



FACULDADE DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
LICENCIATURA EM ENGENHARIA MECÂNICA

Relatório de Estágio

**Estudo da Eficiência do Arrefecimento dos Ânodos de Carbono no Forno de
Cozimento para um Ciclo de 24 e 25 Horas na Mozal**

Discente:

Nélia Ralina Luís Zunguene

Supervisor da Faculdade:

Prof. Dr. Eng.º Paxis Roque

Supervisor da Empresa:

Eng.º Sansão Chaúque

Maputo, Abril de 2024



FACULDADE DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
LICENCIATURA EM ENGENHARIA MECÂNICA

Relatório de Estágio

**Estudo da Eficiência do Arrefecimento dos Ânodos de Carbono no Forno de
Cozimento para um Ciclo de 24 e 25 Horas na Mozal**

Discente:

Nélia Ralina Luís Zunguene

Supervisor da Faculdade:

Prof. Dr. Eng.º Paxis Roque

Supervisor da Empresa:

Eng.º Sansão Chaúque

Maputo, Abril de 2024



**Estudo da Eficiência do Arrefecimento dos Ânodos de Carbono no Forno de Cozimento para
um Ciclo de 24 e 25 Horas na Mozal
Nélia Ralina Luís Zunguene**

TERMO DE ENTREGA DE RELATÓRIO DE ESTÁGIO PROFISSIONAL

Declaro que a estudante Nélia Ralina Luís Zunguene entregou no dia ____/____/20____
as 03 cópias do Relatório do seu Estágio Profissional intitulado: **Estudo da Eficiência
do Arrefecimento dos Ânodos de Carbono no Forno de Cozimento para um
Ciclo de 24 e 25 Horas na Mozal.**

Maputo, ____ de _____ de 20____

O chefe da Secretaria

DECLARAÇÃO DE HONRA

Eu, Nélia Ralina Luís Zunguene, declaro por minha honra que o presente Relatório de Estágio com o tema **Estudo da Eficiência do Arrefecimento dos nodos de Carbono no Forno de Cozimento para um Ciclo de 24 e 25 Horas na Mozal** é exclusivamente de minha autoria, não constituindo cópia de nenhum trabalho realizado anteriormente e as fontes usadas para a realização do trabalho encontram-se referidas na bibliografia.

(Nélia Ralina Luís Zunguene)

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho de licenciatura a toda a família em especial aos meus pais e irmãos.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradecer a Deus pela dádiva da vida, pela saúde, por permitir a realização dos meus sonhos, por sustentar-me nos momentos mais difíceis e por colocar-me no lugar certo e na hora certa.

Agradecer aos meus pais Zeferino Luís Zunguene e Ralina Arnaldo Manjate pelo amor, carinho, apoio, pelos conselhos e pelo enorme sacrifício que fazem para que eu possa alcançar os meus objetivos em todas as vertentes da minha vida em especial na vida académica, palavras nunca serão suficientes para expressar a minha eterna gratidão. Agradecer aos meus irmãos Livia Ralina Luís Zunguene e Arnaldo Zeferino Zunguene pelo sacrifício e apoio incondicional. Agradecer ao resto da minha família em especial a minha avó Cristina Salomão Ngovene e tia Inocência Arnaldo Manjate.

Agradecer a Moçambique Alumínio que vem acompanhando o meu percurso académico na faculdade de engenharia desde o início, me dando a oportunidade de estar no programa “Mulher na Indústria”, um programa que vem motivando a presença da mulher numa área considerada masculina, e por fim me dando a oportunidade de estagiar na mesma.

Pela Moçambique Alumínio, endereço os sinceros agradecimentos ao Sr. Dias Bande por acreditar no potencial da mulher no ramo industrial, ao meu Supervisor Eng. Sansão Chaúque pelos ensinamentos e incentivo durante o período de estágio. Agradecer também a toda equipe do processo do departamento do Carbono pela motivação. Pela Universidade Eduardo Mondlane, agradecer ao meu supervisor da faculdade, o Professor Dr. Eng. Paxis Roque pelo acompanhamento e supervisão no trabalho do final do curso.

Os meus agradecimentos são extensivos aos meus amigos e colegas da faculdade em especial Albino Arone, António Uele, Youndy Magaia e Welka Cossa pelo suporte e apoio durante toda a jornada na faculdade, agradecer também a Frância Pinto pela ajuda durante a elaboração do relatório de estágio

ÍNDICE

TERMO DE ENTREGA DE RELATÓRIO DE ESTÁGIO PROFISSIONAL	i
DECLARAÇÃO DE HONRA.....	ii
DEDICATÓRIA.....	iii
AGRADECIMENTOS	iv
ÍNDICE DE FIGURAS	viii
ÍNDICE DE TABELAS	viii
LISTA DE ABREVIATURAS, SÍMBOLOS E ACRÓNIMOS.....	x
RESUMO	xii
CAPÍTULO 1 . INTRODUÇÃO	1
1.1 Introdução	1
1.2 Problema de Estudo.....	3
1.3 Problema.....	3
1.4 Objectivo	4
1.4.1 Objectivo Geral	4
1.4.2 Objectivos Específicos.....	4
1.5 Metodologia.....	4
1.6 Perguntas de investigação	5
1.7 Importância ou razões que motivam o estudo.....	5
1.8 Estrutura do trabalho.....	5
CAPÍTULO 2 . REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	7
2.1 Produção do Alumínio no Mundo e na África	7
2.2 História do Alumínio	8
2.3 Propriedades físicas e químicas do Alumínio.....	8
2.4 Processo de Produção do Alumínio	9
2.5 Processo Hall-Héroult	10
2.6 Matéria-Prima para a produção do Alumínio.....	13
2.6.1 Alumina.....	13
2.6.2 Ânodo de Carbono	15
2.6.3 Materiais electrolítico	15
2.6.4 Electrólise e Electricidade.....	16

2.7	Ânodo de Carbono	16
2.7.1	Coque	16
2.7.2	Alcatrão	18
2.7.3	Ânodo reciclado	19
2.8	Processo de produção do ânodo	20
2.8.1	Fábrica de Pasta	20
2.8.2	Fábrica de Cozimento.....	21
2.8.3	Planta de Chumbamento	21
2.9	Forno de Cozimento de Ânodos.....	22
2.9.1	Composição do forno de Cozimento	22
2.9.2	Ciclo de Cozimento	24
2.10	Transferência de calor	26
2.10.1	Condução.....	27
2.10.2	Convecção	28
2.10.3	Radiação	29
2.11	Transferência de calor nos fornos de cozimento de ânodos.....	30
2.12	Estudos feitos sobre o arrefecimento do ânodo.....	32
CAPÍTULO 3	. CONTEXTUALIZAÇÃO DA INVESTIGAÇÃO	35
3.1	Apresentação da Moçambique Alumínio.....	35
3.2	Carbono	36
3.2.1	Planta de Pasta do Ânodo	37
3.2.2	Forno de Cozimento do Ânodo.....	37
3.2.3	Planta de Chumbamento	38
3.3	Forno de Cozimento Do Ânodo da Moçambique Alumínio	39
3.3.1	Composição do forno	39
CAPÍTULO 4	. METODOLOGIA DE ESTUDO	40
4.1	Materiais e métodos.....	40
4.2	Amostragem.....	41
4.3	Processamento e Análise dos Dados	43

4.3.1	Procedimento para a Escolha do Modelo	44
4.3.2	Etapas para o cálculo da temperatura para os ciclos de 24 e 25 horas	45
CAPÍTULO 5 . APRESENTAÇÃO, ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS		46
5.1	Resultados dos Testes 1, 2 e 3.....	46
5.1.1	Apresentação gráfica dos testes 1, 2 e 3.....	46
5.1.2	Determinação dos modelos de estimação das temperaturas	48
5.1.3	Estimação das temperaturas finais de arrefecimento para os ciclos de 25 e 24 horas	49
CAPÍTULO 6 . CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES		53
6.1	Conclusões	53
6.2	Recomendações	54
6.3	Limitações da pesquisa.....	54
6.4	Sugestões para futuros trabalhos	55
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		56
ANEXOS		60

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Fluxograma do processo produtivo do Alumínio	10
Figura 2 Esquema de uma cuba eletrolítica.	11
Figura 3 Fluxograma simplificado do processo Hall-Hérault.	13
Figura 4 Fluxograma do processo Bayer	15
Figura 5 Bloco de ânodo com uma haste metálica "Stem".....	22
Figura 6 Composição de um forno	24
Figura 7 Composição de um fire	24
Figura 8 Curva de cozimento do ânodo	26
Figura 9 Modos de Transferência de calor.....	27
Figura 10 Transferência de Calor por Convecção.....	28
Figura 11 Sistema de transferência de calor do ânodo até a parede.....	31
Figura 12 Corte transversal do Forno de Cozimento de Ânodos	31
Figura 13 Planta da Moçambique Alumínio.....	35
Figura 14 Forno de Cozimento do Ânodo- Moçambique Alumínio.....	38
Figura 15 Bloco de ânodo com uma haste metálica.....	38
Figura 16 Composição do forno.	39
Figura 17 Cabo termopar tipo e um colector de dados.	41
Figura 18 Coletor de dados e os termopares conectados.....	42
Figura 19 Termómetro digital infravermelho.....	43

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 Comparação de propriedades entre o alumínio e outros metais.	9
Tabela 2 Insumos para a produção de 1 tonelada de alumínio primário.....	12
Tabela 3 Composição típica do coque verde de petróleo	17
Tabela 4 Valor das propriedades do alcatrão utilizado na fabricação de ânodo	19
Tabela 5 Número de ânodos produzidos por ciclo/ dia	25
Tabela 6 Modelos polinomiais dos testes 1, 2 e 3.....	48
Tabela 7 Valores estimados das temperaturas finais- ciclo de 24 e 25 horas.....	49
Tabela 8 Horas de Arrefecimento para cada Ciclo.....	51
Tabela 9 Temperaturas dos ânodos na retirada dos poços.	52

ÍNDICE DE GRÁFICO

Gráfico 1 Curva de arrefecimento do ânodo para um ciclo de 26 horas- teste 1	47
Gráfico 2 Curva de arrefecimento do ânodo para um ciclo de 26 horas- teste 2	47
Gráfico 3 Curva de arrefecimento do ânodo para um ciclo de 30 horas- teste 3	47

LISTA DE ABREVIATURAS, SÍMBOLOS E ACRÓNIMOS

σ	Constante de Stefan- Boltzmann
%	Porcentagem
% massa	Porcentagem de massa
°C	Graus Celsius
ABAL	Associação Brasileira de Alumínios
Al	Alumínio
Al ₂ O ₃	Óxido de alumínio (III) (alumina)
AlF ₃	Trifluoreto de alumínio
ALUCAM	Cameroon Aluminium
A _s	Área
B	Bromio
C	Carbono
C ₂ F ₆	Hexafluoreto
CaF ₂	Fluoreto de cálcio
CF ₄	Tetrafluorometano
CO	Monóxido de carbono
CO ₂	Dióxido de carbono
Cp	Medida de concentração
dt	Diferencial de temperatura
dT	Diferencial do tempo
E _b	Energia emitida
EGYPTALUM	Egypt Aluminium
FCA	Forno de Cozimento de Ânodos
Fe	Ferro
GPa	Giga Pascal
H	Horas
H ₀	Hipótese nula
H _a	Hipótese alternativa
IDC	Industrial Development Corporation
K	Condutividade térmica

K	Kelvin
kg	Quilogramas
kJ	Kilo Joules
M	Metros
MOZAL	Mozambique Aluminium
MPa	Mega Pascal
N	Numero de grupos de fogo
Na_2AlF_6	Banho de Criolita
NaAlO	Aluminato de Sódio
Ni	Níquel
NO_x	Óxidos de nitrogênio
P	Potássio
PAH's	Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos
PC	Planta de Chumbamento
PPA	Planta de Pasta de Ânodo
PPM	Partes por milhões
$\dot{Q}$	Taxa de transferência de calor
Q	Produtividade
R^2	Coeficiente de determinação
s	Segundos
SO_x	Óxidos de enxofre
t	Tempo
T	Temperatura
T_∞	Temperatura do infinito
T_s	Temperatura da superfície
V	Vanádio
VALCO	Volta Aluminium Company Limited

RESUMO

A Moçambique Alumínio é uma empresa que se dedica na produção do alumínio, com capacidade instalada de 580 mil toneladas ano, tornando-se a segunda maior do continente africano. O alumínio é obtido por meio do processo de Hall- Heroult, em que é realizada a electrólise ígnea da alumina fundida na criolita. No processo de produção de alumínio, dentre varias componentes, o destaque são os ânodos de carbono, que tem um papel preponderante na produção do alumínio. No processo de cozimento dos ânodos de carbono tem-se tido em conta a relação entre os ciclos e a temperatura final de arrefecimento dos mesmos. Assim sendo, no presente estudo, a análise da eficiência de arrefecimento do ânodo de carbono para os ciclos de 24 e 25 horas constituiu o objectivo geral, tendo como objectivos específicos; (i) análise da eficiência do arrefecimento dos ânodos de carbono nos ciclos de 26 e 30 horas, (ii) estimação das temperaturas para um ciclo de 24 e 25 horas, (iii) descrição do processo de cozimento dos ânodos de carbono e (iv) identificação dos factores que afectam o arrefecimento. Para responder os objectivos específicos, foram observados os seguintes procedimentos metodológicos: usou-se o cabo termopar, o registrador de dados e o termopar de combustão como instrumentos de recolha de amostras de temperatura de arrefecimento que foram processados e analisados com o auxilio do Excel. Este software ajudou a gerar gráficos para cada amostra, de seguida os respectivos modelos nomeadamente: linear, exponencial, logarítmico e polinomial. De seguida escolheram-se as equações para determinar a temperatura final para os ciclos de 24 e 25 horas, sendo o modelo apropriado para a estimação o Polinomial por ter apresentado o maior coeficiente de determinação. Para o presente trabalho foram retiradas doze amostras, sendo quatro em cada teste, dois testes foram realizados no forno de cozimento 1 num ciclo de 26 horas e um teste no forno de cozimento 2, para um ciclo de 30 horas. Isto significa que as temperaturas de arrefecimento de 24 e 25 horas foram estimadas a partir dos modelos polinomiais de 26 e 30 horas. Como resultados e conclusões, o estudo constatou que a temperatura final de arrefecimento dos ânodos de carbono aumentava com a redução dos ciclos de cozimento. Como factores que impactam sobre o processo de arrefecimento, são referenciados, o fluxo do ar, a posição da rampa de arrefecimento, as dimensões do *olho mágico*, as configurações do *olho mágico* (aberto/ fechado), a espessura das paredes de fumo e a potência da rampa de arrefecimento. Em virtude do aumento da

temperatura com a redução do ciclo de cozimento, o estudo recomenda que se faça o incremento do fluxo e ar de modo a assegurar que o arrefecimento atinja os parâmetros definidos e o aumento de mais uma rampa de arrefecimento. Com esta medida, a empresa deve assegurar que todos os *olhos mágicos* estejam 100% abertos nas secções onde a rampa de arrefecimento está assente e garantir o controle do ponto zero, para que o ar incrementado não afecte a zona de aquecimento.

Palavras-chaves: Ciclo de Cozimento, Ânodo de Carbono, Forno de Cozimento, Temperatura de Arrefecimento.

CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO

1.1 Introdução

O alumínio é o terceiro elemento mais abundante da natureza. O metal está presente nas nossas vidas de diversas formas, sejam naturais ou manufacturadas, pois estamos expostos ao alumínio do solo, da água, do ar e até nos alimentos.

As características do alumínio permitem que ele tenha uma ampla gama de aplicações, por isso, o metal é um dos mais utilizados no mundo todo. Material leve, durável e de excelente aspecto estético, o alumínio mostra uma excelente performance e propriedades favoráveis na maioria das aplicações. Produtos que utilizam o alumínio ganham também competitividade, em função dos inúmeros atributos que este metal incorpora, como pode ser conferido a seguir (Davis, 1993).

No mundo a sua produção vem aumentando a cada dia que passa sendo China um dos países que mais se destaca com uma produção anual de 40 milhões de toneladas métricas de alumínio primário em 2022, superando todos os outros países produtores primários de alumínio. Africa também participa de forma activa no ramo de produção do alumínio tendo Moçambique como o segundo maior produtor do continente.

A Moçambique Alumínios, é uma empresa sediada em Moçambique, localizada em Maputo, no Distrito de Boane, que se dedica a produção do alumínio primário, com uma capacidade instalada de 580 mil toneladas ano. Em termos práticos, a Moçambique Alumínios tem como meta diária a produção de cerca de 1550 toneladas. Sendo uma empresa de relevo no ramo da indústria metalúrgica em Moçambique, a necessidade de compreender o processo produtivo torna-se relevante.

Dentre os vários processos, o arrefecimento dos ânodos de carbono é uma das etapas mais importantes na produção do alumínio. Segundo ABAL (2000), actualmente Hall-Héroult é o único processo utilizado industrialmente para produzir alumínio primário. Este processo ocorre nas células de redução e consiste na

dissolução de alumina a aproximadamente 960 °C em um banho de criolita fundida, na presença de um ânodo de carbono e da corrente elétrica. Ao fim do processo, obtém-se o alumínio fundido depositado no fundo das células de redução.

Sendo o ânodo de carbono um dos elementos que participa no processo de produção do alumínio a sua qualidade tem um impacto significativo no produto final. Para garantir que o ânodo de carbono tenha um bom desempenho é necessário que o ânodo tenha as características físicas, químicas e mecânicas necessárias. Estas características são determinadas em parte pela qualidade da matéria-prima usada, no caso coque de petróleo e alcatrão, pelas propriedades de formação do bloco, especificamente densidade verde e teor de alcatrão na formulação, e pelas condições de tratamento térmico, ou processo de cozimento do ânodo.

O Processo de cozimento do ânodo é constituído por três etapas principais: (i) Pré-aquecimento, onde queimam todos os voláteis de alcatrão, (ii) Aquecimento, onde se atinge a temperatura mais alta do processo e o ânodo coze e (iii) A zona de arrefecimento, onde arrefecem até atingirem temperaturas abaixo dos 350 °C. Se os ânodos de carbono não forem arrefecidos até uma temperatura abaixo dos 350 °C surgem defeitos como queimas na superfície do ânodo devido a reacção com o ar. O outro problema que pode surgir é o reaquecimento dos ânodos, cujo impacto é a inutilidade dos ânodos e consequente perdas de produção na empresa.

No processo de produção ou arrefecimentos dos ânodos de carbono acima descrito, uma das mais importantes variáveis a ter em conta é o ciclo de produção dos ânodos de carbono. Keller & Sulger 2010, definem Ciclo de Cozimento como o período de tempo, necessário para mover um *fire* uma secção afrente e que normalmente varia de 24 a 28 horas, apesar de a literatura prever que os ciclos também possam estar entre 20 a 32 horas. Isto significa que existe uma relação entre o ciclo e a quantidade de ânodos de carbono produzida, sendo que, quanto menor for o ciclo maior é a quantidade de ânodos produzida.

Assim, neste estudo procurou-se compreender, se o aumento da produtividade usando como base a aceleração do ciclo, neste caso, para um ciclo de 24 horas e 25

horas, teria impacto na temperatura final dos ânodos de carbono depois do arrefecimento.

1.2 Problema de Estudo

Conforme consta da secção 1.1, para a produção de alumínio é necessária a presença do ânodo de carbono, que participa no processo de eletrólise. Neste processo, o ânodo é consumível por isso é necessária uma produção contínua. Depois da produção da pasta do ânodo verde segue-se o processo de cozimento do ânodo verde que visa aumentar as propriedades físico-químicas do bloco de carbono através de uma adequada relação tempo (ciclo) versus temperatura.

Para o efeito, durante o cozimento os ânodos são submetidos a um processo de pré-aquecimento, aquecimento e arrefecimento. Existe uma temperatura estipulada para que o ânodo entre em contacto com o meio ambiente, devendo-se garantir que a mesma seja atingida de forma eficaz para evitar defeitos provenientes da interacção do ânodo em altas temperaturas com o ar, o que pode impactar na eficiência produtiva. Dai que o presente estudo visa explicar até que ponto a redução dos ciclos de produção para 24 e 25 horas pode influenciar na temperatura final de arrefecimento, e, por conseguinte, a eficiência produtiva dos ânodos de carbono.

1.3 Problema

Analisar se é possível arrefecer os ânodos de carbono num ciclo de 24 ou 25 horas sem afectar a sua qualidade. Para o efeito surge a necessidade de responder questões como: (i) como é que funciona o processo de cozimento dos ânodos de carbono? (ii) qual é o efeito da redução do ciclo na temperatura final? (iii) quais são os factores que influenciam o processo de arrefecimento e que podem contribuir positivamente na eficiência produtiva?

1.4 Objectivo

1.4.1 Objectivo Geral

Estudar a eficiência de arrefecimento do ânodo para o ciclo de 24 horas e 25 horas do Forno de Cozimento de Ânodo.

