



UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE

Faculdade de Engenharia

Departamento de Engenharia Química

Licenciatura em Engenharia Química

**AVALIAÇÃO DO TEOR DE CARBONO EM ALUMINA CARREGADA USADA NA
REDUÇÃO ELECTROLÍTICA DO ALUMÍNIO**

Autora:

Joyce Cátia Camilo

Supervisor

Prof. Doutor Borges Chambal, Eng.º

Maputo, Fevereiro de 2024



UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE

Faculdade de Engenharia

Departamento de Engenharia Química

Licenciatura em Engenharia Química

**AVALIAÇÃO DO TEOR DE CARBONO EM ALUMINA CARREGADA USADA NA
REDUÇÃO ELECTROLÍTICA DO ALUMÍNIO**

Autora:

Joyce Cátia Camilo

Supervisor

Prof. Doutor Borges Chambal, Eng.º

Maputo, Fevereiro de 2024

TERMO DE ENTREGA DO RELATÓRIO DE ESTÁGIO PROFISSIONAL

Declaro que a estudante Joyce Cátia Camilo entregou no dia ____/____/2024 as 04 cópias do Relatório do seu Estágio Profissional intitulado: **Avaliação do teor de carbono em alumina carregada usada na redução electrolítica.**

Maputo, ____ de _____ de 20 ____

O Chefe da Secretaria

DECLARAÇÃO SOB PALAVRA DE HONRA

Eu, Joyce Cátia Camilo, declaro por minha honra que o presente trabalho foi realizado inteiramente por mim, na empresa Moçambique Alumínio, no âmbito da conclusão do curso de Licenciatura em Engenharia Química, no Departamento de Engenharia Química da Universidade Eduardo Mondlane.

Maputo, ____ de _____ de 20 ____

(Joyce Cátia Camilo)

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradecer meu Senhor e Salvador Jesus Cristo, meu Deus, que tem guiado meu caminho, sempre fazendo com que a vontade Dele prevalecesse em relação a minha. Nada conseguiria sem a luz do Espírito Santo. Agradecer também pelas intercessões da nossa Senhora Gloriosa Mãe de Deus e sempre Virgem Maria e da minha Santa padroeira Santa Catarina.

Aos meus pais, Nacir Camilo e Ella Prokhorova Evguenievna, pelo amor, apoio, cuidado e ensinamentos, proporcionando o carácter e princípios que possuo, pela fé que sempre tiveram em mim, principalmente pelas fortes orações da minha mãe. Ao meu irmão, Lewis Camilo, obrigada pela força. Aos meus pais espirituais, Bispo Ioannis e Padre Cristo, por todos ensinamentos e todas orações desde a escola até a faculdade, nunca me deixaram ficar longe da Palavra e por sempre manterem a minha luz acesa.

À Moçambique Alumínio pela oportunidade, proporcionando-me uma incrível experiência de estágio e aprendizado. Às pessoas que tornaram possível a realização deste trabalho: Luís Mata por todos ensinamentos, tempo e motivação; Leila Macave por todo suporte; Tomás Sigaúque pelo apoio na elaboração e realização do plano de actividades laboratoriais; Samuel Uamusse pelo imenso apoio na determinação do teor de carbono nas amostras diárias; Paulino Chau que apesar da dificuldade da amostragem do “tar in stack” se fez disponível em ajudar-me; Samuel Mandlate pelo suporte no processo de extracção; Sansão Chaúque, Arnaldo Nhavoto e Jaime Vicente por partilharem os conhecimentos relacionados ao Forno e seu processo, proporcionando visitas para melhor entendimento.

Ao Manuel Cumbi por todo suporte e incentivo. Ao Dias Bande pelo acompanhamento e por confiar no potencial das meninas do projecto “Mulher na indústria”. Às incríveis amigas que me acompanharam nessa jornada: Milene Charifo por todo suporte moral e auxílio nas actividades laboratoriais; e Eive Nhone pelas trocas de ideias e motivação. Ao meu supervisor, Borges Chambal, pelos ensinamentos ao longo do curso, pela paciência e acompanhamento no processo de realização do trabalho final. Aos meus queridos amigos e colegas de faculdade, Narcésia Zandamela e António Chirico, por todo suporte.

RESUMO

O processo de produção de alumínio é comumente realizado através da electrólise da alumina fundida entre um ânodo e cátodo de carbono. Os ânodos de carbono são preparados através de um cozimento em um Forno de Cozimento de Ânodos (FCA), onde ocorre libertação de fumo que contém hidrocarbonetos e fluoretos na sua composição. Estas emissões são posteriormente tratadas em um Centro de Tratamento de Fumo (CTF), usando a alumina como agente de adsorção. O teor de carbono na alumina do Centro de Tratamento de Fumo não deve ser superior a 0.5% (w/w), para evitar a saturação da alumina e impactos ambientais adversos, sendo este problema a base do presente trabalho de pesquisa. O presente trabalho foi realizado na empresa de fundição de alumínio, cujo objectivo era avaliar o teor de carbono na alumina carregada, um termo usado para denominar a alumina rica em hidrocarbonetos e flúor gerada no Centro de Tratamento do Fumo. O trabalho consistiu na análise do teor de carbono em alumina carregada em dois pontos de amostragem, nomeadamente, nos filtros 2 e 3 do Centro de Tratamento de Fumos. O trabalho incluiu também a determinação do teor de alcatrão emitido por volume de gás para a atmosfera. O ensaio consistiu na avaliação do impacto do incremento do fluxo de alumina primária no teor de carbono. A determinação do teor de carbono na alumina carregada foi realizada a partir da espectroscopia de absorção de radiação infravermelha e o teor de alcatrão no gás foi determinado pela extracção sólido-líquido. Os ensaios realizados, mostraram que o teor de carbono na alumina carregada, mantendo o fluxo de gás constante e aumentando o fluxo de alumina primária de 1200 para 1538 kg/h e de 1200 para 1406 kg/h, para os filtros 2 e 3 respectivamente, reduz o teor de carbono de 0.508 para 0.280 % (w/w) e de 0.634 para 0.254 % (w/w). Mantendo o fluxo de alumina constante e reduzindo o fluxo de gás de 12.43 para 10.76 Nm³/s e de 16.5 para 9.79 Nm³/s, para os filtros 2 e 3 respectivamente, o teor de carbono reduz de 0.661 para 0.508 % (w/w) e de 0.676 para 0.512 % (w/w). A quantidade de alcatrão emitido por volume de gás para a atmosfera reduz de 13 para 3 mg/Nm³ com o aumento do fluxo de alumina primária de 1000 para 1511 kg/h. Deste modo, foi possível constatar que o fluxo de alumina primária tem maior impacto na concentração de carbono na alumina.

Palavras-chaves: Centro de Tratamento de Fumos, alumina, *tar*, adsorção.

ABREVIATURAS, SÍMBOLOS E ACRÓNIMOS

%: Percentagem

% w/w: Percentagem peso por peso

° C: Graus Celsius

Al: Alumínio

AlF₃: Trifluoreto de alumínio

Al₂O₃: óxido de alumínio (III) (alumina)

C: Carbono

CaF₂: Fluoreto de cálcio

CF₄: Tetrafluorometano

C₂F₆: Hexafluoretano

CO: Monóxido de carbono

CO₂: Dióxido de carbono

CTF: Centro de Tratamento de Fumos

DCM: Diclorometano

FCA: Forno de Cozedura de Ânodos

h: Horas

HAP: Hidrocarbonetos aromáticos policíclicos

HF: fluoreto de hidrogénio

K: Kelvin

kJ: kilo Joules

kg: Kilogramas

mm: milímetros

mg: Miligramas

mL: mililitros

min: minutos

MJ: Mega Joules

Nm³: Normais metros cúbicos

Na₃AlF₆: Hexafluoraluminato de sódio (criolita)

P_s: Pressão estática

P_D: Pressão dinâmica

s: Segundos

Tar: voláteis de alcatrão.

SO₂: Dióxido de enxofre

SO₃: Trióxido de enxofre

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. OBJECTIVOS	3
1.1.1. Objectivo geral	3
1.1.2. Objectivos específicos	3
1.2. JUSTIFICATIVA DA ESCOLHA DO TEMA	4
1.3. METODOLOGIA.....	5
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	7
2.1. HISTÓRIA DO ALUMÍNIO.....	7
2.2. PRODUÇÃO DE ALUMÍNIO PRIMÁRIO EM ÁFRICA	8
2.2. PROCESSO DE PRODUÇÃO DE ÂNODOS DE CARBONO PRÉ-COZIDOS	9
2.2.1. Matéria-prima	9
2.2.2. Forno de Cozedura dos Ânodos (FCA).....	11
2.3. CENTRO DE TRATAMENTO DE FUMO (CTF).....	16
2.3.1. Impacto das emissões de <i>tar</i> e flúor	17
2.3.2. Adsorção	18
2.3.3. Filtração de gás.....	22
2.4. PROCESSO DE HALL-HÉROULT.....	23
2.4.1. Efeito anódico	25
3. ESTUDO DE CAMPO	27
3.1. PROCESSO DE PRODUÇÃO DE ALUMÍNIO	27
3.2. ESTUDO DE CASO: CENTRO DE TRATAMENTO DE FUMO (CTF) ...	29
3.2.1. Circuito de fumo	29
3.2.2. Circuito de alumina	31
4. MATERIAIS E MÉTODOS	34
4.1. CALIBRAÇÃO DA BALANÇA DE FLUXO DE ALUMINA PRIMÁRIA.....	34
4.2. DETERMINAÇÃO DO TEOR DE CARBONO EM ALUMINA CARREGADA	34
4.2.1. Amostragem.....	34
4.2.2. Preparação e análise da amostra	35
4.3. DETERMINAÇÃO DO FLUXO VOLUMÉTRICO DE GÁS POR FILTRO	35
4.4. DETERMINAÇÃO DO TEOR DE TAR POR VOLUME DE GÁS EMITIDO	38

4.4.1. Amostragem.....	38
4.4.2. Preparação e análise da amostra	40
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	42
5.1. CALIBRAÇÃO DA BALANÇA DE FLUXO DE ALUMINA PRIMÁRIA	42
5.2. CONCENTRAÇÃO DE CARBONO NA ALUMINA DOS FILTROS EM RELAÇÃO AO FLUXO DE ALUMINA PRIMÁRIA	42
4.2.1. Análise do fluxo de alumina primária, teor de carbono e fluxo de gás no filtro 2	45
4.2.2. Análise do fluxo de alumina primária, teor de carbono e fluxo de gás no filtro 3	46
5.3. ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO FLUXO DE ALUMINA PRIMÁRIA NAS EMISSÕES DA CHAMINÉ	47
6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	49
6.1. CONCLUSÕES	49
6.2. RECOMENDAÇÕES	50
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	51

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Fábrica Moçambique Alumínio.....	9
Figura 2: Estrutura do ânodo de carbono.....	10
Figura 3: Transferência de calor no cozimento do ânodo.	12
Figura 4: Esquema do forno de cozimento dos ânodos.	12
Figura 5: Disposição dos ânodos nos poços.....	13
Figura 6: Forno de Cozedura.	14
Figura 7: Diagrama de fluxo do processo no Centro de Tratamento de Fumo.....	16
Figura 8: Adsorção.....	18
Figura 9: Efeito da temperatura na adsorção física e adsorção química, respectivamente.	19
Figura 10: Esquema de formação de bolo em um filtro de bolsas.....	23
Figura 11: Pote de redução electrolítica.	24
Figura 12: Processo de produção na Moçambique Alumínio.	27
Figura 13: Centro de Tratamento de Fumo.....	29
Figura 14: Torre de resfriamento.....	30
Figura 15: Modo de operação da balança de impacto	31
Figura 16: Filtro de bolsas.....	32
Figura 17: Medição do fluxo no tubo de Pitot.	36
Figura 18: Anemômetro.....	37
Figura 19: Aparato de vidro para suporte da resina e circulação do gás.	39
Figura 20: Amostragem na chaminé.	40
Figura 21: Extractor de Soxhlet.....	41

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1: Processos chave do cozimento de ânodo (Fonte: KELLER & SULGER, 2008).	15
Tabela 2: Limite das emissões na produção de alumínio segundo o Decreto 18/2004 do regulamento sobre os padrões de qualidade ambiental e de emissão de efluentes (WORLD BANK GROUP, 1998).	17
Tabela 3: Composição do fumo na entrada e saída do CTF massa do composto por volume de gás em condições padrões (Fonte: Moçambique Alumínio).	29
Tabela 4: Fluxo de alumina calculado e medido pela balança antes da calibração. .	42
Tabela 5: Variação do teor de carbono da alumina do filtro 2 em função do caudal de gás mantendo contante o fluxo de alumina primária.	46
Tabela 6: Variação do teor de carbono da alumina carregada do filtro 2 em função do fluxo de alumina primária mantendo constante o caudal de gás.	46

1. INTRODUÇÃO

A Moçambique Alumínio é a única fábrica de produção de alumínio em Moçambique e a segunda maior em África. A companhia opera no Sul do país, no Parque Industrial de Beluluane, província de Maputo (MARCOS, 2017). A empresa Moçambique Alumínio produz cerca de 550000 toneladas de alumínio anualmente.

O alumínio é o terceiro elemento mais abundante (8.1%) na crosta terrestre (KVANDE et al., 2012). Entretanto, este não ocorre na natureza na forma livre de alumínio puro, pois está associado aos seus óxidos, sendo o óxido de alumínio (alumina) a forma mais comum. Por sua vez o minério de alumínio, a bauxite, é refinada pelo método de Bayer com a finalidade de concentrar a alumina da matéria-prima (YOUSSEF et al., 2023). Já a fundição e redução do alumínio são baseados no método de Hall-Héroult. A empresa de fundição de alumínio dedica-se apenas ao processo Hall-Héroult, uma vez que, a matéria-prima, a alumina, vem previamente processada. A electrólise da alumina é realizada entre ânodos de carbono e cátodo de grafite, onde os ânodos são cozidos previamente nos Fornos de Cozedura de Ânodos (FCA).

A indústria metalúrgica é um dos sectores mais pressionados quando se trata do atendimento às exigências da legislação ambiental (*FiberSals*, 2017), daí a necessidade de garantir um tratamento eficiente de efluentes líquidos e gasosos, assim como o tratamento de resíduos sólidos gerados durante o processo de produção. O fumo nocivo gerado no Forno de Cozedura de Ânodos contém hidrocarbonetos e fluoreto de hidrogénio ou flúor particulado, que são tratados em um Centro de Tratamento de Fumo (CTF) através da adsorção em alumina e filtração gás-sólido. Esta alumina que contém carbono e flúor após o tratamento no CTF é designada por *alumina carregada*.

A saturação da alumina por carbono pode eventualmente causar danos para o ambiente, para a comunidade e afectar o processo de redução electrolítica que reaproveita esta alumina. Caso a alumina esteja saturada, a área de superfície reduz, o fumo não é tratado devidamente e, como consequência os poluentes nele contidos são emitidos para a atmosfera, contribuindo para o aquecimento global e podendo afectar a saúde da comunidade e a vegetação ao redor. O alto teor de carbono na

alumina reduz o tempo de vida dos filtros e a solubilidade da alumina no processo de redução, aumentando assim temperatura de fundição.

É neste contexto que surgiu o presente trabalho, cujo objectivo é estudar a causa do alto do teor de carbono na alumina carregada do Centro de Tratamento de Fumo (CTF) da empresa Moçambique Alumínio, uma vez que esta se encontra acima das especificações estabelecidas pelo fabricante de 0.5% (w/w).

1.1. OBJECTIVOS

1.1.1. Objectivo geral

- Investigar a causa do alto teor de carbono na alumina carregada proveniente do Centro de Tratamento de Fumo (CTF) da empresa de fundição de alumínio e a sua influência nas emissões.

1.1.2. Objectivos específicos

- Analisar o teor de carbono presente na alumina carregada do Centro de Tratamento de Fumo;
- Correlacionar o teor de carbono na alumina carregada com o fluxo de fumo e o fluxo de alumina primária alimentados no Centro de Tratamento de Fumo;
- Correlacionar o fluxo de alumina primária e emissões do efluente *tar* para a atmosfera.

1.2. JUSTIFICATIVA DA ESCOLHA DO TEMA

O processo de cozedura dos ânodos liberta gases que contribuem para o efeito estufa. Caso a qualidade de combustão seja fraca, maior será o teor de carbono contido no gás alimentado ao Centro de Tratamento de Fumo, e conseqüentemente maior será o teor de carbono na alumina carregada. A alumina carregada é posteriormente usada no processo de redução da alumina em alumínio. Se a alumina carregada estiver saturada de carbono, provocará o efeito anódico nos potes de redução, ou seja, por estar coberta de hidrocarbonetos na sua superfície, a sua densidade aumenta fazendo com que se deposite no fundo do pote e que a temperatura e tensão do pote aumentem devido a baixa concentração de alumina no banho electrolítico, causando maior consumo de energia e um rápido consumo do ânodo. Para além disto, a alumina saturada de carbono deixa de tratar de forma eficiente os gases provenientes do forno, fazendo com que a sua adsorção dependa apenas da alumina primária.

Uma vez que a quantidade de alumina primária alimentada encontrava-se no limite inferior das especificações estabelecidas pelo fabricante, é possível variar este parâmetro de modo a aumentar a área de adsorção.

1.3. METODOLOGIA

A revisão bibliográfica consistiu na pesquisa, leitura e recolha de informações em livros, artigos científicos, trabalhos de licenciatura, dissertações de mestrado, módulos de treinamento da empresa Moçambique Alumínio, guiões de Procedimento Operacional Padrão (Standard Operating Parameters, "SOP") de amostragem e análises realizadas nos equipamentos usados no laboratório da empresa Moçambique Alumínio.

A exposição ao campo consistiu em compreender os processos industriais na prática, desenvolver habilidades técnicas e para soluções de problemas.

A parte experimental consistiu na:

- Calibração da balança de fluxo de alumina primária: determinação da margem de erro da balança para sua calibração de modo a obter informação fiável.
- Amostragem: colecta de amostras de alumina nos três filtros do Centro de Tratamento de Fumo e colecta de *tar* contido por volume de gás efluente da chaminé após o tratamento.
- Tratamento das amostras: análise laboratorial para a determinação da concentração de carbono na alumina carregada por espectroscopia de absorção infravermelha; e para a determinação da quantidade de *tar* emitido por volume de gás pelo método de extracção sólido-líquido.

