



**UNIVERSIDADE  
E D U A R D O  
MONDLANE**

**FACULDADE DE ENGENHARIA**

**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA**

**LICENCIATURA EM ENGENHARIA QUÍMICA**

**Relatório de Estágio Profissional**

**ESTUDO E ANÁLISE DE INSTABILIDADE NA MUDANÇA TECNOLÓGICA DE  
CÉLULAS ELECTROLÍTICAS DE PRODUÇÃO DE ALUMÍNIO, DO MODELO AP35  
PARA O MODELO AP3XLE**

**(Caso de Estudo: Mozal)**

**Autor:**

Mate, Estácio

**Supervisor**

Mestre Rodrigues Manjate, Eng.º

Maputo, Maio de 2025

**Autor:**

Estácio Mate

**ESTUDO E ANÁLISE DE INSTABILIDADE NA MUDANÇA TECNOLÓGICA DE  
CÉLULAS ELECTROLÍTICAS DE PRODUÇÃO DE ALUMÍNIO, DO MODELO AP35  
PARA O MODELO AP3XLE**

**(Caso de Estudo: Mozal)**

Relatório submetido ao Departamento de Engenharia Química, Faculdade de Engenharia, da Universidade Eduardo Mondlane, como requisito parcial para a obtenção do grau de Licenciatura em Engenharia do Química

**Supervisor:**

---

Mestre Rodrigues Manjate, Eng.º

**Chefe do Departamento:**

---

Prof. Dr. Clemêncio Nhantumbo, Eng.º

Maputo, Maio de 2025

## **TERMO DE ENTREGA DO RELATÓRIO DE ESTÁGIO PROFISSIONAL**

Declaro que o estudante Estácio Mate entregou no dia \_\_\_\_/\_\_\_\_/2025 as \_\_\_\_ cópias do Relatório do seu Estágio Profissional, intitulado: **Estudo e Análise de Instabilidade na Mudança Tecnológica de Células Electrolíticas de Produção de Alumínio, do Modelo AP35 para o Modelo AP3XLE (Caso de Estudo: Mozal).**

Maputo, \_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ de 2025

Chefe da Secretaria

---

## DECLARAÇÃO DE HONRA

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

Maputo, \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ de 20\_\_\_\_

---

(Estácio Mate)

## AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço ao Deus Todo-Poderoso, pela sua graça e misericórdia que é sobre mim em todas áreas da minha vida, em especial no ramo académico pela força, coragem e ânimo.

À toda minha família, especialmente aos meus pais Ernesto Estácio Mate e Josefa Fernando Chembene Mate pelo apoio, suporte e investimento na minha educação e aos meus irmãos Lionel Mate e Ludmila Suely Mate pela motivação diária na compilação do presente trabalho.

À Universidade Eduardo Mondlane, pelo empenho em formar dia após dia profissionais de modo a contribuir para o desenvolvimento do nosso Moçambique e em especial a Faculdade de Engenharia e aos professores do Departamento de Engenharia Química por cada lição e todo o acompanhamento em minha formação. Agradeço de forma especial ao meu supervisor, Mestre Rodrigues Manjate pelo suporte e acompanhamento no processo de realização do trabalho final.

À toda turma de Engenharia Química 2020, por todos os momentos passados, pela ajuda, suporte e pelos esforços nos grupos de estudo até que seja possível concluir o curso com êxito. Agradeço de forma especial ao meu colega Sérgio Anacleto Manjaze pelo encorajamento para que este trabalho fosse possível e por todo suporte nesta minha jornada académica.

À empresa MOZAL pela oportunidade de estágio, que me agregou tanto conhecimento e experiência profissional, permitindo que fosse possível aplicar os conhecimentos adquiridos durante a minha formação académica. Agradeço especialmente a equipa de Processos do Departamento de Redução pela recepção, encorajamento e motivação neste início de carreira, especialmente aos meus tutores Lino Armando, Alberto Nhacassane, Amilcar Chotai, Pascoal Banze, Mário Cossa e Joaquim Balate, serei eternamente grato pelos ensinamentos e pela rica mentoria e motivação.

Fora do fórum académico, quero agradecer a Igreja Ministério Poder do Evangelho, em especial aos meus pais espirituais, General Dr. Apóstolo Gerson Daracube e Profetisa Ercília Fermengas Daracube pelo apoio e suporte espiritual ao longo de toda jornada académica.

## Abstract

The production of primary aluminum is carried out through a process known as the Hall-Héroult process, which involves the electrochemical reduction of alumina into aluminum in electrolytic cells, commonly referred to as pots or electrolytic cells. The electrolytic cell technology used was designed by Aluminium Pechiney, a company that has invested significantly in developing models of electrolytic cells aimed at increasing production capacity while reducing aluminum production costs, minimizing the anode effect (caused by low alumina concentration in the electrolytic bath), and reducing greenhouse gas emissions.

This study analyzes the instability resulting from the technological transition of electrolytic cells from the AP35 model to the AP3XLE model at MOZAL. The specific objectives of the study were to: identify the factors contributing to the instability of the electrolytic cells, identify and quantify the types of instability, and propose potential solutions to reduce instability during amperage increase.

To address these specific objectives, data collection was conducted with the support of the laboratory in collaboration with the measurement team. Due to the instability crisis particularly evident in pot line 1 a detailed analysis was carried out on several operational quality parameters of the electrolytic cells, namely: iron and silicon concentration in the aluminum, temperature of the electrolytic bath, metal and bath height in the pot, pot superheat, energy efficiency, and other parameters used to monitor cell stability such as WRMI, LF (low frequency), and HF (high frequency).

It was observed that the instability was most pronounced between mid-November 2023 and January 2024, resulting in a reduction of energy efficiency by approximately 4.85%, indicating low productivity and significant energy loss. During the crisis period, contamination of aluminum was recorded with peaks of 7650 ppm of iron and 750 ppm of silicon. As a result, most of the aluminum produced was not sold but rather stored in the harbour, at Matola. However, it was concluded that the electrolytic cells have dynamic behavior and that increasing the amperage without conditioning the cells to handle the increase was the main cause of the instability—especially anodic instability.

Keywords: Magnetohydrodynamic Instability, Electrolytic Cells, Mozal.

## RESUMO

A produção de alumínio primário é feita através de um processo denominado Hall-Héroult, que consiste na redução electroquímica da alumina em alumínio, em células electrolíticas mais conhecidos como potes ou cubas electrolíticas. A tecnologia de células electrolíticas usadas foram desenhados pela Aluminium Pechiney technology, que tem trabalhado bastante na construção de modelos de células electrolíticas com objectivo de aumentar a capacidade de produção reduzindo os custos de produção do alumínio, o efeito anódico (baixa concentração de alumina no banho electrolítico) e a redução de emissão de gases de efeito de estufa.

O presente estudo e análise de instabilidade na mudança tecnológica de células electrolíticas de produção de alumínio, do modelo AP35 para o modelo AP3XLE na MOZAL, teve como objectivo específico: Identificar os factores que contribuíram para a instabilidade das células electrolíticas, identificar os tipos de instabilidade e quantificá-las, e propor possíveis soluções para reduzir a instabilidade durante o aumento da amperagem.

Para responder os objectivos específicos foi feita uma coleta de dados com a ajuda do laboratório em cooperação com a equipe de medição. Tendo a crise causada pela instabilidade, principalmente na linha 1 de produção, fez-se uma análise minuciosa de alguns parâmetros de qualidade operacional da célula electrolítica, nomeadamente: concentração de ferro e silício no alumínio, temperatura do banho electrolítico, altura do metal e do banho no pote, superaquecimento no pote, eficiência energética e alguns parâmetros que ajudam a monitorar a estabilidade tais como: WRMI, LF (low frequency) e HF (high frequency).

Foi possível verificar que a instabilidade se fez sentir mais nos meados de Novembro de 2023 até Janeiro de 2024, causando uma redução de eficiência energética, cerca de 4.85% simbolizando baixa produtividade com elevada perda de energia. Durante o período da crise foi possível verificar a contaminação do alumínio com o pico de 7650 ppm de ferro e 750 ppm de silício sendo assim, maior parte o alumínio não comercializado mais sim armazenado no porto da Matola. Contudo foi possível verificar que as células electrolíticas tem um comportamento dinâmico e o aumento da amperagem sem condicionar as células electrolíticas para suportar o aumento foi a principal causa da Instabilidade, principalmente a instabilidade anódica.

**Palavras-chave:** Instabilidade Magneto-hidrodinâmica, Células Electrolíticas, Mozal.

## ÍNDICE

|   |     |
|---|-----|
| TERMO DE ENTREGA DO RELATÓRIO DE ESTÁGIO PROFISSIONAL ..... | i   |
| DECLARAÇÃO DE HONRA.....                                    | ii  |
| AGRADECIMENTOS .....  | iii |
| RESUMO.....   | 1   |
| LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS .....                      | 8   |
| CAPÍTULO I: CONSIDERAÇÕES GERAIS.....                       | 9   |
| 1.1. Introdução.....  | 9   |
| 1.2. Problemática.....                                      | 11  |
| 1.3. Objectivos.....  | 12  |
| 1.3.1. Objectivo Geral:.....                                | 12  |
| 1.3.2. Objectivos específicos: .....                        | 12  |
| 1.4. Justificação da Escolha do Tema .....                  | 13  |
| 1.5. Metodologia do Trabalho .....                          | 14  |
| 1.5.1. Revisão bibliográfica .....                          | 14  |
| 1.5.2. Exposição ao local de estágio .....                  | 14  |
| 1.5.3. Tratamento e análise de dados .....                  | 14  |
| 1.5.4. Elaboração do relatório .....                        | 14  |
| 2. CAPÍTULO II: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....                  | 16  |
| 2.1. Alumínio e suas propriedades .....                     | 16  |
| 2.2. Historial da Indústria de Produção de Alumínio .....   | 17  |
| 2.3. Produção de alumínio primário em África.....           | 18  |
| 2.4. Matéria-prima para a produção de alumínio .....        | 19  |
| 2.4.1. Alumina.....   | 20  |
| 2.4.2. Ânodos de carbono .....                              | 22  |

|        |   |    |
|--------|---|----|
| 2.4.3. | Materiais electrolíticos.....   | 23 |
| 2.4.4. | Corrente eléctrica.....   | 25 |
| 2.5.   | Processo de Hall-Héroult .....  | 27 |
| 3.     | CAPÍTULO III: ESTUDO DE CAMPO .....                                   | 28 |
| 3.1.   | MOZAL.....  | 28 |
| 3.2.   | Departamento de Redução .....   | 32 |
| 3.3.   | Células Electrolíticas.....   | 33 |
| 3.4.   | Células Electrolíticas do Modelo AP3XLE .....                         | 35 |
| 3.5.   | Desenvolvimento Células Electrolíticas do Modelo AP3XLE .....         | 35 |
| 3.6.   | Instabilidade do pote .....   | 37 |
| 3.7.   | Impacto de Instabilidade no Pote .....                                | 39 |
| 3.8.   | Impacto da Troca dos Ânodos na Instabilidade .....                    | 40 |
| 3.9.   | Impacto do Material de Cobertura dos Ânodos na Instabilidade .....    | 41 |
| 4.     | CAPÍTULO IV: APRESENTAÇÃO, ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS ..      | 43 |
| 4.1.   | Eficiência Energética.....  | 43 |
| 4.2.   | Intensidade da Corrente Eléctrica .....                               | 44 |
| 4.3.   | Concentração de Ferro .....   | 45 |
| 4.4.   | Concentração de Silício .....   | 46 |
| 4.5.   | Altura de Metal .....   | 47 |
| 4.6.   | Temperatura do Banho.....   | 48 |
| 4.7.   | Altura do Banho.....  | 50 |
| 4.8.   | Parâmetro WRMI de instabilidade.....                                  | 50 |
| 4.9.   | Parâmetro LF ( <i>low frequency</i> ) de Instabilidade Catódica.....  | 52 |
| 4.10.  | Parâmetro HF ( <i>high frequency</i> ) de Instabilidade Anódica ..... | 53 |
| 4.11.  | Superaquecimento.....   | 54 |

|      |   |    |
|------|---|----|
| 5.   | CAPÍTULO V: CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES..... | 55 |
| 5.1. | Conclusões .....                            | 55 |
| 5.2. | Recomendações .....                         | 56 |
| 6.   | CAPÍTULO VI: BIBLIOGRAFIAS .....            | 57 |
| 6.1. | Bibliografia Referenciada .....             | 57 |
| 6.2. | Bibliografia Consultada.....                | 58 |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 2.1: Capacidade anual de produção de fundidoras de alumínio .....             | 19 |
| Figura 2.2: Diagrama simplificado de processo de Bayer para produção de alumina..... | 20 |
| Figura 2.3: Diagrama de fases do sistema (NaF-AlF <sub>3</sub> ).....                | 24 |
| Figura 3.1: Ilustração do Projecto Mozal.....  | 28 |
| Figura 3.2: Ilustração de ligotes de alumínio no porto da Matola .....               | 29 |
| Figura 3.3: Interligação do departamento de Redução com outros departamentos .....   | 32 |
| Figura 3.4: Organização estrutural do departamento de redução .....                  | 33 |
| Figura 3.5: Representação esquemática de uma célula electrolítica.....               | 34 |
| Figura 3.6: Célula electrolítica do modelo APXLE da Mozal.....                       | 35 |
| Figura 3.8: Célula electrolítica em instabilidade severa .....                       | 40 |
| Figura 3.9: Ilustração de pote estável através do ALPSYS .....                       | 42 |
| Figura 3.10: Ilustração de um pote instável através do ALPSYS.....                   | 42 |

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

|  |    |
|--|----|
| Gráfico 4.1: Variação da eficiência energética em função do tempo .....                    | 43 |
| Gráfico 4.2: Variação e frequência de corte de corrente eléctrica em função do tempo ..... | 44 |
| Gráfico 4.3: Variação da concentração de ferro no alumínio em função do tempo .....        | 45 |
| Gráfico 4.4: Variação da concentração de silício no alumínio .....                         | 46 |
| Gráfico 4.5: Variação da altura do metal em função do tempo .....                          | 47 |
| Gráfico 4.6: Variação da temperatura do banho em função do tempo.....                      | 48 |
| Gráfico 4.7: Variação da altura do banho em função do tempo.....                           | 50 |
| Gráfico 4.8: Variação do parâmetro WRMI de Instabilidade com o tempo .....                 | 51 |
| Gráfico 4.9: Variação da Instabilidade catódica com o tempo .....                          | 52 |
| Gráfico 4.10: Variação de instabilidade anódica em função do tempo.....                    | 53 |
| Gráfico 4.11: Variação do superaquecimento em função do tempo.....                         | 54 |

## LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

$Al_2O_3$ : Alumina

Al: Alumínio

AP: Aluminium Pechiney

C: Carbono

$CO_2$ : Dióxido de carbono

GJ: Gigajoules

g: Gramas

°C: Graus Celcius

$Na_3AlF_6$ : Hexafluoraluminato de sódio (criolita)

$Al(OH)_3$ : Hidróxido de alumínio

$NaOH$ : Hidróxido de sódio

HF: High frequency (frequências altas)

LME: London Metal Exchange LF: Low frequency (frequências baixas)

$\mu$ : Micro

MOZAL: Moçambique alumínios

$\Omega$ : Ohm

%: Percentagem

kA: Quilo amperes

SH: Superaquecimento

$AlF_3$ : Trifluoreto de alumínio

Tar: Voláteis de alcatrão.

## CAPÍTULO I: CONSIDERAÇÕES GERAIS

### 1.1. Introdução

A indústria moderna de produção de alumínio primário está continuamente buscando reduzir o consumo de energia da célula e tem um desafio de atingir a meta de reduzir pela metade as emissões de gases de efeito estufa até 2050, enquanto a demanda por alumínio deve aumentar de 2 a 3 vezes até o mesmo ano. A eficiência energética desempenhará um papel importante para atingir a meta.

Atualmente o alumínio é o metal não ferroso mais utilizado pela indústria mundial de bens de consumo, sendo que sua demanda tem crescido de maneira consistente nas últimas décadas. Sua aplicação é bastante variada, sendo empregado desde a fabricação de painéis e outros recipientes, condutores elétricos, automóveis, aviões e até naves espaciais. A produção mundial de alumínio metálico primário gira em torno de 70.5 milhões de toneladas por ano (International Aluminium Institute, 2023), enquanto a produção em Moçambique é de aproximadamente 578 mil toneladas por ano (South 32, 2023).

Assim, atualmente o alumínio metálico primário é obtido por um processo electroquímico de redução da alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) chamado processo Hall-Héroult, desenvolvido independentemente em 1886 por Charles Martin Hall (EUA) e Paul Héroult (França).

O processo Hall-Héroult para a produção de alumínio é baseado na redução electroquímica de alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) dissolvida em um electrólito à base de criolita ( $\text{Na}_3\text{AlF}_6$ ), produzindo o alumínio metálico. O processo acontece em temperaturas em torno de  $960^\circ\text{C}$ . Uma vez reduzido, o alumínio metálico possui densidade maior que o banho e é imiscível, depositando-se assim na camada inferior do reactor chamada célula electrolítica.

Uma célula electrolítica, além de conter fisicamente as substâncias envolvidas na reacção, tem a função de fornecer a corrente eléctrica necessária para que ocorra a electrólise e a geração do calor. Assim, faz-se necessária uma série de condutores eléctricos capazes de prover correntes contínuas em cada célula. Muitas células electrolíticas podem ser ligadas em série (algumas centenas, em geral) em uma planta de produção de alumínio.