1.4.2 Objectivos Específicos

De forma a alcançar com sucesso o objectivo geral foram estabelecidos os seguintes objectivos específicos:

- Descrever o funcionamento de um forno de cozimento de ânodo;
- Analisar a eficiência do arrefecimento do ânodo de carbono nos ciclos de 26 horas e 30 horas;
- Estimar as temperaturas de arrefecimento do ânodo de carbono para os ciclos de 24 horas e 25 horas;
- Identificar os factores que afectam o processo de arrefecimento dos ânodos de carbono.

1.5 Metodologia

Para se obter resultados precisos em qualquer actividade, deve se escolher os melhores métodos de modo a alcançar as metas traçadas. No presente trabalho cumpriu com a seguinte metodologia:

- Revisão bibliográfica- Consistiu na leitura de material relevante à construção da fundamentação teórica necessária para o tratamento do problema de pesquisa.
- Exposição ao campo- Consistiu na exposição ao local de realização do estágio, precisamente no Forno de Cozimento do Ânodo, de modo a observar e compreender os processos industriais e identificar um tema de pesquisa relevante.
- Parte experimental- Consistiu em colocar o colector de dados no forno durante todo o processo de arrefecimento.
- Tratamento de dados- Realizou-se o tratamento, a análise, interpretação e discussão dos dados obtidos pelas medições.

- Compilação do relatório- O presente relatório compreende a informação obtida na revisão da literatura, o problema de pesquisa, a justificativa da escolha do tema, os procedimentos experimentais realizados, a apresentação e discussão dos resultados.

1.6 Perguntas de investigação

1. Como é que funciona o processo de cozimento dos ânodos de carbono?
2. Qual é o efeito da redução do ciclo na temperatura final?
3. Quais são os factores que influenciam o processo de arrefecimento e que podem contribuir positivamente na eficiência produtiva?

1.7 Importância ou razões que motivam o estudo

Segundo Donário & Santos (2014), o objectivo primordial das empresas é garantir a maximização do lucro através da maximização da produção. Neste contexto, sendo a Moçambique Alumínio uma empresa com fins lucrativos, constitui preocupação a melhoria contínua da eficiência produtiva. Sendo uma das componentes do processo de produção de alumínio, o cozimento do ânodo de carbono, torna-se importante estudar o contributo da redução dos ciclos para 24 e 25 horas na temperatura final de arrefecimento e em consequência a eficiência produtiva da Moçambique Alumínio.

1.8 Estrutura do trabalho

O trabalho está dividido de forma coerente de modo a explicar e mostrar com clareza todo o processo de análise do arrefecimento do ânodo para tal o trabalho está dividido nos seguintes capítulos:

- Capítulo 1: Consiste na introdução do tema com vista a dar ao leitor uma pequena visão do que vai se analisar durante todo o trabalho, de seguida apresentou-se o problema que levou ao estudo do tema em causa.
- Capítulo 2: Que consiste na revisão bibliográfica para apresentar a literatura com as informações acerca do processo de produção do alumínio, o processo de produção do ânodo dando ênfase ao processo de cozedura do ânodo e por

fim o processo de transferência de calor que acontece no arrefecimento do ânodo.

- Capítulo 3: consiste na contextualização da investigação onde deu-se ênfase a Moçambique Alumínio que foi o local onde se realizou o trabalho especificamente no Carbono onde se encontra o forno de cozimento de ânodo.
- Capítulo 4: Onde apresenta-se a metodologia de resolução de problemas dando ênfase a parte experimental e aos instrumentos usados durante o processo de recolha de dados.
- Capítulo 5: Fase de apresentação dos resultados e posteriormente a análise e a discussão dos dados obtidos. Relaciona-se a literatura, as informações obtidas durante o estágio acerca do cozimento do ânodo.
- Capítulo 6: Fase de se expor aquilo que foram as conclusões do trabalho tendo em conta a revisão bibliográfica e a discussão dos resultados

CAPÍTULO 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Produção do Alumínio no Mundo e na África

O alumínio, apesar de ser o segundo elemento metálico mais abundante na crosta terrestre, é o metal mais jovem usado em escala industrial. A sua produção comercial iniciou a 150 anos. Além de ser o metal mais consumido no mundo a sua produção actual supera a dos outros metais não ferrosos. As suas características físicas e químicas como o seu baixo peso específico comparando com os outros metais de grande consumo, a resistência a corrosão, a alta condutividade electrónica e térmica contribuem para que haja uma grande variedade nas suas aplicações e preferências. (ABAL, 2004)

Em 2022, a China produziu 40 milhões de toneladas métricas de alumínio primário, superando todos os outros países produtores primários de alumínio. Este dado indica que a China é o actual maior produtor de alumínio no mundo. Segundo a mesma fonte, a China em 2021 foi o maior exportador deste *commodity*, com uma exportação avaliada em 34,7 biliões de dólares norte americanos. O segundo maior exportador foi a Alemanha com um volume de exportação avaliado em 18,8 biliões de dólares norte americanos¹.

Em África os cinco maiores produtores de alumínio são Africa do Sul (HILLSIDE ALUMINIUM) com uma capacidade instalada de 720 mil toneladas ano, Moçambique (MOZAL ALUMINIUM), com capacidade instalada de 580 mil toneladas ano, Egipto (EGYPTALUM), com capacidade instalada de 320 mil toneladas ano, Gana (VALCO) com 200 mil toneladas ano de capacidade instalada e Camarões (ALUCAM) com uma capacidade instalada de cerca de 100 mil toneladas ano. África produziu cerca de 1,64 milhões de toneladas de alumínio em 2019. Na última década, a produção africana de alumínio manteve-se relativamente estável, variando de um mínimo de

¹ Dados disponíveis em <https://www.statista.com/statistics/1113623/global-aluminum-exports-by-country/>

produção de 1,64 milhões de toneladas em 2012 a um máximo de 1,81 milhões de toneladas em 2013².

2.2 História do Alumínio

O alumínio foi descoberto em 1809 por Sir Humphrey Davy e foi isolado pela primeira vez, em 1825, por Hans Christian Orsted. Apesar disso, somente em 1886 foi desenvolvido um processo industrial economicamente viável para a obtenção do alumínio metálico. Dois cientistas trabalharam de forma independente: Charles Martin Hall, nos Estados Unidos, e Paul Louis Toussaint Héroult, na França, e inventaram o mesmo processo eletrolítico para transformar o óxido de alumínio em alumínio metálico, o que permitiu a evolução e o crescimento da utilização do metal até os dias atuais, tal processo é usado até hoje e é chamado de Hall-Héroult. (Abal, 2000)

O processo Hall-Héroult é o processo industrial usado mundialmente na produção do alumínio primário. É um exemplo de fundição em que o alumínio metálico é obtido por electrólise, em uma reação eletroquímica. A produção decorrente do electrólise é regida pela lei de Faraday que, em linhas gerais, significa que a quantidade de alumínio produzido será diretamente proporcional à corrente elétrica aplicada, ou seja, se não houver passagem de corrente elétrica, não haverá produção. (ABAL, 2000)

2.3 Propriedades físicas e químicas do Alumínio

Segundo Kammer (1999), alumínio faz parte do grupo dos metais não ferrosos, ele é leve e possui ótimas propriedades químicas e mecânicas o que contribui para o aumento da sua demanda. O alumínio puro comercial contém um baixo teor de impurezas, normalmente inferior a 1% e é bastante leve quando comparado com outros metais. A sua densidade é de 2,7 g/cm³, cerca de um terço da densidade do aço, possui um baixo ponto de fusão, tem uma elevada resistência à corrosão e grande facilidade na formação de ligas com propriedades bastante distintas entre si.

² Dados disponíveis em <https://www.alcicle.com/news/the-top-5-primary-aluminium-producers-of-africa-62457>

Podemos observar a comparação de algumas propriedades do alumínio com três tipos de aços e com o cobre. A densidade é bastante inferior a qualquer um dos outros materiais, o que como já foi referido constitui uma das suas maiores vantagens. O módulo de *Young* é também inferior aos materiais da tabela, uma vez que o alumínio não é um material rígido. O baixo ponto de fusão confere-lhe uma multiplicidade de aplicações, especialmente na aeronáutica (Totten, 2003).

Tabela 1 Comparação de propriedades entre o alumínio e outros metais.

	Alumínio	Aço-carbono	Ligas de aço	Aços inoxidáveis	Cobre
Densidade (1000 kg/m ³)	2,6-2,8	7,85	7,85	7,75-8,1	8,92
Módulo Elástico (GPa)	69	190-210	190-210	190-210	110-128
Resistividade Eléctrica (10 ⁻⁹ W-m)	28,2	130-1250	210-1251	75,7-1020	17
Ponto de Fusão (°C)	660 °C	1426-1538		1371-1454	1357
Constante de Poison	0,33	0,27-0,3	0,27-0,3	0,27-0,3	0,34
Calor Específico (J/Kg-K)	938	450-2081	452-1499	420-500	385
Tensão de Ruptura (MPa)	230-570	276-1882	758-1882	515-827	
Condutividade Térmica (W/m-K)	150-180	24,3-65,2	26-48,6	11,2-36,7	401
Expansão Térmica (10 ⁻⁶ /K)	20,4-25	11-16,6	9-15	9-20,7	16,5
Tensão de Cedência (MPa)	215 - 505	186-758	366-1793	207-552	70

Fonte: (Totten, 2003)

2.4 Processo de Produção do Alumínio

Segundo Kelle & Sulger (2008), o processo de fundição eletrolítica patenteado por Hall e Héroult em 1886 ainda é a única maneira de produzir alumínio primário em escala comercial, embora, haja vários estudos tendentes a encontrar métodos alternativos. O alumínio é produzido a partir da bauxita, um minério encontrado em quantidades abundantes nos solos vermelhos e tropicais da Austrália, América do Sul e África.

A bauxita contém compostos de óxido de alumínio juntamente com impurezas como, por exemplo, óxido de ferro e silicatos. O processo de produção de alumínio ocorre em duas etapas principais nomeadamente, (i) a primeira conhecida como processo de Bayer, que consiste em produzir óxido de alumínio anidro a partir do minério de

alumínio chamado bauxite e (ii) a segunda denominada redução (Processo de Hall-Heroult) que consiste em reduzir o óxido por electrólise fundida em células electrolíticas. Abaixo, o fluxograma de produção:

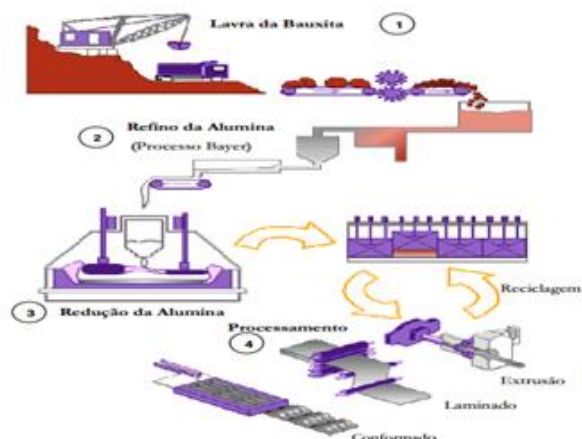


Figura 1 Fluxograma do processo produtivo do Alumínio

Fonte: (QUALITCR, n.d.)

Tendo em conta que o presente trabalho tem como foco o estudo da influência do ciclo no processo de cozimento de ânodos, na secção seguinte, é feita a descrição do processo de Hall-Hérault.

2.5 Processo Hall-Hérault

O processo Hall-Hérault é iniciado com a dissolução da alumina pura em um banho de criolita (Na_3AlF_6), cujo ponto de fusão é 1009°C . Para reduzir a temperatura de fusão do banho electrolítico para a faixa de 940°C a 980°C , são adicionados fluorita (CaF_2) e um excesso de fluoreto de alumínio (AlF_3) (SHIREVE & BRINK JUNIOR, 1997).

Uma corrente eléctrica é passada pelo electrolito em baixa voltagem, de modo que o banho electrolítico seja fundido em baixa tensão. A reacção electrolítica de produção de alumínio se processa em grandes vasos de aço, com formato de tanque, conhecidos como cuba electrolítica.

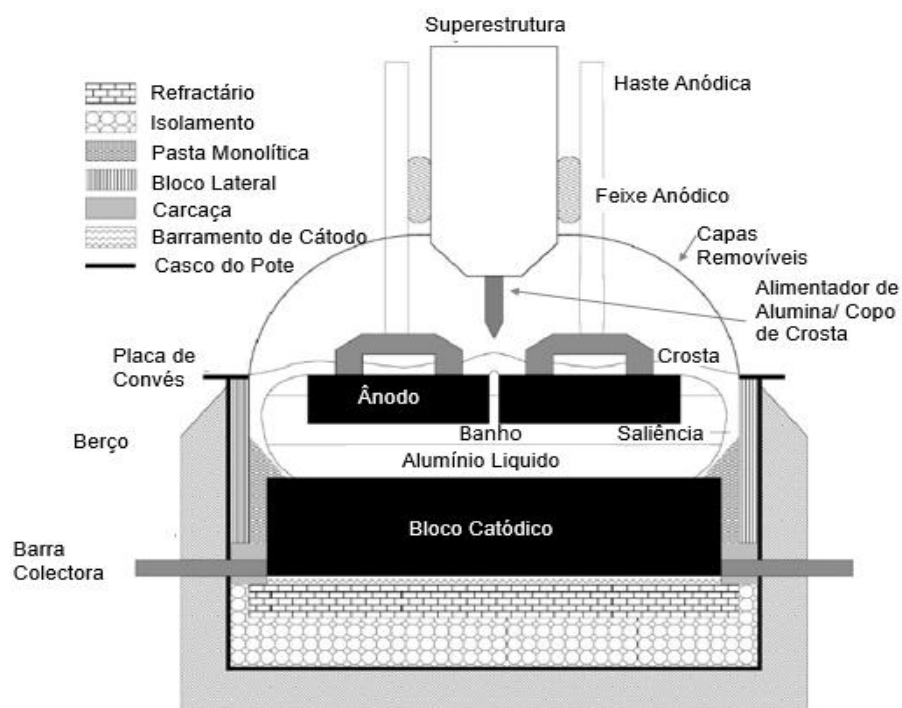


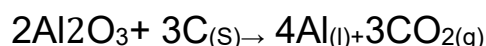
Figura 2 Esquema de uma cuba eletrolítica.

Fonte: Ishak (2018)

De acordo com ABAL 2010, na cuba electrolítica, a corrente eléctrica passa pelo ânodo, atravessa o cátodo e segue para o ânodo da cuba seguinte formando um circuito em série. A voltagem em cada uma das cubas varia de 4 a 5 Volts, dos quais apenas 1,6 Volts são necessários para a electrólise propriamente dita. O restante da voltagem é usado para vencer as resistências do circuito e gerar calor para manter o electrolito fundido.

Apesar de as células operarem a uma baixa voltagem, necessitam de valores de corrente altíssimos na ordem de 50.000 a 350.000 amperes (IAI, 2010). Os materiais do electrolito são adicionados no espaço existente entre o ânodo e o cátodo da célula e à medida que vão sendo fundidos, os ânodos são levantados para que a célula comece a operar. O electrolito fundido é composto por criolita, 6 a 10% ponderais de fluorita, excesso de fluoreto de alumínio e alumina na concentração de 2 a 6% (SHIREVE & BRINK JUNIOR, 1997)

A equação abaixo, representa a reação global do processo electroquímico que acontece no interior da cuba. Na electrólise, os iões de alumínio migram para o cátodo, onde são reduzidos a alumínio metálico, enquanto o oxigénio liberado reage com o carbono do ânodo, formando CO e CO₂, com predominância para o CO₂.



Equação 1: Reação global do processo eletrolítico

O alumínio metálico, à medida que vai se formando, se deposita na parte inferior da cuba, por diferença de densidade, de onde é, de tempos em tempos, vazado para cadinhos e destinado ao transporte.

Tabela 2 Insumos para a produção de 1 tonelada de alumínio primário

Insumos para produção de 1 tonelada de Alumínio	
Alumina	1.919 Kg
Energia Elétrica	15,0 MWh
Criolita	8 Kg
Coque de petróleo	384 Kg
Alcatrão	117 Kg
Óleo combustível	44,2 Kg

Fonte: Abal 2010

Após a produção de alumínio primário na sala de cubas, o metal é enviado para o sector de fundição, onde são ajustadas a sua composição química e a forma física do produto (lingote, tarugo, rolo, *caster* e vergalhão), o qual é, então, enviado para a área de transformação mecânica (extrusão, laminação, cabos) onde será dada a forma final do metal, de acordo com a demanda do cliente (ABAL, 2008).

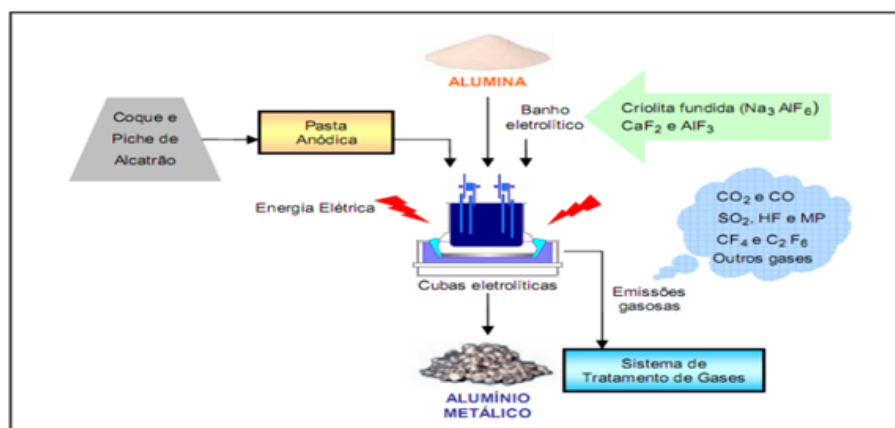


Figura 3 Fluxograma simplificado do processo Hall-Hérout.

Fonte: Silva 2010

Dentro do processo Hall-Hérout existem variáveis tecnológicas que podem variar de uma planta industrial para outra. Essas variáveis estão relacionadas ao tipo de ânodo utilizado nas cubas electrolíticas, que pode ser ânodo pré-cozido e ânodo de pasta Söderberg. Os dois tipos de ânodo são obtidos a partir de uma mistura de coque de petróleo calcinado e alcatrão. O ânodo pré-cozido é cozido antes de ser introduzido no processo de redução da alumina no forno. O ânodo de pasta Söderberg, por sua vez, é cozido na própria cuba eletrolítica, com o calor liberado no processo, e é consumido continuamente, devendo ser constantemente alimentado no sistema (SHIREVE & BRINK JUNIOR, 1997).

2.6 Matéria-Prima para a produção do Alumínio

Nesta secção são apresentadas as matérias primas aplicadas no processo de produção de alumínio.

alcatrão

2.6.1 Alumina

A Alumina (óxido de alumínio – Al_2O_3) é um composto químico que se apresenta na forma de um pó branco e apresenta diversas aplicações industriais destacando-se, dentre elas, a produção de alumínio (SAFARIAN & KOLBEINSEN, 2016). A alumina é obtida principalmente através do minério bauxite pelo processo de Bayer.

Assim sendo, o processo de produção da alumina resume-se em alguns passos essenciais a destacar:

- (i) ocorre primeiro a moagem húmida da bauxita com a adição de calcário, que resulta na obtenção de uma mistura pastosa, que é digerida pela adição de soda cáustica;
- (ii) Em seguida, realiza-se a separação e lavagem dos resíduos insolúveis (lama vermelha e areia) da solução, denominado “licor verde”, que são armazenados em áreas de secagem de resíduos;
- (iii) Posteriormente, ocorre a precipitação de alumínio trihidratado (ATH) presente no aluminato de sódio (NaAlO_2) devido à adição de grãos de hidróxido de alumínio, permitindo a separação dos cristais do licor verde e o retorno do licor residual para o sistema de digestão. Partículas sólidas de hidróxido de alumínio são classificadas e as mais finas são utilizadas no processo de precipitação para que se atinja altas taxas de precipitação.
- (iv) Por fim, realiza-se a calcinação dos cristais de alumínio trihidratado a aproximadamente $1000\text{ }^\circ\text{C}$, removendo todas as partículas de água e obtendo-se alumina (Al_2O_3).