A análise de resultados compreendeu no tratamento dos dados obtidos a partir de análises laboratoriais, baseando-se na sua apresentação através de gráficos e tabelas para melhor interpretação.

O presente trabalho inclui a justificativa da escolha do tema, revisão bibliográfica para compreensão do tema em estudo, procedimentos realizados na amostragem e análise dos dados experimentais e discussão dos resultados obtidos seguindo o regulamento de culminação do curso da Universidade Eduardo Mondlane.

As limitações do trabalho estão relacionadas com dados referentes ao Forno de Cozedura dos Ânodos. Era de interesse analisar a composição do fumo a entrada do Centro de Tratamento de Fumo, porém esta é uma técnica de amostragem que deixou

de ser efectuada pelo Laboratório da empresa Moçambique Alumínio. Não sabendo qual o teor de carbono presente no fumo emitido pelo forno durante a cozedura não é possível investigar na totalidade a causa da subida no teor de carbono da alumina, se é devido a qualidade de combustão ou pela quantidade de fluxo de alumina primária alimentada no Centro de Tratamento. Outro aspecto esteve relacionado com filtro 1, que tinha um comportamento instável por apresentar alarmes recorrentes de alto nível de alumina na tremonha, como consequência a válvula de alimentação de alumina primária do filtro fechava, fazendo com que apenas a alumina carregada fosse alimentada ao filtro. Por conta disto, não foi possível analisar uma amostra representativa, ou seja, dos três filtros, que daria melhor informação sobre o efeito do fluxo de alumina primária na concentração de alumina carregada. A falta de um *autosampler*, um dispositivo que colheria a amostra representativa periodicamente, forneceria uma visão geral da performance do Centro de Tratamento de Fumos ao longo do dia, mas neste caso as amostras correspondiam ao momento do dia em que foram colhidas.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. HISTÓRIA DO ALUMÍNIO

O alumínio é um metal de baixa densidade, não tóxico, possui alta condutividade térmica, excelente resistência à corrosão e pode ser facilmente fundido, usinado e conformado. Não é magnético e não produz faíscas. É o segundo metal mais maleável e o sexto mais dúctil (*Aluminium*, sem data).

Em 1808, Humphrey Davy foi o mentor da descoberta do alumínio, ao fundir o ferro na presença do alumínio por electrólise (*Alumínio*, 2016).

Em 1825, Hans Christian Oersted conseguiu isolar o alumínio a partir da reacção entre o cloreto de alumínio com amálgama de potássio (liga de potássio e mercúrio). O aquecimento da amálgama de alumínio resultante sob pressão reduzida fez com que o mercúrio evaporasse, deixando um metal que continha muitas impurezas (SHELTON, 2017).

Em 1854, Henri Saint-Claire Deville demonstrou que podia ser usado o sódio, que é menos dispendioso que o potássio, como redutor formando um complexo com baixa temperatura de fusão, o tetracloroaluminato de sódio (NaAlCl_4). Deville adicionou fluoreto de cálcio (CaF_2) e mais tarde a criolita (Na_3AlF_6) como solvente para a formação do alumínio a partir do óxido de alumínio (MAHINROOSTA & ALLAAHVERDI, 2018).

Em 1886, Hall e Héroult inventaram o processo de produção do alumínio. Primeiro, eles tiveram que seleccionar um electrólito, ou seja, um composto de alumínio apropriado, que pudesse ser electrolisado em um banho apropriado. Depois de muitas tentativas, Hall e Héroult seleccionaram o óxido de alumínio (Al_2O_3), também chamado de alumina, e estudaram a optimização do banho eletrolítico. As qualidades exigidas eram: um baixo ponto de fusão e uma baixa resistência eléctrica, a fim de reduzir o consumo de energia. O banho também devia garantir que o electrólito fosse facilmente dissolvido e que o metal produzido fosse facilmente isolado e extraído. Os dois inventores tiveram que projectar o pote onde o processo de electrólise seria realizado,

bem como os materiais do ânodo e do cátodo, seu tamanho, forma e posição. Este processo é usado até hoje (LAPARRA, 2012).

2.2. PRODUÇÃO DE ALUMÍNIO PRIMÁRIO EM ÁFRICA

Os 5 principais produtores de alumínio primário em África são:

1. HILLSIDE ALUMINIUM (África do Sul);
2. MOZAL ALUMINIUM (Moçambique);
3. EGYPTALUM (Egipto);
4. VALCO (Camarões);
5. ALUCAM (Gana).

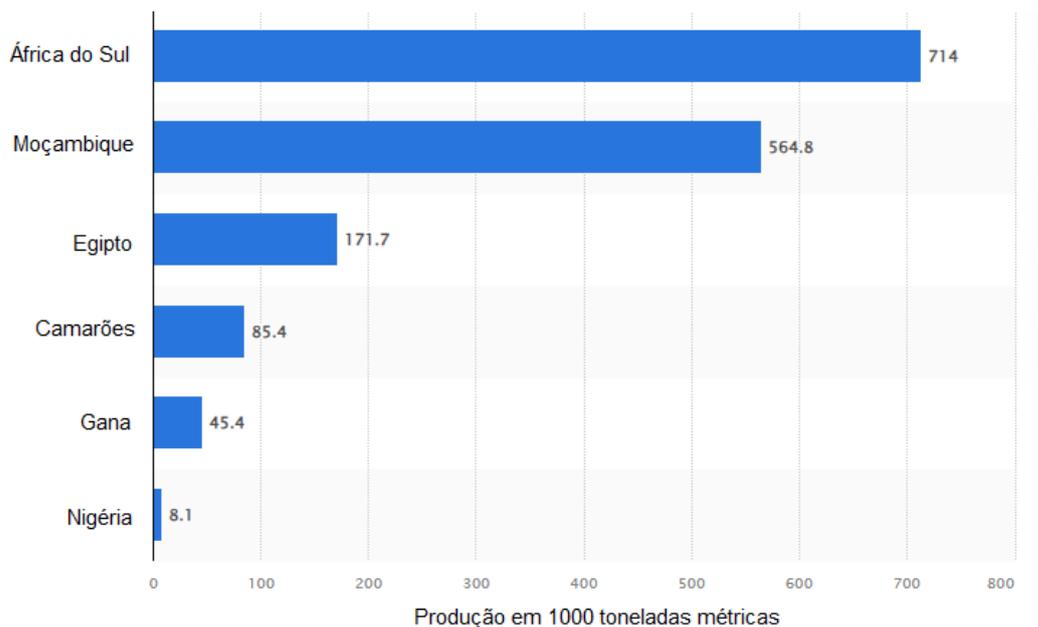


Gráfico 1: Produção de alumínio em África em 2021.

Fonte: Adaptado de SASU (2022).

A empresa Moçambique Alumínio é o maior empregador industrial em Moçambique, uma nação da África Austral, dando um contributo significativo para a economia local. A fundição de alumínio está situada a apenas 20 quilômetros a oeste da capital de Moçambique, Maputo (SOUTH32, 2023).



Figura 1: Fábrica Moçambique Alumínio

Fonte: Moçambique Alumínio.

A empresa foi inicialmente construída para produzir 250000 toneladas por ano, e é agora o maior produtor de alumínio em Moçambique e o segundo maior em África com uma produção anual total de cerca de 550000 toneladas. É responsável por 30% das exportações oficiais do país e também utiliza 45% da electricidade produzida em Moçambique (MAJUMDER, 2021).

2.2. PROCESSO DE PRODUÇÃO DE ÂNODOS DE CARBONO PRÉ-COZIDOS

2.2.1. Matéria-prima

As fábricas modernas de fundição de alumínio pré-cozem os ânodos antes da electrólise, onde estes ânodos são chamados de ânodos pré-cozidos. Esta tecnologia substituiu a tecnologia de ânodos Soderberg, onde os ânodos são cozidos durante a electrólise, porém o fumo gerado neste processo coloca em risco a saúde da comunidade, trabalhadores e o meio ambiente (KELLER & SULGER, 2008).

Um ânodo é um bloco em forma de paralelepípedo de carbono amorfo calcinado a alta temperatura. Sua superfície superior apresenta furos cilíndricos, nos quais estão localizados os pinos com hastes de ferro fundido. Um terço do volume do ânodo é

composto por poros microscópicos que se intercomunicam em maior ou menor grau, o que torna o ânodo permeável aos gases (CHAREYRE et al., 2016).

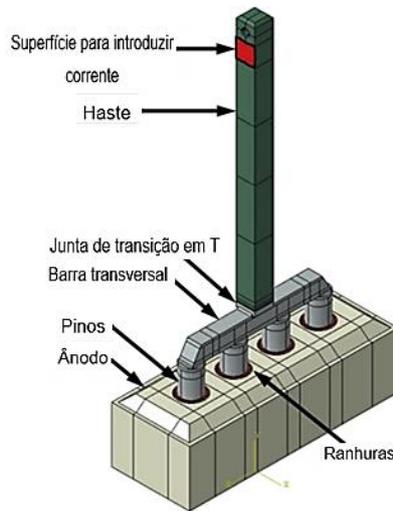


Figura 2: Estrutura do ânodo de carbono.

Fonte: Adaptado de GUNASEGARAM & MOLENAAR (2015).

Os ânodos de carbono são grandes blocos usados para conduzir corrente eléctrica durante a troca de electrões com o cátodo no processo de redução do alumínio. Os ânodos de carbono são constituídos por coque de petróleo (60-70% w/w), alcatrão de petróleo (14-17% w/w) e ânodos reciclados (15-20% w/w) (RADENOVIC, sem data).

O coque tem uma composição elementar de mais de 80% de carbono, com quantidades variáveis de hidrogênio, nitrogênio, enxofre, oxigênio e algumas impurezas (HUSSAN, 1994). Deve ter densidade ideal, garantindo porosidade suficiente para interação com o aglutinante, boa conductividade eléctrica e dureza apropriada, para garantir as características térmicas do ânodo e sua estabilidade durante o processo de electrólise. O teor de misturas de metais e enxofre no coque deve ser baixo para que o ânodo não seja muito reactivo, ou seja, que o ânodo não seja rapidamente consumido durante a electrólise e dessa maneira reduzir as emissões de poluentes. O coque de petróleo calcinado é usado para o empacotamento, para reduzir o ingresso de ar durante o cozimento (RADENOVIC, sem data).

O alcatrão de petróleo é um aglomerante das partículas de coque, devido ao elevado índice de carbono em sua estrutura polimérica que faz com que a força de interação entre as moléculas seja maior, e se apresenta sólido a temperatura ambiente. Após a fusão, o alcatrão se solidifica sem cristalização (DOMINGOS et al., sem data).

Os ânodos reciclados são ânodos reaproveitados após a redução electrolítica. É importante que seja feita a devida limpeza destes ânodos, deixando apenas traços de material do banho electrolítico, que sejam duros e não porosos. (KVANDE et al., 2012). Os ânodos reciclados fornecem conductividade e densidade adicional aos ânodos de carbono, diminuindo dessa forma a porosidade dos mesmos para evitar com que sejam consumidos rapidamente durante o processo de electrólise.

2.2.2. Forno de Cozedura dos Ânodos (FCA)

A qualidade dos ânodos está directamente relacionada ao custo de produção, consumo de carbono, energia e emissões ambientais. É desejável que os ânodos tenham: alta densidade; baixa porosidade pois a presença de rachaduras e poros aumenta a resistividade eléctrica do ânodo, aumentando o consumo do ânodo e consequentemente o custo de produção; baixa resistividade eléctrica para reduzir a energia necessária durante a electrólise; e baixa reactividade de ar e dióxido de carbono (AMRANI et al., 2021).

Os fornos mais usados actualmente para o processo de cozimento são os fornos tipo anel de formato “U”, na qual os ânodos permanecem estacionários em seus poços, enquanto que as rampas de combustão e arrefecimento se movem por secções ao longo do processo. Todo o processo corresponde a um trocador de calor semi-contínuo em contracorrente (HUSSAN, 1994).

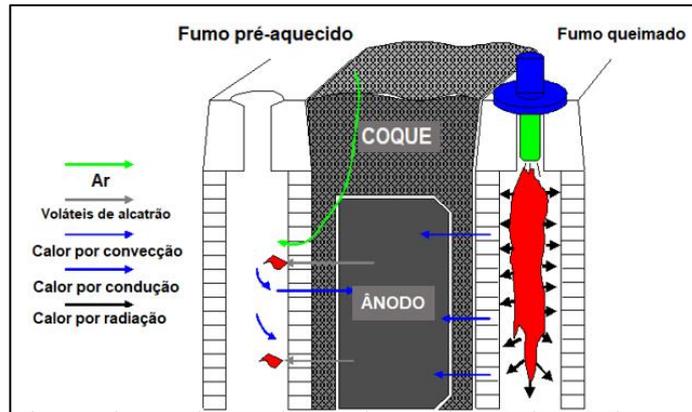


Figura 3: Transferência de calor no cozimento do ânodo.

Fonte: Adaptado de (MOÇAMBIQUE ALUMÍNIO, sem data-a).

As secções de cozimento são conectadas em série e o processo de cozimento do ânodo ocorre em vários estágios simultaneamente ao longo das secções do forno (AARHAUG et al., sem data).

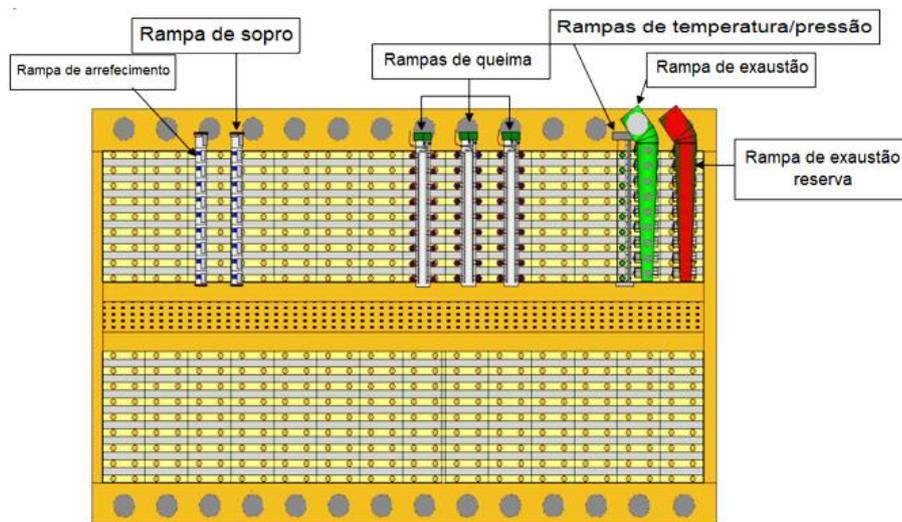


Figura 4: Esquema do forno de cozimento dos ânodos.

Fonte: Adaptado de (MOÇAMBIQUE ALUMÍNIO, sem data-b).

Os poços são separados por paredes de tijolo refractário ocas, através das quais circulam os gases quentes durante a fase de cozimento e o ar flui durante a fase de resfriamento (CHAREYRE et al., 2016).



Figura 5: Disposição dos ânodos nos poços.

Fonte: Adaptado pela autora, Forno de Cozedura (2023).

O forno funciona como um trocador de calor entre as paredes de tijolos refractários, os ânodos e o coque de enchimento. O ar ambiente é succionado por ventiladores para o interior das paredes pela rampa de arrefecimento, ocorrendo a troca de calor dos ânodos cozidos para o coque de enchimento, do coque de enchimento para as paredes, e das paredes para o ar frio, arrefecendo dessa forma o ânodo e aquecendo o ar (KELLER & SULGER, 2008). O forno é composto por três secções: pré-aquecimento, aquecimento e arrefecimento.

O ar proveniente da secção de arrefecimento, realiza o pré-arrefecimento dos ânodos cozidos através da rampa de sopro. A rampa de sopro é responsável pela inserção do oxigénio na câmara de combustão.

Na secção de aquecimento, ar se encontra mais quente que o ânodo, e gás natural (metano) com poder calorífico de 50 MJ/kg (KELLER & SULGER, 2008) é injectado pela rampa de queima. Devido a alta temperatura deste ar, o metano entra em combustão, e a cozedura dos ânodos ocorre a mais ou menos 1100°C.

A combustão do gás metano com o ar gera o fumo que passa para a fase do pré-aquecimento dos ânodos verdes. Os ânodos verdes contêm voláteis de alcatrão que são queimados antes do cozimento na zona de pré-aquecimento, contribuindo em

cerca de 40 a 50 % da energia total usada no forno (KELLER & SULGER, 2008). Nesta secção ocorre transferência de calor do fumo quente para os ânodos verdes frios, précozendo-os e reduzindo a temperatura do fumo. Pequenas quantidades de hidrocarbonetos aromáticos policíclicos escapam no princípio do pré-aquecimento, antes de atingir a sua temperatura de ignição, não queimando durante o processo (KELLER & SULGER, 2008). O fumo passa pela rampa de exaustão, onde está sob pressão negativa criada pelos exautores do Centro de Tratamento de Fumo.



Figura 6: Forno de Cozedura.

Fonte: (INNOVATHERM, sem data)

Após um período de 24 a 32 horas, tanto a rampa de exaustão quanto as rampas de sopro e resfriamento avançam uma secção, sendo a última rampa de queima transferida a montante da zona de aquecimento (CHAREYRE et al., 2016).

2.2.2.1. Processos químicos e físicos afectados pela combustão

Ânodos reciclados: a temperaturas acima de 900°C são libertados fluoretos dos ânodos reciclados, provenientes do banho electrolítico do processo de redução. Estudos mostram que os níveis de fluoretos de hidrogénio (HF) sobem para 0.3kg por tonelada de ânodos cozidos (KELLER & SULGER, 2008).

Coque de petróleo: aquecendo este material a temperaturas na ordem de 2500°C resultaria na mudança da sua estrutura cristalina para grafite. Mantendo os ânodos em torno de 1100°C a 1150°C se atinge uma mudança de estrutura parcial, onde a orientação da estrutura cristalina resulta em uma melhor condutividade eléctrica e melhor resistência térmica contra o ataque do ar ambiente e do dióxido de carbono gerado durante a electrólise. Porém, a temperaturas maiores que 1150°C são gerados de óxidos de enxofre que formam microporos que aumentam a reactividade com o ar e aumenta o consumo do ânodo no processo de electrólise (KELLER & SULGER, 2008).

