe a heterogeneidade inerente claramente. Observa-se que com partículas maiores, a quantidade de o teor de alumínio metálico também aumenta, enquanto é menor nas partículas menores. Isto

se deve principalmente à maior viscosidade do alumínio metálico. Quando o conteúdo do óxido domina a composição da escória, a fratura frágil é evidente. Por outro lado, a fratura dúctil pode ser observada onde os aglomerados apresentam maior alumínio. Portanto, pode-se entender que com maior tamanho de partícula obtido após britagem, maior será o teor metálico e menor será a proporção de nitretos e carbonetos (Hiraki e Miki, 2014).

As partículas maiores (com maiores valores metálicos) podem ser usadas directamente para a extração de metal e as partículas mais finas podem ser posteriormente processadas para reciclar a escória completamente. Soluções aquosas quentes, cristalização, secagem e o tratamento com gases são outras operações de pré-processamento para tratar a escória de alumínio. A fracção residual sólida e de óxido metálico obtida após as operações de pré-processamento podem ser usados como matéria-prima para pavimentação de estradas, construção e componentes de argamassa (Gil e Korili, 2016; Hiraki e Miki, 2014).

2.5.1. Rota pirometalúrgica para reciclagem da escória de alumínio

Primeiramente, é necessário entender como a escória de alumínio surge durante a fusão e refusão de resíduos, sobras e lingotes de alumínio. Vários produtos químicos compostos como Al_2O_3 , Al_4C_3 e AlN formam-se devido às seguintes reacções que ocorrem (Gil, 2005):



Os investigadores tentaram avaliar criticamente a importância da reciclagem de todos os tipos de escória de alumínio e extrair o conteúdo metálico para trazer de volta o alumínio perdido às principais aplicações. Para isso, as rotas pirometalúrgicas foram escolhidas por muitas indústrias (Meshram, 2019).

A rota pirometalúrgica convencional compreende a utilização de fornos de sal para extração de alumínio, fornos rotativos de sal para escória branca enquanto a escória preta requer processos diferenciados (Hwang *et al.*, 2006). Durante as operações de fusão e refusão, a produção de alumínio a partir da escória de alumínio aumenta à medida que aumenta a quantidade de fluxos de sal adicionado para o refino (Reuter *et al.*, 2004). Outros sais de flúor como MgF_2 , CaF_2 também são utilizados e considerados eficientes na extração de alumínio.

São usados fluxos de sal com composição 45% em mol NaCl – 45% em mol KCl – 10% em mol de AlCl₃ e 35% em mol de NaCl – 35% em mol de KCl – 30% em mol de AlCl₃ (Hiraki *et al.*, 2014).

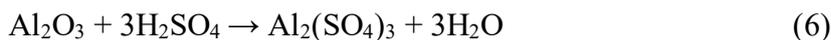
Por exemplo, Wang, (2008) demonstrou que a recuperação de alumínio pode variar entre 55% e 83%, dependendo da origem da escória e da quantidade de sais usados. Embora eficaz, a rota pirometalúrgica apresenta desafios ambientais e de custo devido ao uso intensivo de sais, o que, exige um balanceamento criterioso entre eficiência e sustentabilidade.

2.5.2. Rota hidrometalúrgica para reciclagem da escória de alumínio

Além dos métodos térmicos, a escória de alumínio também pode ser tratada hidrometalúrgicamente, ou seja, através da lixiviação com ácidos ou bases. Apesar de não permitir a recuperação directa do alumínio metálico, essa abordagem converte o alumínio contido na escória em compostos de valor comercial, como a alumina e outros produtos valiosos, trazendo assim o alumínio de volta ao ciclo do material (Meshram, 2019).

Como o alumínio tem natureza anfotérica, ele pode reagir com ácidos e bases. A tendência de reacção do alumínio com ácidos e bases, representa a extracção global de alumínio da escória, além dos parâmetros experimentais que regem a operação de lixiviação. Foi visto que a lixiviação do alumínio é possível em concentrações relativamente altas de ácido sulfúrico (Meshram, 2019).

Quase 85% da alumina foram recuperadas da escória de alumínio usando ácido sulfúrico, lixiviação com pó fino de escória de alumínio com tamanho de 2-5 nm (Dash *et al.*, 2008). A lavagem de escória fina melhora a operação de lixiviação, a eficiência chegando a 95%, após a retirada dos sais da escória. Em altas concentrações de ácido, foram relatadas cerca de 96% de extracção de alumínio. Quando a escória de alumínio reage com o ácido sulfúrico, ocorrem as seguintes reacções (Garrett, 1982):



Assim como o ácido sulfúrico, a solução de ácido clorídrico também auxilia na extracção de alumina da escória de alumínio de pó fino. O ácido clorídrico também se mostra eficiente na extracção de alumínio, permitindo a recuperação de uma parte significativa do metal (Sarker *et al.*, 2015).

A lixiviação alcalina é realizada principalmente com hidróxido de sódio. A geração de aluminato ocorre quando soluções alcalinas são usadas. Quando o hidróxido de sódio é usado, forma-se aluminato de sódio. Essa lixiviação resultar ainda na síntese de vários produtos importantes e valiosos. A literatura aponta taxas de extracção de até 57% para o alumínio residual e altas recuperações de sódio e potássio da escória preta, cerca de 80% e 85% (Tsakiridis *et al.*, 2013).

2.6. Factores que influenciam a extracção de alumínio da escória

- **Composição química da escória**

A composição química da escória de alumínio é um dos factores mais significativos que influenciam a recuperação do alumínio. A escória normalmente consiste em óxido de alumínio (Al_2O_3), óxido de cálcio (CaO), óxido de magnésio (MgO) e compostos de flúor como fluoreto de cálcio (CaF_2). O processo de recuperação de alumínio é mais eficiente quando a escória contém uma percentagem maior de óxido de alumínio, pois isso contribui directamente para o rendimento de alumínio. A presença de óxidos básicos como cálcio e magnésio pode complicar a recuperação porque esses óxidos tendem a formar compostos estáveis com o alumínio, dificultando a separação (Ali, 2019).

- **Temperatura e condições de fusão**

A temperatura na qual ocorre a recuperação de alumínio desempenha um papel crucial na solubilidade do alumínio na escória. Temperaturas elevadas reduzem a viscosidade da escória e aumentam a mobilidade dos iões de alumínio, facilitando a extracção do alumínio. No entanto, temperaturas excessivamente altas podem resultar em ineficiência energética e perda potencial de componentes voláteis como o flúor. Temperaturas na faixa de 900–1200°C são comumente usadas para recuperação efectiva de alumínio. Nessas temperaturas, o alumínio torna-se mais facilmente redutível, e outros componentes da escória podem ser separados selectivamente (Li, 2021).

- **Agentes de redução e agentes fundentes**

Agentes de redução como carbono (C), sódio (Na) e magnésio (Mg) são usados para reduzir óxidos de alumínio na escória para alumínio metálico. A escolha do agente de redução afecta a eficiência do processo de redução. O carbono, por exemplo, pode reduzir o óxido de alumínio para metal de alumínio, mas também gera CO_2 , o que pode ser ambientalmente indesejável.

Sódio e magnésio, por outro lado, podem reduzir óxidos de alumínio de forma mais selectiva, mas podem ter custos mais altos e desafios operacionais (Zhang, 2020).

Agentes fundentes como carbonato de sódio (Na_2CO_3) ou carbonato de cálcio (CaCO_3) são comumente usados para diminuir o ponto de fusão da escória e melhorar a sua fluidez, o que ajuda na melhor separação do alumínio de outros componentes da escória. O uso de agentes fundentes apropriados reduz a viscosidade da escória e auxilia na separação do alumínio metálico de impurezas não metálicas (Zhang, 2020).

- **Métodos de separação mecânica**

Técnicas de separação mecânica, como flotação, peneiramento e separação magnética, são comumente aplicadas para recuperar alumínio da escória. Esses métodos são frequentemente usados após a etapa de redução para separar fisicamente o alumínio metálico dos componentes não metálicos da escória. A separação magnética é particularmente eficaz quando o alumínio foi reduzido a um estado metálico, pois o alumínio metálico pode ser distinguido de outros metais não ferrosos ou partículas de escória. A flotação, usando bolhas de ar e surfactantes, pode ser usada para separar selectivamente o alumínio da escória com base nas diferenças nas propriedades da superfície (Deng, 2022).

- **Pré-tratamento da escória**

O pré-tratamento da escória é uma etapa importante para aumentar a acessibilidade do alumínio para extracção. Técnicas como moagem podem quebrar a matriz de escória e expor mais partículas de alumínio, tornando-as mais fáceis de recuperar durante os processos de extracção subsequentes. Além disso, métodos de lixiviação de alta pressão, incluindo soluções ácidas e alcalinas, podem ser aplicados para dissolver o alumínio da escória. Esses métodos são particularmente úteis quando o alumínio está presente em formas complexas, como silicatos de alumínio ou outros compostos refractários (Nakamura, 2021).

2.7. Geração de produtos valiosos a partir da escória de alumínio

Um novo horizonte de reciclagem da escória tem sido explorado por diversos pesquisadores da área. No cenário actual, o principal objectivo é reciclar completamente a escória e produzir valiosos compostos químicos. A síntese de zeólites, materiais refractários, compósitos, importantes produtos químicos industriais e outros produtos provenientes da escória de alumínio tem sido o foco dos pesquisadores (Meshram, 2019).

2.8. Impactos ambientais da escória de alumínio

A levar em consideração a grande quantidade de escória de alumínio produzida em todo o mundo, é muito importante desenvolver métodos de reciclagem adequados para combater este problema. É uma verdade amarga que actualmente, em muitos países, métodos de reciclagem adequados não foram desenvolvidos. Com isso, a escória de alumínio gerada nas indústrias é transportada, afastada e depositada em aterro. Compreender o facto de que a deposição em aterro nunca é uma alternativa para a reciclagem de escórias é muito necessária (Meshram, 2019).

Quando esses resíduos industriais perigosos são depositados em aterro, o solo ao redor da fossa depositada degrada-se e consome recursos terrestres, que são totalmente escassos. A tendência de lixiviação da escória de alumínio quando entra em contacto com as águas subterrâneas é explicada por muitos investigadores. É bem entendido que se a escória permanecer em contacto com o solo e a água, produzirá gases nocivos como amónia e hidrogénio e também pode poluir os recursos hídricos e a atmosfera (Peng *et al.*, 2013). O pH da água pode mudar e no solo a contaminação também é possível, devido à lixiviação de metais pesados da escória e outros produtos residuais (Peng *et al.*, 2013). Em contacto com a água da chuva, podem reagir emanando gases inflamáveis ou tóxicos, como metano e amónia, ou podem tornar-se solúveis, infiltrando-se no solo e chegando finalmente aos lençóis freáticos; portanto, são considerados perigosos para o meio ambiente (Teodorescu *et al.*, 2013).

2.9. Lixiviação

A lixiviação consiste na extração do constituinte solúvel de um sólido, que apresenta em sua composição o metal ou metais de interesse. Essa extração ocorre através do contacto desse sólido com uma fase aquosa, que contém ácidos, bases ou agentes complexantes, que são os agentes lixiviantes em diferentes condições. É importante salientar que a escolha do agente lixiviante vai depender principalmente, da matriz a ser submetida à lixiviação, solubilidade da espécie de interesse, relação custo/benefício, além de factores ambientais. Uma possível recuperação do reagente também constitui um critério importante na escolha (Morais *et al.*, 2014).

Ainda segundo Morais *et al.*, (2014), existe a possibilidade de os agentes lixiviantes serem utilizados de maneira isolada ou em combinação com agentes oxidantes. Poucas vezes esses materiais são utilizados em combinação com agentes redutores. Os agentes oxidantes utilizados comumente são oxigénio do ar, peróxido de hidrogénio (H_2O_2), dióxido de manganés (MnO_2),

nitrito de sódio (NaNO_2) e clorato de sódio (NaClO_3). Já os agentes redutores mais empregados são catiões ferrosos (Fe (II)) e dióxido de enxofre (SO_2).

Os principais objectivos da lixiviação na mineração são: dissolução selectiva de metais de interesse presentes em minérios e a recuperação de metais disponíveis (Zanbak, 2012). De acordo com Ciminelli (2007), as operações de lixiviação podem ser classificadas em dois grandes grupos: leito estático e tanques agitados.

2.9.1. Lixiviação em leito estático

A lixiviação em leito estático pode ser dividida em lixiviação no local, pilhas (rejeito, estéril ou até mesmo minério) e tanques estáticos. Na lixiviação no local, o material não é retirado do local onde se formou geologicamente. Para tanto, o minério contendo o metal de interesse é desprendido da matriz rochosa através de uma solução especificamente preparada, que percola o depósito e extrai o minério em uma solução líquida (Magalhães, 2009).