Este processo foi desenvolvido há mais de um século e, conceitualmente, do ponto de vista termodinâmico, permanece inalterado até hoje. Os avanços tecnológicos colhidos ao longo desse tempo dizem respeito à melhoria dos equipamentos, produção, rendimento do processo e controle de poluentes.

O centro do funcionamento de uma célula electrolítica é a cavidade ocupada pelos líquidos. Estes são imiscíveis formando um sistema bifásico: o banho electrolítico na parte superior, (doravante chamado apenas de "banho") e o alumínio líquido na parte inferior (doravante chamado apenas de "metal"). Se a força da gravidade fosse a única presente neste sistema, a interface entre os dois líquidos seria perfeitamente plana e horizontal. Entretanto a presença de corrente eléctrica atravessando o banho e o metal, acopladas com campos magnéticos gerados pelos condutores eléctricos, resulta em forças electromagnéticas, também chamadas de forças de Lorentz.

As forças electromagnéticas promovem a movimentação dos fluidos e a deformação da interface banho-metal. Além disso, a configuração magnética das cubas favorece o mecanismo de excitação retro alimentado entre as forças e as ondas geradas por essas forças. Esse fenômeno é chamado de Instabilidade Magneto-hidrodinâmica (MHD).

## 1.2. Problemática

A instabilidade é um factor determinante na eficiência de operação de uma célula electrolítica. Quando a eficiência de corrente é alta, mais alumínio é fabricado com a mesma energia eléctrica fornecida. O aumento de 1% na eficiência de corrente representa economia da ordem de alguns Mega Watts em uma planta. A presença de ondas instáveis dentro de uma célula electrolítica favorece a reacção de reoxidação, como será mostrado com detalhe mais adiante, reduzindo a eficiência de corrente, e em casos extremos, põe em risco a integridade dos operadores e dos equipamentos. Investigar as causas da instabilidade nas células de electrolíticas de alumínio pode levar a um melhor desempenho da célula.

Entender a variação na voltagem é crítico para as células, porque a magnitude da voltagem determina o padrão de consumo de energia no processo e, portanto, qualquer economia na voltagem pode economizar energia. A voltagem afecta a eficiência de corrente da célula e uma voltagem de célula ideal leva a uma maior eficiência de corrente sem comprometer o consumo de energia.

Para estimar a perda na eficiência de corrente nas células de electrolíticas devido a instabilidades de metal, medições são realizadas e dados são analisados. O presente estudo analisa o efeito das flutuações de voltagem (ruído) durante a instabilidade do metal, juntamente com a causa da instabilidade e seu efeito na eficiência de corrente da célula.

Nesse contexto, surge a necessidade de se estudar e analisar as possíveis causas de instabilidade nas células electrolíticas da Mozal, logo após da implementação de um novo modelo tecnológico de células electrolíticas, com o objectivo reduzir o consumo de energia aumentando a amperagem.

### **1.3. Objectivos**

#### **1.3.1. Objectivo Geral:**

- ✓ Estudar e analisar a instabilidade na mudança tecnológica de células electrolíticas de produção de alumínio, do modelo AP35 para o modelo AP3XLE.

#### **1.3.2. Objectivos específicos:**

- ✓ Identificar os factores que contribuem para a instabilidade de uma célula electrolítica;
- ✓ Identificar os tipos de instabilidade e quantificá-las;
- ✓ Verificar o impacto da instabilidade na vida útil da célula electrolítica e
- ✓ Propor possíveis soluções para reduzir a instabilidade durante o aumento da amperagem.

#### 1.4. Justificação da Escolha do Tema

A Mozal, no final do ano 2023 e início de 2024, esteve numa grande crise que por pouco perdia a linha 1 de produção, mais de 100 células electrolíticas, devido á questões ligada a instabilidade. Este estudo analítico foi movido pela crise que houve na Mozal logo após a troca da tecnologia AP35 (*Aluminium Pechiney* 350 kA) para AP3XLE (*Aluminium Pechiney* 3xLow Energy), em 2018. Essa tecnologia demandou o aumento da corrente eléctrica de 350 kA para 378 kA, o que gerou uma grande instabilidade, causando quedas sucessivas de blocos ânodos em uma única célula electrolítica. Essa instabilidade gerou mais actividades operacionais não programadas do que as actividades programadas, fazendo com que estas ficassem atrasadas, tais como: troca de ânodos, sucção do metal, elevação do *beam* (haste metálica que transporta a corrente eléctrica para os ânodos) e cobertura dos ânodos. Esse atraso de actividades também afectou na qualidade de alumínio produzido que por sua foi contaminado pelo ferro presente nos *pins* (dispositivos que seguram o bloco anódico).

Por outro lado, o aumento da corrente é directamente proporcional ao aumento da produção e consumo do ânodo. Essa tecnologia foi implementada com objectivo de aumentar a quantidade e a velocidade de produção do alumínio reduzindo o consumo de energia, porém o projecto não foi bem-sucedido. Com base na crise vivida na Mozal, causada pela instabilidade, surge a necessidade de estudar e analisar as principais causas de instabilidades nas células electrolíticas de modo a evitar futuras crises durante o aumento da amperagem, pois a instabilidade de uma célula pode ser a principal causa de perda de uma linha de produção ou até em casos mais severos pode provocar acidentes e mortes.

## **1.5. Metodologia do Trabalho**

Para a realização do trabalho, seguiram-se os seguintes procedimentos:

### **1.5.1. Revisão bibliográfica**

A pesquisa consistiu na leitura de material relevante à construção da fundamentação teórica necessária para o tratamento do problema de pesquisa. Para o efeito, foi realizada a leitura de livros, artigos científicos, guiões de Procedimento Operacional Padrão (*Standard Operating Parameters*, “SOP”) da Mozal, trabalhos de licenciatura, relatórios de estágio e dissertações de mestrado, cuja temática tenha sido a produção de alumínio primário e outros temas complementares que fundamentassem e dessem sustentabilidade ao trabalho de pesquisa.

### **1.5.2. Exposição ao local de estágio**

O estágio foi realizado na empresa moçambicana de fundição de alumínio, Mozal, especificamente no Departamento de Redução, de modo a conciliar o conhecimento teórico adquirido durante a formação académica com a prática, observar e compreender os processos industriais e identificar um tema de pesquisa relevante de modo a solucionar possíveis de problemas.

### **1.5.3. Tratamento e análise de dados**

Realizou-se o tratamento, a análise, interpretação e discussão dos dados obtidos pelas medições e pelas análises laboratoriais, fazendo o uso de gráficos e tabelas de forma a apresentar os resultados para uma melhor interpretação.

### **1.5.4. Elaboração do relatório**

O presente relatório compreende a informação obtida na revisão da literatura, o problema de pesquisa, os procedimentos realizados até a apresentação e discussão dos resultados. A compilação realizou-se seguindo o regulamento em vigor na Faculdade de Engenharia da Universidade Eduardo Mondlane para a elaboração de Relatório de Estágio.

## Estrutura do trabalho

O relatório é constituído por 7 capítulos, sendo que cada um destes se divide em vários subcapítulos para melhor organização da informação.

- ✓ **Capítulo I:** Considerações Gerais, dá a introdução do trabalho, apresentando os objectivos, a problemática, as metodologias usadas como também justificando a escolha do tema.
- ✓ **Capítulo II:** Revisão Bibliográfica, são apresentados os fundamentos teóricos extraídos da literatura base, descrevendo o processo de produção de alumínio como também da matéria-prima usada, apresentando ainda a célula electrolítica.
- ✓ **Capítulo III:** Estudo de Campo, descreve-se o local de realização do estágio e dos processos envolventes a produção do ânodo na indústria e é apresentada a metodologia usada na investigação, enfatizando os parâmetros de produção.
- ✓ **Capítulo IV:** Apresentação, Análise e Discussão dos Resultados, consiste na apresentação, nas análises e discussões dos resultados obtidos da investigação, relacionando com a literatura.
- ✓ **Capítulo V:** Conclusões e Recomendações, são apresentadas de forma sucinta as conclusões, recomendações, limitações deste trabalho e as perspectivas de trabalhos futuros.
- ✓ E por fim, no **Capítulo VI:** Bibliografias, são apresentados os documentos e livros referenciados e consultados para a elaboração do trabalho.

## 2. CAPÍTULO II: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. Alumínio e suas propriedades

O alumínio é um elemento químico, de símbolo *Al*, com número atômico 13, massa atômica aproximadamente à 27 u.m.a e faz parte do grupo 13 (família IIIA) da Tabela Periódica. Na temperatura ambiente é sólido, é o metal mais abundante na crosta terrestre e o terceiro elemento mais comum no mundo, atrás apenas do oxigênio e do silício. (Nhone, 2023) Ele não é encontrado em seu estado natural na crosta terrestre, sendo obtido a partir de seus óxidos e hidróxidos que formam a bauxita. (Abal, 2017)

À temperatura ambiente o alumínio apresenta estrutura cristalina cúbica de faces centradas (CFC) e o seu raio atômico é 0,143 nm. (Callister, 1997)

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/cm<sup>3</sup> – cerca de 1/3 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. Do ponto de vista da aplicabilidade é um material facilmente formado, maquinado e vazado, maleável, fácil de soldar e montar, propício a diferentes acabamentos superficiais, adequado para tratamentos térmicos e decorativo. Possui condutividades elétricas e térmicas elevadas, sendo utilizado em condutores elétricos. Além disso, não é tóxico, não é magnético e não gera faíscas quando atritado. É o segundo metal mais maleável (sendo primeiro o ouro), é o sexto metal mais dúctil, não é combustível, é reciclável, e possui elevado índice de reflectividade. (Martins, 2008)

Na tabela 1, 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 (módulo de elasticidade) 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.

**Tabela 1:** Comparação das propriedades físicas e mecânicas do alumínio com as de outros materiais.

| Propriedades                                  | Alumínio  | Aço-carbono | Aço-inoxidável | Cobre     |
|---|-----------|-------------|----------------|-----------|
| Densidade (g/cm <sup>3</sup> )                | 2.6 - 2.8 | 7.85        | 7.75 - 8.1     | 8.92      |
| Módulo de Young (GPa)                         | 69        | 190 - 210   | 190 - 210      | 110 - 128 |
| Resistividade eléctrica ( $10^{-9}\Omega/m$ ) | 28.2      | 130 - 250   | 75.7 - 1020    | 17        |
| Ponto de fusão (°C)                           | 660       | 1426 - 1538 | 1371 - 1454    | 1357      |
| Calor específico (J/kg.K)                     | 938       | 450 - 2081  | 420 - 500      | 395       |
| Conductividade térmica ( $W/m.k$ )            | 150 - 180 | 24.3 - 65.2 | 11.2 - 36.7    | 401       |
| Tensão de Cedência (MPa)                      | 215 - 505 | 186 - 758   | 207 - 552      | 70        |
| Tensão de Ruptura (MPa)                       | 230 - 570 | 276 - 1882  | 515 - 827      | ---       |

Fonte: Martins (2008)

## 2.2. Historial da Indústria de Produção de Alumínio

No final do século XVIII e início do século XIX, vários cientistas trabalharam na obtenção do alumínio. Em 1808, Humphrey Davy foi o mentor da descoberta do alumínio, ao fundir o ferro na presença do alumínio por electrólise (*Alumínio*, 2016).

Em 1825, o cientista Hans Cristian Oersted (1777-1851) descobriu uma forma de preparar cloreto de alumínio anidro, que seria um componente importante na produção de alumínio. Friedrich Wöhler (1800-1882) isolou este metal, em 1827, a partir da reação de cloreto de alumínio anidro com potássio, num cadinho de porcelana (William, 2012).

A refinação de alumínio propriamente dita teve início há aproximadamente 200 anos, sendo que antes da década de 1850, a sua produção era de difícil processo tornando este metal mais valioso que o ouro (Kvande, 2014).

Em 1856, o químico francês Henri Etienne Sainte-Claire Deville (1818-1881) produziu alumínio, substituindo o potássio por sódio e utilizando o mineral criolita ( $Na_3AlF_6$ ) como solvente para o óxido de alumínio ( $Al_2O_3$ ) (William, 2012).

Em 1886, o químico Charles Martin Hall (1863-1914) reforçou a descoberta de Deville, observando que o óxido de alumínio poderia tornar-se líquido a temperaturas mais baixas, quando misturado com a criolita e, coincidentemente, o cientista Paul Louis Toussaint Héroult (1863-1914) produzira também alumínio puro na presença de criolita. Embora os trabalhos destes cientistas tenham sido realizados de forma independente e se diferenciem somente no tamanho e na quantidade de ânodos de carbono utilizados, o processo patenteou-se como “Hall-Héroult”. Actualmente, o Hall-Héroult é o processo industrial mais utilizado para a produção de alumínio primário (Kvande, 2014).

### **2.3. Produção de alumínio primário em África**

Os 5 principais produtores de alumínio primário em África são:

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

A HILLSIDE Aluminium é o maior produtor de alumínio do hemisfério sul. A fundição está localizada em Richards Bay, na província sul-africana de KwaZulu-Natal, e é 100% de propriedade e operada pela South32, com capacidade de produção de metal sólido de 720.000 toneladas por ano (South32, 2023). A fundição produz alumínio para o mercado interno e externo. Para apoiar o desenvolvimento da indústria de alumínio na África do Sul, o metal líquido é fornecido para a Hulamin e outras empresas locais que vendem produtos nos mercados doméstico e de exportação.

A MOZAL (*Mozambique Aluminium*) foi inicialmente comissionada para produzir 250.000 toneladas por ano, seguida por uma extensão em 2003-04, e agora é a maior produtora de alumínio em Moçambique e a segunda maior na África, tendo uma produção anual total de cerca de 580.000 toneladas.

É responsável por 30% das exportações oficiais do país e também usa 45% da eletricidade produzida em Moçambique.

A EGYPTALUM (*Egypt Aluminum*) criada em 1975 é o maior produtor de alumínio do Egipto e um dos maiores de África, com uma produção anual total de cerca de 320.000 toneladas. A empresa é abastecida com a energia eléctrica pela represa Aswan High.

A VALCO (*Volta Aluminium Company's*) criada em 1948 em localizada em Gana é uma fundição de alumínio que se dedica a produção nominal de 200.000 toneladas de alumínio por ano.

A ALUCAM (*Cameroonian Aluminum*) opera em Edea e Douala em Camarões e está em actividade desde 1957. A ALUCAM emprega 480 pessoas e tem uma capacidade de produção anual de 100.000 toneladas de alumínio.

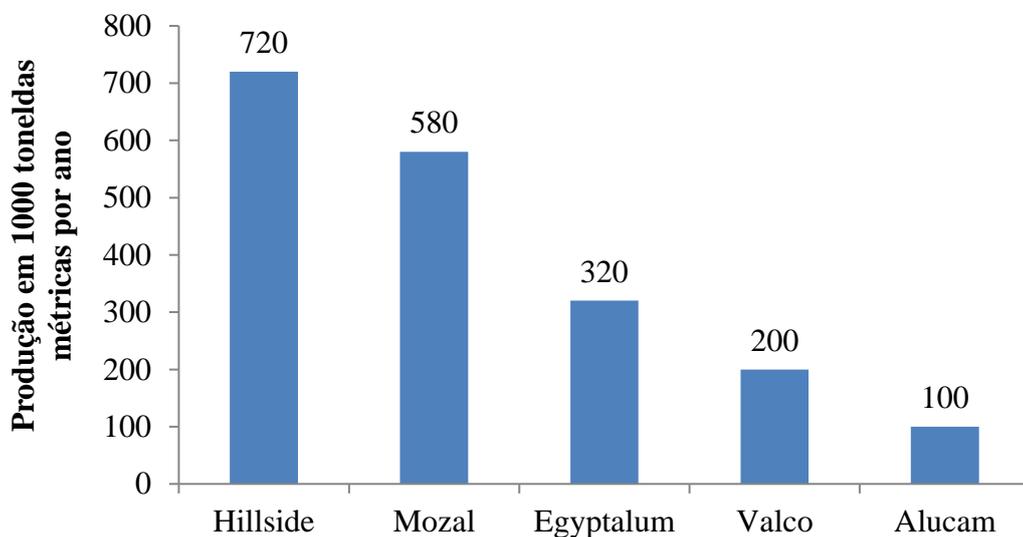


Figura 2.1: Capacidade anual de produção de fundidoras de alumínio

Fonte: The International Aluminium Institute, 2023

#### 2.4. Matéria-prima para a produção de alumínio

- ✓ Alumina (Óxido de alumínio)
- ✓ Ânodos de carbono
- ✓ Materiais electrolíticos
- ✓ Corrente eléctrica

### 2.4.1. Alumina

Alumina (óxido de alumínio -  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) 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 (Kolbeinsen, 2016). A alumina é obtida principalmente através do minério bauxite pelo processo de Bayer.

O processo de Bayer para a produção da alumina é dividida em 4 fases: digestão, clarificação, precipitação e calcinação. A Figura 2 ilustra o processo de Bayer para a produção da alumina.