Alcatrão: o ideal seria queimar toda matéria volátil do alcatrão, porém uma parte desta escapa a níveis de temperatura baixos para ignição (KELLER & SULGER, 2008).

Tabela 1: Processos chave do cozimento de ânodo (Fonte: KELLER & SULGER, 2008).

Tempo (dias)	Temperatura (°C)	Processos do cozimento
1	150-350	O ânodo perde estabilidade quando o alcatrão se torna líquido.
1.5	350-450	Formação e queima dos voláteis leves de alcatrão.
	450-600	Solidificação entre o alcatrão e coque. Formação e queima dos voláteis mais pesados.
3	600-900	Libertação de metano e hidrogénio.
4.5	900-1200	Mudança de estrutura cristalina do aglutinante de coque e alcatrão.
6 a 7	>1150	Alcatrão liberta nitrogénio e enxofre.

2.3. CENTRO DE TRATAMENTO DE FUMO (CTF)

O fumo extraído do forno contém várias impurezas, em particular:

- Poeiras de carbono: proveniente do coque não queimado e coque de empacotamento, criando o risco de incidentes de incêndio na rampa de exaustão;
- Hidrocarbonetos (*Total Organic Carbon* TOC);
- Hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (HAP's): condensados e gasosos, cancerígenos ao ser humano;
- Fluoretos: prejudica a vegetação, a saúde do gado da comunidade e reduz o tempo de vida das paredes de refractário do forno de cozedura;
- Dióxido de enxofre: é emitido em pequenas quantidades, mas contribui na formação de chuvas ácidas (KELLER & SULGER, 2008).

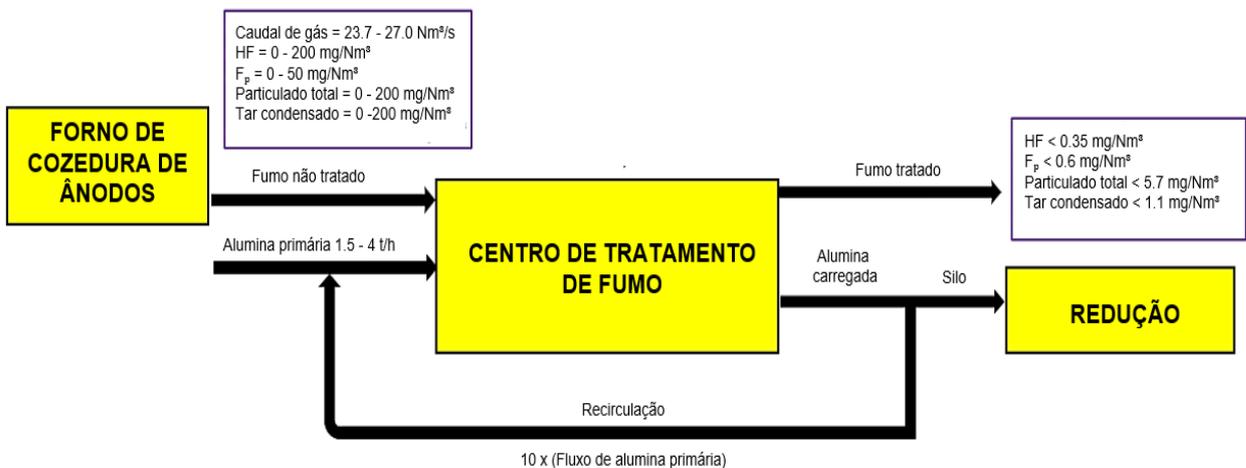


Figura 7: Diagrama de fluxo do processo no Centro de Tratamento de Fumo.

Fonte: Adaptado pela autora (2023).

No Centro de Tratamento de Fumo, o gás é succionado do forno de cozedura por exaustores, garantindo um bom funcionamento das rampas e também para a limpeza dos gases. O gás passa primeiro por uma torre de arrefecimento onde é injectada água e ar comprimido para reduzir a temperatura do gás até a temperatura de condensação do *tar*, removendo partículas maiores de *tar* presentes. Em seguida,

ocorre a adsorção dos fluoretos e hidrocarbonetos remanescentes em alumina primária, ao passar por reactores de Venturi¹. Ocorre uma segunda adsorção nos filtros, uma vez que a alumina carregada fica retida enquanto que o fumo limpo segue para a chaminé. Cada filtro tem um sistema de ar reverso que faz com que pulsem para remover a alumina carregada. A alumina carregada é usada para a recirculação no CTF e também no processo de redução electrolítica do alumínio.

2.3.1. Impacto das emissões de *tar* e flúor

O processo de produção de alumínio a partir de ânodos pré-cozidos tem maior eficiência em relação ao processo Soderberg em termos de tratamento dos gases gerados, sendo respectivamente 98 e 90%. Os sistemas de tratamento a seco dos gases usa alumina ou óxido de alumínio como adsorvente. O uso de alcatrão com baixo teor de enxofre para a cozedura os ânodos ajudam a controlar as emissões de SO₂ (WORLD BANK GROUP, 1998).

Tabela 2: Limite das emissões na produção de alumínio segundo o Decreto 18/2004 do regulamento sobre os padrões de qualidade ambiental e de emissão de efluentes (WORLD BANK GROUP, 1998).

Parâmetro	Valor máximo (mg/Nm ³)
Fluoreto de hidrogénio	1
Flúor total	2
Compostos orgânicos voláteis	20

Os hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPA) são um grupo de compostos aromáticos, gerados durante a combustão incompleta de matéria orgânica encontrados na fase gasosa ou matéria particulada (MONTANO-SOTO & GARZA-OCANAS, 2014). Os HPAs podem afectar a saúde humana dependendo do tempo de exposição, seu volume e concentração. São amplamente referidos como cancerígenos, mutagénicos e teratogénicos, afectando a pele, pulmão, pâncreas, esófago, bexiga, cólon, seios femininos e muitos órgãos ficam propensos a tumores devido a longa exposição (MALLAH et al., 2022).

¹ Reactor de Venturi é um reactor onde o gás circula a alta velocidade devido a redução de tamanho da área de secção, criando uma turbulência que permite maior contacto entre o sólido adsorvente e o gás a tratar (MUSSATTI & HEMMER, 2002).

A ingestão de fluoretos pelo ser humano por via respiratória ou oral corresponde a uma situação de toxicidade crônica, que pelo consumo diário pode desenvolver fluorose esquelética. Torna os dentes opacos e mais fragilizados para crianças e animais e os ossos mais frágeis e sensíveis a fracturas (NETTO, 2016). O flúor afecta a vegetação causando cloroses, necroses, redução no crescimento, entre outros (SANTOS et al., 2013).

2.3.2. Adsorção

A adsorção é a adesão de átomos, iões ou moléculas de gás ou líquido em superfícies sólidas (adsorvente), criando película molecular de adsorvato no adsorvente.

O adsorvato é a substância a ser adsorvida; o adsorvente é o material sólido sobre o qual ocorre a adsorção e o adsorvato é a componente adsorvida na superfície sólida.

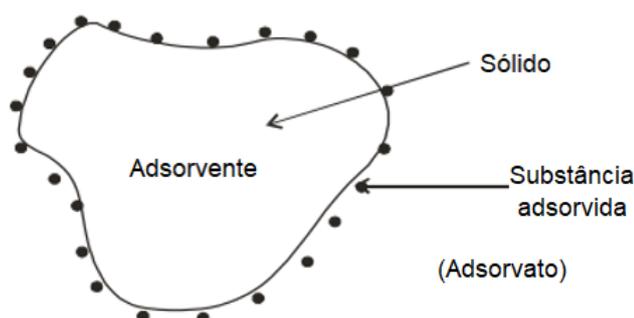


Figura 8: Adsorção.

Fonte: Adaptado de BAJAH et al. (2017).

A purificação de gases por adsorção tem desempenhado um papel importante no controle da poluição do ar e tem sido altamente empregada para a purificação da água (WEBER JR, sem data).

2.3.2.1. Fissisorção e quimissorção

A fissisorção ou adsorção física é um fenómeno reversível, onde a ligação do adsorvato à superfície do adsorvente envolve uma interacção relativamente fraca de Van der Waals (DO NASCIMENTO et al., 2014). A substância adsorvida não penetra na rede cristalina do sólido e não se dissolve nela, mas permanece inteiramente sobre a superfície (TREYBAL, 1981). A adsorção física é caracterizada por baixa entalpia

de adsorção, que é de cerca de 10–40 kJ.mol⁻¹, na ordem da entalpia de condensação ou vaporização (DO NASCIMENTO et al., 2014). A adsorção física aumenta com o aumento da pressão do gás e diminui com o aumento da temperatura do gás. Na adsorção física, várias camadas de adsorvato são adsorvidas uma sobre a outra (BAJAH et al., 2017).

A quimissorção ou adsorção química é o resultado interação química entre o sólido e a substância adsorvida. A força de ligação química varia entre os compostos químicos, mas a força adesiva é muito maior que a encontrada na fisissorção. O processo é frequentemente irreversível (TREYBAL, 1981). A sua entalpia é alta, entre 40–400 kJ.mol⁻¹ na ordem da entalpia ou calor da reacção assim como suas ligações químicas (DO NASCIMENTO et al., 2014). A quimissorção primeiro aumenta e então diminui com o aumento da temperatura. Durante a quimissorção, apenas uma camada de moléculas de adsorvato é adsorvida (BAJAH et al., 2017). A quimissorção pode ser rápida se a energia de activação for nula ou baixa (DO NASCIMENTO et al., 2014).

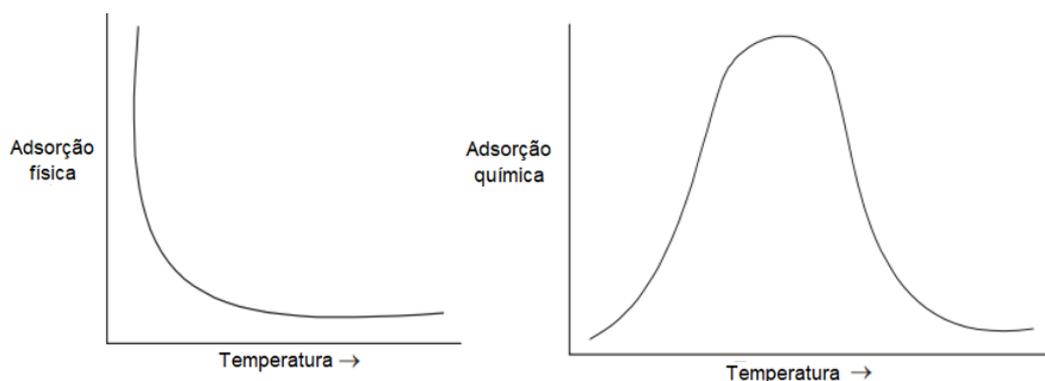


Figura 9: Efeito da temperatura na adsorção física e adsorção química, respectivamente.

Fonte: Adaptado de BAJAH et al. (2017).

2.3.2.2. Factores que afectam a adsorção

Temperatura: a adsorção é um processo exotérmico, ocorre com a libertação de calor, o que faz com que a taxa de adsorção seja inversamente proporcional a temperatura.

Pressão: é directamente proporcional a taxa de adsorção, devido ao aumento das moléculas de gás que atingem a superfície de adsorvente.

Propriedades do adsorvente: a natureza físico-química do adsorvente é um factor determinante, pois a capacidade e a taxa de adsorção dependem da área superficial específica, porosidade e grupos funcionais presentes na superfície do adsorvente (DO NASCIMENTO et al., 2014). Para maior eficiência do processo os adsorventes devem possuir certas propriedades como: resistência e dureza adequadas para não sofrerem redução de tamanho durante o manuseio ou esmagamento ao suportar o próprio peso em leitos de espessura necessária; ter um tamanho adequado, pois reduzindo o tamanho das partículas a área superficial aumenta, o que evita resistência a difusão; não devem fornecer uma queda de pressão muito grande para o fluxo nem devem ser facilmente arrastados pela corrente de fluxo (TREYBAL, 1981).

Propriedades do adsorvato: a polaridade do adsorvato é uma característica de grande influência, uma vez que a espécie polar terá mais afinidade com o adsorvente conforme a polaridade (DO NASCIMENTO et al., 2014).

2.3.2.3. Isotermas de adsorção

A adsorção resulta na remoção de solutos da solução em uma superfície, até que a quantidade de soluto restante na solução esteja em equilíbrio com o soluto que será adsorvido na superfície do adsorvente (WEBER JR, sem data). Este equilíbrio é descrito por isotermas de adsorção, usadas para prever a capacidade de adsorção de uma substância. As isotermas são obtidas a partir de um balanço de massa da seguinte forma: a massa de adsorvente é adicionada em um determinado volume (V) de uma série de soluções com concentrações iniciais (C_0) diferentes e conhecidas; quando o equilíbrio de adsorção é atingido, temos a concentração final do soluto na solução em equilíbrio (C_e) e a capacidade de adsorção do adsorvente (q) (DO NASCIMENTO et al., 2014).

$$m_{adsorvato} = m_{inicial} - m_{solutos\ em\ equilibrio} \quad (1)$$

$$q_e = \frac{m_{adsorvato}}{m_{adsorvente}} = \frac{C_i - C_e}{m_{ads}} \times V \left[\frac{g_{adsorvato}}{g_{adsorvente}} \right] \quad (2)$$

Isoterma de Langmuir: é baseada na suposição de que cada sítio activo de adsorção tem um número fixo e a capacidade de uma partícula interagir com o sítio é independente dos sítios próximos estarem ou não ocupados, ou seja, as espécies não

interagem entre si. Langmuir (1916) considerou a adsorção como um processo reversível, em que a adsorção e dessorção estão em um equilíbrio dinâmico. Ele também assumiu a formação de apenas monocamadas. Esta isoterma funciona particularmente bem para quimissorção (BAJAH et al., 2017).

$$\theta = \frac{\text{Sítios activos ocupados}}{\text{Total de sítios activos disponíveis}} = \frac{q}{q_{max}}$$

$$\text{Velocidade de adsorção: } \left(\frac{dq}{dt}\right)_{adsorção} \cong k_a(1 - \theta)C \quad (4)$$

$$\text{Velocidade de dessorção: } \left(\frac{dq}{dt}\right)_{dessorção} \cong k_d\theta \quad (5)$$

No equilíbrio a velocidade de adsorção é igual a velocidade de dessorção:

$$k_a(1 - \theta)C = k_d\theta \quad (6)$$

$$\theta = \frac{q}{q_{max}} = \frac{KC}{1 + KC} \quad (7)$$

Onde $K=k_a/k_d$ é a constante de equilíbrio de adsorção, θ é a fracção da superfície coberta e C é a concentração de adsorbato.

Isoterma de Freudlinch: o modelo considera o sólido heterogéneo e a formação de multicamadas, onde todas moléculas adsorvidas interagem entre si (DO NASCIMENTO et al., 2014).

$$q = kC^n \quad (8)$$

Isoterma de Brunauer-Emmet-Teller (BET): admite adsorção em multicamada, onde as primeiras moléculas adsorvidas após formarem a primeira camada produzem sítios de adsorção para as moléculas subseqüentes, gerando deposição de uma camada sobre a outra (RAUT, 2022).

$$\frac{P}{V(P_0 - P)} = \frac{1}{V_m C} + \frac{C - 1}{V_m C} \left(\frac{P}{P_0}\right) \quad (9)$$

V: volume do gás adsorvido a pressão P e temperatura T;

V_m : volume do gás para a formação de monocamada;

C: constante a temperatura T;

P_o : pressão de vapor saturado;

P: pressão de equilíbrio.

2.3.3. Filtração de gás

A filtração é um processo no qual partículas sólidas em líquidos ou gases são removidos através de um filtro que permite a passagem da fase fluída, mas retém as partículas sólidas. No gás encontram-se partículas muito finas, denominado aerossol. O aerossol é um sistema no qual as partículas, sólidas ou líquidas, estão em suspensão em um gás (COSTA & PAULIQUEVIS JUNIOR, sem data). A limpeza destes gases ocorre a partir da filtração em filtros de bolsas por ar reverso.

Segundo BARBOSA (2014), a remoção de partículas é um processo que pode ser realizado em um filtro que permite que as partículas fiquem retidas na superfície do tecido, formando assim o chamado bolo de filtração responsável pela filtração. Este processo ocorre em três etapas:

1. O gás entra em contacto com o tecido, as partículas ficam retidas no tecido. A queda de pressão aumenta com o aumento número de partículas colectadas;
2. Os sólidos presos na superfície do meio filtrante formam uma camada fina de sólidos chamada de bolo de filtração;
3. O bolo de filtração quando formado passa a desempenhar o papel de meio filtrante e fica responsável pela captura do material particulado, aumentando gradualmente sua espessura durante o processo. O tecido tem apenas a função de suporte para o bolo de filtração.

Ao atingir queda de pressão definida segundo a idade do filtro, o bolo de filtração é removido do filtro através de pulsação reversa, onde o ar ambiente passa pelo interior

dos filtros e desloca as partículas sólidas colectadas na superfície externa. Com o aumento dos ciclos de filtração, a resistência efectiva do meio aumenta e o tempo de filtração diminui (RODRIGUES, 2006).

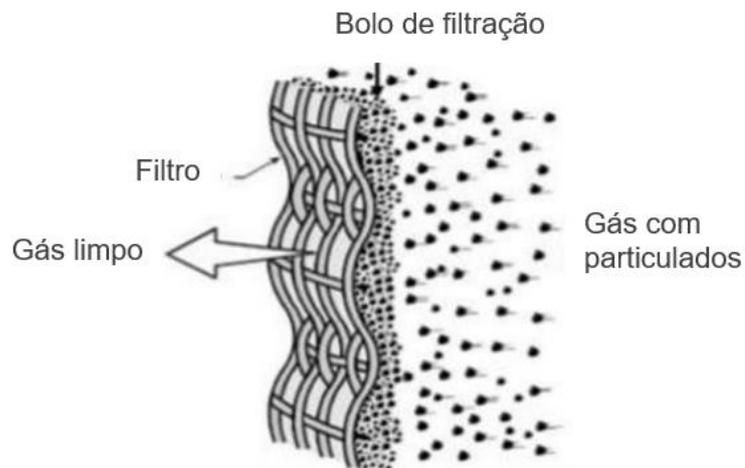


Figura 10: Esquema de formação de bolo em um filtro de bolsas.