2.9.2. Lixiviação em tanques agitados

A lixiviação em tanques agitados pode ser dividida em tanques abertos ou sob pressão. A diferença mais significativa é no sistema de agitação, enquanto um é realizado de forma mecânica o outro utiliza o ar. No método de lixiviação em tanque aberto, o agente lixiviante e o material previamente moído são adicionados em um tanque com o mecanismo de agitação. Essa agitação favorece a cinética das reacções e evita a sedimentação do material. A lixiviação em tanques agitados é bastante utilizada para minérios de alto teor, com recuperação na ordem de 90%. Porém, esse método apresenta custos maiores de beneficiamento, devido a factores como preço dos equipamentos, custos de operação, necessidade de moagem, lavagem e separação sólido/líquido (Unda, 2016). A lixiviação em tanques agitados sob pressão é uma técnica em que minerais moídos ou concentrados de flotação são tratados quimicamente em reactores (autoclaves) em condições de alta pressão e temperatura para extracção de sais de metal do minério. Além disso, permite o uso de reagentes gasosos ou altamente voláteis em temperaturas elevadas, acelerando ainda mais a cinética do processo (Zanbak, 2012).

2.9.3. Factores que influenciam a velocidade de lixiviação

- **Dimensão da partícula do sólido**

A dimensão da partícula influencia a velocidade de extracção de diversas maneiras. Quanto menor for a partícula, maior é a área de interface entre o sólido e o líquido e menor será a

distância através da qual o solvente tem de difundir-se no interior do sólido, portanto maior será a velocidade de transferência de matéria durante a lixiviação. Por outro lado, a superfície pode não ser usada tão eficientemente com um material tão fino, caso a circulação do líquido seja impedida, e a separação das partículas do líquido e o escoamento do resíduo sólido tornam-se mais difíceis (Coulson e Richardson, 1968).

- **Concentração do Agente Lixivante**

O agente lixivante deve ser um bom solvente selectivo e de baixa densidade de forma que sua circulação no meio seja a mais livre possível e de fácil homogeneização (Coulson e Richardson, 1968). Concentrações mais elevadas do agente lixivante geralmente aumentam a velocidade de lixiviação, mas também podem aumentar os custos operacionais e os impactos ambientais (Gupta e Mukherjee, 1990). Há um limite em que um aumento adicional na concentração não resulta em um aumento significativo na taxa de lixiviação devido à saturação da reacção (Gupta e Mukherjee, 1990).

- **Temperatura**

A temperatura é um parâmetro que predomina no aumento da solubilidade da substância lixiviada e na velocidade de lixiviação (Coulson e Richardson, 1968). Aumentar a temperatura geralmente acelera as reacções químicas, diminuindo o tempo necessário para a lixiviação. No entanto, o aumento da temperatura pode levar à decomposição de reagentes ou à formação de subprodutos indesejados. Em temperaturas mais elevadas, as propriedades físicas do agente lixivante, como viscosidade e densidade, também podem ser afectadas, influenciando a difusão dos iões (Free, 2013).

- **Agitação do Fluido**

A agitação do solvente é importante, porque aumenta a difusão turbilhonar e conseqüentemente a transferência de substância da superfície da partícula para o meio da solução. Além disso, a agitação de suspensões de partículas finas evita a sedimentação e permite uma utilização mais eficiente da superfície interfacial (Coulson e Richardson, 1968). Sistemas de agitação mecânica ou aeração podem aumentar a eficiência de lixiviação. O fluxo contínuo de solução pode ser necessário para evitar a saturação da lixiviação e a precipitação de produtos indesejáveis (King, 2002).

- **Tempo de Lixiviação**

O tempo é uma variável fundamental para garantir a eficiência do processo de lixiviação. Para processos económicos, é necessário otimizar o tempo de contacto entre o agente lixiviante e o minério. Lixiviações rápidas são preferíveis para melhorar a produtividade, no entanto lixiviações muito curtas podem resultar em recuperação incompleta do metal. Lixiviações mais longas podem ser necessárias para minerais refractários ou de difícil acesso (Peters e Muhammed, 1987).

3. PARTE EXPERIMENTAL

Neste capítulo descreve-se os procedimentos laboratoriais, bem como os métodos, materiais e equipamentos usados para a realização do trabalho final.

3.1. Descrição das principais operações unitárias do processo de produção de barras de alumínio até à produção da escória

De acordo com as divisões territoriais de Moçambique, a Midal Cables situa-se na localidade de Beleluane, posto administrativo da Matola Rio, distrito de Boane, província de Maputo, zona franca do Parque Industrial de Beluluane. A empresa Midal Cables, foi construída em uma área de 11 hectares de terra, sendo a área coberta de 12.000 metros quadrados, com capacidade instalada máxima de produtos na ordem das 50.000 toneladas de cabos de alumínio por ano, foi implantada em Moçambique em meados de 2014, tendo iniciado a sua produção em Dezembro do mesmo ano. A vila sede do distrito está a 30 km da cidade de Maputo, com uma densidade populacional de 101 hab/km², conforme ilustrado na **Figura 4**.

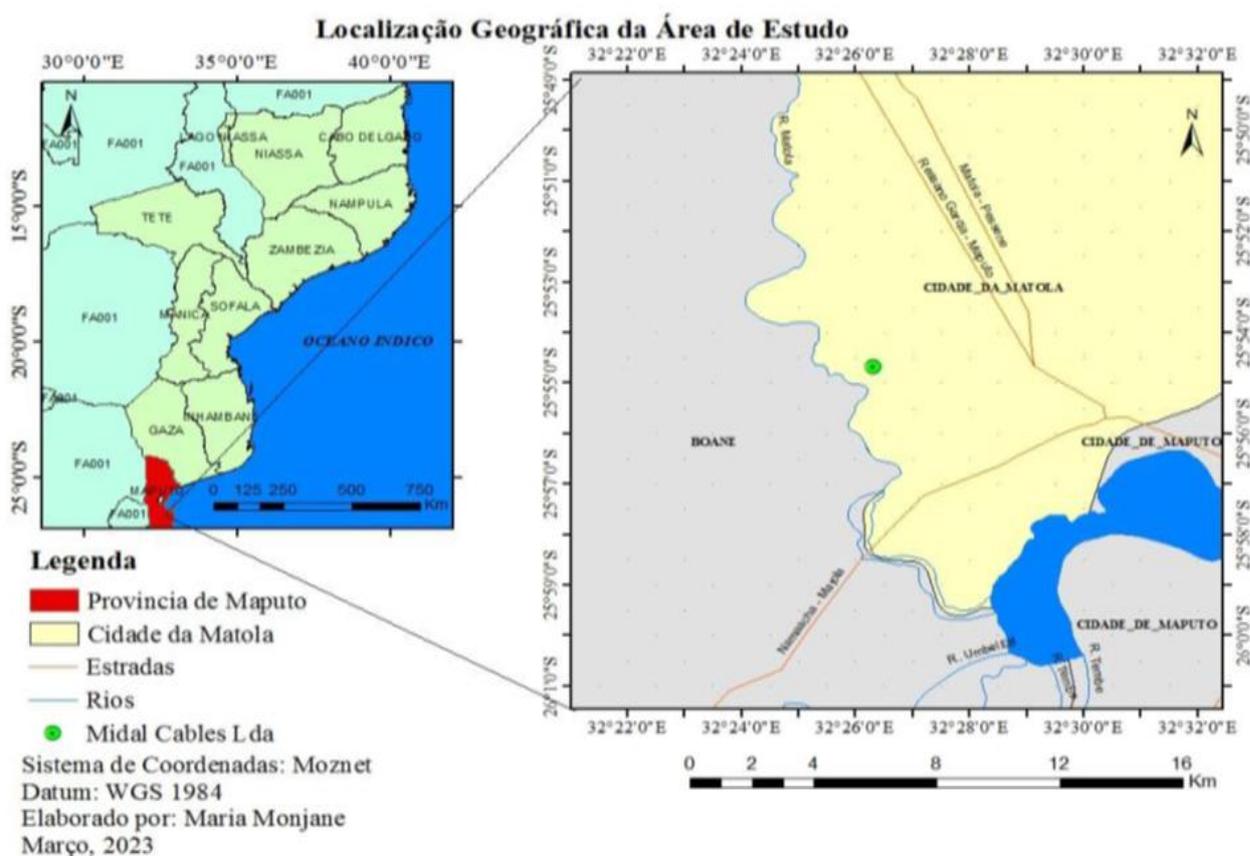


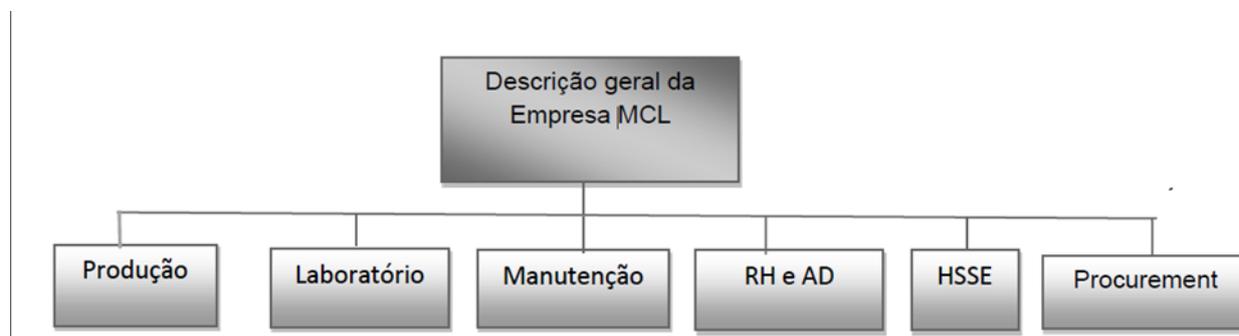
Figura 4: Localização geográfica da área de estudo. Fonte: Monjan e Suarez (2024).

- **MIDAL CABLES Lda**

A MIDAL CABLES iniciou as suas operações no final de 2014, com a produção comercial começando em 2015. Como fornecedora global, a empresa possui contratos de fornecimento preferencial garantidos com clientes na Europa, África do Sul e Oriental, Ásia e EUA.

A capacidade de produção da MIDAL CABLES é de 50.000 toneladas/ano para hastes, 24.000 toneladas/ano para condutores, e uma capacidade diária de 100 córregos. A empresa tem experiência em linhas de transmissão de até 400 kV em todo o mundo.

Com uma equipe de 300 funcionários distribuídos em vários sectores (conforme mostrado no Fluxograma), a MIDAL CABLES conta com escritórios, refeitório, casas de banho, estacionamento e armazéns para produtos acabados e matéria-prima. A empresa possui 20 veículos dedicados ao transporte de materiais, além de uma área designada para a circulação de empilhadeiras.



Fluxograma 1: Estrutura administrativa da MIDAL CABLES Lda.

O sector de produção da MIDAL CABLES está dividido em dois segmentos: fundição (*casting*) e trefilação (*stranding*). Este sector conta com 50 trabalhadores distribuídos em turnos. O foco do estudo está na área de fundição, que possui 28 funcionários. Esses funcionários são distribuídos em quatro turnos de trabalho, e cada turno é composto por 7 elementos.

Linha 1 (fundição), Produção de varões de alumínio.

As operações unitárias envolvidas no processo de produção dos cabos eléctricos são:

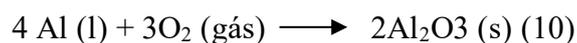
- **Refundição**

A matéria-prima utilizada na MIDAL CABLES é fornecida pela Empresa Mozal no estado líquido, com uma temperatura variando entre 800 até 900 °C. Antes de iniciar o processo de produção, a matéria-prima passa por um controle de qualidade, cujo objectivo é verificar a percentagem de alumínio admissível pela empresa na amostra. O material é transportado em

panelas metálicas (*ladle*), com diferentes pesos. Após o controle de qualidade, o material é carregado no forno primário, conforme mostrado na **Figura 5** (a). Este forno tem uma capacidade de 55 toneladas e desempenha duas funções principais: conservação da temperatura e refusão. A carga do material nesse forno é realizada com o auxílio de uma grua.

As reacções que provavelmente ocorrem nessa fase estão descritas nas equações (9 e 10), conforme abordado por Campos (2011).

Alumínio mais atmosfera:



- **Moldagem**

Posteriormente, a matéria-prima é transferida para o forno secundário, conforme representado na **Figura 5** (b). Nesse ponto, por meio das canaletas metálicas para condução de metal (*launders*), apresentados na **Figura 5** (c), são adicionados os fundentes, e inicia-se o processo de desgasificação utilizando nitrogénio atmosférico. A equação (11) representa a reacção entre o alumínio e o nitrogénio, conforme descrito por Shinzato (1999).



E, por sua vez, os nitratos formados reagem com a humidade do ambiente, gerando amónia, conforme indicado pela equação (12), de acordo com a abordagem de Gomes (2013).



