



Universidade Eduardo Mondlane
Faculdade de Ciências
Departamento de Química
Curso de Licenciatura em Química Industrial
Trabalho de Culminação de Curso

Análise dos Factores que Influenciam os Teores de Flúor na Alumina Secundária no Centro de Tratamento de Gases da Fundição de Alumínio



Autora:

Rhindzela Vênus Tamele

Maputo, Novembro de 2025



Universidade Eduardo Mondlane
Faculdade de Ciências
Departamento de Química
Curso de Licenciatura em Química Industrial
Trabalho de Culminação de Curso

Análise dos Factores que Influenciam os Teores de Flúor na Alumina Secundária no Centro de Tratamento de Gases da Fundição de Alumínio



Autora: Rhindzela Vênus Tamele

Supervisora: Prof.^a Doutora Tatiana Kuleshova

Co-supervisor: Lic. Feniassse Chitaca

Maputo, Novembro de 2025

DECLARAÇÃO DE COMPROMISSO DE HONRA

Eu, **Rhindzela Vênus Tamele**, declaro, sob minha honra, que o presente trabalho é de minha autoria e que nunca foi apresentado para a obtenção de qualquer grau académico ou, na sua essência, para qualquer outro fim. O trabalho resulta da investigação por mim realizada e do Estágio Laboral na empresa MOZAL, tendo sido desenvolvido com os recursos devidamente referenciados e sob a orientação dos meus supervisores. Todas as fontes bibliográficas consultadas encontram-se identificadas ao longo do texto.

Maputo, ____ de _____ de 2025

A Autora

(Rhindzela Vênus Tamele)

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais, Cidália Amélia Lucas Monjane e Viriato Teotónio Elias Tamele, pelo apoio em cada etapa da minha jornada, pela sabedoria transmitida que moldou o meu ser e pelo amor que sempre me orientou e fortaleceu.

À minha irmã, Khaya Alana Waka Tamele, minha companheira de vida, pela amizade sincera e pela cumplicidade que nunca faltou em todos os momentos.

E à minha mãe do coração, Margarida Rumbane, pelos ensinamentos valiosos que partilhou, pelo carinho que me ofereceu e pelo seu senso de humor único que sempre alegrou meus dias e permanecerá para sempre em minha memória.

AGRADECIMENTOS

Antes de tudo, agradeço a Deus por me conceder o dom da vida e por me guiar com luz ao longo desta jornada, especialmente nos momentos de maior desafio e adversidade.

Um profundo e especial agradecimento à minha supervisora, Prof.^a Doutora Tatiana Kuleshova, e ao meu co-supervisor, Lic. Feniassse Chitaca, pela orientação dedicada, pelos valiosos ensinamentos e pelo apoio constante. As suas contribuições não apenas enriqueceram este trabalho, como também foram fundamentais para o meu crescimento pessoal e académico.

À Universidade Eduardo Mondlane e a todo corpo docente, o meu muito obrigada pela valiosa contribuição à minha formação.

À empresa MOZAL, expresso a minha profunda gratidão pela oportunidade ímpar de estágio que enriqueceu a minha formação, possibilitando a aplicação prática dos conhecimentos teóricos. Aos meus mentores, Luís Mata, José Saranga, Fernando Panguene e Manuel Cumbi, o meu eterno obrigado pela orientação e por cada lição partilhada.

À minha professora de Química do ensino secundário, Carlota Ribeiro, expresso o meu sincero reconhecimento por ter despertado em mim a paixão por esta ciência, com o seu ensino dedicado e inspirador.

Aos meus queridos amigos, Wendy Uthui, Manuela Baptista, Alessandra Conceição, Melanie Cossa, Anuarite Nhafuma, Kimberley Pioris, Yassmin Faira, Malaika Mbilana, Larisse Silveira, Felisberto Langa, Ivan Rosário, ao meu primo, Waiyaki Monjane e ao meu companheiro Alane Lopes, sou imensamente grata por cada sorriso partilhado e apoio incondicional que tornaram esta caminhada mais leve e especial.

Aos meus colegas de faculdade, Gabriel Tembe, Stevlana Nhancolo, Naftal Chongo, José Tivane, Salmina Machava, Shaquira Quincardeth, Sílvio Cumbe, Dalton Sozinho, Birsia Vilanculo, Débora Matusse, Carolina Banze, Valeriano Nhantole, Aires Buló, Nasiah Gentivo, Jepson Tsane e Valentim Machava agradeço pelas experiências partilhadas durante esta formação. Aos meus colegas de trabalho, Estácio Mate, Rogério Matsinhe, Shelton Tamele, Daniela Andrade, Ornita Mutolo, Ânder Atabo, Ismael Nhamussua, Deisy Machava e Haider dos Reis, o meu muito obrigada por todo o apoio durante o estágio.

“...Os sonhos precisam de persistência e coragem para serem realizados. Nós os regamos com nossos erros, fragilidades e dificuldades. Quando lutamos por eles, nem sempre as pessoas que nos rodeiam nos apoiam e nos compreendem. Às vezes, somos obrigados a tomar atitudes solitárias, tendo como companheiros apenas nossos próprios sonhos...”

Augusto Cury

RESUMO

A eficiência do Centro de Tratamento de Gases (CTG) na indústria do alumínio depende directamente da estabilidade do teor de flúor na alumina secundária, pois o controlo dos compostos fluorados é essencial para otimizar a recuperação de fluoretos, o desempenho das células de redução e o consumo de matérias-primas na fundição de alumínio. A manutenção do teor de flúor na faixa ideal de 1,7% a 1,9% é de importância estratégica, pois assegura a máxima eficiência de adsorção no CTG, promove a reciclagem eficaz dos fluoretos no banho electrolítico, reduz o consumo de matérias-primas fluoradas, como o AlF_3 impactando positivamente o desempenho e economia operacional da unidade. Neste contexto, o presente trabalho teve como objectivo analisar os factores que influenciam os teores de flúor na alumina secundária no Centro de Tratamento de Gases da fundição de alumínio. Foram analisadas variáveis como a granulometria da alumina primária, taxa de alimentação, vazão volumétrica do gás de entrada, concentração de flúor no gás e número de alarmes de nível alto nos funis dos filtros. Complementou-se o estudo com o tratamento estatístico dos dados que envolveu os testes de Anderson-Darling, Kruskal-Wallis e Correlação de Spearman, visando avaliar a distribuição dos dados e as relações entre as variáveis analisadas. Os resultados indicaram que a granulometria da alumina primária apresentou correlação positiva com o teor de flúor na alumina secundária, demonstrando que fracções mais finas favorecem a retenção de fluoretos. Em contrapartida, a taxa de alimentação e a vazão volumétrica do gás de entrada exibiram correlação negativa, sugerindo que valores mais elevados destas variáveis contribuem para maior remoção dos fluoretos gasosos. A concentração de flúor no gás de entrada e os alarmes de nível alto mostraram correlação positiva, reflectindo a influência directa da carga de fluoretos e do acúmulo de material sobre a eficiência do sistema. A análise de dados operacionais em tempo real, complementada por resultados laboratoriais, mostrou que o comportamento do flúor no processo depende do equilíbrio entre estas variáveis operacionais e as propriedades da matéria-prima, sendo essencial uma gestão integrada para garantir a eficiência do CTG e a sustentabilidade do processo de fundição.

Palavras-chave: Centro de tratamento de gases, alumina secundária; flúor; adsorção; variáveis operacionais.

ÍNDICE GERAL

DECLARAÇÃO DE COMPROMISSO DE HONRA	i
DEDICATÓRIA	ii
AGRADECIMENTOS	iii
RESUMO	v
ÍNDICE DE TABELAS.....	ix
ÍNDICE DE FIGURAS.....	x
LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÓNIMOS.....	xiii
1. Introdução.....	1
1.1. Objectivos.....	2
1.1.1. Objectivo geral.....	2
1.1.2. Objectivos específicos	2
1.2. Justificativa do tema.....	2
1.3. Perguntas de pesquisa.....	3
1.4. Metodologia	3
2. Revisão Bibliográfica	6
2.1. Alumínio.....	6
2.1.1. História da indústria de produção de alumínio	7
2.1.2. Matéria-prima necessária para a produção do alumínio	7
2.1.2.1. Alumina.....	7
2.1.2.2. Ânodos de carbono.....	10
2.1.2.3. Materiais electrolíticos	11
2.1.2.4. Corrente eléctrica	12
2.1.3. Processo de produção do alumínio	13
2.1.4. Efluentes gerados no processo de produção do alumínio	15
2.1.5. Centro de Tratamento de Gases	16

2.1.6.	Adsorção	17
2.1.6.1.	Tipos de adsorção.....	17
2.1.7.	Filtração de gases.....	18
2.1.8.	Métodos Analíticos	20
2.1.8.1.	Espectroscopia Ultravioleta-Visível (UV-Vis)	20
2.1.8.2.	Espectrometria de Fluorescência de Raios-X (XRF)	22
2.1.8.3.	Difracção a laser.....	24
3.	Descrição do local de estudo	25
3.1.	Processo de produção de alumínio na MOZAL: Estrutura Operacional.....	26
3.2.	Centro de Tratamento de Gases da MOZAL	28
3.2.1.	Processo de funcionamento do Centro de Tratamento de Gases	28
4.	Parte Experimental	31
4.1.	Diagrama de Causa e Efeito (Diagrama de Espinha de Peixe)	31
4.2.	Materiais, equipamentos e reagentes.....	33
4.3.	Amostragem	34
4.3.1.	Amostragem do gás de entrada do CTG	34
4.3.1.1.	Preparação dos materiais e equipamentos.....	34
4.3.1.2.	Processo de amostragem	35
4.3.2.	Amostragem da alumina secundária	38
4.4.	Análises laboratoriais	38
4.4.1.	Determinação do teor de flúor no gás de entrada do CTG	38
4.4.1.1.	Preparação da amostra e determinação do flúor gasoso	38
4.4.1.2.	Preparação da amostra e determinação do flúor particulado	39
4.4.2.	Determinação da granulometria da alumina.....	42
4.4.3.	Determinação do teor de flúor na alumina secundária	42
4.4.3.2.	Análise da amostra por Espectrometria de Fluorescência de Raios-X (XRF)	44

4.4.	Tratamento Estatístico dos dados.....	44
5.	Resultados e Discussão.....	46
5.1.	Resultados das análises dos variáveis monitoradas.....	46
5.1.1.	Análise dos níveis de flúor na alumina secundária.....	46
5.1.2.	Análise da granulometria da alumina primária.....	47
5.1.3.	Análise da taxa de alimentação da alumina primária.....	49
5.1.4.	Análise da vazão volumétrica do gás de entrada	50
5.1.5.	Análise dos alarmes de nível alto nos funis dos filtros.....	51
5.1.6.	Análise da concentração do flúor no gás de entrada.....	53
5.2.	Resultados do tratamento estatístico	54
5.2.1.	Teste de Anderson-Darling (Normalidade dos dados).....	54
5.2.2.	Teste de Kruskal-Wallis (Diferença entre grupos)	54
5.2.3.	Teste de Correlação de Spearman.....	56
5.2.3.1.	Granulometria da alumina primária (Área específica superficial e fracção de partículas finas).....	56
5.2.3.2.	Taxa de alimentação da alumina primária.....	57
5.2.3.3.	Vazão volumétrica do gás de entrada.....	57
5.2.3.4.	Alarmes de nível alto no funil dos filtros	57
5.2.3.5.	Concentração de flúor no gás de entrada	57
6.	Conclusões e Recomendações	59
6.1.	Conclusões	59
6.2.	Recomendações.....	60
	Referências Bibliográficas	61
	Anexos	A

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1: Propriedades físico-químicas do alumínio.....	6
Tabela 2: Propriedades físico-químicas da alumina	8
Tabela 3: Materiais, reagentes e equipamentos necessários.....	33
Tabela 4: Resultados do teste de normalidade de Anderson-Darling.....	54
Tabela 5: Resultados do teste de Kruskal-Wallis	55
Tabela 6: Resultados do teste de Correlação de Spearman.....	58

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Alumina.....	8
Figura 2: Diagrama do Processo de Bayer.	9
Figura 3: Matéria-prima necessária para a produção de alumínio.....	13
Figura 4: Ilustração da célula de redução de alumina Hall-Héroult para ânodos pré-cozidos	14
Figura 5: Configuração esquemática do CTG	16
Figura 6: Representação esquemática do processo de adsorção física e química.	18
Figura 7: Esquema de funcionamento do filtro de mangas.	19
Figura 8: Componentes do Espectrofotómetro Ultravioleta-Visível (UV-Vis).....	22
Figura 9: Ilustração do princípio da fluorescência de raios-X.....	23
Figura 10: Componentes do Espectrómetro de Fluorescência de Raios-X (XRF).....	23
Figura 11: Componentes do Granulómetro por Difracção a laser.....	24
Figura 12: Mapa especial e localização da MOZAL	25
Figura 13: Disposição dos CTG ao longo das linhas de produção.....	28
Figura 14: Diagrama do Circuito do Gás.....	29
Figura 15: Diagrama de Causa e Efeito.....	32
Figura 16: Equipamentos utilizados durante o processo de amostragem.	35
Figura 17: Manómetro e Tubo Pitot.	35
Figura 18: Processo de amostragem do gás de entrada.	36
Figura 19: Esquema do sistema de amostragem de gases em série.....	37
Figura 20: Amostrador automático de alumina secundária.	38
Figura 21: Solução-padrão de flúor e SPC.	39
Figura 22: Espectrofotómetro UV-VIS	39
Figura 23: Esquema de Destilação.	40
Figura 24: Analisador de granulometria por difracção a laser.	42
Figura 25: Misturador Tridimensional de pós - Turbula	43
Figura 26: Forno de pastilhas vítreas.....	43
Figura 27: Amostras em forma de pastilhas vítreas.	43
Figura 28: Espectrómetro de Fluorescência de Raios-X.	44
Figura 30: Gráfico do teor mensal de flúor na alumina secundária.....	47
Figura 29: Gráfico do teor diário de flúor na alumina secundária.....	47
Figura 31: Gráfico da área superficial específica da alumina primária.	48

Figura 32: Gráfico da fracção de partículas finas da alumina primária.....	49
Figura 33: Gráfico da taxa de alimentação da alumina primária.....	50
Figura 35: Vazão volumétrica mensal do gás de entrada.	51
Figura 34: Vazão volumétrica diária do gás de entrada.	51
Figura 36: Gráfico do número de alarmes de nível alto nos funis dos filtros.....	52
Figura 37: Gráfico da concentração de flúor no gás de entrada.	53

ANEXOS

Anexo A: Resultados da determinação do teor de flúor na alumina secundária obtidos por Fluorescência de Raios-X.	B
Anexo B: Resultados da determinação da granulometria da alumina primária: área específica superficial e fracção de partículas finas.	C
Anexo C: Resultados da determinação da taxa de alimentação da alumina primária registrada por sensores do CTG.	G
Anexo D: Resultados da determinação das análises do gás de entrada do CTG registrada por sensores do CTG.	I

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÓNIMOS

%	Percentagem
ρ	Coeficiente de Spearman
SSA	Área Superficial Específica (do inglês <i>Specific Surface Area</i>)
CTF	Centro de Tratamento de Fumos (do inglês <i>Fume Treatment Center</i>)
CTG	Centro de Tratamento de Gases (do inglês <i>Gas Treatment Center</i>)
HDPS	Sistema de Fase Hiper-Densa (do inglês <i>Hyper Dense Phase System</i>)
IACS	Padrão Internacional de Cobre Recozido (do inglês <i>International Annealed Copper Standard</i>)
IQR	Intervalo Interquartil
LI	Limite Inferior
LS	Limite Superior
M	metro
m ³	metro cúbico
Mg	miligrama
mg/Nm ³	miligrama por metro cúbico normal

mL	mililitro
Mm	milímetro
daPa	decapascal
Nm ³	Metro cúbico normal
Nm ³ /s	Metro cúbico normal por segundo
Nm ³ /s/pote	Metro cúbico normal por segundo por pote
P	valor-p (em estatística)
PIB	Produto Interno Bruto
SCIELO	<i>Scientific Electronic Library Online</i>
SOP	Norma Operacional Padrão (do inglês <i>Standard Operating Procedure</i>)
SPC	Solução Padrão de Controlo
TA	Taxa de Alimentação
T&L	Tratamento e Logística
TISAB II	Solução tampão de ajuste da força iônica total (do inglês <i>Total Ionic Strength Adjustment Buffer</i>)

ton/h tonelada por hora

UV-Vis Espectroscopia Ultravioleta-Visível

XRF Espectrometria de Fluorescência de Raios-X

1. Introdução

O alumínio, frequentemente utilizado na forma de ligas metálicas, tem apresentado uma aplicação crescente em diferentes sectores industriais, impulsionado pelas suas propriedades físico-químicas vantajosas (Brough & Jouhara, 2020).

A produção de alumínio em Moçambique continua fortemente concentrada na fundição Mozal, que mantém um papel central na dinâmica industrial do país. De acordo com dados da South32, principal accionista e operadora da unidade, a produção atingiu cerca de 271 mil toneladas no ano financeiro de 2016-2017, representando um aumento em relação ao período anterior e reflectindo a operação próxima da capacidade máxima instalada. Estes dados confirmam a importância estratégica da indústria do alumínio para a economia moçambicana e a sua inserção no mercado global (Jorge, 2017).

O processo de fundição do alumínio é acompanhado pela geração de gases e poeiras ricas em compostos fluorados e alumina, cujo tratamento prévio é importante para a recuperação do flúor (Schultz & Mallmann, 2002).

Nos Centros de Tratamento de Gases (CTG), os gases gerados no processo de fundição são exaustos de modo a reagirem com alumina e serem adsorvidos antes da sua emissão. Dessa forma, as indústrias de produção de alumínio em grande escala conseguem realizar a purificação de gases e a reciclagem da alumina, que retorna às células de redução (Ngunga, 2022).

De acordo com Tomago Aluminium Company (2025), a implementação de sistemas de tratamento de gases — como lavadores secos, filtros de mangas e leitos de alumina para adsorção de fluoretos — possibilita a remoção de compostos fluorados, os quais, após recuperados, podem ser reincorporados no processo produtivo, como é o caso da alumina fluoretada que retorna às células de redução.

Dentre os principais factores que influenciam a eficiência do processo de tratamento, destaca-se a estabilidade dos níveis de flúor na alumina secundária produzida, uma vez que variações podem afectar a qualidade do produto final. Por isso, o monitoramento e a reciclagem controlada destes níveis constituem, portanto, uma prioridade na operação de Centros de Tratamento de Gases, como o da MOZAL.

Deste modo, o presente estudo visa analisar os factores que influenciam os teores de flúor na alumina secundária, no contexto dos Centros de Tratamento de Gases da fundição de alumínio,

procurando identificar as principais causas associadas às variáveis de medição, aos métodos operacionais e à matéria-prima que possam contribuir para essas oscilações.

1.1. Objectivos

1.1.1. Objectivo geral

Analisar os factores que influenciam os teores de flúor na alumina secundária no Centro de Tratamento de Gases da fundição de alumínio.

1.1.2. Objectivos específicos

- Identificar os principais factores associados às variáveis de medição, aos métodos operacionais e à matéria-prima que afectam os teores de flúor na alumina secundária;
- Monitorar e relacionar as variáveis de medição, os métodos operacionais e as características da matéria-prima com a variabilidade dos teores de flúor na alumina secundária, utilizando dados operacionais obtidos em tempo real por sensores do sistema CTG, integrados a um aplicativo de controlo e submetidos a tratamento estatístico;
- Caracterizar, por meio de análises laboratoriais, a granulometria da alumina primária, os teores de flúor no gás de entrada e na alumina secundária.

1.2. Justificativa do tema

Na produção de alumínio, a alumina desempenha um papel essencial como adsorvente de fluoretos, actuando na purificação dos gases gerados durante a redução electrolítica. Essa função é desempenhada pelo Centro de Tratamento de Gases, que tem um papel estratégico ao capturar o fluoreto presente no gás proveniente das células de redução e reintroduzi-lo no banho electrolítico sob a forma de alumina fluoretada, promovendo assim a reciclagem dos compostos fluoretados e contribuindo para a optimização do processo produtivo.

A estabilidade dos teores de flúor na alumina secundária é, portanto, um factor determinante para a eficiência operacional, uma vez que garante o reaproveitamento adequado dos fluoretos e reduz o consumo de fluoreto de alumínio.

Apesar da eficiência desse sistema, na operação da MOZAL, têm sido observadas flutuações nos níveis de flúor da alumina secundária, cujas causas por de trás das mesmas continuam desconhecidas.

Essas variações podem comprometer o processo electrolítico, uma vez que a alumina secundária, proveniente do sistema de purificação de gás, é posteriormente reintroduzida na célula, retornando não só os fluoretos como também impurezas, o que por sua vez, acaba diminuindo a eficiência da célula ao longo do seu tempo de uso (Novák, 2013). Além disso, há evidências operacionais significativas de que as propriedades da alumina afectam o desempenho da fundição, influenciando desde a eficiência dos filtros a seco, até à dissolução e à estabilidade térmica nas células de redução (Metson *et al.*, 2013).

Dessa forma, investigar os factores que influenciam os teores de flúor na alumina secundária torna-se fundamental para esclarecer as causas dessa variabilidade e mitigar os seus impactos no processo produtivo. No contexto moçambicano, esta investigação não só oferece um contributo técnico relevante para o aprimoramento da eficiência operacional da principal fundição de alumínio do país, como também representa um passo significativo rumo a uma industrialização mais sustentável, eficiente e alinhada com uma gestão otimizada dos recursos disponíveis.

1.3. Perguntas de pesquisa

- Quais são as variáveis críticas que influenciam os teores de flúor da alumina secundária?
- De que forma as variáveis críticas contribuem para a variabilidade dos teores de flúor na alumina secundária?

1.4. Metodologia

O presente trabalho foi desenvolvido de forma sistemática e progressiva, seguindo uma sequência lógica de etapas que sustentaram o seu desenvolvimento, compreendendo as seguintes fases:

- **Identificação do Problema e Definição das Variáveis**

Nesta fase, procedeu-se à observação directa das condições operacionais do Centro de Tratamento de Gases (CTG), bem como à análise do seu histórico de desempenho. Esta etapa incluiu ainda um período de familiarização com o sistema, permitindo compreender o funcionamento dos equipamentos, os fluxos operacionais e as principais variáveis do processo.

Com base nesta análise, foi possível identificar o problema em estudo e definir as variáveis relevantes para investigação.

- **Identificação das Causas — Sessões de Brainstorming e Diagrama de Causa e Efeito**

Com base no conhecimento adquirido durante a exposição ao local de estágio, foram realizadas sessões de brainstorming com o objectivo de levantar e sistematizar, de forma colaborativa, as possíveis causas associadas ao problema. Os factores identificados foram organizados e estruturados através da elaboração de um Diagrama de Causa e Efeito (Diagrama de Ishikawa), que permitiu categorizar as causas potenciais segundo as suas origens — nomeadamente mão-de-obra, métodos, máquina, materiais, meio ambiente e medição.