Fonte: Adaptado de SHAH, K. P. (2017) citado por DE BONNA (2021).

2.4. PROCESSO DE HALL-HÉROULT

A produção industrial de alumínio primário é realizada pelo processo electrolítico de Hall-Héroult, no qual o óxido de alumínio ou alumina (Al_2O_3) é dissolvido em um banho electrolítico constituído principalmente de criolita fundida (Na_3AlF_6) e fluoreto de alumínio (AlF_3) (KVANDE & DRABLOS, sem data).

Durante a redução eletrolítica, o alumínio precipita para o cátodo na forma líquida devido a sua densidade, o oxigênio evapora e em contacto com o ânodo reage formando dióxido de carbono e monóxido de carbono (OBADAT et al., 2018).

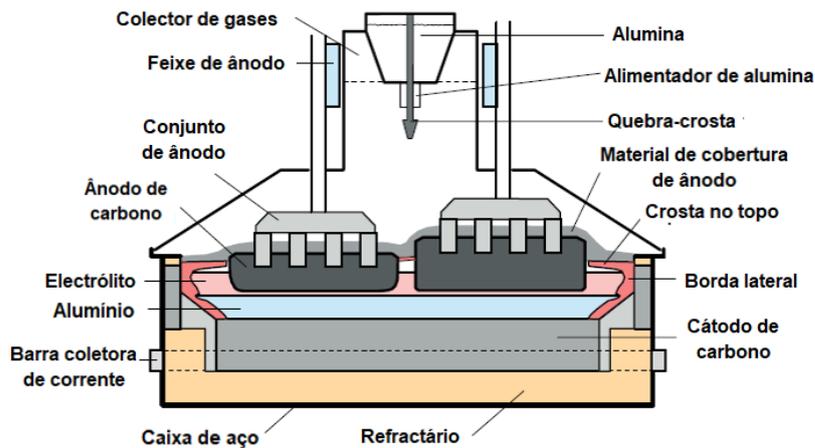


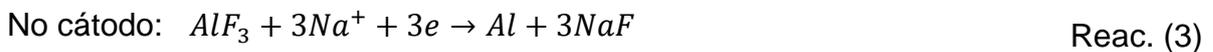
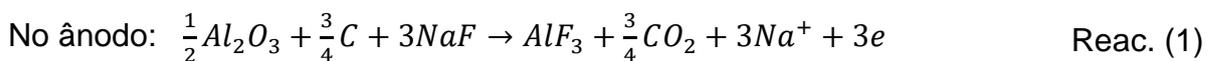
Figura 11: Pote de redução electrolítica.

Fonte: Adaptado de ASHEIM (2017).

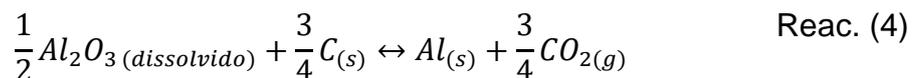
O banho electrolítico tem a função de permitir a passagem de corrente eléctrica do ânodo para o cátodo, dissolver a alumina e fornecer uma separação física entre o metal de alumínio líquido produzido catodicamente e o dióxido de carbono evoluído anodicamente (KVANDE et al., 2012).

O fluoreto de alumínio (AlF_3) é usado como catalisador para o banho electrolítico, aumentando a solubilidade da alumina e conductividade eléctrica e reduzindo a temperatura e o consumo de energia durante o processo (LINDSAY, 2013).

As principais reacções do eléctrodo são:



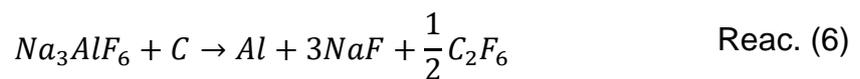
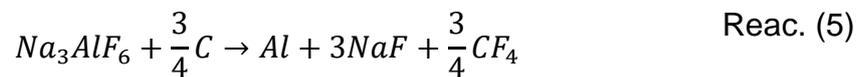
A equação balanceada da reacção electrolítica é:



A energia eléctrica permite que a reacção electrolítica ocorra e gera calor pelo efeito Joule, compensando as perdas de calor e mantendo o banho electrolítico líquido (CHAREYRE et al., 2016).

2.4.1. Efeito anódico

O efeito anódico ocorre quando a concentração de alumina no banho é muito baixa para manter processo de electrólise normal, aumentando assim a voltagem e temperatura. O efeito anódico faz com que o carbono do ânodo e o flúor dissociado da criolita do banho combinem, produzindo dessa forma os perfluorcarbonos (PFC): tetrafluorometano (CF₄), hexafluoretano (C₂F₆) (GIBBS et al., sem data) (GORAI et al., sem data).



A concentração de alumina mínima e máxima no banho é de 2 e 7 % (w/w), respectivamente, e quando esta for menor em 30% ocorre o efeito anódico. Os iões de oxigénio presentes chegam até a superfície do eléctrodo e formam uma camada resistiva na superfície do ânodo que aumenta a tensão (TABEREAUX & PETERSON, 2014).

O CF₄ e C₂F₆ são gases de efeito estufa, com um Potencial de Aquecimento Global (PAG), em respectivamente 6900 e 12500 vezes a mais em relação ao dióxido de carbono num período de 100 anos, tendo uma tensão superficial forte que bloqueia a superfície anódica através de uma camada de gás não conductora. Este isolamento gera um forte aumento na geração de calor do banho através do efeito Joule (CHAREYRE et al., 2016).

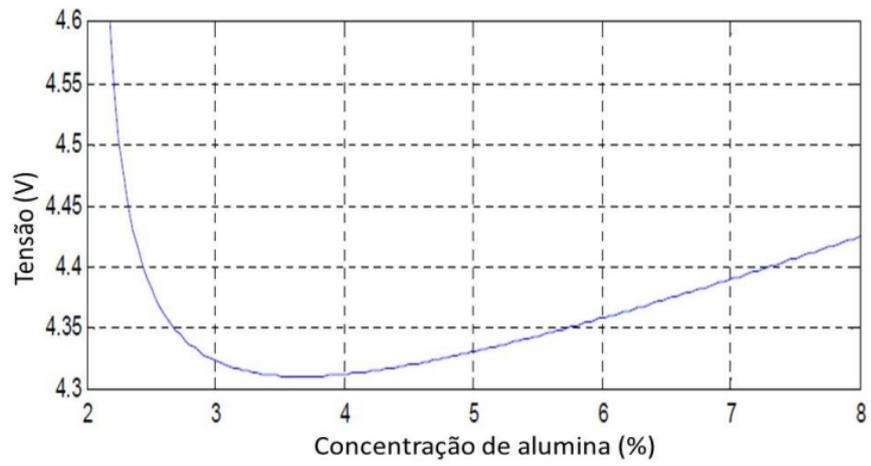


Gráfico 2: Tensão do pote de acordo com a variação da concentração de alumina.

Fonte: Adaptado de MARINHO (2019).

3. ESTUDO DE CAMPO

3.1. PROCESSO DE PRODUÇÃO DE ALUMÍNIO

A Moçambique Alumínio está dividida nos seguintes departamentos de produção: Carbono, Redução, Tratamento e Logística e Fundição.

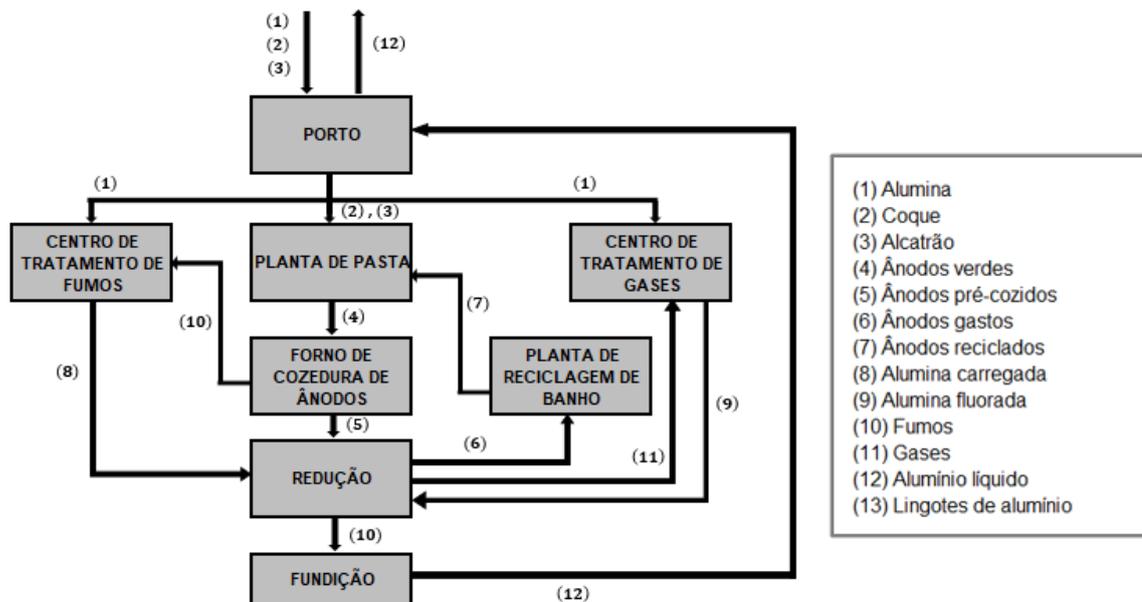


Figura 12: Processo de produção na Moçambique Alumínio.

Fonte: Adaptado pela autora (2023).

O Carbono é responsável pela produção de ânodos verdes e pré-cozidos, usados no processo de redução electrolítica da matéria-prima alumina em alumínio. Os ânodos verdes são produzidos a partir de uma pasta composta por coque, alcatrão e ânodos reciclados, que posteriormente é compactada em moldes e arrefecida. Os ânodos verdes são pré-cozidos no Forno de Cozedura de Ânodos. O Carbono é também responsável pela limpeza dos ânodos reciclados, separando-os do banho electrolítico proveniente da Redução.

A Redução é responsável pela redução electrolítica da alumina. Ocorre em células também chamadas de potes conectados em série, onde cada pote contém dois ânodos mergulhados em banho electrolítico e um cátodo no fundo do pote.

O processo de produção no departamento de Tratamento e Logística está dividido em:

- Porto: recebe a matéria-prima necessária para o processo de produção, nomeadamente coque, alcatrão, alumina e fluoreto de alumínio, e exporta os lingotes de alumínio produzidos para o mercado.
- Centro de Tratamento de Fumo: responsável pelo tratamento do fumo gerado durante cozedura dos ânodos de carbono e reaproveita a alumina carregada no processo de redução.
- Centro de Tratamento de Gás: responsável pelo tratamento de gás gerado durante o processo de redução electrolítica e reaproveita a alumina fluorada no processo de redução.
- Planta de Reciclagem de Banho: responsável pela reciclagem do banho electrolítico proveniente do processo de redução electrolítica.
- Laboratório: fornece serviços para todas áreas de produção da empresa, analisando e divulgando informação técnica sobre a qualidade de produção, tendo em conta a saúde, segurança e o meio ambiente.

Na Fundição, o alumínio líquido da Redução é moldado em lingotes e são adicionados metais para adequar a composição química do alumínio às especificações do cliente.

3.2. ESTUDO DE CASO: CENTRO DE TRATAMENTO DE FUMO (CTF)

O cozimento dos ânodos gera gases como fluoretos, óxidos de enxofre, assim como *tar* condensado e poeiras durante o processo. É necessário tratar estas emissões antes de lançá-las à atmosfera.

Tabela 3: Composição do fumo na entrada e saída do CTF massa do composto por volume de gás em condições padrões (Fonte: Moçambique Alumínio).

Composição do fumo [mg/Nm ³]	Alimentação do CTF	Efluente do CTF
Fluoreto de hidrogénio	0-50	<0.35
Flúor particulado	0-50	<0.6
Particulado total	0-200	<5.7
<i>Tar</i> solúvel condensado	0-100	<1.1

3.2.1. Circuito de fumo

O Centro de Tratamento de Fumo (CTF) tem três exaustores responsáveis pela sucção dos gases do Forno de Cozedura de Ânodos (FCA) e por garantir um tratamento eficaz deste fumo. O gás passa primeiro pela torre de resfriamento, segue para os reactores, filtros e é lançado para a atmosfera pela chaminé.

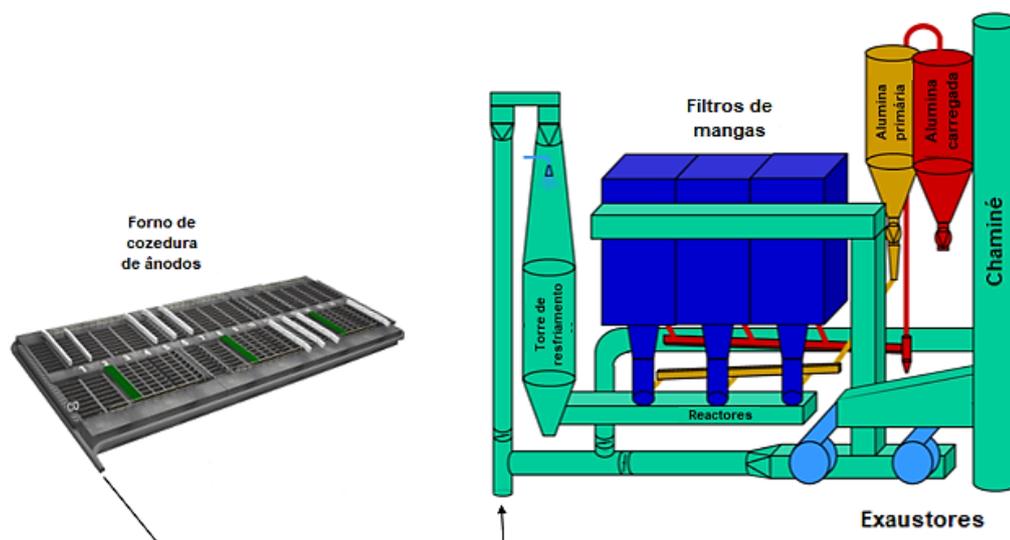


Figura 13: Centro de Tratamento de Fumo.

Fonte: Adaptado da FIVES GROUP (2023).

Na torre de resfriamento a maior parte dos particulados de *tar* são retidos. A água a temperatura ambiente é injectada juntamente com ar comprimido reduzindo, por evaporação, a temperatura do gás até 105°C, resultando na condensação de hidrocarbonetos de partículas maiores. As partículas maiores de hidrocarbonetos causam risco de incêndio nas conductas e poluição da alumina, então, um dispositivo especial para a captação na forma de um cone é instalada na parte inferior da torre, criando uma mudança brusca na direcção do fluxo de gases de combustão. As partículas condensadas caem no fundo da torre e são evacuadas periodicamente. No fundo da torre existem duas válvulas para evitar o ingresso de ar.

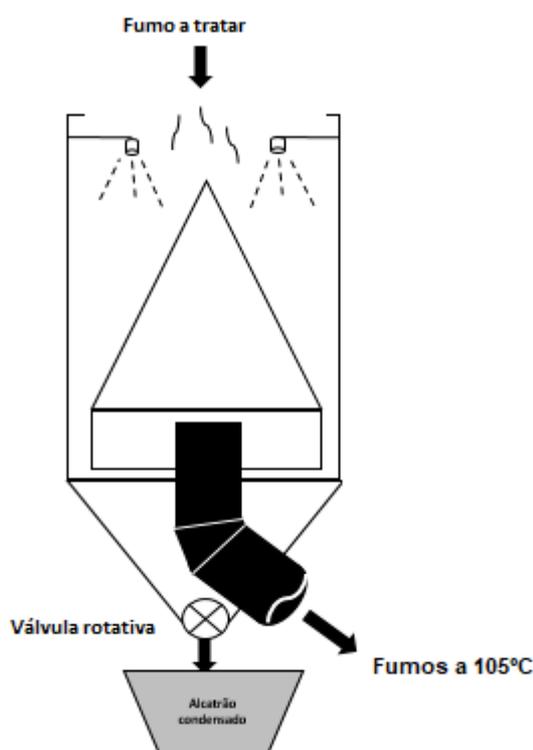


Figura 14: Torre de resfriamento.

Fonte: Adaptado da FIVES GROUP (2023).

De forma a aumentar a eficiência de condensação dos hidrocarbonetos, seria necessário operar a menor temperatura possível, para eliminar os hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (HAP) como o naftaleno, que condensa a 80°C. Porém, não é possível sustentar uma evaporação nessas condições pois uma parte do líquido seria colectado na parte inferior, juntamente com uma certa quantidade de *tar* dependendo da temperatura e das emissões de hidrocarbonetos do forno, podendo causar

corrosão ao equipamento pela formação de ácido sulfúrico, uma vez que estes gases contêm SO_2 e SO_3 .

Os gases passam pelo reactor de Venturi, onde ocorre a adsorção dos fluoretos e adesão do *tar*. Os gases passam pelo “pescoço” de Venturi a alta velocidade por onde a alumina é injectada, criando uma turbulência que acelera o processo de adsorção. A mistura sólido-gás segue para os filtros a uma velocidade baixa, garantindo uma filtração eficiente onde a alumina carregada fica retida enquanto que o gás segue para a chaminé onde é liberado.

3.2.2. Circuito de alumina

São instalados dois silos de 80 toneladas, de alumina primária e alumina carregada, equipados com sistemas de medição de nível e doseadores anti-segregação.

A alumina primária é fornecida por um camião que a descarrega por uma estação de descarga controlada por um painel eléctrico. A alumina sai do silo para uma peneira vibratória de 625 mesh, que alimenta o silo de passagem, doseando a quantidade de alumina necessária para alimentar o sistema. O fluxo de alumina que alimenta os reactores é medido a partir de uma balança de impacto, onde o fluxo de material produz uma deflexão mecânica ao atingir a placa de detecção e uma célula de carga (sensor) converte a força horizontal na placa em quilogramas por hora («Solids Flowmeters», 2011).