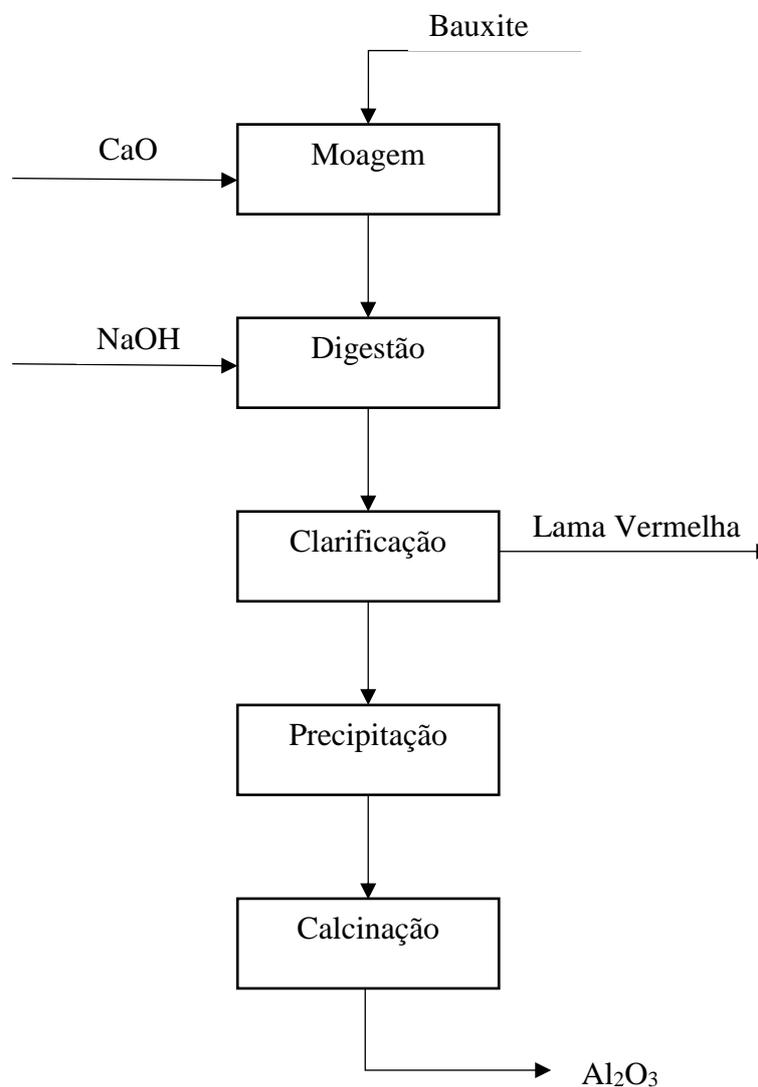


Figura 5.2: Diagrama simplificado de processo de Bayer para produção de alumina

Fonte: Adaptado pelo autor (2025)

### ✓ Digestão

O estágio inicial, denominada digestão, envolve, num primeiro momento, a moagem da bauxita ocorrendo primeiro a moagem húmida da bauxita com a adição de cal viva, que resulta na obtenção de uma mistura pastosa, seguida pela digestão propriamente dita com uma solução cáustica de hidróxido de sódio (NaOH) sob temperatura e pressão. As condições em que se processa a digestão (concentração, temperatura e pressão), variam de acordo com as propriedades da bauxita. Plantas modernas comumente operam em temperaturas entre 200 e 240°C, e pressão em torno de 30 atm (Silva Filho, 2007).

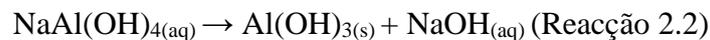
### ✓ Clarificação

Na fase da clarificação, a mistura é clarificada para remover as impurezas. Com excepção da alumina e da sílica, todos os outros componentes presentes na bauxita não se dissolvem, depositando-se assim no fundo, formando lama vermelha (Chemicals, 2023). O processo de filtração converte o óxido de alumínio em aluminatos de sódio solúveis,  $NaAlO_2$ , conforme a reacção 2.1.



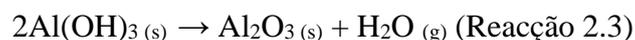
### ✓ Precipitação

A mistura límpida restante é adicionada aos precipitadores usando trocadores de calor, que transformam a mistura em licor frio. A sílica é precipitada da mistura devido ao aquecimento. Após este esfriamento é feita adição de uma pequena quantidade de cristais de alumina (semeadura) para estimular a precipitação, em uma operação reversa à digestão, conforme a reacção 2.2 (Silva Filho, 2007)



### ✓ Calcinação

A alumina cristalizada é encaminhada para a calcinação e o licor residual que contém NaOH e alumina é recirculada para a etapa de digestão. A calcinação é a etapa final do processo, em que a alumina é lavada para remover qualquer resíduo do licor e posteriormente seca. Em seguida a alumina é calcinada a aproximadamente 1000°C para desidratar os cristais, e forma assim cristais de alumina puros, de aspecto arenoso e branco, conforme ilustra a reacção 2.3 (Silva Filho, 2007).



## 2.4.2. Ânodos de carbono

Em uma célula electrolítica para obtenção de alumínio, o ânodo atua como condutor eléctrico através do qual passa a corrente contínua que facilita a dissolução da alumina.

Durante o processo de electrólise, utilizam-se ânodos de carbono (únicos ou pré-cozidos) que são consumidos durante a reacção. Os ânodos únicos são utilizados em células de *Soderberg* 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, 2014). O ânodo pré-cozido típico é feito de uma mistura de coque de petróleo, alcatrão de hulha e material de ânodo reciclado.

### ✓ Coque

O resíduo de coque do refino de petróleo é bastante puro e, portanto, tem sido a principal fonte de carbono para os ânodos. Este coque requer calcinação a cerca de 1200°C para remover constituintes voláteis e aumentar sua densidade, força e porosidade antes de ser adicionado à mistura do ânodo (Kvande, 2014).

### ✓ Alcatrão de Hulha

O alcatrão de hulha é usado como um agente aglutinante, e consiste em uma mistura complexa de compostos orgânicos aromáticos e heterocíclicos, que carbonizam com o tratamento térmico. Os voláteis do alcatrão são designados Tar.

Os ânodos de carbono contêm 13 a 16% em peso de alcatrão de hulha para ser usado como material aglutinante, ligando assim as partículas de coque e material de ânodo reciclado. O alcatrão de hulha líquido pode ser mantido a cerca de 200°C e transportado para as fundições de alumínio (Kvande, 2014).

### ✓ Material de ânodo reciclado

O material de ânodo reciclado, é o restante do ânodo usado que é removido da célula electrolítica durante a troca do ânodo. O teor de material de ânodo reciclado (butts) nos novos ânodos pode variar, mas normalmente usa-se entre 15 e 25% (Kvande, 2014).

Os ânodos reciclados fornecem conductividade e densidade adicional aos ânodos de carbono, diminuindo dessa forma a porosidade dos mesmos para evitar com que sejam consumidos rapidamente durante o processo de electrólise.

### 2.4.3. Materiais electrolíticos

Dado que o ponto de fusão da alumina é relativamente alto, e para que a dissolução possa ocorrer há pressões e temperaturas mais baixas, faz-se o uso de um banho rico em criolita e fluoreto de alumínio.

A criolita foi adoptada como solvente desta reacção devido a algumas das suas características especiais (Soares, 2010) É um dos poucos solventes para a alumina encontrados na natureza;

- ✓ Possui maior potencial de dissociação do que a alumina;
- ✓ No seu estado líquido possui condutividade eléctrica aceitável;
- ✓ Possui temperatura de fusão aceitável (~960 °C);
- ✓ Não é reactiva com o carbono ou alumínio, fazendo assim com que a reacção de electrólise de alumina produza alumínio em alto rendimento;
- ✓ Permitir a passagem da corrente eléctrica do ânodo para o cátodo;
- ✓ Possui baixa pressão de vapor.

O banho electrolítico apresenta uma composição química que influencia diretamente na formação da crosta e na eficiência da corrente. É composto por mais de 75% de criolita, sendo o remanescente composto por fluoreto de cálcio (4 – 8 %), trifluoreto de alumínio (5 – 13 %), alumina (1 – 5 %) e por vezes fluoreto de lítio (0 – 5 %) e de magnésio (0 – 5 %). A presença de alumina no banho tem impacto no desempenho da produção, pois o forno requer uma quantidade ideal da mesma (2 - 5% em massa) para que se mantenha a estabilidade (William, 2012).

#### ✓ **Criolita**

A criolita,  $Na_3AlF_6$  é o principal constituinte do electrólito usado na electrólise da alumina e com ponto de fusão em torno de 1011°C. A Criolita foi encontrada apenas em grandes quantidades na costa oeste da Groenlândia. Este depósito natural foi esgotado em 1987. É uma importante matéria-prima para extração de alumínio a partir da alumina. A criolita sintética é usada como electrólito na redução da alumina em alumínio devido a indisponibilidade de criolita natural em todo o mundo. A composição e as propriedades da criolita sintética são as mesmas da criolita natural, mas a criolita sintética geralmente é deficiente em fluoreto de sódio (Bhavan, 2015).

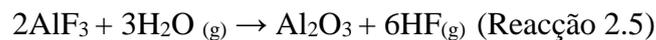
A criolita pode ser produzida pela reacção do ácido fluorídrico com uma solução alcalina de aluminato de sódio de acordo com a reacção geral 2.4.



### ✓ Fluoreto de Alumínio

O fluoreto de alumínio é adicionado como aditivo ao electrólito de criolita usado na electrólise. Sua fórmula química é  $\text{AlF}_3$ . Este composto químico não ocorre na natureza e é feito de espatoflúor em um processo semelhante ao da criolita. É marcado como um pó branco, mas pode apresentar tons de cor como resultado de impurezas.

(Kvande, 2014) explica que o fluoreto de alumínio,  $\text{AlF}_3$ , pode constituir 9 a 12% em peso do electrólito, quando registado em excesso na quantidade representada pela composição da criolita. O fluoreto de alumínio é consumido durante a operação normal por três mecanismos principais. Em primeiro lugar, o fluoreto de alumínio reage com o óxido de sódio que é sempre adicionado como impureza na alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). O segundo mecanismo de consumo ocorre quando o fluoreto de alumínio pode ser esgotado por hidrólise devido à humidade na célula, conforme a reacção 2.5.



E o terceiro mecanismo consiste nas perdas de fluoreto de alumínio por vaporização do electrólito. A espécie mais volátil desenvolvida a partir do electrólito é o vapor de tetrafluoroaluminato de sódio,  $\text{NaAlF}_4(g)$ . A figura 2.3 ilustra o diagrama de fases do sistema  $\text{NaF} - \text{AlF}_3$ , durante o processo de transformação química no banho electrolítico.

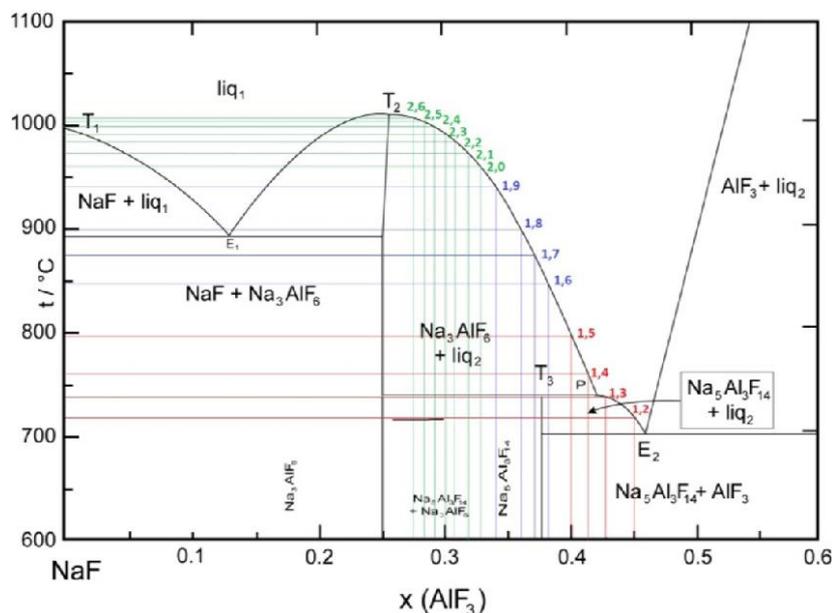


Figura 2.3: Diagrama de fases do sistema (NaF- $\text{AlF}_3$ )

Fonte: Nhone (2023)

À medida que aumentamos a concentração de  $\text{AlF}_3$ , forma-se uma mistura eutética E1, numa concentração de aproximadamente 13% (mol/mol) de  $\text{AlF}_3$ , e o Tlíquido do banho diminui. Se continuarmos aumentando a quantidade de  $\text{AlF}_3$  há um aumento no Tlíquido do electrólito até uma concentração de 25% (mol/mol) de  $\text{AlF}_3$ . Entretanto, a partir desta concentração, a temperatura de equilíbrio entre a fase líquida e a fase sólida cai muito rapidamente, tornando a concentração de  $\text{AlF}_3$  um importante fator de controlo no processo de redução, pois uma pequena variação em sua concentração influencia fortemente (grande variabilidade) o Tlíquido do electrólito. A Figura 2.3 mostra que em aproximadamente  $960^\circ\text{C}$ , que é a temperatura de operação da célula eletrolítica, que é representada pela linha tracejada horizontal, a taxa de variação da temperatura com a composição é alta, facto que pode resultar em variação nas variáveis de temperatura no sistema de controlo da célula.

#### 2.4.4. Corrente eléctrica

Electrólise é um processo de separação de elementos químicos presentes em um composto, através do uso de corrente eléctrica (Cardoso, 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. 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 (Da Silva, 2022). Define-se eficiência da corrente como a razão entre o metal produzido e a produção teórica, conforme apresentado na Equação 2.6:

$$\text{Eficiência Energética} = \frac{\text{Produção de alumínio metálico}}{\text{Produção teórica}} \quad (\text{Equação 2.6})$$

Primeira Lei de Faraday:

A quantidade de qualquer substância depositada, desenvolvida ou dissolvida em um eléctrodo é diretamente proporcional à quantidade de carga eléctrica que passa pelo circuito.

Número de Avogrado:  $6,023 \times 10^{23}$  Electrões em 1 mol

Carga elementar: (ou seja, carga de um único electrão):  $1,6022 \times 10^{-19}\text{C}$

1 mol de electrões =  $6,023 \times 10^{23}$  electrões  $\times 1,6022 \times 10^{-19}\text{C}$

Carga = 96485 C de carga = 1 Faraday

### Segunda Lei de Faraday:

A massa de diferentes substâncias produzidas pela mesma quantidade de eletricidade é diretamente proporcional às massas molares das substâncias em questão e inversamente proporcional ao número de electrões na semirreação relevante, conforme ilustra a equação 2.7.

$$\text{Produção teórica} = \frac{I * M * t}{z * F} \quad (\text{Equação 2.7})$$

Onde:

I = intensidade da corrente da linha (A)

M = massa molar (g/mol)

t = tempo (s)

z = valência

F = constante de Faraday (96.485 A/mol)

Massa atômica do Alumínio: 26.98g/mol

Valência do Alumínio: III

- ✓ São necessários 3 mol de eletrões para libertar 1 mol de Al
- ✓ Cada mol de Al pesa 26,98g
- ✓ Assim sendo, 1 mol de eletrões liberta 26,98/3 g Al
- ✓ Isto é 1 Faraday liberta 26,98/3 g Al

Faradays = (carga total/96485). Mas  $Q = I * t$  Logo Faradays = (corrente x tempo)/96485

Para Faradays de 24 horas = corrente x (24 x 60 x 60) /96485

1 Faraday liberta (26,98/3) g Al

Assim sendo, para 24 horas = corrente x (24 x 60 x 60) x (26,98/3) g Al = corrente x 8,053g Al. Para corrente de linha Mozal = 366kA, calcula-se a produção por vaso por dia. Contudo, a produção teórica é definida pela Equação 2.8:

$$\text{Produção Teórica} = 8,053 * I \quad (\text{Equação 2.8})$$

## 2.5. Processo de Hall-Hérault

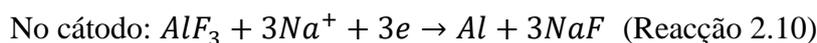
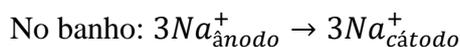
A produção industrial de alumínio primário é realizada pelo processo electrolítico de Hall-Hérault, no qual o óxido de alumínio ou alumina ( $Al_2O_3$ ) é dissolvido em um banho electrolítico constituído principalmente de criolita fundida ( $Na_3AlF_6$ ) e fluoreto de alumínio ( $AlF_3$ ) (Kvande & Drablos,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

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

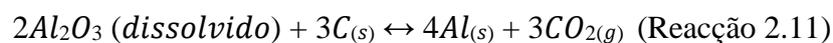
O banho electrolítico tem a função de permitir a passagem de corrente eléctrica do ânodo para o cátodo, dissolver a alumina e fornecer uma separação física entre o metal de alumínio líquido produzido catodicamente e o dióxido de carbono evoluído anodicamente (Kvande, 2012).

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

As principais reacções do eléctrodo são:



A equação balanceada da reacção electrolítica é:



Para a produção de 1 tonelada de alumínio são necessários 1930 Kg de alumina, 370 Kg de coque, 65 Kg de alcatrão de carvão, 15 Kg de produtos fluorinados e 13500 Kw/h de energia eléctrica e banho electrolítico. (Grjotheim & Kvande, 1993) citado por (Macuácuca, 2011).

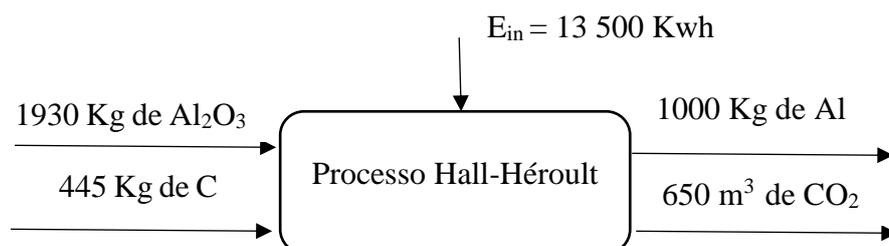


Figura 2.4: Balanço mássico e energético para produção de alumínio

Fonte: Adaptado pelo autor (2024)

### 3. CAPÍTULO III: ESTUDO DE CAMPO

Este trabalho de estudo e análise foi desenvolvida no âmbito do Estágio Profissional realizado na empresa Mozal S. A, de Março a Junho de 2024.