- **Trabalho de Campo – Amostragem, Análises Laboratoriais e Monitoramento Operacional**

Amostragem: foram recolhidas amostras do gás de entrada e da alumina secundária do CTG, seguindo procedimentos normalizados (SOP) da empresa;

Análises laboratoriais: As amostras recolhidas foram analisadas de acordo com procedimentos normalizados (SOP), utilizando as seguintes técnicas:

- Difracção a laser (distribuição granulométrica e área superficial específica da alumina primária);
- Espectrofotometria Ultravioleta- Visível (teor de flúor no gás de entrada);
- Espectrometria de Fluorescência de Raios-X (teor de flúor na alumina secundária).

Monitoramento operacional: realizou-se a inspecção contínua e a avaliação das variáveis do sistema, com registo de factores e ocorrências consideradas críticas para o processo, permitindo correlacionar os dados recolhidos com o fenómeno em estudo.

- **Tratamento e Análise dos Resultados**

Os resultados obtidos foram submetidos a um tratamento estatístico e posteriormente analisados, interpretados e discutidos à luz de uma revisão bibliográfica direccionada ao tema, permitindo a sua sustentação teórica, bem como a validação das hipóteses formuladas com base no Diagrama de Causa e Efeito.

2. Revisão Bibliográfica

2.1. Alumínio

Na escala de abundância elementar, o alumínio ocupa a terceira posição em termos de massa na crosta terrestre, precedido pelo oxigénio e silício. Este metal é um importante componente dos solos e formações geológicas, incluindo minerais de argila, tais como: caulinite, gibbsite e outros óxidos (Pedrotti *et al.*, 2003). O alumínio é amplamente utilizado na indústria devido as suas propriedades físico-químicas, entre as quais se destacam a baixa densidade (em comparação a outros metais), a elevada resistência à corrosão e a excelente condutividade térmica e eléctrica. Somam-se a essas características as diversas aplicações e as propriedades das suas ligas, bem como a sua capacidade de ser reciclada de forma ilimitada, sem que ocorram perdas das suas propriedades iniciais (Silva, 2020). Na Tabela 1 encontram-se dispostas as principais propriedades físico-químicas do alumínio.

Tabela 1: Propriedades físico-químicas do alumínio.

Propriedades	Descrição
Ponto de Fusão	660 °C (Pureza = 99,8%)
Ponto de Ebulição	2470 °C
Resistividade Eléctrica	0,00000263 ohm/cm ³
Condutividade Eléctrica	62% IACS
Condutibilidade Eléctrica	0,53 K (cal/s. cm. °C)
Densidade	2,70 g/cm ³
Peso específico	2,70 g/cm ³
Coeficiente de dilatação térmica linear	0,0000238 mm/°C (Faixa de 20°C - 100°C)
Reflectividade	Acima de 80%
Propriedade antimagnética	Não magnético
Reciclagem	100% reciclável
Toxicidade	Não tóxico
Resistência à corrosão	Altamente resistente a intempéries

Fonte: Adaptado de GGD Metals (2023).

2.1.1. História da indústria de produção de alumínio

Em 1809, Humphry Davy nomeou o alumínio ao sugerir que o mesmo poderia ser produto da redução electrolítica do óxido de alumínio. No entanto, foi Friedrich Woehler quem comprovou a teoria, em 1845, ao produzir a primeira amostra de alumínio puro (Brough & Jouhara, 2020). O químico francês Henri Sainte-Claire Deville, em 1856, aperfeiçoou a técnica desenvolvida por Woehler para a produção de alumínio, ao substituir o potássio por sódio e utilizando a criolite (Na_3AlF_6) como solvente para o óxido de alumínio (Nhone, 2023).

Em 1886, de forma independente e coincidente, Charles Martin Hall e Paul Louis Toussaint Héroult descobriram que o óxido de alumínio podia ser fundido a temperaturas mais baixas quando dissolvido em criolite, possibilitando a obtenção de alumínio puro e por partilharem da mesma patente, o processo foi denominado por Processo de Hall-Héroult (Ngunga, 2022).

Em 1887, Karl Joseph Bayer demonstrou que a alumina podia ser extraída do minério bauxite para alimentar o processo de Hall-Héroult (Brough & Jouhara, 2020).

De acordo com Massinguil (2014), a produção industrial e de forma económica do alumínio metálico teve início em 1889 com a introdução do processo de Hall-Héroult, que até aos dias de hoje é único método capaz de produzir o alumínio com elevados rendimentos.

Na década de 1990, a África do Sul e o Médio Oriente destacaram-se como produtores de alumínio devido ao preço reduzido do carvão energético e a disponibilidade de gás natural, associado à produção de petróleo (Magaia, 2023).

Do pioneirismo sul-africano (1940), a produção do alumínio expandiu-se no continente africano no Gana, Camarões, Egipto e em Moçambique (Ngunga, 2022).

2.1.2. Matéria-prima necessária para a produção do alumínio

As matérias-primas necessárias para a produção de alumínio envolvem principalmente recursos minerais e insumos energéticos, nomeadamente: alumina, ânodos de carbono, materiais electrolíticos e corrente eléctrica.

2.1.2.1. Alumina

O óxido de alumínio, conhecido como alumina, é a principal matéria-prima utilizada para a produção de alumínio primário (Galasiu *et al.*, 2007). É um sólido branco, tal conforme mostra a Figura 1, inerte e amorfo, presente, naturalmente, em diversos minerais, como o corindo (Arif & Ahmad, 2022).

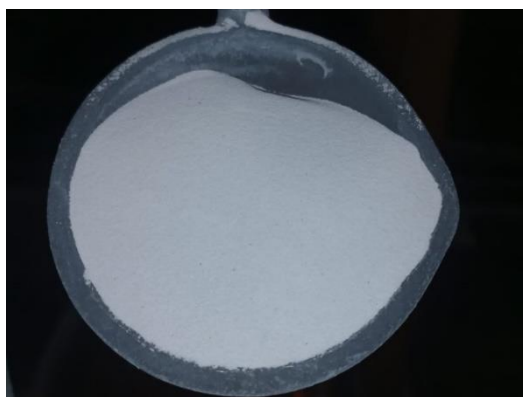


Figura 1: Alumina.

Com elevada dureza, densidade, resistência a riscos, baixa porosidade e natureza não reactiva, a alumina apresenta características físico-químicas notáveis, tal como demonstrado na Tabela 2, sendo a maior parte destinada ao processo electrolítico para produção de alumínio, enquanto a alumina activada, devido à sua estrutura porosa e granular, é utilizada como material adsorvente e suporte catalítico (Arif & Ahmad, 2022).

Tabela 2: Propriedades físico-químicas da alumina

Propriedades	Descrição
Estado físico	Sólido
Cor	Branco
Massa molar	101,96 g/mol
Densidade	3,85 g/cm ³
Solubilidade	Insolúvel em água
Inflamabilidade	Não inflamável
Ponto de fusão	2072 °C
Ponto de ebulição	2977 °C
Dureza	15-19 GPa
Condutividade térmica	20-30 W/mK
Resistência (Compressão)	2000-4000 MPa
Resistência (Mecânica)	300-630 MPa
Resistência (Eléctrica)	10 ¹² -10 ¹³ Ωm

Fonte: Adaptado de Arif & Ahmad (2022).

- **Processo de Bayer**

Descoberto em 1877 por Karl Joseph Bayer, o óxido de alumínio é extraído a partir do minério bauxite através do processo de Bayer, que foi esquematicamente representado na Figura 2 (Moreno, 2020).

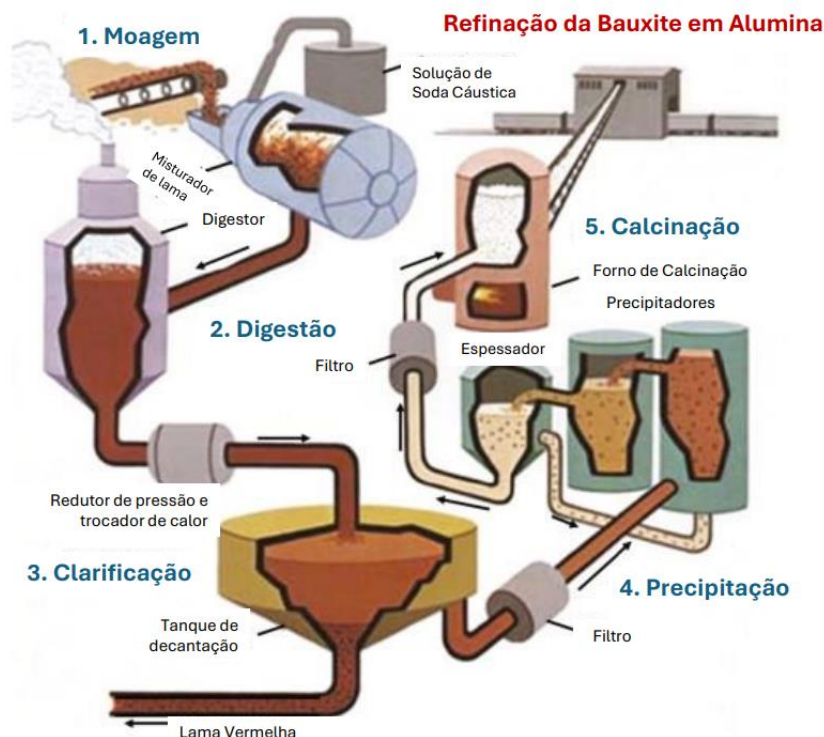


Figura 2: Diagrama do Processo de Bayer.

Fonte: Adaptado de Binnemans & Jones (2025).

A bauxite é o minério de maior importância na produção de alumínio, é rica em alumina (40 a 60%) e contém impurezas como óxido de silício (1,5 a 3,0%), óxido de ferro (12 a 17%) e óxido de cálcio (<0.5%) (Massinguil, 2014). Trata-se de uma rocha, geralmente avermelhada (o teor dos óxidos de ferro determina a coloração da rocha), constituída por hidróxidos de alumínio, principalmente, gibbsite ($\text{Al}(\text{OH})_3$) e os isómeros bohemite ($\text{AlO}(\text{OH})$) e diásporo ($\text{AlO}(\text{OH})$) (Alves, 2017).

O processo de Bayer é constituído por cinco etapas, nomeadamente: britagem, digestão, clarificação, precipitação e calcinação.

Britagem e Moagem: tem como finalidade reduzir, de forma controlada, o tamanho das partículas de bauxite (Chitaca, 2012). Ainda que a moagem não seja considerada uma etapa do

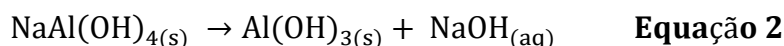
processo de Bayer, ela contribui para o aumento da área, tornando mais eficiente o ataque da soda cáustica à alumina disponível (Garcia, 2012).

Digestão: consiste na solubilização da gibbsite, presente na bauxite, através do uso da soda cáustica (NaOH), sob temperatura de 150 °C e pressão de 45 psi, formando uma solução supersaturada de aluminato de sódio (lama vermelha), como mostra a Equação 1 (Moreno, 2020). Além disso, ocorre a formação de um licor verde (solução contendo elevados teores de hidróxidos solúveis), resultante da dissolução das espécies de alumínio (Garcia, 2012).

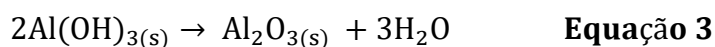


Clarificação: a etapa da clarificação é responsável pela separação sólido-líquido, entre o resíduo de bauxite e o licor rico em alumina solubilizada, que é encaminhado para as próximas etapas (Alves, 2017). Entre as técnicas usualmente empregadas, destacam-se a decantação e a filtração (Massinguil, 2014).

Precipitação: em tanques de aço sob agitação constante, o licor entra em contacto com finas partículas de hidróxido de alumínio, causando a solidificação de alumina formando cristais que em seguida são lavados e secos, conforme mostra a Equação 2 (Magaia, 2023).



Calcinação: na fase da calcinação, a alumina passa por um processo de lavagem de modo a eliminar o licor residual, seguida de uma secagem e calcinação a aproximadamente 1000°C, promovendo a desidratação e a formação de cristais de alumina puros, de aspecto branco e arenoso (Gonçalves, 2016). A Equação 3 descreve a reacção que ocorre durante a etapa de calcinação.



2.1.2.2. Ânodos de carbono

No processo electrolítico de produção de alumínio, o ânodo de carbono- também chamado de ânodo de carbono cozido- actua como produto intermediário desempenhando a função de conduzir corrente eléctrica através do qual passa a corrente contínua que facilita a dissolução da alumina (Pinto, 2024).

Durante o processo de electrólise podem ser empregues duas tecnologias de ânodos de carbono, os ânodos únicos (Söderberg), que são cozidos ou curados dentro das próprias células e os ânodos pré-cozidos que são previamente submetidos a elevadas temperaturas em fornos de

cozedura, com parâmetros controlados, garantindo o controlo e a captura e tratamento dos fumos gerados durante o processo (Ngunga, 2022).

Os ânodos pré-cozidos, geralmente, são produzidos a partir de uma combinação de coque de petróleo, alcatrão de hulha (que actua como aglutinante) e material de ânodo reciclado (Nhone, 2023).

- **Coque de petróleo**

O petróleo, como uma importante fonte energética, passa por um processo de refino que permite a obtenção de diversos produtos derivados com aplicações diversas. Durante esse processo é gerado o coque de petróleo, que actualmente desponta como alternativa ao carvão mineral (Baptista & Cardoso, 2014).

O coque empregado na composição dos ânodos deve passar por um processo de calcinação a aproximadamente 1200 °C, promovendo a remoção de constituintes voláteis e o aumento da sua densidade, força e porosidade (Nhone, 2023).

- **Alcatrão de hulha**

Obtido através da destilação do carvão mineral, o alcatrão é utilizado para unir as partículas de coque na produção de ânodos de carbono (Massinguil, 2014).

- **Material de ânodo reciclado**

Denomina-se de material de ânodo reciclado ao resíduo remanescente da célula electrolítica durante a troca do ânodo (Nhone, 2023).

2.1.2.3. Materiais electrolíticos

O banho electrolítico representa o meio no qual ocorre a interacção entre a electricidade e os iões de alumínio, formado por sais fundidos que fornecem o ambiente adequado para as reacções. A criolite fundida (Na_3AlF_6) foi escolhida por Hall e Héroult, uma vez que este sal apresenta a dupla função de dissolver a Al_2O_3 e permitir a condução da corrente eléctrica (Martinho, 2019).

A composição do banho é predominantemente constituída por criolite (> 75%), fluoreto de cálcio (4-8%), trifluoreto de alumínio (5-13%), alumina (1-5%) e, em alguns casos, fluoretos de lítio e magnésio em menores proporções (Mate, 2025).

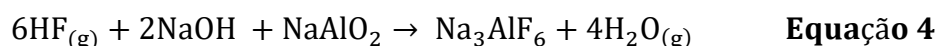
- **Criolite**

A criolite (Na_3AlF_6) é um halogeneto mineral cuja composição elementar, quando pura, contém: 32,85% de sódio (Na), 12,85% de alumínio (Al) e 54,30% de flúor (F). Trata-se de um

mineral de raridade significativa, cujo único depósito economicamente viável conhecido foi encontrado nos filões graníticos da mina de Ivigtut, na Groenlândia e como consequência, os substitutos sintéticos passaram a tomar espaço (Ferreira *et al.*, 2015).

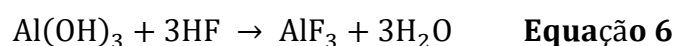
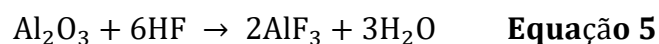
Embora a composição e as propriedades da criolite sintética sejam as mesmas da criolite natural, a criolite sintética tende a apresentar deficiência em fluoreto de sódio (Mate, 2025).

Conforme mostra a Equação 4, a síntese da criolite ocorre por meio de reacção do ácido fluorídrico com uma solução alcalina de aluminato de sódio.



- **Trifluoreto de alumínio**

O trifluoreto de alumínio (AlF_3) apresenta-se na forma de pó branco, podendo exibir variações de cor em função de impurezas. Este composto químico não ocorre na forma natural, sendo obtido a partir do espatoflúor em um processo semelhante ao da criolite (Mate, 2025). Pode ser obtido por diferentes rotas sintéticas, destacando-se a reacção do hidróxido de alumínio ($\text{Al}(\text{OH})_3$) ou do óxido de alumínio (Al_2O_3) com ácido fluorídrico (HF), conforme mostrado nas Equações 5 e 6.



2.1.2.4. Corrente eléctrica

O processo de redução de alumina para a produção de alumínio demanda de uma grande quantidade de energia eléctrica, cerca de 13 kWh para produzir 1 kg de alumínio (Kvande & Drabløs, 2014). A quantidade de matéria-prima necessária para a produção de 1 kg de alumínio primário está ilustrada na Figura 3.

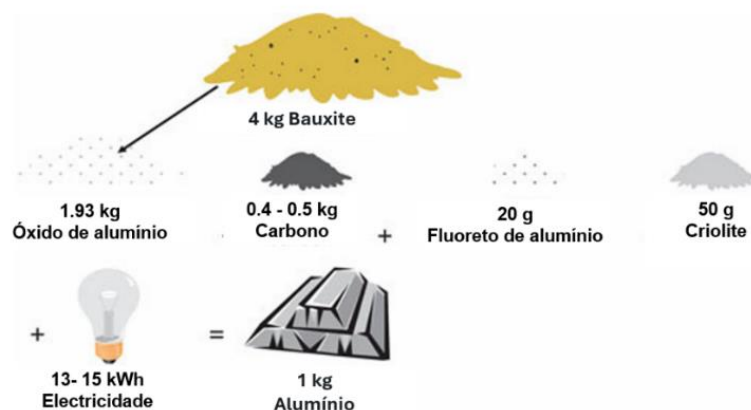


Figura 3: Matéria-prima necessária para a produção de alumínio

Fonte: Adaptado de Kvande & Drabløs (2014).

2.1.3. Processo de produção do alumínio

O processo de produção de alumínio compreende duas etapas, nomeadamente: o Processo de Bayer, que consiste na produção da alumina a partir do minério bauxite e o Processo de Hall-Héroult, no qual a alumina é fundida por electrólise em células electrolíticas (Pinto, 2024).

2.1.3.1. Processo de Hall-Héroult

O processo de Hall-Héroult é fundamentado pela Lei de Faraday, segundo a qual o alumínio é separado do oxigénio através da passagem da corrente eléctrica no banho electrolítico contendo alumina dissolvida (Massinguil, 2014).

A dissolução da alumina ocorre no interior de uma célula electrolítica, onde o banho electrolítico é submetido a temperaturas que variam entre 950°C e 1000°C (Pinto, 2024).

Constituído principalmente por criolite (Na_3AlF_6), o banho electrolítico é um sal fundido derivado da mistura de fluoreto de alumínio (AlF_3) e fluoreto de sódio (NaF), com ponto de fusão em torno de 1012°C. Sua principal função é diminuir o ponto de fusão da alumina, possibilitando sua dissolução sob pressões mais baixas e contribuindo para a redução da temperatura operacional do processo (Ngunga, 2022).

A célula electrolítica de aço é revestida internamente por uma camada de carbono e um isolante térmico refractário e o fundo da célula é composto por blocos de carbono pré-cozidos e paredes laterais que são revestidas com antarcite parcialmente grafitada em alcatrão de carvão (Prasad, 2000).

De acordo com Goto *et al.* (2016), a célula electrolítica possui dois pólos: o ânodo (eléctrodo positivo, situado na região superior) e o cátodo (eléctrodo negativo, posicionado na base da célula), conforme ilustrado na Figura 4. Na região anódica, formada por carbono, ocorre a reacção com os iões de oxigénio, resultando na queima do carbono e na produção de gás carbónico. Já no cátodo ocorre a deposição dos iões de alumínio, onde se extrai o alumínio primário (Nhone, 2023).

As reacções envolvidas no processo electrolítico podem ser representadas pelas seguintes equações:

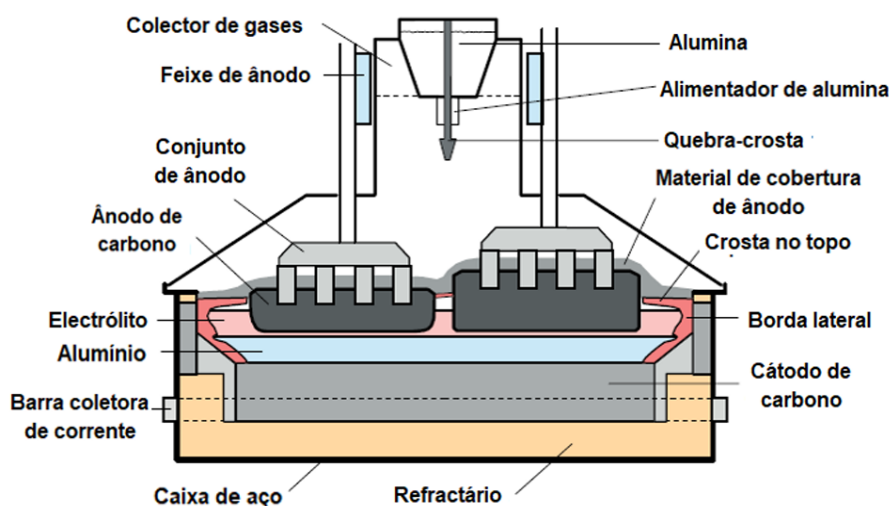
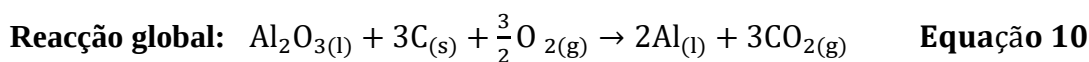
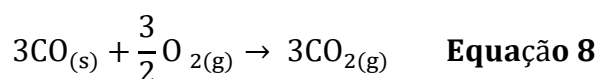
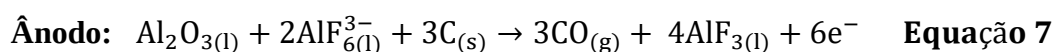


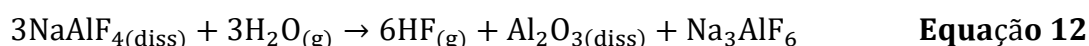
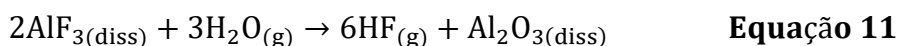
Figura 4: Ilustração da célula de redução de alumina Hall-Héroult para ânodos pré-cozidos

Fonte: Adaptado de Åsheim (2017).

2.1.4. Efluentes gerados no processo de produção do alumínio

À semelhança de qualquer processo industrial, a obtenção do alumínio resulta na geração de excedentes, sendo responsabilidade do gerador garantir a sua destinação ambiental correcta e a mitigação de poluentes (Barbosa, 2025). Durante o processo de fundição do alumínio, são gerados efluentes contendo fluoretos gasosos, poeiras fluoradas e partículas de alumina, as quais requerem tratamento prévio à sua libertação atmosférica (Schultz & Mallmann, 2002).