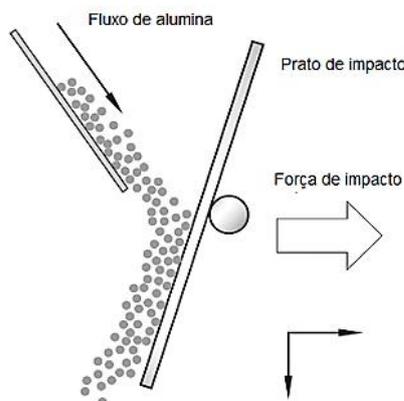


Figura 15: Modo de operação da balança de impacto

Fonte: Adaptado de “Solids Flowmeters” (2011).

A alumina segue através de uma rampa fluidizada com ar para uma caixa de distribuição, também fluidizada, onde o fluxo de alumina é dividido por igual alimentando os três reactores. A mistura sólido-gás de cada reactor é encaminhada para os filtros, através da pressão negativa exercida pelos exaustores, onde ocorre a separação da alumina carregada e do gás. Os filtros são compostos por cinco células, cada contendo 12 bolsas feitas de poliéster, e por sua vez, cada bolsa está dividida em 29 canais. Cada célula é equipada com uma válvula de corte accionada por um cilindro de ar com solenoide, onde a limpeza dos filtros é realizada por ar reverso, de forma sequenciada. A pressão negativa prevalece na tremonha do filtro, permitindo o movimento do ar (PROCEDAIR S.A., sem data).

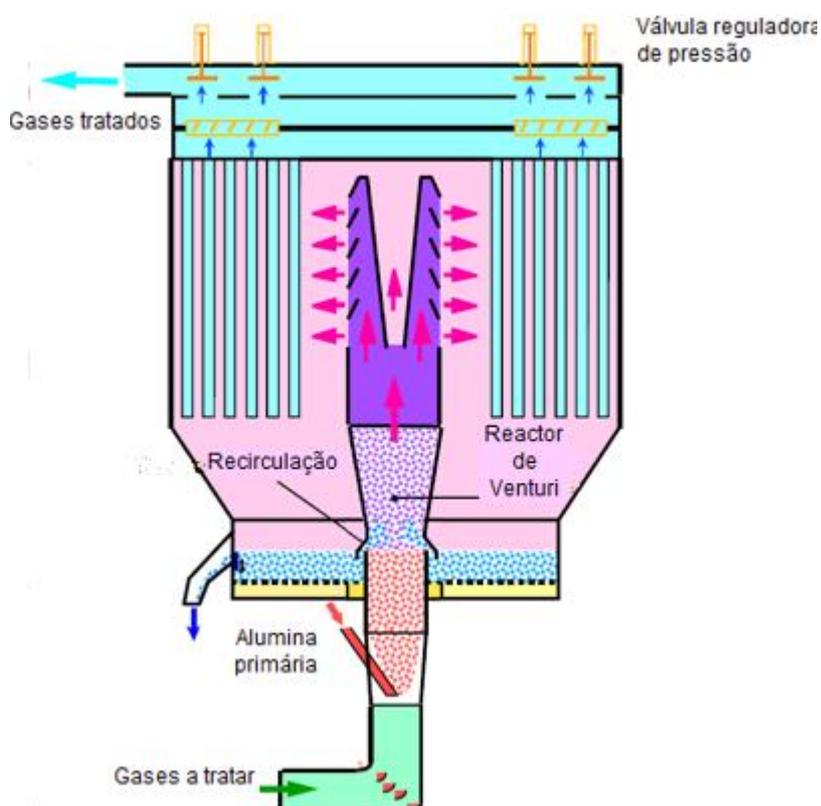


Figura 16: Filtro de bolsas.

Fonte: Adaptado de FIVES GROUP (2023).

Uma parte alumina carregada sai da tremonha pelas linhas de recirculação e retorna para os reactores de modo a aumentar a área de adsorção, tempo de contacto e também continua o tratamento caso o reactor não receba alumina primária. O reactor não recebe alumina se a tremonha estiver cheia, pois a válvula automaticamente

fecha e o material recircula até o nível baixar. Para aliviar a tremonha, abre-se a válvula do ducto “*overflow*” que retira o material.

A outra parte da alumina carregada é encaminhada para o silo de alumina carregada, que a armazena até que o caminhão descarregue e a encaminhe para a Redução.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. CALIBRAÇÃO DA BALANÇA DE FLUXO DE ALUMINA PRIMÁRIA

A calibração de equipamentos de medição, como a balança, são actividades realizadas para garantir que os resultados obtidos são fiáveis, evitando desvios em análises e possíveis danos ao instrumento (SILVA, 2022).

A balança em causa mede o fluxo de alumina primária que é distribuída pelos três reactores, onde ocorre a adsorção.

Posiciona-se um recipiente com capacidade de 1 tonelada por baixo do tubo de calibração com ajuda de um veículo que mantém o saco devidamente posicionado. Fecha-se a válvula de alimentação, que permite a passagem da alumina para a rampa que distribui aos reactores. Abre-se a válvula de calibração para que a alumina saia pelo tubo de calibração para o recipiente. Cronometra-se 30 minutos, fecha-se a válvula de calibração e abre-se a válvula de alimentação simultaneamente. Pesa-se a quantidade de alumina contida no saco. Retira-se o valor do fluxo medido pela balança durante o mesmo intervalo de tempo através do sistema de monitoramento da balança que regista continuamente o fluxo de alumina.

$$\varepsilon (\%) = \frac{|X_{medido} - X_{verdadeiro}|}{X_{verdadeiro}} \times 100\% \quad (10)$$

Onde ε é o erro relativo, X_{medido} é o valor calculado pela balança e o $X_{verdadeiro}$ é o valor calculado a partir da pesagem da alumina nos 30 minutos.

4.2. DETERMINAÇÃO DO TEOR DE CARBONO EM ALUMINA CARREGADA

4.2.1. Amostragem

Recolheram-se amostras de alumina carregada nas linhas de recirculação dos três filtros do CTF da empresa Moçambique Alumínio em recipientes plásticos com auxílio de uma colher de amostra.

4.2.2. Preparação e análise da amostra

A concentração de carbono na alumina é determinada através do LECO, um equipamento determina a composição elementar de gases intersticiais por combustão ou fusão da amostra sob condições em que os produtos resultantes podem ser analisados quantitativamente (BAIRD, 2020).

Pesam-se 0.15g de amostra de alumina carregada e em folha de estanho é encapsulada e colocada em um carrossel que transfere a amostra de forma automática para uma câmara de purga selada ou forno, regulado a 1050°C, onde o gás atmosférico é removido. A amostra entra em combustão, liberando carbono como gás CO₂ que é transportado para uma célula infravermelha não dispersiva (CIND) para a detecção do carbono (LECO CORPORATION, 2020).

As células infravermelhas não dispersivas são baseadas no princípio de que o dióxido de carbono absorve energia infravermelha em certos comprimentos de onda únicos dentro do espectro. O filtro de CO₂ são usados para garantir que apenas o dióxido de carbono incida no detector (*NDIR instrument*, 2000).

4.3. DETERMINAÇÃO DO FLUXO VOLUMÉTRICO DE GÁS POR FILTRO

Após o resfriamento do gás na torre de resfriamento, o mesmo é distribuído pelos três reactores. O teor de carbono na alumina carregada de cada filtro está relacionado com o fluxo de gás alimentado por reactor, uma vez que a quantidade de alumina primária é distribuída de igual forma, enquanto que o fluxo de gás depende da percentagem de abertura válvulas dos exaustores.

O fluxo de gás é calculado pela equação de Bernoulli, que considera um escoamento incompressível (massa específica constante), invíscido (efeitos viscosos desprezados) e um regime permanente (velocidade e pressão em um ponto não variam com o tempo). A equação é aplicável ao longo de uma linha de corrente (MUNSON et al., 2004).

$$P_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 + \rho g h_1 = P_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2 + \rho g h_2 \quad (11)$$

O fluxo é determinado a partir de um sensor de temperatura e de um tubo de Pitot, que é um instrumento usado para a medição da pressão dinâmica e estática. A pressão estática surge do movimento aleatório e das colisões de moléculas dentro do gás que exercem uma força perpendicular à superfície da conducta, não tendo em conta os efeitos dinâmicos do movimento do fluido. A pressão dinâmica é a pressão exercida pelo gás devido a energia cinética associada a velocidade do seu movimento (SUPMEA AUTOMATION, 2023).

Existem dois tipos de aberturas nos tubos de Pitot: uma abertura voltada directamente para o fluxo para detectar a pressão dinâmica, e as outras perpendiculares ao fluxo para medir a pressão estática (GUO, 2009).

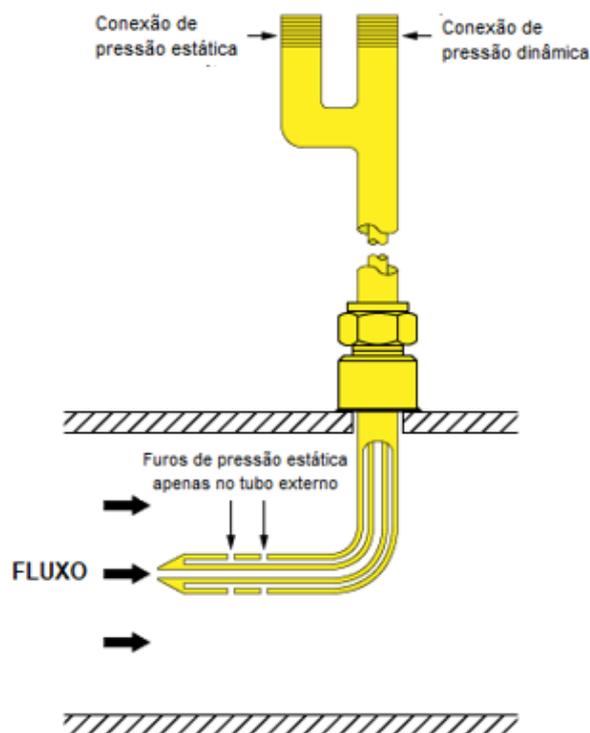


Figura 17: Medição do fluxo no tubo de Pitot.

Fonte: Adaptado de "Pitot Tube Flow Meter" (2020).

Conecta-se o sensor de temperatura e o tubo de Pitot a um termo-anemo-manômetro (multímetro), um instrumento que permite a leitura destas grandezas.



Figura 18: Anemômetro.

Fonte: AGRIEXPO (2023).

A partir da pressão dinâmica é possível determinar a velocidade de escoamento do gás:

$$P_D = \frac{1}{2} \rho v^2 \leftrightarrow v = \sqrt{\frac{2P_D}{\rho}} \quad (12)$$

A densidade do gás a temperatura ambiente é igual a 1.293g/cm³, logo é necessário corrigi-la tendo em consideração a pressão e temperatura do gás:

$$\rho = \rho_0 \left(\frac{T_0}{T_0 + T} \times \frac{P_{atm} + P_s}{P_{atm}} \right) \quad (13)$$

Onde ρ é a densidade corrigida; P_s é a pressão estática; ρ_0 , T_0 e P_{atm} é a densidade, temperatura e pressão respectivamente nas condições normais de temperatura e pressão ($T=273$ K e $P=101325$ atm).

O fluxo é determinado pela equação de continuidade:

$$Q = A \times v \quad (14)$$

Corrigindo o fluxo de gás da mesma forma como a densidade, teremos o caudal nominal igual a:

$$Q_{nominal} = Q_{real} \left(\frac{T_0}{T_0 + T} \times \frac{P_{atm} + P_s}{P_{atm}} \right) \quad (15)$$

Onde Q é o fluxo expresso em volume de gás nas condições padrões por segundo (Nm³/s), A é a área e igual a 0.45m² e v a velocidade do fluido. Substituindo as equações (12), (13) e (15) na equação (14) temos:

$$Q_{nominal} = A \times \sqrt{\frac{2P_D}{\rho_0} \times \frac{T_0}{T_0 + T} \times \frac{P_{atm} + P_s}{P_{atm}}} \quad (16)$$

4.4. DETERMINAÇÃO DO TEOR DE TAR POR VOLUME DE GÁS EMITIDO

4.4.1. Amostragem

Mede-se a temperatura do gás, as pressões dinâmicas em sete pontos e a pressão estática em um ponto do tubo de Pitot, conectado a um multímetro através de tubos de silicone. Introduzem-se no sistema os dados de pressão e temperatura, como também do diâmetro do bocal igual a 6 mm e pressão contra estática de 450 Pa, para o cálculo da velocidade média e do caudal de gás que passa pela chaminé.

No laboratório, pesam-se 34g de resina amberlite XAD-2, um adsorvente poliaromático para compostos hidrofóbicos. A resina é colocada em dois tubos de vidro cilíndricos de diâmetro interno de 38 mm e 200 mm de comprimento, cada contendo 17g de resina.



Figura 19: Aparato de vidro para suporte da resina e circulação do gás.

Fonte: Autora pela autora (2023).

Coloca-se o aparato de vidro em uma caixa de resfriamento, onde também é colocado gelo para manter a temperatura do sistema inferior a 20°C durante a amostragem, condensando as partículas de *tar*.

Em um suporte metálico (*filter holder*) coloca-se um filtro de papel, e conecta-se na extremidade de uma sonda, alinhando-o em 180° em relação ao indicador de posição da chaminé. Conecta-se a outra extremidade do suporte de filtro a caixa de resfriamento que contém o aparato de vidro, permitindo que os gases passem pela resina a uma velocidade inferior a 0.5 m/s durante um determinado período e a uma temperatura inferior a 20°C.

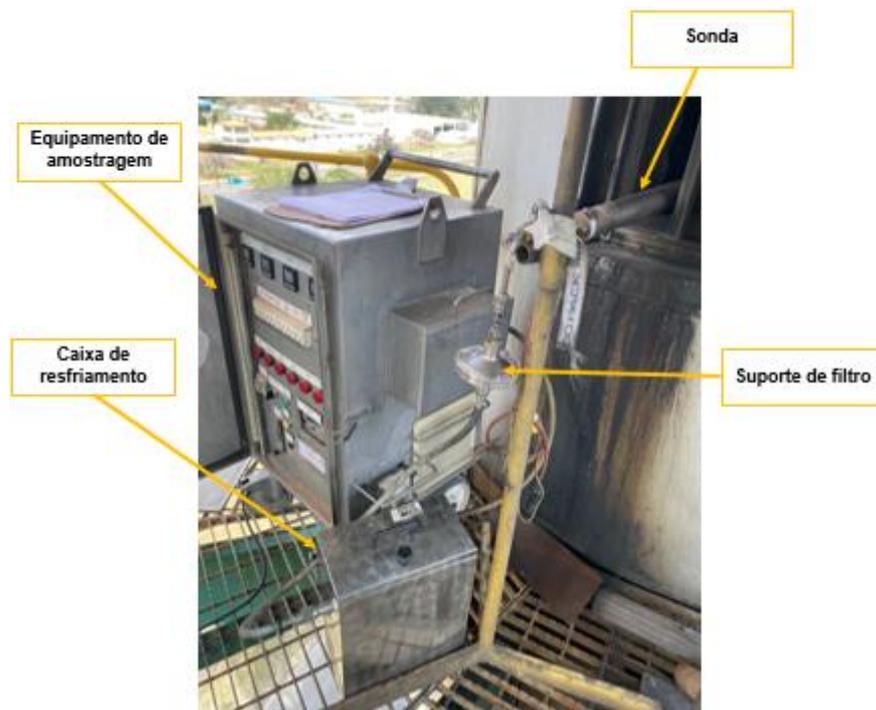


Figura 20: Amostragem na chaminé.

Fonte: Adaptado pela autora (2023).

Monitora-se a velocidade da sucção do gás exercida pela bomba do equipamento de amostragem 84s/L para uma amostra de 50 litros de gás. A amostragem ocorre por 2 horas.

4.4.2. Preparação e análise da amostra de *tar*

Determina-se o teor de *tar* no fumo recolhido no CTF pelo método de extração contínua sólido-líquido, em um extractor de Soxhlet. Este processo ocorre por duas horas tanto para a resina como para o filtro de papel.

O solvente, diclorometano, é aquecido no balão até entrar em ebulição. O vapor formado sobe pelo tubo lateral até o condensador, onde sofre condensação, gotejando no extrator e cobrindo o reservatório de vidro ou dedal de extração. Quando o nível do solvente atinge o sifão, o solvente é retirado pelo braço lateral, levando consigo o *tar*. O processo se repete enquanto o sistema ficar em aquecimento por 2 horas, de modo a enriquecer o DCM. Após resfriamento, o DCM é evaporado a temperatura ambiente por ser uma substância extremamente volátil (APOLINÁRIO, 2021).

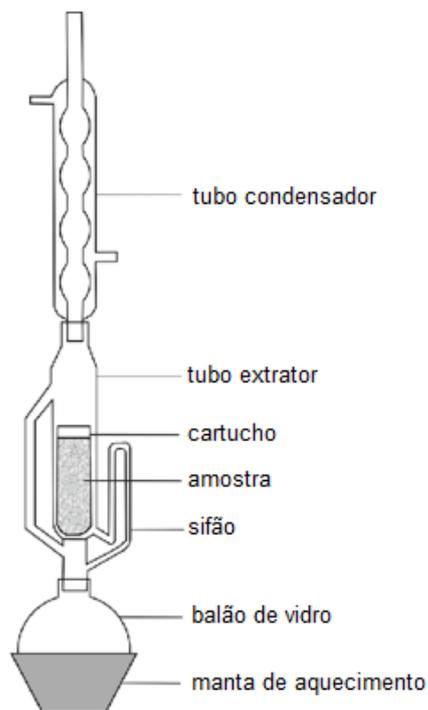


Figura 21: Extrator de Soxhlet.

Fonte: Adaptado de SHINZATO (2010).

O teor de *tar* é determinado pelo método gravimétrico após a evaporação do solvente (MOÇAMBIQUE ALUMÍNIO, 2017). Lavam-se dois cadinhos de 150mL de platina com acetona, e deixa-se por duas horas no forno a vácuo a 60°C e resfria-se no dessecador. Pesam-se os cadinhos, e adiciona-se o DCM enriquecido com *tar* e deixa-se a evaporar. Pesa-se a massa do cadinho com o *tar* depois de 24h para garantir a evaporação do DCM, e faz-se a diferença para obter a massa de *tar* contida por volume de gás emitido (mg/Nm³).