#### 3.1. MOZAL

A Mozal é o primeiro Mega-Projeto industrial implementado no país após a independência. Neste contexto, a Mozal é uma empresa moçambicana dedicada à produção de alumínio primário, localizada no distrito de Boane, em de Beluluane, a cerca de 20 km da cidade de Maputo (Figura 3.1). A produção mundial de alumínio metálico primário é estimada em 24 milhões de toneladas por ano, enquanto a contribuição de Moçambique através da empresa é estimada em 580.000 toneladas por ano (Gusbert, 2007)

A empresa tem um capital de investimento total de 2,0 bilhões de dólares americanos e com a participação do Governo moçambicano em 3,9%, Industrial Development Corporation (África do Sul) em 24%, Mitsubishi em 25% e detendo a maior percentagem BHP- Billiton (Reino Unido) em 47,1%, que por sua vez acabou vendendo suas acções para a South32, em 2015. (South32, 2023



Figura 3.1: Ilustração do Projecto Mozal

Fonte: South32 (2023)

O projeto começou em 1998 como parte de um programa de recuperação liderado pelo desejo ativo do governo moçambicano por investimento estrangeiro para ajudar a reconstruir a nação após a guerra civil do país no início dos anos 1990. A fábrica da Mozal foi inaugurada oficialmente em Setembro de 2000 com uma capacidade instalada de 250.000 toneladas/ano. A Mozal foi seguida por uma extensão (Mozal II) em Abril de 2003, aumentando a capacidade instalada para 580.000 toneladas. A Mozal é a segunda maior fundição de alumínio na África e segue a fundição de alumínio Hillside na África do Sul (South32, 2023).

A Mozal foi o primeiro grande investimento estrangeiro em Moçambique e é o maior projeto do setor privado no país, responsável por 30% das exportações oficiais do país e também usa 45% da eletricidade produzida em Moçambique.

Em Fevereiro de 2013, a Mozal assinou um acordo no qual fornecerá 50.000 toneladas de alumínio para a Midal, uma das maiores fabricantes mundiais de cabos de alumínio. A fábrica da Midal em Moçambique iniciou suas operações em 2014, com capacidade de 50.000 toneladas/ano de vergalhões de alumínio e 24.000 toneladas/ano de fios de alumínio. Esta foi a primeira vez que o alumínio produzido pela Mozal começou a ser usado em Moçambique.

O Terminal de Alumínio da Mozal, conforme ilustra a figura 3.2, localizado no porto da Matola, foi inaugurado a 16 de Março de 2000. O terminal tem capacidade para movimentar 1,6 milhões de toneladas por ano de matéria-prima para a produção de alumínio, essencialmente também alumina, coque e trifluoreto de alumínio. Até Março de 2012, a Mozal exportou mais de 5,5 milhões de toneladas de alumínio.



Figura 3.2: Ilustração de lingotes de alumínio no porto da Matola

Fonte: Mozal

A empresa está dividida em dois grupos de Departamentos, nomeadamente os Departamentos pertencentes à área de operações/produção, que compreende os Departamentos de Carbono, Redução, Fundição, Tratamento e Logística, Manutenção e Engenharia. A área de atendimento é composta pelas áreas de Recursos Humanos, Finanças, Saúde, Segurança e Ambiente e Assuntos Corporativos.

Como indústria, a Mozal apresenta perigos e riscos nas suas instalações, tais como: veículos móveis, metais fundidos a altas temperaturas, gases e poeiras, ruído, cargas suspensas, trabalhos em altura, trabalhos em espaços confinados, entre outros. Para reduzir o risco de ocorrência de acidentes e infortúnios, é necessário utilizar equipamento de proteção adequado nas áreas de produção. O uso de vestuário de proteção individual é obrigatório e, dependendo do tipo de trabalho e exposição, é necessário o uso de equipamentos de proteção individual como luvas, óculos de proteção, respiradores, protetores auditivos, entre outros. Qualquer pessoa que pretenda visitar a Mozal é obrigada a passar por uma introdução geral de segurança à entrada. Atualmente, a empresa é operada pelo grupo South32, com sede na Austrália.

### **3.2. Processo de Produção de Alumínio na Mozal**

Para a obtenção do alumínio líquido, a MOZAL utiliza o processo de redução electrolítica (Processo Hall-Héroult), que permite a produção de 1550 toneladas de alumínio por dia.

O processo produtivo envolve a interligação de 4 Departamentos, nomeadamente: Tratamento e Logística, Carbono, Redução e Fundição, conforme ilustra a figura 3.3. No Departamento de Tratamento e Logística existem quatro áreas diretamente relacionadas com o processo produtivo, que são o Porto, o Centro de Tratamento de Gás, o Centro de Tratamento de Fumos, o Laboratório e a Estação de Tratamento de Banhos.

O processo inicia-se com a recepção da matéria-prima (alumina, coque, alcatrão e trifluoreto de alumínio) no Porto da Matola, onde é armazenada em silos. Proveniente da Austrália, a alumina já processada é descarregada no Centro de Tratamento de Gás, onde ocorre a adsorção do flúor, transformando-a em alumina fluorada, que é posteriormente fornecida às células do Departamento de Redução, como cobertura anódica do Departamento de Carbono e do Tratamento de Banhos.

No Departamento de Redução ocorre a electrolise da alumina, visando produzir alumínio de alta qualidade e maximizar a eficiência da produção. Durante o processo de redução são utilizados ânodos e material electrolítico reciclado.

Os ânodos utilizados são produzidos no departamento de Carbono, o que garante a sua qualidade, visando minimizar os custos de produção.

O Centro de Tratamento de Fumos extrai e trata o fumo proveniente do forno de cozedura anódico. Os vapores são arrefecidos e os fluoretos são adsorvidos pela alumina fresca, deixando-os limpos e capazes de serem libertados para a atmosfera.

Na Estação de Tratamento de Banhos, os resíduos do banho são reciclados das células de Redução, do revestimento interior das panelas do departamento de Fundição, e as varetas são limpas na oficina de limpeza do Departamento de Carbono para que possam ser reutilizadas. - los nas células.

O Laboratório garante análises precisas de amostras de todos os departamentos de produção a custos minimizados, realizando o controlo de qualidade das matérias-primas, resíduos e metal produzido, produzindo todos os dados técnicos necessários considerando a saúde, a segurança e o ambiente, monitorizando todos os impactos de todas as operações no ambiente interno e externo.

O Departamento de Fundição recebe o metal líquido da Redução e transforma-o em lingotes. Por fim, os lingotes são transportados para o Porto para exportação.

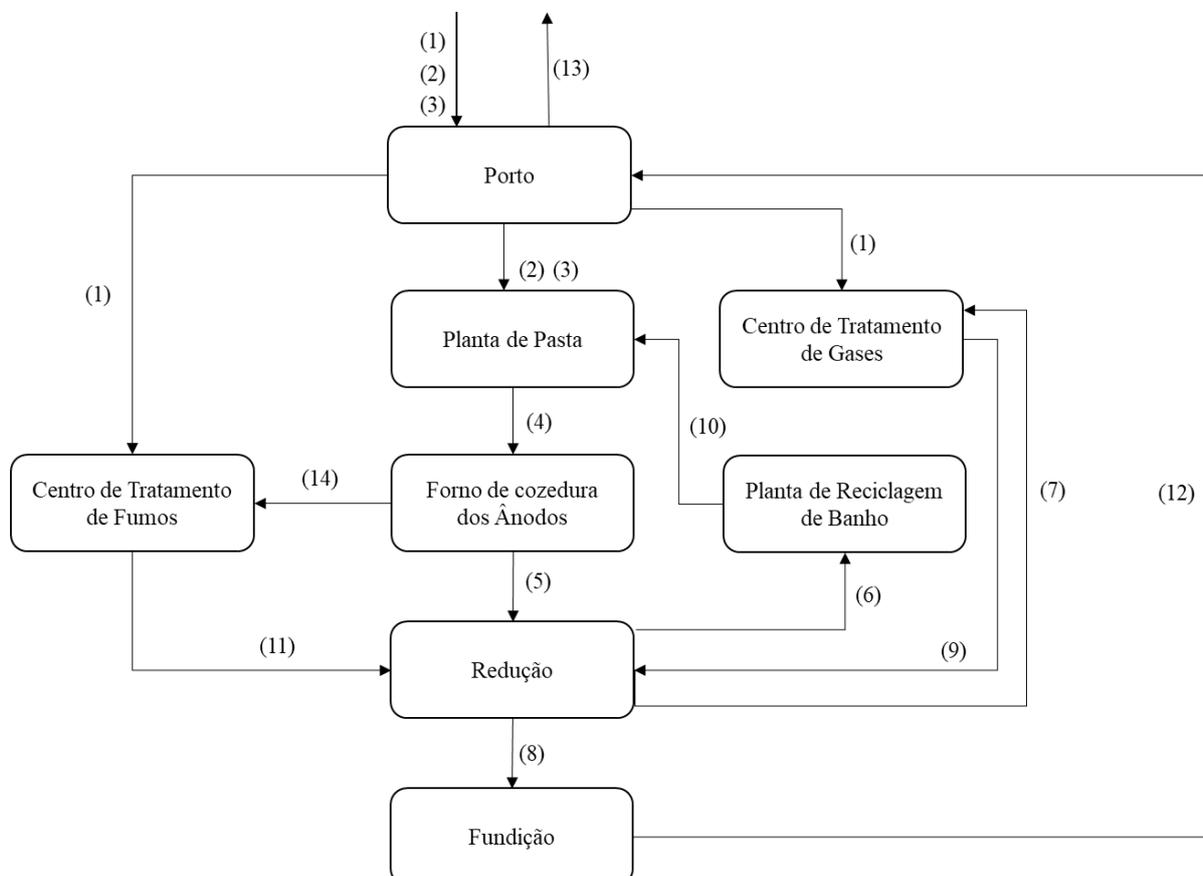


Figura 3.3: Interligação do Departamento de Redução com outros Departamentos

Fonte: Adaptado pelo autor (2025)

**Legenda:**

|                  |                        |                           |
|------------------|------------------------|---------------------------|
| (1) Alumina      | (6) Ânodos Gastos      | (11) Alumina Carregada    |
| (2) Coque        | (7) Gases              | (12) Lingotes de Alumínio |
| (3) Alcatrão     | (8) Alumínio Líquido   | (13) Exportação de Al     |
| (4) Ânodo Verde  | (9) Alumina Flourinada | (14) Fumos                |
| (5) Ânodo Cozido | (10) Ânodos Reciclados |                           |

### 3.2. Departamento de Redução

A redução é composta por 4 (quatro) sectores, ilustrada na figura 3.4, a saber:

- ✓ *Ladle Workshop*: O objetivo desta oficina é limpar as conchas que cuidam do metal fundido desde as salas de panelas até à Casthouse.
- ✓ *Lining e Silling shop*: é responsável pela construção de novas células electrolítica. Reembasamento de frascos novos (blocos catódicos de material refractário);
- ✓ *Delining shop*: é responsável pelo tratamento dos potes mortos, que chegaram ao fim da sua vida útil. Remove o material refractário e os cátodos, utiliza a escavadora para destruir os componentes da caixa do vaso.
- ✓ *Potrooms/Potlines*: A Mozal possui 144 potes em série que formam aquilo a que chamamos POTROOM. Existem 4 salas de potes lá, o que implica que existem 576 potes no total. As 4 salas estão divididas em 2 linhas, que se chamam POTLINE. Cada linha de pote contém 2 salas.

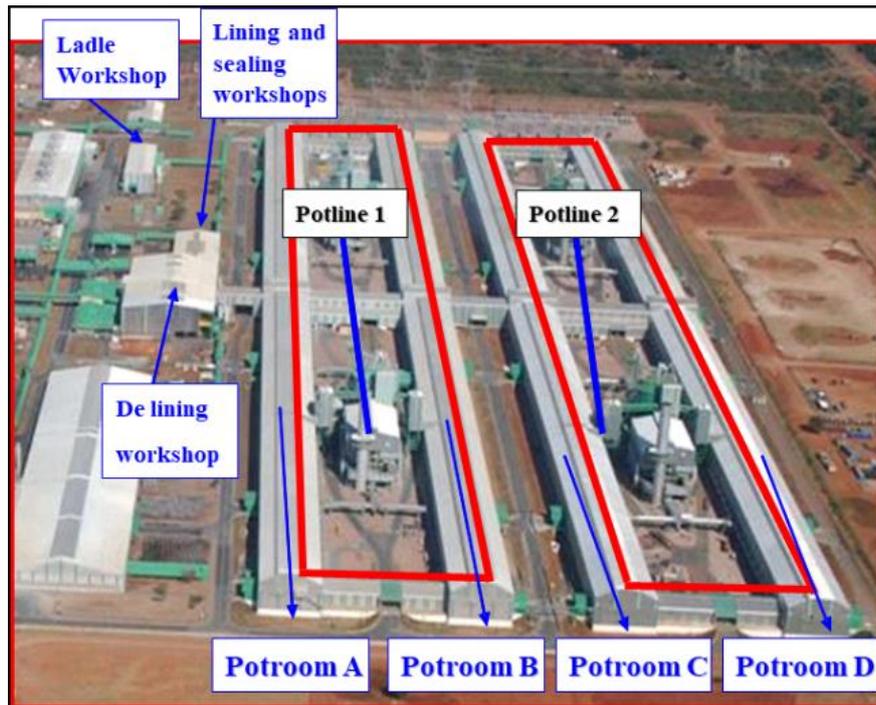


Figura 3.4: Organização estrutural do departamento de redução (Fonte: Mozal)

A corrente de 366 kA flui da subestação através da sala B, para a sala A e de volta para a subestação e da subestação através da sala de D para a sala de C e de volta para a subestação. Mostra claramente a ligação em série das salas das células eletrolíticas. Cada sala de frascos está dividida em 4 secções e cada secção recebe 36 frascos. Por exemplo, na sala A as secções são AG1, AG2, AG3 e AG4.

### 3.3. Células Electrolíticas

Em 1886, dois cientistas, Charles Martin Hall (EUA) e Paul Louis Toussaint Héroult (França), trabalhando separadamente e cada um inconsciente do trabalho do outro descobriu simultaneamente uma técnica prática e económica para produzir alumínio dos seus óxidos, um processo atualmente conhecido como processo Hall - Héroult (Grjotheim, 1995). Neste processo, o alumínio é produzido pela redução electrolítica de alumina ( $Al_2O_3$ ) dissolvida no banho de flúor fundido. O processo ocorre em fornos especiais revestidos de carbono, também chamados de vates electrolíticos, que operam a aproximadamente 960°C.

O pote tem dois componentes principais: os ânodos, dispostos na parte superior, e o cátodo, ou o próprio pote, onde a eletrólise ocorre. As células eletrolíticas são reatores grandes normalmente sob a forma de um tanque onde, dentro de cada um, existe um compartimento de cátodo, revestido com uma mistura de arremesso e antracite ou coque, empacado e recozido no lugar pela ação de uma corrente elétrica ou revestida com blocos cimentados, pré-assados, como mostrado na Figura 3.5.

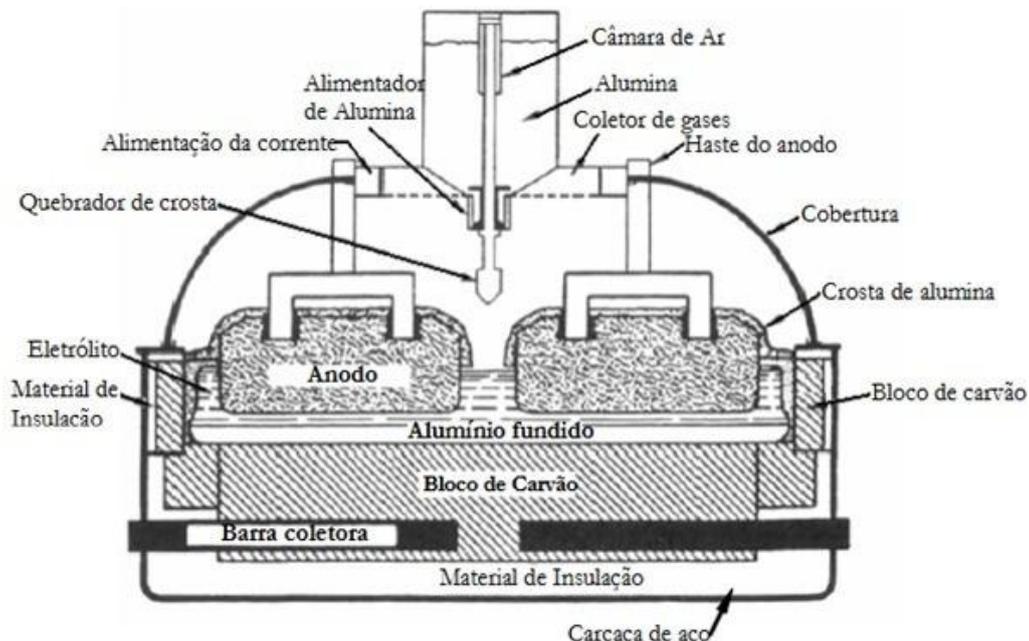


Figura 3.5: Representação esquemática de uma célula eletrolítica

Fonte: Ngunga (2022)

Este compartimento, ou cavidade de cátodo, pode ter uma profundidade de 30 a 50 cm e até 3 a 9 m de comprimento, dependendo do tipo de tanque e dos 7 amperagens para os quais é concebido. A espessura do revestimento do compartimento do cátodo varia de 15 a 25 cm nas laterais e de 35 a 45 cm na parte inferior. Entre o revestimento e a casca de aço, é colocada uma camada de isolamento térmico, tijolos refratários. As grandes barras de aço estão incorporadas na parte inferior do revestimento, que servem como colecionadores atuais e estendem-se às aberturas do tanque, onde contactam a barra de catódicos. O revestimento dos vates dura normalmente 5 anos (Gomes, 2007). Quando ocorre uma avaria, geralmente devido à penetração do metal nos coletores de cátodo, que dissolve, ou devido à penetração do metal na casca do tanque, a partir de onde vazia em redor dos coletores, é necessário substituir todo o revestimento, isolamento térmico e conjunto de coletores.