As descargas de flúor são classificadas em flúor gasoso e particulado. O flúor gasoso é resultante da reacção entre o AlF_3 no banho ou como vapor do banho $NaAlF_4$ com uma fonte de hidrogénio, conforme representando nas Equações 11 e 12; e o flúor particulado é formado quando o vapor do banho condensa, gerando gotículas ou partículas finas de banho que são arrastadas com os gases da célula electrolítica (Nhone, 2023).



2.1.4.1. Importância do controlo do teor de flúor na alumina secundária

Segundo Parker *et al.* (2020) o controlo do teor de flúor na alumina secundária é um aspecto crítico, resultante da interacção entre factores operacionais e qualidade dos insumos. A reciclagem dos fluoretos capturados nos gases de exaustão, realizada por adsorção em alumina ou em outros materiais, constitui uma prática consolidada que visa reduzir a dependência de aditivos externos.

Manter o teor de flúor na faixa de aproximadamente 1,7% a 1,8% é fundamental para garantir a eficiência do processo de reciclagem de flúor na produção de alumina. Essa faixa evita a saturação da alumina com HF, que ocorre quando os níveis de flúor estão acima de 2,7%, o que reduz a eficiência do tratamento e aumenta as perdas de flúor para a atmosfera. Ao garantir que o teor de flúor esteja próximo de 1,7% a 1,8%, é possível otimizar a recuperação de flúor e reduzir a necessidade de adição de matérias-primas caras, como o AlF_3 . Assim, manter o teor de flúor dentro dessa faixa resulta em benefícios económicos e operacionais, ajudando a minimizar custos e a melhorar o desempenho do sistema (Uys, 2007). Quando a alumina secundária contém níveis de flúor elevados (por exemplo, acima de certos limiares operacionais), pode ocorrer saturação de sítios de adsorção ou formação de compostos

fluoretados estáveis (como compostos de alumina-fluoreto) que dificultam a sua reutilização e afectam negativamente o desempenho das células de redução. A saturação compromete a eficiência da captura de HF ou outros gases fluoretados, aumentando o consumo de AlF_3 ou outros aditivos de fluoreto para compensar as perdas (Hyland *et al.*, 2000).

2.1.5. Centro de Tratamento de Gases

No início da década de 1970 foi desenvolvida uma técnica de depuração baseada na utilização de alumina primária para a remoção de contaminantes (Aarhaug & Ratvik, 2019).

O tratamento dos gases é realizado mediante a exaustão dos mesmos, desde as células de redução até ao centro de tratamento. Estes exaustores asseguram a sucção necessária, impedindo a dispersão para as salas de electrolise. Paralelamente, ocorre o fornecimento de alumina primária, que é armazenada em silos e posteriormente injectada nos reactores. Nesse estágio, ocorre a adsorção dos gases pela alumina, a qual prossegue até aos sacos filtrantes, responsáveis por reter o material sólido e permitir apenas a passagem do gás purificado. O resíduo sólido resultante é então conduzido para os silos de armazenamento, destinando-se à subsequente alimentação das células de redução (Ngunga, 2022). A Figura 5 apresenta a configuração esquemática do sistema de tratamento de gases (CTG).

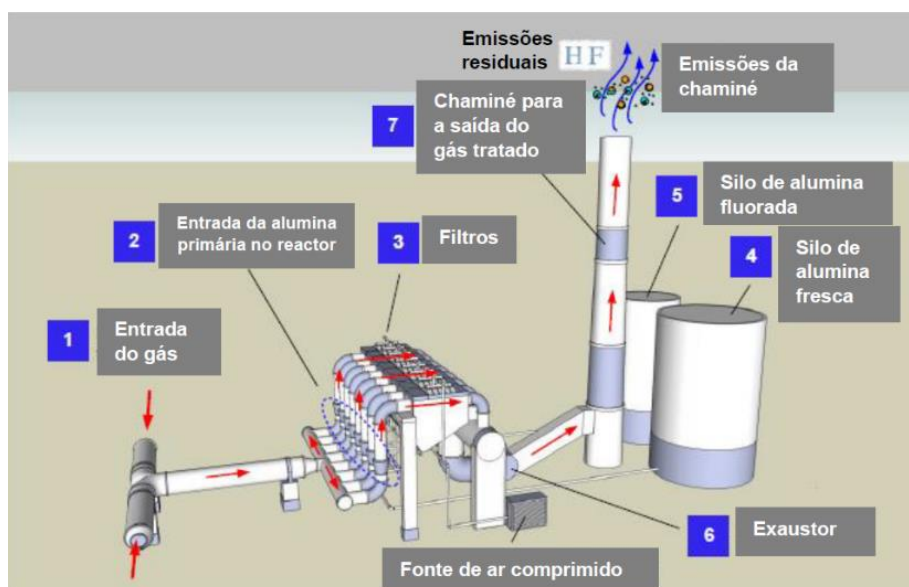


Figura 5: Configuração esquemática do CTG

Fonte: Adaptado de Nhone (2023).

2.1.6. Adsorção

A adsorção é um fenómeno caracterizado pela fixação de moléculas de um fluído (líquido ou gás) sobre a superfície de um sólido, resultando na formação de uma camada interfacial (Alaqarbeh, 2021).

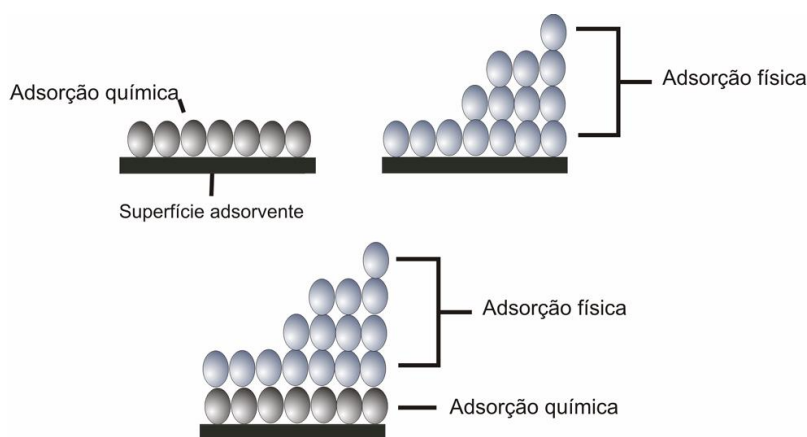
Durante o processo de adsorção, os componentes adsorvidos concentram-se na superfície externa do sólido e a eficiência desse processo depende directamente da área superficial disponível, razão pela qual os materiais porosos são amplamente empregues para essa finalidade. O material acumulado na interface é denominado adsorvato e a superfície sólida que o retém é designada adsorvente (Nascimento *et al.*, 2014).

2.1.6.1. Tipos de adsorção

De acordo com a natureza das forças envolvidas, a adsorção pode ser classificada em dois tipos: física e química.

- **Adsorção física (fisissorção):** caracteriza-se pela ligação fraca do adsorvato à superfície do adsorvente, determinada principalmente pelas forças de Van der Waals, análogas às forças de coesão molecular (Nascimento *et al.*, 2014). O material adsorvido não se incorpora à estrutura cristalina do sólido nem se dissolve, permanecendo apenas aderido à superfície (Camilo, 2024).
- **Adsorção química (quimissorção):** na adsorção química, ou quimissorção, estabelecem-se ligações químicas entre o adsorvato e o adsorvente, por meio do rearranjo da densidade electrónica. Tais ligações podem assumir carácter iónico ou covalente (Alaqarbeh, 2021).

Tanto a adsorção física quanto a química caracterizam-se como processos exotérmicos e a sua entalpia pode ser avaliada pelo monitoramento da variação de temperatura em uma amostra de capacidade calorífica conhecida. Conforme mostra a Figura 6, ao contrário da adsorção química, a adsorção física tende a ocorrer em multicamadas, o que significa que o número de moléculas adsorvidas não está limitado à superfície inicial, permitindo o acúmulo sucessivo delas. Além disso, essas multicamadas resultantes da adsorção física podem ser depositadas sobre uma camada previamente formada por adsorção química (Guimarães, 2016).



Fonte:

Adaptado

Figura 6: Representação esquemática do processo de adsorção física e química.
de Guimarães (2016).

O processo de adsorção pode ser influenciado por diversos factores, destacando-se: as propriedades físico-químicas do adsorvente, como a porosidade (quantidade e dimensão dos poros) e a composição química; as características do adsorvato, tais como tamanho molecular, polaridade e concentração na fase líquida; bem como o tempo de residência do sistema, ou tempo de contacto (Nhone, 2023).

Pela sua eficácia em baixas concentrações, a adsorção é amplamente utilizada para a remoção de contaminantes, sobretudo no tratamento de poluentes, na recuperação de solventes e aproveitamento de compostos de elevado valor económico (Costa, 2015).

A adsorção tem recebido destaque por se tratar de uma técnica de fácil aplicação, de baixo requisito espacial, natureza ecológica e elevada viabilidade económica. Para a remoção de fluoreto, emprega-se comumente alumina activada ou carvão activado, materiais que operam segundo o mesmo princípio de adsorção (Nascimento *et al.*, 2014).

2.1.7. Filtração de gases

A filtração corresponde a um processo de separação no qual partículas sólidas presentes em líquidos ou gases são removidos por um meio filtrante, o qual retém os sólidos e permite a passagem da fase fluída (Camilo, 2024).

A filtração de gases consiste na passagem de uma corrente de ar contaminada por um meio filtrante poroso que captura as impurezas sólidas e deixa passar apenas o fluxo limpo. Essa

operação unitária destaca-se por ser uma das mais antigas, de baixo custo, simples aplicação e elevada eficiência na coleta em ampla faixa granulométrica (Nunes, 2017).

Os filtros de mangas integram a classe de equipamentos utilizados na remoção de partículas sólidas em correntes gasosas. Constituídos por sacos de tecidos, geralmente, dispostos em paralelo, têm grande capacidade e eficiência para limpeza, permitindo que as concentrações de partículas na saída atinjam valores próximos de 2 mg/Nm^3 . Conforme ilustrado na Figura 7, o seu funcionamento baseia-se na passagem da mistura gasosa através do tecido filtrante, no qual o fluído atravessa os poros e as partículas ficam retidas formando, progressivamente, um bolo de filtração que, por sua vez, aumenta a eficiência de retenção de partículas, embora também eleve a resistência à passagem do fluxo gasoso (Bonna, 2021).

O aumento da espessura do bolo de filtração ocorre até que seja atingido um valor limite de perda de carga, momento em que se torna necessária a limpeza das bolsas filtrantes. Essa limpeza é realizada por meio da injeção de ar em sentido inverso, que provoca a expansão das bolsas e sua pulsação, removendo o material particulado acumulado na superfície. Após o desprendimento das partículas, o ciclo de limpeza é finalizado e observa-se a redução da perda de carga. Esse processo ocorre de forma periódica, assegurando que a queda de pressão se mantenha dentro dos limites operacionais, geralmente, entre 160 e 300 daPa (Ngunga, 2022).

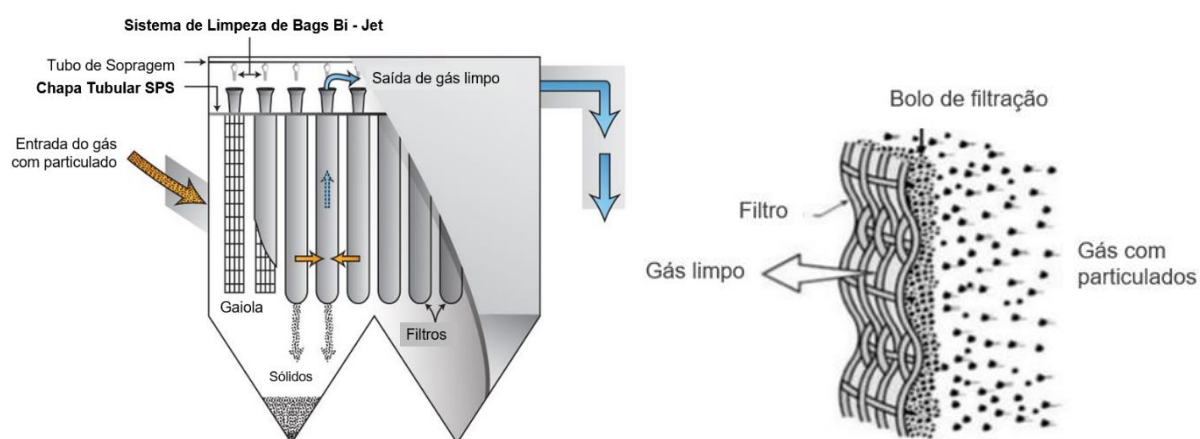


Figura 7: Esquema de funcionamento do filtro de mangas.

Fonte: Adaptado de Bonna (2021).

2.1.8. Métodos Analíticos

O controlo de qualidade nas indústrias de transformação depende das análises qualitativas, a fim de identificar as espécies químicas presentes nas amostras, e das análises quantitativas que indicam a quantidade de cada espécie presente de modo a assegurar que as matérias-primas atendam os padrões exigidos e que o produto final possua a qualidade adequada (Forte *et al.*, 2019).

2.1.8.1. Espectroscopia Ultravioleta-Visível (UV-Vis)

- **Princípio**

A Espectroscopia Ultravioleta-Visível (UV-Vis) é uma técnica analítica que se baseia na interacção da radiação electromagnética na região do ultravioleta e visível com a matéria. Quando uma onda electromagnética atinge uma amostra, pode ocorrer uma série de processos, incluindo a transmissão, absorção, reflexão e dispersão. A Espectroscopia UV-Vis foca-se especificamente no fenómeno de absorção (Alaboodi *et al.*, 2025). Durante a absorção da luz UV ou visível, as moléculas ou iões da amostra sofrem uma transição electrónica, ou seja, os electrões são promovidos de um orbital molecular (ou atómico) de estado fundamental (menor energia) para um orbital molecular do estado excitado (maior energia), utilizando a energia do fóton absorvido (Alaboodi *et al.*, 2025).

- **Lei de Lambert-Beer**

A Lei de Lambert-Beer serve de base para a espectrofotometria por descrever a relação entre absorbância e a transmitância da luz ao atravessar uma amostra (Rosa *et al.*, 2019).

De acordo com princípio de Lambert-Beer, conforme descrito na Equação 1, existe uma relação entre a absorbância de uma solução e a sua concentração, desde que a radiação incidente seja monocromática e composta por raios paralelos (Lima, 2013).

$$A = \varepsilon \times c \times l \quad \text{Equação 13}$$

onde:

A: é a absorbância

c: é a concentração da solução (mol. L⁻¹)

ε : é o coeficiente de absorção molar (L. mol⁻¹cm⁻¹)

l: é o comprimento do caminho óptico (cm)

A relação evidencia que a absorbância varia linearmente com a concentração do soluto e com o comprimento do caminho óptico que a luz percorre na amostra. A lei é válida para soluções

homogêneas e para comprimentos de onda em que o comportamento de absorção é linear (Souza, 2025).

- **Componentes do Espectrofotómetro Ultravioleta-Visível (UV-Vis)**

Os principais componentes do Espectrofotómetro UV-Vis, conforme ilustrado na Figura 8 são: fonte de radiação, monocromador, fendas (selector de comprimento de onda), cuvetas, detector e sistema de processamento e leitura.

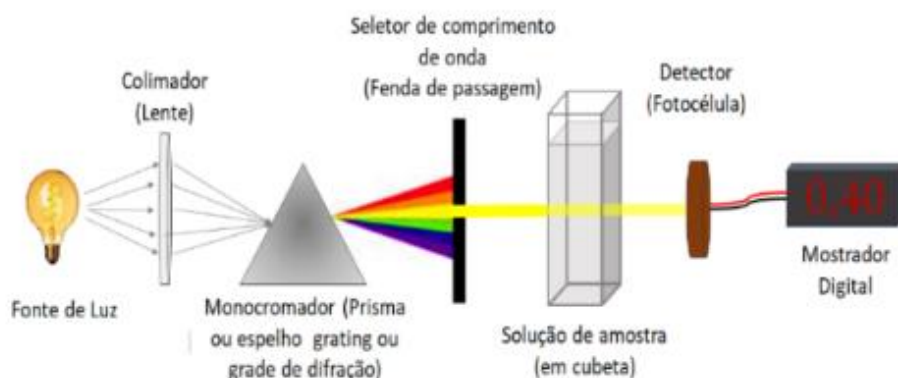


Figura 8: Componentes do Espectrofotómetro Ultravioleta-Visível (UV-Vis).

Fonte: Rosa *et al.* (2019).

2.1.8.2. Espectrometria de Fluorescência de Raios-X (XRF)

- **Princípio**

A Fluorescência de Raios-X (XRF) é um método que permite a identificação e quantificação de elementos químicos em uma dada amostra de forma rápida, precisa e não destrutiva, exigindo apenas uma prévia preparação da amostra de modo a garantir resultados confiáveis (Da Silva, 2020). O princípio da técnica baseia-se na excitação dos átomos da amostra por um feixe de raios-X provocando uma emissão fluorescente, cuja intensidade é directamente proporcional concentração de cada elemento presente na amostra (Neikov & Yefimov, 2019). Quando um átomo é irradiado por raios-X, o mesmo perde um electrão da camada atómica de menor energia, criando um espaço que é ocupado por um electrão de uma camada mais externa, ocorrendo a libertação de energia na forma de fotões de raios-X - fenómeno conhecido como fluorescência (Figura 9). A radiação emitida possui um comprimento de onda característico, permitindo a identificação dos elementos presentes na amostra (Nogueira, 2016).

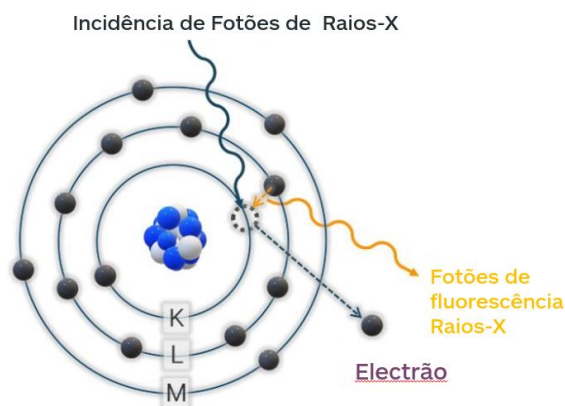


Figura 9: Ilustração do princípio da fluorescência de raios-X.

Fonte: Adaptado de Bruker (2025).

- **Componentes do Espectrómetro de Fluorescência de Raios-X (XRF)**

Os principais componentes do Espectrofotómetro XRF, conforme ilustrado na Figura 10 são: fonte de radiação (raios-X), sistema de colimação ou monocromador, suporte da amostra, amplificador, sistema de electrónica e processamento de dados e computador ou software de análise.

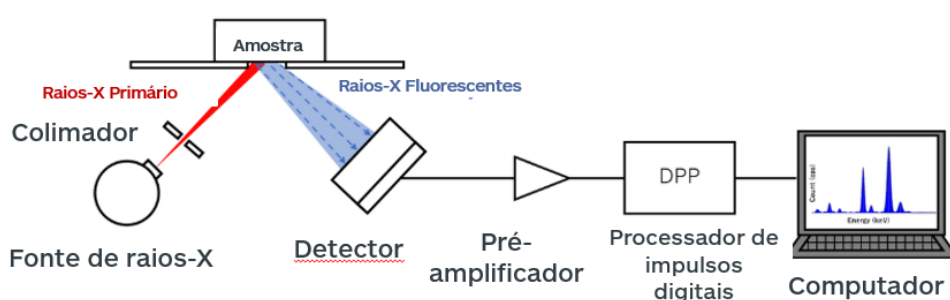


Figura 10: Componentes do Espectrómetro de Fluorescência de Raios-X (XRF).

Fonte: Horiba Scientific (2025).

2.1.8.3. Difracção a laser

- **Princípio**

Introduzida na década de 1970, a técnica de difracção a laser surgiu como uma ferramenta eficiente para a análise do tamanho de partículas devido à sua simplicidade, rapidez e amplitude de leitura. O método baseia-se na dispersão da luz pelas partículas, produzindo um padrão de intensidade tridimensional que depende directamente do tamanho das partículas (Santana, 2017). Conforme descrito por França & Couto (2007), na difracção a laser, as partículas maiores dispersam a luz em ângulos menores, enquanto partículas menores difractam a luz em ângulos maiores.

- **Componentes do Granulómetro por Difracção a laser**

O granulómetro por difracção a laser, conforme ilustrado na Figura 11, possui os seguintes componentes básicos: fonte de luz (laser), célula da amostra, sistema de óptica (lentes e espelhos), detector de luz, sistema de electrónica e processamento de dados, computador ou software de análise e sistema de circulação.

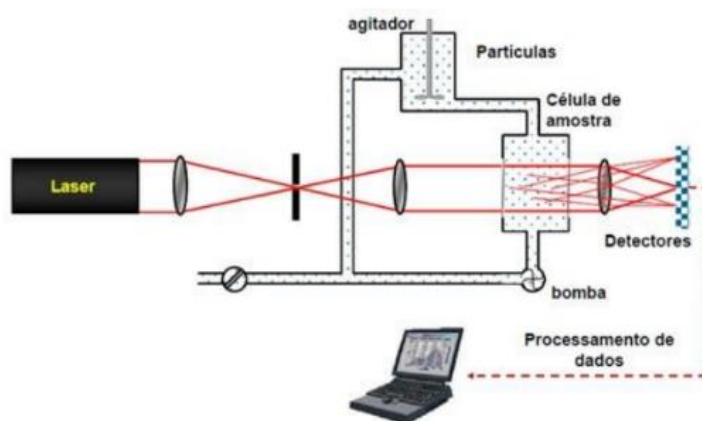


Figura 11: Componentes do Granulómetro por Difracção a laser.

Fonte: Oliveira *et al.* (2016).

3. Descrição do local de estudo

O estágio foi realizado na MOZAL *Aluminium*, uma empresa de fundição de alumínio, situada no Parque Industrial de Beluluane, a aproximadamente 20 Km a Oeste da cidade de Maputo, no distrito de Boane, na província de Maputo, entre Março e Novembro de 2025. A Figura 12 apresenta o mapa espacial da planta e da localização da MOZAL.