Em seguida, o operador responsável pela transferência do metal em serviço colecta uma amostra para análise laboratorial, com o objectivo de verificar a composição química dos elementos presentes na amostra e a quantidade de massa dos fundentes a serem adicionados. Após a aprovação das análises laboratoriais, o metal é transferido para a roda de fundição (*casting wheel*) através das canaletas metálicas para condução de metal (*launders*). A roda de fundição (*casting wheel*), representado na **Figura 5** (d), é composto por dois moldes (*Tundash*). Esses moldes têm a função de receber o metal, rejeitar as impurezas e o metal frio. Além disso, o bico vertedor (*spout*) tem a finalidade de alimentar a roda (*wheel*), e nesse processo obtém-se a barra de alumínio.

- **Auto-cisalhamento**

A barra obtida no processo anterior é conduzida através do tesoura principal (*main shear*), como ilustrado na **Figura 5** (e), onde passa pelo processo de corte. Esse estágio envolve a utilização da tesoura principal (*main shear*) para realizar o corte da barra de alumínio de acordo com as especificações desejadas.

- **Tratamento térmico (Homogeneização)**

A barra obtida na roda de Fundição (*casting wheel*) passa por um processo de arrefecimento com água, conforme representado na **Figura 5** (f). Posteriormente, é encaminhada para a máquina de indução de calor (*induction heater*), onde ocorre o aquecimento com o objectivo de preparar a barra para o próximo estágio. É importante observar que esse processo ocorre apenas quando há produção de liga metálica (*alloy*). Para outros tipos de produção, a barra passa por um processo de arrefecimento, como mostrado na **Figura 5** (g).

- **Extrusão**

O processo de extrusão é dividido em duas etapas: extrusão primária e secundária. Na extrusão primária, a barra de alumínio passa por 4 estações de laminação (*stands*) de diferentes diâmetros com o objectivo de reduzir o diâmetro da barra obtida no processo anterior.

Para facilitar esse processo, a barra é resfriada por uma mistura de óleo e água (emulsão). Nesta etapa, a barra adquire um formato semiquadrado, com o diâmetro ainda não desejado. Em seguida, a barra segue para o processo de extrusão secundária, conforme representado na **Figura 5** (h). Nessa fase, a barra passa por 10 estações de laminação (*stands*), sofrendo redução de diâmetro e alteração do formato obtido na etapa anterior, até atingir o diâmetro exigido pelo cliente.

- **Têmpera**

Após a obtenção da barra desejada, ela passa pela máquina de Máquina de Resfriamento Rápido (*quenching*), onde é submetida a um resfriamento rápido com o objectivo de alcançar propriedades mecânicas adequadas e ideais para o uso. Em seguida, o varão é encaminhado para a sistema de enrolamento (*OTT*), onde é enrolado e transportado até o armazenamento. Posteriormente, o produto acabado é submetido a um controle de qualidade para verificar se atende às especificações do cliente. A Figura 5 e o Fluxograma 1 representam o processo produtivo para a obtenção dos varões de alumínio.



Figura 5: Principais equipamentos usados para obtenção do varão do alumínio. **a)** Panela metálica. **b)** Forno secundário. **c)** Caneletes metálicas. **d)** Roda de fundição. **e)** Tesoura principal. **f)** Roda de fundição. **g)** Máquina de indução de calor. **h)** Máquina de extrusão secundária.

Apresentação e descrição dos fornos de fundição do alumínio

Os resultados apresentados foram obtidos através da revisão documental dos manuais de operações e observação directa. A área do fundição (*casting*) é composta por 3 fornos respectivamente do HF1, TF1 e TF2. No presente relatório fez-se apenas a descrição dos HF1 e TF1.

- **Forno de espera (*Holding Furnace*) (HF1)**

O Forno de espera (HF1) é feito de construção muito pesada de acordo com a exigência de um forno de fusão de alumínio para uso em fundição pesada. É feita de chapas do tipo M.S pesadas

de qualidade comercial totalmente soldadas, construção de pelo menos 12 mm de espessura. A estrutura do tecto é feita de qualidade testada de 12 mm M.S, como ilustra a **Figura 6**.



Figura 6: Forno HF1.

Este forno é chamado de forno de espera e refusão que é utilizado para fundir o lingote sólido ou de alumínio e manter o alumínio fundido na temperatura desejada para que possa alimentar o sistema de produção contínua de fio-máquina. Tem a capacidade de 55 toneladas e apresenta 4 queimadores. Ele é projectado de tal forma que pode carregar uma grande quantidade de metal de uma só vez, que pode ser metal sólido ou metal fundido líquido. Outro ponto a ser considerado é o princípio de funcionamento conhecido como regenerativo dentro da fornalha para reaquecer o ar frio proveniente do soprador de ar de combustão.

Este forno é equipado com todos os instrumentos necessários para controlar o factor de gás e ar do sistema. O metal fundido será despejado no forno de fusão com a sua respectiva calha de carregamento por cadinho quente.

- **Forno basculante (*Tilting Furnace*) (TF1)**

O Forno basculante (TF1) é feito de construção muito pesada de acordo com a exigência de um forno de fusão de alumínio para uso em fundição pesada é feita de chapas do tipo M.S pesadas de qualidade comercial totalmente soldadas. A **Figura 7** ilustra de forma representativa o TF1.



Figura 7: Forno TF1.

Este forno é usado para manter e alimentar o alumínio fundido para a linha de fundição para a produção contínua de fio máquina. É um forno do tipo basculante completo com os respectivos acessórios para operar o forno e apresenta uma capacidade de 25 toneladas. É considerado forno de espera e está projectada de forma que se possa preparar o banho de liga e possui uma porta usada para escumação e limpeza do forno, o movimento da porta é controlado por cilindros hidráulicos.

- **Princípio de funcionamento dos fornos HF1 e TF'S**

Para iniciar o processo de combustão no HF1, é necessário a combinação de ar e gás natural. O ar passa por dois estágios, primário e secundário. O ar primário é capturado da atmosfera através dos sopradores e mistura-se com o gás natural nos queimadores em funcionamento. Estes queimadores operam de forma intercalada (2 a 2). O ar secundário é reaproveitado dos gases de exaustão, que é capturado pelos queimadores que não estão em funcionamento. Com o auxílio dos sopradores, o ar é arrefecido e, em seguida, depois de atingir a temperatura ideal, a carga é adicionada no forno.

Nos TF's (Tanques de Fusão), o processo inicia colocando os queimadores em funcionamento até que as paredes absorvam o calor. Após aproximadamente 3 horas com baixa chama, aumenta-se a pressão dos queimadores para obter a temperatura ideal para receber o metal.

- **Identificação do ponto e colecta das amostras**

Para o desenvolvimento do trabalho foi colectada a escória do alumínio na empresa MIDAL CABLES na cidade de Maputo. As amostras foram colectadas em dois fornos TF1 e TF2 como mostra a **Figura 8**.



Figura 8: Representação dos pontos de recolha, fornos TF1 e TF2. 1. Recolha da amostra no forno TF1, 2- recolha da amostra no forno TF2.

De seguida as amostras passaram por um arrefecimento até atingirem a temperatura ambiente e embaladas em caixa do tipo papelão e encaminhadas para o laboratório do Departamento de química da UEM.

3.2. Colheita das amostras de Escória de Alumínio na Empresa MIDAL CABLES Lda

A escória de alumínio empregue no presente estudo é proveniente dos fornos da fundição de rejeitados de alumínio (*serap*) da empresa Midal Cables. Após o processo de fundição, o metal prevalece no forno durante um intervalo de tempo, no qual ocorre a formação de uma camada fina na sua superfície enquanto está o seu estado líquido. Na sequência, o resíduo é sujeito ao processo de arrefecimento, o que permite a solidificação deste material em partículas com tamanhos diferenciáveis. No local de armazenamento, com recurso a uma pá, foram retiradas em pontos aleatórios, amostras deste material para homogeneizar visando a representatividade.

Terminado o processo de homogeneização, foram constituídas 3 amostras que foram embaladas em sacos plásticos e depositados em uma caixa forrada de plástico, para possibilitar o transporte seguro para o laboratório de química analítica, pertencente ao Departamento de Química, Faculdade de Ciências da Universidade Eduardo Mondlane. Na **Figura 9** que se segue apresenta-se uma ilustração da formação do resíduo de alumínio e área de armazenamento e colecta das amostras.

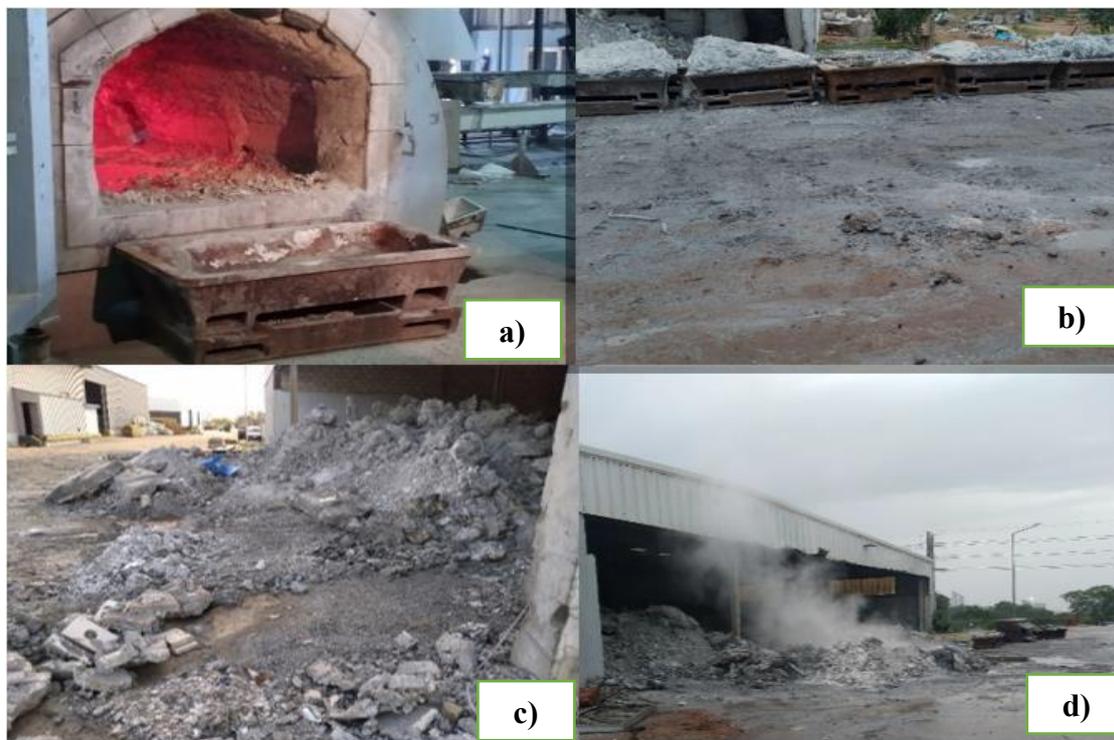


Figura 9: Retirada da escória do forno e armazenagem: **a)** Formação da escória no forno. **b)** Transporte da escória para o armazém. **c)** Armazenamento do resíduo de alumínio. **d)** Emissão de pó ao ambiente.

O resíduo passa por um processo de arrefecimento na temperatura ambiente, que faz com que o material endureça e se aglomere, formando blocos irregulares de dimensões e formatos heterogêneos (**Figura 10**). As amostras foram coletadas na localização 25°01'09.0" Sul-31°25'51.2" Leste da empresa Midal cables.



Figura 10: Local de colecta da amostra de escória.

3.3. Metodologia experimental

As amostras de escória foram coletadas na empresa Midal Cables. Todas as experiências e análises foram executadas no Laboratório Central do Departamento de Química da Faculdade de Ciências da Universidade Eduardo Mondlane (UEM). Na Tabela 1 descreve-se os principais materiais, reagentes e equipamentos utilizados na pesquisa.

Tabela 1: Materiais, reagentes e equipamentos utilizados.

Equipamentos	Reagentes
Balança analítica Denver Instrument XS-210 (precisão 0,01 g)	Ácido sulfúrico concentrado (H ₂ SO ₄ , 96%)
Mufla CARBOLITE GERO AAF 1100	Água destilada
Estufa OVEN, SERIES 2000	Álcool etílico a 70 %
Congelador	Peróxido de hidrogénio (H ₂ O ₂ , 35%)
Agitadores com placa de aquecimento (NAHITA, modelo 690-1)	
Espectrómetro de fluorescência de raios-X modelo (EDX-7000)	
Destilador de água BOECO WS 8000	
Moinho de bolas modelo (pneumatic clamp TS-250 MILL)	
Calorímetro de varredura diferencial (DSC) modelo TA SDT-Q600	
Materiais	
Provetas graduadas (5, 10, 15, 25 e 50 mL)	Cadinhos de porcelana
Espátulas	Papel de filtro; papel de alumínio
Filtros de fluoreto de polivinilideno (PVDF) 0,45 μ	Frascos de vidro; varetas; funis de vidro; crivos; Pedra magnética.
Erlenmeyer (200 e 250 mL)	Dessecador; almofariz com pistão;
Balões volumétricos (10, 25, 50 e 100 mL)	Copos Becker (50, 100, 200, 250, 600 e 1000 mL)
Pinças; Papel de rótulos; Garrafas plásticas;	Vidro de relógio (NORMAX); esguicho;

3.3.1. Análises laboratorias

I. Moagem

A amostra de escória foi triturada em um moinho de bolas modelo Pneumatic Clamp TS-250 MILL por 25 segundos, até a obtenção de um pó fino. Foram utilizados 50 g de escória por ensaio, inseridos em um jarro com volume de 250 mL. No interior do moinho, foram adicionadas 3 bolas de aço inoxidável com 20 mm de diâmetro. O processo visou a homogeneização e redução granulométrica da amostra. Após a moagem, o pó foi coletado e armazenado para análises posteriores.