A renovação do revestimento de vates constitui uma parte apreciável das despesas de produção e inclui não só o custo de mão-de-obra, os colecionadores, os revestimentos e os materiais de isolamento térmico, mas também a perda de electrólitos absorvidos no revestimento danificado (muitos produtores recuperam pelo menos parte do electrólito que permanece no revestimento). O alumínio líquido, produzido por electrólise, é removido periodicamente dos vates e transferido em cadinhos para os chamados fornos de retenção. A partir daí, o metal vai para as máquinas de fundição, onde é formado e arrefecido, para produzir lingotes.

### 3.4. Células Electrolíticas do Modelo AP3XLE

Na Mozal, a produção de alumínio através da redução de alumina numa solução electrolítica (banho) é realizada utilizando a tecnologia Aluminium Pechiney de França (AP), ilustrada na figura 3.6, agora actualizada para AP3XLE.



Figura 3.6: Célula electrolítica do modelo APXLE da Mozal (Fonte: Mozal)

### 3.5. Desenvolvimento Células Electrolíticas do Modelo AP3XLE

A célula AP35 já funciona satisfatoriamente há vários anos na Aluminum Dunkerque.

No espaço de apenas alguns anos, a produtividade da célula AP3X aumentou consideravelmente em comparação com a da primeira versão, a AP30. Isto é o resultado de grandes alterações no *design*, visando manter um baixo consumo específico de energia e uma longa vida útil enquanto a corrente aumenta.

As principais alterações foram as seguintes:

- ✓ Aumento do tamanho do ânodo, mantendo a densidade de corrente ideal;
- ✓ Modificações na rampa de compactação;
- ✓ Blocos catódicos mais longos com cobre no interior e
- ✓ Blocos de parede lateral mais termicamente condutores.

Os três últimos melhoram a transferência de calor do metal e do banho para a parede do casco, mantendo uma espessura de rebordo satisfatória para proteger o revestimento apesar do maior calor interno.

Um passo adicional para maximizar a produtividade foi utilizar o arrefecimento forçado a ar da parede do casco. Este oferece três vantagens: aumenta o fluxo de calor na superfície do casco, mantém uma boa saliência na interface metal-banho e mantém a temperatura do casco baixa. Isto resulta numa longa vida útil e em baixos custos de manutenção da carcaça.

Também é importante manter o pote estável enquanto aumenta a corrente, para manter uma elevada eficiência de corrente e um baixo consumo específico de energia.

Um modelo foi utilizado para verificar o desempenho do MHD e a estabilidade da célula, e as suas previsões foram verificadas por extensas campanhas de medição.

Estes confirmaram que o pote opera com uma boa margem de estabilidade apesar do aumento da corrente. O AP35 já tinha uma margem de estabilidade muito boa e as modificações serviram para a reforçar.

O último desafio foi garantir uma alimentação precisa e fiável de alumina, de forma a minimizar a frequência dos efeitos anódicos e as suas consequências nefastas para o ambiente.

O sistema de controlo do pote ALPSYS® tem sido continuamente melhorado para proporcionar um controlo cada vez mais preciso do teor de alumina, apesar do volume do banho que se tornou menor com cada aumento do tamanho dos blocos anódicos. A tecnologia AP36 está agora a ser explorada comercialmente.

## Os desafios apresentados pelo aumento da amperagem

Aumentar a amperagem de um vaso mantendo o mesmo *design* da carcaça e dos berços apresenta três problemas principais: manter o equilíbrio térmico, manter a célula estável e continuar com um bom funcionamento.

Os dois primeiros são óbvios, mas o último necessita de uma pequena explicação. Para evitar um aumento excessivo da densidade de corrente, apesar de uma corrente mais elevada, é necessário aumentar a área superficial do ânodo, mas isto significa que o volume do banho deve diminuir. O volume específico do banho diminuiu ao longo do desenvolvimento do AP30 ao AP37, e o nível esperado para a próxima versão. O número de quilo amperes por quebra-crosta aumentou, reduzindo tanto os custos específicos de capital como os custos operacionais. (Moxnes, 2004)

Menos banho significa maior variação do nível do banho em geral e, em particular, mais acção de bombeamento à medida que a posição do feixe anódico é alterada. Isto modifica a dinâmica do pote, aumentando a probabilidade de má operação do pote, como os efeitos anódicos, e a única forma de lidar com isto é manter o equilíbrio térmico significa tentar reduzir a resistência interna para gerar menos calor, e modificar o revestimento e o arrefecimento externo para dissipar mais calor. Manter o pote estável requer melhorar a sua estabilidade magneto-hidrodinâmica intrínseca, minimizando a componente vertical do campo magnético e a componente horizontal do campo de densidade de corrente. (Moxnes, 2007)

### 3.6. Instabilidade do pote

A instabilidade no pote pode surgir de vários factores, incluindo flutuações na voltagem, temperatura ou composição química dentro do vaso. A instabilidade pode levar à produção desigual de alumínio, à redução da eficiência ou mesmo a falhas no pote. Manter a estabilidade na operação destes potes é crucial para a eficiência e produtividade global de uma fundição de alumínio.

A instabilidade do pote em células electrolíticas de fundição de alumínio pode ser influenciada por vários factores (Moxnes, 2007), incluindo:

1. Qualidade da matéria-prima: As flutuações na qualidade das matérias-primas, como a alumina, podem ter impacto no processo eletrolítico. Variações na composição da alumina, na distribuição do tamanho das partículas e nos níveis de impurezas podem afetar a eficiência e a estabilidade do funcionamento da célula.
2. Condições de funcionamento: Alterações nos parâmetros de funcionamento, como a temperatura, a densidade de corrente e a composição electrolítica, podem contribuir para a instabilidade do potenciómetro. Os desvios das condições ideais podem levar a flutuações no comportamento e desempenho das células.
- 3.º Desgaste do eléctrodo: O desgaste e a degradação dos eléctrodos catódicos e anódicos ao longo do tempo podem afetar a distribuição da corrente e levar à instabilidade do potenciómetro. O desgaste irregular do eléctrodo pode resultar em pontos quentes localizados ou áreas de condutividade reduzida, afetando o funcionamento da célula.
4. Composição do electrólito: A composição do eletrólito, incluindo aditivos e impurezas, pode influenciar a estabilidade da panela. As alterações na composição do eletrólito podem alterar a viscosidade, a condutividade e outras propriedades do eletrólito, afetando a deposição de metal e o desempenho da célula.
5. Evolução de gás: A evolução de gás nos eléctrodos, especialmente hidrogénio e flúor, pode interromper o processo eletrolítico e contribuir para a instabilidade do recipiente. As bolhas de gás podem interferir com o fluxo de corrente, causar salpicos de metal e levar à deposição irregular de metal.
- 6.º *Design* e configuração da célula: O *design* e a configuração das células eletrolíticas, incluindo a geometria da célula, o isolamento e os materiais de revestimento, podem afetar a estabilidade do recipiente. As células mal concebidas podem sofrer uma distribuição desigual de calor, erosão dos eléctrodos ou outros problemas que contribuem para a instabilidade.
- 7.º Controlo e monitorização de processos: Sistemas inadequados de controlo e monitorização de processos também podem contribuir para a instabilidade do potenciómetro. A falta de dados em tempo real sobre parâmetros-chave como a tensão, a corrente, a temperatura e a qualidade do metal pode dificultar a identificação e a resolução imediata dos problemas.

Os esforços para mitigar a instabilidade do vaso envolvem normalmente o controlo cuidadoso dos parâmetros do processo, tais como a composição do electrólito, a densidade de corrente e a temperatura, bem como a manutenção regular e monitorização dos equipamentos. Além disso, os avanços na tecnologia e na otimização de processos visam minimizar a instabilidade do pote e melhorar o desempenho global da fundição.

### 3.7. Impacto de Instabilidade no Pote

A instabilidade do pote nas fundições de alumínio pode ter vários impactos negativos na operação e produtividade da instalação:

**Eficiência de Produção Reduzida:** A instabilidade do pote pode levar a flutuações na taxa de produção de alumínio. As variações na tensão, temperatura ou composição química dentro da panela podem resultar em eletrólise irregular, provocando flutuações na quantidade de alumínio produzido. Esta inconsistência pode diminuir a eficiência global da produção e aumentar os custos operacionais.

**Consumo de energia:** A instabilidade nas células eletrolíticas pode exigir ajustes nos parâmetros do processo para manter a estabilidade, como o aumento da tensão ou a corrente. Estes ajustes podem resultar num maior consumo de energia, levando ao aumento dos custos operacionais e à redução da rentabilidade.

**Danos no equipamento e tempo de inatividade:** A instabilidade severa do pote pode causar danos nas células eletrolíticas ou no equipamento associado.

As falhas ou os danos podem necessitar de reparações ou substituições, resultando em tempo de inatividade não planeado e perda de produção. Os custos associados à reparação ou substituição de equipamentos danificados podem ser significativos, tais como:

- ✓ **Questões de qualidade:** as flutuações no processo de eletrólise devido à instabilidade da panela podem resultar em variações na qualidade do alumínio produzido. As condições de produção inconsistentes podem levar a impurezas ou defeitos no alumínio, reduzindo a sua qualidade e valor de mercado.
- ✓ **Riscos de segurança:** A instabilidade do pote pode representar riscos de segurança para o pessoal que trabalha na fundição. A instabilidade severa ou as falhas de equipamento podem resultar em condições perigosas, como a libertação de metal quente ou eletrólito, que pode causar ferimentos ou acidentes.

No geral, a instabilidade do pote pode ter um impacto prejudicial na viabilidade económica, segurança e desempenho ambiental das operações de fundição de alumínio. Por conseguinte, as fundições esforçam-se por minimizar a instabilidade do pote através de um controlo cuidadoso de processos, manutenção regular e avanços tecnológicos. A figura 3.7 ilustra um pote em instabilidade severa, colocando em perigo a vida de todos colaboradores



Figura 3.7: Célula electrolítica em instabilidade severa (Fonte: Mozal)

### 3.8. Impacto da Troca dos Ânodos na Instabilidade

A operação de troca de ânodo é a operação mais perturbadora para a célula de alumínio e qualquer alteração no procedimento padrão terá um impacto direto no próprio desempenho da célula, positiva ou negativamente. Assim, qualquer alteração nesta operação deverá ser estabelecida ou realizada após um robusto processo de validação. A operação de troca do ânodo tem um impacto direto no equilíbrio térmico do pote, no fluxo de corrente elétrica, na dissipação de calor e no desempenho global da eficiência da corrente. Na operação de fundição contínua, o desafio permanece em todas as tecnologias a cada nova troca de ânodo, considerando o comportamento dos ânodos vizinhos e mais antigos, a posição do ânodo em relação ao padrão de velocidade do metal, o deslocamento do ânodo frio e a compensação de resistência, a potência de energização do ânodo e o impacto do campo magnético.

### **3.9. Impacto do Material de Cobertura dos Ânodos na Instabilidade**

As tarefas de cobertura de ânodos recém-instalados e de manutenção da qualidade desta cobertura durante todo o ciclo de vida são críticas para manter os potenciômetros eletrolíticos em bom equilíbrio térmico. Para evitar a adição indesejada de material de cobertura sólido ao banho durante a mudança do ânodo, é preferível garantir a formação de uma camada sólida suficientemente espessa em torno do novo ânodo.

Na Albras (Aluminium Brazil), o material de cobertura do ânodo possui entre 7 e 8% de  $AlF_3$  e aproximadamente 40% de alumina primária, pelo que a entrada durante as trocas ou por colapsos durante a operação diminui o excesso de flúor e dificulta o controle do banho. As variações no teor de flúor contribuem para o desequilíbrio térmico e aumentam a probabilidade de colapso da crosta.

Se este ciclo persistir, o funcionamento da panela pode tornar-se muito instável. Com o objetivo de resolver este problema a Albras (Aluminium Brazil) decidiu atrasar a cobertura anódica em 8 horas após cada troca. Isto resultou num melhor controle químico do banho e equilíbrio térmico dos potes.

Além disso, a redução do consumo de material de cobertura, mantendo a mesma altura da cobertura mostrou que menos material estava a entrar no banho durante as trocas do ânodo e através do colapso da crosta durante o funcionamento normal dos potes. Na Mozal, o controle de parâmetros de instabilidade é feito através de um software denominado ALPSYS, conforme ilustra a figura 3.8 e 3.9.

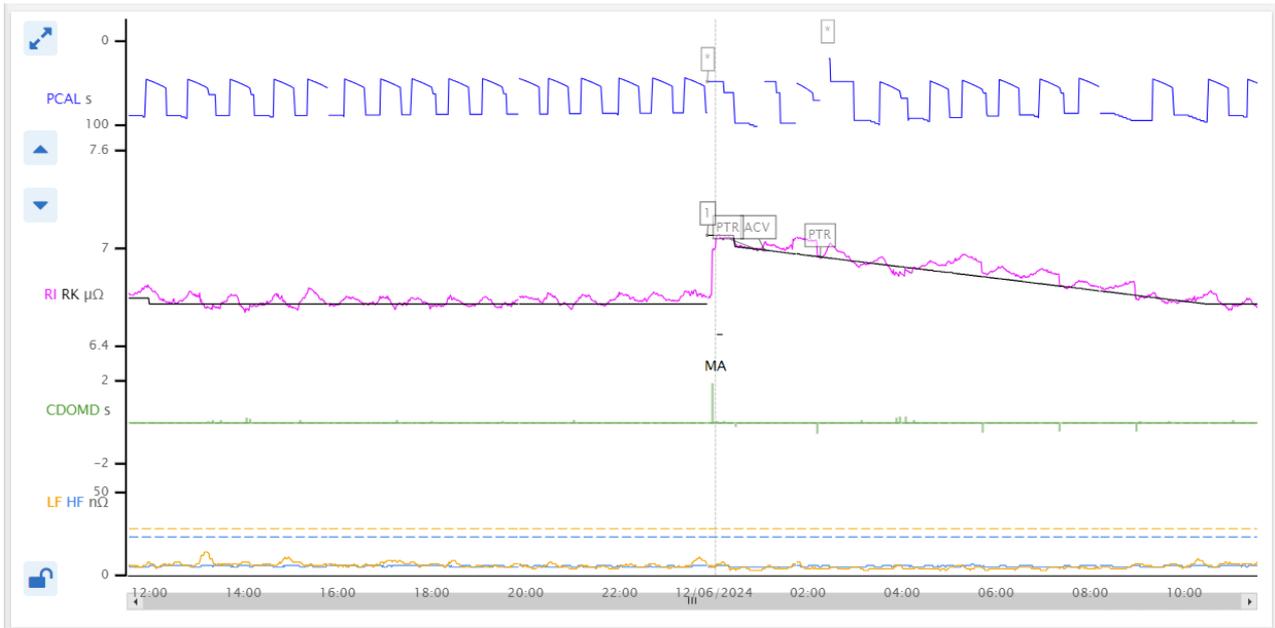


Figura 3.8: Ilustração de um pote estável através do ALPSYS (Fonte: Mozal)

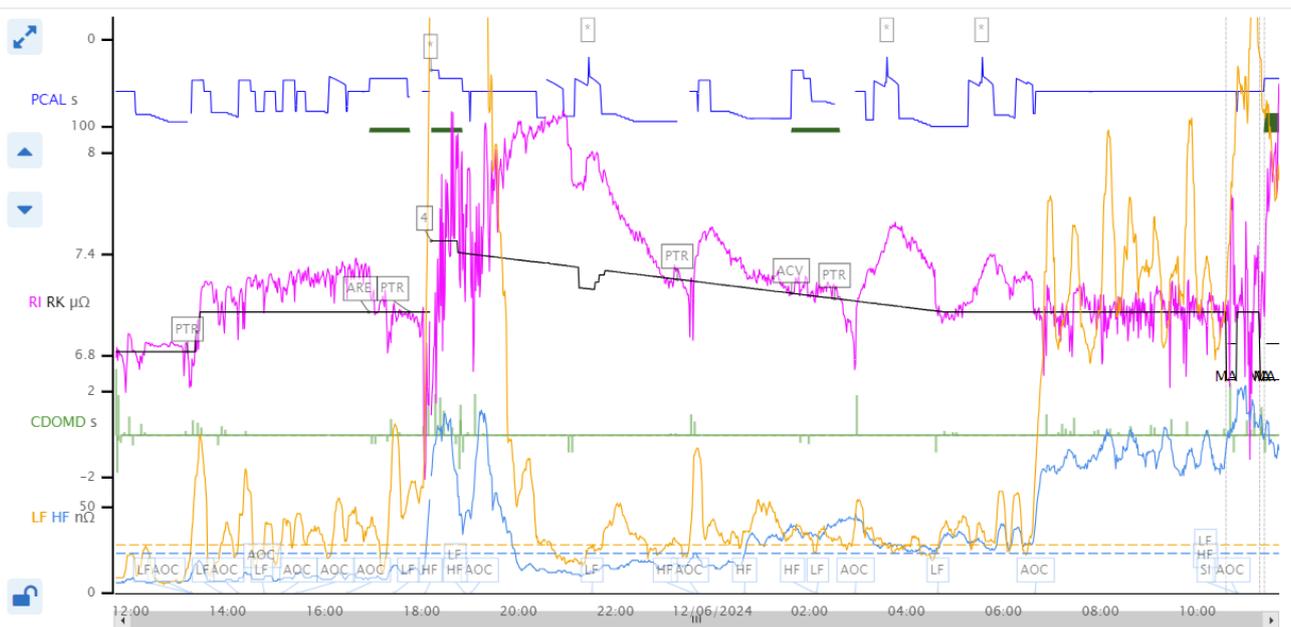


Figura 3.9: Ilustração de pote instável através do ALPSYS (Fonte: Mozal)

## 4. CAPÍTULO IV: APRESENTAÇÃO, ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

### 4.1. Eficiência Energética

O gráfico 4.1 mostra a variação da eficiência energética ao longo do tempo na linha 1 de produção, desde 1 de Maio de 2023 á 31 de Maio de 2024.