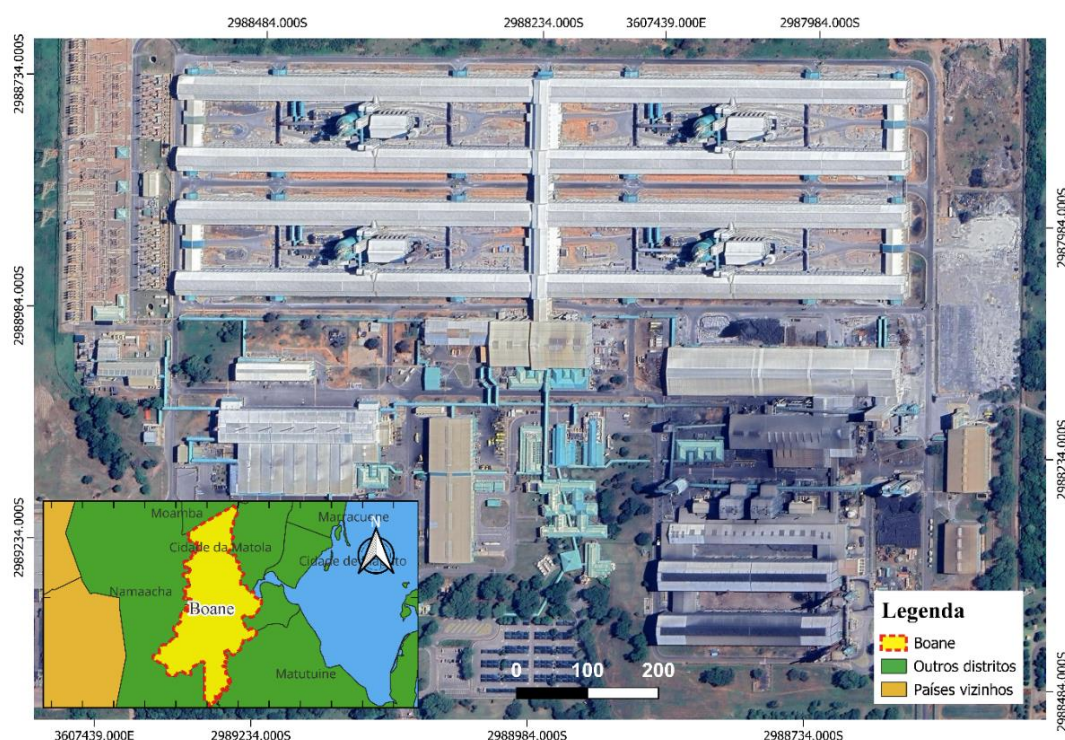


Figura 12: Mapa espacial e localização da MOZAL

Fonte: *Google Maps*.

A MOZAL *Aluminium*, fundada em Julho de 1998 e inaugurada em Setembro de 2000, é a segunda maior fundição de alumínio de África, depois da Hillside *Aluminium*, com a capacidade de produzir anualmente até 580.000 toneladas de metal sólido (Nhone, 2023).

Reconhecida pela produção de alumínio primário de alta qualidade, a MOZAL abastece os mercados doméstico e internacional, contribuindo com cerca de 3% para o PIB nacional e empregando milhares de funcionários e contratados (South32, 2025).

3.1. Processo de produção de alumínio na MOZAL: Estrutura Operacional

A MOZAL emprega o Processo Hall-Héroult, que permite a produção diária de aproximadamente 1.550 toneladas de alumínio. O fluxo produtivo está dividido em quatro departamentos principais: Carbono, Redução, Casa de Fundição, Tratamento e Logística.

Departamento de Carbono (*Carbon*): tem a função de produzir, armazenar e fornecer ânodos de alta qualidade utilizados no processo da electrólise no departamento da redução, além de fornecer o coque utilizado na preparação dos potes de electrólise. A produção dos ânodos inicia com a preparação da pasta, seguida da moldagem e compactação, resultando no ânodo verde, que posteriormente passa por um processo de cozedura para adquirir resistência mecânica e melhores propriedades eléctricas e, posteriormente procede-se à fixação da haste condutora.

Departamento de Redução (*Reduction*): tem como principal função produzir alumínio líquido de alta pureza e maximizar a eficiência das linhas de potes. O processo ocorre em 2 linhas de produção (*potlines*), onde cada linha contém 2 salas de redução (*potrooms*), totalizando 4 *potrooms*. Cada *potroom* possui 144 potes electrolíticos, resultando em 576 potes no total. Nestes potes, a alumina é introduzida no electrolito mantido a aproximadamente 960°C. A passagem da corrente eléctrica assegura a manutenção dessa temperatura e promove a dissociação da alumina em alumínio e oxigénio. O alumínio líquido deposita-se no fundo do pote, enquanto o oxigénio libertado reage com o carbono do ânodo, formando dióxido de carbono (CO₂). Após o processo de redução faz-se o enchimento das panelas com metal líquido nos *potrooms* que é transportado até ao departamento de fundição.

Departamento de Fundição (*Cast House*): a casa de fundição recebe o alumínio líquido do departamento de redução, prepara e molda o alumínio líquido em lingotes de modo a enviá-los para o porto. Chegado a casa de fundição, a panela contendo o metal líquido é colocada na fornalha, que então vira e despeja o metal para o canal que transporta o metal líquido para a roda de fundição e esta de forma contínua e uniforme enche os moldes de fundição do transportador com o metal líquido entre 730°C – 770°C. Ocorre o arrefecimento dos moldes até uma temperatura de 500°C – 550°C, através da passagem de água por debaixo dos moldes, solidificando e assim dando os lingotes que são passados para o próximo transportador. Após isso, o transportador passa por um túnel de arrefecimento que pulveriza água a alta pressão por cima dos lingotes para os arrefecer directamente para 45°C. Depois de arrefecidos os lingotes

são organizados em camadas e estas por sua vez em pacotes de 1 tonelada métrica cada e 44 lingotes.

Departamento de Tratamento e Logística (T&L): desempenha um papel essencial de apoio operacional aos sectores produtivos da MOZAL (Carbono, Fundição e Redução), garantindo tanto o tratamento adequado dos gases e fumos gerados no processo quanto a gestão das subestações. Além disso, é responsável pela logística de entrada e saída, assegurando o transporte das matérias-primas até à fábrica e dos lingotes produzidos até ao porto, bem como por operações externas ao processo produtivo. O departamento está subdividido em:

- **Laboratório:** está voltado às análises de controlo de qualidade de matérias-primas, subprodutos, resíduos e metal produzido de todos os departamentos de produção, monitorizando os impactos de todas as operações considerando a saúde, a segurança e o ambiente interno e externo.
- **Centro de Tratamento de Gases (CTG):** é responsável pela captação e tratamento dos gases gerados no processo de redução nos potes, conduzindo-os ao reactor, onde a alumina fresca é injectada no fluxo gasoso, reagindo com os fluoretos. Nesse percurso, os gases impuros são filtrados e tornando-se limpos. A alumina que contém o flúor é armazenada em silos e reutilizada no processo de redução.
- **Centro de Tratamento de Fumos (CTF):** tem a função de extrair e tratar os fumos provenientes do forno de cozedura dos ânodos. Os fumos são arrefecidos, permitindo a remoção de poeiras, fluoretos e alcatrão. Em seguida, são conduzidos a um reactor onde a alumina fresca é injectada, que reage com os fluoretos. A mistura gás-alumina passa por filtros onde os fluoretos fixam-se à alumina; poeiras e a alumina capturada são armazenadas em silos e então encaminhadas ao Centro de Tratamento de Gases.
- **Planta de Reciclagem de Banho (Bath Plant):** tem como função principal processar e recuperar materiais residuais gerados em diversos pontos da fábrica de alumínio, permitindo a sua reutilização no processo de redução. A planta actua na reciclagem dos resíduos do banho, provenientes das células de redução, do revestimento interno das panelas do departamento de fundição, e das varetas limpas no departamento de carbono.
- **Porto:** é a área responsável por toda a cadeia logística, desde a importação, recepção, armazenamento (em tanques e silos) e transporte interno de matérias-primas — como alumina, coque, alcatrão e trifluoreto de alumínio — até à sua distribuição para a unidade

de produção. Inclui também a gestão da exportação dos lingotes de alumínio, abrangendo o seu manuseamento, armazenamento e envio

3.2. Centro de Tratamento de Gases da MOZAL

A fim de purificar os gases gerados nas células de redução, a MOZAL dispõe de 4 Centros de Tratamento de Gases, conforme ilustrado na Figura 13. A sua configuração estrutural compreende 2 linhas de redução (*potlines I e II*) e 4 salas de redução (*potrooms A, B, C e D*), com 144 células em cada *potroom* destinadas ao tratamento dos gases gerados no processo.



Figura 13: Disposição dos CTG ao longo das linhas de produção.

Fonte: Adaptado de Club of Mozambique (2024).

3.2.1. Processo de funcionamento do Centro de Tratamento de Gases

Cada Centro de Tratamento (CTG) da MOZAL é responsável pelo tratamento dos gases provenientes de 144 potes de redução (distribuídos em quatro conjuntos de 36 potes), garantindo a remoção de compostos de flúor e a reciclagem da alumina. O processo é sustentado por três circuitos interligados — circuito de gás, circuito de alumina primária e circuito de alumina secundária— que funcionam de forma contínua e sinérgica.

• Circuito do Gás

O circuito de gás em cada CTG tem início com a sucção dos gases quentes (100 a 145 °C), provenientes dos potes. Essa aspiração ocorre por meio de um sistema de exaustão que mantém pressão negativa constante, conduzindo os gases através de 8 entradas colectoras que convergem para duas condutas principais, uma para o lado norte e outra para o lado sul, cada qual ligada a 72 potes. Caso a temperatura dos gases esteja excessivamente alta, abafadores promovem a diluição com ar para um arrefecimento adequado. Os gases, então, são conduzidos até ao reactor Venturi. Neste equipamento ocorre a primeira e crucial etapa de tratamento, quando os gases entram em contacto com a alumina primária, que adsorve e remove os compostos de flúor. A mistura de gás e partículas sólidas segue para os filtros de mangas Vibrair (13 filtros por CTG), onde a alumina fluorinada (alumina secundária) se deposita na superfície das mangas, formando uma camada que aprimora a filtragem do flúor residual. Após atravessarem os filtros, os gases agora limpos passam pelo exaustor principal, que garante o fluxo contínuo e a pressão negativa de todo o sistema, sendo finalmente libertados para a atmosfera através da chaminé do CTG. Todo este percurso é monitorizado por sensores e controlado por um sistema computadorizado que regula variáveis como temperatura e pressão. A Figura 14 mostra a representação esquemática do circuito do tratamento de gases.

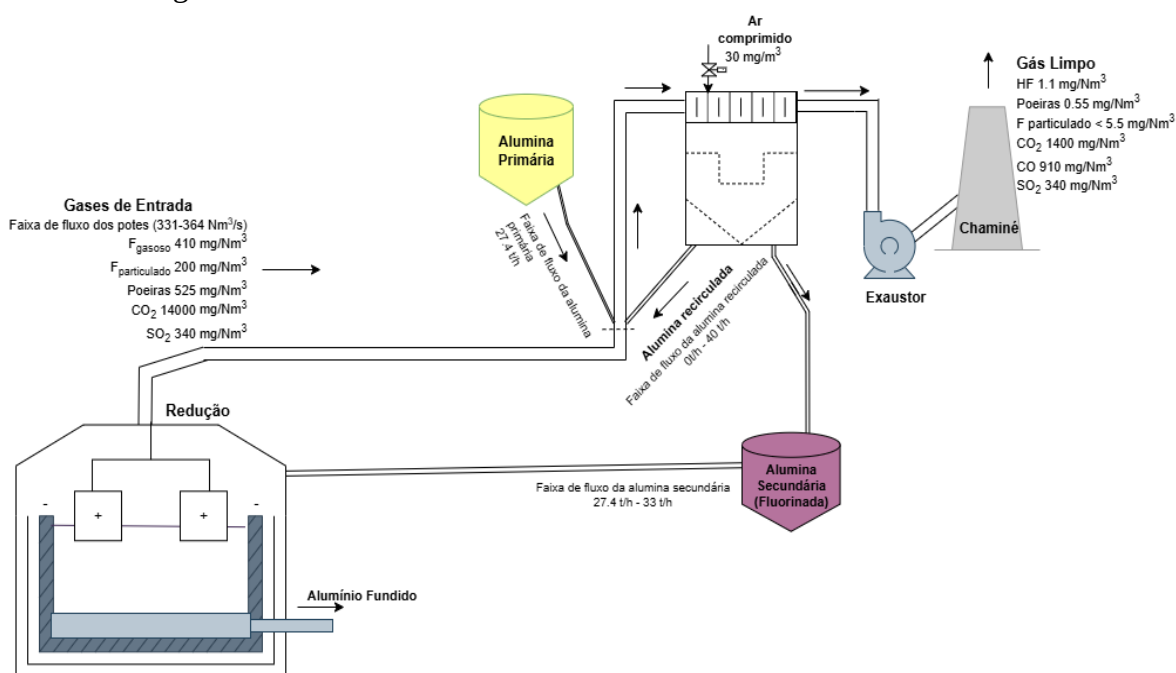


Figura 14: Diagrama do Circuito do Gás.

- **Circuito da Alumina Primária**

O circuito de alumina primária começa com a sua descarga subterrânea, de onde é elevada, pneumáticamente, para um tanque de expansão e, subsequentemente, transportada para um silo de grande capacidade. Antes de entrar no processo, a alumina é peneirada para remover impurezas e pesada para controlar o fluxo. Através de uma caixa de distribuição, é repartida de forma equitativa para cada filtro e, por fim, injectada no reactor Venturi, onde se dá o contacto com os gases.

- **Circuito da Alumina Secundária**

Do contacto entre os gases e a alumina, resulta a alumina secundária agora carregada com flúor. Esta mistura é conduzida aos filtros, onde a alumina se acumula. Durante a limpeza automática das mangas por pulsos de ar, a alumina secundária cai em tremonhas. A partir daí, o material pode seguir dois caminhos: ser recirculado directamente para o reactor Venturi para garantir a continuidade do processo ou em caso de enchimento excessivo da tremonha, ser removido. Neste caso, a alumina secundária é novamente transportada por fluidização, peneirada, amostrada e armazenada em silos dedicados. Por fim, é distribuída de forma uniforme de volta para as células de redução através de um sistema de fase hiper-densa (HDPS), completando assim o ciclo e reintegrando ao processo os materiais capturados.

4. Parte Experimental

4.1. Diagrama de Causa e Efeito (Diagrama de Espinha de Peixe)

O Diagrama de Causa e Efeito, também conhecido como Diagrama de Ishikawa, é uma ferramenta utilizada na gestão de qualidade que auxilia na identificação das causas-raízes de um problema, permitindo a análise dos factores que afectam a execução do processo (Costa & Mendes, 2018).

Tendo em vista os possíveis factores associados à instabilidade nos níveis de flúor, elaborou-se um Diagrama de Causa e Efeito com o objectivo de identificar e analisar de forma sistemática todas as causas potenciais relacionadas ao problema em estudo, conforme apresentado na Figura 15. O desenvolvimento do diagrama partiu da definição clara do problema central, que foi estabelecido como: “Factores que Influenciam os Teores de Flúor na Alumina Secundária”. Este efeito foi posicionado na "cabeça" do peixe, à direita do diagrama. Posteriormente, foram identificadas as principais categorias de causas, frequentemente referidas como os 6 M's, que constituem as "espinhas" principais da estrutura. As categorias adoptadas para este estudo foram:

- **Mão de Obra (Pessoas):** Relacionada à influência humana no processo.
- **Matéria-Prima:** Referente às características e variabilidade dos insumos.
- **Método:** Abordando os procedimentos e protocolos operacionais.
- **Medição:** Envolvendo a precisão e confiabilidade dos equipamentos e técnicas de análise.
- **Meio Ambiente:** Considerando as condições externas e internas que possam afectar o processo.
- **Equipamento:** Relacionada ao estado e funcionamento da maquinaria e instrumentos.

Para cada uma dessas categorias, conduziu-se uma sessão de brainstorming e análise técnica para levantar as causas específicas que poderiam impactar a estabilidade do flúor. Cada causa identificada foi então posicionada como uma "espinha" menor, conectada à sua respectiva categoria principal. Apesar de o Diagrama de Ishikawa permitir a identificação de um conjunto alargado de potenciais causas, nem todos os factores puderam ser analisados no âmbito deste trabalho. A análise centrou-se nos factores que reuniam, simultaneamente, relevância técnica,

acessibilidade, autorização institucional e possibilidade de quantificação dentro do período definido para o estudo, correspondendo estes às variáveis assinaladas a vermelho.

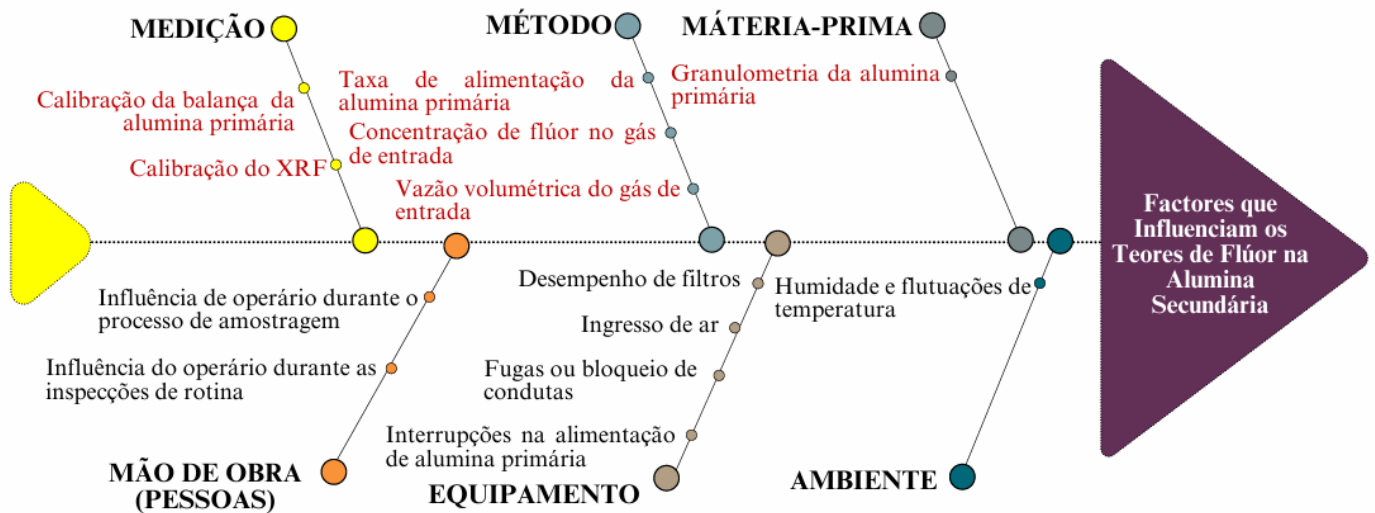


Figura 15: Diagrama de Causa e Efeito.

4.2. Materiais, equipamentos e reagentes

Os materiais, equipamentos e reagentes necessários para a realização da amostragem e dos ensaios laboratoriais encontram-se listados na Tabela 3.

Tabela 3: Materiais, reagentes e equipamentos necessários.

Materiais	Equipamentos	Reagentes
Espátulas	Balança analítica (<i>Mettler Toledo AT400, d= 0,1 mg</i>)	Solução de Na ₂ CO ₃ (20 e 50 g/L)
Vidro relógio	Mufla (<i>Labcon Furnace S444/011</i>)	Solução de NaF (190 mg/L)
Béquers (50 mL)	Placa de aquecimento e agitador magnético	Solução de Alizarina
Erlenmeyer	Exsicador	Solução de HCl (1:1)
Pipetas graduadas (5, 20, 25 mL)	Manómetro	Solução de NaOH (40 mg/L e 200 g/L)
Micropipetas (100, 200 µL)	Ionómetro	Solução de Titrisol
Pinças resistentes ao calor	Cronómetro	Solução TISAB II
Barras magnéticas	Tubo Pitot (1,5 m e 2,5 m)	NaOH (s)
Almofariz e pistilo	Capela de Exaustão de gases	Na ₂ O ₂ (s)
Filtros de nitrato de celulose (d=90 mm e 0,8 µm)	Sonda de amostragem	Solução de H ₂ SO ₄
Cartucho de celulose (30×100 mm)	Espectrofotómetro UV-Vis (<i>PerkinElmer Lambda 20</i>)	Solução de H ₃ PO ₄
Suporte de Filtro	Espectrómetro de XRF (<i>Thermo Scientific</i>)	Água destilada
Suporte de cartucho	Aparelho de destilação	Indicador fenolftaleína
Borbulhadores (conjunto de 3 garrafas de acrílico de 2L com fritas de difusão)	Forno de produção de pastilhas vítreas (<i>Fusion Bead Casting Machine F-M4</i>)	Reagente Flux (20% Tetraborato de lítio) (80% Metaborato de lítio)
Acoplamentos de mangueira	Misturador tridimensional de pós (<i>Turbula</i>)	Tampão sulfosalicílico

Tubos flexíveis ($l=2\text{ m}$ e $d=5\text{ mm}$)	Aparelho de destilação	Solução de KCl (3 mol/L)
Fita adesiva de Teflon	Analizador granulométrico por difracção a laser (<i>Mastersizer Malvern Panalytical</i>)	
Cadinho de níquel	Bomba de amostragem	
Balões volumétricos (50, 100, 250 mL)	Estufa (<i>Labcon Furnace</i>)	
Proveta (1 L)		

4.3. Amostragem

Para a realização do presente estudo, procedeu-se à recolha de amostras entre Março e Julho de 2025, de acordo com a norma operacional padrão da empresa (SOP000725, SOP000728).

4.3.1. Amostragem do gás de entrada do CTG

4.3.1.1. Preparação dos materiais e equipamentos

Fez-se a limpeza da sonda de amostragem e do suporte do cartucho de celulose com ar comprimido, a fim de remover quaisquer poeiras ou partículas. O cartucho de celulose foi submetido a secagem em uma estufa a $110 \pm 5\text{ °C}$ durante 2 h. Em seguida, o cartucho foi transferido para um exsicador, de modo a arrefecer até atingir a temperatura ambiente. Após esse período, procedeu-se à pesagem do cartucho de celulose com o auxílio de uma balança analítica (m_I) e por fim, o mesmo foi colocado em um suporte apropriado e anexado à sonda. Foram preparados três borbulhadores por meio da adição de uma solução de Na_2CO_3 (50 g/L). Os recipientes foram preenchidos com 600 mL, 500 mL e 0 mL, respectivamente, e posteriormente fixados entre si com fita adesiva. A Figura 16 ilustra os equipamentos usados para a amostragem.

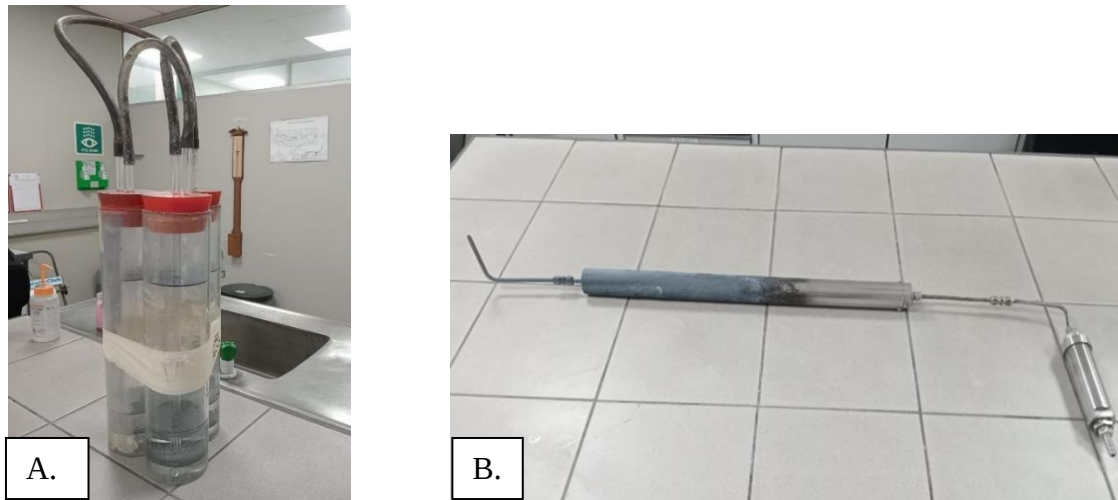


Figura 16: Equipamentos utilizados durante o processo de amostragem.

