



UNIVERSIDADE  
E D U A R D O  
MONDLANE

**FACULDADE DE ENGENHARIA**

**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA**

LICENCIATURA EM ENGENHARIA QUÍMICA

Estágio Profissional

**TEMA:**

**Avaliação do impacto do pré-aquecimento do cátodo  
no desempenho e tempo de vida útil da célula  
electrolítica – Caso de estudo Mozal S.A**

**Autor**

Bernardo Tomás Mangana

**Supervisor**

Prof. Doutor António Cumbane, Eng.º

Maputo, Maio de 2025



UNIVERSIDADE  
E D U A R D O  
MONDLANE

**FACULDADE DE ENGENHARIA**

**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA**

**LICENCIATURA EM ENGENHARIA QUÍMICA**

Estágio Profissional

**TEMA:**

**Avaliação do impacto do pré-aquecimento do cátodo no desempenho e tempo de vida útil da célula electrolítica – Caso de estudo Mozal S.A**

**Autor:**

Bernardo Tomás Mangana

**Supervisor:**

Prof. Doutor António Cumbane, Eng.º

Maputo, Maio de 2025

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

Declaro que o estudante Bernardo Tomás Mangana entregou no dia \_\_\_\_/\_\_\_\_/2025 as 04 cópias do Relatório do seu Estágio Profissional intitulado: **Avaliação do impacto do pré-aquecimento do cátodo no desempenho e tempo de vida útil da célula electrolítica – Caso de estudo Mozal, S.A.**

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

O Chefe da Secretaria

\_\_\_\_\_

## **DECLARAÇÃO DE HONRA**

Declaro que este presente trabalho é resultado da minha própria pesquisa, as ideias originais expressas são da minha inteira responsabilidade sob orientação do meu supervisor e este trabalho não foi submetido em nenhuma outra instituição para a obtenção de qualquer grau académico.

Maputo, Maio de 2025

O Autor

---

(Bernardo Tomás Mangana)

## **DEDICATÓRIA**

Dedico este trabalho, com amor e carinho, à memória do meu tio homónimo, Bernardo Mangana, por todo amor incondicional, carinho, apoio e incentivo a mim oferecido e especialmente por ter acreditado no meu potencial, até ao último dia de sua vida. Que a sua alma continue descansando em paz.

## **AGRADECIMENTOS**

A realização deste trabalho de licenciatura representa a conclusão de uma importante etapa da minha vida acadêmica, e não teria sido possível sem o apoio de diversas pessoas às quais sou profundamente grato.

Em primeiro lugar, agradeço a Deus por me conceder força, saúde e perseverança ao longo desta jornada.

Agradeço ao meu supervisor, prof. Dr. Eng<sup>o</sup> António Cumbane, por sua orientação, paciência e incentivo durante todas as etapas deste trabalho. Sua experiência e disponibilidade foram fundamentais para o desenvolvimento desta pesquisa.

À Faculdade de Engenharia da UEM, agradeço pela oportunidade de frequentar o curso de Engenharia Química.

À empresa Mozal S.A, agradeço pela oportunidade de realizar a pesquisa em suas instalações.

À equipe do processo do departamento de redução na Mozal, e em particular aos engenheiros Alberto Nhacassane, Abílio Timane, Walter Mwanza e Samuel Nhamtumbo, ao meu supervisor Mário Cossa, ao superintendente do processo Pascoal Macuácuca e ao superintendente de serviços de linha Rui Guiboane, agradeço pela orientação e fornecimento de dados fundamentais para a pesquisa.

Aos meus professores e colegas do curso, agradeço pela orientação, trocas de conhecimento, companheirismo e apoio mútuo ao longo desses anos.

Aos meus pais, Tomás Mangana e Percina Fernando Cossa, e a todos meus irmãos, meu eterno agradecimento por acreditarem em mim, mesmo nos momentos mais difíceis, e por sempre me apoiarem com amor e compreensão.

Agradecimento muito especial à minha esposa, Karen Ngaye Siteo, pelo apoio incondicional e principalmente pela confiança no meu potencial

Aos meus filhos, Rooney, Wendy e Emilly, agradeço pela paciência e compreensão dos momentos ausentes ao longo da minha jornada acadêmica.

Gratidão imensurável aos amigos verdadeiros, que compreenderam minhas ausências, ofereceram palavras de apoio e celebraram cada pequena conquista comigo, em particular, o Felizardo Bouene e Lucas Lucas, pela partilha de sua larga experiência no ramo de produção de alumínio.

Por último, mas não menos importante, agradeço a todo indivíduo que, directa ou indirectamente me apoiou ao longo da minha jornada acadêmica.

*“O sucesso é ir de fracasso em fracasso, sem perder entusiasmo”*

*– Winston Churchill*

## **Abstract**

The present work aimed to evaluate the impact of cathode preheating on the operational performance and lifespan of electrolytic cells, using the Mozal S.A. aluminum smelting plant as a case study. The adopted methodology combined a bibliographic and empirical approach, where three electrolytic cells (B053, B106, and B122) were selected. Thermal and electrical monitoring procedures were applied during their preheating phase, and their behavior was evaluated over the first 45 days of operation (early life). The data collected were processed and analyzed using statistical and comparative methods.

The results demonstrated that efficient preheating is crucial for achieving thermal uniformity and optimized cathodic current distribution. It was observed that cells with final preheating temperatures above 850 °C exhibited lower thermal standard deviations, whereas cells with temperatures below 850 °C showed higher deviations. Cell B053 displayed a more acceptable preheating rate and consistently maintained its standard deviation within the acceptable limit throughout the process, indicating uniform temperature distribution across the cathode surface. Moreover, during early life, electrical current efficiency was higher in the cells that showed better performance during the preheating phase, with cell B053 standing out.

It was also noted that in cells with more homogeneous preheating, the instability index (WRMI) remained below 100  $\mu\Omega$  (the maximum acceptable limit for a stable cell) for most of the early life period.

The occurrence of stresses generated by thermal shock during cell startup, stresses caused by excessive deformation in the cathode, and metal infiltration into the joints of cathode blocks were identified as the main failure mechanisms due to inadequate preheating.

**Keywords:** Electrolytic cell, Preheating, Cathode, Current efficiency, Lifespan, Mozal S.A.

## **GLOSSÁRIO DE ABREVIATURAS E ACRÓNIMOS**

**A** – Amperes

**ACD** – Distribuição da corrente no ânodo

**AE** – *Anode effect* (efeito anódico)

**AlF<sub>3</sub>** – Fluoreto de alumínio

**AP35** – Tecnologia “*Aluminium Pechiney*” em plantas de cerca de 350 Quilo Amperes

**Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>** – Alumina

**BH** – *Bath Height* (Altura do banho)

**BT** – *Bath temperature* (temperatura do banho)

**C** – Carbono

**CaF<sub>2</sub>** – Fluoreto de cálcio

**CF<sub>4</sub>** – Tetrafluorometano

**CO** – Monóxido de carbono

**CO<sub>2</sub>** – Dióxido de carbono

**C<sub>2</sub>F<sub>6</sub>** – Hexafluoreto de etano

**CVD** – *Cathode Voltage Drop* (queda de tensão catódica ou resistência catódica)

**Dev** – *Deviation* (desvio)

**E** – Número de equivalente-grama

**E<sub>el</sub>** – Energia acumulada

**Ef** – Eficiência da corrente

**F** – Constante de Faraday

**Fe** – Ferro

**I** – Intensidade da corrente eléctrica

**KA** – Quilo Amperes

**M** – Massa molar

**m<sub>real</sub>** – Massa real do Alumínio produzido diariamente

**m'<sub>real</sub>** – Massa real do produzido a cada 32h

**m<sub>teórica</sub>** – Massa teórica do alumínio produzido diariamente

**N** – Número de valência

**NaF** – Fluoreto de Sódio

**NaCN** – Cianeto de sódio

**N<sub>2</sub>** – Nitrogénio

**Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>** – Soda ash (Carbonato de sódio)

**Na<sub>3</sub>AlF<sub>6</sub>** – Criolita (Hexafluoroaluminato de sódio)

**O<sub>2</sub>** – Oxigénio

**PFC's** – Perfluorocarbonetos

**Q** – Carga eléctrica

**RSD** – *Relative standard deviation* (Desvio padrão relativo)

**Si** – Silício

**SiO<sub>2</sub>** – Óxido de silício

**SP** – *Set point* (ponto de ajuste)

**t** – Tempo

**T<sub>i</sub>** – Temperatura parcial do cátodo (i=1,2,3,4,5)

**T<sub>m</sub>** – Temperatura média

**UEM** – Universidade Eduardo Mondlane;

**V** – Volts

**WRMI** – *Wehrli-Rau-Morita Instability* (Parâmetro de instabilidade)

**ΔT** – Variação de temperatura por unidade de tempo

## **ÍNDICE**

Página

TERMO DE ENTREGA DO RELATÓRIO DO ESTÁGIO PROFISSIONAL .....	i
DECLARAÇÃO DE HONRA.....	ii
DEDICATÓRIA .....	iii
AGRADECIMENTOS.....	iv
Abstract.....	vi
GLOSSÁRIO DE ABREVIATURAS E ACRÓNIMOS .....	vii
ÍNDICE .....	ix
ÍNDICE DE TABELAS .....	xii
ÍNDICE DE FIGURAS .....	xii
ÍNDICE DE GRÁFICOS .....	xiii
CAPÍTULO I .....	1
1. INTRODUÇÃO .....	1
1.1. Contextualização .....	1
1.2. Objectivos .....	2
1.2.1. Geral.....	2
1.2.2. Específicos .....	2
1.3. Problema de pesquisa .....	2
1.4. Justificativa .....	3
1.5. Perguntas de pesquisas.....	4
1.5.1. Questões de apoio à investigação .....	4
1.5.2. Hipóteses.....	4
1.6. Metodologia do trabalho.....	4
a) Pesquisa Bibliográfica: .....	5
b) Pesquisa de Campo:.....	5
c) Recolha de Dados:.....	5
d) Apresentação e discussão dos resultados:.....	5
e) Elaboração do relatório: .....	5
CAPÍTULO II .....	6
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	6
2.1. Introdução a produção do Alumínio .....	6
2.1.1. Estequiometria da reacção envolvida no processo .....	8

2.1.2. Eficiência da corrente .....	8
2.1.3. Características físico-químicas do electrólito .....	9
2.2. Pré-aquecimento das células electrolíticas .....	10
2.2.1. Método de resistência eléctrica .....	11
2.2.2. Método de Pré-aquecimento de Chama.....	13
2.2.3. Avaliação da qualidade do pré-aquecimento.....	14
a) Temperatura de pré-aquecimento .....	14
b) Distribuição da temperatura.....	14
c) Distribuição de corrente eléctrica pelos ânodos .....	14
d)Tempo de Pré-aquecimento.....	14
2.3. Inicialização e monitoramento das células electrolíticas .....	15
2.3.1. Inicialização à quente ( <i>Hot Start Up</i> ) .....	15
a) Primeira fase .....	15
b) Segunda fase .....	15
c)Terceira fase.....	15
2.3.2. Inicialização a frio ( <i>Dry Start Up</i> ) .....	17
2.3.3. Acidez do banho electrolítico durante a inicialização .....	17
2.4. Falha catódica.....	18
2.4.1. Mecanismos de falha dos cátodos .....	18
2.4.1.1. Processos químicos em cátodos.....	19
a) Formação de carbetos de alumínio .....	19
b) Intercalação e adsorção do sódio .....	21
c) Interação sódio – carbono – electrólito .....	21
d) Interação sódio – carbono – ar.....	21
e) Interação metal – material refractário.....	21
2.4.1.2. Estratificação e retracção da pasta catódica.....	22
2.4.1.3. Interação entre os blocos catódicos e a carcaça.....	22
2.4.1.4. Interação entre os blocos catódicos e barras colectoras .....	23
2.4.1.5. Choques térmicos devido ao pré-aquecimento irregular.....	24
2.4.1.6. Interrupções temporárias da corrente.....	24
CAPÍTULO III .....	25
3. DESCRIÇÃO DO ESTUDO DO CAMPO.....	25
3.1. Mozal .....	25