II. Peneiração das amostras

Com a ajuda de dois crivos (10 e 16 mesh) fez-se a peneiração das amostras moídas, na qual as partículas maiores ficaram retidas nos crivos e as menores passaram pela malha. As porções de menor tamanho seguiram para as análises posteriores.

3.3.2. Processo de lixiviação da escória usando ácido sulfúrico

Inicialmente foram colocados 45 mL de solução do ácido sulfúrico de concentração 20%, 30% e 40%, nos copos de precipitação de 500 mL em aquecimento a 95 °C na manta de aquecimento, com agitação de 330 rpm. De seguida, foram adicionados vagorosamente cerca de 56 gramas de escória com agitação e temperatura constante, reagindo sob condições variáveis. Foram realizadas em três replicas, com finalidade de estudar os seguintes parâmetros: concentração do ácido sulfúrico (20%, 30% e 40%) e o tempo de lixiviação (30 min, 60 min, 90 min, 120 min e 150 min). A **Figura 11** ilustra a preparação das soluções do ácido sulfúrico.

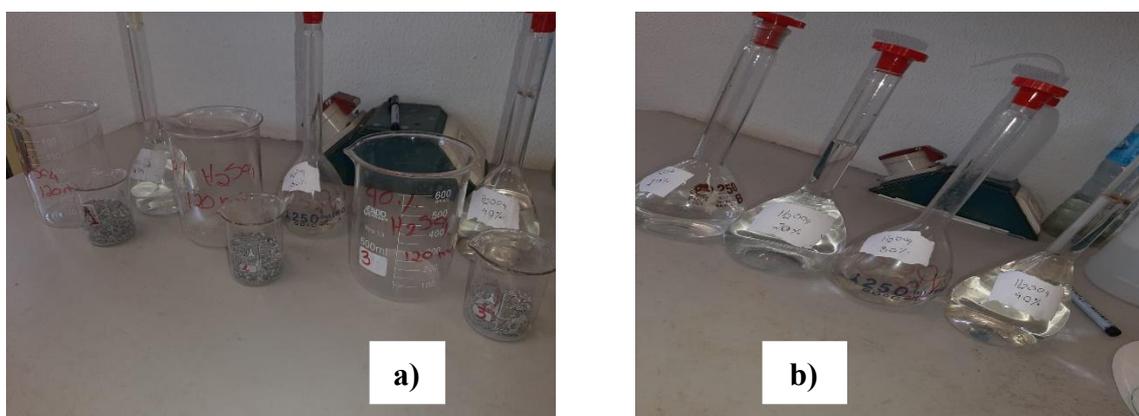


Figura 11: Processo de preparação das soluções. **a)** Preparação dos materiais e escórias. **b)** Soluções de ácido sulfúrico preparadas.

Após esta etapa, fez-se a decantação da solução e sedimentação dos sólidos, de seguida, fez-se a filtração com auxílio de um funil e papel de filtro de baixa porosidade para separar os sólidos em suspensão dos filtrados ricos em sulfatos de alumínio, componente de interesse do presente trabalho. Após as filtrações, obtiveram-se os filtrados, os quais foram levados à evaporação para eliminação do excesso de água. Após os arrefecimentos à temperatura ambiente, para a formação de cristais de sulfato de alumínio, os cristais ainda húmidos foram levados a um dessecador, contendo sílica gel como agente dessecante, e deixou-se secar por um período de 48 horas, onde se obteve as características de cristais secos. Com auxílio de um pistilo e almofariz, os cristais foram reduzidos a pó colocados em cadinhos e levados a uma estufa a $45 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$, para reduzir a humidade e posteriormente, foram analisados por XRF, e TGA para os produtos de 20% e 40% de teor do ácido na extracção, com 120 min de tempo de lixiviação. A **Figura 12** ilustra todo processo de lixiviação da escória usando ácido sulfúrico.

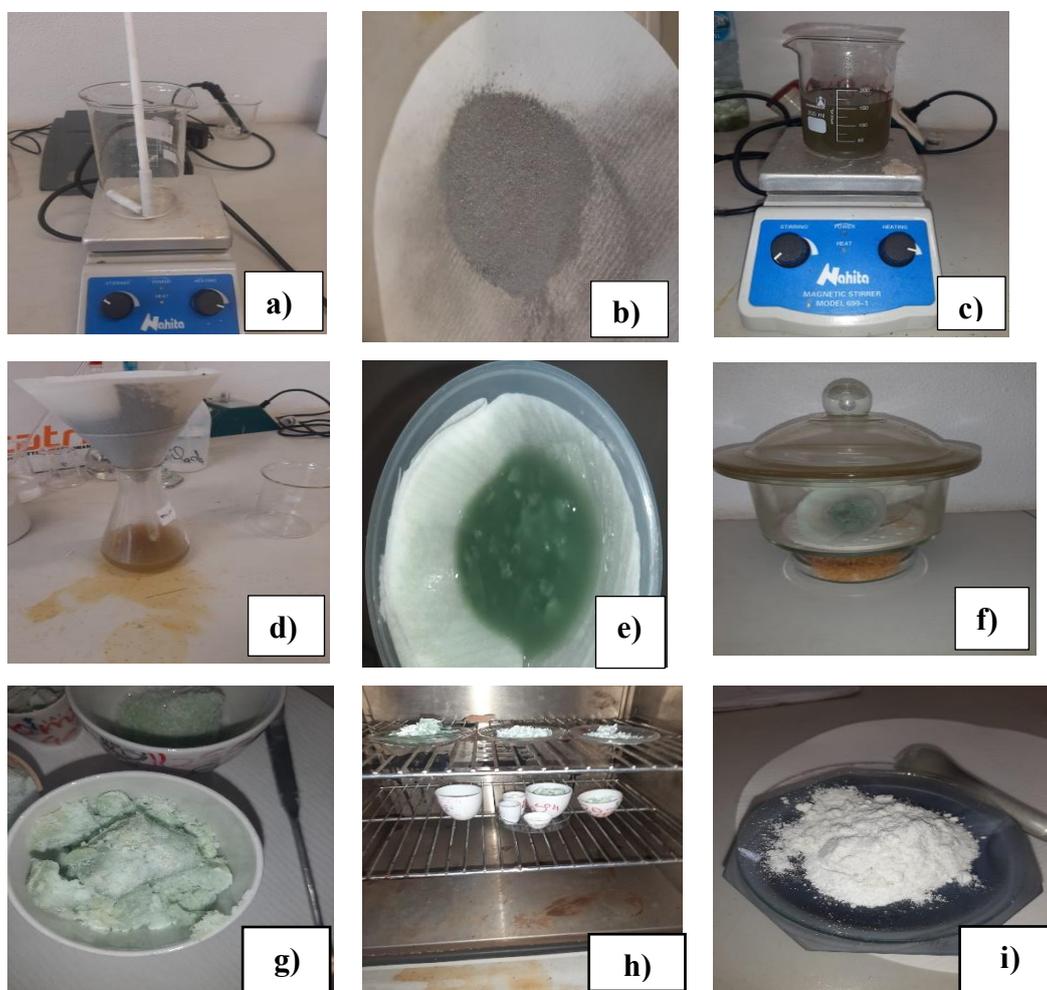


Figura 12: Processo de lixiviação da escória usando ácido sulfúrico. **a)** Copos de precipitação na manta de aquecimento. **b)** Escórias secas em pó. **c)** Escórias adicionadas na solução do ácido sulfúrico. **d)**

Filtração da escória dissolvida no ácido sulfúrico. e) Os sólidos em suspensão dos filtrados ricos em sulfatos de alumínio. f) Secagem dos cristais no dessecador. g) Após a secagem no dessecador. h) Secagem dos sulfatos de alumínio na estufa. i) Após a secagem na estufa e preparação para análises de XRF e TGA.

3.3.3. Procedimento para Análise por XRF

A escória de alumínio e os produtos da lixiviação foram caracterizados por fluorescência de raios-X utilizando o espectrômetro EDX-7000 (Shimadzu). As amostras foram secas, moídas, peneiradas e prensadas em pastilhas para análise. O equipamento operou com tensão de 15 a 50 kV, em atmosfera ambiente. A leitura foi feita em 100 segundos por ponto. Os dados obtidos permitiram identificar qualitativa e quantitativamente os elementos presentes.

3.3.4. Procedimento para Análise por TGA

O comportamento térmico dos produtos de lixiviação foi analisado por TGA usando o equipamento TA SDT-Q600. Cerca de 8 mg de cada amostra foi aquecida de 25 a 1000 °C, a uma taxa de 10 °C/min, em atmosfera de ar. A técnica TGA permitiu avaliar perdas de massa associadas a processos térmicos. A análise DTG identificou etapas de decomposição, desidroxilação e oxidação. Os dados obtidos indicaram a estabilidade térmica e a decomposição dos materiais.

3.3.5. Determinação do rendimento da extração do alumínio na escória

A percentagem da extração de alumínio na escória foi calculada a partir das quantidades de alumínio extraído presente no sulfato de alumínio e da quantidade teórica do alumínio presente na escória, usando a equação seguinte:

$$\% \text{ Al extraído} = \frac{m \text{ Al extraído}}{m \text{ Al na escória}} \cdot 100 \quad (13)$$

onde:

m Al extraído é a massa do alumínio presente na quantidade do sulfato de alumínio (Tabelas 5-7),

m Al na escória é a massa teórica do alumínio presente na quantidade da escória (87,93%), e

% Al extraído é o rendimento da extração do alumínio (Jiménez *et al.*, 2022; Zhao *et al.*, 2013).

4. RESULTADOS, ANÁLISE E DISCUSSÃO

4.1. Caracterização química da escória

Os resultados da análise XRF que mostra a composição elementar da escória de alumínio estão apresentados na **Tabela 2**. Em relação à caracterização química da escória pelo método de fluorescência de raios-X (XRF), foi detectada a presença de alumínio como um dos elementos com a maior percentagem, equivalente a 87,93%. De entre os elementos em menores quantidades, destacam-se o Cloro (Cl) e Silício (Si) com 4,80% e 2,65% respectivamente. Elementos traços tais como Vanádio (V), Cálcio (Ca), Titânio (Ti), Ferro (Fe), Potássio (K), Crómio (Cr), Cobre (Cu), entre outros, também foram identificados.

A escória produzida pela MIDAL apresentou características de uma escória branca que é rica em alumínio, isto porque a escória branca geralmente contém mais de 70% de metal do alumínio (Kudyba *et al.*, 2021). A percentagem do alumínio na escória foi de cerca de 87,93%, o que indica que a extracção do alumínio a partir da escória é necessária para o reaproveitamento deste elemento metálico, o que é melhor que o descarte nos resíduos da escória para o meio ambiente.

Tabela 2: Resultados da análise XRF mostrando a composição elementar da escória de alumínio.

Elementos	Escória (%)
Ca	1,08%
Si	2,65%
Fe	0,60%
Al	87,93%
K	0,31%
Ti	0,93%
Mn	0,01%
Sr	0,01%
Cr	0,04%
Cu	0,04%
V	1,55%
Zr	0,03%
Zn	0,02%
Ir	0,01%
Cl	4,80%

4.2. Rendimento da extracção do alumínio

Nas **Tabelas 3 e 4** encontram-se apresentados os resultados da quantidade e rendimento da extracção do alumínio na forma de sulfato de alumínio. Em relação à quantidade obtida na extracção do alumínio, observou-se que, em 20% de ácido a quantidade variou entre 18,18 g e 33,09 g, em 30% de ácido entre 21,95 g e 38,11 g e em 40% do ácido a quantidade variou entre 23,94 g e 44,04 g.

Em relação ao rendimento da extracção do alumínio observou-se que, em 20% de ácido o rendimento variou entre 11,81% e 25,29%, em 30% de ácido o rendimento variou entre 18,52% e 30,00% g e em 40% do ácido o rendimento variou entre 20,71% e 33,95%. O rendimento máximo da extracção do alumínio foi obtido nas condições de 120 min e 40% de concentração do ácido com 33,95%.

Tabela 3: Sulfato de alumínio produzido nas diferentes condições de extracção de alumínio a partir da escória.