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Analizou-se a concentração de carbono alumina carregada dos três filtros e a sua correlação com o fluxo de alumina primária, fluxo de gás e emissões de *tar* com o objectivo de reduzir o teor de carbono na alumina e nas emissões. As amostras de alumina carregada foram colectadas num período de 23 dias por cada filtro e realizou-se o tratamento estatístico usando o critério R para a verificação da homogeneidade dos resultados de três ensaios paralelos por filtro. Para correlacionar o nível de emissões de *tar* e fluxo de alumina primária recorreu-se a correlação de Pearson, onde recorreu-se a dados históricos do ano de 2023 e três amostragens realizadas após o acréscimo do fluxo de alumina primária.

5.1. CALIBRAÇÃO DA BALANÇA DE FLUXO DE ALUMINA PRIMÁRIA

Calibrou-se a balança e obteve-se um erro relativo de aproximadamente 10%, o que significa que o fluxo era 10% menor do que se esperava antes da calibração.

Tabela 4: Fluxo de alumina calculado e medido pela balança antes da calibração.

Data	Massa (kg)	Tempo (min)	Tempo (h)	Fluxo calculado (kg/h)	Fluxo medido (kg/h)
19/07/2023	450	29.58	0.493	912.779	1003.022

$$\varepsilon = \frac{1003.022 - 912.779}{912.779} \times 100\% = 9.887 \cong 10\%$$

5.2. CONCENTRAÇÃO DE CARBONO NA ALUMINA DOS FILTROS EM RELAÇÃO AO FLUXO DE ALUMINA PRIMÁRIA

Realizou-se a amostragem da alumina carregada nos três filtros do Centro de Tratamento de Fumos 2. Analizou-se a concentração de carbono e a influência do fluxo de alumina primária alimentada ao reactor para adsorção. De acordo com as especificações, o teor máximo de carbono na alumina não deve ser maior do que 0.5% (w/w).

O Gráfico (3) representa a concentração de carbono na amostra representativa do Centro de Tratamento de Fumos 2.

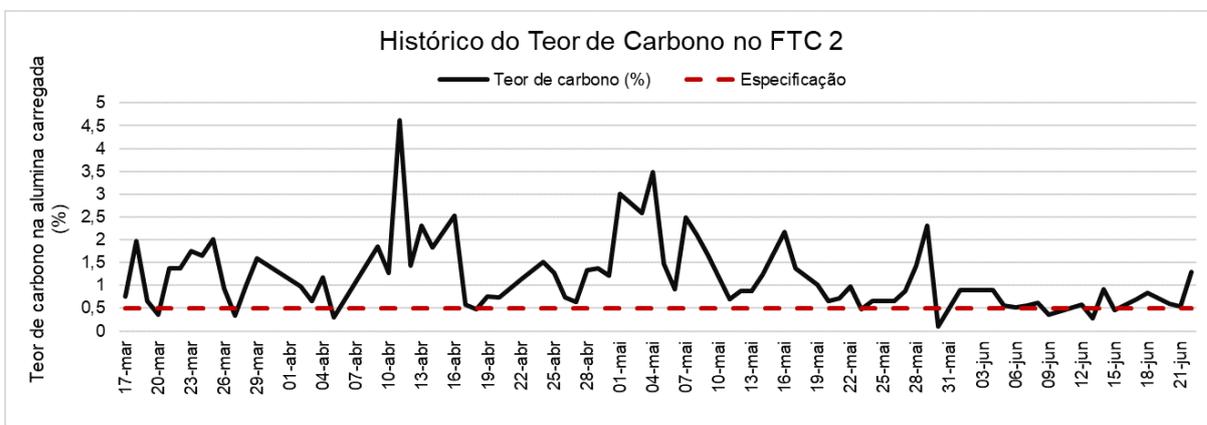


Gráfico 3: Dados históricos do teor de carbono da amostra representativa do Centro de Tratamento de Fumos 2.

O Gráfico (4) representa a concentração de carbono nos três filtros em função do fluxo de alumina primária.

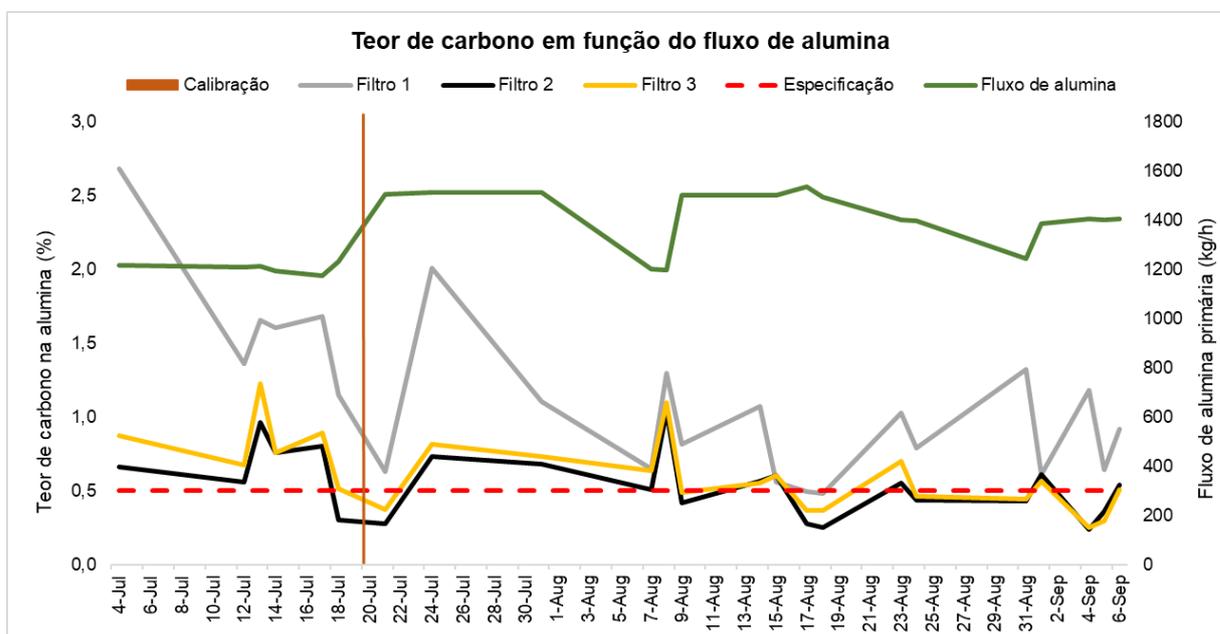


Gráfico 4: Concentração de carbono nos três filtros em função do fluxo de alumina primária.

Analisando a concentração de carbono nos três filtros é possível observar que os filtros 2 e 3 têm um comportamento semelhante, enquanto o filtro 1 tem um comportamento instável. Isto deve-se ao facto de que o filtro 1 teve alarmes

recorrentes de alto nível de alumina carregada na tremonha, fazendo com que a válvula de alimentação deste filtro fechasse para permitir que a alumina drenasse. Uma vez que o filtro não recebe alumina primária, apenas alumina carregada é recirculada, aumentando o teor de carbono. Devido a instabilidade do filtro 1, não seria viável analisar o comportamento em função das outras variáveis, pois os resultados não seriam fidedignos.

O Gráfico (5) representa a ocorrência de alarmes de alto nível de alumina carregada na tremonha para os filtros 1, 2 e 3 respectivamente ao longo do período de amostragem.



Gráfico 5: Alarmes de alto nível de alumina carregada na tremonha para os filtros 1, 2 e 3 respectivamente.

Os filtros 2 e 3 mostram uma boa correlação com o fluxo de alumina primária. É possível observar que com o aumento do fluxo de alumina primária a concentração de carbono na alumina reduz. Nos dias 4 a 12 de Julho o fluxo de alumina era de 1200 kg/h e o teor de carbono estava acima das especificações. Após a calibração, aumentou-se o fluxo para 1500 kg/h, no dia 20 de Julho, podendo se notar um decréscimo no teor de carbono. Pode-se observar que no dia 8 de Agosto os teores de carbono subiram para 1.1% acompanhado o decréscimo do fluxo.

Na linha de recirculação, o caudal de recirculação do filtro 2 era maior em relação ao filtro 3, uma vez que os orifícios destes filtros tinham uma diferença de diâmetro de 11.25 cm como se pode verificar na Figura A7-5 dos Anexos. Isto significa que o filtro 2 tinha maior área de adsorção por receber maior quantidade de alumina no para o tratamento, o que ocasionou uma concentração de carbono ligeiramente menor para o filtro 3. No dia 1 de Setembro trocaram-se os orifícios do filtro 1 e 2, tornando a diferença entre os orifícios dos filtros 2 e 3 igual a 0.87 cm o que fez com os valores de concentração de carbono estivessem mais alinhados ou próximos.

4.2.1. Análise do fluxo de alumina primária, teor de carbono e fluxo de gás no filtro 2

O Gráfico (6) apresenta o comportamento da concentração de carbono na alumina em função do fluxo de alumina primária e do caudal de gás no filtro 2.

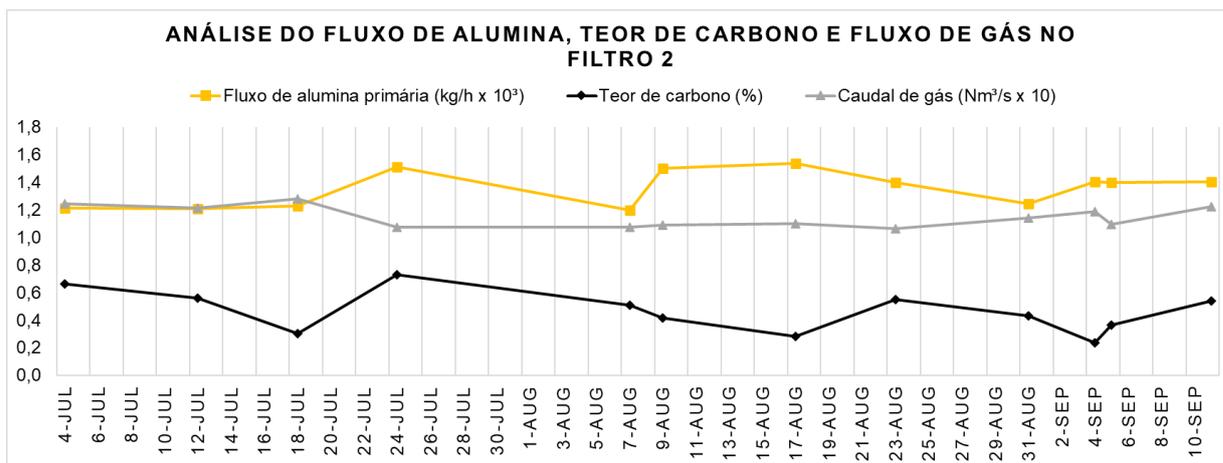


Gráfico 6: Análise do fluxo de alumina e gás no filtro 2 em relação a concentração de carbono na alumina.

Observou-se uma boa correlação entre o teor de carbono na alumina e o fluxo de alumina primária, aumentando o fluxo de alumina o teor de carbono reduz, e vice-versa, com excepção do dia 24 de Julho, onde mesmo com o acréscimo do fluxo de alumina o teor de carbono continuou alto.

O caudal de gás tem um comportamento quase constante. Focalizando nos dias 4 de Julho, 12 de Julho e 7 de Agosto onde o fluxo de alumina era de aproximadamente 1200 kg/h, verifica-se que quanto maior o fluxo de gás, o teor de carbono também

aumenta. Nos dias 4 de Julho e 7 de Agosto observa-se que reduzindo o fluxo de gás em 15.52% o teor de carbono reduz de 0.661 para 0.508 % (w/w).

Tabela 5: Variação do teor de carbono da alumina do filtro 2 em função do caudal de gás mantendo contante o fluxo de alumina primária.

Data	Teor de carbono (%)	Caudal de gás (Nm ³ /s)	Fluxo de alumina primária (kg/h)
4-Jul	0.661	1,43	1216
12-Jul	0.560	12.12	1210
7-Aug	0.508	10.76	1200

O mesmo verifica-se ao manter o fluxo de gás constante e aumentando o fluxo de alumina em 21.98% o teor de carbono reduz de 0.508 para 0.280 % (w/w).

Tabela 6: Variação do teor de carbono da alumina carregada do filtro 2 em função do fluxo de alumina primária mantendo constante o caudal de gás.

Data	Teor de carbono (%)	Caudal de gás (Nm ³ /s)	Fluxo de alumina primária (kg/h)
7-Aug	0.508	10.76	1200
9-Aug	0.419	10.91	1501
17-Aug	0.280	11.03	1538
05-Set	0.363	10.98	1400

4.2.2. Análise do fluxo de alumina primária, teor de carbono e fluxo de gás no filtro 3

O Gráfico (7) apresenta o comportamento da concentração de carbono na alumina em função do fluxo de alumina primária e do caudal de gás no filtro 3.

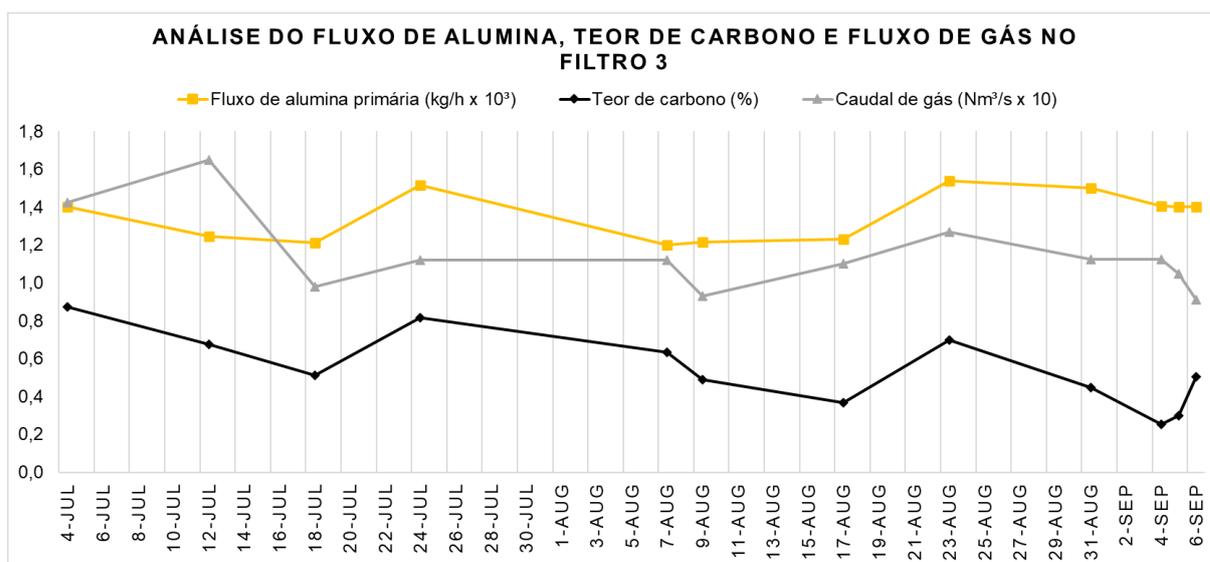


Gráfico 7: Análise do fluxo de alumina e gás no filtro 3 em relação a concentração de carbono na alumina.

Para o filtro 3 observa-se que a curva de teor de carbono tem maior correlação com o fluxo de alumina. Nos dias 12 e 18 de Julho, o fluxo de alumina era de 1200 kg/h, o teor de carbono reduziu de 0.676 para 0.512 % (w/w) pois o fluxo de gás passou de 16.5 para 9.79 Nm³/s e nos dia 7 de Agosto e 4 de Setembro onde o fluxo de gás era de 11 Nm³/s, o teor de carbono reduziu de 0.634 para 0.254 % (w/w) pois o fluxo de alumina variou de 1200 para 1406 kg/h.

Aumentando o fluxo de alumina em 14.65% mantendo o fluxo de gás constante reduz-se o teor de carbono de 0.634 para 0.254 % (w/w), enquanto que reduzindo o fluxo de gás em 68.84% o teor de carbono reduz apenas de 0.676 para 0.512 % (w/w).

5.3. ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO FLUXO DE ALUMINA PRIMÁRIA NAS EMISSÕES DA CHAMINÉ

A Gráfico (8) apresenta a correlação entre a concentração de *tar* nas emissões e o fluxo de alumina primária.

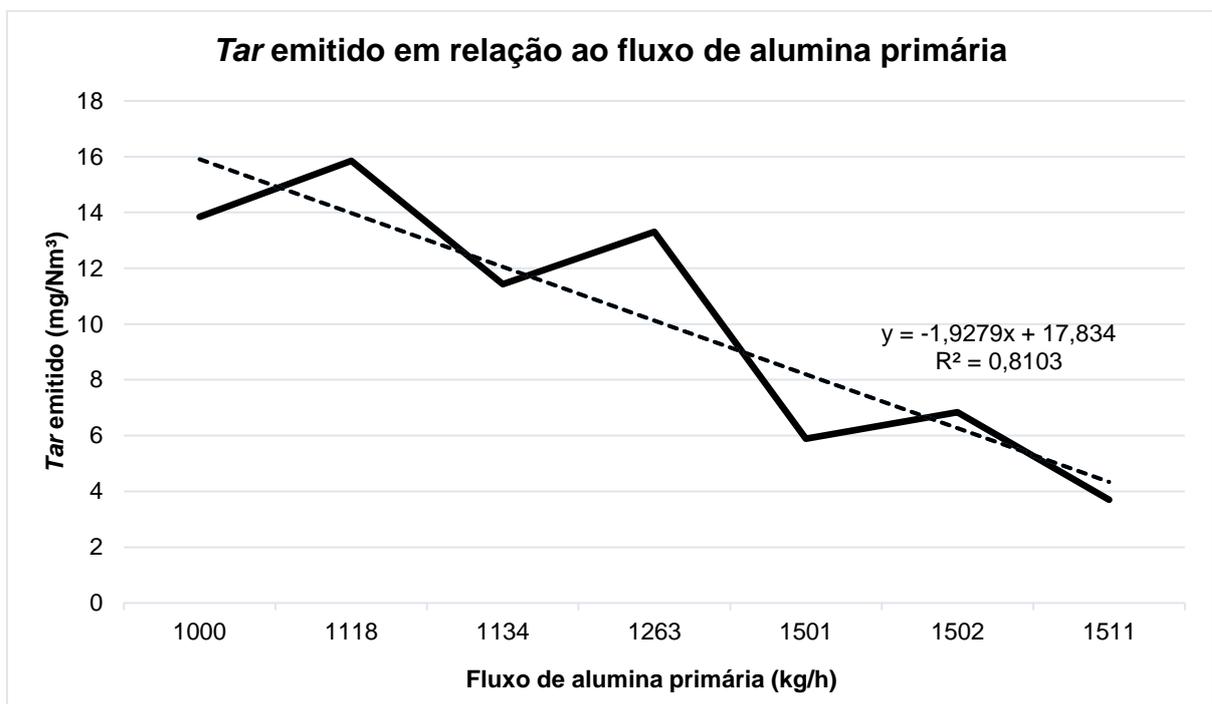


Gráfico 8: Correlação entre o *tar* emitido e o fluxo de alumina primária.