3.2. Estudo de caso .....	27
3.2.1. Principais actividades de serviços de linha.....	27
3.2.2. Recolha de dados .....	28
CAPÍTULO IV.....	29
4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	29
4.1. Fase do pré-aquecimento .....	29
4.1.1. Comportamento dos perfis de temperatura das células .....	30
4.1.2. Taxa de pré-aquecimento das células.....	31
4.1.3. Distribuição da temperatura do cátodo.....	31
4.1.4. Distribuição da corrente dos ânodos (ACD) .....	32
4.2. Período primórdio de operação ( <i>Early Life</i> ) .....	33
4.2.1. Temperatura do banho.....	33
4.2.2. Altura do banho .....	34
4.2.3. Excesso de $\text{AlF}_3$ .....	36
4.2.4. Concentração de Ferro e Silício no metal.....	37
4.2.5. Resistência catódica.....	38
4.2.6. Efeitos anódicos (AE) .....	39
4.2.7. Índice de Instabilidade (WRMI).....	41
4.2.8. Eficiência da corrente (Ef).....	42
CAPÍTULO V.....	44
5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....	44
5.1. Conclusões .....	44
5.2. Recomendações.....	45
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	47
Anexos .....	1

## ÍNDICE DE TABELAS

	Página
<b>Tabela 1.</b> Comparação dos Métodos de Pré-aquecimento. ....	13

## ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
<b>Figura 1.</b> Célula electrolítica com ânodos pré-cozidos. Fonte: Massinguil (2014). ....	6
<b>Figura 2.</b> Disposição das células electrolíticas em um "Potline". ....	7
<b>Figura 3.</b> Diagrama de equilíbrio do electrólito da célula de redução electrolítica. ....	9
<b>Figura 4.</b> Disposição dos termopares para o monitoramento de temperatura. ....	10
<b>Figura 5.</b> Preenchimento de grafite nas posições onde assentam-se os ânodos. ....	11
<b>Figura 6.</b> Preenchimento de Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> e criolita para a cobertura sobre os ânodos. ....	12
<b>Figura 7 .</b> Inicialização a quente: Adição de banho electrolítico na célula. ....	16
<b>Figura 8.</b> Formação de Al <sub>4</sub> C <sub>3</sub> em função do teor de Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> no electrólito. Fonte: Grjotheim & Welch (1998). ....	19
<b>Figura 9.</b> Corrosão do cátodo nas zonas de formação de Al <sub>4</sub> C <sub>3</sub> . Fonte: Grjotheim & Welch (1998). ....	20
<b>Figura 10.</b> Evolução da corrosão das paredes laterais. Fonte: SØRLIE & ØYE (1993). ....	20
<b>Figura 11.</b> Estratificação e retracção da pasta catódica. Fonte: Faanes et al (1989) ....	22
<b>Figura 12.</b> Classificação das barras colectoras. Fonte: SØRLIE & ØYE (1993). ....	23
<b>Figura 13.</b> Blocos catódicos e suas respectivas barras colectoras, comumente utilizados na indústria de produção de alumínio. ....	23
<b>Figura 14.</b> Vista aérea da Mozal. Fonte: Mozal, Introduction to Potlines (2016). ....	25
<b>Figura 15.</b> Vista aérea do departamento de redução. ....	26
<b>Figura 16.</b> Ciclo de operações de serviços de linha em uma célula electrolítica. ....	27
<b>Figura 17.</b> Fluxo da corrente eléctrica em uma célula parada. Fonte: Mozal, <i>Pot Energizing and Preheating</i> (2017). ....	28

## **ÍNDICE DE GRÁFICOS**

	<b>Página</b>
<b>Gráfico 1.</b> Perfis de temperatura de pré-aquecimento das células. ....	30
<b>Gráfico 2.</b> Gradientes de temperatura das células em pré-aquecimento. ....	31
<b>Gráfico 3.</b> Desvio padrão relativo das temperaturas das células em pré-aquecimento. ....	32
<b>Gráfico 4.</b> Desvio padrão relativo da corrente dos ânodos. ....	32
<b>Gráfico 5.</b> Temperatura do banho da célula B053. ....	33
<b>Gráfico 6.</b> Temperatura do banho da célula B106. ....	34
<b>Gráfico 7.</b> Temperatura do banho da célula B122. ....	34
<b>Gráfico 8.</b> Variações da altura do banho da célula B053. ....	35
<b>Gráfico 9.</b> Variações da altura do banho da célula B106. ....	35
<b>Gráfico 10.</b> Variações da altura do banho da célula B122. ....	35
<b>Gráfico 11.</b> Excesso do $\text{AlF}_3$ na célula B053. ....	36
<b>Gráfico 12.</b> Excesso do $\text{AlF}_3$ na célula B106. ....	36
<b>Gráfico 13.</b> Excesso do $\text{AlF}_3$ na célula B122. ....	37
<b>Gráfico 14.</b> Concentrações de Ferro e Silício na célula B053. ....	37
<b>Gráfico 15.</b> Concentrações de Ferro e Silício na célula B106. ....	38
<b>Gráfico 16.</b> Concentrações de Ferro e Silício na célula B122. ....	38
<b>Gráfico 17.</b> Variações da resistência catódica das células em estudo. ....	39
<b>Gráfico 18.</b> Número de efeitos anódicos na célula B053. ....	40
<b>Gráfico 19.</b> Número de efeitos anódicos na célula B106. ....	40
<b>Gráfico 20.</b> Número de efeitos anódicos na célula B122. ....	40
<b>Gráfico 21.</b> Índice de instabilidade das células em estudo. ....	41
<b>Gráfico 22.</b> Eficiência da corrente na célula B053. ....	42
<b>Gráfico 23.</b> Eficiência da corrente na célula B106. ....	42
<b>Gráfico 24.</b> Eficiência da corrente na célula B122. ....	42

## **CAPÍTULO I**

### **1. INTRODUÇÃO**

#### **1.1. Contextualização**

As células electrolíticas servem como elementos essenciais numa variedade de aplicações industriais tais como a geração de hidrogénio, a refinação de metais e as tecnologias de células de combustível. O funcionamento eficaz destas células depende em grande parte do desempenho dos seus eléctrodos, especialmente do cátodo, que é crucial para minimizar as perdas de energia e manter um desempenho consistente durante longos períodos. No entanto, a sua longevidade e eficiência podem ser consideravelmente influenciadas por vários factores, incluindo a degradação do material, a dinâmica do transporte de iões e as tensões mecânicas resultantes das variações de temperatura.

O pré-aquecimento do cátodo é essencial para aumentar a eficiência e durabilidade das células electrolíticas. Na indústria de produção do alumínio, o método de pré-aquecimento de resistência eléctrica é complexo e influencia grandemente o desempenho e vida útil das células electrolíticas (Tremblay *et al.*, 2023). Factores como a taxa de aumento da temperatura, a distribuição da temperatura, temperatura final da superfície do cátodo, a distribuição da corrente anódica são críticos na avaliação da qualidade do pré-aquecimento da célula (Tremblay *et al.*, 2023). O pré-aquecimento adequado é essencial para atingir uma temperatura de operação consistente nos blocos catódicos, no entanto, isto raramente é realizado em aplicações do mundo real.

Os cátodos sofrem efeitos de envelhecimento durante o seu funcionamento, o que por sua vez afecta a sua condutividade eléctrica e a eficiência energética global (Hankel *et al.*, 2022). A avaliação do pré-aquecimento catódico oferece uma oportunidade valiosa para aumentar a eficiência e a durabilidade das células electrolíticas. Dados os duplos desafios das limitações económicas e das responsabilidades ambientais, a obtenção de conhecimento aprofundado na aplicação desta técnica pode impactar efectivamente a sustentabilidade da indústria de produção do alumínio. Por esta razão, o objectivo desta investigação é avaliar os efeitos do pré-aquecimento catódico na eficiência e na durabilidade das células electrolíticas tendo como caso de estudo as células electrolíticas da Mozal S.A.

## **1.2. Objectivos**

### **1.2.1. Geral**

- Avaliar o impacto do pré-aquecimento do cátodo no desempenho e tempo de vida útil da célula electrolítica.

### **1.2.2. Específicos**

- Investigar a relação entre o processo do pré-aquecimento das células electrolíticas e o seu comportamento na fase operacional;
- Descrever os principais mecanismos de falha dos cátodos;
- Identificar os mecanismos de falha dos cátodos resultantes de um processo de pré-aquecimento inadequado;
- Identificar medidas de correcção em células electrolíticas cujo processo de pré-aquecimento não tenha sido bem-sucedido.

## **1.3. Problema de pesquisa**

Em operações industriais extensas, como a fundição de alumínio, as células electrolíticas desempenham um papel crucial. No entanto, estas células são susceptíveis a declínios de eficiência e deterioração ao longo do tempo, principalmente devido às elevadas densidades de corrente, temperaturas variáveis e ao desenvolvimento de compostos indesejados na superfície do cátodo. Um desafio significativo encontrado por estas células é o problema dos choques térmicos durante a sua inicialização, que ocorrem intensamente quando são activadas a temperaturas abaixo do ideal. Esta situação resulta numa cinética de reacção abaixo do ideal, diminuição da mobilidade dos electrões e degradação acelerada dos materiais catódicos (Tada *et al.*, 2015).

Em termos operacionais deve garantir-se que as intervenções na célula sejam feitas mediante os procedimentos padrão, sem atrasos e com um monitoramento contínuo de modo a evitar qualquer instabilidade ou perda da qualidade do metal produzido. O processo de reconstrução das células também impacta tanto o seu comportamento na fase operacional como o seu tempo de vida útil. Dentre os desafios comuns associados, destacam-se a regulação da temperatura durante o pré-aquecimento das células e o alcance da energia

acumulada suficiente para a inicialização com uma distribuição uniforme ao longo da superfície catódica. Na ausência de estratégias para um pré-aquecimento adequado do cátodo, a indústria enfrenta consideráveis perdas de energia e diminuição da vida útil das células electrolíticas, resultando, em ineficiências financeiras e danos ambientais (Hankel *et al.*, 2022; Tada *et al.*, 2015).

O pré-aquecimento adequado do cátodo apresenta uma abordagem viável para melhorar a estabilidade da célula, diminuindo assim a formação de óxidos e aliviando as tensões mecânicas no material do cátodo. No entanto estes factores não se encontram quantitativamente bem definidos e documentados, isto é, todas investigações conduzidas até os dias actuais basearam-se em análises estatísticas e carecem de evidências quantitativas (Ali, 2013). Obter mais informações sobre estes factores é essencial para otimizar o desempenho das células electrolíticas, reduzindo os gastos energéticos e melhorando a durabilidade destes componentes vitais.

#### **1.4. Justificativa**

Um estudo sobre o pré-aquecimento do cátodo no ramo da indústria de produção do alumínio torna-se um tópico muito necessário, desse modo pode sumarizar-se as potenciais contribuições que o presente trabalho oferece:

- **Indústria de produção do alumínio:** O pré-aquecimento adequado do cátodo aumenta significativamente a eficiência energética da célula electrolítica, resultando em reduções dos custos operacionais e aumento da produção. Portanto, os resultados desta investigação podem melhorar a sustentabilidade económica da Mozal S.A, servindo de enquadramento para os sectores envolvidos melhorarem a eficiência operacional, mantendo assim a competitividade e a adaptabilidade face aos custos variáveis de energia e outras matérias-primas.
- **Ciência dos Materiais:** O pré-aquecimento adequado do cátodo contribui para a minimização do seu desgaste, garantindo condições térmicas estáveis e aliviando o stress mecânico. Este processo prolonga a vida útil operacional das células electrolíticas, diminuindo assim os gastos de manutenção e minimizando os períodos de inactividade.
- **Electroquímica:** Esta investigação ajuda a examinar o impacto do pré-aquecimento na mobilidade dos electrões durante a electrólise e na cinética das reacções.