Como regra geral, necessita-se de pouco mais de 5 kg de bauxita para produzir 1 kg de alumínio e, apresenta-se na Figura 4 um fluxograma simplificado que ilustra o processo de Bayer (CARDOSO, et al., 2011)

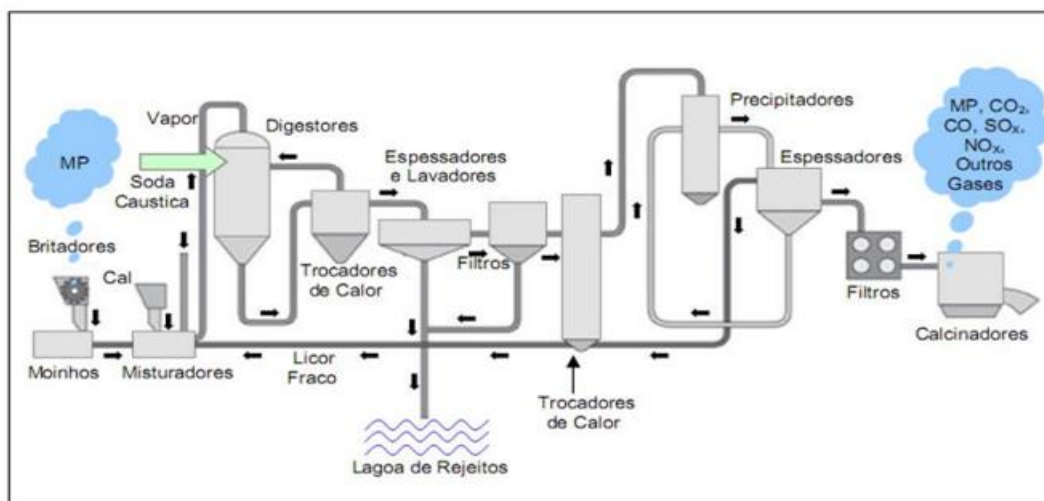


Figura 4 Fluxograma do processo Bayer

Fonte: (Alumínio, 2008)

2.6.2 Ânodo de Carbono

Durante o processo de electrólise, utilizam-se ânodos de carbono (Söderberg ou pré-cozidos) que são consumidos durante a reação. Os ânodos Söderberg são utilizados em células de Söderberg e são “cozidos” no interior das mesmas, enquanto os pré-cozidos são sujeitos previamente a altas temperaturas, em fornos de cozedura com parâmetros bem estabelecidos, tornando possível controlar devidamente o processo e capturar os fumos produzidos durante o processo e garantir o seu tratamento. (Kvande, 2011). Entretanto, tendo em conta que o ânodo de carbono é o objecto de estudo, a sua caracterização detalhada é feita na secção 2.7.

2.6.3 Materiais electrolítico

Kvande (2011), refere que os materiais electrolíticos são usados para diminuir o ponto de fusão da alumina para que a dissolução ocorra a pressões mais baixas e por conseguinte diminuir a temperatura da operação no geral. Este processo ocorre com o uso de um banho rico em criolita e contendo aditivos.

2.6.4 Electrólise e Electricidade

A electrólise é um processo de separação de elementos químicos presentes em um composto, através do uso de corrente eléctrica (Cardoso, et al., 2015). A reacção de electrólise requer o uso de grandes quantidades de energia, de tal modo que ocorra a redução de alumina que resulta em alumínio como produto. Da Silva (2022) citando Dion e outros (2013), descreveu dois parâmetros principais que retratam a performance das células e o custo de produção, sendo estes a eficiência de corrente e o consumo de energia.

2.7 Ânodo de Carbono

Conforme referenciado na subsecção 2.6.2, por constituir o objecto de estudo do presente trabalho, é caracterizado com detalhe o processo e produção do ânodo de carbono incluindo a respectiva matéria prima. Deste modo, a produção do ânodo de carbono é feita a partir da mistura do coque (65%), alcatrão (15%) e ânodos reciclados (20%) provenientes do processo de redução.

Tanto o ânodo como o cátodo das cubas são fabricados com carbono. Enquanto o ânodo é um elemento sempre consumido na electrólise de redução da alumina, os blocos de carbono que formam o cátodo servem apenas de condutor eléctrico e isolante térmico. A camada de alumínio líquido que está sobre os blocos catódicos também faz parte do cátodo.

Dada a sua relevância, as indústrias de alumínio no mundo consomem cerca de oito milhões de toneladas de carbono por ano devido ao desgaste do ânodo. Outrossim, os ânodos de carbono precisam preencher dois requisitos: conduzir eletricidade na cuba electrolítica e, actuar como um redutor no processo electrolítico, como por exemplo, a conversão da alumina em alumínio (ONDER & Bagdoyan, 1993)

2.7.1 Coque

O coque uma das matérias primas do ânodo é definido segundo Kelle & Suger 2008, como um produto sólido granulado carbonáceo de cor preta, é um subproduto produzido a partir dos resíduos da destilação do petróleo bruto em algumas refinarias.

A produção de coque de petróleo verde (GPC) é normalmente de 5% do volume e 2% do valor da quantidade de petróleo bruto processado.

Sua composição varia de acordo com o tipo de petróleo refinado, sendo geralmente caracterizado pelo elevado teor de carbono e rico em hidrocarbonetos residuais (de 2% a 15%, podendo chegar a mais de 21%), incluindo hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (HAP), o que lhe confere um odor característico e alto poder calorífico (CONCAWE, 1993; MESKO, 2008; PEREIRA, 2007; SANTOS; SILVA, 2008). O coque é usado na produção de ânodos devido ao seu rico teor de carbono. A seguir encontra-se uma tabela com a composição típica do coque verde de petróleo.

Tabela 3 Composição típica do coque verde de petróleo

Composto	Valores de referência
Carbono fixo (%)	84 -97
Enxofre (%)	0.5-7.5
Material volátil (%)	2-15
Hidrogênio (%)	Até 5
Cinzas (%)	0.1- 0.8
Ferro (Fe) (mg/kg)	50- 2000
Vanádio (V) (mg/kg)	5,0-5.000
Boro (B) (mg/kg)	0,1- 5,0
Níquel (Ni) (mg/kg)	10- 30.000

Fonte: Agência Pernambucana de Recursos Hídricos, 2004.

2.7.2 Alcatrão

O Alcatrão é uma substância facilmente inflamável, de cor escura e pegajosa, constituído de carbono e hidrogênio, dentre outras substâncias. Ele provém do processo de coqueificação, que usa carvão mineral como matéria-prima e que gera vários compostos nocivos, como voláteis orgânicos, NO_x, SO_x, hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (PAH's) com preocupantes propriedades carcinogénicas. (SOLOMON & King, 1985) (PEREZ, 2003)

Quando os ânodos são produzidos, ele actua como ligante na mistura de partículas com granulométricas diferentes. O alcatrão é resíduo remanescente após a destilação a vácuo para a remoção de metade ou mais constituintes voláteis. Geralmente o alcatrão é preferido na fabricação de ânodos por causa da sua alta qualidade de agregar partículas. (MARSH, et al., 1999)

Durante a mistura destas partículas o alcatrão preenche os espaços vazios deixados pelas partículas do coque de petróleo, aglutinando as frações de fino, desta forma, pode-se modelar os blocos em qualquer formato. O tratamento térmico subsequente é necessário para proporcionar resistência mecânica e densidade ao ânodo, como também condutividade térmica e elétrica apropriada para ser aplicada na célula eletrolítica.

Ânodos que têm o alcatrão como ligante, são misturas complexas e grandes cadeias de hidrocarbonetos aromáticos usualmente derivado de alta temperatura do carvão de alcatrão e resíduos de petróleo. Como o alcatrão é composto de uma mistura de hidrocarbonetos, a identificação de suas propriedades físico-químicas, a partir de sua composição química, é bastante complexa. No entanto, o alcatrão é geralmente classificado segundo propriedades tais como o ponto de amolecimento, valor de coqueificação, densidade real, insolúveis em quinoleína, dentre outros. (MEIER, 1992)

Tabela 4 Valor das propriedades do alcatrão utilizado na fabricação de ânodo

Propriedades	Unidades	Valores Limites
Carbono	% massa	> 93
Hidrogênio	% massa	4,3 – 4,5
Oxigênio	% massa	1,3 – 2,5
Enxofre	% massa	0,1 – 0,7
Cinzas	% massa	0,1 – 0,5
Cálcio	PPM	50 – 150
Ferro	PPM	100 – 500
Manganês	PPM	1 – 50
Silício	PPM	100 – 400
Sódio	PPM	100 – 700
Potássio	PPM	10 – 100
Zinco	PPM	10 – 400
Titânio	PPM	< 30
Vanádio	PPM	< 10
Ponto de amolecimento	°C	100 – 115
Viscosidade a 140 °C	Cp	3000– 12000
Densidade em água	kg.dm ⁻³	1,30 – 1,33
Valor de coqueificação	% massa	54 – 60
Insolúveis em quinolina (α -resina)	% massa	7 – 14
Insolúveis em tolueno(γ -resina)	% massa	26 – 34

Fonte: (MEIER, 1992)

2.7.3 Ânodo reciclado

Refere-se ao ânodo retirado da cuba após o seu tempo de vida na mesma, que é geralmente em torno de 26 dias. Os ânodos reciclados são reciclados não só para o controle de custos, mas para melhorar a qualidade dos novos ânodos.

Um ânodo reciclado de boa qualidade começa com um bom ânodo e termina com uma boa limpeza para remover o banho, alumina e metal. Pode-se haver o questionamento de que se um ânodo bom pode ser fabricado sem o ânodo reciclado,

e a resposta seria que sim, porém há um grande risco de ocorrer à formação de rachaduras durante o cozimento e a perda de propriedades, que são importantes para o ânodo, deste modo o ânodo reciclado tem como maior funcionalidade o aumento da densidade do produto (ONDER & Bagdoyan, 1993).

2.8 Processo de produção do ânodo

Na secção 2.7 abordou-se acerca da matéria prima do ânodo, das suas características e propriedades. Nesta secção ira se abordar acerca do processo de produção do princípio até ao fim. Para se obter um ânodo de carbono cozido passa-se por três etapas de produção, nomeadamente, (i) a mistura da matéria prima o coque, alcatrão e os ânodos reciclados que vão dar origem ao ânodo verde, de seguida o segundo passo (ii) que consiste no cozimento do ânodo em um forno que vai dar origem ao ânodo cozido e por último (iii) o ânodo cozido é unido a uma haste metálica com ferro fundido, e só depois o ânodo é enviado para o processo de redução.

Normalmente as plantas que produzem ânodos estão subdivididas em três fabricas nomeadamente:

- Fábrica de Pasta;
- Fábrica de Cozimento;
- Fábrica de Chumbamento.

2.8.1 Fábrica de Pasta

O coque de petróleo entra na fábrica da pasta, onde é seleccionado, classificado e misturado com os ânodos usados, triturados para a reciclagem. A mistura de coque entra na câmara de pré-aquecimento por via de um balde elevador, depois do qual é transferida para o misturador "*Buss Mixer*", onde é completamente misturado com alcatrão líquido para formar uma pasta homogénea à uma temperatura de 180 a 190°C (temperatura necessária para que o alcatrão cobrir efetivamente as partículas de coque e preenchendo os seus poros).

A pasta entra no segundo misturador, o refrigerador "*Eirich Cooler*", onde a temperatura da pasta é reduzida até cerca de 150°C de modo para reduzir a

quantidade de voláteis liberados pela que prejudicariam a qualidade do ânodo durante a sua compactação (gerariam micro rachas no interior do ânodo), assim como completa o processo de mistura. A pasta já pronta para ser moldada em ânodos em forma de blocos, com comprimento = 1.55metros, Largura= 0.655metros e altura = 0.62metros., e um peso entre 900 kg a 930kg. Este processo ocorre no vibro-compactador. (Kelle & O.Sulger, 2008)

A secção elevada do molde desce, exercendo grande pressão na mistura dentro do molde. Ao mesmo tempo o molde é vibrado para facilitar a distribuição equitativa das partículas de coque na mistura. No fim deste processo o molde e a base se separam, o ânodo é ejectado e conduzido através de um túnel de refrigeração onde é pulverizado com água para os eu arrefecimento antes do seu manuseio. No final desse processo obtêm-se o “ânodo cru” ou ânodo verde pronto para seguir para a fábrica de cozimento.

2.8.2 Fábrica de Cozimento

Segundo Kelle e Sulger 2008, para alcançar as propriedades necessárias para a produção do alumínio o ânodo é submetido a um tratamento térmico num forno de cozimento para tornar ânodo um condutor eléctrico e aumentar a sua resistência mecânica.

Sendo a fabrica de cozimento do ânodo o centro no estudo do trabalho, as suas características e funcionalidades serão abordadas de forma detalhada na secção 2.9..

2.8.3 Planta de Chumbamento

Os ânodos cozidos no forno de cozimento entram na Planta de Chumbamento onde ocorre a ligação da haste ao ânodo denominado “*Stem*”. Para unir a haste com o ânodo usa-se o ferro fundido que deve possuir as propriedades desejadas para garantir um bom desempenho no processo de redução. Na figura a baixo podemos observar a composição de um *stem*.

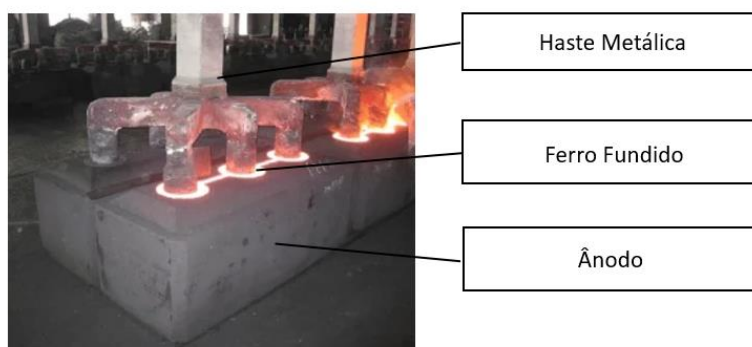


Figura 5 Bloco de ânodo com uma haste metálica "*Stem*"

Fonte: (China, 2023)

2.9 Forno de Cozimento de Ânodos

O processo de cozimento de ânodos tem como principal objectivo, conferir aos ânodos características físicas e químicas adequadas a sua utilização nas cubas electrolíticas dentre elas a condutividade eléctrica, condutividade térmica, estabilidade mecânica e química, resistência mecânica, densidade e porosidade e resistência ao choque térmico (ALBRAS, 2005) .

Segundo Kelle & Sulger hoje em dia o forno do tipo anel superior aberto é considerado o que há de mais moderno em cozimento anódico. Esse nome surge pelo facto das secções não possuírem cobertura rígida de material refractário.

Os ânodos entram no Forno de Cozimento e duram cerca de duas semanas para cozer, e na metade desse tempo eles são submetidos a altas temperaturas, em média 1100°C a 1150°C, o restante do tempo é usado para arrefecer os ânodos e para efeitos de manutenção.

2.9.1 Composição do forno de Cozimento

Segundo Carneiro (2011), o forno de cozimento dos ânodos de carbono é composto pelas seguintes rampas:

1. **Rampa de Exaustão** - considerada cabeça do *fire* é a primeira rampa responsável pela sucção dos fumos produzidos durante a combustão criando pressões negativas, a rampa possui ductos que são colocados em cada olho mágico de cada parede de fumo. A rampa de exaustão é colocada na primeira secção do *fire*.
2. **Rampa de Medição** - é a segunda rampa depois da rampa de exaustão, é responsável por medir as temperaturas assim como a pressão negativas em cada uma das paredes do forno na região de pré-aquecimento onde são queimados os voláteis do alcatrão. A rampa de medição é colocada na segunda secção do *fire*.
3. **Rampa de Aquecimento** - cada *fire* é composto por três rampas de aquecimento e todas as rampas encontram-se na zona de aquecimento e são responsáveis por injectar o gás natural que participa no processo de combustão, e controlar o processo de cozimento dos ânodos garantindo que se atinja uma temperatura acima dos 1085 °C. As rampas de aquecimento ocupam a quarta, quinta e sexta secções.
4. **Rampa do Ponto Zero** - localiza-se na oitava secção depois das rampas de aquecimento e esta na zona de arrefecimento, é responsável por medir a pressão no ponto em que temos a mudança de pressão positiva (zona de arrefecimento dos ânodos) para pressão negativa (zona de aquecimento dos ânodos).
5. **Rampa de sopro** – encontra-se na decima secção, responsável por injectar o ar que será usado no processo de combustão, possui ventoinhas que capturam o ar do meio ambiente conduzindo-o para o interior das paredes através de um ducto.
6. **Rampa de Arrefecimento**- é a última rampa do *fire*, encontra-se na decima primeira e decima segunda secção, responsável por arrefecer os ânodos antes de serem retirados do poço, garantindo que estejam abaixo dos 350 °C. A rampa é composta por ventoinhas que injectam ar dentro das paredes de fumo através de ductos.

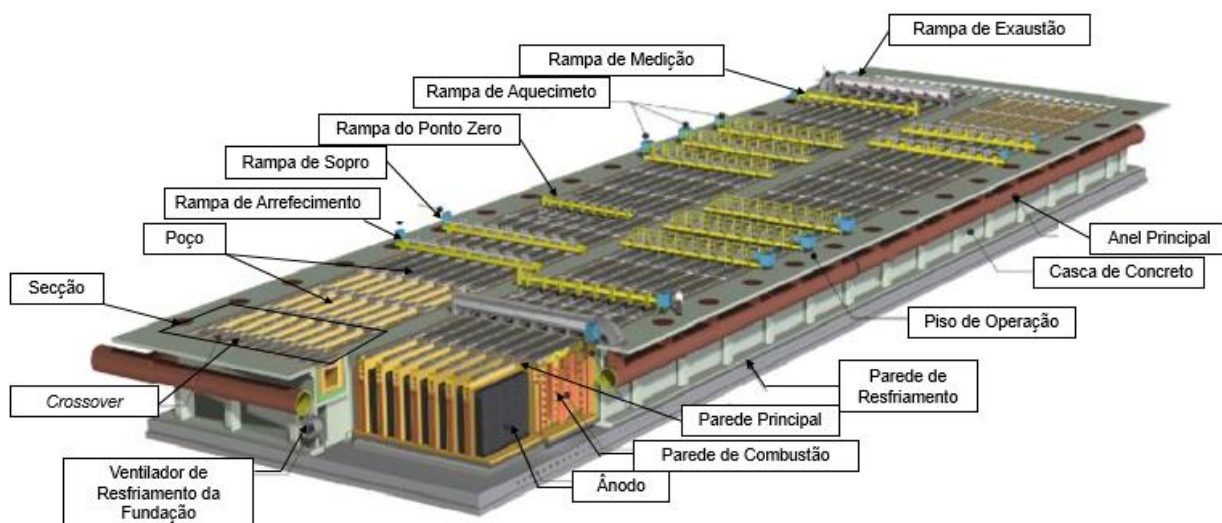


Figura 6 Composição de um forno

Fonte: Santos (2014)

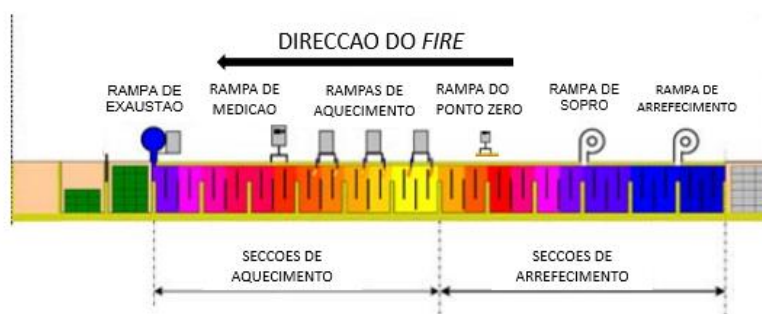


Figura 7 Composição de um fire

Fonte: Tiba (2009)

2.9.2 Ciclo de Cozimento

Keller & Sulger 2008, definem Ciclo de Cozimento como o período de tempo, normalmente de 24 a 28 horas, como o tempo necessário para mover um *fire* uma secção afrente. O ciclo de produção é determinado principalmente pela demanda dos ânodos cozidos nas cubas e pelas condições do forno. Para se calcular o número de ânodos produzidos por ciclo usa-se a seguinte formula:

$$\text{Anodos Produzidos} = \frac{24\text{horas} \times \text{Numero de Fires} \times \text{Numero de anodos por seccao}}{\text{Ciclo}}$$

Para um caso em que temos 6 *fire's*, como nos fornos da Moçambique Alumínio, teremos resultados como indicam a tabela abaixo

Tabela 5 Número de ânodos produzidos por ciclo/ dia

Ciclo	24	25	26	27	28	29	30	31	32
Número de Ânodos Produzidos/dia	1008	968	930	896	864	834	806	780	756

Para calcular a quantidade de ânodos que se produzem por ano para cada ciclo usa-se a seguinte formula:

$$P = \frac{8760 \times Q \times n}{t}$$

Onde:

P – Produção por ano

Q – Quantidade de ânodos em cada secção

n – Número de ciclos

t – Ciclo em horas

8760 – Número de horas por ano

Durante o processo de cozimento dos ânodos de carbono ocorre um processo de transferência de calor, desde a zona de pré-aquecimento até a zona de arrefecimento. É relevante abordar acerca do fenómeno de transferência de calor e das leis que regem o processo visto que tem uma influência muito grande na performance do *fire*. Na secção a seguir abordar-se-á acerca da transferência de calor nos fornos de cozimento de ânodos de carbono.