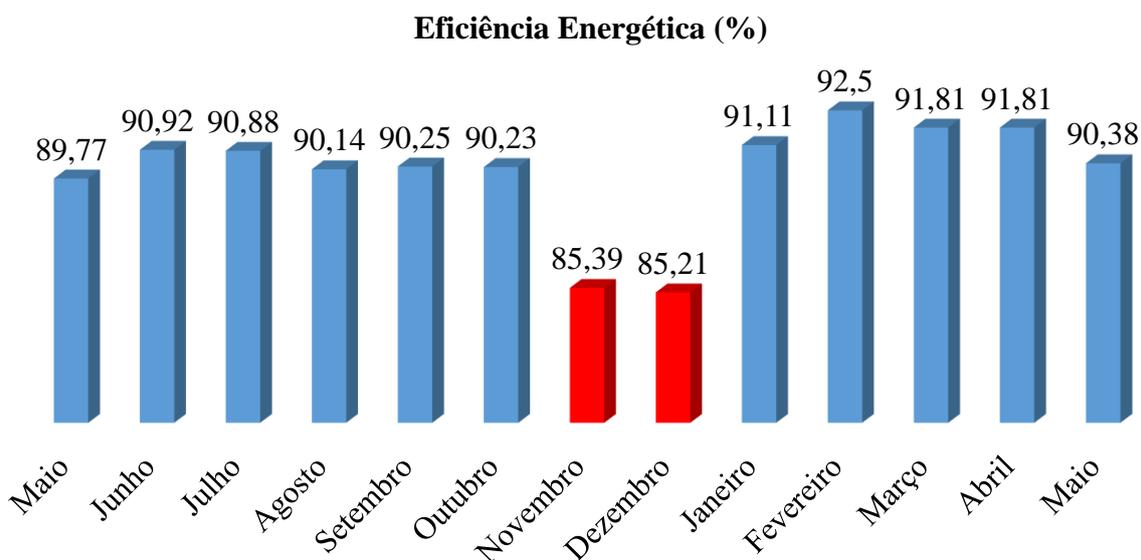


Gráfico 4.1: Variação da eficiência energética em função do tempo

A Eficiência Energética é um parâmetro importante da célula electrolítica que descreve qual fracção da corrente eléctrica que resulta na produção de alumínio. A literatura tendo em conta as possíveis perdas, prevê a variação da eficiência energética no intervalo de 90% a 96%, para células electrolíticas que operam a uma amperagem superior a 300 kA e consumo energético em torno de 13kWh/ kg de Al (Haarberg, 2016).

No gráfico 4.1 pode-se observar o decréscimo da eficiência energética nos meses de Novembro e Dezembro de 2023, com uma eficiência energética de 85.39 % e 85.21% respectivamente. Essa redução demonstra o quão a instabilidade se fez sentir, significando que a quantidade de alumínio produzido na prática foi acentuadamente inferior ao esperado na produção teórica, consequentemente houve alto consumo energético. Esta redução da eficiência foi causada pela reacção inversa, onde parte do alumínio é dissolvido de novo no banho e reage com os produtos do ânodo, produzindo alumina. A extensão desta reacção depende da área relativa do cátodo, da temperatura do banho e da composição do banho. Outro factor que contribuiu foi depósito de impureza na superfície do cátodo aumentando a resistência do pote contribuindo para aquecimento do pote e perdas excessivas de calor.

Para aumentar a condutividade do cátodo fez a inserção de cobre no cátodo, um dos melhores condutores de corrente eléctrica, reduzindo as perdas excessivas de calor, e pode se notar um crescimento positivo da eficiência energética nos meses subsequentes. Em suma a eficiência energética é influenciada por vários factores que serão detalhados posteriormente.

## 4.2. Intensidade da Corrente Eléctrica

O gráfico abaixo mostra a variação da corrente eléctrica, em kA, ao longo do tempo na linha 1 de produção, desde 1 de Maio de 2023 á 31 de Maio de 2024.

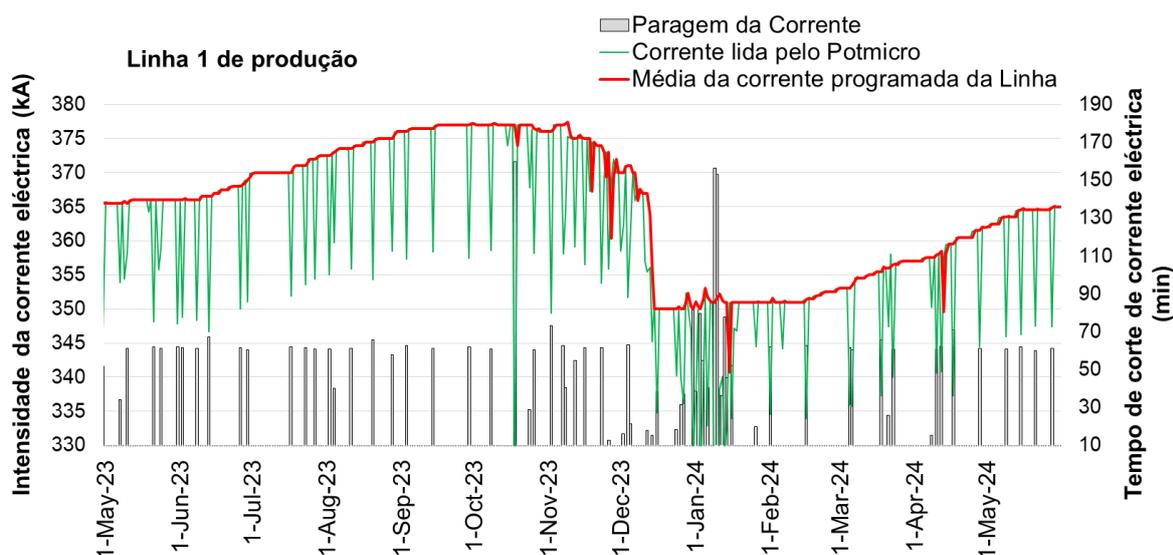


Gráfico 4.2: Variação e frequência de corte de corrente eléctrica em função do tempo

A corrente eléctrica é factor importante para que ocorra o processo denominado electrólise, e é um dos factores que afecta directamente na eficiência energética do pote.

Pelo gráfico 4.2 pode se observar um aumento gradual da corrente eléctrica, devido a mudança tecnológica de células electrolíticas do modelo AP35 para AP3XLE, isto é, de 350 kA para 378 kA. Pode se observar também a frequência excessiva de interrupção de corrente eléctrica, sendo este a principal causa de oscilação de corrente vista no gráfico e é um dos principais problemas crónicos fora do controle da Mozal, pois a fonte da corrente eléctrica é África do Sul.

No gráfico 4.2 pode se observar também que após o aumento gradual da corrente eléctrica até o valor máximo desejado de 378 kA, nos meados do mês de Novembro, há uma redução gradual da corrente eléctrica devido a queda excessiva de ânodos no mesmo pote.

Ainda pode se verificar que redução brusca nos meados do mês de Dezembro, pois além da queda dos ânodos havia atraso na sucção de metal no pote. A redução da corrente, pela equação de Faraday, prevê a redução da quantidade e velocidade da produção de metal no pote.

### 4.3. Concentração de Ferro

O gráfico abaixo mostra a variação da concentração do ferro (ppm) no alumínio com ao longo do tempo, desde 1 de Maio de 2023 á 31 de Maio de 2024.

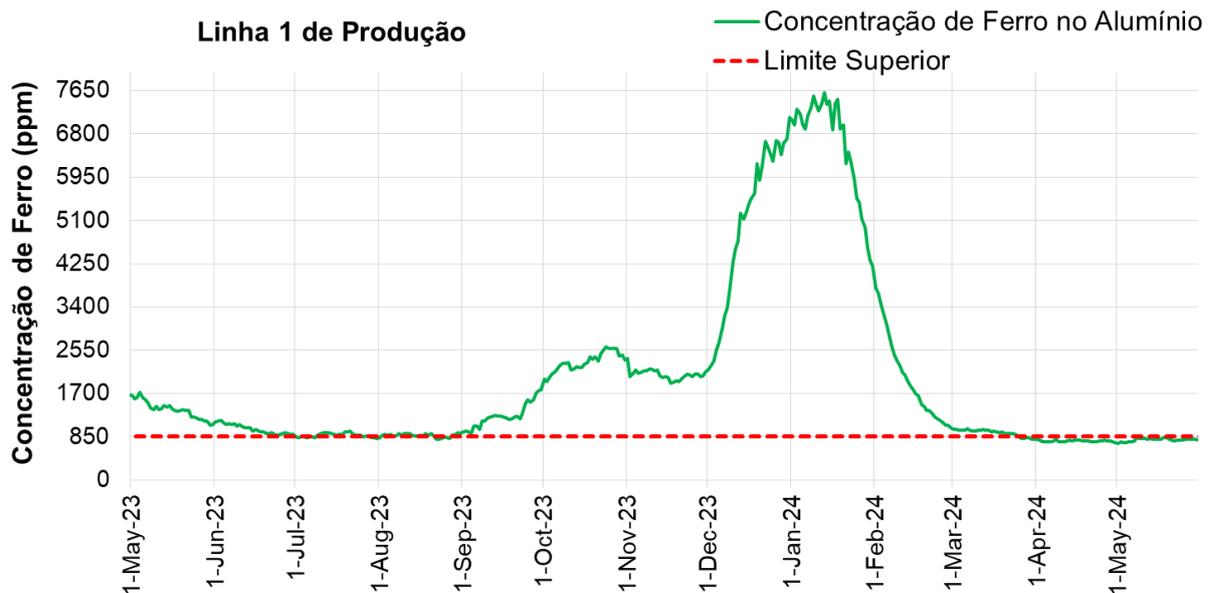


Gráfico 4.3: Variação da concentração de ferro no alumínio em função do tempo

O ferro é uma impureza comum no alumínio e suas ligas que não é facilmente removida pode causar efeitos adversos à ductilidade e à fundibilidade, particularmente em ligas fundidas à base de Al-Si. A escolha de usar alumínio primário ou ligas de alumínio secundárias para um produto fundido, com seu baixo e níveis moderados/altos de ferro, respectivamente, é uma decisão comercial que deve ser tomada. A decisão muitas vezes significa um compromisso entre a necessidade de reduzir o custo do metal e a necessidade de maximizar a fundição produtividade através da redução da formação de defeitos e/ou para minimizar o efeito deletério do ferro nas propriedades mecânicas da peça fundida final. A contaminação do alumínio pelo ferro reduz a capacidade de resistência a corrosão do alumínio, sendo o alumínio mais usado devido a sua conductibilidade e resistência a corrosão.

Segundo a LME (London Metal Exchange), principal correctora do alumínio da Mozal, define três qualidades de alumínio:

- ✓ P1020 (1000 ppm de Fe e 2000 ppm de Si)
- ✓ P0610 (600 ppm de Fe e 1000 ppm de Si)
- ✓ P0406 (400 ppm de Fe e 600 ppm de Si) – qualidade *premium*

A Mozal tem como padrão de concentração de ferro no alumínio de 850 ppm, para conseguir vender no mercado. Para a qualidade P1020 de alumínio a LME compra por \$2500/ton. Quanto maior for o teor de Ferro menor é o preço de compra do alumínio.

Pelo gráfico 4.3 pode se observar que no período de Setembro de 2023 á meados de Janeiro de 2024 teve um aumento acentuado do teor de Ferro, atingindo cerca de 7650 ppm, devido a instabilidade. O Ferro contaminou o alumínio devido a demora da troca dos ânodos no tempo programado, pois os ânodos após 27 começam a contaminar o metal através dos pinos que seguram o bloco anódico.

#### 4.4. Concentração de Silício

O gráfico abaixo representa a variação da concentração de silício (em ppm) em função do tempo, de 1 de Maio de 2023 á 31 de Maio de 2024.

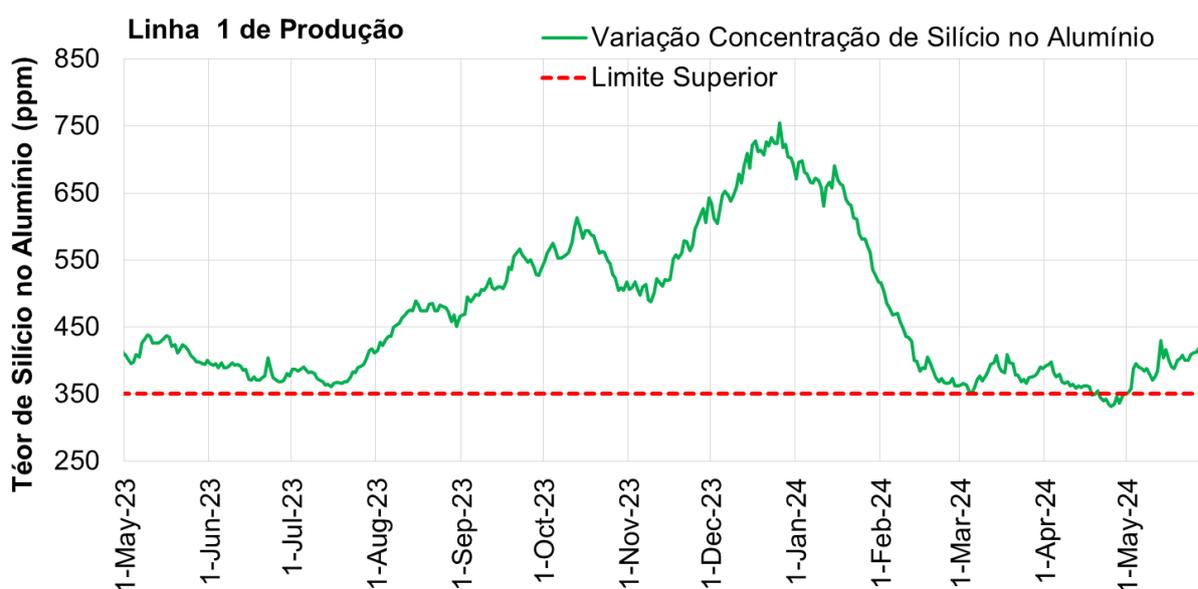


Gráfico 4.4: Variação da concentração de silício no alumínio

O silício é também uma impureza no alumínio e suas ligas, devido ao seu impacto negativo em certas propriedades em certas aplicações, tais como: o aumento da fragilidade, dificuldades na usinagem, problemas de Soldagem e impactos na corrosão

No gráfico 4.4 pode se observar um aumento acentuado da concentração de silício, a partir do mês de Agosto de 2023 a Janeiro de 2023, tendo pico máximo de 750 ppm, devido ao consumo das paredes do pote denominado *side Wall*, causando fuga de alumínio nos potes devido a crise de instabilidades pelos motivos anteriores descritos. A concentração de silício é um indicador que mostra possíveis tendências de *run out* (fuga de alumínio nas células electrolíticas), alto teor de silício indica que as paredes do pote estão a ser consumidas.

Segundo as especificações de qualidades definidas pela LME, a Mozal tem tendências de atingir o nível de qualidade premium de aluminium. Actualmente o target da Mozal é produzir alumínio com um teor de silício abaixo de 350 ppm.

#### 4.5. Altura de Metal

O gráfico 4.5 mostra a variação da altura do metal, cm, no pote em função do tempo, a partir de 1 de Maio de 2023 até 1 de Maio de 2024.