## **1.5. Perguntas de pesquisas**

Com base no problema de pesquisa levantado, e com vista a dar-se uma resposta a mesma, coloca-se a seguinte pergunta a investigar:

*De que forma o pré-aquecimento dos cátodos influencia a eficiência global das células electrolíticas na Mozal S.A.?*

### **1.5.1. Questões de apoio à investigação**

Por forma a expandir o campo do trabalho e dar uma visão mais ampla do trabalho, podem se colocar as seguintes perguntas auxiliares:

- Como é que o pré-aquecimento afecta a taxa de degradação do material catódico?
- Como é que o pré-aquecimento influencia os custos de operação, reduzindo o desgaste e as falhas do cátodo?
- Que benefícios mensuráveis um pré-aquecimento adequado oferece?

### **1.5.2. Hipóteses**

Em virtude do problema levantado, assim como a pergunta a ser investigada, para o presente trabalho podem ser levantadas as seguintes hipóteses:

**Hipótese Nula ( $H_0$ ):** O pré-aquecimento do cátodo não tem impacto significativo no desempenho e no tempo de vida útil da célula electrolítica na Mozal S.A.

**Hipótese Alternativa ( $H_1$ ):** O pré-aquecimento do cátodo tem um impacto significativo no desempenho e no tempo de vida útil da célula electrolítica na Mozal S.A.

## **1.6. Metodologia do trabalho**

Com vista alcançar os objectivos traçados, a elaboração do presente trabalho obedeceu a seguinte sequência:

- a) Pesquisa Bibliográfica:** A revisão bibliográfica consistiu na recolha, selecção das informações relacionadas com o campo da electroquímica, filtrando as informações referentes às células electrolíticas de produção do alumínio. Onde para tal recorreu-se ao uso de revistas, artigos científicos, livros, trabalhos de conclusão de curso, dissertações e módulos de treinamento da empresa Mozal S.A.
- b) Pesquisa de Campo:** Reconhecimento e exploração do local da recolha de dados, especificamente no departamento de redução (nos sectores de controlo de processo e serviços de linha), com o objectivo de observar e entender os processos fundamentais relacionados ao tema de estudo.
- c) Recolha de Dados:** Foram seleccionadas três células electrolíticas paradas com denominações B053, B106 e B122, tendo acompanhado o seu processo de pré-aquecimento, arranque e *early life*, com objectivo de colher dados fundamentais para o controlo e avaliação do pré-aquecimento e a posterior análise do comportamento da célula no *early life*.
- d) Apresentação e discussão dos resultados:** Após a obtenção dos resultados experimentais, estes foram expressos na forma de gráficos e tabelas no trabalho. Fez-se o uso de técnicas e ferramentas estatísticas para analisar e comparar os resultados obtidos para dar um juízo final em torno do mesmo.
- e) Elaboração do relatório:** O relatório final foi elaborado de acordo com as normas em vigor na Faculdade de Engenharia da UEM, cobrindo informações desde a introdução, objectivos, relevância do tema, revisão bibliográfica, parte experimental, apresentação e interpretação dos resultados, conclusões e recomendações.

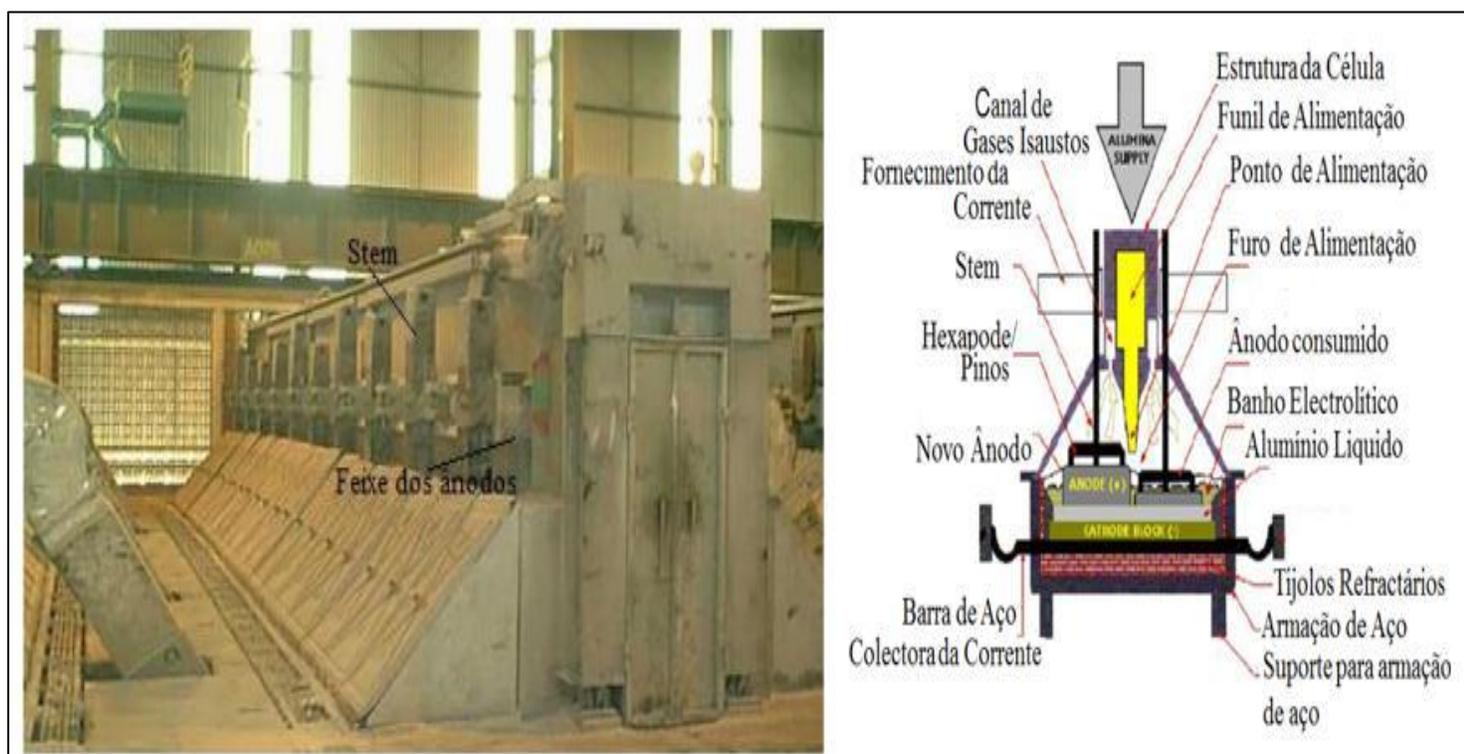
## CAPÍTULO II

### 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 2.1. Introdução a produção do Alumínio

O alumínio, com uma produção anual superior a 50 megatoneladas em 2016, é um material essencial nos projectos modernos de engenharia (Alamdari, 2017). Suas propriedades, como leveza, alta condutividade eléctrica, grande resistência à corrosão e baixo ponto de fusão, permitem que seja utilizado de forma extensiva para a produção de diversos itens, tais como ligas metálicas, laminados e extrudados (Cardoso *et al*, 2011).

O processo de produção industrial mais económico do alumínio teve início no ano de 1889 e ficou conhecido como Hall-Heroult em homenagem aos cientistas Toussaint Heroult e Charles Hall pelo seu contributo independente no processo. Este processo ocorre em uma unidade denominada célula electrolítica, ilustrada na Figura 1 (Grjotheim & Welch, 1998).

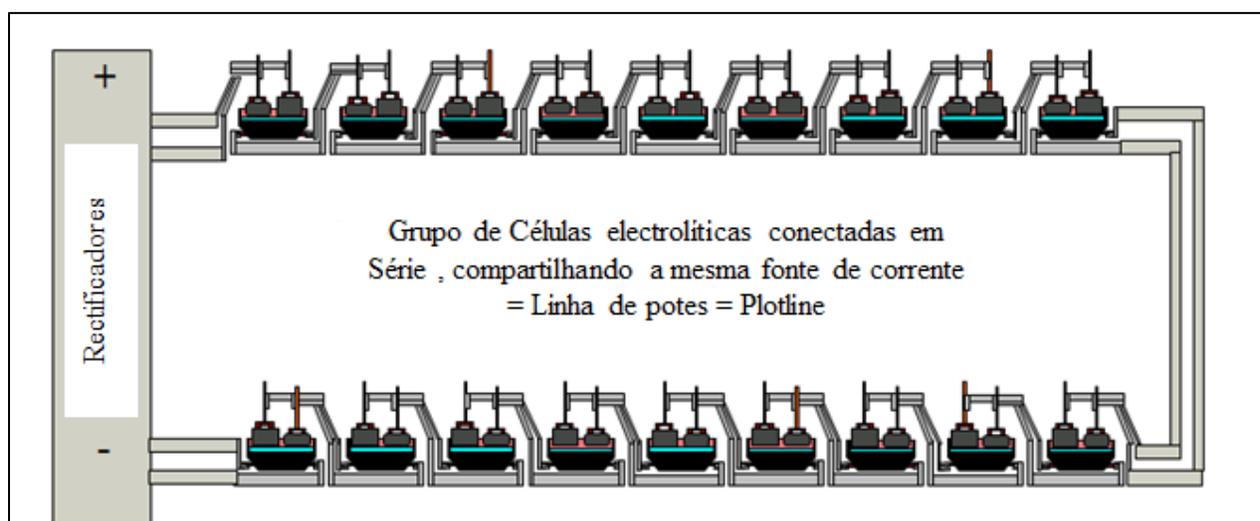


**Figura 1.** Célula electrolítica com ânodos pré-cozidos. Fonte: Massinguil (2014).

Os blocos de ânodo de carbono são suspensos em varões de aço e mergulhados no electrólito. À medida que a corrente eléctrica flui através do electrólito, decompõe a alumina

dissolvida nos seus elementos componentes, como o alumínio metálico e o gás oxigénio. O oxigénio reage com os ânodos de carbono, formando bolhas de gás (CO e CO<sub>2</sub>). O alumínio líquido deposita-se no fundo da célula, uma vez que é mais denso (gravidade específica 2,3 a 960°C) do que o electrolito (gravidade específica 2,1). (Altenpohl *et al.*, 1998).

Nos sistemas de produção modernos, as células electrolíticas são dispostas em série para reduzir os efeitos magnéticos e não são colocadas lado a lado. Como mostra a Figura 2, a corrente contínua da subestação entra nos ânodos e atravessa o banho electrolítico, saindo do cátodo pelas barras colectoras para a próxima célula, uma vez que estão conectadas em série. (Massinguil, 2014).

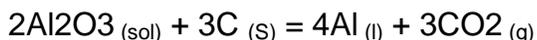


**Figura 2.** Disposição das células electrolíticas em um "Potline".

Fonte: Mozal, *Definition and Major Equilibrium* (2017).

A alimentação contínua da alumina por injeção é feita em pontos de alimentação automatizados. Esta é fornecida por quatro funis em cada uma das células electrolíticas e quatro alimentadores volumétricos acoplados aos funis. Os alimentadores adicionam um quilo de alumina em cada quinze segundos (na configuração normal). As voltagens individuais das células na ordem de 4.0 V garantem que a corrente seja constante. Como mostra a Figura 1, uma barra de distribuição de corrente conhecida como "anode beam" mantém os ânodos suspensos na célula. De forma cíclica, o alumínio líquido a alta temperatura é sugado das células e transportado para a fábrica de moldes, onde é transformado em lingotes (Massinguil, 2014).