Entre dois poços com ânodos, existem câmaras fechadas por onde passam gases aquecidos para permitir aquecimento indireto do ânodo pela parede refratária e pelo coque fluido. Os ânodos normalmente passam entre 14 e 16 dias dentro desses poços, onde obedecem a uma curva de temperatura (ciclo de cozimento) garantida pela injeção de combustíveis nas câmaras gerando calor.

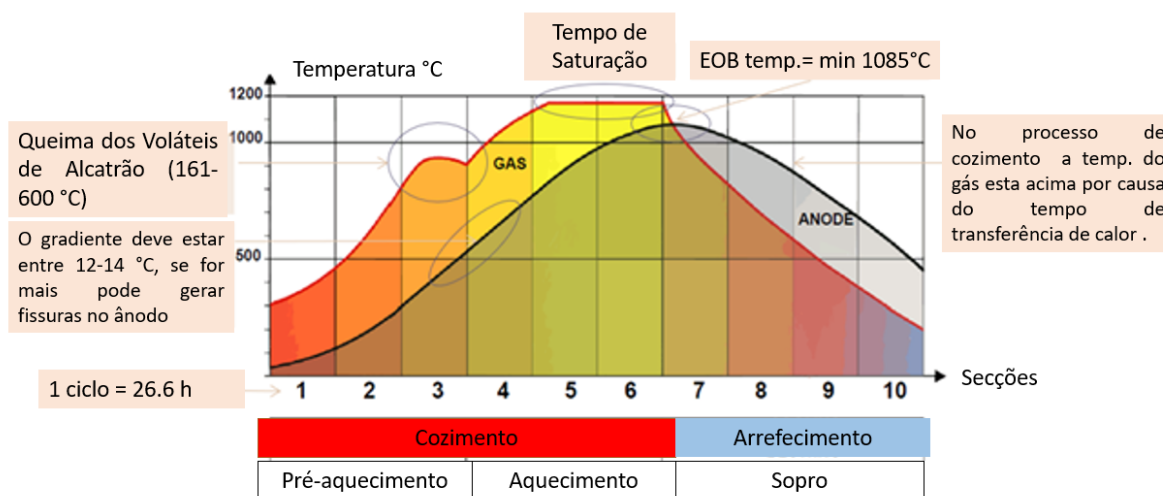


Figura 8 Curva de cozimento do ânodo

Fonte: Moçambique Alumínio

A primeira etapa da queima consiste no pré-aquecimento do ânodo cujo objetivo principal é retirar gases voláteis presentes no alcatrão. Esta região é controlada basicamente pelo calor liberado da queima do ânodo, na zona de cozimento do forno, e da queima resultante dos gases voláteis.

A segunda etapa consiste do tratamento térmico do ânodo, onde este adquire as propriedades desejadas para sua utilização: elevada densidade, baixa resistividade elétrica, elevada condutividade térmica, baixa reatividade ao ar e ao CO₂, além de baixa permeabilidade ao ar e elevada resistência à flexão. (ANDERSEN e ZHANGA, 2011).

2.10 Transferência de calor

Durante o cozimento ocorre uma troca de calor entre as paredes de fumo e os ânodos de carbono, esse fenómeno é chamado de transferência de calor. Segundo Incropera & DeWitt 2014, transferência de calor pode-se definir como o fluxo de energia que se estabelece em um sistema devido a uma distribuição desigual da temperatura. Para Livi (2012), a transferência de calor é vista como uma forma da lei natural da tendência ao equilíbrio. A energia térmica pode passar de um corpo para outro

fundamentalmente de três maneiras diferentes: condução, convecção e radiação conforme pode ser visualizado na figura abaixo.

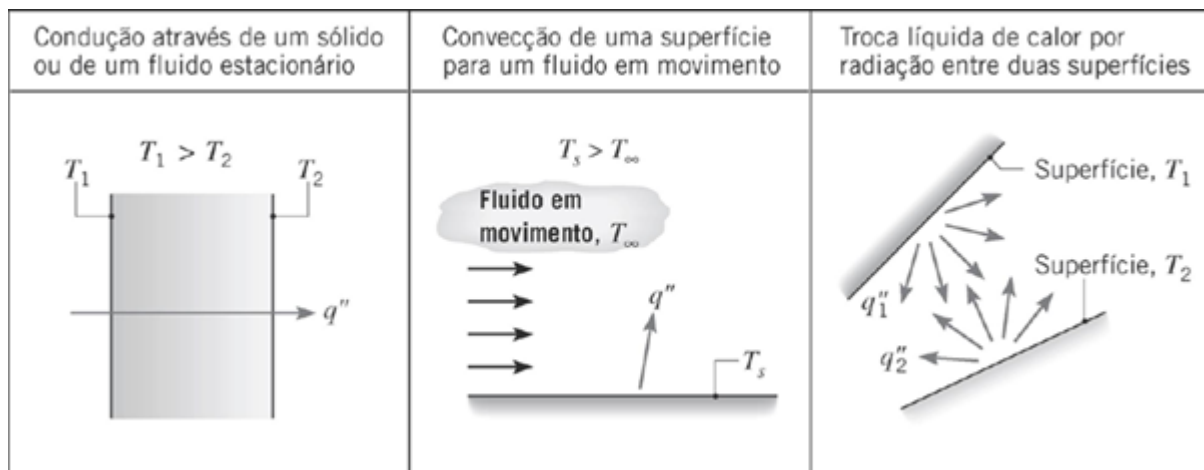


Figura 9 Modos de Transferência de calor

Fonte: (Mendes, et al., 2015)

Nos fornos de cozimento dos ânodos de carbono ocorrem os três tipos de mecanismos desde o processo de convecção, condução e radiação. Para uma melhor percepção destes mecanismos na secção a seguir abordar-se-á de forma detalhada cada tipo de transferência de calor e onde se aplicam no processo de cozimento dos ânodos de carbono.

2.10.1 Condução

Condução é um tipo de transferência de energia entre átomos e/ou moléculas vizinhas em uma substância devido a um gradiente de temperatura. Diferentemente da convecção, na condução não há movimento da matéria na escala macroscópica. A condução está presente no nosso dia a dia em muitos exemplos como em um dia de inverno onde uma grande quantidade de energia é perdida do quarto aquecido para o ar externo. Esta perda é ocasionada principalmente pela transferência de calor por condução da parede que separa o quarto do ar externo (Incropera & Dewitt, 1996)

Segundo Çengel (2012), a transferência de calor por condução é regida pela lei de condução de calor de Fourier, que é expressa a partir da seguinte equação:

$$\dot{Q} = -k \frac{dT}{dx}$$

Onde:

$\dot{Q}$ - Taxa de transferência de calor – W

k - Condutividade térmica do material, medida pela capacidade do material conduzir calor – (W/m K):

$\frac{dT}{dx}$ - Gradiente da temperatura.

2.10.2 Convecção

Para Çengel (2012), a convecção pode ser definida como o processo pelo qual a energia é transferida da região mais quente para a região mais fria de um fluido através da ação combinada de: condução de calor, armazenamento de energia e movimento de mistura. O mecanismo da convecção pode ser facilmente entendido considerando, por exemplo, um circuito sendo refrigerado (ar ventilado) como mostra a figura a seguir.

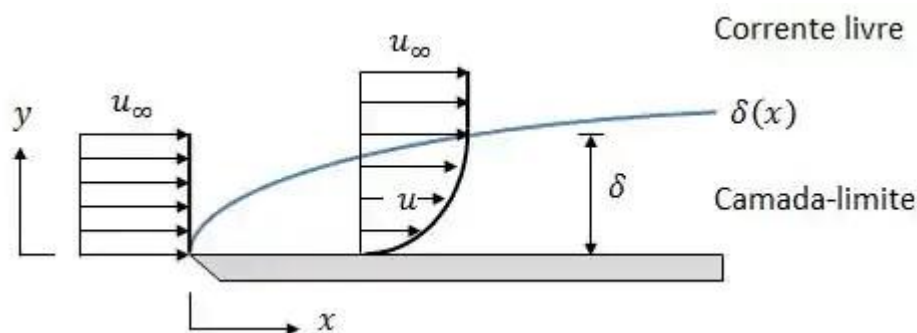


Figura 10 Transferência de Calor por Convecção

Fonte: (Ai, n.d.)

O mesmo autor afirma que a convecção pode ser natural ou forçada. A convecção é forçada se o fluido é forçado a fluir sobre a superfície por meios externos, como

ventilador, bomba ou vento. Em contrapartida, a convecção é chamada convecção natural (ou livre) se o movimento do fluido é causado por forças de flutuação induzidas por diferenças de densidade, decorrentes da variação da temperatura no fluido.

Neste modo de transferência de calor, quanto mais rápido o movimento do fluido, maior será a transferência de calor por convecção. Na ausência de qualquer movimento de uma massa de fluido, a transferência de calor entre uma superfície sólida e o fluido é por pura condução (Çengel, 2012)

A equação que determina o fluxo de calor por convecção, também conhecida como lei de Newton de resfriamento, é mostrada a seguir:

$$\dot{Q}_{conv} = hA_s(T_s - T_{\infty})$$

Onde:

$\dot{Q}$ - Taxa de transferência de calor – W

h -Coeficiente de transferência de calor por convecção – $(W/m^2 K)$

T_s -Temperatura da superfície- K

T_{∞} -(K): Temperatura do seio do fluido - K

A_s - Área de escoamento do fluido - (m^2)

A experiência mostra que a transferência de calor por convecção depende fortemente dos parâmetros indicados abaixo:

- Viscosidade dinâmica do fluido;
- Condutividade térmica do fluido;
- Densidade do fluido e o seu calor específico;
- Velocidade do fluido;
- Geometria e da rugosidade da superfície sólida;
- Tipo de escoamento do fluido (modo laminar ou turbulento).

2.10.3 Radiação

A radiação pode ser definida como a energia emitida pela matéria sob a forma de ondas eletromagnéticas (ou fótons) como resultado das mudanças nas configurações

eletrônicas dos átomos ou moléculas. Ao contrário da condução e da convecção, a transferência de calor por radiação não exige a presença de um meio interveniente. De facto, a transferência de calor por radiação é mais rápida (na velocidade da luz) e ela não sofre atenuação no vácuo (Çengel, 2012)

As ondas eletromagnéticas são comuns a muitos outros fenômenos: raio-X, ondas de rádio e TV, micro-ondas e outros tipos de radiações. As suas características são primeiramente que todos os corpos em temperatura acima do zero absoluto emitem continuamente radiação térmica. Outras características importantes são que as intensidades das emissões dependem somente da temperatura e da natureza da superfície emitente e a radiação térmica viaja na velocidade da luz.

A equação que rege o processo de transferência de calor por radiação pode é chamada de Lei de Stefan-Boltzmann e pode ser escrita da seguinte forma:

$$E_b = \sigma T^4$$

Onde:

E_b - A energia emitida por uma superfície

T – Temperatura absoluta da superfície em K.

σ - Constante de Stefan- Boltzmann ($5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$).

2.11 Transferência de calor nos fornos de cozimento de ânodos

Como referiu-se na secção 2.10, nos fornos de cozimento de ânodos ocorre o fenómeno de transferência de calor entre as paredes de fumo, o coque e os ânodos de carbono.

A transferência de calor está presente no processo de cozimento de ânodos desde o início até ao fim, isto é, desde a zona de pré-aquecimento, a zona de aquecimento e a zona de arrefecimento. Tendo em conta que o trabalho em causa tem como foco a o estudo da eficiência do arrefecimento, a secção a seguir tem como foco explicar todo o processo de transferência de calor que ocorre durante o arrefecimento dos ânodos de carbono.

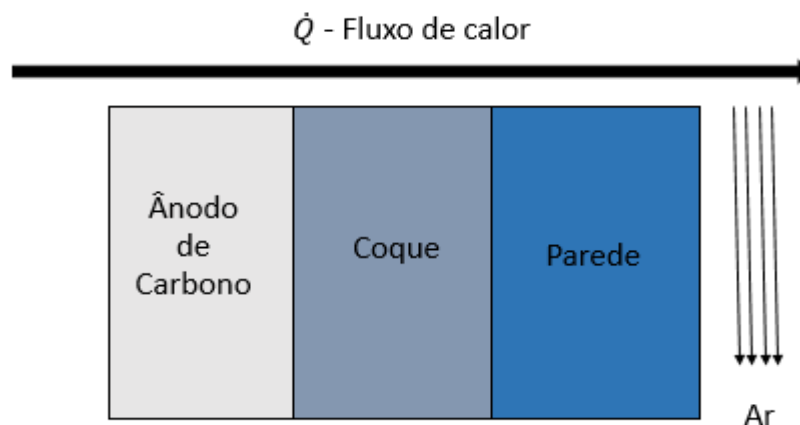


Figura 11 Sistema de transferência de calor do ânodo até a parede

Fonte: Autora

Para melhor percepção abaixo encontra-se o corte transversal de um forno de cozimento de ânodos. A câmara de combustão é onde circulam os gases de combustão durante o processo de cozimento e o ar durante o processo de arrefecimento.

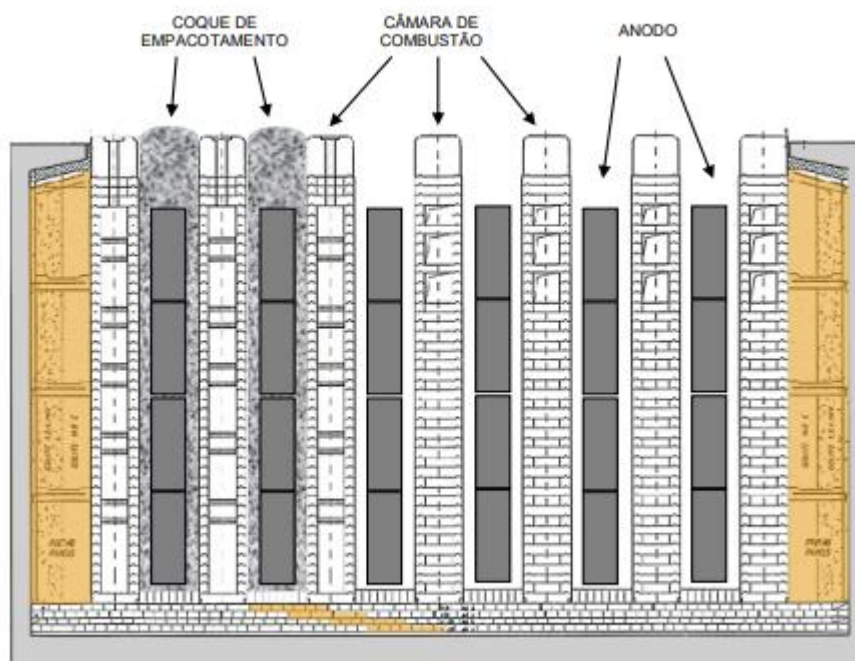


Figura 12 Corte transversal do Forno de Cozimento de Ânodos

Fonte: Carneiro (2011)

Segundo Lienhard (2002), citado por Tiba (2012), afirma que o fluxo de energia térmica do ânodo até a parede ocorre por meio de dois mecanismos: por condução pelas partículas de coque de recobrimento e por radiação (coque e parede) devido a elevada temperatura de queima nas secções do fire que antecedem o resfriamento dos blocos.

Tiba (2012), depois de realizar os seus estudos também afirma que pode-se analisar de forma simplificada o fluxo de calor por meio de um circuito eléctrico onde temos duas resistências térmicas principais antes de se alcançar o ânodo: (R_1) por condução e (R_2) radiação entre as partículas de coque de recobrimento. O mesmo autor também afirma que a radiação e a convecção forçada são os principais mecanismos responsáveis pelo processo de transferência de calor entre o fluído (ar) e as paredes. Assim pode-se dizer que o calor vai no sentido do meio mais quente para o mais frio, saindo do ânodo para o coque por meio da condução e radiação, do coque para a parede a partir da condução e radiação e da parede para o fluído (ar) por meio da radiação e convecção forçada.

2.12 Estudos feitos sobre o arrefecimento do ânodo.

Para suportar o trabalho em causa recorreu-se a estudos feitos anteriormente em algumas companhias produtoras de Alumínio Primário e ânodos de carbono, que tinham como objectivo optimizar o processo de produção.

Suarez (2012), editou um estudo feito na companhia EMAL (*Emirates Aluminium Company*) que tinha como objectivo estudar a Qualidade Do Ânodo E Desempenho Do Forno De Cozimento Dos Ânodos De Carbono Na EMAL. O objectivo deste estudo foi de aumentar a produtividade do forno de cozimento de ânodos, e um dos obstáculos que foi encontrado é o controle do processo de arrefecimento.

Depois de realizados os estudos Suarez (2012), constatou que para elevar a produção de ânodos de carbono nos fornos de cozimento, o processo de arrefecimento é vital porque evita queimas no ânodo devido ao contacto com ar, e também ajuda no manuseio do ânodo de forma segura.

O mesmo autor também constatou que a ineficiência do arrefecimento dos ânodos de carbono pode resultar da:

- Quantidade insuficiente de ar para o resfriamento;
- Distribuição de tamanho de grão muito grosseira do coque;
- Pressão excessiva no ar para o resfriamento.

A pressão excessiva do ar para o resfriamento e o material de vedação muito grosso inflamam o material de vedação causando:

- Aumento do consumo do material de vedação,
- Ineficiência no arrefecimento dos ânodos de carbono e o reaquecimento dos ânodos depois do processo de arrefecimento
- Superfícies dos ânodos danificados em consequência do contacto com o ar.

Assim Suarez (2012) concluiu que a eficiência do resfriamento é otimizada pela maximização da quantidade e da pressão do ar de resfriamento sem inflamar o coque ao redor do ânodo, e que o coque deveria apresentar uma distribuição granulométrica ideal.

A Rio Tinto Alcan e os seus parceiros operam cerca de 28 fornos de cozimento de ânodos de carbono de diversas tecnologias e sistemas de queima em todo mundo, produzindo mais de 15 formatos de ânodos diferentes. O aumento contínuo da amperagem no processo de produção de alumínio primário requer um aumento da massa do ânodo e ou o aumento da produção do ânodo. Para responder a esse problema realizou-se um estudo que teve como nome “Enfrentado os desafios de aumentar a produtividade do forno de cozimento anódico”.

Lindsay (2011), constatou no estudo feito, que pode-se aumentar a produtividade nos fornos de cozimento dos ânodos através da otimização do ciclo de cozimento. Para tal realizaram-se estudos para determinar a capacidade do forno de resfriar adequadamente os ânodos antes da descarga nos poços.

ALMA WORKs solicitou um estudo sobre a zona de arrefecimento do ânodo de carbono para permitir a aceleração do ciclo de cozedura das 27 horas para 26 horas, tal mudança de ciclo levou para um aumento da temperatura final de resfriamento

entre 20 °C e 40 °C. Inicialmente, o modelo de resfriamento foi validado comparando os resultados da simulação e das medições feitas na configuração inicial de resfriamento, nesse caso no ciclo de 27 horas.

Lindsay (2011), no seu estudo apontou que os parâmetros como a posição da rampa de resfriamento, as condições dos olhos mágicos (abertos ou fechados), as dimensões dos olhos mágicos, a potência da rampa de sopro e a espessura do tijolo da parede de combustão influenciam no processo de arrefecimento dos ânodos de carbono. Para testar a sua tese, fez uma simulação aumentando o fluxo do ar da rampa de arrefecimento em 30%. Este aumento do fluxo do ar influenciou na redução na temperatura final de arrefecimento de 420 °C para 390 °C. Isto é, ao reduzir o ciclo de 27 horas (390°C) para 26 horas, a temperatura calculada para este ciclo foi de 420 °C, sendo que para reduzi-la a 390 °C (temperatura igual a do ciclo de 27 horas) o autor aumentou o fluxo de ar.

Um outro estudo feito em *Tomago Aluminium Company*, editado também por Lindsay (2011), teve como foco o estudo da influência da temperatura ambiente (verão versus inverno) na eficiência do resfriamento. A modelagem foi usada para desenvolver configurações de resfriamento ideais, este processo consistiu no manuseio das posições de rampas, olho mágico e quantidade de rampas.

A modelagem indicou que o aumento da temperatura do ânodo teria um aumento correspondente na temperatura do coque, e que as temperaturas do coque para o guindaste do forno³ de cozimento seriam excedidas nas condições de verão. Portanto com a capacidade actual de resfriamento das rampas para um ciclo de 21 horas não é viável para as condições de verão. Os resultados sugeriram que só seria possível operar num ciclo de 21 horas se o sistema de sopro for actualizado.

³ Guindaste do Forno (*Furnace Tending Assembly*) - Máquina projectada para efectuar trabalhos do forno como: manuseio dos ânodos, sucção e descarga do coque nos poços.