A- Borbulhadores; B- Sonda de amostragem

4.3.1.2. Processo de amostragem

Iniciou-se a amostragem com a avaliação das condições do local de amostragem e montagem dos equipamentos, na qual foi determinado o fluxo do gás nos pontos de amostragem, por meio da medição das pressões dinâmicas e estáticas, realizadas com auxílio de um manómetro acoplado ao tubo de Pitot (Figura 17). Fez-se a leitura da temperatura no sistema operativo conectado aos sensores instalados no CTG.



Figura 17: Manómetro e Tubo Pitot.

Fonte: Sauermann (2019).

A extremidade de saída do suporte do cartucho foi conectada ao tubo de entrada do borbulhador 1 (contendo 600 mL de Na_2CO_3) utilizando a mangueira flexível mais curta possível para minimizar perdas e contaminação; em seguida, o tubo de saída do borbulhador 1 foi ligado ao tubo de entrada do borbulhador 2 (contendo 500 mL de Na_2CO_3), e o tubo de saída deste foi conectado ao tubo de entrada do borbulhador 3, deixado vazio como garante final; por fim, o tubo de saída do último borbulhador foi acoplado à entrada da bomba de amostragem, responsável por fornecer a pressão negativa necessária para garantir a sucção do gás de entrada para o equipamento, tal como ilustrado na Figura 18. Procedeu-se ao monitoramento das condições de amostragem (velocidade do gás no sistema de amostragem de gases em série e quantidade de solução de carbonato de sódio nos borbulhadores) e remoção do equipamento após 2 h de amostragem. A frequência de amostragem foi realizada de forma alternada entre os diferentes pontos com o objectivo de garantir uma cobertura representativa.



Figura 18: Processo de amostragem do gás de entrada.

A Figura 19 apresenta a esquematização do sistema de amostragem de gases em série.

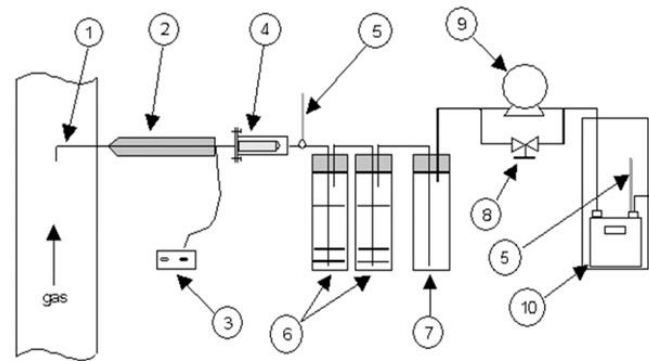


Figura 19: Esquema do sistema de amostragem de gases em série.

Fonte: Mozal (2022)

onde:

- | | | |
|--|---------------------------------------|------------------------|
| 1: Sonda; | 4: Suporte para cartucho de celulose; | 8: Válvula; |
| 2: Peça de extensão da sonda aquecida; | 5: Termostato; | 9: Bomba; |
| 3: Sistema de controlo de aquecimento; | 6: Borbulhadores 1 e 2; | 10: Contador de fluxo. |
| | 7: Borbulhador 3 ; | |

4.3.2. Amostragem da alumina secundária

A amostragem da alumina secundária foi realizada diariamente por meio de um amostrador automático, ilustrado na Figura 20, o qual dispõe de um sistema automatizado que retira, de forma periódica, alíquotas de alumina provenientes de todos os filtros, garantindo a representatividade da amostra.



Figura 20: Amostrador automático de alumina secundária.

4.4. Análises laboratoriais

As análises laboratoriais foram realizadas pela própria empresa, de acordo com as suas rotinas operacionais e normas operacionais padrão (SOP001075 e SOP000957), sendo os resultados obtidos a partir da plataforma interna da mesma. Importa referir que, embora as análises não tenham sido executadas directamente pela autora, estas foram acompanhadas durante o seu decorrer, permitindo a compreensão dos procedimentos adoptados.

4.4.1. Determinação do teor de flúor no gás de entrada do CTG

4.4.1.1. Preparação da amostra e determinação do flúor gasoso

A preparação da amostra para a determinação do flúor gasoso deu-se em 4 etapas: preparação do SPC (solução padrão de controlo), que é uma solução conhecida de flúor preparada a partir de NaF, preparação das soluções-padrão para calibração, tratamento da amostra e análise da amostra por espectroscopia UV-VIS.

A Figura 21 ilustra as soluções-padrão de flúor e de SPC preparadas.



Figura 21: Solução-padrão de flúor e SPC.

As análises foram realizadas com recurso ao espectrofotómetro PerkinElmer Lambda 25, conforme ilustrado na Figura 22, um equipamento de espectroscopia UV-VIS (Ultravioleta-Visível). O espectrofotómetro está acoplado ao sistema operativo PerkinElmer UV WinLab, que possibilita a configuração de experimento, a aquisição e análise de dados.



Figura 22: Espectrofotómetro UV-VIS

4.4.1.2. Preparação da amostra e determinação do flúor particulado

A determinação do flúor particulado compreendeu três etapas principais: preparação da amostra, destilação e análise por espectrofotometria UV-VIS.

Para a preparação da amostra, o cartucho de celulose contendo o material particulado foi seco em estufa, arrefecido em um exsiccador e pesado, permitindo determinar a massa de poeira por

diferença de massas. Posteriormente, o material foi submetido a um processo de tratamento térmico e químico, envolvendo impregnação com reagentes alcalinos, calcinação e fusão, com o objectivo de garantir a completa solubilização do flúor presente na amostra. Após o arrefecimento, a amostra foi dissolvida em água destilada, originando uma solução adequada para a etapa seguinte.

A destilação foi realizada em meio ácido, permitindo a separação do flúor sob a forma volátil. O destilado obtido foi recolhido e sujeito a diluições sucessivas, de modo a ajustar a concentração para a faixa de medição do método analítico.

Por fim, a quantificação do flúor foi efetuada por espectrofotometria UV-VIS, seguindo as mesmas directrizes apresentadas na secção 4.4.1.1. As amostras foram analisadas considerando os fatores de diluição resultantes do processo de destilação, sendo a concentração determinada por comparação com padrões previamente preparados. A Figura 23 apresenta o esquema da destilação.

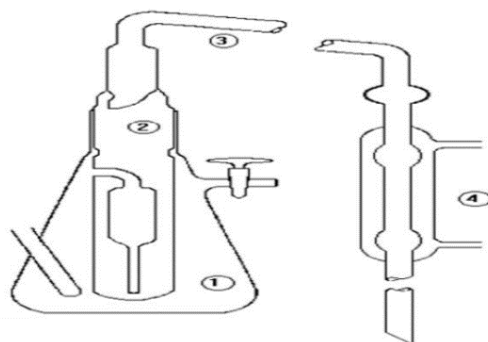


Figura 23: Esquema de Destilação.

Fonte: Mozal (2023)

onde:

1: Kitassato;

4: Condensador.

2: Extractor;

3: Conector;

4.4.2. Determinação da granulometria da alumina

Para a análise granulométrica da alumina, utilizou-se um analisador por difracção a laser (*Mastersizer 3000, Malvern Panalytical*), ilustrado na Figura 24. Após a inicialização do sistema do instrumento e o preenchimento da célula de medida com o dispersante apropriado (água, no caso da unidade hidrodinâmica *Mastersizer S*), uma pequena quantidade da amostra foi adicionada à célula sob agitação até que o valor de obscuração, monitorizado em tempo real no software, se estabilizasse na faixa ideal entre 15,0% e 20,0%. Uma vez atingida essa condição, deu-se início à aquisição automática dos dados, que consistiu em múltiplas leituras para garantir a representatividade estatística da distribuição de partículas.



Figura 24: Analisador de granulometria por difracção a laser.

4.4.3. Determinação do teor de flúor na alumina secundária

Para a determinação do teor de flúor na alumina secundária, as amostras foram inicialmente homogeneizadas com o reagente Flux em proporções adequadas, recorrendo a um misturador tridimensional de pós Turbula, conforme ilustrado na Figura 25.

Após a homogeneização, a mistura foi submetida a um processo de fusão em equipamento de produção de pastilhas vítreas *Fusion Bead Casting Machine F-M4*, conforme apresentado na Figura 26, operando a alta temperatura.

Durante este processo, a amostra fundida foi convertida em pastilhas homogêneas (Figura 27) garantindo a completa incorporação do flúor na matriz vítrea. Após a fusão, as pastilhas foram arrefecidas até à solidificação completa pela presença das luzes verdes no painel do equipamento, originando pastilhas vítreas prontas para análise.



Figura 25: Misturador Tridimensional de pós - Turbula



Figura 26: Forno de pastilhas vítreas.



Figura 27: Amostras em forma de pastilhas vítreas.

4.4.3.2. Análise da amostra por Espectrometria de Fluorescência de Raios-X (XRF)

Para a análise, foi utilizado um Espectrómetro de Fluorescência de Raios-X (*Thermo Scientific*) por dispersão de comprimento de onda, conforme ilustrado na Figura 28. As amostras foram inseridas no equipamento e devidamente registadas no software associado, de acordo com o número de identificação e a ordem de inserção.



Figura 28: Espectrómetro de Fluorescência de Raios-X.

4.4. Tratamento Estatístico dos dados

Os testes estatísticos foram realizados utilizando as ferramentas de análise de dados *Minitab* e *Microsoft Excel*, visando assegurar a fiabilidade e a robustez das análises.

Inicialmente, fez-se o teste de outliers através do Método do Intervalo Interquartil (IQR), tendo-se confirmado a presença de valores atípicos na amostra. Em seguida, para avaliar a normalidade dos dados aplicou-se o teste de Anderson-Darling e empregou-se o teste de Kruskal-Wallis com o objectivo de avaliar se existiam diferenças estatisticamente significativas entre as medianas mensais dos parâmetros monitorados. Complementarmente, foi realizada uma análise de correlação de Spearman com o objectivo de identificar a força e a direcção das relações entre o teor de flúor na alumina secundária e as variáveis operacionais do processo no Centro de Tratamento de Gases.

A interpretação dos resultados foi conduzida com base nas seguintes hipóteses estatísticas:

- **Teste de Anderson-Darling (Normalidade dos Dados)**

Hipótese nula (H_0): $p \geq 0,05 \rightarrow$ Os dados seguem uma distribuição normal;

Hipótese alternativa (H_1): $p < 0,05 \rightarrow$ Os dados não seguem uma distribuição normal.

- **Teste de Kruskal–Wallis (Diferença entre Grupos)**

Hipótese nula (H_0): $p \geq 0,05 \rightarrow$ as medianas dos grupos são estaticamente iguais.

Hipótese alternativa (H_1): $p < 0,05 \rightarrow$ pelo menos uma das medianas difere significativamente.

- **Correlação de Spearman (Relação entre Variáveis)**

Hipótese nula (H_0): Não existe correlação monotónica entre X e Y ($\rho = 0$);

Hipótese alternativa (H_1): Existe correlação monotónica entre X e Y ($\rho \neq 0$).

5. Resultados e Discussão

Nesta secção são apresentados e discutidos os resultados obtidos a partir da análise dos principais factores associados às variáveis de medição, aos métodos operacionais e à matéria-prima que afectam os teores de flúor na alumina secundária;

Para tal, procedeu-se à recolha, sistematização de dados relevantes e de seguida foi realizada a análise estatística descritiva dos parâmetros avaliados, complementada por um tratamento estatístico que permitiu identificar relações significativas entre as variáveis e apoiar a interpretação dos resultados à luz da literatura especializada.

5.1. Resultados das análises dos variáveis monitoradas

As tabelas contendo os dados das variáveis monitoradas, nomeadamente, níveis de flúor na alumina secundária, granulometria da alumina primária, taxa de alimentação da alumina primária, vazão do gás de entrada, concentração de flúor no gás de entrada e os resultados do erro da calibração da alumina primária encontram-se apresentadas nos Anexos deste trabalho, de modo a complementar e sustentar as análises realizadas.

5.1.1. Análise dos níveis de flúor na alumina secundária

Na análise dos níveis de flúor na alumina secundária, observou-se uma variabilidade significativa ao longo do período monitorizado. O gráfico ilustrado na Figura 29 evidencia que os valores diários do teor de flúor flutuam em torno do limite inferior (LI) de 1,690% F e do limite superior (LS) de 2,50% F, apresentando oscilações abaixo do limite inferior estabelecido, indicando uma instabilidade na operação.

A análise mensal, ilustrada na Figura 30, mostra que a média do teor de flúor em cada mês se mantém relativamente estável, com valores médios entre 1,672% F (Julho) e 1,799% F (Março), contudo, os desvios padrões revelam variações consideráveis dentro de cada mês, sendo que o maior desvio padrão foi observado em Março (0,293) e o menor em Fevereiro (0,171).

Estes resultados indicam que, apesar das médias mensais estarem próximas do limite inferior, existe uma dispersão relevante dos dados diários que precisa ser considerada para a gestão do processo.

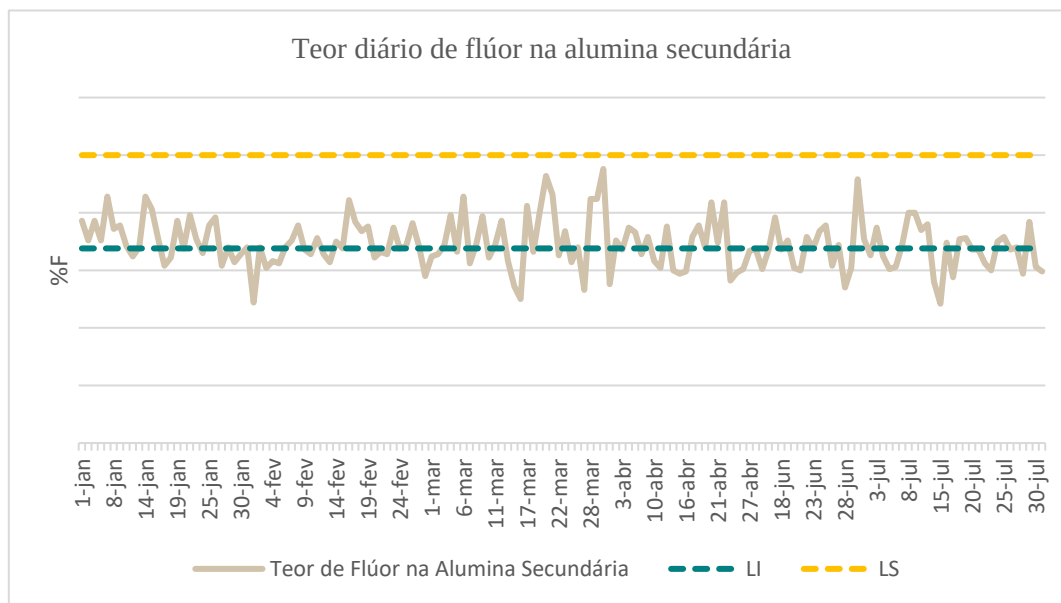


Figura 30: Gráfico do teor diário de flúor na alumina secundária.

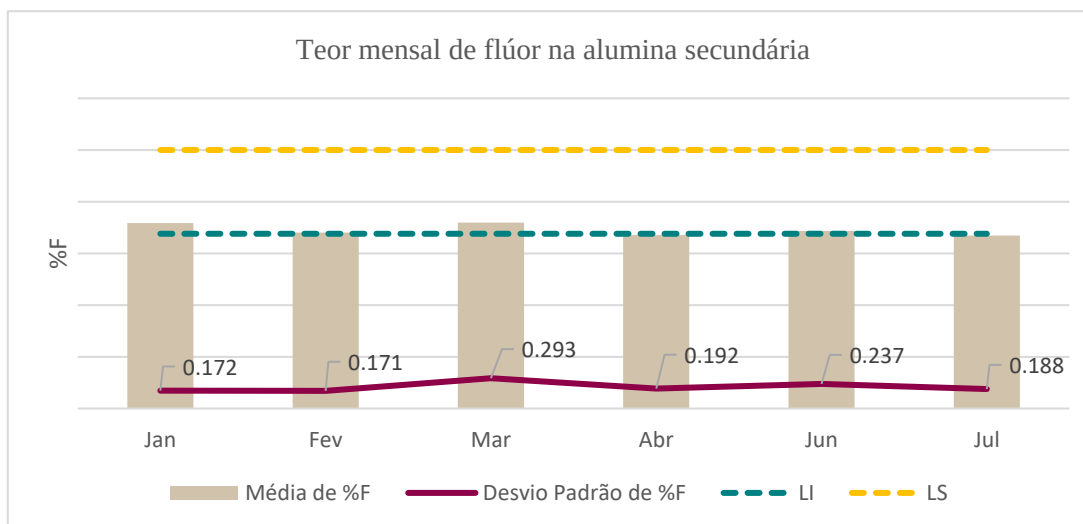


Figura 29: Gráfico do teor mensal de flúor na alumina secundária.

5.1.2. Análise da granulometria da alumina primária

A alumina primária utilizada no processo é fornecida por uma empresa internacional, sendo que cada lote é acompanhado por uma amostra representativa de controlo, devidamente identificada e acondicionada. É essa amostra de controlo que é submetida às análises laboratoriais utilizadas para a caracterização e verificação da qualidade do lote recebido.

Conforme ilustrado na Figura 31, os valores médios da área superficial específica (SSA) da alumina primária mantiveram-se relativamente estáveis, variando entre 0,091 e 0,105 m²/g. De acordo com Alves (2017), a área superficial da alumina é fortemente influenciada pela

temperatura de calcinação. Aluminas submetidas a temperaturas elevadas tendem a apresentar valores de SSA inferiores a 5 m²/g, indicando estruturas com baixa porosidade, enquanto aluminas calcinadas em temperaturas mais brandas apresentam SSA significativamente superiores (entre 80 e 100 m²/g), reflectindo maior porosidade e capacidade de adsorção.

No contexto do tratamento de gases, a fracção de partículas finas (partículas inferiores a 20 µm e 45 µm) é um parâmetro de grande importância, pois influencia directamente a eficiência de adsorção do fluoreto de hidrogénio (HF). Teores muito baixos reduzem a reactividade do material e, consequentemente, a capacidade de captura de flúor, enquanto teores excessivos podem aumentar a perda de carga no leito e dificultar o fluxo de gases. Assim, os valores observados ao longo do período estudado — entre 8 e 11% para partículas inferiores a 45 µm e entre 4 e 6% para partículas inferiores a 20 µm — encontram-se dentro da faixa considerada ideal para manter a eficiência de adsorção. As Figuras 31 e 32 ilustram os resultados da distribuição granulométrica da alumina primária.

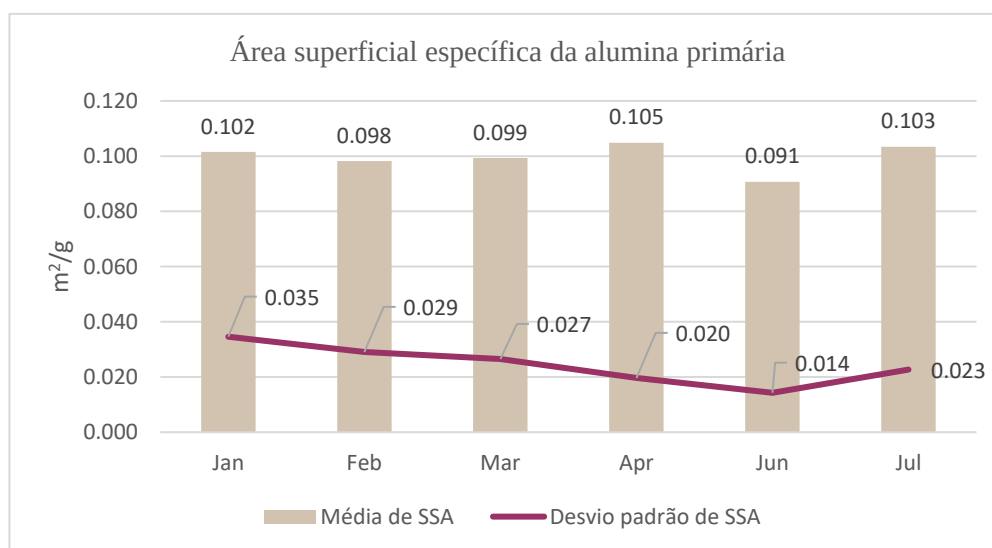


Figura 31: Gráfico da área superficial específica da alumina primária.

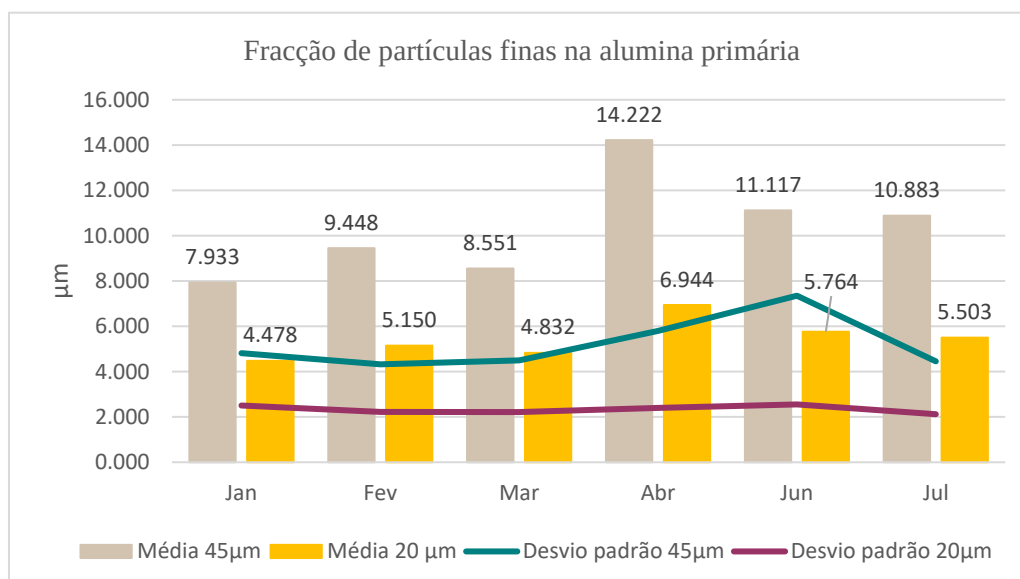


Figura 32: Gráfico da fracção de partículas finas da alumina primária.

5.1.3. Análise da taxa de alimentação da alumina primária

Os dados da taxa de alimentação da alumina primária foram obtidos por meio de sensores instalados no sistema do CTG, os quais possuem interface com um aplicativo computacional responsável pelo controlo e monitoramento contínuo das operações e do funcionamento dos equipamentos. Esses sensores permitem a aquisição automática e em tempo real dos dados operacionais.