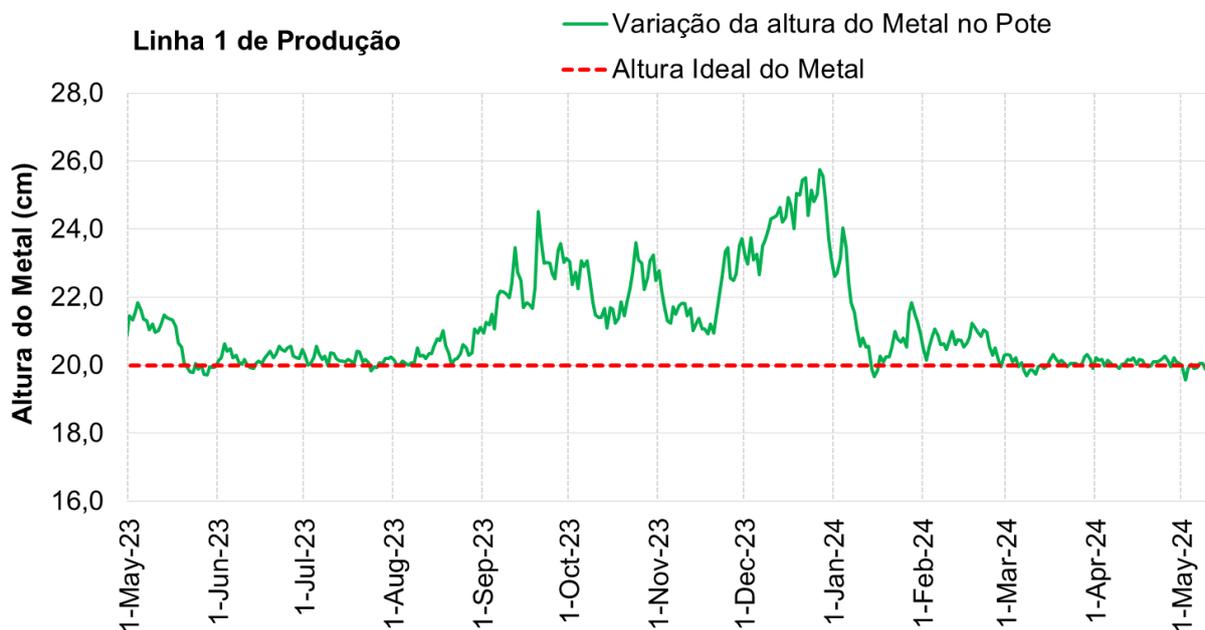


Gráfico 4.5: Variação da altura do metal em função do tempo

A altura do metal é um parâmetro determinante para a sucção de metal no pote. A altura ideal para a sucção de metal no pote é de 20 cm, e para esta altura de metal existe uma quantidade certa de metal para se fazer a sucção no pote, neste caso, 3660 Kg de Al/pote.

No gráfico 4.5 é possível verificar um aumento súbito da altura do metal nos meados de Setembro de 2023 até finais de Dezembro de 2023. Esse aumento foi gerado devido ao excesso de actividades atrasadas, mais demanda de actividades não programadas do que as programadas, ocupando os PTA (Pot Tending Assembly) dando-se prioridade a remoção dos ânodos cortados dentro dos potes ao invés de se fazer a sucção de metal.

O excesso de metal no pote pode gerar redução da temperatura do pote. O nível de metal no pote afecta na quantidade de perda de calor através da parede lateral. Se houver muito metal no pote, haverá maior perda de calor através da parede lateral devido ao aumento da área de superfície e, subsequentemente, formação de *ledge* no pote.

#### 4.6. Temperatura do Banho

O gráfico 4.6 mostra a variação da temperatura do banho, em °C, na linha 1 de produção, em função do tempo, de 1 de Maio de 2023 á 1 de Maio de 2024.

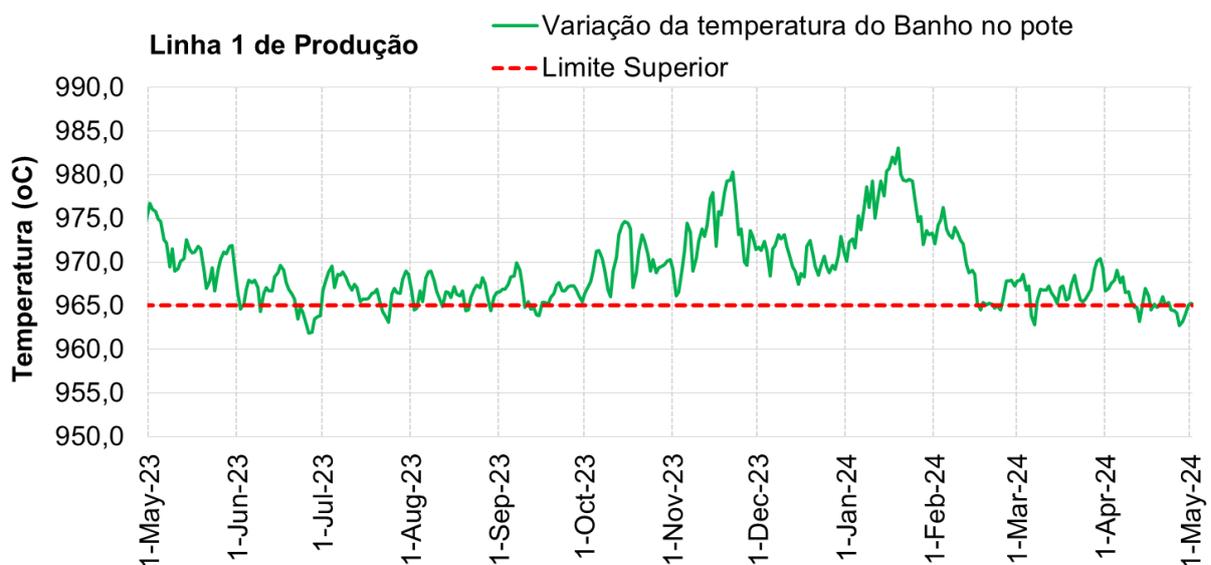


Gráfico 4.6: Variação da temperatura do banho em função do tempo

Para a produção de alumínio é necessário que haja balanço térmico, neste caso a temperatura estável para que ocorra a electrolise é de aproximadamente 965 °C.

A solubilidade da Alumina na solução electrolítica da criolita ( $\text{Na}_3\text{AlF}_6$ ) desempenha um papel importante no processo de electrólise do alumínio no pote.

Um dos parâmetros que afetam a solubilidade da alumina é a temperatura do banho (temperatura da criolita), a relação entre a solubilidade da alumina e a temperatura do banho (temperatura da criolita) é diretamente proporcional, quanto maior a temperatura do banho (temperatura da criolita), maior é solubilidade de alumina.

Efeitos que causam variações na temperatura do banho (neste caso, isto leva a um aumento da temperatura):

- ✓ **Problemas anódicos:** Os ânodos definidos demasiado baixos causarão instabilidade, o que fará com que o pote desligue assim, introduzindo assim mais energia ao banho. Os picos causarão o aquecimento localizado, provocando aumento de temperatura do pote.
- ✓ **Efeito anódico:** Um efeito ânodo aumentará a temperatura do banho de 5°C para 20°C, dependendo da sua força.
- ✓ **Poeira de carbono:** A poeira de carbono atua como um isolador (efeito das articulações) dificultando a troca de calor.
- ✓ **Operação do alimentador  $AlF_3$ :** Se o excesso de %  $AlF_3$  no pote diminuir, a temperatura aumentará.
- ✓ **Nível de baixo metálico:** Os níveis de metais baixos diminui a área efectiva do metal para a troca de calor.

Pelo gráfico 4.6 pode se observar que há um aumento acentuado, atingindo o pico de 983 °C no mês de Janeiro 2024, devido a fraca dissolução de alumina no pote. Pode se observar também um aumento progressivo da temperatura do banho a partir do mês de Novembro de 2023 até meados de Janeiro de 2024, esse aumento foi devido a queda dos ânodos no pote e despachos operacionais, tais como *o sholver* (processo de remoção de material sólido no interior do pote) durante a troca dos ânodos, isso gera *mushrooms* (impurezas sólidas por baixo do ânodo) e pó de monóxido de carbono presente na superfície do banho, aumentando a resistência do ânodo e por consequência aumento de temperatura, o que é explicado pela lei de Joule-Lens.

#### 4.7. Altura do Banho

O gráfico abaixo mostra a variação da altura do banho, cm, na linha 1 de produção, em função do tempo, a partir de 1 de Maio de 2023 até 1 de Maio de 2024.

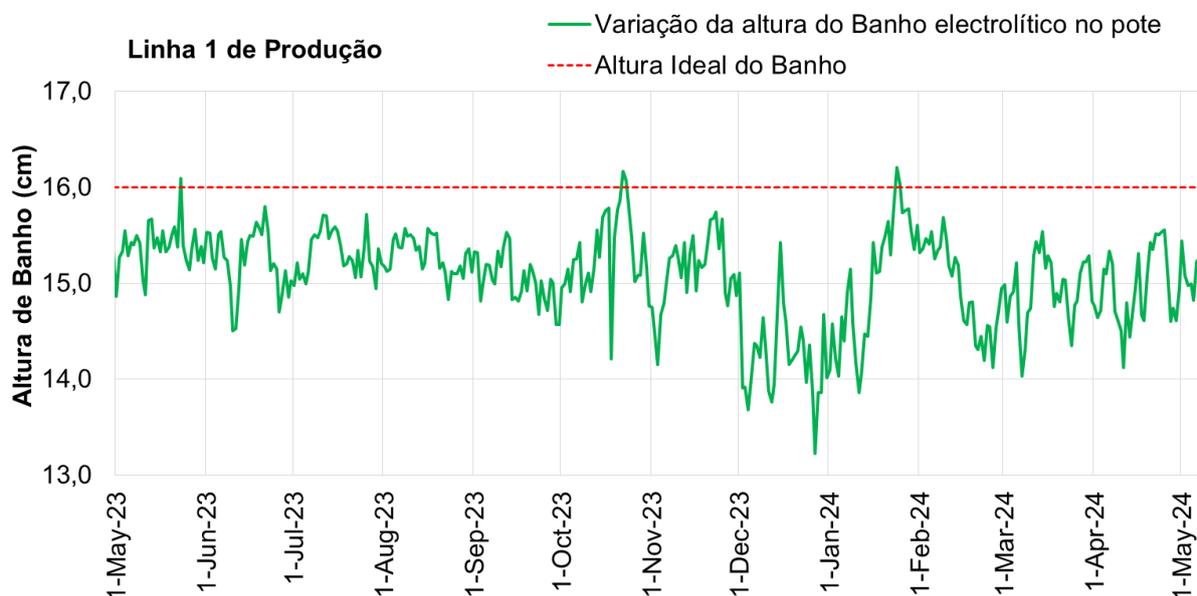


Gráfico 4.7: Variação da altura do banho em função do tempo

A altura do banho é um dos parâmetros que deve ser monitorado com bastante atenção. A altura de banho ideal para a produção de alumínio é de 16 cm. Com base no gráfico acima é possível observar um decréscimo progressivo do banho, atingindo um valor de 13,2 cm, no final de Dezembro de 2023. O decréscimo do final de Dezembro foi devido a solidificação do banho causado pelo excesso de metal no pote culminando na redução da temperatura.

O déficit de banho no pote tem como consequência a fraca dissolução de alumina, permitindo a formação de *sludge* (alumina não dissolvida) por cima do cátodo, aumentando a resistência do cátodo, gerando uma instabilidade catódica.

#### 4.8. Parâmetro WRMI de instabilidade

O gráfico 4.8 mostra a variação do parâmetro WRMI de instabilidade, em  $n\Omega$ , em função do tempo, a partir de 1 de Maio de 2023 até 31 de Maio de 2024.

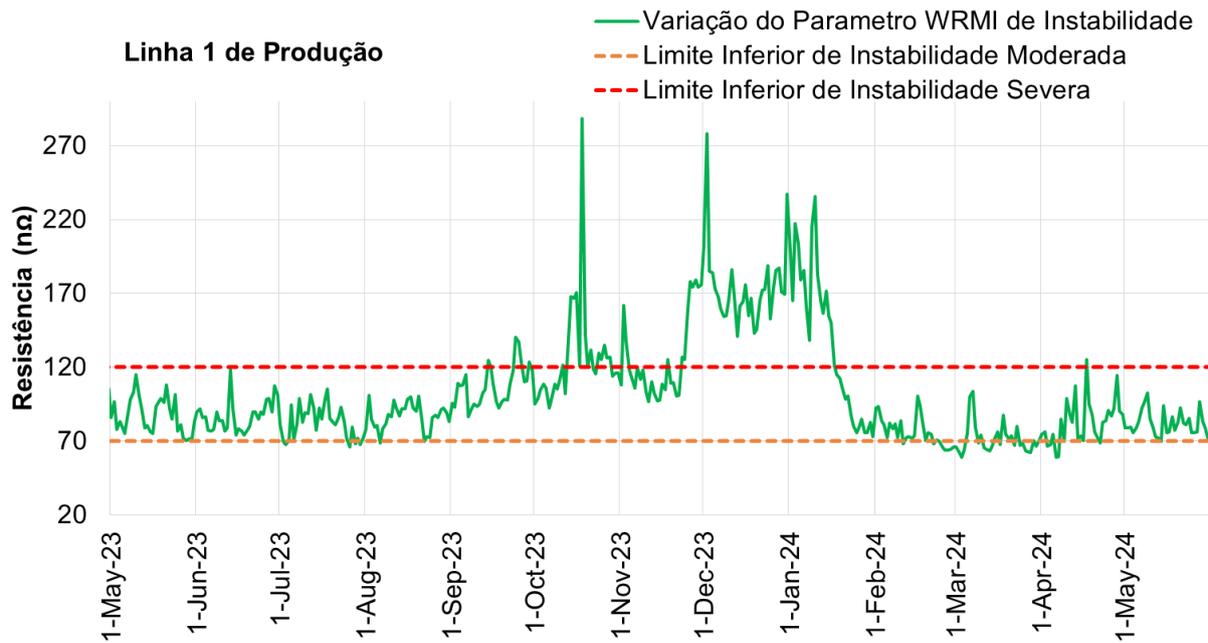


Gráfico 4.8: Variação do parâmetro WRMI de Instabilidade com o tempo

A instabilidade no pote é um parâmetro que monitorado através resistência, ou seja, alongação dado na forma de resistência. O parâmetro WRMI, é um parâmetro que não faz a separação entre as altas frequências, relativamente ao ânodo (HF) e baixas frequências, relativamente ao cátodo (LF).

A classificação da instabilidade em função do parâmetro WRMI é dado em três categorias, nomeadamente:

- ✓ **Nível estável:** abaixo de 70 nΩ
- ✓ **Nível de instabilidade Moderada:** no intervalo de 70 nΩ á 120 nΩ
- ✓ **Nível de instabilidade Severa:** acima de 120 nΩ

No gráfico 4.8 pode se observar que nos meados do mês de Outubro de 2023 e nos finais de novembro 2023 á meados de Janeiro de 2024, verifica se um alerta vermelho de instabilidade severa, devido a queda de alguns ânodos no pote e danificação de cátodo causado pela instabilidade.

#### 4.9. Parâmetro LF (*low frequency*) de Instabilidade Catódica

O gráfico 4.9 mostra a variação do parâmetro LF de instabilidade, em  $n\Omega$ , em função do tempo, a partir de 1 de Maio de 2023 até 31 de Maio de 2024.

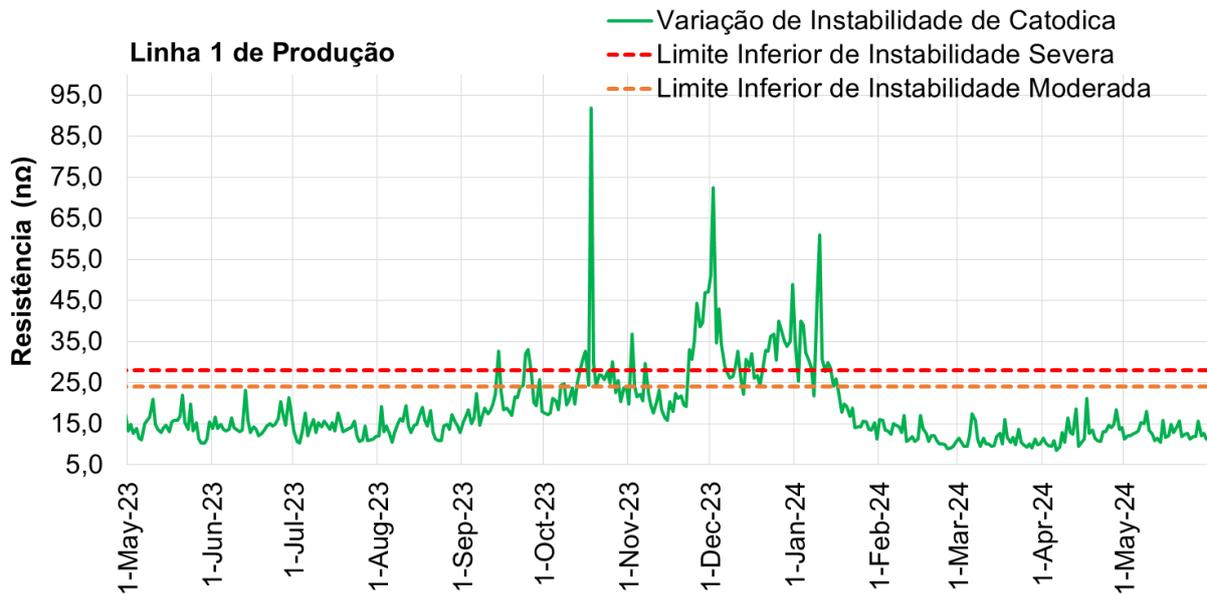


Gráfico 4.9: Variação da instabilidade catódica com o tempo

LF (*low frequency*) é um parâmetro que nos dá indício de ocorrência de uma instabilidade catódica, na forma de resistência. O parâmetro LF é um parâmetro que mede baixas frequências e pode ser influenciado por vários factores tais como: formação de *sludge*, devido a fraca dissolução de alumina, levando ao aumento da resistência do cátodo, gerando uma instabilidade catódica.