CAPÍTULO 3. CONTEXTUALIZAÇÃO DA INVESTIGAÇÃO

3.1 Apresentação da Moçambique Alumínio

Moçambique Alumínio é uma empresa de fundição de alumínio sediada em Moçambique, a 21 quilômetros a oeste da capital, Maputo, Distrito de Boane no Parque Industrial de Beluluane. A empresa foi estabelecida em julho de 1998, por um consórcio de empresas investidoras, liderado pela BHP Biliton, incluindo empréstimos para projectos, representa cerca de 2 milhões de dólares, um dos maiores projectos já empreendidos em Moçambique. Actualmente os acionistas da Moçambique Alumínio são South32 (63.7%), a Mitsubishi (8.4%), a IDC- *Industrial Development Corporation* (24%) e o Governo de Moçambique (3.9%).⁴

Visão da Moçambique Alumínio: Ser uma fundidora líder na produção de alumínio, com baixos custos operacionais, e um empregador de preferência.

Valores: Cuidado, Confiança, União e Excelência.



Figura 13 Planta da Moçambique Alumínio

Fonte: Creamer Media's

A Moçambique Alumínio possui vários departamentos que visam funcionar de forma a manter o bem-estar do trabalhador, e alcançar a meta de produção diária do alumínio. Tais departamentos são: Recursos Humanos, Melhoria de negócios, Assuntos Corporativos, Finanças, Saúde Segurança e Ambiente, Tratamento e

⁴ Informação retirada da revista - MOZAL Newsletter 2021-2022

Logística, Manutenção, Carbono, Redução, Casa de Fundição. A Moçambique Alumínio tem uma meta diária de produzir 1550 toneladas por dia de forma segura. A matéria-prima principal na Moçambique Alumínio é o Coque, Alcatrão, Alumina e Energia. O processo inicia com a chegada da matéria-prima no porto através de navios no porto nomeadamente coque, alcatrão e alumina, os navios contendo esse material atracam no Porto da Matola e são depositados em silos e nos tanques usando as máquinas de elevação e transporte adequados para tal.

Em seguida a matéria prima é levada por camiões devidamente equipados para garantir que a matéria-prima chegue nas instalações da Moçambique Alumínio em condições, o coque e a alumina são transportados por camiões fechados para evitar que caiam devido a acção do vento durante o trajecto, o alcatrão é transportado em um camião fechado e equipado com um sistema de aquecimento para manter o mesmo com uma temperatura no intervalo de 170°C a 190°C de modo a manter lhe no estado líquido.

Na Moçambique Alumínio existem três departamentos que participam directamente na produção do alumínio, tais departamentos são:

- Carbono;
- Redução;
- Casa de Fundição.

3.2 Carbono

Um dos departamentos da Moçambique Alumínio responsáveis pela produção de ânodos de carbono usados na Redução, o Carbono está dividido em três plantas, nomeadamente:

- Planta de Pasta do Ânodo (PPA);
- Forno de Cozimento do Ânodo (FCA);
- Planta de Chumbamento (PC).

3.2.1 Planta de Pasta do Ânodo

No Carbono existem duas plantas de produção da Pasta do Ânodo, Planta de Pasta 1 e Planta de Pasta 2, com as mesmas características e máquinas especiais desenhadas para a produção de ânodos verdes. Uma Planta de Pasta tem a capacidade de produzir 35 toneladas de pasta por hora o que totalizaria cerca de 800 ânodos verdes por dia (cada um deles pesando de 1040kg a 1050kg). A matéria-prima usada para a produção do ânodo verde é o coque, o alcatrão e o ânodo reciclado provenientes do processo de redução. Na Moçambique Alumínio um bloco de ânodo tem 85% de material seco e 15% de material líquido. Dividindo teremos:

- 14% de Alcatrão;
- 24% de Ânodo Reciclado;
- 62% de Coque.

A junção do material acima citado forma um bloco de ânodo de carbono verde com um peso de 1040 a 1050kg. No processo de produção do ânodo verde o objetivo é obter um ânodo de boa qualidade isso significa ter um ânodo com boa densidade e uma boa estrutura mecânica (sem rachaduras).

3.2.2 Forno de Cozimento do Ânodo

Na Moçambique Alumínio existem duas plantas de cozimento de ânodo idênticas equipadas com diversas máquinas que funcionam de forma sincronizada para cozer os ânodos, nomeadamente Forno de Cozimento do Ânodo 1 e 2.



Figura 14 Forno de Cozimento do Ânodo- Moçambique Alumínio

Fonte: Google Mapas

Na sessão 3.3 abordar-se-á de forma detalhada como funciona o forno de cozimento da Moçambique Alumínio.

3.2.3 Planta de Chumbamento

Depois de cozer os ânodos, eles são levados a planta de Chumbamento onde se une o bloco e a haste usando Ferro Fundido. O ferro fundido deve possuir as propriedades desejadas para garantir um bom desempenho no processo de redução. Na figura a baixo podemos observar a composição de um *stem*.

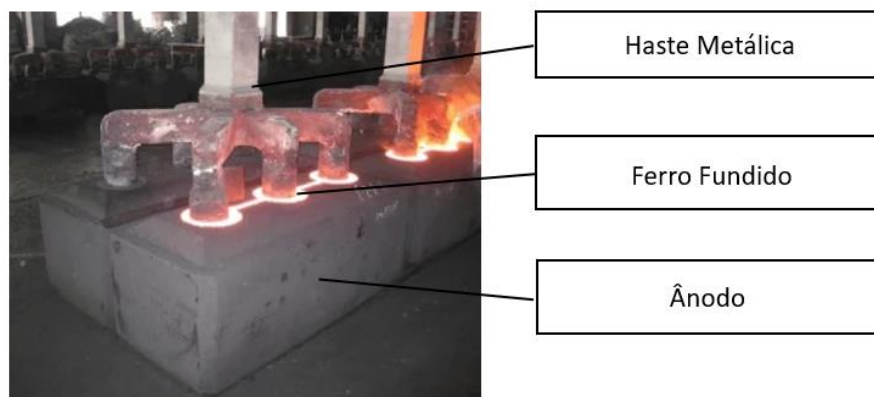


Figura 15 Bloco de ânodo com uma haste metálica

(China, 2023)

3.3 Forno de Cozimento Do Ânodo da Moçambique Alumínio

Como foi dito na secção 3.2.2 na Moçambique Alumínio existem dois fornos de cozimento de ânodos de carbono, nomeadamente Forno de Cozimento de Ânodos 1 e Forno de Cozimento de Ânodos 2 e ambos possuem a mesma estrutura no que toca aos equipamentos usados no processo de produção.

3.3.1 Composição do forno

O forno é composto por 52 secções, cada secção tem 8 poços e 9 paredes de fumo, tais secções são separadas por uma parede principal que tem canais que ligam as paredes de fumo de uma secção com a outra. Cada forno possui três *fire's*, assim totalizando, tem-se 6 *fire's*. No forno de cozimento, a carga (ânodo verde) é colocada dentro de poços profundos, abertos na parte superior e envoltos por tijolos refratários. Em cada poço são colocadas três filas de 7 ânodos verdes, assim, em cada secção tem-se uma produção total de 168 ânodos de carbono. De seguida, os ânodos são cobertos com coque granulado proveniente da Planta de Pasta do Ânodo.

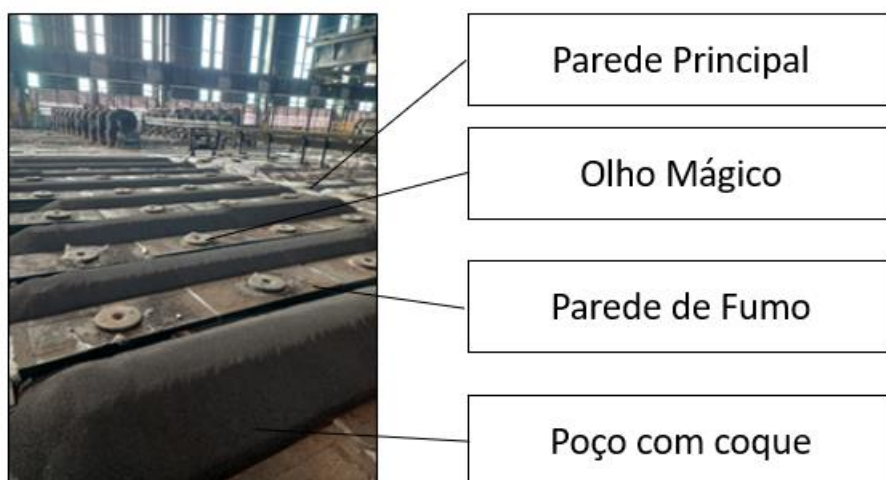


Figura 16 Composição do forno.

Fonte: Moçambique Alumínio - Autora

CAPÍTULO 4. METODOLOGIA DE ESTUDO

O presente capítulo retrata os materiais e métodos usados para a realização deste estudo. Tendo em conta o objectivo de estudo, a metodologia usada para o efeito baseou-se fundamentalmente no método experimental. Segundo Alves (2017), o planeamento experimental, também denominado delineamento experimental, representa um conjunto de ensaios estabelecidos com critérios científicos e estatísticos e tem como objetivo determinar a influência de diversas variáveis nos resultados de um dado sistema ou processo.

No planeamento de experimentos verifica-se quais são os factores mais importantes que devem ser controlados e o que acontece com a característica em estudo em cada nível de valor estudado, possibilitando assim a optimização da característica em questão. Assim, as secções seguintes apresentam a metodologia usada para a recolha de dados, processamento e análise de dados, o procedimento da escolha dos modelos de estimação das variáveis de interesse (temperatura e tempo) e o procedimento de estimação para os ciclos de 24 e 25 horas.

4.1 Materiais e métodos

Para a recolha de dados no forno de cozimento de ânodos foram usados os seguintes instrumentos:

- Cabo Termopar;
- Colector de dados;
- Termopar de Combustão.



Figura 17 Cabo termopar tipo e um colector de dados.

Fonte: Moçambique Alumínio- Autora

- a) A principal função de um colector de dados é capturar informações precisas e confiáveis em tempo real, sem a necessidade de processos manuais, de seguida enviar para dados para o sistema.
- b) O cabo termopar serviu de conector entre o colector de dados e o termopar de combustão;
- c) O Termopar de Combustão é o instrumento que mede a temperatura e pressão. Para o presente trabalho, este instrumento foi usado para a medição da temperatura.

4.2 Amostragem

Chama-se teste o processo de retirada de amostras em cada *fire*. Para o presente trabalho foram retiradas doze amostras, quatro em cada teste, dois destes testes foram realizados no forno de cozimento 1 num ciclo de 26 horas e um teste no forno de cozimento 2 para um ciclo de 30 horas.

Os testes no forno de cozimento 1 foram realizados em *fire's* diferentes e secções diferentes com o intuito de analisar se existe alguma diferença no comportamento do processo de arrefecimento. Também foi feito um teste no forno dois para analisar o comportamento do processo de arrefecimento no forno 2 e com um ciclo diferente do ciclo do forno 1.

O conjunto de instrumentos usados foram colocados na primeira secção da zona de arrefecimento depois da zona de aquecimento após o movimento do *fire*.

Para retirar os dados referentes a temperatura na zona de arrefecimento colocou-se o termopar de combustão na interface do coque e do ânodo. Os termopares foram colocados em quatro poços da secção nomeadamente, 1, 3, 5 e 7. De seguida conectaram-se quatro cabos termopares, um em cada termopar de combustão, por fim, conectou-se no registrador de dados conforme mostra a figura 18. O registrador de dados foi programado para fazer leitura das temperaturas a cada minuto ate ao fim do processo.

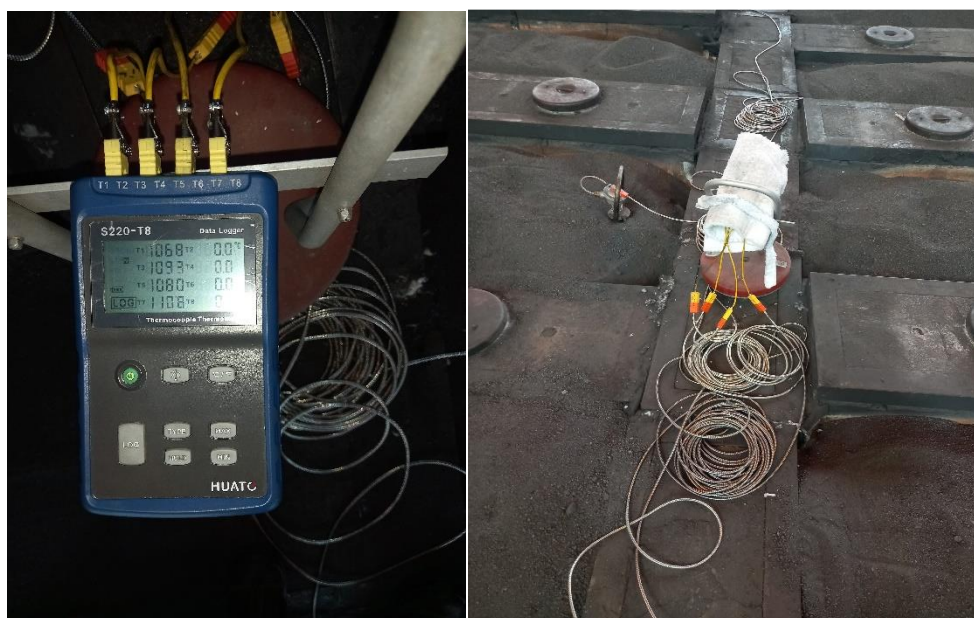


Figura 18 Coletor de dados e os termopares conectados

Fonte: Moçambique Alumínios- Autora

Para o ciclo de 26 horas a recolha de dados levou quase 7 dias tendo em conta que a zona de arrefecimento ocupa seis secções, e para o ciclo de 30 horas levou-se cerca de 8 dias. Durante esse processo monitorou-se os *fire's* para registrar possíveis falhas dos equipamentos.

No fim do processo de arrefecimento os instrumentos foram retirados do forno, de seguida retirou-se o coque a volta para posterior retirada dos ânodos. Deve-se garantir

que os ânodos estejam abaixo dos 300°C para evitar desgaste do ânodo de Carbono quando em contacto com o oxigénio do meio ambiente. O processo de retirada do coque e dos ânodos leva de 6 a 10 horas dependendo da eficiência do circuito de sucção do coque de empacotamento e da carga de trabalho num determinado turno.

Para ter uma ideia da temperatura dos ânodos depois de serem arrefecidos e retirados do poço um outro instrumento foi usado para medir a temperatura dos mesmos, nesse caso escolheu-se um termómetro digital infravermelho como mostra a figura 16 abaixo. Foi usado este termómetro por ser recomendado para leitura de temperatura a longa distância, uma vez que os ânodos apresentam altas temperaturas ao sair dos poços, o que pode impactar no código de Higiene e Segurança no Trabalho.



Figura 19 Termómetro digital infravermelho

Fonte: (LIVRE, 2023)

4.3 Processamento e Análise dos Dados

Os dados das temperaturas que se encontravam no registrador de dados foram retirados para o computador, tendo em conta que seria impossível visualizar no ecrã do instrumento. Para tal, foi necessário instalar um software para leitura de dados, nesse caso, o Tinytag Explorer & Connect, através do programa foi possível visualizar os dados e obtê-los em uma folha de Excel. Todos os dados de temperatura recolhidos com recurso aos instrumentos descritos na secção 4.1, foram processados e analisados com

recurso ao Microsoft Excel. Este pacote ajudou na geração de tabelas e gráficos apresentados no capítulo 5 deste trabalho.

Tendo em conta que o registrador de dados fazia leitura a cada minuto, no total tinham mais de 9000 dados para cada amostra, com registo a cada minuto. Para facilitar a leitura e análise dos dados, estes foram reduzidos para períodos de meia hora, o que fez com que cada amostra tivesse cerca de 150 observações (registos).

De seguida, foram gerados os gráficos para cada teste, constantes na secção 5 do presente trabalho. Depois da geração de gráficos, fez-se uma análise comparativa das temperaturas finais das quatro amostras de cada teste, com o objectivo de averiguar se existem diferenças nos resultados para os ciclos de 26 horas e o ciclo de 30 horas.

Tendo em conta que um dos objectivos específicos do trabalho é estimar as temperaturas finais de arrefecimento dos ânodos de carbono para um ciclo de 24 e 25 horas, foram usados modelos (equações) que relacionam a temperatura e o tempo de arrefecimento.

A partir dos gráficos de cada amostra, determinou-se os respectivos modelos, nomeadamente: linear, exponencial, logarítmico e polinomial, o que implica que para cada amostra foram determinados quatro modelos. A escolha da equação (modelo) que melhor estimou a temperatura, para os ciclos de 24 e 25 horas, foi baseada no coeficiente de determinação.

4.3.1 Procedimento para a Escolha do Modelo

Para a escolha do modelo apropriado para as previsões, Loureiro (2008) propõe os métodos baseados nos coeficientes de determinação ou nas variâncias de erros de previsão. Para o trabalho em causa, o melhor modelo foi escolhido com base no coeficiente de determinação (R^2). Segundo Kennedy (2008), supõe-se que o coeficiente de determinação representa a proporção da variação da variável dependente que é explicada pela variação da variável independente, isto é, mede quanto o modelo é robusto e varia de 0 a 1. Martins (2018), afirma que quando o valor do R^2 tender a 1 considera-

se que o modelo está mais próximo do ideal (mais robusto) e quando R^2 tender a zero o modelo está distante do ideal (menos robusto). No estudo em causa a variável dependente é a temperatura e a independente é o tempo.

Nos anexos encontram-se os modelos para cada amostra e os respectivos coeficientes de determinação, a partir do qual foi possível escolher o modelo com maior robustez.

4.3.2 Etapas para o cálculo da temperatura para os ciclos de 24 e 25 horas

Usando os modelos com maior robustez, calculou-se as temperaturas para cada amostra, de seguida, com os resultados obtidos, foram feitas as médias em cada teste para os ciclos de 24 e 25 horas. Por fim fez-se a comparação entre os resultados e as temperaturas padronizadas. Referir que o modelo polinomial foi o que apresentou maior robustez em todos os testes. Abaixo o modelo matemático:

$$T(t) = \alpha_0 t^2 - \alpha_1 t + \gamma$$

Onde:

T - Temperatura do ânodo;

t - Tempo que representa o ciclo;

$\alpha_0; \alpha_1$ -Coeficientes;

γ - Intercepto

CAPÍTULO 5. APRESENTAÇÃO, ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados do presente estudo. Tendo em conta que o objectivo deste estudo é analisar se o sistema de arrefecimento é capaz de arrefecer os ânodos de forma eficiente para os ciclos de 24 e 25 horas os resultados são apresentados em três secções, nomeadamente: (i) apresentação gráfica dos testes 1, 2 e 3 que descrevem os resultados obtidos com a medição do ciclo de 26 horas da do forno 1, resultados obtidos no ciclo de 30 horas no forno 2; (ii) Determinação dos modelos de estimação das temperaturas e (iii) estimação das temperaturas para os ciclos de 24 e 25 horas a partir dos modelos obtidos nos testes 1, 2 e 3.

5.1 Resultados dos Testes 1, 2 e 3

5.1.1 Apresentação gráfica dos testes 1, 2 e 3

A partir dos gráficos 1, 2 e 3 abaixo, constata-se que os resultados obtidos durante a recolha de amostras no forno de cozimento 1, para os testes 1 e 2, e do forno de cozimento 2 para o teste 3, apresentam curvas de arrefecimento do ânodo de carbono que possuem os mesmos padrões apesar de serem de *fire's* diferentes. As pequenas diferenças observadas na inclinação das curvas, podem estar relacionadas com possíveis fugas de ar nas paredes de fumo durante a ventilação forçada e também da provável falta de uniformidade na velocidade do ar, sabendo-se que a velocidade do ar é um dos parâmetros que influencia na transferência de calor. Durante todo o processo não ocorreu nenhuma avaria nas rampas.