### **2.1.1. Estequiometria da reacção envolvida no processo**



Teoricamente, para produzir 1 quilograma de alumínio são necessários 1.89 quilogramas de alumina, 0.33 quilogramas de carbono e 13.5 quilowatts-horas de energia eléctrica, libertando cerca de 1.22 quilogramas de dióxido de carbono em emissões. Na prática, o consumo da alumina pode atingir até 1.93 quilogramas, de carbono entre 0.40 a 0.45 quilogramas e energia eléctrica entre 13 a 15 quilowatts-hora (dependendo da eficiência energética do processo), libertando até cerca de 1.5 quilogramas de dióxido de carbono em emissões (Grjotheim & Welch, 1998).

### **2.1.2. Eficiência da corrente**

A eficiência da corrente do processo de electrólise é definida como a relação entre a produção de alumínio por unidade de tempo e a produção teórica de alumínio calculada de acordo com a lei de Faraday:  $E_f = (m_{\text{real}} / m_{\text{teórica}}) \times 100$

Onde,  $m_{\text{real}}$  é a produção real do alumínio e  $m_{\text{teórica}}$  a produção teórica do alumínio.

De acordo com a segunda lei de Faraday, a massa da substância produzida durante a electrólise é directamente proporcional à carga eléctrica total do sistema e à equivalente-grama dessa substância.  $m_{\text{teórica}} = (1/F) \times Q \times E$

E - Equivalente grama da substância produzida; F - Constante de Faraday;

Q - Carga eléctrica; Sendo que:  $Q = I \times t$  e  $E = M/N$

I – Intensidade da corrente; t – tempo; M – massa molar; N – número de valência

$$m_{\text{teórica}} = M \times I \times t / (N \times F)$$

Para o caso da produção diária do alumínio por via da electrólise temos os seguintes dados:

M = 26.98 g/mol; N = 3; F = 96500.51 C/mol; t = 24 h = 24 x 60 x 60 s

Substituindo os dados:

$$m_{\text{teórica}} = 26.98 \times I \times 24 \times 60 \times 60 / (3 \times 96485)$$

$$m_{\text{teórica}} = 8.0533 \times I$$

Portanto, a eficiência da corrente referente à produção diária do alumínio é:

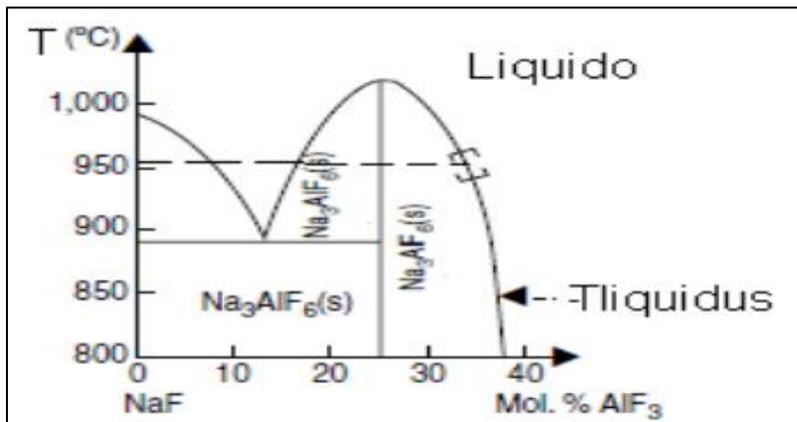
$$E_f = m_{\text{real}} / (8.0533 \times I)$$

### 2.1.3. Características físico-químicas do electrólito

A criolita ( $\text{Na}_3\text{AlF}_6$ ) é o principal componente do banho electrolítico. Ela funde-se congruentemente a  $1010^\circ\text{C}$ , porém, a sua temperatura de fusão é reduzida para condições operacionais através da adição de fluoreto de alumínio ( $\text{AlF}_3$ ) e fluoreto de cálcio ( $\text{CaF}_2$ ) na proporção correcta. Quando fundida, a criolita torna possível a dissolução da alumina à temperaturas em torno de  $960^\circ\text{C}$  (embora o ponto de fusão da alumina seja  $2072^\circ\text{C}$ ).

Composição típica do banho electrolítico (em massa): criolita  $\text{Na}_3\text{AlF}_6$  ( $3\text{NaF}:1\text{AlF}_3$ ) com 80%; Excesso de  $\text{AlF}_3$  com 11.5%;  $\text{CaF}_2$  com 5%,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  com 2% e criolita sintética complexa  $\text{Na}_5\text{Al}_3\text{F}_{14}$  ( $5\text{NaF}:3\text{AlF}_3$ ) com 1.5% (Massinguil, 2014).

A figura 3 apresenta o diagrama de equilíbrio da criolita e a influência da sua composição na Temperatura  $T_{\text{liquidus}}$  do banho.



**Figura 3.** Diagrama de equilíbrio do electrólito da célula de redução electrolítica.

Fonte: Schneider (2012)

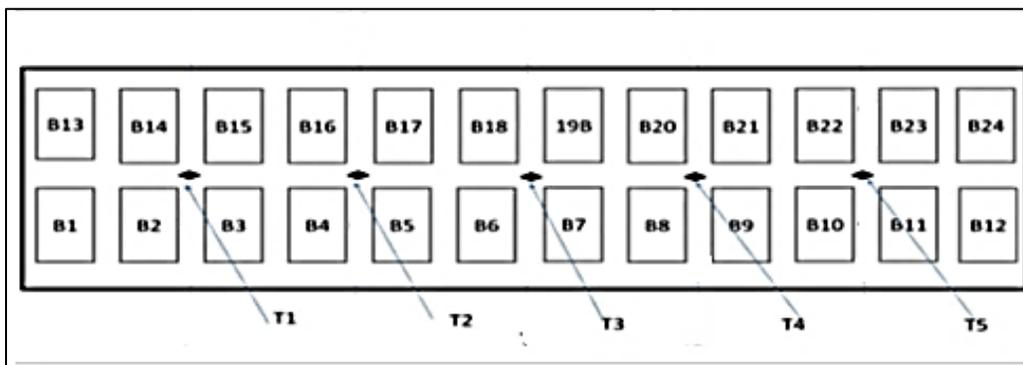
À medida que aumentamos a concentração de  $\text{AlF}_3$  verifica-se a formação de uma mistura eutética, a uma concentração de aproximadamente 13% mol de  $\text{AlF}_3$ , e abaixamento da  $T_{\text{liquidus}}$  do banho. Se continuarmos aumentando a quantidade de  $\text{AlF}_3$  verifica-se um aumento da  $T_{\text{liquidus}}$  do electrólito até uma concentração de 25% mol de  $\text{AlF}_3$ . A figura 3 mostra que em aproximadamente  $960^\circ\text{C}$ , a qual é a temperatura de operação da célula electrolítica que é representada pela linha tracejada horizontal, a taxa de variação da temperatura com a composição é alta, fato que pode resultar em variação nas variáveis do sistema de controlo da célula (Schneider, 2012).

## 2.2. Pré-aquecimento das células electrolíticas

Antes de iniciar a operação, as células electrolíticas precisam ser pré-aquecidas para permitir que o material do cátodo aumente gradualmente sua temperatura do nível do meio ambiente para a faixa operacional, entre 940 - 970 °C (Ali, 2013).

O principal objectivo deste processo é estabelecer uma distribuição uniforme da temperatura na superfície do cátodo e fornecer calor suficiente para evitar choque térmico durante a inicialização da célula. O pré-aquecimento eficaz desempenha um papel vital na manutenção da estabilidade da célula durante a operação e melhora sua vida útil. Estudos recentes indicam que o pré-aquecimento e a inicialização de células electrolíticas contribuem em aproximadamente 25% dos factores que afectam sua durabilidade. Os restantes 75% são distribuídos da seguinte forma: 10% pertencem à resistência ou qualidade do material, 20% à construção, 20% ao projeto e 25% à fase operacional (Ali, 2013).

Para evitar choque térmico durante a inicialização, é melhor pré-aquecer a célula electrolítica até uma temperatura que seja o mais próximo possível de sua temperatura operacional. Além disso, os gradientes de temperatura devem ser minimizados para evitar a expansão térmica tanto horizontal quanto verticalmente no cátodo. Na prática, a temperatura final de pré-aquecimento é geralmente inferior à faixa ideal, normalmente entre 800 e 900 °C, e é geralmente medida em cinco locais dentro da área central do cátodo (Ali & Kvande, 2016).



**Figura 4.** Disposição dos termopares para o monitoramento de temperatura.

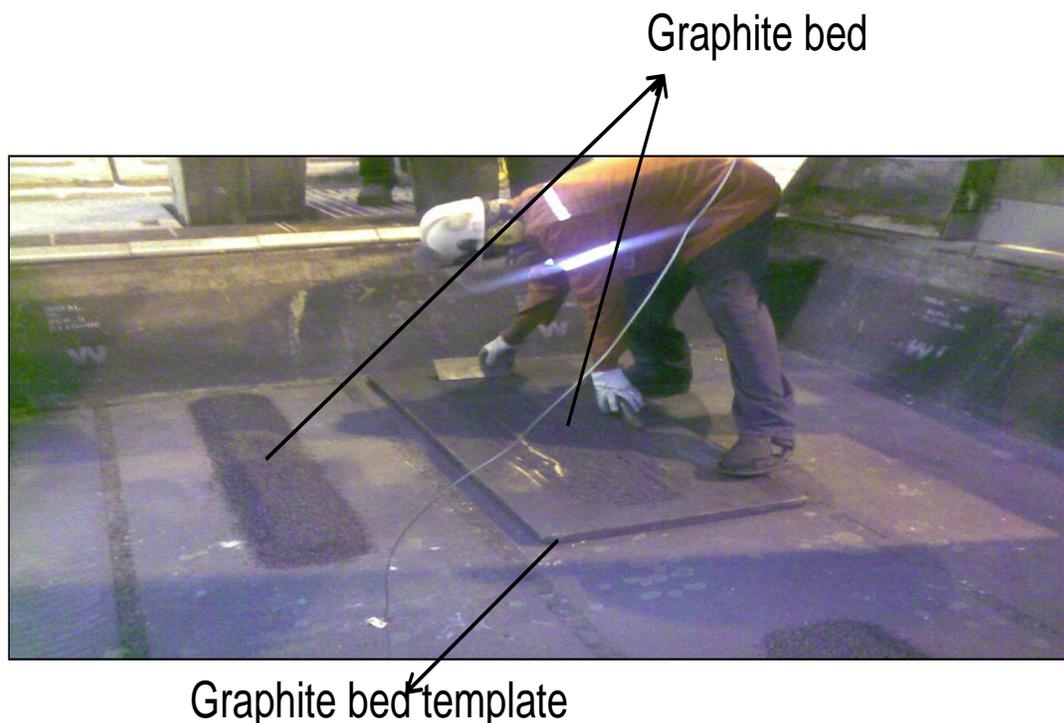
Fonte: Ali & Kvande (2016).

Dos métodos de pré-aquecimento que mais se empregam na indústria destacam-se os seguintes:

- Resistência Eléctrica;
- Queimadores de Óleo ou Gás (Pré-aquecimento de Chama).

### 2.2.1. Método de resistência eléctrica

Este método pode ser implementado usando como material de resistência a cama de coque, cama de grafite ou a combinação de ambos. Em todo o caso, o material de resistência é preenchido na superfície do cátodo onde é assentado o ânodo. Quando se utiliza o coque ou mistura de coque e grafite como material de resistência, o processo é acompanhado pelo uso de derivações de corrente eléctrica (*shunts*) para reduzir os elevados gradientes de temperatura que este material proporciona. No uso de grafite como material de resistência (Figura 5), não há necessidade de derivação da corrente eléctrica, pois as camas de grafite oferecem baixos gradientes e distribuição mais uniforme da temperatura. Como resultado, as camas de grafite tornaram-se a opção preferida para muitas plantas modernas que usam o método de resistência eléctrica (Ali & Kvande, 2016). No início do projecto, a Mozal usava coque como material de resistência, mas com os avanços tecnológicos e requisitos de alta amperagem, uma mudança para grafite foi implementada, tornando o processo mais eficiente e menos trabalhoso.