Para analisar a correlação entre o fluxo de alumina primária e as emissões de *tar* recorreu-se a correlação de Pearson, que mede o grau de relação linear entre duas variáveis.

O coeficiente de Pearson (r) assume valores entre -1 a +1 onde: $r = 0$ ausência de correlação, $0 < r \leq |0.3|$ correlação fraca, $|0.3| < r \leq |0.6|$ correlação moderada, $|0.6| < r < 1$ correlação forte, $r = 1$ correlação perfeita e positiva e $r = -1$ correlação perfeita negativa (PARREIRA, 2015).

Analisando o teor de *tar* nas emissões em função do aumento fluxo de alumina primária verificou-se que existe uma correlação forte de $r=0.905$.

Observa-se que com um aumento do fluxo de alumina primária em 33.82%, a quantidade de *tar* emitida reduziu de 13 para 3 mg/Nm³.

6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

6.1. CONCLUSÕES

No presente trabalho foi analisado o teor de carbono na alumina carregada do Centro de Tratamento de Fumos 2, em relação ao fluxo de alumina primária, fluxo de gás e *tar* emitido. Contudo, foi possível concluir que:

- A concentração de carbono na alumina carregada é fortemente influenciada pelo fluxo de alumina primária alimentado aos reactores;
- Alimentando com um caudal nominal de 1500 kg/h, estabelecido pelos fabricantes do equipamento, o teor de carbono reduz de modo que esteja dentro das especificações, reduzindo até 0.2%;
- O caudal de recirculação é inversamente proporcional ao teor de carbono da alumina carregada, influenciando a área de adsorção;
- O fluxo de gás que contém o soluto influencia no teor de carbono na alumina carregada, reduzindo o teor em até cerca de 0.5%;
- Existe uma forte correlação entre o fluxo de alumina primária e o teor de *tar* presente no gás emitido para a atmosfera reduzindo em 10mg/Nm³, ou seja, em até 4 vezes. Quanto menor o teor de carbono na alumina carregada, menor será o nível de emissões para o ambiente.

6.2. RECOMENDAÇÕES

- Recomenda-se aumentar o caudal de alimentação de alumina primária para 1500 kg/h, segundo as especificações estabelecidas pelo fabricante para evitar saturar a alumina;
- Recomenda-se a uniformização do caudal da alumina recirculada para que a área de adsorção seja uniforme entre os reactores;
- Recomenda-se que em futuras pesquisas criem-se condições para a realização da amostragem do teor de alcatrão do gás que entra no Centro de Tratamento de Fumo, para assim correlacionar a qualidade da queima nos Fornos de Cozedura com o teor de carbono na alumina;
- Recomenda-se para futuras pesquisas correlacionar como o teor de alcatrão na alumina afecta na adsorção do flúor.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AARHAUG, T. A., BRANDVIK, T., KJOS, O. S., GAERTNER, H., & RATVIK, A. P. (sem data). A study of anode baking gas composition. *SINTEF Information and Communication Technology*. Obtido 15 de Julho de 2023, de https://sintef.brage.unit.no/sintef-xmlui/bitstream/handle/11250/2633599/E119393_reviewer%2Bcomments_tb.pdf?sequence=4
- Alumínio*. (2016, Julho 7). Materioteca Sustentável. <https://materioteca.paginas.ufsc.br/aluminio/>
- Aluminium*. (sem data). Royal Society of Chemistry. Obtido 9 de Julho de 2023, de <https://www.rsc.org/periodic-table/element/13/aluminium>
- AMRANI, S., KOCAEFE, D., KOCAEFE, Y., BHATTACHARYAY, D., BOUZARA, M., & COTÊ, J. (2021). Effect of carbon anode production parameters on anode cracking. *A Springer Nature*. <https://link.springer.com/article/10.1007/s42452-020-04133-8>
- APOLINÁRIO, J. M. D. S. D. S. (2021). *Práticas laboratoriais das análises clínicas ao biodiagnóstico* (Editora Ampla, Ed.). <https://ampllaeditora.com.br/books/2021/07/Praticas-Laboratoriais.pdf>
- ASHEIM, H. (2017). *PFC Evolution in the Aluminium Production Process* [Doctoral theses, Norwegian University of Science and Technology]. https://ntnuopen.ntnu.no/ntnu-xmlui/bitstream/handle/11250/2443916/2017-137_Aasheim_PhD.pdf?sequence=1
- BAIRD, K. (2020). *LECO Analysis*. <https://www.linkedin.com/pulse/leco-analysis-kelsey-baird/>
- BAJAH, S. T., TEIBO, B. O., ONWU, G., & OBIKWARE, A. (2017). ADSORPTION AND CATALYSIS. Em S. T. BAJAH, B. O. TEIBO, G. ONWU, & A. OBIKWERE (Eds.), *Senior Secondary Chemistry* (3.^a ed.). LearnAfrica.
- BARBOSA, M. G. (2014). *Uso de filtro de mangas para tratamento de gases resultantes da combustão de bagaço de cana* [Dissertação, Universidade Estadual Paulista]. <https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/91727/000742775.pdf;jsessionid=D3AD855FC080E51FF839D9FC5B8496A9?sequence=1>

- CHAREYRE, M., JOLAS, J.-M., PRAIZELIN, N., GUILLAUD, V., RICHIARDONE, M., MUHAMMAD, A., CHICO, O. M., VAFEIADIS, T., CABALLERO, J. A. J., SILVA, A., SCHLUTTER, R., DIAS, M., & GELHEN, M. (2016). Process Industry Domain Analysis and Use Cases. *MONSOON Consortium*. <https://ec.europa.eu/research/participants/documents/downloadPublic?documentIds=080166e5af3c7463&appId=PPGMS>
- COSTA, A. A., & PAULIQUEVIS JUNIOR, T. M. (sem data). *Aerossóis atmosféricos e nuvens*. Obtido 29 de Julho de 2023, de http://www.dca.iag.usp.br/material/fornaro/AGM5823/AGM5823_Material_Particionado_nov2019.pdf
- DE BONNA, R. (2021). *Dimensionamento de um Sistema de Exaustão para Indústria de Processamento de Plástico*. UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL.
- DO NASCIMENTO, R. F., DE LIMA, A. C. A., VIDAL, C. B., MELO, D. D. Q., & RAULINO, G. S. C. (2014). *Adsorção: aspectos teóricos e aplicações ambientais* (Imprensa Universitária, Ed.). <https://www.repositoriobib.ufc.br/000016/000016ea.pdf>
- DOMINGOS, B. S. M., RIBEIRO, R. B., & VALENTIM, L. T. V. (sem data). Influência na polimerização de aglomerante para as indústrias metalúrgicas da produção de alumínio. *Cadernos UniFOA*. Obtido 14 de Julho de 2023, de <https://unifoa.emnuvens.com.br/cadernos/article/view/1163/1040>
- FiberSals*. (2017, Julho 8). Indústria metalúrgica: como evitar riscos ambientais e garantir produtividade. <https://fibersals.com.br/blog/industria-metalurgica-riscos-ambientais/>
- GIBBS, M. J., BAKSHI, V., LAWSON, K., PAPE, D., & DOLIN, E. J. (sem data). *PFC EMISSIONS FROM PRIMARY ALUMINIUM PRODUCTION*. Obtido 5 de Agosto de 2023, de https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gp/bgp/3_3_PFC_Primary_Aluminium_Production.pdf
- GORAI, B., JANA, R. K., & PREMCHAND. (sem data). *Reduction of Emission from Aluminium Industries and Cleaner Technology*.
- GUNASEGARAM, D. R., & MOLENAAR, D. (2015). Towards improved energy efficiency in the electrical connections of Hall–Héroult cells through Finite Element

- Analysis (FEA) modeling. *ScienceDirect*.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652615000694>
- GUO, D. (2009). Pitot-static Tube: A Device to Measure Air Flow Speed. *JoVE Science Education*. <https://www.jove.com/v/10452/pitot-static-tube-a-device-to-measure-air-flow-speed#:~:text=The%20pitot%2Dstatic%20tube%20is,pressure%20is%20at%20its%20maximum.>
- HUSSAN, K. (1994). *The influence of pitch quality on anode carbon gasification* [PhD thesis, Loughborough University of Technology].
https://repository.lboro.ac.uk/articles/thesis/The_influence_of_pitch_quality_on_a_node_carbon_gasification/9239681/1/files/16822052.pdf
- INNOVATHERM. (sem data). *ProBake Firing System*. Obtido 16 de Outubro de 2023, de <https://www.innovatherm.de/en/aluminium/probake/>
- KELLER, F., & SULGER, P. O. (2008). *Anode Baking* (2.^a ed.). Calligraphy.
- KVANDE, H., & DRABLOS, P. A. (sem data). *The Aluminium Smelting Process and Innovative Alternative Technologies*.
- KVANDE, H., RYE, K., STOKKA, P., & SORLIE, M. (2012). *The 16th Course on Fundamentals and their Application in Aluminium Production* (H. Kvande, K. Rye, P. Stokka, & M. Sorlie, Eds.).
- LAPARRA, M. (2012). The Aluminium False Twins. Charles Martin Hall and Paul Héroult's First Experiments and Technological Options. *Cairn.Info*.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301479718307205>
- LECO CORPORATION. (2020). *828 Series Carbon / Hydrogen / Nitrogen Analyzer Intruction Manual*.
- LINDSAY, S. J. (2013). ALUMINIUM FLUORIDE - A USERS GUIDE . *Essential Readings in Light Metals: Aluminum Reduction Technology*. <https://books-library.net/files/books-library.net-12181330Lv3l9.pdf>
- MAHINROOSTA, M., & ALLAHVERDI, A. (2018). Hazardous aluminum dross characterization and recycling strategies: A critical review. *ScienceDirect*.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301479718307205>
- MAJUMDER, R. (2021). The top 5 primary Aluminium producers of Africa. *AlCircle*.
<https://www.alcircle.com/news/the-top-5-primary-aluminium-producers-of-africa-62457>

- MALLAH, M. A., CHANGXING, L., MALLAH, M. A., NOREEN, S., LIU, Y., SAEED, M., XI, H., & AHMED, B. (2022). *Polycyclic aromatic hydrocarbon and its effects on human health: An overreview*. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/35151703/#:~:text=Many%20PAHs%20are%20widely%20referred,to%20long%2Dterm%20PAH%20exposure>.
- MARCOS, J. (2017). Mozal atinge melhor nível de produção de alumínio. *O País*. <https://opais.co.mz/mozal-atinge-melhor-nivel-de-producao-de-aluminio/>
- MARINHO, D. C. (2019). *Estudo da dissolução da alumina no banho eletrolítico na produção de alumínio primário em cubas de tecnologia VSS Soderberg* [ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO]. <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3133/tde-20032019-101813/publico/DiegoCotaMarinhoCorr19.pdf>
- MOÇAMBIQUE ALUMÍNIO. (sem data-a). *TMR000004 Anode Bake Furnace Overview*.
- MOÇAMBIQUE ALUMÍNIO. (sem data-b). *TRM000010 BF Firing Operation*.
- MOÇAMBIQUE ALUMÍNIO. (2017). *BOP00093 - Tar content determination for environment*.
- MONTANO-SOTO, M. T., & GARZA-OCANAS, L. (2014). Health effects due to exposure to polycyclic aromatic hydrocarbons from the petroleum refining industry. *ELSIVIER*. <https://www.elsevier.es/en-revista-medicina-universitaria-304-articulo-health-effects-due-exposure-polycyclic-X1665579614675927#:~:text=These%20compounds%20have%20been%20considered,effects%20in%20some%20of%20them>.
- MUNSON, B. R., YOUNG, D. F., & OKIISHI, T. H. (2004). *Fundamento da mecânica dos fluidos* (Editora Edigard Blucher, Ed.; 4.^a ed.).
- MUSSATTI, D., & HEMMER, P. (2002). Wet Scrubbers for Particulate Matter. Em *Particulate Matter Controls*.
- NDIR instrument*. (2000). <https://patentimages.storage.googleapis.com/48/1e/6e/bbf5dfe51dede8/US6114700.pdf>
- NETTO, C. G. (2016). Pesquisa investiga ação de fluoreto no meio ambiente na produção de alumínio. *Jornal da Unicamp*.

- OBAIDAT, M., AL-GHANDOOR, A., PHELAN, P., VILLALOBOS, R., & ALKHALIDI, A. (2018). *Energy and Exergy Analyses of Different Aluminum Reduction Technologies*.
- PARREIRA, G. (2015). COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO DE PEARSON. *GP Soluções em Estatística*. <https://gpestatistica.netlify.app/blog/correlacao/>
- Pitot tube flow meter. (2020). *INSTRUPAEDIA*. <https://instrulearning.com/flow/pitot-tube-flow-meter/>
- PROCEDAIR S.A. (sem data). *MOZAL SMELTER EXPANSION PROJECT*.
- RADENOVIC, A. (sem data). *Properties of carbon anode components for aluminium production*. Obtido 13 de Julho de 2023, de <https://hrcak.srce.hr/file/120150>
- RAUT, B. (2022). BET Adsorption Isotherm Equation and Applications. *Chemist Notes*. <https://chemistnotes.com/physical/bet-adsorption-isotherm-equation-and-applications/>
- RODRIGUES, K. B. (2006). *Filtração de gases: estudo da deposição de diferentes tortas de filtração em diferentes meios filtrantes* [Universidade Federal de São Carlos]. <https://repositorio.ufscar.br/handle/ufscar/3843>
- SANTOS, H. J. M., DE SOUZA, P. R., SILVA, P. F. N., BRAGA, R. D. O., GUEDES, E. M. S., & LOBATO, A. K. D. S. (2013). FLÚOR: ELEMENTO POTENCIALMENTE TÓXICO PARA PLANTAS, ANIMAIS E SERES HUMANOS. *EDUCAMAZONIA*.
- SASU, D. D. (2022). Aluminum production in Africa in 2021, by country. *statistica*. <https://www.statista.com/statistics/1309504/aluminum-production-in-africa-by-country/>
- SHELTON, G. R. (2017, Julho 7). Across the pond - Continental Europe. *CHEM 13 NEWS MAGAZINE*. <https://uwaterloo.ca/chem13-news-magazine/december-2016-january-2017/feature/across-pond-continental-europe>
- SHINZATO, M. C. (2010). *Alteração experimental de rochas carbonáticas, Caverna das Perólas, Iporanga (SP)* [Universidade Federal de São Paulo]. https://www.researchgate.net/publication/272113273_Alteracao_experimental_d_e_rochas_carbonaticas_Caverna_das_Perolas_Iporanga_SP
- SILVA, L. (2022). A importância de calibrar instrumentos na sua fábrica. *Blog Industrial Nomus*. <https://www.nomus.com.br/blog-industrial/calibrar-instrumentos/>

- Solids Flowmeters. (2011). *Siemens AG*. https://www.siemens-pro.ru/doc/kip/wheighting/catalog/Catalog%20WT10%20en%202012/WT10_en_kap06.pdf
- SOUTH32. (2023). *Mozal Aluminium*. <https://www.south32.net/what-we-do/our-locations/southern-africa/mozal-aluminium>
- SUPMEA AUTOMATION. (2023). *Static Pressure Vs. Dynamic Pressure Vs. Total Pressure*. <https://www.supmeaauto.com/training/static-pressure-vs-dynamic-pressure-vs-total-pressure#:~:text=The%20dynamic%20pressure%20is%20a,the%20impact%20of%20fluid%20movement.>
- TABEREAUX, A. T., & PETERSON, R. D. (2014). Anode Effect. *Science Direct*. <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/anode-effect>
- TREYBAL, R. E. (1981). Adsorption and Ion Exchange. Em R. E. TREYBAL (Ed.), *MASS-TRANSFER OPERATIONS* (Third, pp. 565–567). McGraw-Hill Book Company.
- WEBER JR, W. J. (sem data). *ADSORPTION PROCESSES*. 418–421. Obtido 29 de Julho de 2023, de <https://www.degruyter.com/document/doi/10.1351/pac197437030375/pdf>
- WORLD BANK GROUP. (1998). Aluminum Manufacturing. *Pollution Prevention and Abatement Handbook*.
- YOUSSEF, H. A., EL-HOFY, H. A., & AHMED, M. H. (2023). Smelting and Extraction of Nonferrous Metals. Em H. A. Youssef, H. A. El-Hofy, & M. H. Ahmed (Eds.), *Manufacturing Techonology* (Second, pp. 142–143). CRC Press.

ANEXOS

ANEXO 1 – Concentração de carbono em alumina carregada pelo critério R (para homogeneidade dos ensaios paralelos)

$$R_{\alpha,f} = \frac{|X_d - \bar{X}|}{S \sqrt{\frac{n-1}{n}}}$$

Tabela A1-1: Variáveis para o cálculo do critério R e determinação do R tabelado.

Resultado duvidoso	X_d	-
Média aritmética	\bar{X}	-
Desvio padrão quadrático	S	$\sqrt{\frac{\sum(X_i - \bar{X})^2}{n}}$
Número de amostras	n	7
Nível de fiabilidade	α	0.05
Número de graus de liberdade	f	$n-2 = 7-2 = 5$

Se o critério calculado for menor do que o critério tabelado, $R_c < R_{tab}$, então o resultado duvidoso pertence ao conjunto geral e não pode ser rejeitado.