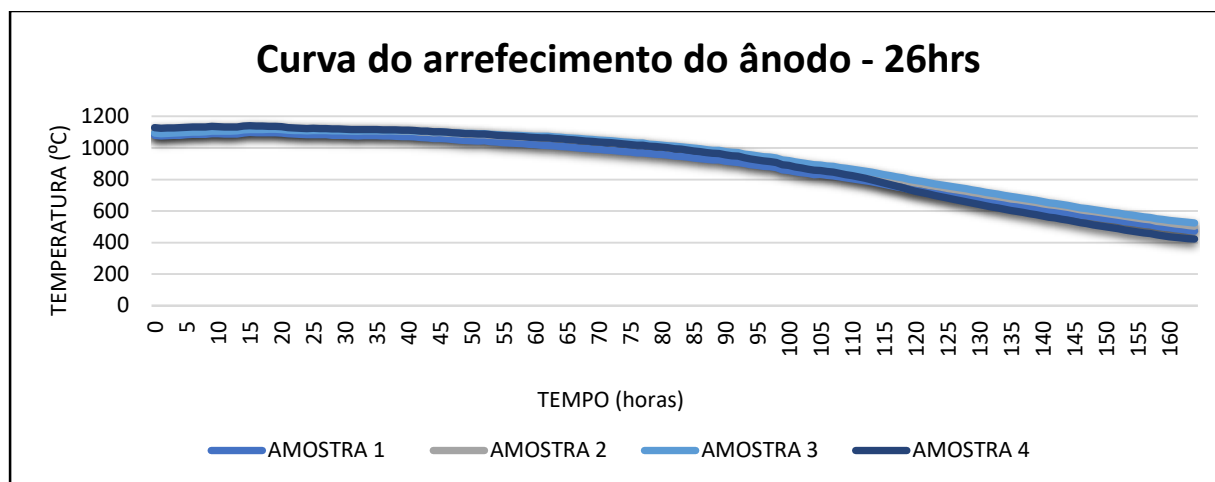


Gráfico 1 Curva de arrefecimento do ânodo para um ciclo de 26 horas- teste 1

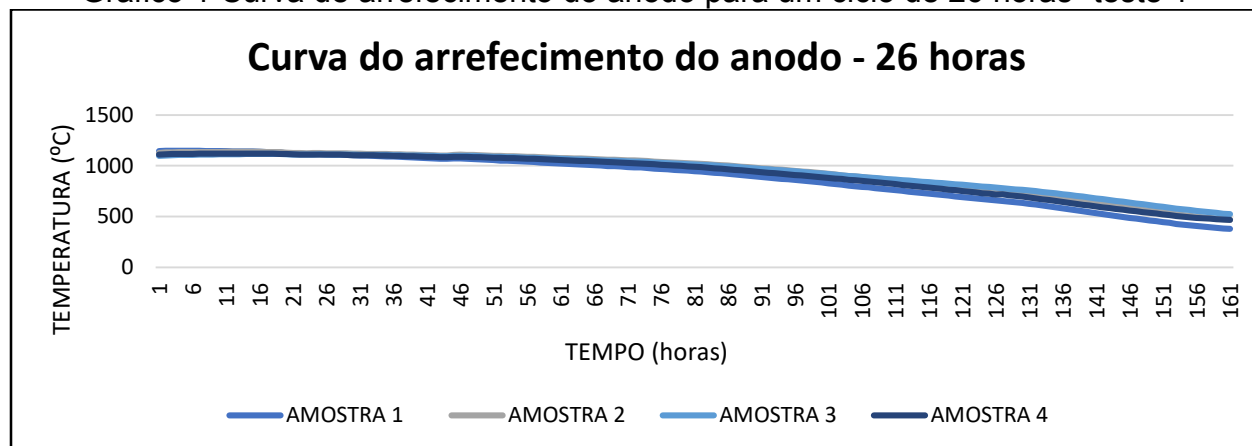


Gráfico 2 Curva de arrefecimento do ânodo para um ciclo de 26 horas- teste 2

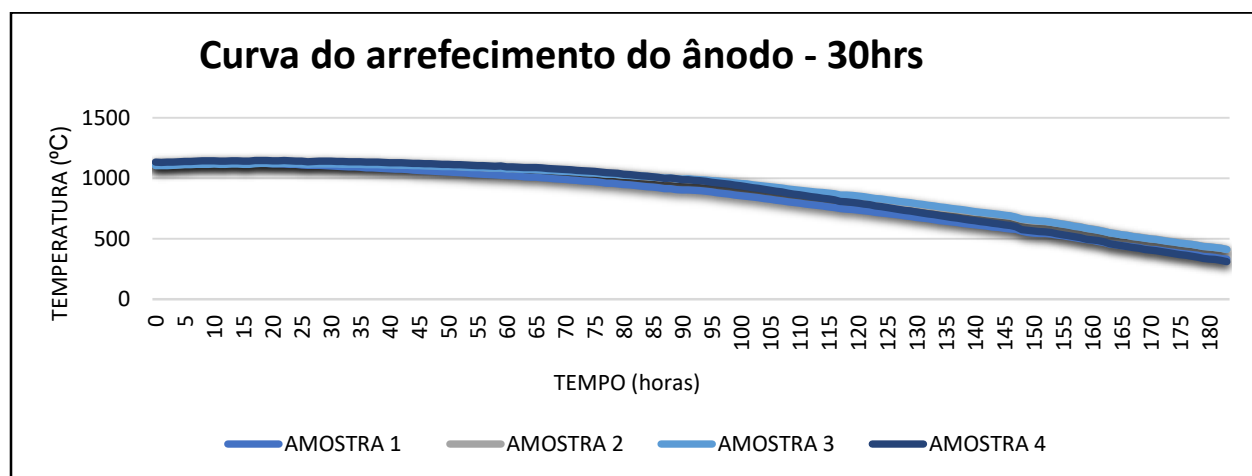


Gráfico 3 Curva de arrefecimento do ânodo para um ciclo de 30 horas- teste 3

5.1.2 Determinação dos modelos de estimação das temperaturas

Depois de gerar os gráficos acima, determinou-se os modelos conforme descrito na metodologia, secção 4.3. Assim foram gerados para cada amostra os modelos, linear, exponencial, logarítmico e polinomial, isto é, para cada teste recolheu-se quatro amostras perfazendo um total de doze amostras para igual numero de modelos. Loureiro, (2008) propõe os métodos baseados nos coeficientes de determinação e nas variâncias de erros de previsão para a escolha do modelo apropriado. Neste estudo o critério usado foi o coeficiente de determinação. Com base neste critério, observou-se nos três testes que o modelo polinomial é que apresentava maior robustez em comparação com os outros modelos, pois este está próximo de 1. Pala, Oliveira (2019), refere que o coeficiente de determinação, toma valores entre 0 e 1 e quanto mais próximo de 1, maior parte da variação da variável resposta está sendo explicada. A tabela 6 abaixo, apresenta sumariamente os modelos polinomiais seleccionados para as amostras dos 3 testes realizados nos fornos de cozimento dos ânodos de carbono.

Tabela 6 Modelos polinomiais dos testes 1, 2 e 3

Experimento	Modelo	Coeficiente de determinação (R^2)
Teste 1	Amostra 1 $T(t) = -7 \times 10^{-6}t^2 + 0,0052t + 1093,9$	0,9968
	Amostra 2 $T(t) = -8 \times 10^{-6}t^2 + 0,0152t + 1114,0$	0,9971
	Amostra 3 $T(t) = -9 \times 10^{-6}t^2 + 0,0233t + 1098,9$	0,9964
	Amostra 4 $T(t) = -1 \times 10^{-5}t^2 + 0,0199t + 1124,5$	0,9926
Teste 2	Amostra 1 $T(t) = -8 \times 10^{-6}t^2 + 0,0019t + 1141,1$	0,9993
	Amostra 2 $T(t) = -1 \times 10^{-5}t^2 + 0,0276t + 1113,4$	0,9982
	Amostra 3 $T(t) = -9 \times 10^{-6}t^2 + 0,0023t + 1098,4$	0,9993
	Amostra 4 $T(t) = -9 \times 10^{-6}t^2 + 0,0203t + 1105,7$	0,9993
Teste 3	Amostra 1 $T(t) = -6 \times 10^{-6}t^2 + 0,0138t + 1142,3$	0,9988
	Amostra 2 $T(t) = -8 \times 10^{-6}t^2 + 0,0173t + 1116,1$	0,9993
	Amostra 3 $T(t) = -8 \times 10^{-6}t^2 + 0,0221t + 1104,3$	0,9994
	Amostra 4 $T(t) = -9 \times 10^{-6}t^2 + 0,0180t + 1139,5$	0,9976

5.1.3 Estimação das temperaturas finais de arrefecimento para os ciclos de 25 e 24 horas

Depois de determinar os modelos apropriados, foi feita a estimação das temperaturas finais de arrefecimento dos ânodos de carbono, cujos resultados são apresentados na tabela 7 abaixo. Referir que, tendo em conta que, para cada teste recolheu-se quatro amostras, a temperatura estimada para cada teste corresponde a média das temperaturas estimadas das quatro amostras.

Tabela 7 Valores estimados das temperaturas finais- ciclo de 24 e 25 horas

Experimentos		Medição 30 horas	Medição 26 horas	Estimação 25 horas	Estimação 24 horas
Teste 1	Amostra 1	NA	377,80 °C	573,70 °C	616,28 °C
	Amostra 2	NA	467,10 °C	602,30 °C	648,13 °C
	Amostra 3	NA	522,50 °C	579,60 °C	628,37 °C
	Amostra 4	NA	466,80 °C	493,60 °C	549,94 °C
Média Teste 1		NA	458,57 °C	562,43 °C	610,68 °C
Teste 2	Amostra 1	NA	471,50 °C	510,20 °C	560,32 °C
	Amostra 2	NA	503,10 °C	551,80 °C	605,37 °C
	Amostra 3	NA	521,70 °C	576,40 °C	625,27 °C
	Amostra 4	NA	478,60 °C	559,40 °C	609,25 °C
Média Teste 2		NA	493,70 °C	549,45 °C	600,05 °C
Teste 3	Amostra 1	332,90 °C	NA	780,50 °C	813,63 °C
	Amostra 2	413,90 °C	NA	623,80 °C	668,37 °C
	Amostra 3	416,50 °C	NA	655,20 °C	698,04 °C
	Amostra 4	317,00 °C	NA	572,50 °C	623,17 °C
Média Teste 3		370,07 °C	NA	658,00 °C	700,81 °C

A partir dos dados da tabela 7 acima, observa-se que ao reduzir os ciclos, a temperatura vai aumentando nos três testes realizados. No teste 1, feito no forno 1, quando o ciclo passa de 26 horas para 25 horas, a temperatura de arrefecimento atinge 562,43 °C, um aumento de 22,6 %. Ao reduzirmos de 26 horas para 24 horas, a temperatura de

arrefecimento do ânodo de carbono aumenta de 458,5 °C para 610,5 °C, o que representa um incremento de 33,2%.

Em relação ao teste 2, feito no mesmo forno do teste 1, o comportamento da temperatura final do ânodo de carbono segue a mesma tendência que a observada no teste 1. Ao se reduzir o ciclo de cozimento de ânodos de 26 horas para 25 horas e 24 horas a temperatura aumenta de 493,57 °C para 549,45 °C e 600,05 °C respectivamente. Este incremento da temperatura de arrefecimento dos ânodos de carbono representa um aumento em 11,30% no ciclo de 25 horas e 21,55% no ciclo de 24 horas.

No que diz respeito ao teste 3, apesar de se ter feito no forno 2, a redução dos ciclos de 30 horas para 25 horas e 24 horas, também causa o aumento da temperatura final de arrefecimento dos ânodos de carbono. Assim, a temperatura final de arrefecimento aumentou de 370,07 °C (30 horas) para 658,00 °C para o ciclo de 25 horas, um aumento de 77,79% e para 700,81 °C para o ciclo de 24 horas, correspondentes a um incremento em cerca 89,35%. O objectivo deste teste foi de observar a possível existência de mudanças nos resultados das amostras pelo facto de ter sido realizado em um local diferenciado. De salientar que durante o processo de recolha de dados no forno, não ocorreu nenhuma interrupção no que toca a falhas nos equipamentos, especificamente nas rampas de sopro e de resfriamento.

Os resultados dos testes 1, 2 e 3 acima apresentados, são similares em termos de padrão comportamental aos encontrados no estudo feito por Stephen (2011). Segundo este estudo ao reduzir os ciclos de 27 horas para 26 horas a temperatura de arrefecimento do ânodo de carbono também aumentou de 390 °C para 420 °C. Isto é, quanto menor for o ciclo de cozimento maior será a temperatura final de arrefecimento dos ânodos de carbono.

Outrossim, os valores estimados das temperaturas finais de arrefecimento dos ânodos de carbono para os ciclos de 25 horas e 24 horas nos três testes realizados mostram-se estarem fora dos parâmetros aceites, pois segundo Kelle & Sulgger (2008) a temperatura final de arrefecimento dos ânodos de carbono deve estar entre 150 °C e 350 °C. Perante

este cenário, poder-se-ia afirmar que não é aconselhável reduzir os ciclos de cozimento para 25 e 24 horas, mas Stephen (2011) refere no seu estudo que é possível otimizar a produção através da redução do ciclo de cozimento desde que se controle os outros factores que podem afectar a eficiência do arrefecimento, tais como, o fluxo do ar, posição da rampa de arrefecimento, dimensões do olho mágico , configurações do olho mágico (aberto/ fechado), espessura das paredes de fumo e a potência da rampa de arrefecimento.

Existe também a possibilidade do aumento de uma segunda rampa de arrefecimento, que vai resultar na subida de 6 secções para 7 secções na zona de arrefecimento e consequentemente o aumento do tempo que cada secção vai ficar no processo de arrefecimento. O aumento de uma rampa de arrefecimento não vai afectar nas quantidades de ânodos produzidos para cada ciclo, e vai arrefecer ainda mais os ânodos de carbono. Talvez deva-se verificar o impacto da segunda rampa de arrefecimento nos trabalhos de manutenção, porque ao se aumentar mais uma secção nos *fires* para cada forno teremos menos 3 secções para efeitos de manutenção.

Na tabela 8 abaixo pode-se observar a horas de arrefecimento para cada ciclo, e pode-se constatar que quanto maior for o ciclo maior será o tempo de arrefecimento. Por exemplo, ao se reduzir o ciclo de cozimento de 30 horas para 24 horas tem-se uma diferença de 36 horas. Por outras palavras, se considerarmos avaliar o numero de secções arrefecidas em um mês (30 dias) para cada ciclo nos fornos de cozimento de ânodos da Moçambique Alumínio teremos 30 secções para um ciclo de 24 horas e 24 secções para um ciclo de 30 horas.

Tabela 8 Horas de Arrefecimento para cada Ciclo.

Ciclo (horas)	24	25	26	27	28	29	30
Horas de Arrefecimento (horas)	144	150	156	162	168	174	180

Com o uso do termómetro digital infravermelho mediu-se a temperatura dos ânodos de carbono depois de retirados do poço para o ciclo de 30 horas. Tais medições foram feitas em dois poços, os resultados constam na tabela 9 abaixo.

Tabela 9 Temperaturas dos ânodos na retirada dos poços.

280,00 °C	239,00 °C	295,00 °C	305,70 °C	223,50 °C	300,70 °C	307,60 °C
276,70 °C	240,00 °C	282,30 °C	300,60 °C	302,60 °C	236,60 °C	300,70 °C
300,30 °C	301,60 °C	259,30 °C	245,70 °C	309,10 °C	287,20 °C	298,00 °C
245,70 °C	289,60 °C	234,70 °C	287,90 °C	284,20 °C	278,70 °C	301,70 °C

Calculando a media das temperaturas teremos 279,00 °C no momento da retirada do poço. Comparando o resultado da media da temperatura final de arrefecimento ainda no poço, 317,00 °C, pode-se constatar uma diferença de 90,00 °C. Durante o tempo de espera os ânodos continuam num processo de arrefecimento por convecção natural, por isso existe uma diferença na temperatura do ânodo no fim do processo de arrefecimento, ainda dentro do poço e fora do poço.

A Moçambique Alumínio tem operado num ciclo de 25 horas nos fornos de cozimento dos ânodos. Contudo é necessário garantir a disponibilidade das rampas, como também o seu maior desempenho para que o arrefecimento dos ânodos de carbono seja eficiente.

CAPÍTULO 6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O presente trabalho teve como objectivos específicos, a análise da eficiência do arrefecimento dos ânodos de carbono nos ciclos de 26 e 30 horas, estimação das temperaturas para um ciclo de 24 e 25 horas, descrição do processo de cozimento dos ânodos de carbono e identificação dos factores que afectam o arrefecimento. Deste modo, são apresentadas neste capítulo as conclusões e recomendações deste estudo.

6.1 Conclusões

Da análise da eficiência do arrefecimento dos ânodos de carbono nos ciclos de 26 e 30 horas, o estudo conclui que apresentam curvas de arrefecimento do ânodo de carbono que possuem os mesmos padrões apesar de serem de *fires's* diferentes. As pequenas diferenças observadas na inclinação das curvas, podem estar relacionadas com possíveis fugas de ar nas paredes de fumo durante a ventilação forçada e também da provável falta de uniformidade na velocidade do ar, sabendo-se que a velocidade do ar é um dos parâmetros que influencia na transferência de calor.

No que toca a estimação das temperaturas finais concluiu-se que quanto menor for o ciclo de cozimento, maior será a temperatura final de arrefecimento. No teste 1, feito no forno 1, quando o ciclo passa de 26 horas para 25 horas, a temperatura de arrefecimento atinge 562,43 °C, um aumento de 22,6 %. Ao reduzirmos de 26 horas para 24 horas, a temperatura de arrefecimento do ânodo de carbono aumenta de 458,5 °C para 610,5 °C, o que representa um incremento de 33,2%. No teste 2, ao se reduzir o ciclo de cozimento de ânodos de 26 horas para 25 horas e 24 horas a temperatura aumenta de 493,57 °C para 549,45 °C e 600,05 °C respectivamente. Este incremento da temperatura de arrefecimento dos ânodos de carbono representa um aumento em 11,30% no ciclo de 25 horas e 21,55% no ciclo de 24 horas. Em relação ao teste 3, a redução do ciclo de 30 horas para 25 horas e 24 horas, também causa o aumento da temperatura final de arrefecimento dos ânodos de carbono de 370,07 °C (30 horas) para 658,00 °C para o ciclo de 25 horas, um aumento de 77,79% e para 700,81 °C para o ciclo de 24 horas, correspondentes a um incremento em cerca 89,35%.

Apesar das temperaturas finais estarem fora dos parâmetros o presente trabalho conclui que é possível reduzir os ciclos de cozimento para 24 e 25 horas desde que se controle os factores extra ciclos que podem afectar o sistema de arrefecimento.

Em termos de factores que afectam a eficiência do arrefecimento do ânodo de carbono, o estudo constatou que, o fluxo do ar, a posição da rampa de arrefecimento, as dimensões do olho mágico, as configurações do olho mágico (aberto/ fechado), a espessura das paredes de fumo e a potência da rampa de arrefecimento, impactam sobre o sistema de arrefecimento.

6.2 Recomendações

Tendo em conta que a redução de ciclos de arrefecimento causa o aumento da temperatura final de arrefecimento, o estudo recomenda que para ciclos de 24 e 25 horas, caso aumente-se o fluxo de ar, a empresa deve garantir que todos os olhos mágicos estejam 100% abertos nas secções onde a rampa de arrefecimento esta assente. E também deve-se fazer o controle do ponto zero, para garantir que o aumento do fluxo de ar não afecte a zona de aquecimento onde ocorre a combustão. Caso aumente-se uma segunda rampa de arrefecimento, deve-se garantir que a mesma não afecta os trabalhos de manutenção no forno.

6.3 Limitações da pesquisa

Durante o processo de elaboração do trabalho teve-se algumas limitações como a impossibilidade de análise de alguns parâmetros que impactam no arrefecimento dos ânodos de carbono, como a granulometria do coque e a espessura das paredes de fumo. Seria ideal que as amostras fossem retiradas numa única secção, com o mesmo *fire*, para que não hajam variações dos parâmetros, mas seria difícil pelo facto dos *fire's* estarem em movimento, e só voltarem para a mesma secção depois de vários dias o que tornaria o processo moroso.

6.4 Sugestões para futuros trabalhos

Tendo em conta que o estudo em causa não pode abranger todos os parâmetros relacionados ao processo de arrefecimento do ânodo, serão sugeridos alguns temas para trabalhos futuros:

- Estudo da influencia da temperatura ambiente no processo de arrefecimento dos ânodos de carbono;
- Estudo da resistência das paredes refratárias se se aumentar o fluxo do ar;
- Estudo da influencia da espessura das paredes de fumo no processo de arrefecimento dos ânodos de carbono.
- Estudo de um outro tipo de material além do coque para colocar a volta do ânodo com maior taxa de transferência de calor;
- Redução da temperatura do ar antes da entrada no sistema com o intuito de aumentar a taxa de a transferência de calor.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ALUMÍNIOS, (2008), *Extrusão-Guia técnico do alumínio*, Brasil, São Paulo, ABAL, . 4º Edição.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ALUMÍNIOS; (2000), *A Historia do Alumínio no Brasil*, Brasil, São Paulo, Beline Editora & Cultura.

BAESSO, Robson De Souza, De Souza, Antônio Artur, *O Coeficiente De Determinação É Uma Medida Confiável Do Poder Explicativo De Modelos De Estimação Do Valor Intrínseco Das Ações Negociadas Na Bovespa*, Universidade Federal De Minas Gerais.

BRITO, Gracieth Varela, Vieira, Sofia Patrícia Gomes, (2010/2011), *Materiais De Construção Alumínio*, C2faup- Sistemas e Materiais de Construção.

CARDOSO, J. G. R., Fosenca, (2011). *A industria do aluminio: estrutura e tendencias*. Brasil: BNDES.