Variáveis para lixiviação da escória de alumínio				Massa do produto ($Al_2(SO_4)_3 \cdot xH_2O$)	Tempo de lixiviação				
Massa da Escória	Temperatura	Velocidade de agitação	[H ₂ SO ₄]		30 min	60 min	90 min	120min	150 min
56 g	95 °C	330 r.p.m	20%	18,18 g	23,08 g	29,01 g	33,09 g	18,93 g	
56 g	95 °C	330 r.p.m	30%	21,95 g	26,87 g	32,08 g	38,11 g	24,07 g	
56 g	95 °C	330 r.p.m	40%	23,94 g	28,48 g	37,03 g	44,04 g	29,70 g	

Tabela 4: Rendimentos da extracção do alumínio.

	% [H ₂ SO ₄]	Tempo de lixiviação				
		30 min	60 min	90 min	120 min	150 min
% Rendimento	20%	11,81%	17,54%	23,90%	25,29%	14,13%
	30%	18,52%	20,63%	26,05%	30,00%	18,66%
	40%	20,71%	24,92%	29,21%	33,95%	22,92%

4.3. Caracterização química dos produtos da lixiviação

A composição química da maioria dos elementos que compõe o sulfato de alumínio foi determinada por XRF. Os valores são expressos em % do peso e apresentados nas **Tabela 5**, **Tabela 6** e **Tabela 7**. Nos resultados é possível observar que os cristais do sulfato de alumínio são constituídos principalmente por enxofre (S) e alumínio (Al) para cada tempo e concentração da lixiviação ácida prevista. Os resultados altos do enxofre (S) foram determinados por XRF devido à contribuição de enxofre da matriz de ácido sulfúrico para formação do sulfato de alumínio (Pepper *et al.*, 2021).

Para a lixiviação com 20% de H₂SO₄ a composição de Al variou entre 32,06% e 40,58%, com 30% de H₂SO₄ a composição de Al variou entre 37,79% e 41,56% e com 40% de H₂SO₄ a composição de Al variou entre 35,80% e 39,62%. A presença de impurezas como outros metais de Fe, Ca, Cu e Zn na composição do sulfato de alumínio que é devida a uma tendência de lixiviação com os ácidos fortes juntamente com o alumínio para a solução (Berry e Hemmings, 1987).

Tabela 5: Resultados da análise XRF mostrando a composição elementar das amostras dos CS-20%.

20% [H ₂ SO ₄] Elementos constituintes	Tempo de lixiviação (min)				
	30 min	60 min	90 min	120 min	150 min
S	41,24%	52,58%	49,59%	51,22%	54,02%
Al	32,06%	37,49%	40,58%	37,63%	36,19%
Si	2,14%	2,50%	2,15%	2,74%	3,37%
Fe	0,09%	0,18%	1,94%	0,44%	0,08%
Ca	23,12%	6,00%	1,65%	5,33%	6,25%
Cu	0,04%	0,05%	0,04%	0,04%	0,05%
Br	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Zn	0,01%	0,01%	0,04%	0,04%	0,01%

Tabela 6: Resultados da análise XRF mostrando a composição elementar das amostras dos CS-30%.

30% [H ₂ SO ₄] Elementos constituintes	Tempo de lixiviação (min)				
	30 min	60 min	90 min	120 min	150 min
S	47,74%	55,06%	47,73%	50,73%	53,63%
Al	41,56%	37,79%	40,02%	39,52%	38,21%
Si	2,14%	2,42%	2,33%	1,72%	3,29%
Fe	1,49%	0,91%	3,05%	1,95%	0,27%
Ca	2,37%	2,16%	1,77%	2,00%	3,73%
Cu	0,04%	0,04%	0,04%	0,05%	0,05%
<u>Br</u>	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Zn	0,04%	0,03%	0,10%	0,07%	0,01%

Tabela 7: Resultados da análise XRF mostrando a composição elementar das amostras dos CS-40%.

40% [H ₂ SO ₄] Elementos constituintes	Tempo de lixiviação (min)				
	30 min	60 min	90 min	120 min	150 min
S	45,02%	40,96%	52,53%	55,19%	57,11%
Al	35,80%	39,62%	38,83%	37,98%	38,02%
Si	2,05%	1,50%	2,55%	2,17%	2,54%
Fe	0,39%	1,14%	1,86%	0,63%	0,45%
Ca	4,02%	3,12%	1,36%	1,88%	0,65%
Cu	0,05%	0,04%	0,04%	0,04%	0,05%
<u>Br</u>	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Zn	0,02%	0,04%	0,06%	0,03%	0,02%

4.4. Efeito do tempo de lixiviação na extracção do alumínio

As Figuras 13-15 apresentam a influência do tempo de lixiviação no rendimento da extracção do alumínio. Para as percentagens de 20%, 30% e 40% de ácido, observou-se o aumento do rendimento quando se variou o tempo de 30 min a 120 min de lixiviação, tendo-se obtido 25,29%, 30,00% e 33,95% de rendimento máximo respectivamente e redução do rendimento quando o tempo passou de 120 min a 150 min, atingindo os valores de 14,13%, 18,66% e 22,92% respectivamente. O rendimento máximo da extracção do alumínio para 20%, 30% e 40% de ácido foi obtido com o tempo de 120 min, que está de acordo com os estudos de Jiménez *et al.* (2022), que apontam 120 min como o tempo óptimo para extracção máxima de alumínio pelo ácido sulfúrico.

Com o aumento do tempo até 120 min observou-se o aumento do rendimento, que pode ser devido ao facto do aumento do tempo de lixiviação permitir que o ácido reaja com mais partes reactivas da escória o que aumenta consequentemente o rendimento da extracção. A redução do rendimento da extracção após o alcance do tempo máximo pode ser explicada possivelmente pela dificuldade na manutenção do alumínio na forma de sulfato de alumínio causando a sua redissolução na solução e reduzindo o seu rendimento (Das *et al.*, 2007).

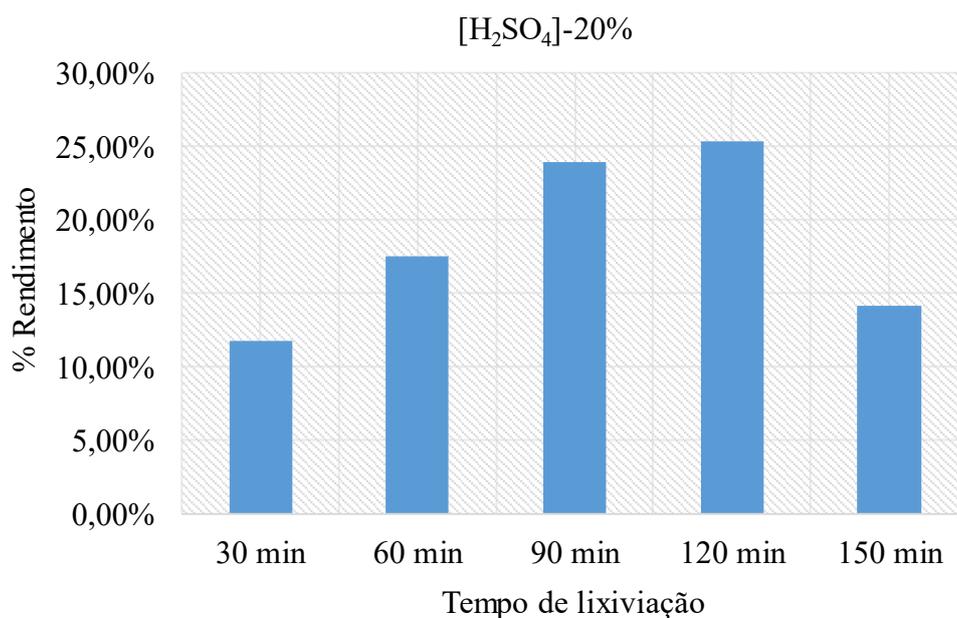


Figura 13: Rendimento da extracção em função do tempo de lixiviação para AC-20%.

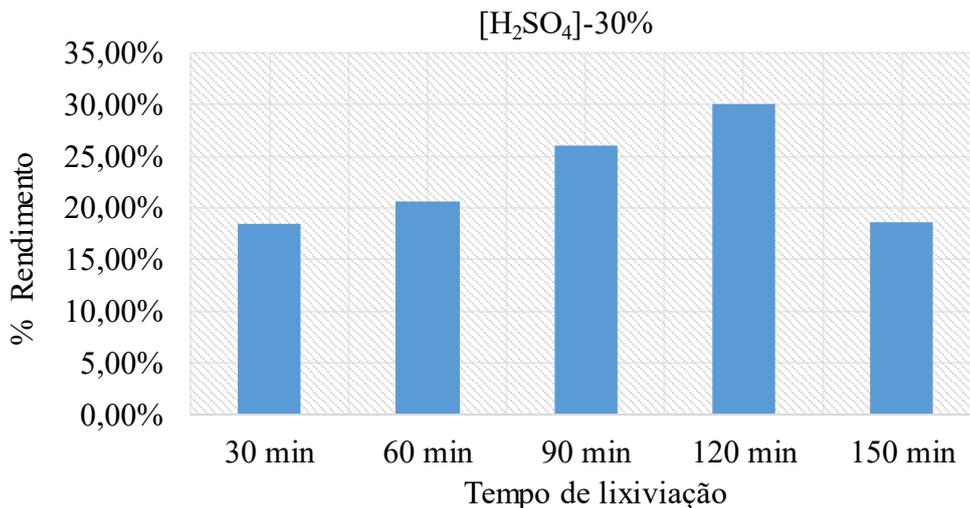


Figura 14: Rendimento da extracção em função do tempo de lixiviação para AC-30%.

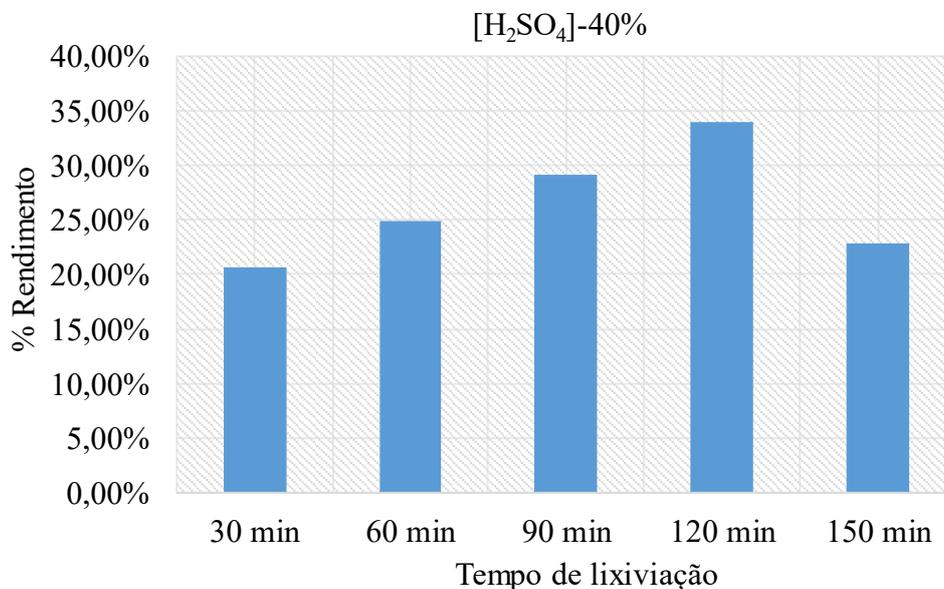


Figura 15: Rendimento da extracção em função do tempo de lixiviação para AC-40%.

4.5. Efeito da concentração de lixiviação na extracção do alumínio

A **Figura 16** apresenta a influência da concentração do ácido na extracção do alumínio na forma de sulfato de alumínio em diferentes tempos de lixiviação. Observou-se que, com um aumento na concentração do ácido produziu-se um aumento no rendimento da extracção do alumínio. Saindo da concentração de 20% para 30% e 30% para 40%, resulta num aumento do rendimento de Al contudo, o grande aumento ocorreu quando foi utilizada a concentração de 40% de ácido, que resultou num rendimento de 33,95%. Portanto, 40% de H₂SO₄ pode ser usado como concentração óptima para lixiviação ácida da escória de alumínio. A partir destes

resultados observou-se que, com o aumento da concentração do ácido aumenta a percentagem da extracção do alumínio, o que está de acordo com os estudos de Wu *et al.* (2012), que mostram que a quantidade de lixiviação de alumínio aumenta com o aumento das concentrações de ácido. O facto do aumento do rendimento da extracção na aumentação da concentração do ácido, pode ser devido ao aumento da quantidade do ácido que permite mais chances de contacto entre H^+ e a escória na dissolução do alumínio e consequentemente o aumento de rendimento (Wu *et al.*, 2012; Amer, 2010).