**Figura 5.** Preenchimento de grafite nas posições onde assentam-se os ânodos.

Fonte: Mozal, *Pot Preparation* (2017).

Após a inserção de todos os ânodos sobre o material de resistência, a área frontal dos ânodos é preenchida por uma camada de  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  (carbonato de sódio), e por cima preenche-se a criolita (Figura 18). Enquanto a criolita serve para proteger os ânodos da oxidação durante o processo, o  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  ajudará na redução do excesso de  $\text{AlF}_3$  no banho electrolítico após a inicialização, pois é indesejável nos dias iniciais da operação da célula.



**Figura 6.** Preenchimento de  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  e criolita para a cobertura sobre os ânodos.

Fonte: Mozal, *Pot Preparation* (2017).

Uma inovação importante no método de resistência eléctrica é a introdução do uso de conectores flexíveis (*Flex Clamps*) para fixar os ânodos no seu suporte (*anode beam*), eles permitem que o ânodo fique livremente suspenso por cima da cama do material de resistência, mantendo uma pressão uniforme por parte do bloco anódico. O uso destes conectores permitiu uma melhor uniformidade de distribuição de corrente entre os ânodos e melhor uniformidade no pré-aquecimento do cátodo e evitar sobreaquecimentos localizados. Os conectores rolantes são os mais tradicionais e continuam sendo utilizados em diversas plantas. A medida que o material da cama de resistência vai se consumindo o conector do seu ânodo correspondente é desapertado manualmente para que o bloco anódico mantenha contacto com o material de resistência. Entretanto, os conectores rolantes para além de serem mais trabalhosos não garantem melhor uniformidade de distribuição da corrente quando comparados aos conectores flexíveis (Ali & Kvande, 2016).

## **2.2.2. Método de Pré-aquecimento de Chama**

Comparado ao método de resistência eléctrica, este é o que oferece melhor uniformidade de distribuição de temperatura e ainda minimiza a ocorrência de elevados gradientes térmicos na superfície e interior dos blocos catódicos, diminuindo o risco de choques térmicos que podem originar rachas ou trincas. No entanto, este método apresenta um potencial risco de oxidação do material de carbono no interior do cátodo e uma inicialização a voltagens elevadas devido às temperaturas relativamente baixas na superfície do cátodo. Além disso, este método apresenta maior duração em relação aos outros métodos e custos de implementação elevados. Para proteger os blocos catódicos da oxidação pelo ar, geralmente utiliza-se um papel refractário, uma fina camada de banho sólido e uma fina chapa metálica para protecção da superfície do cátodo (Rao, 1985).

**Tabela 1.** Comparação dos Métodos de Pré-aquecimento.

<b>Método</b>	<b>Vantagens</b>	<b>Desvantagens</b>
<b>Resistência Eléctrica</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Melhor duração de pré-aquecimento;</li><li>• Baixa voltagem na inicialização da célula.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Propenso a altos gradientes de temperatura;</li><li>• Propenso a surgimento de sobreaquecimentos localizados e consequentemente a distribuição não uniforme da temperatura do cátodo.</li></ul>
<b>Pré-aquecimento de chama</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Fácil de programar;</li><li>• Baixos gradientes de temperatura;</li><li>• Distribuição uniforme de temperatura.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• A operação acarreta custos elevados para sua implementação;</li><li>• Alta voltagem na inicialização da célula;</li><li>• Longa duração de pré-aquecimento;</li><li>• Oxidação do material do carbono no interior do cátodo.</li></ul>

Fonte: *The Minerals, Metals & Materials Society* (2016).

### **2.2.3. Avaliação da qualidade do pré-aquecimento**

O pré-aquecimento do cátodo é uma etapa crucial antes do início do processo de electrólise, com impacto directo na eficiência e durabilidade da célula electrolítica. Ao garantir uma distribuição uniforme de temperatura, essa prática pode minimizar defeitos estruturais e prolongar a vida útil dos componentes. Os principais factores que precisam ser avaliados incluem:

#### **a) Temperatura de pré-aquecimento**

- **Temperatura final do processo:** A temperatura deve aumentar gradualmente até atingir um nível que corresponda à energia acumulada ideal do processo (aproximadamente 42 KWh na tecnologia AP35). A faixa de temperatura típica é entre 850-900 °C.
- **Taxa de pré-aquecimento:** A taxa de aumento da temperatura deve ser regulada para evitar choques térmicos. Em média, uma taxa ideal seria de 20 °C por hora; no entanto, na prática, pode variar significativamente (particularmente no caso do pré-aquecimento por resistência), e é aconselhável que não exceda 50 °C por hora.

#### **b) Distribuição da temperatura**

- **Uniformidade Térmica:** Garantir que a temperatura é distribuída uniformemente ao longo da célula. O desvio padrão ideal deve ser inferior a 10% para evitar tensões térmicas.
- **Zonas Críticas:** Prestar atenção especial a áreas críticas como a base e os cantos da célula onde a distribuição de calor pode ser mais difícil.

#### **c) Distribuição de corrente eléctrica pelos ânodos**

Idealmente deve ser mantida uniforme e com um desvio padrão inferior a 10% para não afectar a distribuição de temperatura do cátodo.

#### **d) Tempo de Pré-aquecimento**

O tempo total de pré-aquecimento pode variar, mas geralmente leva de 48 a 72 horas dependendo método usado, do tamanho e da construção da célula.

## **2.3. Inicialização e monitoramento das células electrolíticas**

O processo de inicialização marca o início da electrólise dentro das células electrolíticas. Semelhante ao pré-aquecimento, esta etapa é vital para a eficiência e longevidade das células. Seus objectivos primários incluem:

- Estabilização da célula para produção rápida e consistente;
- Facilitar uma transição suave do fim do pré-aquecimento para a operação normal, o que melhora o desempenho e prolonga a vida útil da célula;
- Impedir temperaturas excessivamente altas ou baixas que possam danificar o cátodo e afectar negativamente o desempenho e a durabilidade da célula;
- Garantir que quaisquer fissuras, trincas ou lacunas formadas durante o pré-aquecimento sejam preenchidas com o banho solidificado (impregnação do electrólito).

Dependendo das condições e requisitos específicos da planta, o método empregado pode envolver inicialização a quente ou iniciação a frio.

### **2.3.1. Inicialização à quente (*Hot Start Up*)**

É o método mais recomendado para o plano normal de renovação das células electrolíticas na planta, e conhecido por seu custo e complexidade mais elevados, mas oferece vários benefícios como:

- Desgaste térmico reduzido no forro;
- Menor tempo de inicialização;
- Menor risco de choques térmicos.

Este método envolve três fases-chave:

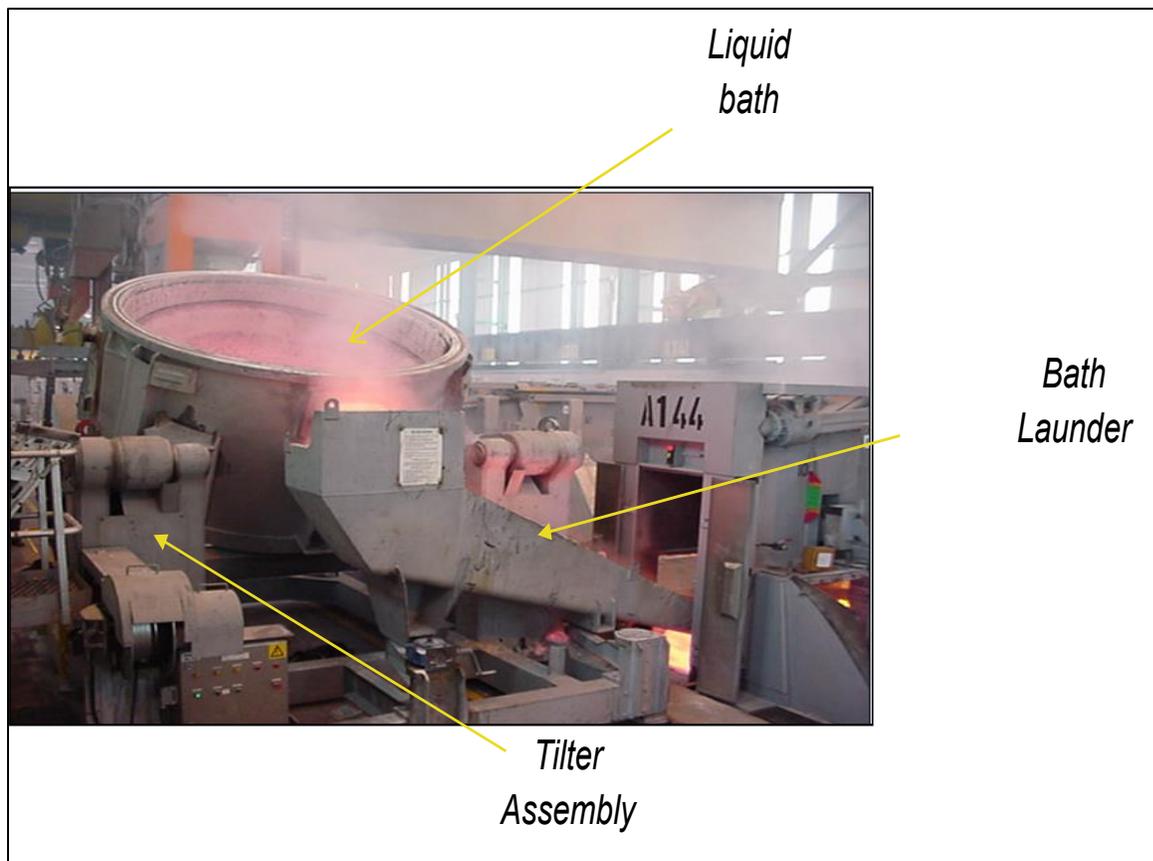
**a) Primeira fase** - Introdução do banho electrolítico na célula electrolítica;

**b) Segunda fase** – Elevação do *anode beam* até que seja alcançado um efeito anódico que deve durar cerca de 60 minutos;

**c) Terceira fase (*Early Life*)** – ocorre após a adição de alumínio líquido na célula e cobertura dos ânodos. Esta fase envolve a reciclagem dos ânodos, monitoramento dos parâmetros de estabilidade, temperatura, altura do banho e metal, excesso de  $AlF_3$  no banho e as

concentrações de ferro e silício no metal. Esta fase pode durar de 30 a 60 dias, dependendo das práticas específicas de cada planta.

Após a primeira e segunda fase, há um período durante o qual o banho electrolítico deve penetrar as fissuras e trincas criadas durante a fase de pré-aquecimento da célula (período de impregnação). Esta fase pode durar de 8 a 24 horas, dependendo das especificações da instalação (normalmente na Mozal são 24 horas). Durante este tempo, o banho electrolítico também auxilia na cura final da pasta catódica e das juntas dos blocos catódicos (*short & large joint*), bem como na formação da *ledge* ao longo da pasta catódica e da parede lateral da célula, que serve de barreira para conter a formação do  $Al_4C_3$  (Kvande, 1996).



**Figura 7.** Inicialização a quente: Adição de banho electrolítico na célula.

Fonte: Mozal, *Start-up & Early Life* (2017).