CARNEIRO, Cleber Miralha, (2011), *Controle de Exaustão de Fornos de Cozimento de Ânodos Baseado em Logica FUZZY*, Universidade Federal do Pará- Mestrado profissional em Engenharia Electrica, Brasil, Belém.

ÇENGEL, Yunus A., Ghajar, Afshin j., (2012), *Transferência de Calor e Massa- Uma abordagem Pratica*, 4º Edição, Mc Graw Hill, AMGH Editora Ltda. USA

DAVIS J. R., (1993), *Aluminium and Aluminium Alloys*, 1º Edição, ASM International: Materials Park (EUA).

DONÁRIO, Arlindo Alegre, Dos Santos, Ricardo Borges, (2016), *A teoria de Karl Marx*, Universidade Autonoma de Lisboa

FRANHOIS Ordronneau, Magali Gendre, (2011), *Meeting The Challenge Of Increasing Anode Baking Furnace Productivity*, Light Metals 2011, Edited by: Stephen J. Lindsay TMS (The Minerals, Metals & Materials Society).

Incropera Frank P., Dewitt, David P., Bergman Theodore L. Lavine, Adreienne S. (2007), *Fundamentals of Heat And Mass Transfer*, Copyright 6º Edição, John Wiley & Sons.

ISHAK Ramzi, (2018), *Protection of carbon anode against air burning: A new approach to apply and understand the inhibiting effect of boron impregnation*, These: Université Laval, Quebec, Canada

Kammer, Catrin, (1999), *Aluminium Handbook*, Vol 1, Fundamentals and Materials, Beuth Verlag GmbH, 2011

KELLER, Felix, O. Sulger, Peter, (2008), *Anode Baking- Baking of Anodes for the Aluminium Industry*, 2º Edição, R&D Carbon Ltd., Sierre, Switzerland.

KENNEDY, Peter, (2008) *A Guide to Econometrics*. Massachusetts: Blackwell Publishing, 2008.

Kvande H, Huglen R and Grjotheim K, (2011), *Carbothermal Production of Aluminium- Technically Possible*, Fundamentals of Aluminium Metallurgy, Norway: NTH

L.Q. ZHANG, C.G. Zheng, M.H. Xu, (2005) *Simulating the heat transfer process of horizontal anode baking furnace*, Dev. Chem. Eng. Miner. Process. 13 (3–4) (447–458)

MADE IN CHINA, (2023), https://pt.made-in-china.com/co_highnic/product_Phosphorized-Copper-Anode-Ball-with-Micro-Crystal_enynhogeg.html, acedido em : 17 de Outubro de 2023

MARTINS, Maria Eugénia Graça Martins, (2018), *Coeficiente de determinação*, Universidade de Lisboa, COPYRIGHT.

MENDES, L., Venturinni, O. & Lora, E., (2015). *International Conference on Energy for a Clean Environment*. Lisboa, Instituto Superior Técnico.

MOZAL, (2021-2022), *MOZAL NEWSLETTER 2021-2022*, Young Network

MOZAL, *Carbon- Introduction to the carbon plant*, Induction, 2023.

OZISIK, M. Necati, (1990), *Transferência de Calor - Um texto básico*, Copyright 1975 by Editora Guarabara Koogan S. A, Rio de Janeiro, RJ- CEP 20040

PALA, Luiz Otávio de Oliveira, (2019), *Revisitando A Estimação Do Coeficiente De Determinação*, Dissertação (Mestrado em Estatística Aplicada e Biometria) - Universidade Federal De Alfenas, ALFENAS, MG

QUALIT CR, anodo Pre-cuzido soderberg, <https://www.xn--qualitecrepresentaes-1b22a.com/2013/07/anodo-pre-cozido-e-anodo-Soderberg.html>, acedido em: 15 de Outubro de 2023

Raja Javed Akhtar, Markus W. Meier, (2012), *Anode Quality and Bake Furnace Performance of EMAL*, Light Metals 2012 Edited by: Carlos E. Suarez, TMS (The Minerals, Metals & Materials Society).

RESONDE AI, <https://app.respondeai.com.br/materias/completas/7/assunto/136> acedindo em : 15 de Novembro de 2023

SAFARIAN, J., & Kolbeinsen, L. (2016). *Sustainability in alumina production from bauxite* – em “Sustainable Industrial Processing Summit and Exhibition”, Kongoli, F (ed.), vol. 5, p. 75-82.

SANTOS, Elisangela Da Silva Moura, (2014), *Avaliação das Emissões Atmosféricas no Processo de Cozimento De Ânodos com a Substituição do Óleo Diesel por Flexgas*, Universidade Federal Do Maranhão, Mestrado Profissional em Energia e Ambiente, Brasil, São Luís.

SHIREVE, R. & Brink Junior, J., (1997). *Indústrias de Processos Químicos*. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan S.A

STATISTA, (2007), <https://www.statista.com/statistics/1113623/global-aluminum-exports-by-country/>, acedido em : 16 de Dezembro de 2023

TIBA Paulo. Tiba, B. H. Teider, J. B. Gallo, V. C. Pandolfelli, (2009), *Seleção de refratários para fornos de cozimento de ânodo*, Departamento de Engenharia Química Cerâmica 55, 333 113-119

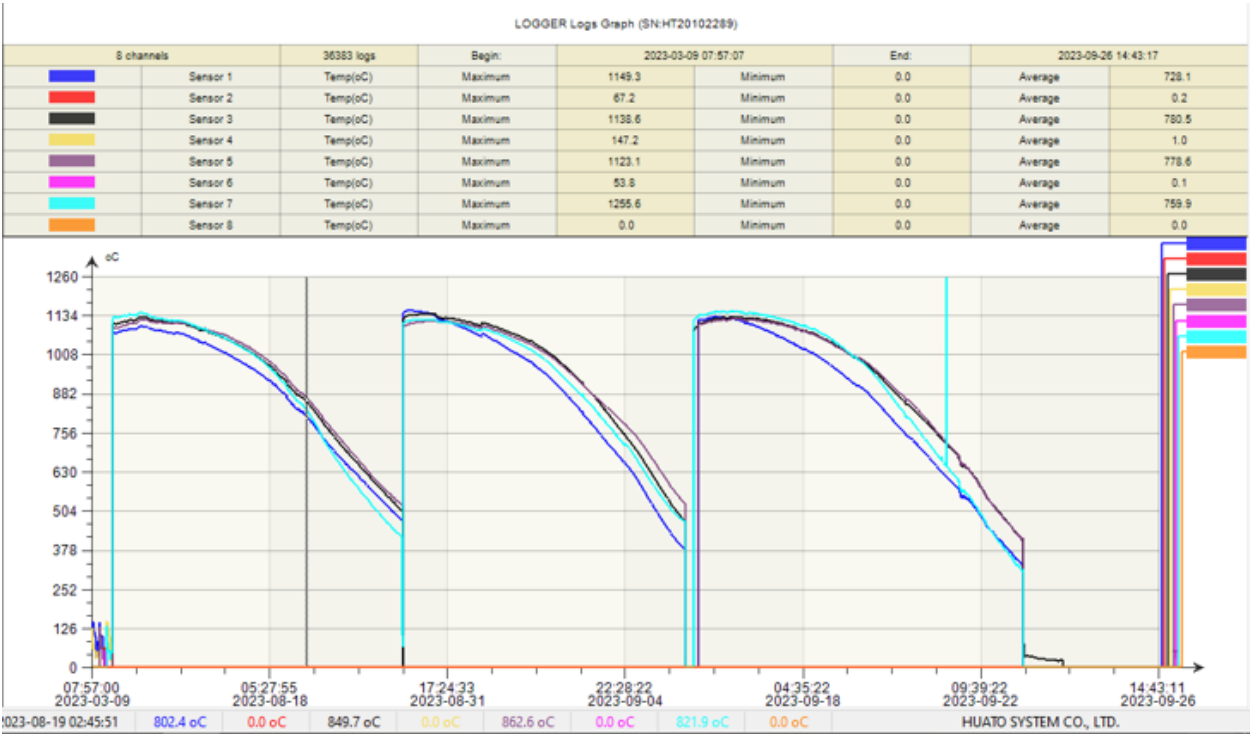
TIBA Paulo. Tiba, B. H. Teider, J. B. Gallo, V. C. Pandolfelli, (2012), *Conservação de energia em fornos de cozimento de ânodo*, Departamento de Engenharia Química Cerâmica 58, 333 436-443

TOTTEN, George, Mackenzie, D. Scott, (2003) *Handbook os Aluminium*, Physical Metallurgy and Processes, Vol 1 , 1º Edition, Copyright.

ANEXOS

Anexo 1- Resultados retirados do registrador de dados

Anexo A1- 1 Graficos do colector de dados



Anexo 2- Resultados das amostras

A2 – 1 - Dados do ciclo de 30 horas

NUMERO	DATA	HORA	POÇO 1	POÇO 3	POÇO 5	POÇO 7
1	9/15/2023	17:30:26	1118.6	1107.6	1103.9	1133.1
2	9/15/2023	18:30:27	1117.6	1108.2	1104.1	1132.4
3	9/15/2023	19:30:27	1119.3	1110	1105.8	1133.9
4	9/15/2023	20:30:27	1119	1110.6	1106	1133.8
5	9/15/2023	21:30:27	1122.5	1113.9	1109.5	1137.2
6	9/15/2023	22:30:27	1124.5	1116.1	1111.3	1139.2
7	9/15/2023	23:30:27	1125.9	1117.8	1112.8	1140
8	9/16/2023	0:30:27	1127.3	1119.9	1114.6	1142.2
9	9/16/2023	1:30:27	1128.5	1121.9	1116.3	1143.9
10	9/16/2023	2:30:27	1127.7	1121.8	1115.8	1143.2
11	9/16/2023	3:30:27	1128.3	1123.4	1117.2	1144.3
12	9/16/2023	4:30:27	1126	1122	1115.3	1142.2
13	9/16/2023	5:30:27	1125.5	1122.8	1116	1142.6
14	9/16/2023	6:30:27	1126.9	1124.7	1118.3	1144.9
15	9/16/2023	7:30:27	1126.1	1124.8	1118.7	1144.8
16	9/16/2023	8:30:27	1122.7	1123.3	1116.5	1142.1
17	9/16/2023	9:30:27	1121.6	1122.8	1116.1	1141.1
18	9/16/2023	10:30:27	1124.6	1126.6	1120.8	1145.9
19	9/16/2023	11:30:27	1125.4	1128.5	1122.8	1147.9
20	9/16/2023	12:30:27	1124.1	1128	1122.5	1147.2
21	9/16/2023	13:30:27	1120.4	1126.1	1120.2	1144.8
22	9/16/2023	14:30:27	1120.1	1127.1	1121.1	1145.3
23	9/16/2023	15:30:27	1119.1	1127.8	1121.9	1146.1
24	9/16/2023	16:30:27	1115.7	1125.9	1120.1	1143.7
25	9/16/2023	17:30:27	1114.2	1125.9	1120.1	1143
26	9/16/2023	18:30:27	1110	1124.1	1117.7	1140.7
27	9/16/2023	19:30:27	1106.1	1121.9	1114.9	1137.2
28	9/16/2023	20:30:27	1106.9	1123.1	1117.6	1140.2
29	9/16/2023	21:30:27	1106	1123.7	1118.4	1141
30	9/16/2023	22:30:27	1104.3	1124	1118.5	1141.2
31	9/16/2023	23:30:27	1102.2	1123.5	1117.9	1140.4
32	9/17/2023	0:30:27	1100.2	1123	1117.3	1139.7
33	9/17/2023	1:30:27	1097.3	1121.5	1115.9	1137.9
34	9/17/2023	2:30:27	1094.3	1120.7	1114.8	1136.5
35	9/17/2023	3:30:27	1092.8	1120.3	1114.6	1135.7
36	9/17/2023	4:30:26	1091.3	1120.5	1114.8	1135.5
37	9/17/2023	5:30:26	1087.2	1117.9	1112.2	1132.8
38	9/17/2023	6:30:26	1086.5	1118.4	1113	1133.3
39	9/17/2023	7:30:26	1084.5	1117.8	1112.7	1132.7
40	9/17/2023	8:30:26	1081.7	1116.4	1111.2	1131

41	9/17/2023	9:30:26	1078.1	1114.2	1109.2	1128.6
42	9/17/2023	10:30:26	1076.2	1113.7	1108.7	1128.1
43	9/17/2023	11:30:26	1074.3	1113.1	1108.2	1127.6
44	9/17/2023	12:30:26	1071.6	1111.5	1106.9	1125.7
45	9/17/2023	13:30:26	1067.2	1108.8	1104	1122.7
46	9/17/2023	14:30:26	1065.8	1108.5	1104.4	1122.9
47	9/17/2023	15:30:26	1062.2	1106.5	1102.5	1121
48	9/17/2023	16:30:26	1060.3	1105.6	1101.7	1120
49	9/17/2023	17:30:26	1057.5	1104	1100.2	1118.6
50	9/17/2023	18:30:26	1053.8	1101.5	1098	1115.8
51	9/17/2023	19:30:26	1050.8	1099.8	1096.5	1114.4
52	9/17/2023	20:30:26	1048.5	1098.5	1095.7	1113.7
53	9/17/2023	21:30:26	1045.8	1097.2	1094.5	1112.1
54	9/17/2023	22:30:26	1042.8	1095.2	1092.5	1110.8
55	9/17/2023	23:30:26	1038	1092.2	1089.5	1107.5
56	9/18/2023	0:30:26	1036.2	1090.7	1088.4	1105.3
57	9/18/2023	1:30:26	1034	1089.7	1087.8	1105.6
58	9/18/2023	2:30:26	1029.6	1086.8	1084.2	1102
59	9/18/2023	3:30:26	1026.6	1085.1	1082.6	1099.9
60	9/18/2023	4:30:26	1025.8	1085.5	1083.3	1100.9
61	9/18/2023	5:30:26	1021.4	1081.1	1078.5	1095.3
62	9/18/2023	6:30:26	1019.7	1079.7	1077	1094.9
63	9/18/2023	7:30:26	1016.5	1078.1	1075	1091.7
64	9/18/2023	8:30:26	1012.7	1076	1073.1	1089.9
65	9/18/2023	9:30:26	1010.5	1074.7	1072	1088.5
66	9/18/2023	10:30:26	1008.3	1073.1	1070.6	1087.7
67	9/18/2023	11:30:26	1005.3	1070.8	1068.6	1085.3
68	9/18/2023	12:30:26	1001.4	1067.9	1065.2	1081.8
69	9/18/2023	13:30:26	996.7	1064.4	1061.6	1078.4
70	9/18/2023	14:30:26	993.5	1061.8	1058.7	1074.9
71	9/18/2023	15:30:26	989.5	1058.7	1055.7	1071.7
72	9/18/2023	16:30:26	986.2	1056.1	1053.3	1068.9
73	9/18/2023	17:30:26	982.3	1053.5	1050.5	1065.8
74	9/18/2023	18:30:26	978	1050.4	1047.4	1062.4
75	9/18/2023	19:30:26	974.4	1047.8	1045	1059.6
76	9/18/2023	20:30:26	971.1	1045.2	1042.6	1056.7
77	9/18/2023	21:30:26	965.7	1040.8	1038.1	1051.1
78	9/18/2023	22:30:26	960.2	1036	1033.6	1045.3
79	9/18/2023	23:30:26	958.1	1034.8	1033	1044.1
80	9/19/2023	0:30:26	954	1031.4	1030.2	1040.3
81	9/19/2023	1:30:26	947.4	1026	1025.3	1034.2
82	9/19/2023	2:30:26	944.6	1023.9	1023.6	1031.1
83	9/19/2023	3:30:26	939.9	1019.8	1020.2	1026.2
84	9/19/2023	4:30:26	935	1015.7	1016.5	1021

85	9/19/2023	5:30:26	930.7	1011.9	1013.3	1016.6
86	9/19/2023	6:30:25	926.3	1008.1	1010.1	1011.7
87	9/19/2023	7:30:25	921.2	1004.2	1006.5	1007.3
88	9/19/2023	8:30:25	913.8	997.9	1000.6	1000
89	9/19/2023	9:30:25	913	999.6	1001.9	1001.3
90	9/19/2023	10:30:25	906.5	994.3	997	995.6
91	9/19/2023	11:30:25	904.1	990.5	994.7	989.2
92	9/19/2023	12:30:25	904.4	988.7	995.5	987.2
93	9/19/2023	13:30:25	900.4	985.8	991.9	983
94	9/19/2023	14:30:25	896.8	982.8	988.6	979.1
95	9/19/2023	15:30:25	891.5	978.5	984.4	973.7
96	9/19/2023	16:30:25	886.2	974	980	967.9
97	9/19/2023	17:30:25	880.6	969.5	976.5	962.2
98	9/19/2023	18:30:25	874.5	965	971.3	956.2
99	9/19/2023	19:30:25	868.7	959.7	966.7	949.9
100	9/19/2023	20:30:25	862.2	954.1	961.5	942.7
101	9/19/2023	21:30:25	856.7	948.8	957	936.5
102	9/19/2023	22:30:25	851.2	943.9	952.4	930.3
103	9/19/2023	23:30:25	844.9	938.3	946.8	923.2
104	9/20/2023	0:30:25	838.5	932.4	941.4	915.8
105	9/20/2023	1:30:24	832.2	926.5	935.5	908.5
106	9/20/2023	2:30:24	825.8	920.7	929.9	901.1
107	9/20/2023	3:30:24	818.2	914	923.3	892.9
108	9/20/2023	4:30:24	813.4	909.1	919	886.5
109	9/20/2023	5:30:24	806.3	902.7	912.4	878.2
110	9/20/2023	6:30:24	799.4	896.4	906.3	870.2
111	9/20/2023	7:30:24	793.7	891.3	902	863.5
112	9/20/2023	8:30:24	787.6	885.7	896.1	856
113	9/20/2023	9:30:24	780.9	879.7	890.4	848.3
114	9/20/2023	10:30:24	775.4	874.3	885.7	841.4
115	9/20/2023	11:30:24	770	869.1	881.3	834.8
116	9/20/2023	12:30:24	764.3	864	876.6	828
117	9/20/2023	13:30:24	757.8	858.2	870.6	820.2
118	9/20/2023	14:30:24	750.6	848.6	861.7	808.8
119	9/20/2023	15:30:24	744.8	846.3	861	805.6
120	9/20/2023	16:30:23	741.4	843.7	857.8	801.3
121	9/20/2023	17:30:23	737.2	838.5	852	795.1
122	9/20/2023	18:30:23	732.4	833.1	846.5	787.6
123	9/20/2023	19:30:23	725.5	827.3	840.7	780.4
124	9/20/2023	20:30:23	718.3	819.5	831.9	770.1
125	9/20/2023	21:30:23	713.9	815.8	828	765.3
126	9/20/2023	22:30:23	707.9	810.3	822.3	758.1
127	9/20/2023	23:30:23	701.7	804.3	815.4	749.3
128	9/21/2023	0:30:23	695.5	798.5	809.2	742.2

129	9/21/2023	1:30:22	689.1	793	803.3	733.6
130	9/21/2023	2:30:22	683.2	788.3	797.6	728.5
131	9/21/2023	3:30:22	676.4	782.2	790.7	721
132	9/21/2023	4:30:22	670.3	776.3	784.6	713.7
133	9/21/2023	5:30:22	663.8	769.5	777.4	705.8
134	9/21/2023	6:30:22	657.5	763.3	770.9	698.4
135	9/21/2023	7:30:22	650.3	756.2	763.6	690.3
136	9/21/2023	8:30:22	644.2	750.7	757.5	683.8
137	9/21/2023	9:30:22	637.7	744.2	750.4	676.4
138	9/21/2023	10:30:22	632.4	738.5	744.8	669.8
139	9/21/2023	11:30:22	626.2	732.3	738	661.9
140	9/21/2023	12:30:22	620.5	726.6	731.7	655.7
141	9/21/2023	13:30:22	614.3	719.3	724.6	648
142	9/21/2023	14:30:21	608.2	714.1	718.9	642.2
143	9/21/2023	15:30:21	603	707.3	712.1	635.2
144	9/21/2023	16:30:21	597.3	702.6	706.7	629.2
145	9/21/2023	17:30:21	592.4	697.5	701.3	623.5
146	9/21/2023	18:30:21	585.9	690.5	694.4	615.9
147	9/21/2023	19:30:21	581.4	685.6	689.3	610.3
148	9/21/2023	20:30:21	578.4	673.4	677.5	598
149	9/21/2023	21:30:21	560.7	660.2	663.3	575.1
150	9/21/2023	22:30:21	552.1	652	656.6	570.3
151	9/21/2023	23:30:21	545.5	646.3	651	564.6
152	9/22/2023	0:30:21	543.4	643.4	646.9	560.2
153	9/22/2023	1:30:21	542.7	641.4	642.8	556.8
154	9/22/2023	2:30:21	537	636.2	637	550.6
155	9/22/2023	3:30:21	529.9	627.6	627.2	541
156	9/22/2023	4:30:21	524.5	621.9	619.9	533.8
157	9/22/2023	5:30:21	517.1	613.8	611.4	524.8
158	9/22/2023	6:30:21	508.6	605.8	602.7	516.4
159	9/22/2023	7:30:21	502.1	598.2	595	509
160	9/22/2023	8:30:21	491.8	586.8	584.4	496.5
161	9/22/2023	9:30:21	486.7	580	577.6	489.8
162	9/22/2023	10:30:21	478.2	572.6	570.6	483.9
163	9/22/2023	11:30:21	468.9	562.4	560.2	473.1
164	9/22/2023	12:30:21	456.6	549.7	547.2	459.3
165	9/22/2023	13:30:21	449.9	542.1	540.7	451.1
166	9/22/2023	14:30:21	442.8	533.2	533.2	442.4
167	9/22/2023	15:30:21	437.7	527.1	526.5	435.5
168	9/22/2023	16:30:21	431.4	520	518	427.5
169	9/22/2023	17:30:21	425.9	514.4	512.3	420.6
170	9/22/2023	18:30:21	417.1	505.4	503.8	411.4
171	9/22/2023	19:30:21	410	498.5	497.2	404.7
172	9/22/2023	20:30:21	407.5	494.8	492.7	399.4