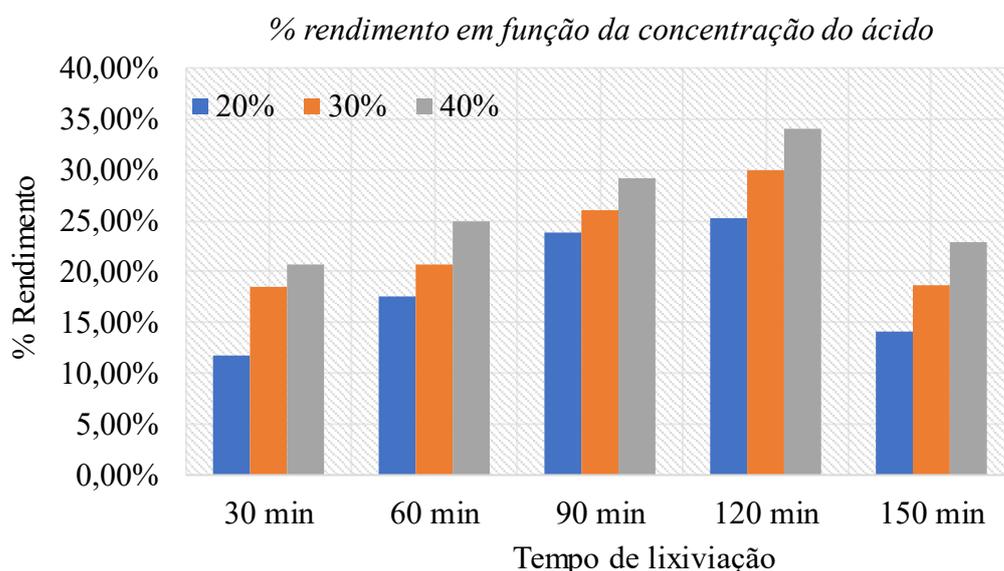


Figura 16: Comparação do rendimento da extração em função das concentrações de H_2SO_4 .

4.6. Caracterização dos produtos através do método de análise termogravimétrica (TGA)

O alumínio obtido pela lixiviação ácida foi caracterizado como $Al_2(SO_4)_3 \cdot x H_2O$ (sulfato de alumínio hidratado) com algumas impurezas conforme os resultados da caracterização química apresentados nas linhas anteriores. O sulfato de alumínio é geralmente encontrado em formas hidratadas (Brown, 2001). O alumínio presente na escória reagiu com ácido sulfúrico para produzir o sulfato de alumínio de acordo com a equação (14) (Gbenou e Wang, 2022).



A análise termogravimétrica (TGA) do sulfato de alumínio, especialmente na forma hidratada ($Al_2(SO_4)_3 \cdot x H_2O$), fornece informações detalhadas sobre a perda de massa em diferentes etapas térmicas quando aquecido de $100^\circ C$ a $1000^\circ C$. A curva de TGA é amplamente utilizada para estudar as etapas de desidratação, decomposição de sulfatos e formação de óxidos.

Abaixo, descreve-se as etapas típicas da curva TGA para sulfato de alumínio, incluindo a percentagem de perda de massa esperada em cada fase.

As curvas de TGA da decomposição térmica dos produtos ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot x \text{H}_2\text{O}$) apresentados nas **Figuras 17 e 18**, pertencem aos produtos de 20% de ácido e 120 min de tempo de lixiviação e do maior rendimento de recuperação do alumínio (40% de ácido e 120 min de tempo de lixiviação) respectivamente. A análise das curvas de TGA apresenta que: (1) Aproximadamente a menos de 150 °C, nesse estágio, o $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot x \text{H}_2\text{O}$ perdeu 30% de massa, que está associado com o processo de desidratação da amostra (Pelovski *et al.*, 1992; Zhao *et al.*, 2013). Samet e Mnif (2010) destacam que as formas mais comuns do sulfato de alumínio perdem entre 20% e 30% de massa total devido à desidratação.

(2) Quando a temperatura passou entre 250 °C e 850 °C o sulfato de alumínio perdeu em torno de 40% de massa em consequência da decomposição do sulfato de alumínio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) em alumina (Al_2O_3) como reportado por Hossein *et al.*, (2011) e Bustanafruz *et al.*, (2013). Durante esta fase, uma perda de massa significativa é observada devido à degradação dos grupos sulfato. A perda de massa nesta fase pode variar entre 40% a 50%, dependendo da forma do sulfato e da quantidade inicial de hidratação (Liu e Zuo, 2009).

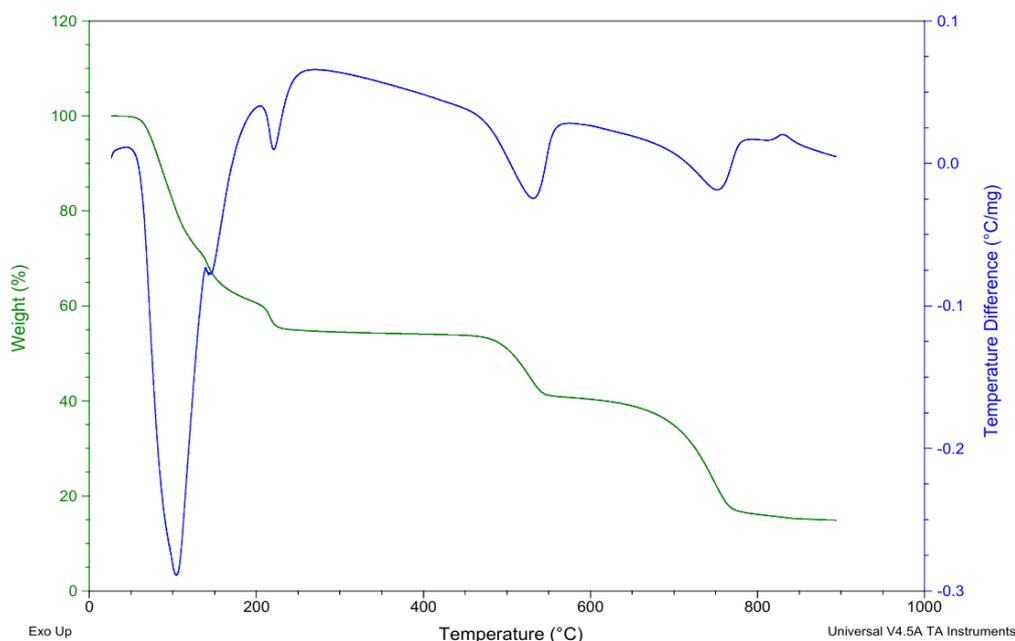


Figura 17: Curva de TGA para o produto de AC-20% e 120 min de tempo de lixiviação.

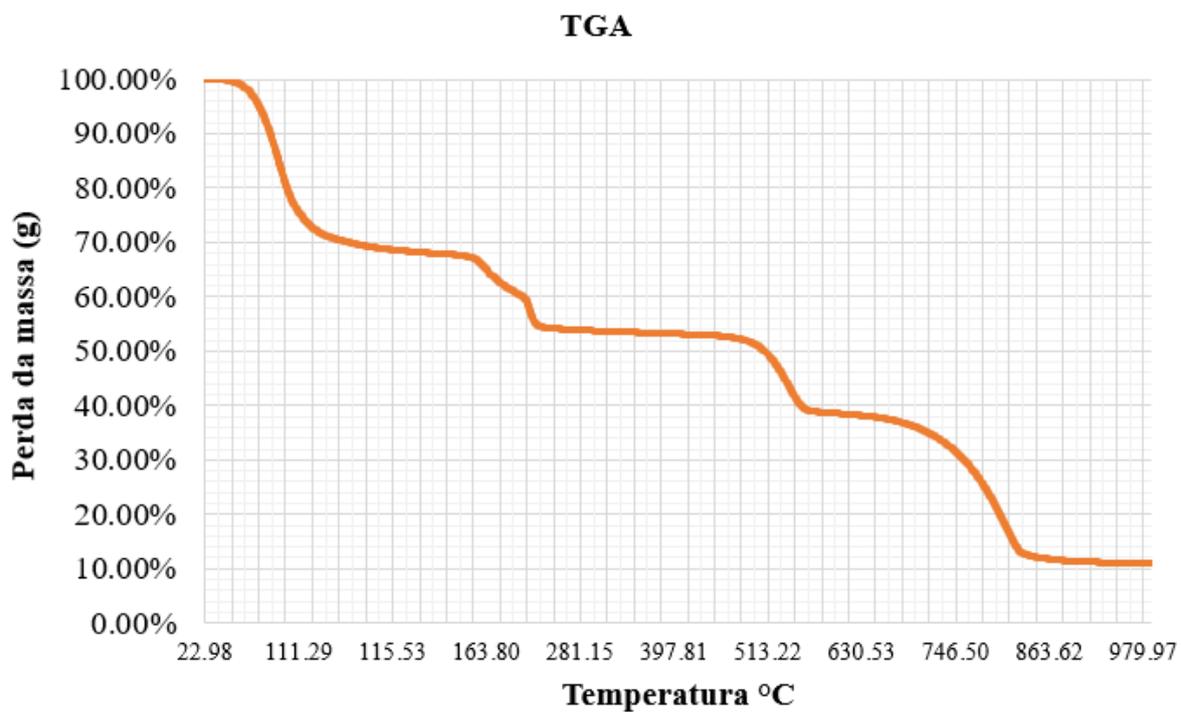


Figura 18: Curva de TGA para o produto de AC-40% e 120 min de tempo de lixiviação.

5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

5.1. Conclusões

O presente trabalho teve como objectivo, aplicar o método de lixiviação ácida para a separação e purificação de altos teores de alumínio contido no resíduo industrial resultante do processamento dos cabos eléctricos e barras de alumínio na empresa Midal Cables. As seguintes conclusões foram alcançadas:

A amostra da escória possui uma composição química constituída principalmente pelo elemento alumínio (87,93%), e apresenta uma característica favorável para a recuperação do alumínio a partir da sua escória. A composição química dos elementos principais que compõe o sulfato de alumínio, resultante da extracção a partir da lixiviação ácida da escória, incluem o enxofre (S) e o alumínio (Al) para cada condição da lixiviação ácida.

Em relação ao efeito do tempo de lixiviação na recuperação do alumínio da escória, observou-se que o aumento do tempo de 30 min para 120 min resulta em um aumento no rendimento da extracção de 11,81% para 25,29%, 18,52% para 30,00% e 16,17% para 33,95% em 20%, 30% e 40% de ácido respectivamente. Além disso, após alcançar o tempo de rendimento máximo da extracção do alumínio até 150 min, verificou-se uma redução do rendimento em 14,13%, 18,66% e 22,92% para 20%, 30% e 40% de ácido respectivamente.

Em relação ao efeito da concentração do ácido na recuperação do alumínio da escória, constatou-se que um aumento na concentração do ácido de 20% para 30% e 30% para 40%, produziu um aumento do rendimento da extracção do alumínio. O maior aumento do rendimento de Al foi de 33,95%, que ocorreu quando se recorreu a 40% de ácido em 120 min. As TGAs dos produtos indicaram em torno de 30% de massa de H₂O na molécula do sulfato de alumínio hidratado.

As condições óptimas para o processo de separação e purificação do alumínio na forma de sulfato a partir da lixiviação da escória com H₂SO₄ foram desenvolvidas e optimizadas, e constatou-se que 40% de ácido em 120 min recupera a máxima quantidade de alumínio. O sulfato de alumínio hidratado produzido a partir da lixiviação de escória produzida na MIDAL CABLES com ácido sulfúrico permite um envolvimento em processos de recuperação e reutilização de materiais residuais, o que agrega valor económico e ambiental.