### **2.3.2. Inicialização a frio (*Dry Start Up*)**

Este método é aconselhável para inicialização de várias células em simultâneo numa linha, pois nestes casos é mais difícil gerar banho suficiente para doar em todas células por inicializar e ainda mobilizar o equipamento necessário para a adição. Também pode recorrer-se a esse método para a Inicialização de células com cátodos reciclados. No entanto, este método apresenta um maior risco de desgaste e potencial falha do revestimento da célula devido ao choque térmico (excepto em cátodos reciclados). No lado positivo, o processo é relativamente simples e tem baixos custos operacionais. O procedimento envolve a adição do banho sólido reciclado (*crushed bath*) à célula durante sua preparação, seguido de passagem da corrente eléctrica através da célula para aquecer a criolita até que ela derreta e dissolva o *crushed bath*. Este processo pode levar várias horas (Ali, 2013).

### **2.3.3. Acidez do banho electrolítico durante a inicialização**

É geralmente reconhecido que a acidez de uma solução é determinada pelo seu potencial iónico de hidrogénio (pH). No entanto, no sector de produção de alumínio, a acidez do banho electrolítico é avaliada com base na actividade dos iões fluoreto. Na prática, a acidez do banho electrolítico é ajustada de acordo com o excesso de  $\text{AlF}_3$ .

Como observado por Raye (2005), recomenda-se o uso de um banho electrolítico básico (com menor acidez) por várias razões:

- A diminuição da acidez no banho electrolítico promove o depósito de criolita (que é rica em iões de sódio) dentro das fissuras, aumentando assim a sua impregnação nas áreas danificadas durante o processo de pré-aquecimento;
- Uma menor acidez resulta em temperaturas de operação mais altas (geralmente a 1000 °C), que deslocam a temperatura do *solidus* para as regiões internas do revestimento, aumentando assim a força de selagem das rachaduras na presença de efeitos anódicos.

Em tais situações, um período de impregnação mais longo é aconselhável.

Como não é possível gerenciar o excesso de  $\text{AlF}_3$  no banho electrolítico das células doadoras, uma quantidade extra de carbonato de sódio é adicionada após a inicialização para reduzir a acidez do banho ao nível desejado. Para manter um melhor controlo da acidez durante esta fase inicial, a alimentação automática do  $\text{AlF}_3$  é inibida nos primeiros 15 dias de operação.

## **2.4. Falha catódica**

As reacções químicas no cátodo iniciam imediatamente após a activação da célula electrolítica e persistem durante toda a sua vida operacional. Um dos indicadores mais aparentes deste processo é o aumento significativo da queda de tensão catódica (CVD) ao longo do tempo, juntamente com a distorção progressivamente maior entre a carcaça e o revestimento catódico. Normalmente, a vida operacional de uma célula electrolítica varia entre 1.200 a 2.800 dias, assumindo todas as condições normais relacionadas com a sua funcionalidade e manutenção. No entanto, podem ocorrer falhas prematuras, salientando a importância de monitorar eventos que indiquem a necessidade de parar a célula antes que ocorra um derrame (do banho ou do metal), o que pode levar a danos ainda mais graves na linha (Grjotheim & Welch, 1998). Os sinais mais comuns são:

- a) O teor de ferro no alumínio produzido torna-se insustentavelmente alto (acima de 1800 ppm);
- b) O teor de silício no alumínio produzido torna-se excessivamente alto (acima de 800 ppm);
- c) O CVD torna-se muito alto (acima de  $0.5 \mu\Omega$ );
- d) Observa-se uma deformação excessiva na carcaça;
- e) Ocorrência de partes avermelhadas na zona de contacto da solução (e/ou metal) com a superfície interna da carcaça.

### **2.4.1. Mecanismos de falha dos cátodos**

No passado, era prático catalogar a falha catódica com base na área onde era observada (por exemplo, falha na parede lateral ou na barra colectora). Contudo, a classificação contemporânea considera principalmente a maneira como a falha ocorre. É importante notar que as autópsias têm uma fiabilidade limitada, a menos que sejam conduzidas em detalhes, uma vez que o ponto de contacto da solução (e/ou metal) com a carcaça difere frequentemente de forma significativa da área da falha no revestimento catódico (Grjotheim & Welch, 1998). A seguir estão mencionados e descritos os mecanismos de falha mais influentes na vida útil da célula electrolítica.

### 2.4.1.1. Processos químicos em cátodos

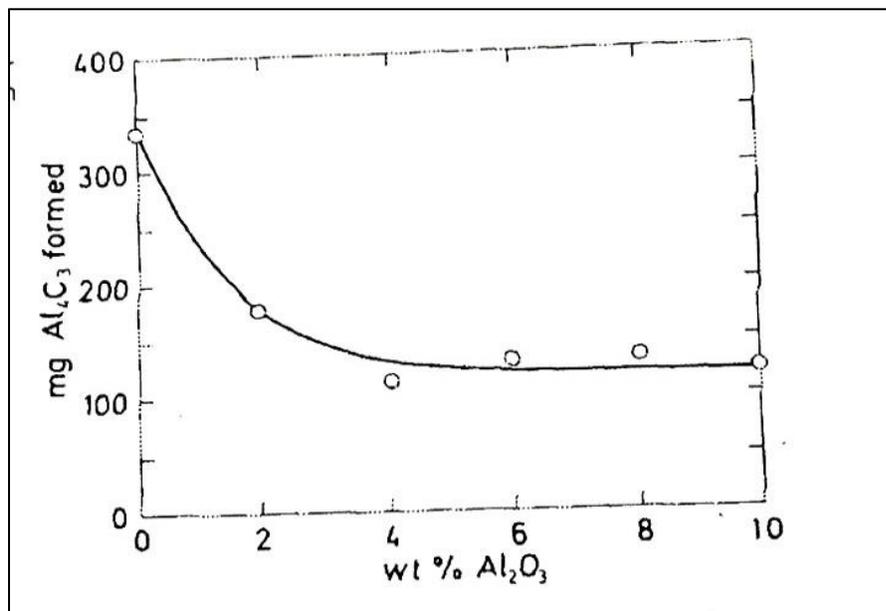
Existem várias interacções químicas que afectam o cátodo, algumas das quais ainda estão a ser investigadas, mas é crucial identificar aquelas que têm maior influência, particularmente na degradação do cátodo.

#### a) Formação de carbeto de alumínio

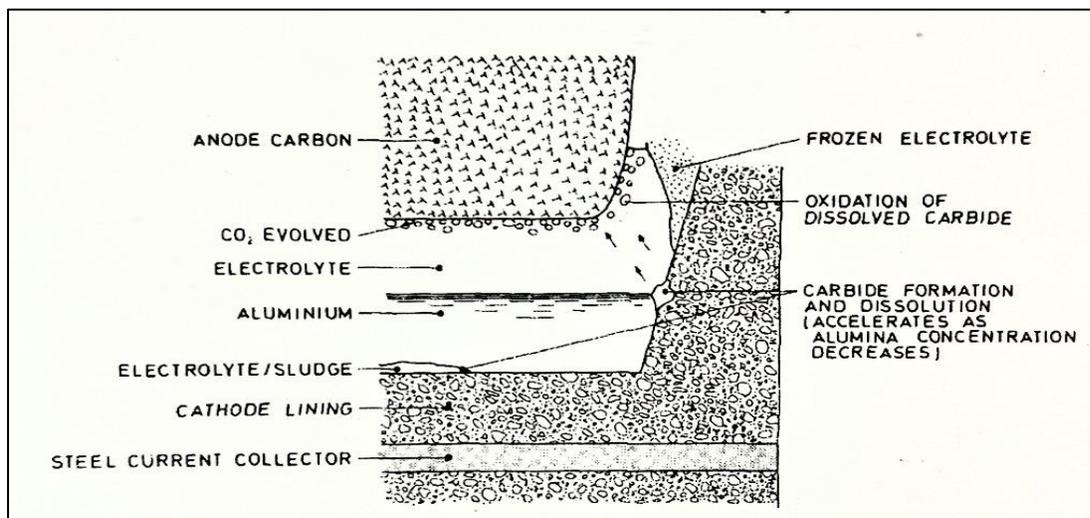
O mecanismo desta reacção é reforçado pela condição em que o metal, electrólito e carbono estão em contacto simultâneo. Esta condição pode ocorrer na parede lateral através da interface metal-electrólito onde a crosta protectora é dissolvida, ou no fundo através do lodo precipitado (*sludge*) sempre que a dissolução de alumina no electrólito é baixa (figura 9). A reacção pode ser ilustrada da seguinte forma:



Grjotheim e Welch (1998) indicam que a quantidade de carbeto de alumínio produzido é dependente do teor de alumina presente na célula. Os resultados apresentados na figura 10 demonstram que a quantidade máxima de carbeto de alumínio que pode ser gerada em um electrólito desprovido de alumina permanece constante para concentrações de alumina superiores a 4% em massa.

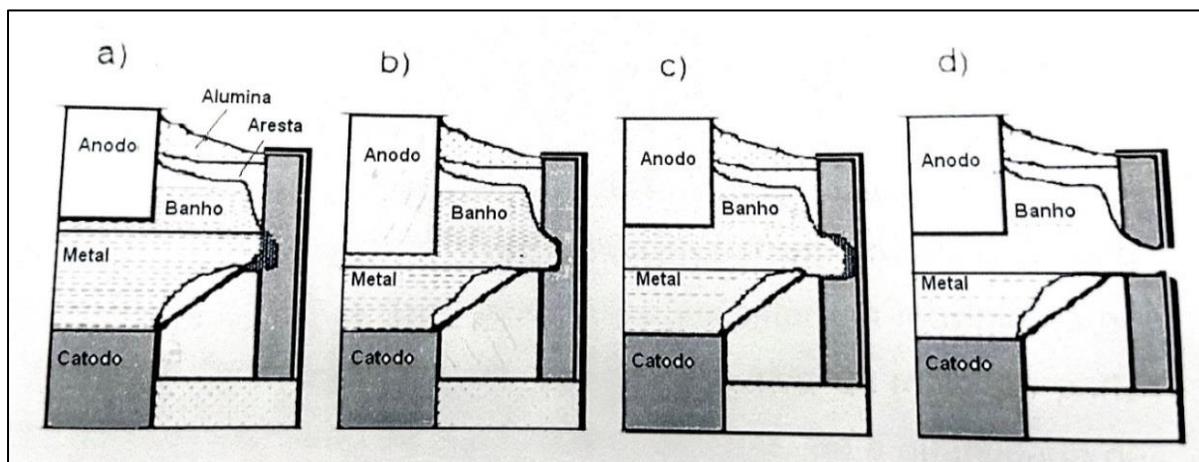


**Figura 8.** Formação de Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> em função do teor de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> no electrólito. Fonte: Grjotheim & Welch (1998).



**Figura 9.** Corrosão do cátodo nas zonas de formação de  $Al_4C_3$ . Fonte: Grjotheim & Welch (1998).

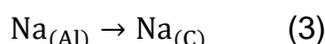
Esse é o mecanismo que ocorre com mais frequência em células electrolíticas e é considerado um factor primário na contribuição para redução significativa da sua vida útil. O efeito anódico agrava muito este problema, uma vez que a sua manifestação eleva a tensão da célula para níveis entre 30 e 50 volts. Este aumento facilita a quebra da *ledge* nas paredes laterais, tornando-as mais susceptíveis à interacção directa metal-electrólito, como ilustrado na figura 12 (SØRLIE & ØYE, 1993).



**Figura 10.** Evolução da corrosão das paredes laterais. Fonte: SØRLIE & ØYE (1993).

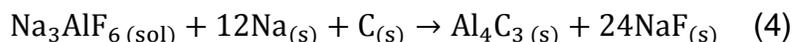
## **b) Intercalação e adsorção do sódio**

Este mecanismo envolve o movimento de átomos de sódio dentro da rede do carbono, permitindo que se assentem em posições estáveis entre as camadas fundamentais da grafite. O sódio é gerado na interface entre o banho e o metal, como descrito na equação (2). Sua difusão ocorre tanto ao longo do agregado como através do bloco aglutinante, ocorrendo em um ritmo rápido (SØRLIE & ØYE, 1993). A presença de sódio cria tensões internas dentro do bloco catódico, que se intensificam quando a temperatura do electrólito cai abaixo da temperatura mínima de funcionamento da célula (950 °C).