173	9/22/2023	21:30:21	400.1	487.3	485.5	391.4
174	9/22/2023	22:30:21	392.8	479.9	476.6	383.5
175	9/22/2023	23:30:21	388.2	474.1	471.3	377.1
176	9/23/2023	0:30:21	379.9	466.2	464.1	369.1
177	9/23/2023	1:30:21	374.7	459.4	458.1	361.9
178	9/23/2023	2:30:21	369.5	453.8	452.2	356.1
179	9/23/2023	3:30:21	362	446.1	444.3	348.1
180	9/23/2023	4:30:20	353.2	437	434.8	336.7
181	9/23/2023	5:30:20	349	432.4	431.2	332.5
182	9/23/2023	6:30:20	344.5	427.2	426.8	327.8
183	9/23/2023	7:30:20	337.8	420.1	420.4	321.3
184	9/23/2023	8:30:20	330	411.6	411.9	311.2

A2- 2- Dados do ciclo de 26

NUMERO	DATA	HORA	POÇO 1	POÇO 3	POÇO 5	POÇO 7
1	8/14/2023	12:30:54	1079.1	1106.9	1094.6	1129.1
2	8/14/2023	13:30:54	1075.5	1103.5	1090.9	1124.7
3	8/14/2023	14:30:54	1077.7	1105.6	1093	1126.2
4	8/14/2023	15:30:54	1079.5	1107.2	1094.5	1127.2
5	8/14/2023	16:30:54	1080.7	1108.6	1096.2	1128.7
6	8/14/2023	17:30:54	1083.5	1111.6	1099.2	1131.3
7	8/14/2023	18:30:54	1085.3	1113.1	1101	1132.8
8	8/14/2023	19:30:54	1085.7	1113.5	1101.3	1132
9	8/14/2023	20:30:54	1086.4	1114.3	1102.7	1132.5
10	8/14/2023	21:30:54	1089.6	1118.2	1107.4	1136.6
11	8/14/2023	22:30:54	1089.6	1118.1	1107.5	1135.5
12	8/14/2023	23:30:54	1088.1	1116.4	1106	1132.3
13	8/15/2023	0:30:54	1088.6	1116.9	1107	1132.2
14	8/15/2023	1:30:54	1089.1	1117.3	1108	1132.1
15	8/15/2023	2:30:54	1094.7	1123.6	1114.8	1139
16	8/15/2023	3:30:54	1098	1126.9	1117.6	1141
17	8/15/2023	4:30:54	1097.3	1126.1	1117.5	1139.5
18	8/15/2023	5:30:54	1097	1125.9	1117.5	1138.6
19	8/15/2023	6:30:54	1096.5	1125.4	1117.9	1137.8
20	8/15/2023	7:30:54	1096.4	1125.6	1117.9	1137.3
21	8/15/2023	8:30:54	1093.6	1122.8	1116.2	1134.2
22	8/15/2023	9:30:54	1090	1119.1	1112.9	1129.5
23	8/15/2023	10:30:54	1087.7	1117.1	1111.5	1127.4
24	8/15/2023	11:30:54	1086.3	1116	1110.2	1125.3
25	8/15/2023	12:30:54	1084.4	1114.6	1109.1	1123.3
26	8/15/2023	13:30:54	1084.7	1115.2	1110.4	1124
27	8/15/2023	14:30:54	1083.5	1114.6	1110	1122.9

28	8/15/2023	15:30:54	1083.4	1114.6	1110.8	1123.3
29	8/15/2023	16:30:54	1081.1	1112.7	1108.7	1120.2
30	8/15/2023	17:30:54	1080.7	1112.5	1108.8	1119.7
31	8/15/2023	18:30:54	1079.2	1111.1	1107.8	1118.1
32	8/15/2023	19:30:54	1078	1109.9	1107.3	1116.8
33	8/15/2023	20:30:54	1077	1108.9	1106.8	1115.8
34	8/15/2023	21:30:54	1078	1110.2	1108.7	1117.1
35	8/15/2023	22:30:54	1077.5	1110.1	1109	1116.8
36	8/15/2023	23:30:54	1077.3	1110.3	1109.4	1116.7
37	8/16/2023	0:30:54	1075.9	1109.3	1108.8	1115.3
38	8/16/2023	1:30:54	1075.8	1109.6	1109.3	1115.6
39	8/16/2023	2:30:54	1074.1	1108.5	1109.1	1114.9
40	8/16/2023	3:30:54	1072.2	1106.9	1108.1	1113.3
41	8/16/2023	4:30:54	1071.3	1106.3	1108	1112.6
42	8/16/2023	5:30:53	1069.2	1104.8	1107.3	1111.4
43	8/16/2023	6:30:53	1065.1	1101.1	1103.8	1107.2
44	8/16/2023	7:30:53	1064.3	1100.8	1104.2	1107.3
45	8/16/2023	8:30:53	1059.6	1096.7	1100	1102
46	8/16/2023	9:30:53	1060.3	1097.5	1101.6	1103.4
47	8/16/2023	10:30:53	1057	1094.8	1099	1100.2
48	8/16/2023	11:30:53	1053.4	1091.8	1096.6	1097.2
49	8/16/2023	12:30:53	1050.4	1089.6	1094.5	1094.3
50	8/16/2023	13:30:53	1047	1086.8	1091.7	1090.8
51	8/16/2023	14:30:53	1044.9	1085.2	1091.3	1090
52	8/16/2023	15:30:53	1044.4	1084.2	1090	1087.8
53	8/16/2023	16:30:53	1044.8	1085	1090.9	1088.7
54	8/16/2023	17:30:53	1040.3	1080.5	1086.2	1083.3
55	8/16/2023	18:30:53	1037.2	1078.2	1084.5	1080.9
56	8/16/2023	19:30:53	1034.3	1075.9	1082.3	1077.9
57	8/16/2023	20:30:53	1032.1	1074.1	1080.8	1075.9
58	8/16/2023	21:30:53	1029.7	1072.4	1079.6	1074
59	8/16/2023	22:30:53	1026.8	1070.6	1078.3	1071.5
60	8/16/2023	23:30:53	1023.2	1067.9	1076.2	1068.8
61	8/17/2023	0:30:53	1021	1066	1074.6	1066.7
62	8/17/2023	1:30:53	1017.4	1063.8	1073.2	1064.5
63	8/17/2023	2:30:53	1016	1063	1073.4	1064.8
64	8/17/2023	3:30:53	1012.3	1059.6	1069.8	1060.1
65	8/17/2023	4:30:53	1009.6	1057.4	1068.1	1058.3
66	8/17/2023	5:30:53	1006.2	1054	1064.8	1054.4
67	8/17/2023	6:30:53	1003.4	1051.4	1062.1	1051.2
68	8/17/2023	7:30:53	999.8	1048	1059	1047.8
69	8/17/2023	8:30:53	997	1044.8	1055.6	1044.5
70	8/17/2023	9:30:53	993.5	1042.1	1052.9	1041

71	8/17/2023	10:30:53	990.6	1039	1050	1037.9
72	8/17/2023	11:30:53	987.6	1037	1048.3	1035.7
73	8/17/2023	12:30:52	984.4	1034.2	1045.8	1033
74	8/17/2023	13:30:52	980.8	1030.2	1041.7	1028.7
75	8/17/2023	14:30:52	976.9	1026.7	1038.2	1025.1
76	8/17/2023	15:30:52	973.7	1023.4	1035	1021.5
77	8/17/2023	16:30:52	969.5	1019.6	1031.5	1017.4
78	8/17/2023	17:30:52	969	1018.8	1030.4	1017.1
79	8/17/2023	18:30:52	963.6	1013	1024.3	1011.3
80	8/17/2023	19:30:52	960.7	1010.2	1021.7	1008.2
81	8/17/2023	20:30:52	957.6	1006.5	1018.2	1004.6
82	8/17/2023	21:30:52	953.3	1001.9	1013.4	1000.2
83	8/17/2023	22:30:52	948.8	998.5	1010.4	995.6
84	8/17/2023	23:30:52	946	994.5	1006.3	991.9
85	8/18/2023	0:30:52	941.8	990.4	1002.3	987.2
86	8/18/2023	1:30:52	936.5	985.8	998.2	981.6
87	8/18/2023	2:30:52	932.8	981.6	994	976.8
88	8/18/2023	3:30:52	928	976.7	989.3	971.1
89	8/18/2023	4:30:52	924	972.4	985.2	966.1
90	8/18/2023	5:30:52	923	971.1	984.4	964.7
91	8/18/2023	6:30:52	915.6	963.5	976.6	955.5
92	8/18/2023	7:30:52	910.7	958.6	972.2	949.9
93	8/18/2023	8:30:52	908.5	956.4	970.4	947.5
94	8/18/2023	9:30:52	900.7	947.4	961.2	937.5
95	8/18/2023	10:30:52	894.4	941.4	955.5	930.4
96	8/18/2023	11:30:52	888.6	935.6	950	923.6
97	8/18/2023	12:30:52	883.7	930.4	945	917.6
98	8/18/2023	13:30:52	881	927.9	942.8	914.5
99	8/18/2023	14:30:52	874.7	921.4	936.3	906.8
100	8/18/2023	15:30:52	861	908	923.9	892.5
101	8/18/2023	16:30:52	856.9	904.6	920.8	889.1
102	8/18/2023	17:30:52	849.3	895.2	911.3	879
103	8/18/2023	18:30:52	843.6	890	906	872.5
104	8/18/2023	19:30:52	838	884.6	900.3	865.5
105	8/18/2023	20:30:52	831.2	878.2	893.8	858.4
106	8/18/2023	21:30:52	832.3	877.1	890.6	856.2
107	8/18/2023	22:30:52	826.8	871.7	885.2	850.1
108	8/18/2023	23:30:51	823.3	868.7	882.8	847.1
109	8/19/2023	0:30:51	816.7	863	875.4	838.3
110	8/19/2023	1:30:51	810.3	857.4	870.2	831.5
111	8/19/2023	2:30:51	804.8	851.7	864.6	823.9
112	8/19/2023	3:30:51	798.8	845.7	858.7	816.2
113	8/19/2023	4:30:51	791.5	839.3	852.5	807.6

114	8/19/2023	5:30:51	785.2	832.1	845.8	798.6
115	8/19/2023	6:30:51	777.6	825.5	838.4	788.3
116	8/19/2023	7:30:51	770.1	817.7	830.8	777.9
117	8/19/2023	8:30:51	762	810.4	823.7	767.4
118	8/19/2023	9:30:51	754.4	802.9	816.3	757.7
119	8/19/2023	10:30:51	748	795.6	810.1	747.8
120	8/19/2023	11:30:51	736.8	785.6	800.1	735
121	8/19/2023	12:30:51	730.2	778.7	793.5	725.9
122	8/19/2023	13:30:51	723.5	772	787.1	717.1
123	8/19/2023	14:30:51	716.8	764.5	780.1	708.2
124	8/19/2023	15:30:51	710.4	757.4	772.7	699.2
125	8/19/2023	16:30:51	704.4	750.8	766.4	691
126	8/19/2023	17:30:51	698	743.4	759.5	682.4
127	8/19/2023	18:30:51	691.5	736.7	752.9	674.1
128	8/19/2023	19:30:51	685.8	730.5	746.7	666.4
129	8/19/2023	20:30:51	680.3	724.1	740.7	658.8
130	8/19/2023	21:30:50	672.8	716.7	732.7	649.4
131	8/19/2023	22:30:50	666.9	710	726.3	641.4
132	8/19/2023	23:30:50	660.8	703.2	719.7	633.6
133	8/20/2023	0:30:50	654	696	712.3	625.5
134	8/20/2023	1:30:50	649.7	690.6	706.3	618.6
135	8/20/2023	2:30:50	642.6	683.5	699.4	610.4
136	8/20/2023	3:30:50	636.9	676.8	692.1	602.5
137	8/20/2023	4:30:50	632.1	671.6	686.1	596.4
138	8/20/2023	5:30:50	627.6	666.3	680.6	590.7
139	8/20/2023	6:30:50	621.9	659.9	674	583.7
140	8/20/2023	7:30:50	616.5	654	667.5	576.9
141	8/20/2023	8:30:50	608.2	646.3	659.8	568.2
142	8/20/2023	9:30:50	602.2	640	652.7	560.9
143	8/20/2023	10:30:50	598.1	635.3	647.7	555.7
144	8/20/2023	11:30:50	592.1	629.4	641.6	549.1
145	8/20/2023	12:30:50	586.4	623	635	541.8
146	8/20/2023	13:30:50	580.7	616	628	534.1
147	8/20/2023	14:30:50	573.6	608.2	620.4	525.9
148	8/20/2023	15:30:50	568.3	602.2	614.7	519.6
149	8/20/2023	16:30:50	562.4	596.2	608.5	512.7
150	8/20/2023	17:30:50	556.7	590.1	602.3	505.7
151	8/20/2023	18:30:50	550.9	585	597.3	500.3
152	8/20/2023	19:30:50	545.6	579.3	591.9	494.3
153	8/20/2023	20:30:49	539.5	572.9	586.1	487.6
154	8/20/2023	21:30:49	533.1	566.2	579.5	480.3
155	8/20/2023	22:30:49	527.2	560.4	574.1	474.1
156	8/20/2023	23:30:49	521.9	554.6	568.5	468.1

157	8/21/2023	0:30:49	516.6	548.6	562.5	461.7
158	8/21/2023	1:30:49	511.7	543.5	558.2	457.2
159	8/21/2023	2:30:49	502.9	535.1	551	449.2
160	8/21/2023	3:30:49	498.7	530	546	443.8
161	8/21/2023	4:30:49	492.8	523.2	540.5	437.8
162	8/21/2023	5:30:49	487.7	518.2	535.8	433
163	8/21/2023	6:30:49	482.6	513.6	531.5	428.7
164	8/21/2023	7:30:49	477.8	508.7	527.2	424.5
165	8/21/2023	8:30:49	473.2	504.8	523.4	115.9

Anexo 3. Equações das curvas de arrefecimento

Anexo A3-1 Resultados das amostras do primeiro teste.

Tipo	Equação	Coeficiente de Determinação(R^2)	Comentários
Linear	$T(t) = -0,0667t + 1212,5$	0,9252	
Exponencial	$T(t) = 1239,8e^{-8 \times 10^{-5}t}$	0,8813	
Logarítmica	$T(t) = -144,4 \ln t + 2066,1$	0,5278	
Polinomial	$T(t) = -7 \times 10^{-6}t^2 + 0,0052t + 1093,9$	0,9968	Modelo Robusto

Tipo	Equação	Coeficiente de Determinação(R^2)	Comentários
Linear	$T(t) = -0,0658t + 1247,6$	0,9056	
Exponencial	$T(t) = 1321,4e^{-8 \times 10^{-5}t}$	0,8619	
Logarítmica	$T(t) = -140,1 \ln t + 2070,5$	0,5002	
Polinomial	$T(t) = -8 \times 10^{-6}t^2 + 0,0152t + 1114$	0,9971	Modelo Robusto

Tipo	Equação	Coeficiente de Determinação(R^2)	Comentários
Linear	$T(t) = -0,063t + 1241,3$	0,8855	
Exponencial	$T(t) = 1309,6e^{-7 \times 10^{-5}t}$	0,8451	
Logarítmica	$T(t) = -131,7 \ln t + 2009,4$	0,4717	
Polinomial	$T(t) = -9 \times 10^{-6}t^2 + 0,0233t + 1098,9$	0,9964	Modelo Robusto

Tipo	Equação	Coeficiente de Determinação(R^2)	Comentários
Linear	$T(t) = -0,0782t + 1286,4$	0,8983	
Exponencial	$T(t) = 1410,2e^{-1 \times 10^{-4}t}$	0,7949	
Logarítmica	$T(t) = -167,1 \ln t + 2269,4$	0,4996	
Polinomial	$T(t) = -1 \times 10^{-5}t^2 + 0,0199t + 1124,5$	0,9926	Modelo Robusto

Anexo A3-2 Resultados das amostras do primeiro teste.

Tipo	Equação	Coeficiente de Determinação(R^2)	Comentários
Linear	$T(t) = -0,0773t + 1255,9$	0,9397	
Exponencial	$T(t) = 1344,4e^{-9 \times 10^{-5}t}$	0,8794	
Logarítmica	$T(t) = -158,8 \ln t + 2192,7$	0,5677	
Polinomial	$T(t) = -8 \times 10^{-6}t^2 + 0,0019t + 1141,1$	0,9993	Modelo Robusto

Tipo	Equação	Coeficiente de Determinação(R^2)	Comentários
Linear	$T(t) = -0,0638t + 1252,6$	0,8779	
Exponencial	$T(t) = 1311,9e^{-7 \times 10^{-5}t}$	0,8267	
Logarítmica	$T(t) = -124,4 \ln t + 1971,7$	0,4781	
Polinomial	$T(t) = -1 \times 10^{-5}t^2 + 0,0276t + 1113,4$	0,9982	Modelo Robusto

Tipo	Equação	Coeficiente de Determinação (R^2)	Comentários
Linear	$T(t) = -0,0557t + 1218,4$	0,8819	
Exponencial	$T(t) = 1260,8e^{-6 \times 10^{-5}t}$	0,8416	
Logarítmica	$T(t) = -107,9 \ln t + 1840$	0,4728	
Polinomial	$T(t) = -9 \times 10^{-6}t^2 + 0,0023t + 1098,4$	0,9993	Modelo Robusto

Tipo	Equação	Coeficiente de Determinação (R^2)	Comentários
Linear	$T(t) = -0,0660t + 1237,2$	0,8970	
Exponencial	$T(t) = 1300,7e^{-8 \times 10^{-5}t}$	0,8473	
Logarítmica	$T(t) = -130 \ln t + 1991,4$	0,4974	
Polinomial	$T(t) = -9 \times 10^{-6}t^2 + 0,0203t + 1105,7$	0,9993	Modelo Robusto

Anexo A3-3 Resultados das amostras do primeiro teste.

Tipo	Equação	Coeficiente de Determinação (R^2)	Comentários
Linear	$T(t) = -0,0760t + 1257,4$	0,9561	
Exponencial	$T(t) = 1400,7e^{-1 \times 10^{-4}t}$	0,8895	
Logarítmica	$T(t) = -190,5 \ln t + 2420$	0,5835	
Polinomial	$T(t) = -6 \times 10^{-6}t^2 + 0,0138t + 1142,3$	0,9988	Modelo Robusto

Tipo	Equação	Coeficiente de Determinação (R^2)	Comentários
Linear	$T(t) = -0,0660t + 1270,2$	0,9035	
Exponencial	$T(t) = 1374,3e^{-8 \times 10^{-5}t}$	0,8419	
Logarítmica	$T(t) = -157,3 \ln t + 2211,8$	0,4973	
Polinomial	$T(t) = -8 \times 10^{-6}t^2 + 0,0173t + 1116,1$	0,9993	Modelo Robusto

Tipo	Equação	Coeficiente de Determinação (R^2)	Comentários
Linear	$T(t) = -0,065t + 1265,6$	0,8926	

Exponencial	$T(t) = 1369,1e^{-8 \times 10^{-5}t}$	0,8289	
Logarítmica	$T(t) = -154,2 \ln t + 2187,2$	0,4858	
Polinomial	$T(t) = -8 \times 10^{-6}t^2 + 0,0221t + 1104,3$	0,9994	Modelo Robusto

Tipo	Equação	Coeficiente de Determinação(R^2)	Comentários
Linear	$T(t) = -0,0792t + 1319,2$	0,9066	
Exponencial	$T(t) = 1488,7e^{-1 \times 10^{-4}t}$	0,8316	
Logarítmica	$T(t) = -189,3 \ln t + 2453,8$	0,5029	
Polinomial	$T(t) = -9 \times 10^{-6}t^2 + 0,0018t + 1139,5$	0,9976	Modelo Robusto