5.2. Recomendações

Depois das conclusões apresentadas em relação à recuperação do teor de alumínio a partir da escória do resíduo de processamento dos cabos eléctricos na MIDAL CABLES pelo método de lixiviação recomenda-se que:

- Mais pesquisas nessa área sejam feitas em relação à avaliação da eficiência da recuperação de alumínio a partir da escória usando os materiais de baixos custos como os ácidos orgânicos;
- Façam-se investigações da performance da recuperação do alumínio na escória, quando o processo da lixiviação é realizado com diferentes ácidos em diferentes temperaturas;
- Mais estudos sejam realizados sobre a aplicação mais eficiente dos produtos da lixiviação ácida da escória de alumínio, de forma a conseguir mais vantagens na sua recuperação;
- Estudar as reacções de parasíticas que propiciam a formação de escória no processo de fundição de alumínio;
- Investigar as condições operacionais e tecnológicas para a reincorporação do alumínio separado e purificação ao processo pelo método aplicado na pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ali, A. (2019). "Influence of Fluoride Compounds on Aluminum Recovery from Slag." *Journal of Metallurgical Science*, 25(3), 123–134. <https://doi:10.1016/j.jmsci.2019.03.001>.
- Ali, Maytham e Yaseen, Rabiha. (2018). *Recovery of Aluminum from Industrial Waste (Slag) by Melting and Electrorefining Processes*. *Al-Khwarizmi Engineering Journal*. 14. 81-91. 10.22153/kej.2018.03.002.
- Aluminum Association. (2009). *Terms and Definitions relating to aluminium products and aluminium-related technology*. Global Advisory Group (GAC) Guidance Document 001. Available at: http://www.aluminum.org/Content/NavigationMenu/TheIndustry/IndustryStandards/GAG_Terms_and_Definitions_-_Edition_2009-01_-_March_2024.pdf.
- Aluminum Association. (2021). *The Strength of Aluminum*. Available at: <https://www.aluminum.org/strength-aluminum>.
- Amer, A. (2010). *Aluminum extraction from Aluminum industrial wastes*. *J. Miner. Met. Mater. Soc.*
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO (ABAL). (2007). *Guia Técnico do Alumínio: geração e tratamento de escória*. vol. 11 – São Paulo.
- Berry, E., e Hemmings, R. (1987). *Enhanced resource recovery by beneficiation and direct acid leaching of fly ash [C]*//*Symposium Proceedings of Materials Research Society*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Brown, M. (2001). *Introduction to Thermal Analysis: Techniques and Applications*. Springer.
- Bustanafruzza, F., Jafar-Tafreshi, M., e Fazli M. (2013). *Studies on Thermal Decomposition of Aluminium Sulfate to Produce Alumina Nano Structure*. *JNS* 2. 463-468.
- Ciminelli, V. (2007). *Hidrometalurgia*. Belo Horizonte. Engenharia Metalúrgica e de Materiais.
- Coulson, J. E Richardson, J. (1968). *Chemical engineering: Unit operations*. 2nd edition. V.2. Oxford: Calousteguilbenkian Foundation.
- Das, B., Dash, B., Tripathy, B., Bhattacharya, I., e Das, S. (2007). *Production of alumina from waste aluminum dross*. *Miner. Eng.*, 20, 252–258.

- Dash, B., Das, B., Tripathy, B., Bhattacharya, I., e Das, S. (2008). *Acid dissolution of alumina from waste aluminium dross*. Hydrometallurgy, 92, 48–53. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2008.01.006>.
- Deng, X. (2022). *Flotation Techniques for the Separation of Aluminum from Slag*. Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review, 43(1), 75–91. <https://doi:10.1080/08827508.2022.2041997>.
- European Aluminium. (2016). *Recycling aluminium: A pathway to a sustainable economy*.
- European Aluminium. (2018). *Environmental Profile Report. Life-Cycle inventory data for aluminium production and transformation processes in Europe*. European Aluminum Association. Available at: <https://www.europeanaluminium.eu/resource-hub/environmental-profile-report-2018/>.
- European Aluminium. (2018). *Environmental Profile Report. Life-Cycle inventory data for aluminium production and transformation processes in Europe*. European Aluminum Association. <https://www.european-aluminium.eu/resource-hub/environmental-profile-report-2018/>.
- Feng, H., Zhang, G., Yang, Q., Xun, L., Zhen, S., e Liu, D. (2020). *The investigation of optimizing leaching efficiency of al in secondary aluminum dross via pretreatment operations*. Processes 8, 1–13, <https://doi.org/10.3390/pr8101269>.
- Free, M. (2013). *Hydrometallurgy: Fundamentals and Applications*. John Wiley & Sons.
- Freti, J., Bbornand, K e Buxman, K. (1982). *Metallurgy of dross formation on aluminium melts*. Light Metal, AIME.
- Garrett, L. (1982). *Process for the production of sulfates*. 4337228.
- Gbenou, T., e Wang, K. (2022). *Kinetic analysis of poly-aluminum sulfate hydrate for low-temperature thermochemical heat storage*. Applied Thermal Engineering. Volume 210. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.118317>.
- Georgitzikis, K., Mancini L., d’Elia E., e Vidal-Legaz B. (2021). *Sustainability aspects of Bauxite and Aluminium Climate change*. Environmental, Socio-Economic and Circular Economy considerations Luxembourg: Publications Office of the European Union.

- Gil, A. (2005). *Management of the Salt Cake from Secondary Aluminum Fusion Processes*. Industrial and Engineering Chemistry Research, 44 (2005) 8852– 8857.
- Gil, A., e Korili, S. (2016). *Management and valorization of aluminum saline slags: current status and future trends*. Chem. Eng. J. 289 (2016) 74–84. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2015.12.069>.
- Gomes. (2013). *Tecnologias e processos industriais*. Revista e-tec, Santa Maria
- Grimaud, G., Perry, N., e Laratte, B. (2017). *Aluminium cables recycling process: Environmental impacts identification and reduction*. Resources, Conservation and Recycling. 10.1016/j.resconrec.2017.11.010.
- Gupta, K., e Mukherjee, K. (1990). *Hydrometallurgy in Extraction Processes*. CRC Press.
- Hill, V., e Sehnke, E. (2006). *Bauxite, Industrial minerals & rocks: commodities, markets, and uses*. Edited by S. T. Kogel, J.E., Trivedi, N.C., Barker, J.M. and Krukowski. Colorado, USA: Society for Mining, Metallurgy and Exploration Inc. doi: 10.5860/choice.44-1280
- Hiraki, T., Miki, T., Nakajima, K., Matsubae, k., Nakamura, S., e Nagasaka, T. (2014). *Thermodynamic Analysis for the Refining Ability of Salt Flux for Aluminum Recycling*. Materials, 7, 5543–5553. <https://doi.org/10.3390/ma7085543>.
- Hosseini, A., Aiaei, A., e Salari, D. (2011). Open Journal of Physical Chemistry. 1, 23.
- Hwang, J., Huang, X., e Xu, Z. (2006). *Recovery of Metals from Aluminum Dross and Saltcake*. Journal of minerals and materials characterization and engineering, 5 (2006) 47–62.
- Jiménez, A., Rives, V., Vicente M., e Gil, A. (2022). *A comparative study of acid and alkaline aluminum extraction valorization procedure for aluminum saline slags*. Journal of Environmental Chemical Engineering. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.107546>.
- Jinping, L., Haobo, H., Jinhua, G., Shujing, Z., e Yongjie, X. (2007). *Extraction of aluminum and iron from boiler slag by sulfuric acid*, J. Natural Sciences, 12, 541-547.
- Kevorkijan, V. (2002). *Evaluating the aluminum content of pressed dross*. Jom, 34–36.
- King, C. J. (2002). *Solvent Extraction and Separation Processes*. CRC Press.

- Kudyba, A., Akhtar, S., e Johansen, I. (2021). *Aluminum Recovery from White Aluminum Dross by a Mechanically Activated Phase Separation and Remelting Process*. *JOM* 73, 2625–2634. <https://doi.org/10.1007/s11837-021-04730-x>.
- Li, X. (2021). *Optimization of Temperature and Fluxing Agents in Aluminum Slag Treatment*. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 52(4), 1898–1908. <https://doi.org/10.1007/s11663-021-02068-6>.
- Liu, Y., e Zuo, G. (2009). *Thermal decomposition behavior of aluminum sulfate*. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 95(1), 73-77.
- Lorber, K., e Antrekowitsch, H. (2010). *Treatment and disposal of residues from aluminium dross*. 2nd Int. Conf. Hazard. Ind. waste Manag.
- Magalhães, C. (2009). *Estudo da aplicabilidade do ácido de Caro como agente de lixiviação do cobre*. Trabalho de conclusão de curso, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Mahinroosta, A., e Allahverdi, A. (2018). *Hazardous aluminum dross characterization and recycling strategies: a critical review*. *J. Environ. Manag.* 223, 452–468, <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.06.068>.
- Manfredi, O., Wuth, W., e Bohlinger, I. (1997). *Characterizing the physical and chemical properties of aluminium dross*. *JOM*, v.49.
- Meshram, A. (2019). *Utilization of aluminium dross to recover valuable products*. Department of Metallurgical Engineering, Indian institute of technology (banaras hindu university) varanasi – 221005.
- Meshram, A., e Singh, K. (2018). *Recovery of valuable products from hazardous aluminum dross: a review*. *Resour. Conserv. Recycl.* 130, 95–108, <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.11.026>.
- Monjane, M., Suarez E. (2024). *Trabalho de modo do curso de engenharia do ambiente: Avaliação da eficiência e produtividade do forno da empresa Midal cables*. Universidade Eduardo Mondlane. Departamento de engenharia. Maputo. Moçambicana
- Morais, C., Albuquerque, R., e Ladeira, A. (2014). *Processos Físicos e Químicos Utilizados na Indústria Mineral*. In: *Cadernos Temáticos de Química Nova na Escola*. 39-45.
- Nakamura, T. (2021). *High-Pressure Leaching for the Recovery of Aluminum from Slag*. *Hydrometallurgy*, 202, 105679. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2021.105679>.

- Pasley, R. (2003). *The Physical and Chemical Reclamation and Recycling of Elements from Black Aluminium Furnace Residues*. Department of Centre for Environmental Research, Brunel University Thesis submitted for degree of Doctor of Philosophy.
- Pelovski, Y., Pietkova, W., Gruncharov, I., Pacewska, B., e Pysiak, J. (1992). *The thermal decomposition of aluminum sulfate in different gas phase environments*. *Thermochimica Acta*. Volume 205, Pages 219-224. [https://doi.org/10.1016/0040-6031\(92\)85263-U](https://doi.org/10.1016/0040-6031(92)85263-U).
- Peng, L., Zhang, M., Teng, L., e Seetharaman, S. (2013). *Recycling of Aluminum Salt Cake : Utilization of Evolved Ammonia*. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 44, 16–19. <https://doi.org/10.1007/s11663-012-9779-3>.
- Pepper, R., Perenlei, G., Martens, W., e Couperthwaite, S. (2021). *High purity alumina synthesised from iron rich clay through a novel and selective hybrid ammonium alum process*. *Hydrometallurgy*, 204, 105728. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2021.105728>
- Petavratzki, E. (2007). *Case study: residues from aluminium dross recycling in cement. Characterization of mineral wastes. resources and processing technologies - Integrated waste management for the production of construction material*. WRT 177 / WR0115, nov.
- Peters, E., e Muhammed, M. (1987). *Leaching and Reduction in Hydrometallurgy*. Elsevier.
- Reuter, M., Xiao, Y., e Boin, U. (2004). *Recycling and environmental issues of metallurgical slags and salt fluxes*. VII Int. Conf. Molten Slags Fluxes Salts, pp. 349–356.
- Samet, B., e Mnif, T. (2010). *Thermal analysis of aluminum sulfate hydrate*. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 102(1), 149-155.
- Santos, J. (2013). *Comparação entre rotas tradicionais de beneficiamento de minérios para a concentração de alumínio metálico em escórias*. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Ponta Grossa. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção. Ponta Grossa.
- Sarker, M., Alam, M., Qadir, M., Gafur, M., e Moniruzzaman, M. (2015). *Extraction and characterization of alumina nanopowders from aluminum dross by acid dissolution process*. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 22, 429–436. <https://doi.org/10.1007/s12613-015-1090-2>.

- Shinzato, M. (1999). *Comportamento de ions metalicos associados a rejeitos de indústria de reaprovechamiento de alumínio e ligas metalicas em solos sedimentares e águas*. São Paulo
- Tenório, J. (2001). *Tecnologia de fusão para reciclagem do alumínio*. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL DO ALUMÍNIO, 8., São Paulo. Anais.
- Teodorescu, R., Badilita, V., Roman, M., e Crisan, A. (2013). *Optimization of process for total recovery of aluminum from smelting slag .removal of aluminum sulfate*, Environmental Engineering and Management Journal, 13, 7-14.
- Tsakiridis, P. (2012). *Aluminium salt slag characterization and utilization – A review*”, Journal of Hazardous Materials, 217- 218 pp.1-10.
- Tsakiridis, P., Oustadakis, P., e Agatzini-Leonardou, S. (2013). *Aluminium recovery during black dross hydrothermal treatment*. Journal of Environmental Chemical Engineering, 1, 23–32. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2013.03.004>.
- Tsakiridis, P., Oustadakis, P., e Agatzini-Leonardou, S. (2014). *Black dross leached residue: an alternative raw material for portland cement clinker*. Waste Biomass Valoriz. 5, 973–983, <https://doi.org/10.1007/s12649-014-9313-8>.
- Unda, A. (2016). *Lixiviação em pilhas de minérios de ouro de baixo teor incorporada ao processo de tanques agitados, “Carbon in leaching”, uma alternativa econômica no norte do Uruguai*. 157f. Tese - Universidade Federal de Minas Gerais.
- Wang, S., Hu, H., Chu, Y., e Cheng, P. (2008). *Dross Recovery of Aluminum Alloy 380*. Cast expo '08 (Atlanta, Georgia,), pp. 1–7.
- Wu, Y., Ma, J., Hu, F., e Li, M. (2012). *Synthesis and characterization of mesopotous Alumina via a Reverse Precipitation Method*. J. Mater. Sci. Technol., 28(6), 572-576.
- Yin, J. (2022). *Hydrometallurgical Approaches for the Extraction of Aluminum from Slag: A Review*. Journal of Hazardous Materials, 428, 128285. <https://doi:10.1016/j.jhazmat.2022.128285>.
- Zambak, C. (2012). *Heap leaching technique in mining: Within the Context of Best Available Technique (BAT)*. 36 p.
- Zhang, H. (2020). *The Role of Fluxing Agents in Aluminum Recovery from Slag*. Metallurgical and Materials Transactions B, 51(3), 1245–1254. <https://doi:10.1007/s11663-020-01984-5>.
- Zhao, S., Gao, B., Yue, Q., Wang, Y., Li, Q., e Zhang, F. (2013). *Effect of Enteromorpha extract on characteristics of flocs formed by aluminum sulfate in Yellow*

River water treatment under different hydraulic conditions, Chemical Engineering Journal, Volumes 215–ISSN 1385-8947. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2012.11.053>.