Conforme ilustrado na Figura 33, os resultados obtidos mostram que a taxa de alimentação se manteve, de modo geral, estável e dentro dos limites de controlo estabelecidos, com médias mensais situadas entre 28,3 e 29,9 ton/h. Essa constância evidencia um processo sob controlo estatístico, com pequenas flutuações que reflectem as variações normais de um sistema industrial contínuo. Entre os meses analisados, destaca-se Março, que apresentou o maior desvio padrão (3,14 ton/h). Esse comportamento indica que, apesar da média mensal se manter próxima do valor ideal (29,83 ton/h), houve maior variabilidade momentânea no fluxo de alumina durante o período. Outro ponto relevante foi a ligeira redução observada em Abril, quando a taxa média atingiu 28,32 ton/h, valor inferior aos meses anteriores e posteriores, mas o baixo desvio padrão (1,56 ton/h) sugere que o sistema rapidamente retomou a estabilidade e o padrão de alimentação habitual.

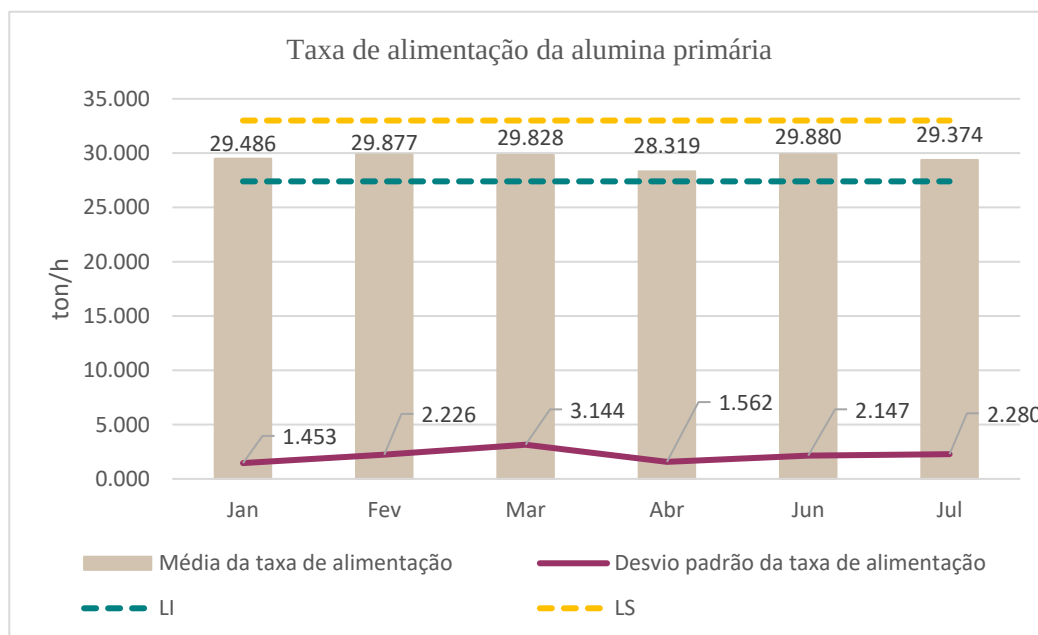


Figura 33: Gráfico da taxa de alimentação da alumina primária

5.1.4. Análise da vazão volumétrica do gás de entrada

Os dados da vazão volumétrica do gás de entrada foram obtidos por meio de sensores instalados no sistema do CTG, os quais possuem interface com um aplicativo computacional responsável pelo controlo e monitoramento contínuo das operações e do funcionamento dos equipamentos. Esses sensores permitem a aquisição automática e em tempo real dos dados operacionais.

Segundo as Figuras 34 e 35, a análise da vazão volumétrica do gás de entrada demonstra que o sistema opera de forma estável, mantendo-se dentro dos limites de controlo estabelecidos, entre 2,290 e 2,540 Nm³/s/pote. No monitoramento diário, verifica-se que a maioria dos valores se mantém dentro da faixa aceitável, com apenas alguns pontos próximos ao limite superior e com quedas que chegam a valores abaixo do limite inferior, embora de forma pontual e não persistente.

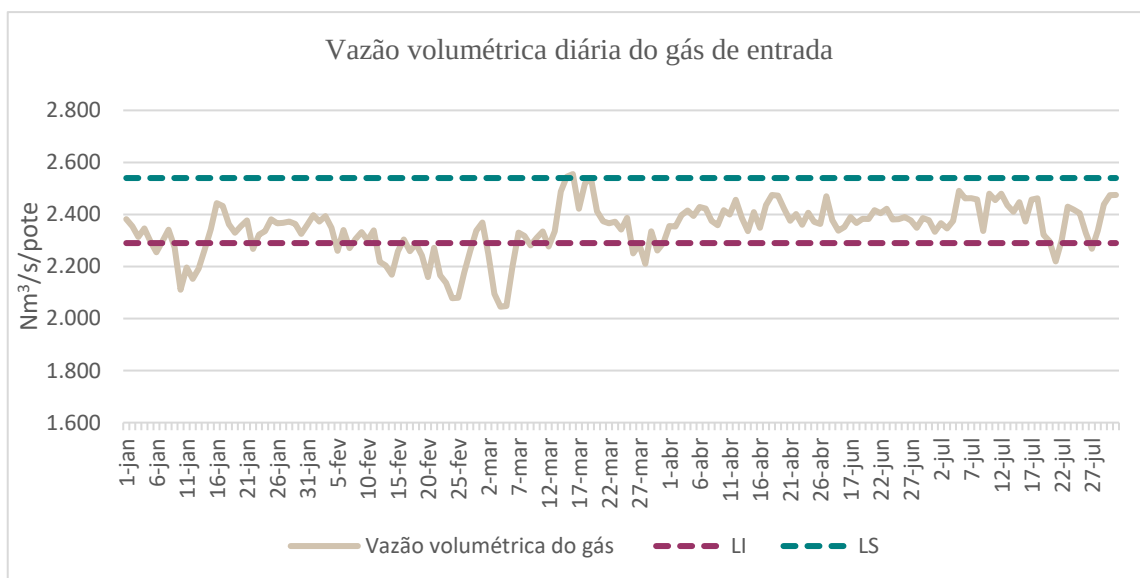


Figura 35: Vazão volumétrica diária do gás de entrada.

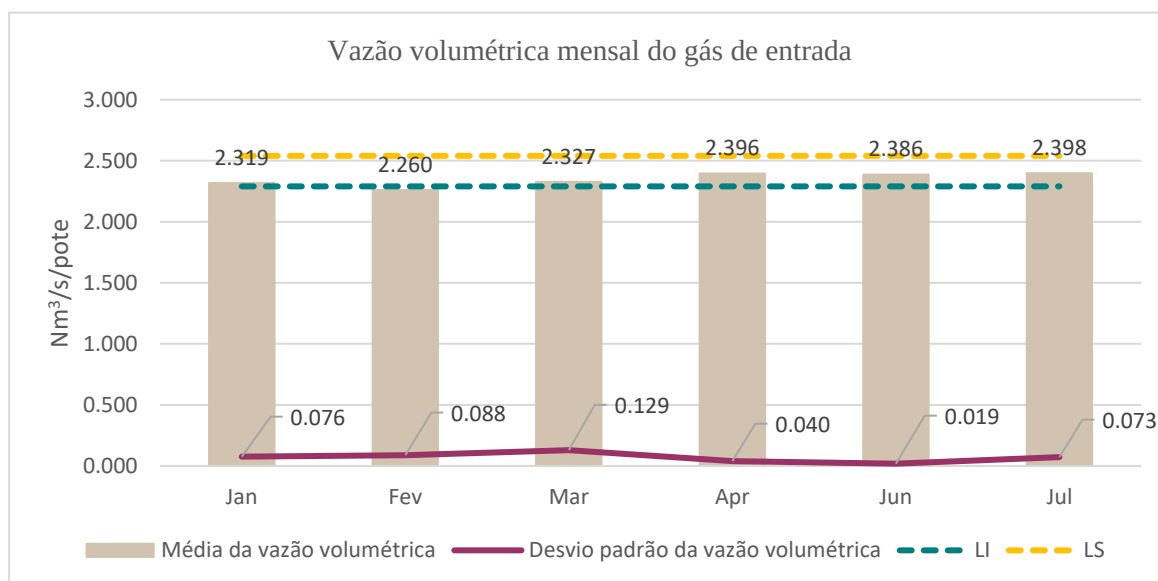


Figura 34: Vazão volumétrica mensal do gás de entrada.

5.1.5. Análise dos alarmes de nível alto nos funis dos filtros

Os dados relativos aos alarmes de nível alto nos funis dos filtros foram obtidos por meio de sensores de nível do tipo garfo vibratório (diapasão), instalados nos filtros. Esses sensores estão integrados a um sistema com interface computacional, responsável pelo controlo e

monitoramento contínuo do processo e do funcionamento dos equipamentos. O acionamento dos alarmes ocorre quando o material atinge o nível máximo previamente definido, permitindo a detecção em tempo real.

Com base nos dados monitorados, observou-se uma tendência de aumento progressivo nos alarmes de nível alto nos funis dos filtros ao longo dos meses de Janeiro a Abril, com valores máximos crescendo de 280 para 335 ocorrências, conforme mostra a Figura 36. Entretanto, é importante destacar a situação do mês de Março, que registou um salto significativo para 500 alarmes, representando um aumento acentuado em relação aos meses anteriores.

Conforme referido por Lindsay (2014), a presença de uma elevada fracção de partículas finas e alterações na distribuição de partículas podem afectar significativamente a manuseabilidade da alumina e o escoamento nos funis dos filtros. Adicionalmente, estudos sobre escoamento em funis evidenciam que tanto a geometria de descarga como as propriedades do material granular (granulometria/finos) influenciam a tendência de acúmulo e bloqueios (Zhang *et al.*, 2022). Por sua vez, a humidade elevada potencia a coesão entre partículas, aumentando o risco de retenção prolongada nos sistemas de armazenamento e alimentação (Howell *et al.*, 2000).

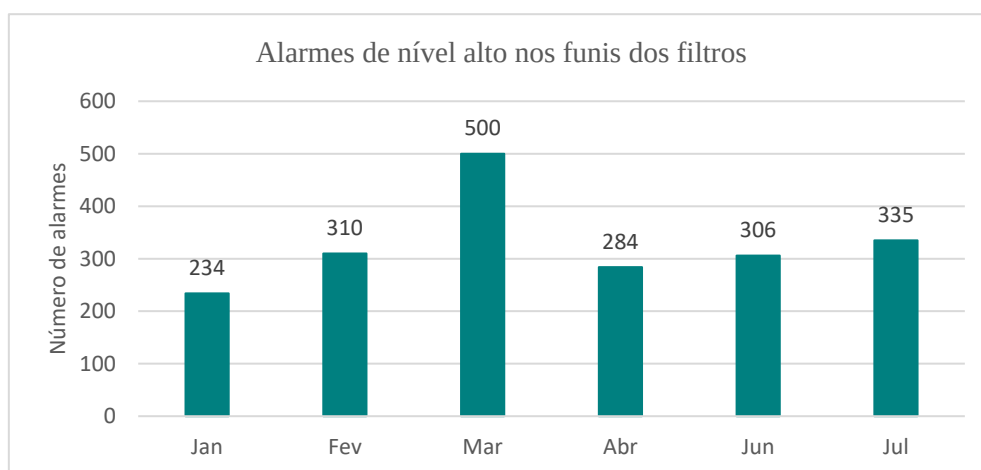


Figura 36: Gráfico do número de alarmes de nível alto nos funis dos filtros.

5.1.6. Análise da concentração do flúor no gás de entrada

Conforme apresentado na Figura 37, o monitoramento da concentração de flúor no gás de entrada evidencia variações significativas nos valores registados. As concentrações oscilaram entre cerca de 80 mg/Nm³ e 400 mg/Nm³, mostrando momentos de maior estabilidade e outros de elevação acentuada. Em grande parte do período, os resultados mantiveram-se entre os limites de controlo (175 mg/Nm³ - 350 mg/Nm³) o que indica que, em condições normais, a carga de flúor recebida pelo sistema de tratamento se mantém dentro da faixa de variabilidade aceitável. Os resultados obtidos confirmam a presença de uma carga significativa de flúor no efluente gasoso gerado durante o processo de redução da alumina. No entanto, observam-se episódios em que os valores não apenas ultrapassam o limite superior, mas também permanecem abaixo do limite inferior em outros momentos.

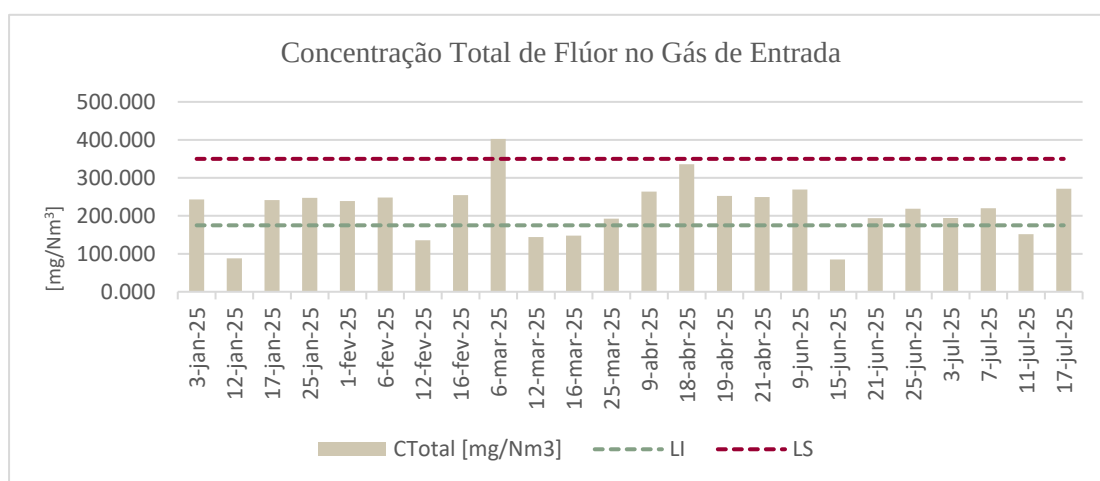


Figura 37: Gráfico da concentração de flúor no gás de entrada.

5.2. Resultados do tratamento estatístico

Foram analisadas 152 observações ($n = 152$) referentes aos valores obtidos para as variáveis operacionais e dos teores de flúor na alumina secundária, garantindo uma base estatística robusta para a aplicação dos testes de Anderson-Darling, Kruskal-Wallis e Correlação de Spearman. Para todos os testes realizados, foi adoptado um nível de significância de 5% ($\alpha = 0,05$), assegurando a confiabilidade das inferências estatísticas.

5.2.1. Teste de Anderson-Darling (Normalidade dos dados)

Os resultados do teste de normalidade de Anderson-Darling, conforme ilustrado na Tabela 4, evidenciam que o teor de flúor na alumina secundária, a área específica superficial da alumina primária, a fracção de partículas finas da alumina primária, a taxa de alimentação da alumina primária e a vazão volumétrica do gás de entrada apresentaram valores de p inferiores a 0,05. Dessa forma, rejeita-se a hipótese nula (H_0), concluindo-se que essas variáveis não seguem uma distribuição normal.

Em contrapartida, as variáveis alarmes de nível alto no funil dos filtros e concentração de flúor no gás de entrada apresentaram valores de p superiores a 0,05, o que leva à aceitação da hipótese nula (H_0). Assim, conclui-se que essas variáveis seguem uma distribuição normal.

Tabela 4: Resultados do teste de normalidade de Anderson-Darling

Variável	Valor-p	Significância
Teor de flúor na alumina secundária	<0,05	Rejeita-se H_0
Área específica superficial da alumina primária	<0,05	Rejeita-se H_0
Fracção de partículas finas da alumina primária (45 μm)	<0,05	Rejeita-se H_0
Fracção de partículas finas da alumina primária (20 μm)	<0,05	Rejeita-se H_0
Taxa de alimentação da alumina primária	< 0,05	Rejeita-se H_0
Vazão volumétrica do gás de entrada	< 0,05	Rejeita-se H_0
Alarmes de nível alto no funil dos filtros	> 0,05	Aceita-se H_0
Concentração de flúor no gás de entrada	> 0,05	Aceita-se H_0

5.2.2. Teste de Kruskal-Wallis (Diferença entre grupos)

Os resultados do teste de Kruskal-Wallis, apresentados na Tabela 5, evidenciam diferenças estatisticamente significativas entre alguns dos parâmetros analisados. As variáveis teor de

flúor na alumina secundária, fracção de partículas finas da alumina primária, vazão volumétrica do gás de entrada e alarmes de nível alto no funil dos filtros apresentaram valores de p inferiores a 0,05, o que levou à rejeição da hipótese nula (H_0). Esse resultado indica que, para essas variáveis, existem diferenças significativas entre os grupos comparados, ou seja, os valores médios ou medianos não são homogêneos ao longo do período estudado.

Essas diferenças podem estar associadas a variações operacionais que influenciam, directamente, a adsorção de flúor pela alumina e o comportamento dos gases no sistema. O facto de o teor de flúor na alumina secundária e a vazão volumétrica do gás de entrada apresentarem diferença significativa reforça a hipótese de que instabilidades nas condições de processo impactam a eficiência do processo de fluorinação e a homogeneidade do material tratado. Por outro lado, as variáveis área superficial específica da alumina primária, taxa de alimentação da alumina primária e concentração de flúor no gás de entrada apresentaram valores de p superiores a 0,05, o que levou à aceitação da hipótese nula (H_0). Assim, conclui-se que não há diferença estatisticamente significativa entre os grupos para esses parâmetros, sugerindo que o comportamento dessas variáveis se manteve relativamente estável ao longo do período de análise.

Tabela 5: Resultados do teste de Kruskal-Wallis

Variável	Valor-p	Significância
Teor de flúor na alumina secundária	< 0,05	Rejeita-se H_0
Área específica superficial da alumina primária	> 0,05	Aceita-se H_0
Fracção de partículas finas da alumina primária (45 μm)	< 0,05	Rejeita-se H_0
Fracção de partículas finas da alumina primária (20 μm)	< 0,05	Rejeita-se H_0
Taxa de alimentação da alumina primária	> 0,05	Aceita-se H_0
Vazão volumétrica do gás de entrada	< 0,05	Rejeita-se H_0
Alarmes de nível alto no funil dos filtros	< 0,05	Rejeita-se H_0
Concentração de flúor no gás de entrada	> 0,05	Aceita-se H_0

5.2.3. Teste de Correlação de Spearman

Os resultados apresentados na Tabela 6 demonstram correlações de magnitude variada, permitindo compreender quais parâmetros exercem maior influência sobre as inconsistências observadas nos teores de flúor.

5.2.3.1. Granulometria da alumina primária (Área específica superficial e fracção de partículas finas)

Observou-se uma correlação negativa entre o teor de flúor e a área específica da alumina primária, indicando que valores mais elevados de área específica tendem a estar associados a teores mais baixos de flúor na alumina secundária, sugerindo que o aumento da fluoridação tende a reduzir a área superficial efectiva. Tal redução pode resultar da formação de fluoretos que bloqueiam poros e modificam a morfologia superficial da alumina.

Esse comportamento pode ser explicado pelo aumento da superfície de contacto disponível para adsorção, o que favorece uma maior retenção de compostos fluorados durante o processo, reduzindo assim a quantidade de flúor residual na alumina secundária.

Verificou-se uma correlação positiva entre a granulometria das partículas finas da alumina primária e o teor de flúor medido na alumina secundária, sugerindo que o aumento da fracção de partículas finas contribui para o incremento do teor de flúor retido, ou seja, quanto menor a granulometria, maior tende a ser o teor de flúor. Esse comportamento pode ser atribuído pelo facto de partículas mais finas oferecerem maior superfície específica e maior contacto com gases fluoretados ou HF, favorecendo a adsorção ou incorporação de flúor nas partículas de alumina.

Essas relações, embora opostas, são complementares: a presença de partículas finas facilita a captura de flúor, enquanto a fluoridação progressiva reduz a porosidade e área específica do material. Esse comportamento é consistente com o mecanismo descrito por Alhassan *et al.* (2020), segundo o qual a adsorção de fluoretos depende fortemente da disponibilidade e modificação dos sítios activos de superfície. Embora o contexto dos autores — remoção de flúor em água — seja distinto, o mecanismo é semelhante: partículas finas disponibilizam mais sítios activos, aumentando a adsorção de fluoretos. Contudo, importa também considerar que superfícies mais finas podem estar associadas a maiores perdas por arraste ou maior

reactividade, o que pode afectar não apenas o teor de flúor, mas também a estabilidade da alumina.

5.2.3.2. Taxa de alimentação da alumina primária

A taxa de alimentação da alumina primária também apresentou uma correlação negativa com o teor de flúor, sugerindo que o aumento na velocidade de alimentação pode levar a um acúmulo de alumina insuficientemente tratada, sugerindo que à medida que a taxa de alimentação de alumina primária aumenta, o teor de flúor na alumina secundária tende a diminuir.

Essa relação indica que taxas de alimentação mais elevadas podem reduzir o tempo de residência da alumina no sistema ou diminuir a eficiência de remoção das partículas responsáveis pela adsorção de flúor. Na indústria de alumínio, é amplamente reconhecido que a eficiência da captura de flúor em sistemas de tratamento de gases depende da quantidade de alumina injectada, da distribuição de partículas e da sua capacidade de adsorver o fluoreto da fase gasosa (Li *et al.*, 2024).

5.2.3.3. Vazão volumétrica do gás de entrada

Em relação à vazão volumétrica do gás de entrada, identificou-se uma correlação negativa, sugerindo que maiores vazões favorecem a remoção do flúor gasoso. A vazão de gás revelou-se um factor determinante: em situações de vazão elevada registou-se uma tendência de menor eficiência de remoção de flúor. Isso pode dever-se a (i) menor tempo de contacto entre gás e meio de tratamento, reduzindo a adsorção ou a reacção de flúor com as partículas de alumina, e (ii) maior turbulência ou arraste de partículas finas que escapam da zona de contacto, reduzindo a eficiência de captura.

5.2.3.4. Alarmes de nível alto no funil dos filtros

O número de alarmes de nível alto apresentou uma correlação positiva com o teor de flúor, evidenciando que o acúmulo de material nos filtros pode afectar negativamente o desempenho do sistema de tratamento, aumentando a retenção de flúor.

5.2.3.5. Concentração de flúor no gás de entrada

A concentração de flúor no gás de entrada apresentou correlação positiva com o teor de flúor na alumina secundária, o que era esperado, uma vez que maiores concentrações iniciais de flúor

no gás aumentam a carga total a ser tratada, reflectindo-se em níveis mais elevados de flúor residual.

Tabela 6: Resultados do teste de Correlação de Spearman

Variáveis correlacionadas	ρ (Spearman)	p-Valor	Interpretação
Teor de flúor & Área específica superficial	- 0.192	0.066	Correlação negativa fraca
Teor de flúor & Teor de finos (45 μm)	+ 0.222	0.032	Correlação positiva fraca
Teor de flúor & Teor de finos (20 μm)	+ 0.260	0.011	Correlação positiva fraca
Teor de flúor & Taxa de alimentação	- 0.2173	0.037	Correlação negativa fraca
Teor de flúor & Vazão volumétrica	- 0.159	0.927	Correlação negativa fraca
Teor de flúor & Alarmes de nível alto	+ 0.144	0.165	Correlação positiva fraca
Teor de flúor & Concentração de flúor no gás de entrada	+0.253	0.01	Correlação positiva fraca

6. Conclusões e Recomendações

6.1. Conclusões

O presente trabalho permitiu responder aos objectivos específicos e às questões de investigação, tendo sido identificadas como variáveis críticas a granulometria da alumina primária (nomeadamente a área específica superficial e o teor de finos), a taxa de alimentação, a vazão volumétrica do gás de entrada, a concentração de flúor no gás e o número de alarmes de nível alto nos funis dos filtros.