A classificação da instabilidade em função do parâmetro LF é dado em três categorias, nomeadamente:

- ✓ **Nível estável:** abaixo de  $24 n\Omega$
- ✓ **Nível de instabilidade Moderada:** no intervalo de  $24 n\Omega$  a  $28 n\Omega$
- ✓ **Nível de instabilidade Severa:** acima de  $28 n\Omega$

No gráfico 4.9 pode se observar que nos meados do mês de outubro de 2023 e de Novembro 2023 á meados de Janeiro de 2024, verifica se um alerta vermelho de instabilidade severa, devido a oscilação de corrente eléctrica, *load shedding* (Corte de Corrente eléctrica).

#### 4.10. Parâmetro HF (*high frequency*) de Instabilidade Anódica

O gráfico 4.10 mostra a variação do parâmetro HF de instabilidade, em  $n\Omega$ , em função do tempo, a partir de 1 de Maio de 2023 até 31 de Maio de 2024.

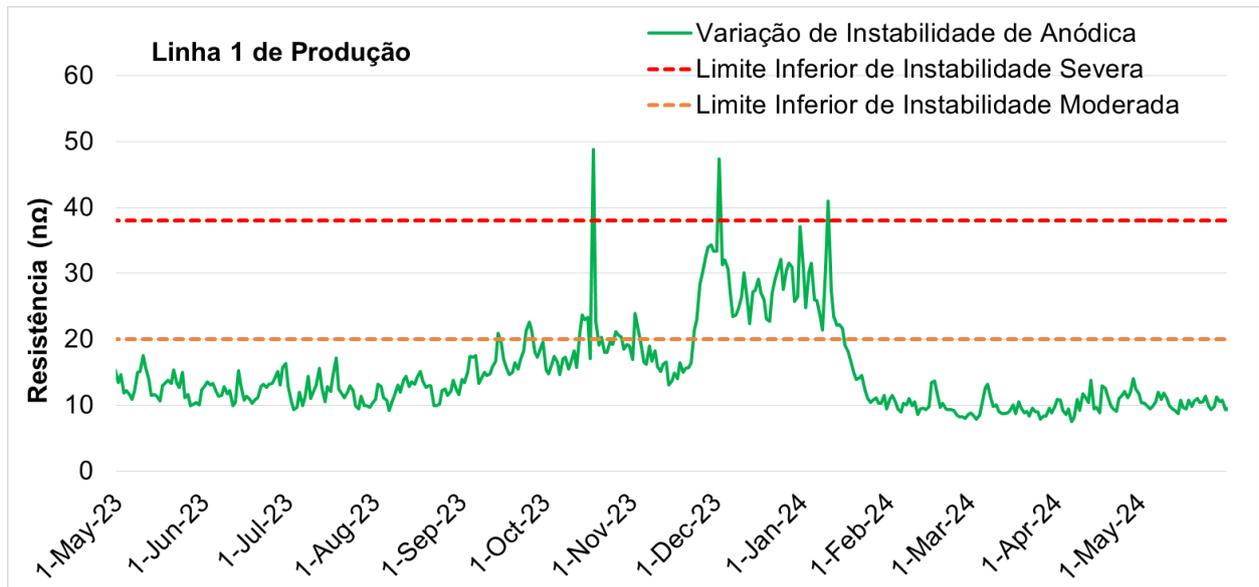


Gráfico 4.10: Variação de instabilidade anódica em função do tempo

HF é um parâmetro que nos dá a indicação de uma ocorrência de uma instabilidade anódica, na forma de resistência. O parâmetro HF é um parâmetro que mede altas frequências, como pode ser influenciado por vários factores tais como: *Mushrooms*, *Cladfail*, *Red Pin*, *Fallen Block*,...

A classificação da instabilidade em função do parâmetro LF é dado em três categorias, nomeadamente:

- ✓ Nível estável: abaixo de  $20 n\Omega$
- ✓ Nível de instabilidade Moderada: no intervalo de  $20 n\Omega$  a  $38 n\Omega$
- ✓ Nível de instabilidade Severa: acima de  $38 n\Omega$

No gráfico 4.10 pode se observar que nos meados do mês de outubro de 2023 e no intervalo mês de finais de novembro 2023 á meados de Janeiro de 2024, verifica se um alerta vermelho de instabilidade severa devido a *mushrooms* excessivos gerados pelas falhas de procedimentos operacionais tais como o *sholver* durante a troca dos ânodos.

#### 4.11. Superaquecimento

O gráfico 4.11 mostra a variação do superaquecimento, em °C, em função do tempo, a partir de 1 de Maio de 2023 até 31 de Maio de 2024.

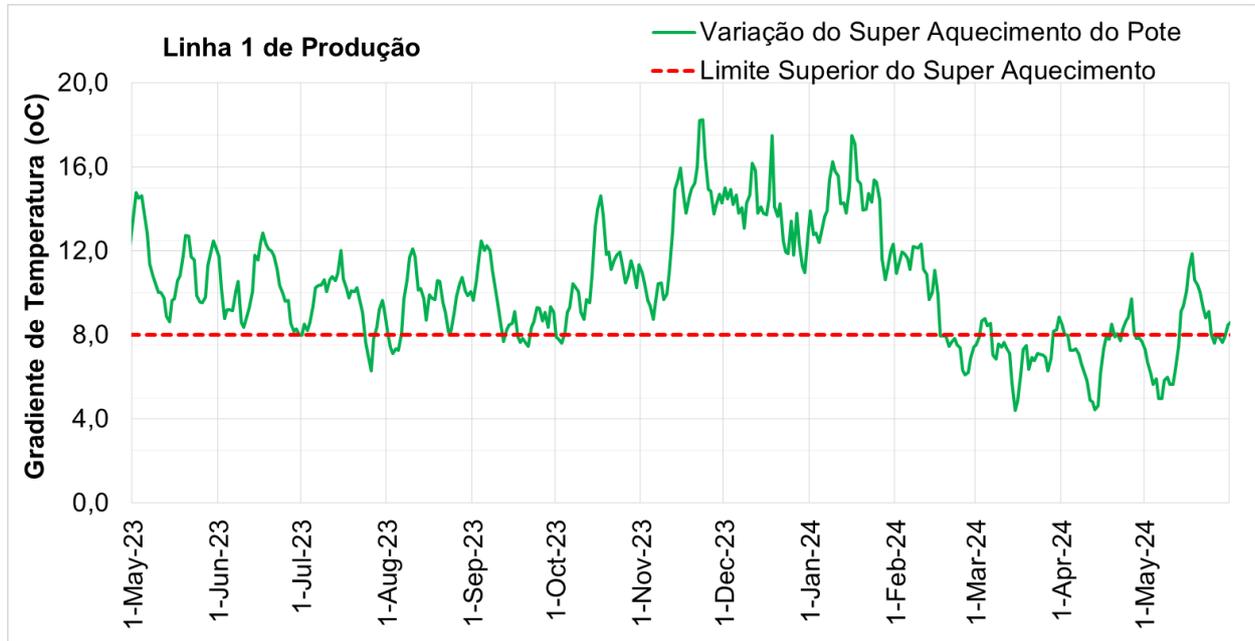


Gráfico 4.11: Variação do superaquecimento em função do tempo

O superaquecimento (SH) é a diferença entre a temperatura do banho ( $T_{\text{banho}}$ ) e a temperatura de fusão ( $T_{\text{Líquido}}$ ) do electrólito.

$$\text{Superaquecimento (SH)} = T_{\text{banho}} - T_{\text{Líquido}}$$

Um determinado valor de superaquecimento é necessário na seguinte ordem para:

- ✓ Fornecer estabilidade do processo
- ✓ Reduzir os custos de energia
- ✓ Aumentar a eficiência atual

Efeitos do superaquecimento:

- ✓ O aumento de 10°C no SH levará a uma diminuição de 1% na eficiência atual
- ✓ Quanto maior SH, maior será a perda de calor (fundação da crosta)
- ✓ SH influencia a energia e o balanço de massa.

No gráfico é possível ver que no mês de novembro, dezembro e janeiro o superaquecimento aumentou até 18 °C. Este é o sinal que mostra a fusão da saliência e da crosta presente na superfície do banho, aumentando a perda de calor.

## 5. CAPÍTULO V: CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

### 5.1. Conclusões

O presente estudo teve como objectivo geral estudar e analisar a variação da instabilidade nas células electrolíticas do modelo tecnológico AP3XLE, na MOZAL. Após o processamento, análise e interpretação dos dados da linha de produção 1, de 1 de Maio de 2023 à 31 de Maio de 2024, foi possível concluir que:

- ✓ A crise provocada pela instabilidade foi mais sentida nos meses de Novembro e Dezembro de 2023 e afectou uma maior percentagem na linha 1 devido à paragem de vários potes, provocada por sucessivos circuitos abertos e fuga de metal.
- ✓ A interrupção frequente de corrente eléctrica é um factor que afecta severamente a instabilidade catódica de um pote quando este dura mais 2h.
- ✓ Um dos factores que influenciou a instabilidade foi o aumento da intensidade da corrente eléctrica que culminou numa maior quantidade de produção de alumínio, mas sem qualidade devido ao elevado teor de ferro cerca de 7650 ppm e silício cerca de 750 ppm. A maior quantidade de produção de alumínio foi directamente proporcional ao número de actividades operacionais atrasadas devido á falhas sucessivas do PTA (Pot Tending Assembly), isto contribuiu para o atraso na sucção do metal, atingindo uma altura indesejável de 26 cm no pote.
- ✓ Outro factor que influenciou a instabilidade foi a falta de banho nos potes, atingindo aproximadamente 13 cm, responsável por circuitos abertos. A elevada temperatura do banho de 983 °C resultou num superaquecimento de 18°C., consumindo a borda das paredes laterais, provocando escorrimento e obrigando à paragem de alguns potes.
- ✓ Outro factor que influenciou a instabilidade foi o mau abastecimento de alumina na célula electrolítica, provocando sucessivos efeitos anódicos (baixa concentração de alumina no banho). Esta má alimentação foi provocada pela má qualidade dos alimentadores dos potes.
- ✓ Os meses de Novembro e Dezembro foram meses muito críticos de instabilidade severa, atingindo um pico de 288 nΩ. Esta instabilidade afectou a eficiência energética, reduzindo-a em cerca de 85%. Foi uma época em que a Mozal investiu no aumento da energia eléctrica, neste caso aumentando o custo de produção, sem retorno da produção (lucro).

## 5.2. Recomendações

Para que a Mozal não entre em estado de instabilidade durante o processo de aumento da corrente eléctrica até atingir a meta de 378 kA, recomenda-se:

- ✓ Instale-se novas pás em todos os PTA, pois esta ferramenta é um factor que influencia bastante na estabilidade durante a substituição do ânodo e é a principal origem de mushrooms nos ânodos;
- ✓ Recomenda-se reajustar o esquema de troca dos ânodos, uma vez que o ânodo dentro do pote na corrente de 365 kA dura 27 dias. Com o aumento da corrente até aos 378 kA o ânodo é consumido rapidamente, reduzindo a vida útil dos ânodos no pote para 25 dias;
- ✓ Coloque-se uma barricada protectora contra passagem de pessoas sempre que seja identificado potencial de estabilidade severa e
- ✓ Faça-se estudos para determinar o aumento óptimo da amperagem em função das condições actuais de produção.

## 6. CAPÍTULO VI: BIBLIOGRAFIAS

### 6.1. Bibliografia Referenciada

1. ABAL, São Paulo, 61p. Disponível em [http://www.abal.org.br/downloads/ABAL\\_Relatorio\\_Bauxita\\_2017\\_1.pdf](http://www.abal.org.br/downloads/ABAL_Relatorio_Bauxita_2017_1.pdf). Acesso em 19/1/2018.
2. *Alumínio*. (2016, Julho 7). Materioteca Sustentável. <https://materioteca.paginas.ufsc.br/aluminio/>.
3. *Aluminium*. (sem data). Royal Society of Chemistry. Obtido 9 de Julho de 2024, de <https://www.rsc.org/periodic-table/element/13/aluminium>
4. Bhavan, I. (2015). Cryolite.
5. Callister jr., W. D. *Materials science and engineering: an introduction*. 4. ed. New York: J. Wiley & Sons, 1997.
6. Emsley J. 1998. *The Elements*. 3ª ed. Nova York, Oxford University Press Inc., 292p. ISBN: 0198558198.
7. Frank, W., Haupin, W., Vogt, H., Bruno, M., Thonstad, J., Dawless, R., Kvande, H., Taiwo, O. (2012). Aluminum. *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*, vol. 2, p. 484-519.
8. Grjotheim, K., & Kvande, H. (1993). *Introduction to Aluminium Electrolysis: Understanding the Hall-Héroult Process*. Beuth Verlag GmbH.
9. Haarberg, G. M. (2016). *The Current Efficiency for Aluminium Deposition from Molten Fluoride Electrolytes with Dissolved Alumina*. Norwegian University of Science and Technology (NTNU), Trondheim, Norway. p. 517.
10. Kolbeinsen, L. (2016). Sustainability in alumina production from bauxite – em “Sustainable Industrial Processing Summit and Exhibition”, Kongoli, F (ed.), vol. 5, p. 75-82.
11. Kvande, H. (2011). Production of primary aluminium. *Fundamentals of Aluminium Metallurgy*, p. 49-69.
12. Kvande, H. (2014). The Aluminium Smelting Process. *JOEM*, vol. 56, n. 5S, p. 2-4.
13. Martins M.M.M (2008). Estudo do comportamento de ligas de alumínio 6061 e 6082. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais). Universidade de Aveia.
14. Moxnes, B. & Kvande, Halvor & Solheim, Asbj, rn. (2007). Experiência e desafios com o aumento da amperagem em linhas de cubas electrolíticas. *TMS light Metals*, p.263-268

15. Nhone, E.S (2023). Análise da Eficiência do Tratamento de Gases em Função da Quantidade de Filtros no Centro de Tratamento de Gases da MOZAL. Engenharia Ambiental. Maputo: Universidade Eduardo Mondlane.
16. Obaidat, M., Al-Ghandoor, A., Phelan, P., Villalobos, R., & Alkhalidi, A. (2018). Energy and exergy analyses of different aluminum reduction technologies. *Sustainability (Switzerland)*, 10(4). <https://doi.org/10.3390/SU10041216>
17. Silva Filho, E. B., Alves, M. C. M., & Da Motta, M. (2007). Lama vermelha da indústria de beneficiamento de alumina: produção, características, disposição e aplicações alternativas. *Matéria (Rio de Janeiro)*, 12(2), 322–338.
18. SOUTH32. (2023). *Mozal Aluminium*. <https://www.south32.net/what-we-do/our-locations/southern-africa/mozal-aluminium>
19. The International Aluminium Institute, 2023. Mining and Refining Process
20. Vanderlei, G. (2007) – Modelamento Matemático de Instabilidade Magnetohidrodinamica em cubas de Redução de Alumínio. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) - Engenharia de Materiais, Universidade Federal Rio Grande Sul.
21. William, F., Warren, H., Helmut, V., Marshall, B., Thonstad, J., Dawless, R., Kvande, H., Taiwo, O. (2012). Aluminium. *Encyclopedia of Industrial Chemistry*, p. 483-515.

## 6.2. Bibliografia Consultada

1. Å. Sterten and P.A. Solli, "An electrochemical current efficiency model for aluminium electrolysis cells", *J. Appl. Electrochem.*, 26 (1996), 187-193.
2. Å. Sterten, *J. Appl. Electrochem.*, "Current efficiency in aluminium reduction cells", 18 (1988), 473-483.
3. Å. Sterten, P.A. Solli, and E. Skybakmoen, "Influence of electrolyte impurities on current efficiency in aluminium electrolysis cells", 28 (1998), 781-789.
4. B.P. Moxnes, Amperage Increase, *29th International Course On Process Metallurgy of Aluminium 2010*, Trondheim Norway, pp 621.
5. Dr. M. Meier, *Anodes – from the raw materials to the pot performance*, International Training Course organized by R&D Carbon Ltd. in Martigny, Switzerland, 22 – 26 September 2014.
6. J. Li, Y. Xu, H. Zhang, and Y. Lai, "An inhomogeneous three-phase model for the flow in aluminium reduction cells", *Int. J. Multiphase Flow*, 37(1) (2011), 46-54..

7. J. Thonstad, P. Fellner, G.M. Haarberg, J. Hives, H. Kvande, and Å. Sterten, "Aluminium Electrolysis. Fundamentals of the Hall-Heroult Process", 353 pages, Aluminium-Verlag, Düsseldorf, 2001.
8. M.A. Bredig, in "Molten Salt Chemistry", M. Blander, ed., Interscience, New York, 1964, p. 367.
9. R. Ødegård, Å. Sterten, and J. Thonstad, "Solubility of aluminium in cryolitic melts", Light Metals 1987, The Metals Materials and Minerals Society, 389 - 398.
10. Solli, P.A., T. Haarberg, T. Eggen, E. Skybakmoen, and A. Sterten, "Laboratory study of current efficiency in cryolitic melts", Light Metals 1994, The Metals Materials and Minerals Society, 195-203.
11. X. Wang, R.D. Peterson, and N.E. Richards, "Dissolved metals in cryolitic melts", Light Metals 1991, The Metals Materials and Minerals Society, 323 - 330.

# ANEXOS

## Anexo 1: Figuras



Figura A1: Ilustração de pó de monóxido de carbono na superfície do banho electrolítico



Figura A2: Ilustração de um PTA



Figura A3: Ilustração de um pote parado devido a instabilidade



Figura A4: Ilustração de um mushroom por baixo do ânodo



Figura A5: Ilustração de um potemicro (conhecido como cérebro do pote)



Figura A6: Ilustração do processo de sucção de metal no pote