- Zuo, Z., Lv, H., Li, R., Liu, F., e Zhao, H. (2021). *A new approach to recover the valuable elements in black aluminum dross*. Resour. Conserv. Recycl. 174, 105768, <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105768>.

Apêndice

Apêndice 1. Tabela dos resultados da caracterização da escória de alumínio pelo método de XRF

Elementos	Escória (%)
Ca	1,08%
Si	2,65%
Fe	0,60%
Al	87,93%
S	0,00%
K	0,31%
Ti	0,93%
Mn	0,01%
Sr	0,01%
Cr	0,04%
Cu	0,04%
V	1,55%
Zr	0,03%
Zn	0,02%
Ir	0,01%
Cl	4,80%
Rb	0,00%
P	0,00%
Ni	0,00%



Figura 1A: a) amostra da escoria. b) equipamentos de estufas.

Apêndice 2. Resultados da quantidade do sulfato de alumínio produzidos nas diferentes condições de extração de alumínio a partir da escória.

Massa da Escória	30 min de lixiviação	n			Média (g)	s	%RSD	IC
56 g	20% [H2SO4]	17,50	18,20	18,84	18,18	0,67	3,69	18,18 ± 1,66
56 g	30% [H2SO4]	21,50	22,10	22,25	21,95	0,39	1,81	21,95 ± 0,98
56 g	40% [H2SO4]	23,50	24,10	24,22	23,94	0,38	1,61	23,94 ± 0,96
	60 min de lixiviação	n			Média (g)	s	%RSD	IC
56 g	20% [H2SO4]	22,50	23,30	23,44	23,08	0,5	2,20	23,08 ± 1,26
56 g	30% [H2SO4]	26,40	26,90	27,31	26,87	0,45	1,70	26,87 ± 1,13
56 g	40% [H2SO4]	28,10	28,40	28,94	28,48	0,42	1,49	28,48 ± 1,06
	90 min de lixiviação	n			Média (g)	s	%RSD	IC
56 g	20% [H2SO4]	28,50	29,12	29,41	29,01	0,46	1,60	29,41 ± 1,15
56 g	30% [H2SO4]	31,50	32,60	32,14	32,08	0,55	1,72	32,08 ± 1,37
56 g	40% [H2SO4]	36,50	37,44	37,10	37,03	0,47	1,29	37,01 ± 1,19
	120 min de lixiviação	n			Média (g)	s	%RSD	IC
56 g	20% [H2SO4]	32,50	33,10	33,67	33,09	0,58	1,77	33,01 ± 1,53
56 g	30% [H2SO4]	37,50	38,20	38,63	38,11	0,57	1,50	38,11 ± 1,42
56 g	40% [H2SO4]	43,50	44,52	44,10	44,04	0,51	1,16	44,04 ± 1,27
	150 min de lixiviação	n			Média (g)	s	%RSD	IC
56 g	20% [H2SO4]	18,50	18,90	19,39	18,93	0,44	2,35	18,93 ± 1,11
56 g	30% [H2SO4]	23,50	24,10	24,61	24,07	0,55	2,31	24,07 ± 1,38
56 g	40% [H2SO4]	29,20	29,80	30,10	29,70	0,45	1,54	29,70 ± 1,14

Estatística

Desvio padrão:

$$\sqrt{\frac{\sum(x_i - \bar{x})^2}{(n-1)}}$$

(Equação 1)

Desvio padrão relativo (RSD): $\%RSD = \frac{s}{\bar{x}} \times 100$ (Equação 2)

Intervalo de confiança (IC): $IC = \bar{x} \pm \frac{ts}{\sqrt{n}}$ (Equação 3)

Onde: s – desvio padrão x

%RSD – desvio padrão relativo

IC – intervalo de confiança

x_i – valor individual experimental

\bar{x} – média experimental

n – número de determinações

t – o valor da distribuição t de student com n-1 graus de liberdade

Apêndice 3. Resultados da análise XRF mostrando a composição elementar dos cristais sólidos produzidos a partir de 20% [H₂SO₄].

20% [H ₂ SO ₄]	Composição (ppm)					% em peso				
	Tempo de lixiviação (min)					Tempo de lixiviação (min)				
	30 min	60 min	90 min	120 min	150 min	30 min	60 min	90 min	120 min	150 min
Elementos constituintes										
S	412463.3 ppm	525816.3 ppm	495994.8 ppm	512266.9 ppm	540289.2 ppm	41,24%	52,58%	49,59%	51,22%	54,02%
Al	320810.9 ppm	374991.8 ppm	405807.6 ppm	376333.1 ppm	361972.1 ppm	32,06%	37,49%	40,58%	37,63%	36,19%
Si	21466.44 ppm	25081.35 ppm	21573.77 ppm	27424.38 ppm	33715.85 ppm	2,14%	2,50%	2,15%	2,74%	3,37%
Fe	914.107 ppm	1848.517 ppm	19486.78 ppm	4419.392 ppm	752.119 ppm	0,09%	0,18%	1,94%	0,44%	0,08%
Ca	231288.3 ppm	61877.28 ppm	16515.31 ppm	53347.31 ppm	62532.63 ppm	23,12%	6,00%	1,65%	5,33%	6,25%
Cu	427.211 ppm	510.264 ppm	498.311 ppm	480.616 ppm	530.552 ppm	0,04%	0,05%	0,04%	0,04%	0,05%
Br	18.929 ppm	19.404 ppm	30.827 ppm	25.299 ppm	19.172 ppm	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Zn	53.973 ppm	76.713 ppm	352.010 ppm	352.010 ppm	88.384 ppm	0,01%	0,01%	0,04%	0,04%	0,01%

Apêndice 4. Resultados da análise XRF mostrando a composição elementar dos cristais sólidos produzidos a partir de 30% [H₂SO₄].

30% [H ₂ SO ₄]	Composição (ppm)					% em peso				
	Tempo de lixiviação (min)					Tempo de lixiviação (min)				
	30 min	60 min	90 min	120 min	150 min	30 min	60 min	90 min	120 min	150 min
Elementos constituintes										
S	477461.5 ppm	550616.8 ppm	477373.2 ppm	507367.1 ppm	536367.1 ppm	47,74%	55,06%	47,73%	50,73%	53,63%
Al	415670.9 ppm	377973.5 ppm	400266.5 ppm	395287.1 ppm	382126.6 ppm	41,56%	37,79%	40,02%	39,52%	38,21%
Si	21466.23 ppm	24215.43 ppm	23335.04 ppm	17207.09 ppm	34992.01 ppm	2,14%	2,42%	2,33%	1,72%	3,29%
Fe	14949.73 ppm	9178.643 ppm	30502.57 ppm	19521.51 ppm	2763.447 ppm	1,49%	0,91%	3,05%	1,95%	0,27%
Ca	23737.93 ppm	21622.41 ppm	17759.44 ppm	20007.09 ppm	37350.40 ppm	2,37%	2,16%	1,77%	2,00%	3,73%
Cu	441.759 ppm	480.987 ppm	351.164 ppm	484.632 ppm	512.347 ppm	0,04%	0,04%	0,04%	0,05%	0,05%
Br	27.266 ppm	25.005 ppm	26.653 ppm	27.518 ppm	19.260 ppm	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Zn	368.148 ppm	309.765 ppm	986.825 ppm	668.505 ppm	92.867 ppm	0,04%	0,03%	0,10%	0,07%	0,01%

Apêndice 5. Tabela com os Resultados da análise XRF mostrando a composição elementar dos cristais sólidos produzidos a partir de 40% [H₂SO₄].

40% [H ₂ SO ₄]	Composição (ppm)					% em peso				
	Tempo de lixiviação (min)					Tempo de lixiviação (min)				
Elementos constituintes	30 min	60 min	90 min	120 min	150 min	30 min	60 min	90 min	120 min	150 min
S	450298.10 ppm	409641.1 ppm	525332.3 ppm	551966.50 ppm	571159.90 ppm	45,02%	40,96%	52,53%	55,19%	57,11%
Al	358017.50 ppm	396266.6 ppm	388370.80 ppm	379872.00 ppm	380258.90 ppm	35,80%	39,62%	38,83%	37,98%	38,02%
Si	20509.18 ppm	15090.95 ppm	25551.05 ppm	21750.89 ppm	25453.88 ppm	2,05%	1,50%	2,55%	2,17%	2,54%
Fe	3973.86 ppm	11489.54 ppm	18680.73 ppm	6374.89 ppm	4557.56 ppm	0,39%	1,14%	1,86%	0,63%	0,45%
Ca	40285.70 ppm	31283.78 ppm	13638.58 ppm	18876.26 ppm	6582.72 ppm	4,02%	3,12%	1,36%	1,88%	0,65%
Cu	498.281 ppm	422.721 ppm	479.13 ppm	422.65 ppm	473.44 ppm	0,05%	0,04%	0,04%	0,04%	0,05%
Br	22.79 ppm	21.252 ppm	29.005 ppm	22.05 ppm	23.67 ppm	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Zn	217.06 ppm	389.716 ppm	620.605 ppm	256.48 ppm	178.84 ppm	0,02%	0,04%	0,06%	0,03%	0,02%

* para conversão das concentrações de ppm para percentual, dividiu-se os valores dos elementos em ppm por 10 000 ppm, que é o total das concentrações em ppm como ilustra a expressão:

$$x\% = \frac{x \text{ ppm}}{10\,000 \text{ ppm}}; \text{ onde } x \text{ representa os elementos presentes.}$$

Exemplo₁ para a concentração de Fe (40%[H₂SO₄] com tempo de lixiviação (120 min): $x\% = \frac{6374,869 \text{ ppm}}{10\,000 \text{ ppm}} = 0,63\%$

Exemplo₂ para a concentração de S (30%[H₂SO₄] com tempo de lixiviação (90 min): $x\% = \frac{477373,20 \text{ ppm}}{10\,000 \text{ ppm}} = 47,73\%$

A. Cálculos da determinação do rendimento da extracção do alumínio na escória

$$\% \text{ Al extraído} = \frac{m \text{ Al extraído}}{m \text{ Al na escória}} \cdot 100$$

Onde:

m Al extraído é a massa do alumínio presente na quantidade do sulfato de alumínio,

m Al na escória é a massa teórica do alumínio presente na quantidade da escória, e

% Al extraído é o rendimento da extracção do alumínio.

Rendimento da extracção do alumínio na escória para 20% de H₂SO₄ em 120 minutos.	Rendimento da extracção do alumínio na escória para 40% de H₂SO₄ em 120 minutos.
<p>Massa da escória= 56 g; Al% na escória=87,93%</p> <p>m Al na escória= Massa da escória x Al% na escória</p> <p>m Al na escória= 56 g x 87,93%= 49,24 g</p> <p>Massa do produto= 33,09 g; Al% no produto= 37,63%</p> <p>m Al extraído= Massa do produto x Al% no produto</p> <p>m Al extraído= 33,09 g x 37,63%= 12,45 g</p> $\% \text{ Al extraído} = \frac{m \text{ Al extraído}}{m \text{ Al na escória}} \cdot 100$ $\% \text{ Al extraído} = \frac{12,45 \text{ g}}{49,24 \text{ g}} \cdot 100$ <p style="text-align: center;">% Al extraído = 25,28%</p>	<p>Massa da escória= 56 g; Al% na escória=87,93%</p> <p>m Al na escória= Massa da escória x Al% na escória</p> <p>m Al na escória= 56 g x 87,93%= 49,24 g</p> <p>Massa do produto= 44,04 g; Al% no produto= 37,98%</p> <p>m Al extraído= Massa do produto x Al% no produto</p> <p>m Al extraído= 44,04 g x 37,98%= 16,72 g</p> $\% \text{ Al extraído} = \frac{m \text{ Al extraído}}{m \text{ Al na escória}} \cdot 100$ $\% \text{ Al extraído} = \frac{16,72 \text{ g}}{49,24 \text{ g}} \cdot 100$ <p style="text-align: center;">% Al extraído = 33,95%</p>