Com base em dados operacionais obtidos em tempo real através do sistema de controlo CTG, e posteriormente organizados e analisados estatisticamente, foi possível monitorar e correlacionar as variáveis de medição, os métodos operacionais e as características da matéria-prima com a variabilidade dos teores de flúor na alumina secundária.

Adicionalmente, foram realizadas análises laboratoriais para a caracterização da granulometria da alumina primária por difração a laser, bem como a determinação dos teores de flúor no gás de entrada e na alumina secundária, recorrendo às técnicas de espectrofotometria de absorção no ultravioleta-visível e fluorescência de raios X, respectivamente. Verificou-se que:

- Quanto à influência da granulometria da alumina primária, observou-se uma correlação positiva entre o teor de finos ($<20\ \mu\text{m}$ e $<45\ \mu\text{m}$) e o teor de flúor na alumina secundária, indicando que fracções mais finas favorecem a retenção de flúor devido à maior área superficial específica e reactividade do material;
- Em relação à taxa de alimentação da alumina primária, constatou-se correlação negativa entre a taxa de alimentação e o teor de flúor, sugerindo que maiores taxas contribuem para uma maior renovação de alumina no sistema, aumentando a disponibilidade de adsorvente e melhorando a eficiência de remoção;
- Relativamente à vazão volumétrica do gás de entrada identificou-se uma correlação negativa, indicando que maiores vazões favorecem a remoção do flúor gasoso, possivelmente devido ao aumento do contacto entre gás e partículas de alumina e à melhor dispersão do fluxo no interior do sistema;

- No que respeita aos alarmes de nível alto nos funis dos filtros, foi observada uma correlação positiva com o teor de flúor, o que demonstra que o acúmulo excessivo de material nos funis pode comprometer a eficiência de fluidização e a uniformidade da mistura gás-sólido;
- Em relação à concentração de flúor no gás de entrada, verificou-se uma correlação positiva indicando que flutuações na carga de fluoretos no gás impactam directamente os teores de flúor na alumina secundária.

De forma geral, os resultados demonstram que a variabilidade dos teores de flúor na alumina secundária está fortemente associada ao equilíbrio entre as variáveis operacionais e as propriedades físicas da alumina. O controlo simultâneo das variáveis é determinante para a estabilidade do processo.

6.2. Recomendações

Com base nos resultados obtidos e nas limitações observadas durante o estudo, recomenda-se:

- A realização da amostragem e avaliação simultânea do teor de flúor no gás de entrada, no caudal de entrada e saída do CTG, permitindo a elaboração de um balanço de massa completo e representativo do comportamento do sistema;
- Conduzir ensaios laboratoriais controlados para avaliar a cinética de adsorção dos fluoretos em função da granulometria e das propriedades físicas da alumina, permitindo aprofundar a compreensão dos mecanismos que influenciam a sua retenção.
- Avaliar a influência da humidade da alumina primária, uma vez que este parâmetro pode afectar tanto o comportamento fluido dinâmico como a capacidade de adsorção no CTG.
- Ampliar o uso de ferramentas estatísticas avançadas, incorporando gradualmente métodos como regressões multivariadas ou modelos preditivos, de forma a complementar as abordagens já aplicadas.

Referências Bibliográficas

- Aarhaug, T. A., & Ratvik, A. P. (2019). Aluminium Primary Production Off-Gas Composition and Emissions: An Overview. *Journal of the Minerals, Metals & Material Society*, 71(9), 2966–2977. <https://doi.org/10.1007/s11837-019-03370-6>
- Alaboodi, A. S., Kadhim, S. A., & Hussein, A. S. (2025). Ultraviolet-Visible Spectroscopy, Importance, Principle, Structure and Most Important Applications: A Study Review. *International Journal of Novel Research in Physics Chemistry & Mathematics*, 12, 53–60. <https://doi.org/10.5281/zenodo.14965556>
- Alaqarbeh, M. (2021). Adsorption Phenomena: Definition, Mechanisms, and Adsorption Types: Short Review. *RHAZES: Green and Applied Chemistry*, 13, 43–51. <https://doi.org/10.48419/IMIST.PRSM/rhazes-v13.28283>
- Alhassan, S., Huang, L., He, Y., Yan, L., Wu, B., & Wang, H. (2020). Fluoride removal from water using alumina and aluminum-based composites: A comprehensive review of progress. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 50(14), 1501–1537. <https://doi.org/https://doi.org/10.1080/10643389.2020.1769441>
- Alves, Á. A. de M. (2017). *Extracção de Alumina- Uma avaliação dos parâmetros influentes* [Dissertação de Mestrado]. Universidade Federal do Pará. Bélem.
- Arif, N., & Ahmad, S. (2022). A Review on the Synthesis, Properties, Applications, and Harmful Effects of Alumina. *International Journal of Trend in Scientific Research and Development (IJTSRD)*, 6(3), 1586–1594.
- Åsheim, H. (2017). *PFC Evolution in the Aluminium Production Process* [Tese de Doutorado]. Norwegian University of Science and Technology.
- Baptista, R., & Cardoso, F. O. (2014). *Estudo ambiental da utilização do coque de petróleo na cogeração de energia elétrica em comparação com o carvão mineral*. www.anp.gov.br
- Barbosa, L. V. (2025). *Projeto de dimensionamento para o controle da emissão de poluentes atmosféricos originados por escória de fundição em indústria de alumínio secundário* [Trabalho de Conclusão de Curso]. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Londrina.

- Binnemans, K., & Jones, P. T. (2025). Lindy Effect in Hydrometallurgy. *Journal of Sustainable Metallurgy*, 5. <https://doi.org/10.1007/s40831-025-01119-x>
- Bonna, R. de. (2021). *Dimensionamento de um Sistema de Exaustão para Indústria de Processamento de Plástico* [Trabalho de Conclusão de Curso]. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre.
- Brough, D., & Jouhara, H. (2020a). The aluminium industry: A review on state-of-the-art technologies, environmental impacts and possibilities for waste heat recovery. *International Journal of Thermofluids*, 1–2. <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2019.100007>
- Brough, D., & Jouhara, H. (2020b). The aluminium industry: A review on state-of-the-art technologies, environmental impacts and possibilities for waste heat recovery. *International Journal of Thermofluids*, 1–2. <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2019.100007>
- Bruker. (2025). *How Does XRF Work? In: X-ray Fluorescence (XRF) Spectrometry*. <https://www.bruker.com/en/products-and-solutions/elemental-analyzers/xrf-spectrometers/how-does-xrf-work.html>
- Camilo, J. C. (2024). *Avaliação do teor de carbono em alumina carregada usada na redução electrolítica do alumínio* [Trabalho de Conclusão de Curso]. Universidade Eduardo Mondlane. Maputo.
- Chitaca, F. E. (2012). *Desenvolvimento do método potenciométrico para determinação de fluoretos em amostras de banho electrolítico* [Trabalho de Conclusão de Curso]. Universidade Eduardo Mondlane. Maputo.
- Club of Mozambique. (2024). *Mozambique: Beluluane Industrial Park contributes US\$900 million to GDP*. Jornal Domingo. <https://clubofmozambique.com/news/mozambique-beluluane-industrial-park-contributes-us900-million-to-gdp-255888/>
- Costa, K. M. B. da. (2015). *Desacidificação de frações destiladas de produto líquido orgânico do craqueamento termo-catalítico de óleos vegetais via adsorção em alumina e lama vermelha ativada* [Dissertação de Mestrado]. Universidade Federal do Pará. Bélem.
- Costa, T. B. da S., & Mendes, M. A. (2018). Análise da causa raiz: Utilização do diagrama de Ishikawa e Método dos 5 Porquês para identificação das causas da baixa produtividade

- em uma cacauicultura. *Sustentabilidade e Meio Ambiente*, 1–11. <http://www.simprod.ufs.br/>
- Ferreira, T. T. L., Amorim, R. S., & Sousa, J. T. (2015). Criolita: As perspectivas do coproduto da Mina de Pitanga, Amazonas para o Brasil. *XXVI Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa*.
- Forte, C. M. S., Pacheco, L. C. M., & De Queiroz, Z. F. (2019). *Química Analítica I* (Editora da Universidade Estadual do Ceará (EdUECE), Ed.; 2nd ed.). www.uece.br
- França, S. C. A., & Couto, H. J. B. (2007). Análise Microgranulométrica- Malvern e Sedigraph. In *Tratamento de Minérios: Práticas Laboratoriais*. CETEM/MCT.
- Galasiu, I., Galasiu, R., & Thonstand, J. (2007). *Inert Anodes for Aluminium Electrolysis*. Aluminium-Verlag, Marketing & Kommunikation GmbH.
- Garcia, M. C. S. (2012). *Modificação do resíduo de Bauxita gerado no Processo Bayer por Tratamento Térmico* [Dissertação de Mestrado]. Universidade de São Paulo. São Paulo.
- GGD Metals. (2023). *Aços ferramenta: Generalidades, aplicações e tratamento térmico*. GGD Metals. <https://www.ggdmetals.com.br/>
- Gonçalves, R. de A. (2016). *O Ciclo de Vida do Alumínio*. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.
- Goto, A. M., Junior, C. A. R. B., Cavalcanti, C. A., & Aquino, F. A. S. A. (2016). Análise pelo método dos elementos finitos da fixação haste-anodo empregado na cuba electrolítica Hall-Héroult. *Anais Do IX Congresso Nacional de Engenharia Mecânica*. <https://doi.org/10.20906/cps/con-2016-1032>
- Guimarães, V. G. (2016). *Adsorção-Dessorção de partículas neutras em sistemas com superfícies não-idênticas* [Dissertação de Mestrado]. Universidade Estadual de Maringá. Maringá.
- Horiba Scientific. (2025). *XRF Key Components*. <https://www.horiba.com/int/scientific/technologies/energy-dispersive-x-ray-fluorescence-ed-xrf/xrf-key-components/>

- Howell, D. W., Aranson, I. S., & Crabtree, G. W. (2000). *Dynamics of electrostatically-driven granular media. Effects of Humidity*.
- Hyland, M. M., Patterson, E. C., Stevens-Mcfadden, F., & Welch, B. J. (2000). *Aluminium Fluoride consumption and control in smelting cells*.
- Jorge, M. (2017). *Mozal atinge melhor nível de produção de alumínio*. O País. <https://opais.co.mz/mozal-atinge-melhor-nivel-de-producao-de-aluminio/>
- Kvande, H., & Drabløs, P. A. (2014). The aluminum smelting process and innovative alternative technologies. *Journal of Occupational and Environmental Medicine*, 56(5). <https://doi.org/10.1097/JOM.0000000000000062>
- Li, B., Zhang, L., Cheng, M., Chen, L., Fang, W., Liu, S., Zhou, T., Zhao, Y., Cen, Q., Qian, W., Mei, X., & Liu, Z. (2024). Evaluation of fluoride emissions and pollution from an electrolytic aluminum plant located in Yunnan province. *Journal of Hazardous Materials*, 478. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.135500>
- Lima, L. S. (2013). Lei de Lambert–Beer. *Revista de Ciência Elementar*, 1(1). <https://doi.org/10.24927/rce2013.047>
- Lindsay, S. J. (2014). Key Physical Properties of Smelter Grade Alumina. *Light Metals*, 597–601. https://doi.org/10.1007/978-3-319-48144-9_101
- Magaia, Y. A. A. (2023). *Restauração da eficiência do processo de arrefecimento de lingotes de Alumínio-MOZAL* [Trabalho de Conclusão de Curso]. Universidade Eduardo Mondlane. Maputo.
- Martinho, D. C. (2019). *Estudo da dissolução da alumina no banho electrolítico na produção de alumínio primário em cubas de tecnologia VSS Soderberg* [Dissertação de Mestrado]. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo.
- Massinguil, J. A. F. (2014). *Impacto das reacções de oxidação parasítica no consumo do ânodo de carbono na produção de alumínio* [Trabalho de Conclusão de Curso]. Universidade Eduardo Mondlane. Maputo.
- Mate, E. (2025). *Estudo e análise de instabilidade na mudança tecnológica de células electrolíticas de produção de alumínio, do Modelo AP35 para o Modelo AP3XLE (Caso*

- de Estudo: Mozal*) [Trabalho de Conclusão de Curso]. Universidade Eduardo Mondlane. Maputo.
- Metson, J. B., Oosterbeek, R., & Lavoie, P. (2013). Predicting impacts of alumina performance in smelters. *Proceedings of the 31st International Conference of ICSOBA (Travaux)*, 1–8. <https://www.researchgate.net/publication/266558891>
- Moreno, R. A. (2020). *Purificação do licor Bayer: remoção de impurezas orgânicas e inorgânicas para aumento da produtividade e tratamento dos resíduos gerados neste processo* [Dissertação de Mestrado]. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo.
- Mozal. (2022). *Sampling for Fluoride and Dust in Flue Gases* (Number SOP000725).
- Mozal. (2023). *Dust and particulate fluoride determination on filter samples* (Number SOP001075).
- Nascimento, R. F. do, Lima Ari Clecius Alves de, Vidal, C. B., & Melo, D. de Q. (2014). *Adsorção: Aspectos teóricos e aplicações ambientais*. Imprensa Universitária (UFC).
- Neikov, O. D., & Yefimov, N. A. (2019). Powder Characterization and Testing. In *Handbook of Non-Ferrous Metal Powders: Technologies and Applications, Second Edition* (pp. 3–62). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100543-9.00001-4>
- Ngunga, A. N. (2022). *Análise do teor de flúor em alumina do Centro de Tratamento de Gases que alimenta as células electrolíticas da MOZAL* [Trabalho de Conclusão de Curso]. Universidade Eduardo Mondlane. Maputo.
- Nhone, E. S. E. (2023). *Análise da Eficiência do Tratamento de Gases em Função da Quantidade de Filtros no Centro de Tratamento de Gases da MOZAL* [Trabalho de Conclusão de Curso]. Universidade Eduardo Mondlane. Maputo.
- Nogueira, K. A. B. (2016). *Análise de materiais por fluorescência de raios-X (XRF): princípios e aplicações*. .
- Novák, B. (2013). *On the chemical and electrochemical formation of aluminium carbide in aluminium electrolysis* [Tese de Doutorado]. Norwegian University of Science and Technology. Trondheim.

- Nunes, D. M. (2017). *Estudo sobre efeito de vibrações axiais sobre a formação e remoção de tortas de filtração gás-sólidos* [Dissertação de Doutoramento]. Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia.
- Oliveira, T. G. de, Mendes, G. da C., Pereira, E. L., & Ferreira, L. D. (2016). Análise comparativa entre o granulômetro a laser e o método convencional de granulometria por sedimentação. *Anais Do XVIII Congresso Brasileiro de Mecânica Dos Solos e Engenharia Geotécnica*. <https://doi.org/10.20906/cps/cb-01-0042>
- Parker, S. P., Wilkes, A. E., Mccue, D. B., Long, G. R., & Goulding, N. W. E. (2020). *Fluoride Regulatory Framework and Aquatic Toxicity Review: Phase I Investigation*. <https://www.world-aluminium.org/publications/>
- Pedrotti, A., Ferreira, M., Curi, N., Silva, M. L. N., Lima, J. M., & Carvalho, R. (2003). Relação entre atributos físicos, mineralogia da fração argila e formas de alumínio no solo. *Revista Brasileira de Ciência Do Solo*, 1–9.
- Pinto, F. M. (2024). *Estudo Da Influência Dos Ânodos Recicláveis Cozidos Nas Propriedades Físicas, Mecânicas e Químicas, Dos Ânodos De Carbono Usados Nas Células Electrolíticas de Extracção Do Alumínio (Caso de Estudo Mozal)* [Trabalho de Conclusão de Curso]. Universidade Eduardo Mondlane. Maputo.
- Prasad, S. (2000). Studies on the Hall-Heroult Aluminum Electrowinning Process. *J. Braz. Chem. Soc*, 11(3), 245–251.
- Rosa, C. L., Martins, F. P. de O. S., Arantes, R. dos S., Da Silva, V. M., Oliveira, T. M., & Saliba, W. A. (2019). Construção de Espectrofotômetro Visível para fins didáticos. *Journal of Exact Sciences-JES*, 21(1), 20–25. <http://www.mastereditora.com.br/jes>
- Santana, G. L. (2017). *Estudo coparativo através da análise de variância para determinação da distribuição granulométrica pelas técnicas de sedimentação e difracção à laser* [Trabalho de Conclusão de Curso]. Universidade Federal da Paraíba. João Pessoa.
- Sauermann. (2019). *MP 210 Temperature measuring instrument: User guide*. Sauermann Industrie SAS. www.sauermanngroup.com

- Schultz, G., & Mallmann, H. (2002). Pot Gas Treatment Centre: Installation, Maintenance and Operating (Technical Manual). In *Mozal Smelter Expansion (Moçambique)* (Number N° M3013-04-020). Procedair S.A.
- Silva, A. J. de J. (2020). Análise da redução eletrolítica e de suas emissões poluentes em uma fábrica de alumínio primário na cidade histórica de Ouro Preto/MG. *Revista de Engenharia e Tecnologia*, 12, 176–192.
- Silva, G. A. V. da. (2020). *Utilização de Fluorescência de Raios-X (XRF) para a caracterização expedita de solos contaminados por metais pesados: Aplicação a obra de construção civil para a identificação em tempo real de resíduos perigosos* [Dissertação de Mestrado]. Universidade de Lisboa. Lisboa.
- South32. (2025). *Mozal Aluminium*. What We Do – Our Locations – Southern Africa. <https://www.south32.net/what-we-do/our-locations/southern-africa/mozal-aluminium>
- Souza, D. M. de. (2025). *Uma proposta para o ensino da espectroscopia UV-VIS na educação básica* [Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Paraná]. <https://sistemas2.utfpr.edu.br/dpls/sistema/aluno03/mpCADEDocsAssinar.pcTelaAssinaturaDoc?>
- Tomago Aluminium Company. (2025). *Emission Control*. Tomago Aluminium. <https://www.tomago.com.au/emission-control/>
- Uys, J. (2007). *Black Belt Project Increase recycling of Fluorides to Reduction Cells*. Hillside Aluminium.
- Zhang, D., Yang, X., Zhan, J., & Liu, X. (2022). Fluctuation of particles during funnel flow discharge from flat-bottomed silos. *AIChE Journal*, 68(1). <https://doi.org/10.1002/aic.17414>

Anexos

Anexo A: Resultados da determinação do teor de flúor na alumina secundária obtidos por Fluorescência de Raios-X.

Tabela A 1: Teores de flúor na alumina secundária.

Data	%F	Data	%F	Data	%F
1-Jan	1,93	10-Fev	1,64	22-Mar	1,63
2-Jan	1,76	11-Fev	1,78	23-Mar	1,84
3-Jan	1,93	12-Fev	1,64	25-Mar	1,57
4-Jan	1,63	13-Fev	1,57	26-Mar	1,70
5-Jan	1,69	14-Fev	1,75	27-Mar	1,33
6-Jan	1,76	15-Fev	1,69	28-Mar	2,12
7-Jan	2,14	16-Fev	2,11	30-Mar	2,12
8-Jan	1,86	17-Fev	1,92	31-Mar	2,38
9-Jan	1,89	18-Fev	1,84	1-Apr	1,38
10-Jan	1,71	19-Fev	1,88	2-Apr	1,76
11-Jan	1,62	20-Fev	1,61	3-Apr	1,68
12-Jan	1,69	21-Fev	1,66	5-Abr	1,87
13-Jan	1,70	22-Fev	1,64	6-Abr	1,83
14-Jan	2,14	23-Fev	1,87	8-Abr	1,64
15-Jan	2,03	24-Fev	1,69	9-Abr	1,79
16-Jan	1,77	25-Fev	1,71	10-Abr	1,58
17-Jan	1,54	26-Fev	1,91	11-Abr	1,52
18-Jan	1,61	27-Fev	1,71	12-Abr	1,88
19-Jan	1,93	28-Fev	1,45	13-Abr	1,50
20-Jan	1,69	1-Mar	1,62	14-Abr	1,47
21-Jan	1,98	2-Mar	1,64	16-Abr	1,49
22-Jan	1,77	3-Mar	1,72	17-Abr	1,79
23-Jan	1,65	4-Mar	1,98	18-Abr	1,89
25-Jan	1,89	5-Mar	1,66	19-Abr	1,70
26-Jan	1,96	6-Mar	2,14	20-Abr	2,09
27-Jan	1,54	7-Mar	1,56	21-Abr	1,74
28-Jan	1,70	8-Mar	1,72	22-Abr	2,09
29-Jan	1,57	9-Mar	1,97	24-Abr	1,41
30-Jan	1,64	10-Mar	1,61	25-Abr	1,48
31-Jan	1,70	11-Mar	1,72	26-Abr	1,51
1-Fev	1,22	12-Mar	1,93	27-Abr	1,67
2-Fev	1,70	13-Mar	1,58	28-Abr	1,68
3-Fev	1,52	14-Mar	1,36	29-Abr	1,51
4-Fev	1,58	15-Mar	1,25	30-Abr	1,68
5-Fev	1,56	17-Mar	2,06	17-Jun	1,96
6-Fev	1,70	18-Mar	1,66	18-Jun	1,68
7-Fev	1,76	19-Mar	2,01	19-Jun	1,76
8-Fev	1,89	20-Mar	2,32	20-Jun	1,52
9-Fev	1,68	21-Mar	2,16	21-Jun	1,50

Análise dos Factores que Influenciam os Teores de Flúor na Alumina Secundária no Centro de Tratamento de Gases da Fundição de Alumínio

22-Jun	1,79	23-Jul	1,50
23-Jun	1,69	24-Jul	1,75
24-Jun	1,84	25-Jul	1,79
25-Jun	1,89	26-Jul	1,68
26-Jun	1,54	27-Jul	1,70
27-Jun	1,72	28-Jul	1,47
28-Jun	1,35	29-Jul	1,92
29-Jun	1,52	30-Jul	1,53
30-Jun	2,29	31-Jul	1,49
1-Jul	1,77		
2-Jul	1,63		
3-Jul	1,87		
4-Jul	1,62		
5-Jul	1,51		
6-Jul	1,53		
7-Jul	1,72		
8-Jul	2,00		
9-Jul	2,00		
12-Jul	1,85		
13-Jul	1,90		
14-Jul	1,40		
15-Jul	1,21		
16-Jul	1,74		
17-Jul	1,44		
18-Jul	1,77		
19-Jul	1,78		
20-Jul	1,68		
21-Jul	1,68		
22-Jul	1,56		

Anexo B: Resultados da determinação da granulometria da alumina primária: área específica superficial e fracção de partículas finas.

Tabela B 1: Distribuição da área específica superficial e fracção de partículas finas.