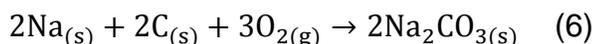
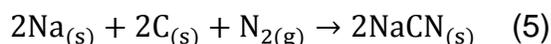
## **c) Interação sódio – carbono – electrólito**

As autópsias feitas em cátodos após suas falhas revelaram a existência de fases salinas inorgânicas diferentes do electrólito penetrante. Trata-se de cristais bem desenvolvidos de NaF e  $\text{Al}_4\text{C}_3$  (Grjotheim & Welch, 1998).



## **d) Interação sódio – carbono – ar**

O grau em que ocorre esta reacção é influenciado pela qualidade do carbono do cátodo, bem como a capacidade do ar de se infiltrar nas paredes laterais, que é a área onde a reacção ocorre. Amostras recém-obtidas de blocos catódicos após uma falha indicam o potencial para reacções subsequentes. Como é ilustrado nas reacções abaixo:



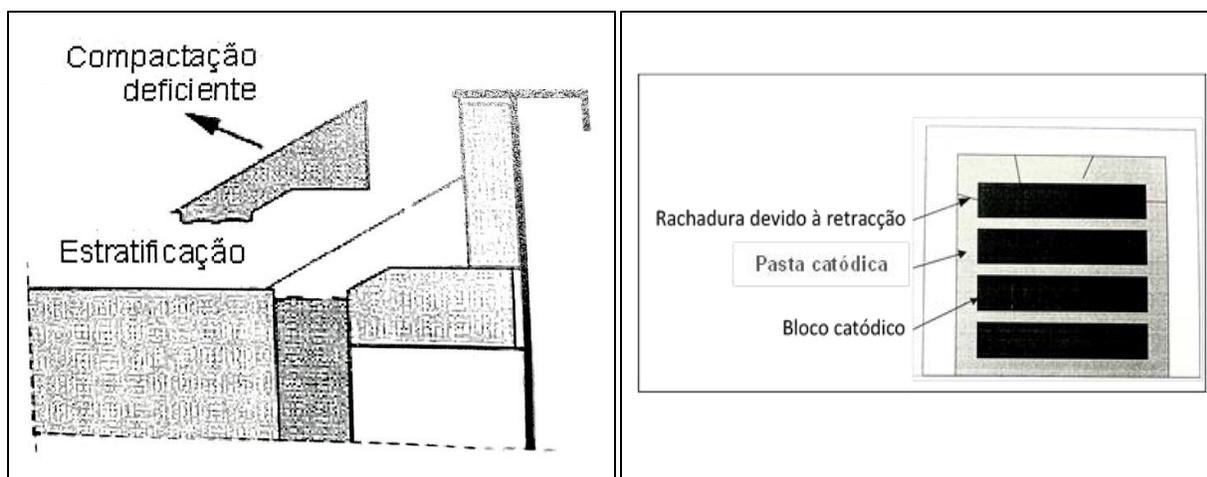
## **e) Interação metal – material refractário**

O material refractário é constituído na sua maioria por  $\text{SiO}_2$ , razão pela qual são vulneráveis à redução quando entram em contacto com o metal líquido.



### **2.4.1.2. Estratificação e retracção da pasta catódica**

A pasta catódica serve para preencher as lacunas entre os blocos catódicos e a área periférica que os rodeia, bem como as paredes laterais (Figura 13). Esta tem a função de evitar a rápida penetração de metal ou electrólito no revestimento e absorve a expansão térmica dos blocos catódicos durante a fase de pré-aquecimento. No entanto, este material é susceptível aos efeitos corrosivos do electrólito e do metal, o que pode levar à falha prematura do cátodo (Faanes *et al*, 1989).



**Figura 11.** Estratificação e retracção da pasta catódica. Fonte: Faanes *et al* (1989)

### **2.4.1.3. Interação entre os blocos catódicos e a carcaça**

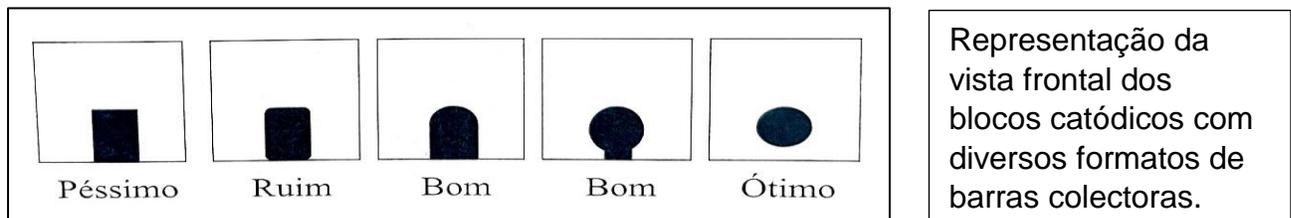
Na fase operacional, os blocos catódicos sofrem uma expansão mais significativa em comparação com a carcaça devido à sua interação com o metal e o banho electrolítico. Como resultado, a limitação na capacidade dos blocos catódicos se expandirem dentro da carcaça pode causar rachaduras internas e/ou o seu deslocamento. Além das fissuras que se desenvolvem nos blocos, a carcaça pode sofrer deformação plástica devido à interação de três tipos de tensões que precisam ser consideradas neste mecanismo:

- Tensões da carga aplicada pelos blocos catódicos, metal e electrólito;
- Tensões decorrentes de deformações materiais (causadas por aumentos de temperatura);
- Tensões induzidas por alterações químicas nos materiais de revestimento.

#### 2.4.1.4. Interação entre os blocos catódicos e barras colectoras

As barras colectoras têm um coeficiente de expansão térmica consideravelmente maior do que o dos blocos catódicos (por exemplo,  $\alpha_{aço} = 4 * \alpha_{carbono}$ ). Esta disparidade pode criar tensões termodinâmicas dentro dos blocos quando a célula é aquecida. Se o aquecimento for intenso o suficiente para elevar essas tensões além da tensão de ruptura do bloco catódico, podem se desenvolver rachaduras. Em casos graves, isso pode levar a um aumento na resistência eléctrica do cátodo, potencialmente comprometendo o tempo de vida operacional da célula (Rao, 1985).

Por outro lado, a magnitude das tensões termodinâmicas geradas pelas barras colectoras nos blocos catódicos pode ser influenciada pelo desenho geométrico da barra colectora, isto é, a presença de aristas nas barras aumenta a magnitude das tensões. A forma ideal seria circular (uma barra cilíndrica); no entanto, esta opção apresenta desafios significativos para a implementação comercial (SØRLIE & ØYE, 1993).



**Figura 12.** Classificação das barras colectoras. Fonte: SØRLIE & ØYE (1993).



**Figura 13.** Blocos catódicos e suas respectivas barras colectoras, comunitamente utilizados na indústria de produção de alumínio.

#### **2.4.1.5. Choques térmicos devido ao pré-aquecimento irregular**

Ao contrário dos métodos de combustão de gás ou óleo, as técnicas alternativas de pré-aquecimento para células electrolíticas são particularmente vulneráveis a este mecanismo de falha, uma vez que não garantem uma distribuição uniforme da temperatura em todo o processo. Por um lado, o monitoramento deficiente dos gradientes de temperatura pode causar expansão térmica excessiva no cátodo, enquanto, por outro lado, uma distribuição desigual da temperatura pode levar ao choque térmico durante o arranque da célula. A combinação desses problemas pode resultar em rachaduras e aberturas na superfície do cátodo, aumentando o risco de falha prematura da célula devido à infiltração do electrólito ou metal no revestimento catódico (Grjotheim & Welch, 1998).

#### **2.4.1.6. Interrupções temporárias da corrente**

As interrupções de corrente eléctrica durante a operação das linhas de redução são bastante frequentes e podem ocorrer devido a várias razões, incluindo:

- a)** Actividades de manutenção nas barras de condução eléctrica;
- b)** Um potencial para circuito aberto;
- c)** Problemas na subestação (avarias no rectificador);
- d)** Racionamento energético imposto pelo fornecedor;
- e)** Factores económicos ou estratégias comerciais.

Independentemente da causa, essas interrupções podem causar danos irreversíveis ao revestimento catódico das células quando a corrente eléctrica é restaurada, levando a uma diminuição significativa na vida útil das células. Um factor chave que contribui para esta questão é o resfriamento das células, que resulta no deslocamento de materiais de revestimento e desenvolvimento de rachaduras e aberturas na superfície do bloco (Brekke, 1982). Após a restauração da corrente eléctrica, as horas iniciais são caracterizadas por instabilidade significativa nas células, muitas vezes acompanhada de vários efeitos anódicos que podem contribuir para a corrosão das paredes laterais (Rao, 1985).

## **CAPÍTULO III**

### **3. DESCRIÇÃO DO ESTUDO DO CAMPO**

#### **3.1. Mozal**

A Mozal é uma empresa de fundição de alumínio, com capitais sul-africanos e australianos, é um dos grandes projectos de exportação em Moçambique. A fábrica situa-se no parque industrial de Beluluane no município da Matola Rio, Sul do País, a 20 km da cidade de Maputo.



**Figura 14.** Vista aérea da Mozal. Fonte: Mozal, *Introduction to Potlines* (2016).

Actualmente a Mozal é operada pelo grupo *South 32*, uma organização global de mineração de metais, que produz alumínio, alumina, bauxita, carvão energético e metalúrgico, manganês, níquel, prata, chumbo e zinco. Suas fábricas estão distribuídas entre Austrália, África Austral e América do Sul (Tchamo, 2021).

O projecto da Mozal foi o primeiro e mais ambicioso dos grandes projectos extractivos de Moçambique, e sua actividade consiste basicamente na importação de alumina e coque para processamento e na exportação de lingotes de alumínio. Fundado pelo grupo *BHP Billiton* (uma organização australiana também do ramo da mineração de metais preciosos) com um

orçamento bilionário, durante a primeira década após a sua inauguração a Mozal foi a empresa com maior facturamento em Moçambique.

Em termos operacionais, a Mozal é composta principalmente por quatro Departamentos:

- O Porto da MOZAL, situado no Porto da Matola, é responsável pela recepção de matéria-prima e exportação do alumínio primário.
- O Carbono, departamento encarregado da fabricação dos ânodos de carbono (eléctrodos positivos).
- Redução, departamento encarregado da produção de alumínio primário.
- Casa de moldes, departamento encarregado da fabricação de lingotes de alumínio (produto final), a partir do alumínio fundido produzido na redução.

Na Mozal, o departamento de redução é formado por duas linhas de produção, conforme ilustrado na figura 15, designadamente: *Potline I - Mozal 1* e *Potline II - Mozal 2*. Cada *Potline* é segmentado em duas salas com 144 células electrolíticas, isto é, em cada linha, há um total de 288 células electrolíticas conectadas em série, com uma corrente de cerca de 365 kA. No total, são 576 células electrolíticas distribuídas em quatro salas (A, B, C, D).