Tabela A1-2: Critério R para verificação da homogeneidade dos ensaios paralelos do filtro 1.

Data	X_1	X_2	X_3	X_m	X_d	S	R_c	R_{tab}	Verificação	X_{mf}
04-jul	2.680	2.680	2.680	2.680	#N/A	0.000	-	1.41	-	2.680
12-jul	1.360	1.360	1.340	1.353	1.340	0.012	1.414	1.41	X_d não pertence ao conjunto	1.360
13-jul	1.680	1.710	1.580	1.657	1.710	0.068	0.960	1.41	X_d pertence ao conjunto	1.657
14-jul	1.570	1.580	1.660	1.603	1.570	0.049	0.828	1.41	X_d pertence ao conjunto	1.603
17-jul	1.710	1.680	1.660	1.683	1.710	0.025	1.298	1.41	X_d pertence ao conjunto	1.683
18-jul	1.150	1.160	1.150	1.153	1.160	0.006	1.414	1.41	X_d não pertence ao conjunto	1.150
21-jul	0.618	0.627	0.635	0.627	0.618	0.009	1.248	1.41	X_d pertence ao conjunto	0.627
24-jul	2.010	2.010	2.040	2.020	2.040	0.017	1.414	1.41	X_d não pertence ao conjunto	2.010
31-jul	1.090	1.120	1.110	1.107	1.090	0.015	1.336	1.41	X_d pertence ao conjunto	1.107
07-ago	0.696	0.625	0.617	0.646	0.696	0.043	1.408	1.41	X_d pertence ao conjunto	0.646
08-ago	1.290	1.300	-	1.295	1.300	0.007	0.866	1.41	X_d pertence ao conjunto	1.295
09-ago	0.815	0.815	0.842	0.824	0.842	0.016	1.414	1.41	X_d não pertence ao conjunto	0.815
14-ago	1.060	1.080	1.070	1.070	1.070	0.010	0.000	1.41	X_d pertence ao conjunto	1.070
15-ago	0.554	0.569	0.556	0.560	0.569	0.008	1.404	1.41	X_d pertence ao conjunto	0.560
17-ago	0.545	0.464	0.474	0.494	0.545	0.044	1.405	1.41	X_d pertence ao conjunto	0.494
18-ago	0.481	0.4820	0.484	0.482	0.481	0.002	1.069	2.41	X_d pertence ao conjunto	0.482
23-ago	1.020	1.030	1.040	1.030	1.020	0.010	1.225	3.41	X_d pertence ao conjunto	1.030
24-ago	0.790	0.798	0.788	0.792	0.798	0.005	1.389	1.41	X_d pertence ao conjunto	0.792
31-ago	1.320	1.310	1.330	1.320	1.310	0.010	1.225	1.41	X_d pertence ao conjunto	1.320
01-set	0.608	0.617	0.615	0.613	0.608	0.005	1.382	1.41	X_d pertence ao conjunto	0.613
04-set	1.190	1.180	1.170	1.180	1.190	0.010	1.225	1.41	X_d pertence ao conjunto	1.180
05-set	0.650	0.637	0.631	0.639	0.650	0.010	1.345	1.41	X_d pertence ao conjunto	0.639
06-set	0.906	0.926	0.914	0.915	0.906	0.010	1.136	1.41	X_d pertence ao conjunto	0.915

Tabela A1-3: Critério R para verificação da homogeneidade dos ensaios paralelos do filtro 2.

Data	X_1	X_2	X_3	X_m	X_d	S	R_c	R_{tab}	Verificação	X_{mf}
04-jul	0.688	0.637	0.658	0.661	0.688	0.026	1.290	1.41	X_d pertence ao conjunto	0.661
12-jul	0.559	0.550	0.572	0.560	0.550	0.011	1.144	1.41	X_d pertence ao conjunto	0.560
13-jul	0.947	0.966	0.976	0.963	0.947	0.015	1.330	1.41	X_d pertence ao conjunto	0.963
14-jul	0.765	0.752	0.758	0.758	0.765	0.007	1.255	1.41	X_d pertence ao conjunto	0.758
17-jul	0.810	0.797	0.802	0.803	0.810	0.007	1.307	1.41	X_d pertence ao conjunto	0.803
18-jul	0.303	0.301	0.313	0.306	0.301	0.006	0.889	1.41	X_d pertence ao conjunto	0.306
21-jul	0.277	0.270	0.274	0.274	0.277	0.004	1.162	1.41	X_d pertence ao conjunto	0.274
24-jul	0.730	0.731	0.735	0.732	0.730	0.003	0.926	1.41	X_d pertence ao conjunto	0.732
31-jul	0.682	0.682	0.697	0.687	0.697	0.009	1.414	1.41	X_d não pertence ao conjunto	0.682
07-ago	0.502	0.512	0.511	0.508	0.502	0.006	1.408	1.41	X_d pertence ao conjunto	0.508
08-ago	1.050	1.040	1.030	1.040	1.050	0.010	1.225	1.41	X_d pertence ao conjunto	1.040
09-ago	0.408	0.414	0.434	0.419	0.408	0.014	0.960	1.41	X_d pertence ao conjunto	0.419
14-ago	0.566	0.563	0.570	0.566	0.563	0.004	1.162	1.41	X_d pertence ao conjunto	0.566
15-ago	0.594	0.605	0.604	0.601	0.594	0.006	1.409	1.41	X_d pertence ao conjunto	0.601
17-ago	0.279	0.286	0.275	0.280	0.286	0.006	1.320	1.41	X_d pertence ao conjunto	0.280
18-ago	0.258	0.253	0.247	0.253	0.258	0.006	1.186	2.41	X_d pertence ao conjunto	0.253
23-ago	0.534	0.552	0.568	0.551	0.534	0.017	1.248	3.41	X_d pertence ao conjunto	0.551
24-ago	0.424	0.439	0.455	0.439	0.424	0.016	1.211	1.41	X_d pertence ao conjunto	0.439
29-ago	0.653	0.649	0.664	0.655	0.649	0.008	0.999	1.41	X_d pertence ao conjunto	0.655
31-ago	0.434	0.427	0.439	0.433	0.427	0.006	1.287	1.41	X_d pertence ao conjunto	0.433
01-set	0.613	0.605	0.618	0.612	0.605	0.007	1.307	1.41	X_d pertence ao conjunto	0.612
04-set	0.242	0.231	0.237	0.237	0.242	0.006	1.186	1.41	X_d pertence ao conjunto	0.237
05-set	0.350	0.371	0.369	0.363	0.350	0.012	1.409	1.41	X_d pertence ao conjunto	0.363
06-set	0.541	0.539	0.546	0.542	0.539	0.004	1.019	1.41	X_d pertence ao conjunto	0.542

Tabela A1-4: Critério R para verificação da homogeneidade dos ensaios paralelos do filtro 3.

Data	X_1	X_2	X_3	X_m	X_d	S	R_c	R_{tab}	Verificação	X_{mf}
04-jul	0.876	0.867	0.872	0.872	0.876	0.005	1.177	1.41	X_d pertence ao conjunto	0.872
12-jul	0.683	0.672	0.673	0.676	0.683	0.006	1.409	1.41	X_d pertence ao conjunto	0.676
13-jul	1.230	1.220	-	1.225	1.220	0.007	0.866	1.41	X_d pertence ao conjunto	1.225
14-jul	0.765	0.752	0.758	0.758	0.765	0.007	1.255	1.41	X_d pertence ao conjunto	0.758
17-jul	0.934	0.869	0.875	0.893	0.934	0.036	1.409	1.41	X_d pertence ao conjunto	0.893
18-jul	0.516	0.535	0.486	0.512	0.535	0.025	1.124	1.41	X_d pertence ao conjunto	0.512
21-jul	0.392	0.379	0.354	0.375	0.392	0.019	1.078	1.41	X_d pertence ao conjunto	0.375
24-jul	0.802	0.830	0.815	0.816	0.802	0.014	1.195	1.41	X_d pertence ao conjunto	0.816
31-jul	0.718	0.748	0.724	0.730	0.718	0.016	0.926	1.41	X_d pertence ao conjunto	0.730
07-ago	0.491	0.479	0.933	0.634	0.479	0.259	0.735	1.41	X_d pertence ao conjunto	0.634
08-ago	1.200	1.100	1.100	1.133	1.200	0.058	1.414	1.41	X_d não pertence ao conjunto	1.100
09-ago	0.496	0.487	0.484	0.489	0.496	0.006	1.373	1.41	X_d pertence ao conjunto	0.489
14-ago	0.546	0.569	0.539	0.551	0.569	0.016	1.379	1.41	X_d pertence ao conjunto	0,551
15-ago	0.601	0.614	0.604	0.606	0.601	0.007	0.960	1.41	X_d pertence ao conjunto	0.606
17-ago	0.376	0.366	0.359	0.367	0.376	0.009	1.290	1.41	X_d pertence ao conjunto	0.367
18-ago	0.328	0.338	0.427	0.364	0.328	0.055	0.816	1.41	X_d pertence ao conjunto	0.364
23-ago	0.693	0.714	0.689	0.699	0.714	0.013	1.398	1.41	X_d pertence ao conjunto	0.699
24-ago	0.467	0.463	0.459	0.463	0.467	0.004	1.225	1.41	X_d pertence ao conjunto	0.463
29-ago	0,682	0.664	0.684	0.677	0.664	0.011	1.408	1.41	X_d pertence ao conjunto	0.677
31-ago	0,443	0.455	0.440	0.446	0.455	0.008	1.389	1.41	X_d pertence ao conjunto	0.446
01-set	0.565	0.567	0.555	0.562	0.567	0.006	0.889	1.41	X_d pertence ao conjunto	0.562
04-set	0.251	0.241	0.270	0.254	0.241	0.015	1.081	1.41	X_d pertence ao conjunto	0.254
05-set	0.295	0.306	0.296	0.299	0.295	0.006	0.805	1.41	X_d pertence ao conjunto	0.299
06-set	0.506	0.511	0.501	0.506	0.511	0.005	1.225	1.41	X_d pertence ao conjunto	0.506

ANEXO 2 – Concentração de carbono em alumina carregada e fluxo de alumina primária

Tabela A2-1: Concentração de carbono em alumina carregada dos três filtros em relação ao fluxo de alumina primária.

Data	Teor de C filtro 1	Teor de C filtro 2	Teor de C filtro 3	Fluxo de alumina primária (kg/h)
4-Jul	2.680	0.661	0.872	1216.18
12-Jul	1.360	0.560	0.676	1210.43
13-Jul	1.657	0.963	1.225	1212.55
14-Jul	1.603	0.758	0.758	1194.91
17-Jul	1.683	0.803	0.893	1172.32
18-Jul	1.150	0.306	0.512	1231.21
21-Jul	0.627	0.274	0.375	1506.35
24-Jul	2.010	0.732	0.816	1514.45
31-Jul	1.107	0.682	0.730	1514.16
7-Ago	0.646	0.508	0.634	1200.00
8-Ago	1.295	1.040	1.100	1199.11
9-Ago	0.815	0.419	0.489	1500.50
14-Ago	1.070	0.566	0.551	1502.26
15-Ago	0.560	0.601	0.606	1501.36
17-Ago	0.494	0.280	0.367	1537.64
18-Ago	0.482	0.253	0.364	1494.61
23-Ago	1.030	0.551	0.699	1400.96
24-Ago	0.792	0.439	0.463	1398.58
31-Ago	1.320	0.433	0.446	1244.42
1-Set	0.613	0.612	0.562	1387.48
4-Set	1.180	0.237	0.254	1405.82
5-Set	0.639	0.363	0.299	1400.46
6-Set	0.915	0.542	0.506	1403.61

ANEXO 3 – Dados de pressão estática, pressão dinâmica e temperatura para o cálculo do caudal volumétrico de gás

Tabela A3-1: Dados de pressão estática, pressão dinâmica e temperatura para os filtros 1, 2 e 3 respectivamente, para o cálculo do caudal de gás.

Data	P_{S1} (Pa)	P_{S2} (Pa)	P_{S3} (Pa)	P_{D1} (Pa)	P_{D2} (Pa)	P_{D3} (Pa)	T₁ (K)	T₂ (K)	T₃ (K)
4-Jul	3386	3695	3362	708	643	838	103.2	102.1	98.5
11-Jul	4564	4625	4041	727	604	1132	96.5	100.6	102.6
18-Jul	4530	4277	4085	757	679	394	102	102	98.5
24-Jul	3618	3379	3245	585	438	418	102.2	101.2	94
7-Ago	2919	3125	3037	590.5	488.5	505.5	106.1	105.1	97.3
9-Ago	2906	3032	3020	363	539.5	490.5	100.9	101.8	95.9
17-Ago	3733	3599	3538	640	417	503	103	101.5	99
28-Ago	3406	3471	3391	710.5	543,5	688	103.3	101.7	100
4-Set	3121	3334	3172	453	572	509	90.1	90.1	88
5-Set	3054	3450	3029	401	503	456	103.6	102.2	99.6
11-Set	3201	3370	3129	574	625.5	346	105	103	101

ANEXO 4 – Caudal volumétrico de gás e concentração de carbono na alumina carregada

Tabela A4-1: Teor de carbono na alumina carregada do filtro 2 em relação ao fluxo de gás e alumina primária.

Data	Teor de carbono (%)	Caudal de gás (Nm ³ /s x 10)	Fluxo de alumina primária (kg/h x 10 ³)
4-Jul	0.661	1.24	1.22
12-Jul	0.560	1.21	1.21
18-Jul	0.306	1.28	1.23
24-Jul	0.732	1.08	1.51
7-Ago	0.508	1.08	1.20
9-Ago	0.419	1.09	1.50
17-Ago	0.280	1.10	1.54
23-Ago	0.551	1.07	1.40
31-Ago	0.433	1.14	1.24
04-Set	0.237	1.19	1.41
05-Set	0.363	1.10	1.40
11-Set	0.542	1.22	1.40

Tabela A4-2: Teor de carbono na alumina carregada do filtro 3 em relação ao fluxo de gás e alumina primária.

Data	Teor de carbono (%)	Caudal de gás (Nm ³ /s x 10)	Fluxo de alumina primária (kg/h x 10 ³)
4-Jul	0.872	1.42	1.40
12-Jul	0.676	1.65	1.24
18-Jul	0.512	0.98	1.21
24-Jul	0.816	1.12	1.51
9-Ago	0.489	0.93	1.22
7-Ago	0.634	1.12	1.20
17-Ago	0.367	1.10	1.23
23-Ago	0.699	1.27	1.54
31-Ago	0.446	1.12	1.50
04-Set	0.254	1.12	1.41
05-Set	0.299	1.05	1.40
06-Set	0.506	0.91	1.40

ANEXO 5 – Correlação de Pearson das emissões de alcatrão na chaminé e o fluxo de alumina primária

Tabela A5-1: Determinação da quantidade de alcatrão total emitido por volume de gás.

Data	Volume (Nm ³)	Resina (mg)	Resina (mg/Nm ³)	Filtro (mg)	Filtro (mg/Nm ³)	Total (mg/Nm ³)
7-Abr	2.37	11.60	4.89	21.20	8.95	13.84
18-Mai	2.89	10.00	3.46	28.51	9.85	13.31
11-Jun	2.94	12.00	4.08	21.60	7.35	11.43
19-Jul	2.17	14.40	6.64	20.00	9.22	15.85
9-Ago	2.92	8.40	2.88	8.80	3.01	5.89
10-Ago	2.75	10.00	3.64	8.80	3.20	6.84
21-Ago	2.70	1.60	0.59	8.40	3.11	3.70

Tabela A5-2: Determinação do coeficiente de Pearson.

Data	Alcatrão (X)	Fluxo de alumina (Y)	Xi ²	Yi ²	XiYi	(Xi-X _m)(Yi-Y _m)	(Xi-X _m) ²
07-Abr	13.84	999.62	191.55	999240.14	13834.74	1080.97	13.88
19-Jul	15.85	1118.01	251.22	1249946.36	17720.46	985.09	32.90
11-Jun	11.43	1134.30	130.64	1286636.49	12965.05	204.54	1.73
18-Mai	13.31	1263.00	177.16	1595169.00	16810.53	85.51	10.21
09-Ago	5.89	1501.33	34.69	2253991.77	8842.83	893.74	17.84
10-Ago	6.84	1501.50	46.79	2254502.25	10270.26	693.31	10.72
21-Ago	3.64	1510.54	13.25	2281731.09	5498.37	1429.41	41.92
Somatório	70.8	9028.3	845.3	11921217.11	85942.24	12372.49	281.06
Média	10.11	1289.76	-	-	-	-	-

$$r = \frac{n \sum X_i Y_i - \sum X_i \sum Y_i}{\sqrt{[n \sum X_i^2 - (\sum X_i)^2][n \sum Y_i^2 - (\sum Y_i)^2]}}$$

$$r = \left| \frac{7 \times 85942.24 - 70.8 \times 9028.3}{\sqrt{[7 \times 845.3 - (70.8)^2][7 \times 11921217.11 - (9028.3)^2]}} \right| = 0.905$$

ANEXO 6 – Cálculo da taxa de aumento ou redução do fluxo de alumina primária e fluxo de gás

Para o filtro 2, cálculo da taxa de redução de fluxo de gás e aumento do fluxo de alumina, respectivamente:

$$\frac{12.43 - 10.76}{10.76} \times 100\% = 15.52\%$$

$$\frac{1538 - 1200}{1200} \times 100\% = 21.98\%$$

Para o filtro 3, cálculo da taxa de redução de fluxo de gás e aumento do fluxo de alumina, respectivamente:

$$\frac{16.5 - 9.79}{9.79} \times 100\% = 68.84\%$$

$$\frac{1406 - 1200}{1406} \times 100\% = 14.65\%$$

ANEXO 7 - Figuras



Figura A7-1: Calibração da balança, respectivamente, válvula de alimentação, válvula de calibração e saco por baixo do tubo de calibração.



Figura A7-2: Aparato de vidro da resina na caixa de resfriamento.



Figura A7-3: Suporte de filtro e filtro de papel.



Figura A7-4: Extractor de Soxhlet.



Figura A7-5: Orifícios da linha de circulação dos filtros 1, 2 e 3 respectivamente de diâmetros 39.58mm, 51.70mm e 40.45mm.