Data	Área superficial específica da alumina primária [m ² /g]	Fracção de finos	
		45 µm	20 µm
1-Jan	0,073	3,67	2,50
2-Jan	0,070	2,81	2,36
3-Jan	0,111	9,05	5,44
4-Jan	0,079	4,99	3,45
5-Jan	0,073	3,98	2,66
6-Jan	0,074	3,84	2,59
7-Jan	0,114	9,36	5,52
8-Jan	0,071	3,28	1,73
9-Jan	0,109	7,55	4,58

Análise dos Factores que Influenciam os Teores de Flúor na Alumina Secundária no Centro de Tratamento de Gases da Fundição de Alumínio

10-Jan	0,076	4,18	2,85
11-Jan	0,077	4,83	3,10
13-Jan	0,121	9,67	5,43
14-Jan	0,107	7,75	4,18
15-Jan	0,196	18,74	9,81
16-Jan	0,121	9,37	5,37
17-Jan	0,132	9,86	5,71
18-Jan	0,110	10,12	5,91
19-Jan	0,144	11,77	6,86
21-Jan	0,078	5,21	3,03
22-Jan	0,084	7,61	3,53
23-Jan	0,081	5,59	2,79
24-Jan	0,083	7,23	3,38
25-Jan	0,078	5,97	3,00
26-Jan	0,056	0,03	0,00
27-Jan	0,095	8,70	4,50
28-Jan	0,095	8,03	4,33
29-Jan	0,171	19,61	10,78
30-Jan	0,166	19,31	9,98
1-Fev	0,090	7,62	4,29
2-Fev	0,113	10,51	5,37
3-Fev	0,077	4,61	2,87
4-Fev	0,078	4,81	3,20
5-Fev	0,011	10,22	6,09
6-Fev	0,083	7,31	3,97
7-Fev	0,137	16,88	8,76
8-Fev	0,111	11,26	6,27
9-Fev	0,108	10,78	5,90
10-Fev	0,081	6,90	3,73
11-Fev	0,100	6,90	3,73
12-Fev	0,100	8,44	5,00
13-Fev	0,109	10,74	5,80
14-Fev	0,136	16,73	8,77
15-Fev	0,116	12,36	6,79
16-Fev	0,095	8,46	4,35
17-Fev	0,182	23,81	12,66
18-Fev	0,068	2,83	1,73
19-Fev	0,102	9,59	5,18
20-Fev	0,103	9,71	5,02
21-Fev	0,091	7,37	3,95
24-Fev	0,095	8,45	4,35
25-Fev	0,094	8,08	4,25
26-Fev	0,090	6,88	3,83
27-Fev	0,091	6,91	4,02
28-Fev	0,092	7,50	4,03

Análise dos Factores que Influenciam os Teores de Flúor na Alumina Secundária no Centro de Tratamento de Gases da Fundição de Alumínio

1-Mar	0,097	8,13	4,50
2-Mar	0,092	7,23	3,94
3-Mar	0,120	11,77	6,58
4-Mar	0,120	13,58	7,27
5-Mar	0,094	7,28	4,13
6-Mar	0,138	16,45	8,52
7-Mar	0,095	7,47	4,25
8-Mar	0,101	9,46	4,61
9-Mar	0,099	7,83	5,08
10-Mar	0,096	7,97	4,21
12-Mar	0,182	19,44	10,68
13-Mar	0,124	14,95	7,21
14-Mar	0,076	4,72	2,62
15-Mar	0,078	4,87	3,09
17-Mar	0,072	3,30	2,34
19-Mar	0,102	9,53	5,00
20-Mar	0,075	4,17	2,83
21-Mar	0,076	3,76	2,92
22-Mar	0,078	4,64	3,08
23-Mar	0,080	5,16	3,23
24-Mar	0,078	4,64	3,06
25-Mar	0,079	4,87	3,23
27-Mar	0,151	17,64	9,64
28-Mar	0,102	8,84	5,08
29-Mar	0,100	8,22	4,86
31-Mar	0,080	6,40	3,67
1-Abr	0,096	8,35	4,56
2-Abr	0,081	7,14	3,46
3-Abr	0,100	8,19	4,70
4-Abr	0,097	7,25	4,34
5-Abr	0,083	10,30	5,60
6-Abr	0,101	14,60	7,80
8-Abr	0,084	15,80	7,32
9-Abr	0,086	15,80	7,30
10-Abr	0,106	12,80	6,40
11-Abr	0,098	12,00	6,10
12-Abr	0,132	13,50	6,90
13-Abr	0,133	19,00	10,30
14-Abr	0,104	14,80	8,10
16-Abr	0,113	17,30	9,70
17-Abr	0,131	17,30	9,20
18-Abr	0,099	25,90	13,70
19-Abr	0,114	12,70	7,30
22-Abr	0,092	10,20	4,10
24-Abr	0,115	13,50	6,60

Análise dos Factores que Influenciam os Teores de Flúor na Alumina Secundária no Centro de Tratamento de Gases da Fundição de Alumínio

25-Abr	0,140	13,50	6,60
26-Abr	0,151	12,10	5,90
27-Abr	0,109	22,80	11,70
28-Abr	0,086	14,30	7,20
29-Abr	0,082	8,50	3,80
30-Abr	0,089	9,10	3,80
17-Jun	0,116	10,50	6,20
18-Jun	0,077	15,10	8,00
19-Jun	0,076	11,20	6,30
20-Jun	0,092	10,54	5,90
21-Jun	0,119	8,70	4,50
22-Jun	0,094	8,10	4,40
23-Jun	0,082	9,40	4,80
24-Jun	0,080	35,50	13,80
26-Jun	0,082	6,00	4,20
27-Jun	0,082	8,90	4,50
28-Jun	0,081	8,20	4,50
29-Jun	0,102	6,80	4,30
30-Jun	0,096	8,10	4,70
1-Jul	0,090	9,80	5,00
2-Jul	0,107	11,00	5,90
3-Jul	0,094	7,10	4,00
8-Jul	0,116	4,50	3,10
9-Jul	0,076	0,00	0,00
10-Jul	0,050	10,10	5,20
11-Jul	0,148	15,80	8,50
12-Jul	0,109	4,50	2,60
13-Jul	0,112	7,70	4,20
15-Jul	0,109	8,00	4,30
17-Jul	0,115	16,20	8,00
18-Jul	0,135	9,00	4,40
21-Jul	0,103	6,00	2,70
22-Jul	0,075	9,90	5,00
23-Jul	0,100	16,10	8,10
24-Jul	0,131	11,00	4,80
25-Jul	0,101	14,80	6,70
28-Jul	0,109	15,40	7,00
29-Jul	0,085	13,00	6,40

Anexo C: Resultados da determinação da taxa de alimentação da alumina primária registrada por sensores do CTG.

Tabela C 1: Taxas de alimentação da alumina primária.

Data	Taxa de alimentação (ton/h)	Data	Taxa de alimentação (ton/h)
1-Jan	27,22	5-Fev	28,96
2-Jan	27,00	6-Fev	30,75
3-Jan	28,85	7-Fev	29,97
4-Jan	28,66	8-Fev	31,80
5-Jan	27,37	9-Fev	31,07
6-Jan	27,60	10-Fev	30,87
7-Jan	27,40	11-Fev	30,13
8-Jan	30,91	12-Fev	30,79
9-Jan	30,71	13-Fev	31,00
10-Jan	30,01	14-Fev	31,00
11-Jan	30,83	15-Fev	29,95
12-Jan	30,47	16-Fev	28,64
13-Jan	31,24	17-Fev	29,43
14-Jan	31,03	18-Fev	28,47
15-Jan	29,95	19-Fev	21,26
16-Jan	28,00	20-Fev	31,60
17-Jan	31,08	21-Fev	27,60
18-Jan	29,69	22-Fev	30,71
19-Jan	30,78	23-Fev	27,79
20-Jan	28,83	24-Fev	27,69
21-Jan	31,74	25-Fev	29,00
22-Jan	28,03	26-Fev	31,37
23-Jan	29,77	27-Fev	29,89
24-Jan	30,41	28-Fev	33,02
25-Jan	29,97	1-Mar	29,62
26-Jan	30,86	2-Mar	30,04
27-Jan	29,81	3-Mar	27,15
28-Jan	30,68	4-Mar	34,26
29-Jan	30,04	5-Mar	30,03
30-Jan	27,52	6-Mar	27,22
31-Jan	27,61	7-Mar	32,39
1-Fev	29,36	8-Mar	32,25
2-Fev	33,45	9-Mar	30,84
3-Fev	30,48	10-Mar	30,37
4-Fev	30,53	11-Mar	31,64
5-Fev	28,96	12-Mar	29,89

Análise dos Factores que Influenciam os Teores de Flúor na Alumina Secundária no Centro de Tratamento de Gases da Fundição de Alumínio

12-Mar	29,89	21-Abr	30,81
13-Mar	34,76	22-Abr	27,79
14-Mar	32,06	23-Abr	29,23
15-Mar	30,43	24-Abr	27,60
16-Mar	31,93	25-Abr	28,16
17-Mar	28,83	26-Abr	29,03
18-Mar	30,61	27-Abr	25,58
19-Mar	31,19	28-Abr	28,06
20-Mar	28,14	29-Abr	29,57
21-Mar	31,66	30-Abr	26,77
22-Mar	31,56	1-Mai	29,25
23-Mar	30,15	2-Mai	29,17
24-Mar	16,10	3-Mai	28,94
25-Mar	28,79	4-Mai	29,61
26-Mar	28,12	5-Mai	27,43
27-Mar	28,12	6-Mai	29,39
28-Mar	28,95	7-Mai	30,76
29-Mar	28,86	8-Mai	24,69
30-Mar	30,15	9-Mai	30,49
31-Mar	28,54	10-Mai	29,09
1-Abr	28,66	11-Mai	29,92
2-Abr	28,90	12-Mai	29,94
3-Abr	29,13	13-Mai	30,00
4-Abr	28,56	14-Mai	31,12
5-Abr	30,47	15-Mai	29,83
6-Abr	29,04	16-Mai	31,20
7-Abr	28,77	17-Mai	31,22
8-Abr	29,06	18-Mai	28,82
9-Abr	26,76	19-Mai	30,63
10-Abr	25,51	20-Mai	26,84
11-Abr	31,94	21-Mai	31,08
12-Abr	25,96	22-Mai	30,58
13-Abr	29,19	23-Mai	29,88
14-Abr	28,41	24-Mai	30,95
15-Abr	26,24	25-Mai	26,78
16-Abr	26,56	26-Mai	31,51
17-Abr	28,95	27-Mai	28,96
18-Abr	27,73	28-Mai	28,05
19-Abr	30,27	29-Mai	29,50
20-Abr	26,84	30-Mai	29,79

Análise dos Factores que Influenciam os Teores de Flúor na Alumina Secundária no Centro de Tratamento de Gases da Fundição de Alumínio

30-Mai	29,79	29-Jun	30,26
31-Mai	30,45	30-Jun	31,20
1-Jun	29,53	1-Jul	30,58
2-Jun	27,04	2-Jul	30,32
3-Jun	26,73	3-Jul	28,65
4-Jun	27,10	4-Jul	29,62
5-Jun	29,21	5-Jul	30,15
6-Jun	25,73	6-Jul	32,19
7-Jun	30,58	7-Jul	30,57
8-Jun	27,49	8-Jul	32,43
9-Jun	28,50	9-Jul	31,07
10-Jun	29,07	10-Jul	31,60
11-Jun	34,21	11-Jul	32,65
12-Jun	33,18	12-Jul	30,34
13-Jun	30,31	13-Jul	34,23
14-Jun	31,60	14-Jul	31,39
15-Jun	29,22	15-Jul	30,55
16-Jun	31,04	16-Jul	29,13
17-Jun	30,40	17-Jul	31,39
18-Jun	30,30	18-Jul	27,08
19-Jun	26,16	19-Jul	27,20
20-Jun	33,21	20-Jul	27,62
21-Jun	31,53	21-Jul	26,35
22-Jun	30,15	22-Jul	26,87
23-Jun	29,94	23-Jul	25,93
24-Jun	30,93	24-Jul	27,64
25-Jun	31,82	25-Jul	27,69
26-Jun	29,75	26-Jul	31,67
27-Jun	32,53	27-Jul	28,95
28-Jun	27,68	28-Jul	27,04
29-Jun	30,26	29-Jul	26,38
30-Jun	31,20	30-Jul	26,97
1-Jul	30,58	31-Jul	26,34

Anexo D: Resultados da determinação das análises do gás de entrada do CTG registrada por sensores do CTG.

Tabela D 1: Vazão volumétrica do gás de entrada do CTG.

Data	Lado Norte [Nm ³ /s]	Lado Sul [Nm ³ /s]	Fluxo por pote [Nm ³ /s/pote]
1-Jan	185,04	157,94	2,38
2-Jan	183,94	155,09	2,35
3-Jan	181,23	151,90	2,31

Análise dos Factores que Influenciam os Teores de Flúor na Alumina Secundária no Centro de
Tratamento de Gases da Fundição de Alumínio

4-Jan	181,78	156,06	2,35
5-Jan	179,86	150,73	2,30
6-Jan	175,13	149,51	2,25
7-Jan	180,12	150,64	2,30
8-Jan	179,01	158,18	2,34
9-Jan	170,52	156,81	2,27
10-Jan	157,65	146,26	2,11
11-Jan	163,73	152,56	2,20
12-Jan	169,74	140,22	2,15
13-Jan	173,60	142,01	2,19
14-Jan	171,81	154,48	2,27
15-Jan	182,22	155,18	2,34
16-Jan	192,85	159,06	2,44
17-Jan	190,46	159,85	2,43
18-Jan	183,09	157,13	2,36
19-Jan	180,11	155,39	2,33
20-Jan	181,73	157,36	2,36
21-Jan	181,82	160,50	2,38
22-Jan	170,64	155,92	2,27
23-Jan	177,42	156,97	2,32
24-Jan	179,20	157,18	2,34
25-Jan	188,26	154,67	2,38
26-Jan	185,80	154,93	2,37
27-Jan	184,73	156,23	2,37
28-Jan	185,10	156,56	2,37
29-Jan	182,87	157,51	2,36
30-Jan	178,02	156,85	2,33
31-Jan	182,48	157,44	2,36
1-Fev	187,26	157,97	2,40
2-Fev	183,28	158,42	2,37
3-Fev	186,23	158,46	2,39
4-Fev	184,16	154,07	2,35
5-Fev	171,00	154,42	2,26
6-Fev	179,32	157,62	2,34
7-Fev	172,65	154,31	2,27
8-Fev	184,68	147,43	2,31
9-Fev	187,45	148,34	2,33
10-Fev	182,64	148,70	2,30
11-Fev	186,56	150,27	2,34
12-Fev	178,35	141,00	2,22
13-Fev	175,81	141,47	2,20
14-Fev	171,44	140,81	2,17
15-Fev	179,48	145,73	2,26
16-Fev	182,71	149,05	2,30
17-Fev	176,68	148,59	2,26

Análise dos Factores que Influenciam os Teores de Flúor na Alumina Secundária no Centro de Tratamento de Gases da Fundição de Alumínio

18-Fev	177,72	151,63	2,29
19-Fev	172,23	150,68	2,24
20-Fev	166,15	144,75	2,16
21-Fev	177,72	149,40	2,27
22-Fev	168,00	143,95	2,17
23-Fev	168,25	139,49	2,14
24-Fev	157,90	141,31	2,08
25-Fev	157,28	142,26	2,08
26-Fev	164,42	148,95	2,18
27-Fev	170,33	155,18	2,26
28-Fev	179,70	156,93	2,34
1-Mar	184,75	156,38	2,37
2-Mar	174,93	148,74	2,25
3-Mar	167,19	134,42	2,10
4-Mar	159,41	135,10	2,05
5-Mar	158,91	135,97	2,05
6-Mar	166,78	150,08	2,20
7-Mar	182,81	152,72	2,33
8-Mar	178,65	155,03	2,32
9-Mar	181,17	147,28	2,28
10-Mar	187,08	145,56	2,31
11-Mar	185,69	150,47	2,33
12-Mar	173,11	154,79	2,28
13-Mar	175,70	160,55	2,34
14-Mar	193,30	165,07	2,49
15-Mar	199,44	167,03	2,55
16-Mar	201,00	166,98	2,56
17-Mar	187,73	161,01	2,42
18-Mar	199,30	163,57	2,52
19-Mar	201,66	164,12	2,54
20-Mar	186,28	161,06	2,41
21-Mar	182,92	158,97	2,37
22-Mar	183,40	157,34	2,37
23-Mar	183,98	157,57	2,37
24-Mar	181,54	155,74	2,34
25-Mar	185,04	158,71	2,39
26-Mar	170,33	153,70	2,25
27-Mar	173,02	156,04	2,29
28-Mar	167,22	151,05	2,21
29-Mar	181,54	154,77	2,34
30-Mar	177,59	148,06	2,26
31-Mar	180,95	148,97	2,29
1-Abr	181,00	158,19	2,36
2-Abr	179,04	159,86	2,35
3-Abr	188,90	156,33	2,40

Análise dos Factores que Influenciam os Teores de Flúor na Alumina Secundária no Centro de
Tratamento de Gases da Fundição de Alumínio

4-Abr	185,88	161,90	2,42
5-Abr	186,32	158,44	2,39
6-Abr	188,51	161,22	2,43
7-Abr	187,55	161,28	2,42
8-Abr	183,95	158,04	2,38
9-Abr	180,95	158,66	2,36
10-Abr	186,35	161,65	2,42
11-Abr	183,01	162,57	2,40
12-Abr	189,60	164,11	2,46
13-Abr	184,56	159,14	2,39
14-Abr	182,81	153,54	2,34
15-Abr	188,15	158,72	2,41
16-Abr	189,01	149,24	2,35
17-Abr	191,65	159,14	2,44
18-Abr	195,25	161,10	2,48
19-Abr	193,96	162,09	2,47
20-Abr	189,87	158,91	2,42
21-Abr	181,67	160,42	2,38
22-Abr	185,76	160,08	2,40
23-Abr	180,90	158,96	2,36
24-Abr	193,78	152,80	2,41
25-Abr	190,80	150,68	2,37
26-Abr	184,91	155,43	2,36
27-Abr	192,59	163,09	2,47
28-Abr	187,68	154,83	2,38
29-Abr	188,71	147,95	2,34
30-Abr	188,47	150,21	2,35
17-Jun	188,54	155,61	2,39
18-Jun	185,24	155,65	2,37
19-Jun	188,96	154,18	2,38
20-Jun	189,16	153,97	2,38
21-Jun	193,37	154,57	2,42
22-Jun	193,32	152,93	2,41
23-Jun	194,33	154,47	2,42
24-Jun	184,99	157,84	2,38
25-Jun	188,32	154,69	2,38
26-Jun	189,70	154,45	2,39
27-Jun	189,05	153,23	2,38
28-Jun	185,30	152,91	2,35
29-Jun	184,78	158,81	2,39
30-Jun	187,22	155,16	2,38
1-Jul	184,78	151,25	2,33
2-Jul	182,59	158,21	2,37
3-Jul	182,33	155,55	2,35
4-Jul	184,65	157,40	2,38

Análise dos Factores que Influenciam os Teores de Flúor na Alumina Secundária no Centro de Tratamento de Gases da Fundição de Alumínio

5-Jul	193,45	165,20	2,49
6-Jul	191,30	163,26	2,46
7-Jul	189,38	165,27	2,46
8-Jul	191,72	162,20	2,46
9-Jul	172,66	163,76	2,34
10-Jul	188,77	168,29	2,48
11-Jul	190,74	162,82	2,46
12-Jul	192,59	164,47	2,48
13-Jul	193,63	157,03	2,44
14-Jul	188,23	158,81	2,41
15-Jul	190,34	162,06	2,45
16-Jul	184,35	157,32	2,37
17-Jul	191,39	162,43	2,46
18-Jul	191,36	163,14	2,46
19-Jul	188,99	145,33	2,32
20-Jul	186,83	143,88	2,30
21-Jul	176,92	142,71	2,22
22-Jul	177,90	153,30	2,30
23-Jul	190,63	159,28	2,43
24-Jul	191,38	156,83	2,42
25-Jul	187,52	158,75	2,41
26-Jul	186,15	149,20	2,33
27-Jul	188,78	137,80	2,27
28-Jul	192,68	143,93	2,34
29-Jul	198,58	152,57	2,44
30-Jul	198,40	157,87	2,47
31-Jul	194,99	161,37	2,48

Tabela D 2: Resultados do flúor gasoso e particulado no gás de entrada

Data	Flúor gasoso [mg]	Flúor particulado [mg]	Flúor Total [mg]
8-Jan	706,00	287,90	993,90
12-Jan	242,50	257,40	499,90
18-Jan	509,60	381,70	891,30
20-Jan	588,70	302,40	891,10
2-Fev	760,70	342,80	1103,50
5-Fev	629,50	278,80	908,30
12-Fev	423,60	166,00	589,60
16-Fev	690,70	328,10	1018,80
5-Mar	1029,40	542,50	1571,90
7-Mar	260,70	313,50	574,20
17-Mar	181,80	382,40	564,20
21-Mar	598,20	189,70	787,90
7-Abr	795,60	250,50	1046,10

Análise dos Factores que Influenciam os Teores de Flúor na Alumina Secundária no Centro de Tratamento de Gases da Fundição de Alumínio

10-Abr	836,40	386,80	1223,20
16-Abr	674,00	248,10	922,10
18-Abr	474,90	475,70	950,60
9-Jun	650,60	299,90	950,50
15-Jun	191,20	174,40	365,60
21-Jun	553,90	311,10	865,00
25-Jun	576,90	294,50	871,40
3-Jul	353,60	399,50	753,10
7-Jul	518,80	348,90	867,70
11-Jul	239,40	427,40	666,80
17-Jul	783,10	329,70	1112,80

Tabela D 3: Resultados da concentração de flúor no gás de entrada.

Data	Volume [m ³]	CFg [mg/Nm ³]	CFp [mg/Nm ³]	CTotal [mg/Nm ³]
3-Jan	4,09	172,70	70,43	243,13
12-Jan	5,69	42,62	45,24	87,86
17-Jan	3,69	138,10	103,44	241,55
25-Jan	3,60	163,53	84,00	247,53
1-Fev	4,62	164,65	74,20	238,85
6-Fev	3,66	172,09	76,22	248,31
12-Fev	4,35	97,38	38,16	135,54
16-Fev	4,01	172,46	81,92	254,38
6-Mar	3,91	263,54	138,89	402,43
12-Mar	3,99	65,37	78,61	143,98
16-Mar	3,81	47,69	100,32	148,01
25-Mar	4,09	146,26	46,38	192,64
9-Abr	3,97	200,61	63,16	263,77
18-Abr	3,64	229,78	106,26	336,04
19-Abr	3,65	184,56	67,94	252,49
21-Abr	3,81	124,65	124,86	249,50
9-Jun	3,53	184,31	84,96	269,26
15-Jun	4,29	44,57	40,65	85,22
21-Jun	4,46	124,19	69,75	193,95
25-Jun	3,99	144,66	73,85	218,51
3-Jul	3,88	91,18	103,02	194,20
7-Jul	3,95	131,41	88,37	219,78
11-Jul	4,40	54,41	97,14	151,55
17-Jul	4,10	191,00	80,42	271,42