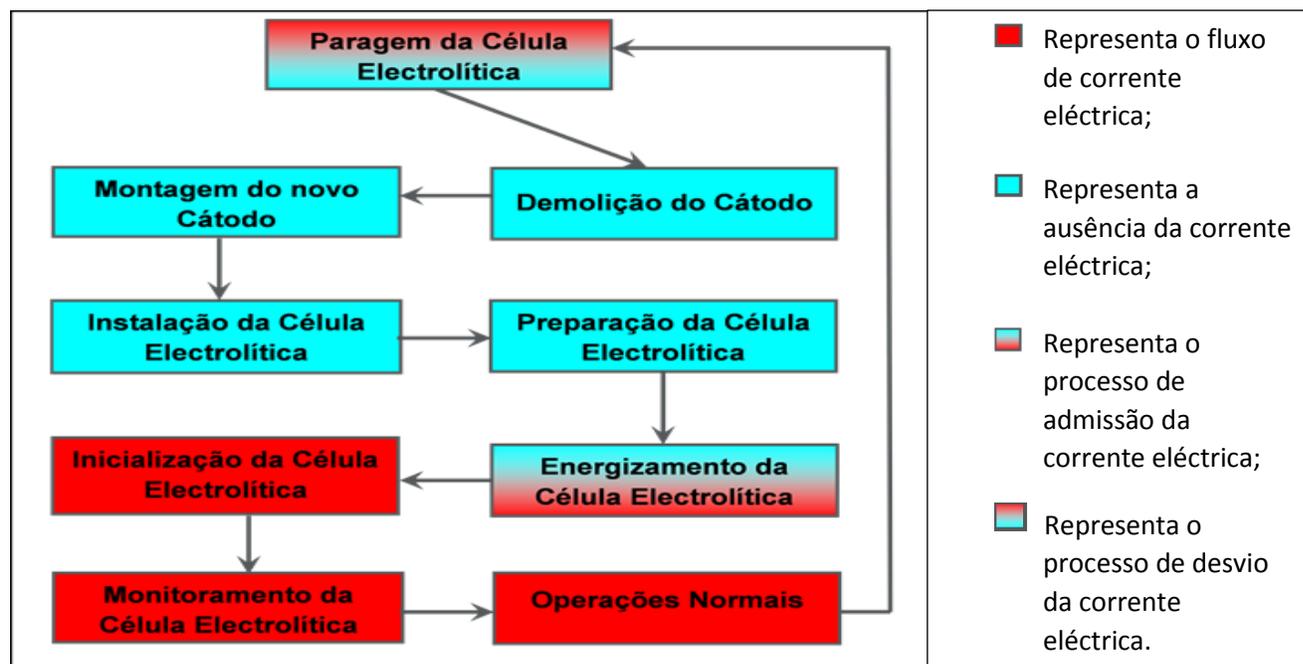
**Figura 15.** Vista aérea do departamento de redução.  
Fonte: Mozal, *General Potlines & Workshops Safety* (2007).

## 3.2. Estudo de caso

O departamento de redução foi o anfitrião da recolha de dados para o presente trabalho, ele subdivide-se em três sectores:

- **Produção:** dedica-se nas operações do quotidiano das salas (*potrooms*) com impacto directo na produção, tais como a troca e cobertura dos ânodos, sucção do metal e outras actividades complementares.
- **Serviços de Linha:** dedica-se essencialmente no processo de renovação das células electrolíticas, que consiste em um conjunto de actividades levadas a cabo desde a paragem da célula até a sua inicialização.
- **Controlo do Processo:** é responsável pelo controle da qualidade das operações bem como o melhoramento e optimização dos parâmetros do processo de produção de modo a garantir as metas diárias.

### 3.2.1. Principais actividades de serviços de linha



**Figura 16.** Ciclo de operações de serviços de linha em uma célula electrolítica.

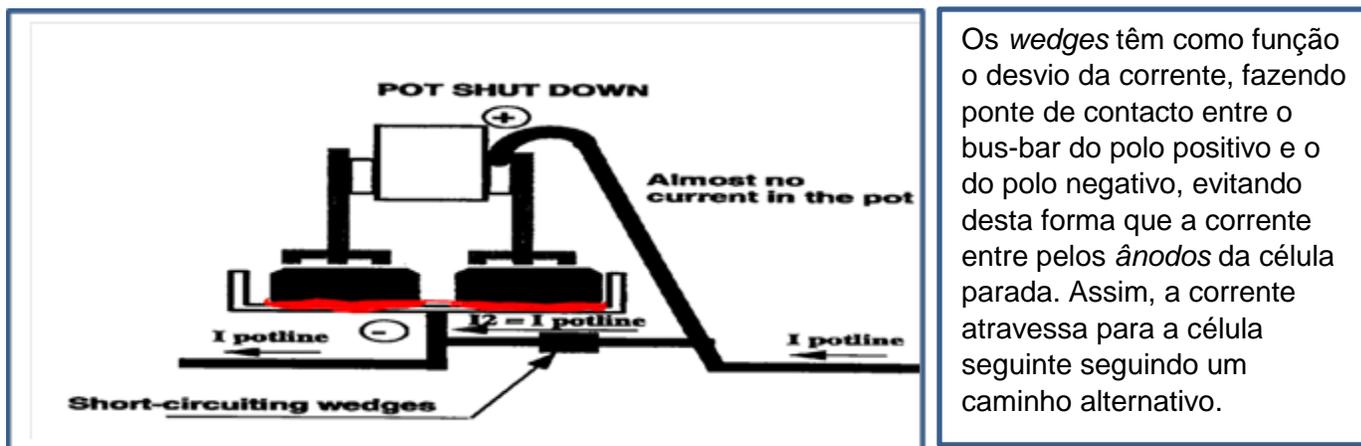
Fonte: Mozal, *Pot Preparation* (2017).

Após a paragem de uma célula electrolítica, segue-se um conjunto de actividades designado “*pot cut-out and replacement*”, que consiste na substituição da superestrutura e o cátodo da

célula parada por um conjunto renovado. O cátodo da célula morta vai para um processo de demolição numa planta designada “*de-lining Shop*”, onde os blocos catódicos e o material refractário são removidos da carcaça e de seguida, esta é levada juntamente com a superstrutura para uma empresa dentro do parque industrial de Beluluane, para serem reparados. Após a sua reparação, a carcaça e a superstrutura são trazidas de volta à empresa, onde a carcaça é alocada numa planta designada “*lining Shop*”, para a construção de um novo cátodo (montagem de material refractário, blocos catódicos e isoladores de corrente).

### 3.2.2. Recolha de dados

No experimento realizado, acompanhou-se as operações de preparação e energizamento das células em estudo (B053, B106 e B122) e posteriormente acompanhou-se os processos de pré-aquecimento, inicialização e monitoramento durante os primeiros 45 dias de operação (*early life*). Colheu-se durante a fase de pré-aquecimento, dados de temperaturas parciais do cátodo e da distribuição da corrente dos ânodos (ACD). Após a inicialização das células, colheu-se durante o *early life*, os dados de temperatura do banho (BT), altura do banho (BH), excesso de  $\text{AlF}_3$  no banho, as composições de ferro (Fe) e silício (Si) no metal, resistência do cátodo (CVD), parâmetro de instabilidade (WRMI), número de efeitos anódicos e a produtividade a cada 32 horas ( $m'_{\text{real}}$ ). O energizamento é a operação que dá início ao pré-aquecimento do cátodo e consiste na remoção das barras de alumínio, conhecidas como *wedges*, utilizadas para o desvio da corrente durante a paragem da célula (figura 17).



Os *wedges* têm como função o desvio da corrente, fazendo ponte de contacto entre o bus-bar do polo positivo e o do polo negativo, evitando desta forma que a corrente entre pelos ânodos da célula parada. Assim, a corrente atravessa para a célula seguinte seguindo um caminho alternativo.

**Figura 17.** Fluxo da corrente eléctrica em uma célula parada. Fonte: Mozal, *Pot Energizing and Preheating* (2017).

## **CAPÍTULO IV**

### **4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS**

No presente capítulo, são apresentados e discutidos os resultados obtidos a partir da realização da recolha de dados, com o objectivo de responder às questões norteadoras e alcançar os objectivos propostos na pesquisa realizada. A análise destes resultados foi realizada à luz do referencial teórico, permitindo uma reflexão crítica sobre as evidências empíricas colectadas. Desta forma, não apenas busca-se relatar os dados obtidos, mas também compreendê-los em seu contexto, explorando suas implicações, limites e possíveis desdobramentos para a prática e futuras investigações.

O capítulo divide-se em duas partes, sendo a primeira referente à fase do pré-aquecimento das células em estudo e a segunda referente ao seu período primórdio de operação, conhecido como *early life*.

#### **4.1. Fase do pré-aquecimento**

Os dados de temperaturas parciais de cada célula, colectados durante fase do pré-aquecimento das células em estudo, foram submetidos a um tratamento estatístico utilizando o pacote MS Excel, conforme pode se observar nos anexos A1-1, A1-2 e A1-3, a partir dos quais foi possível obter os gráficos dos perfis de temperaturas, taxa de pré-aquecimento e desvio padrão relativo de temperatura das células em estudo.

O mesmo tratamento foi submetido aos dados de distribuição da corrente dos ânodos (ver os anexos A2-1, A2-2 e A2-3) com a finalidade de obter-se os gráficos do desvio padrão relativo da corrente das células.

#### 4.1.1. Comportamento dos perfis de temperatura das células

O gráfico 1 ilustra o comportamento dos perfis da temperatura média das três células em estudo durante o processo de pré-aquecimento. Destaca-se que o processo de pré-aquecimento da célula B053 demonstrou uma notável eficiência quando comparado às outras duas unidades, tendo atingido o limiar mínimo de energia exigido para a inicialização significativamente mais cedo do que inicialmente previsto e com uma excelente temperatura final de pré-aquecimento.

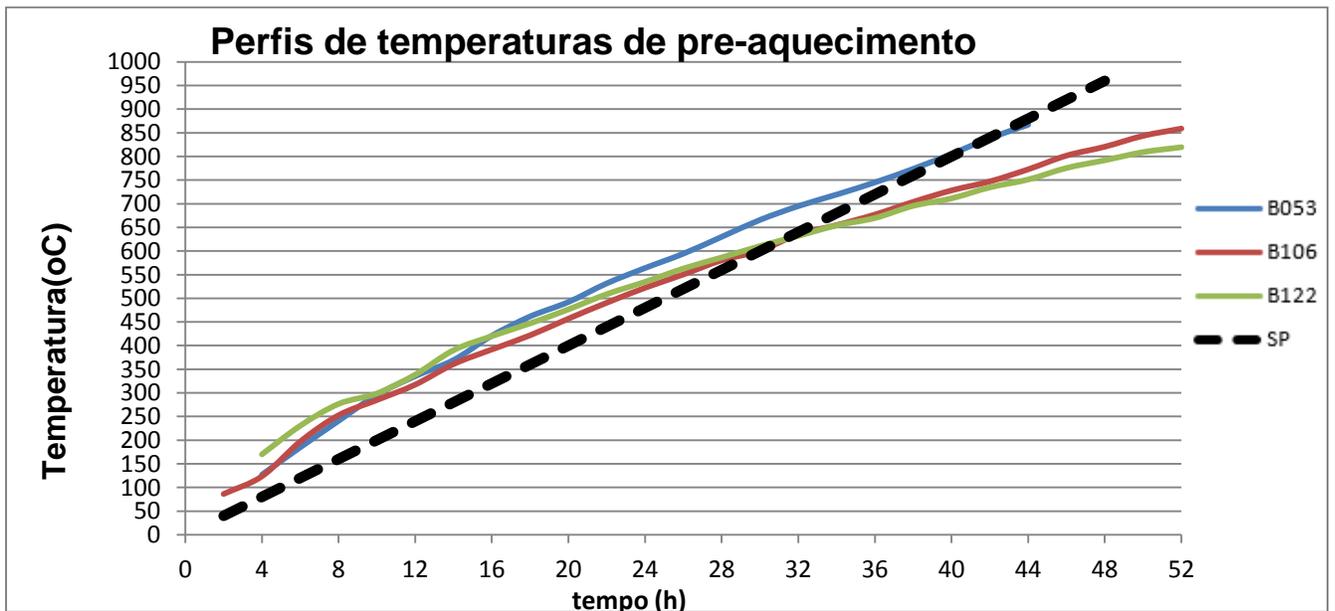
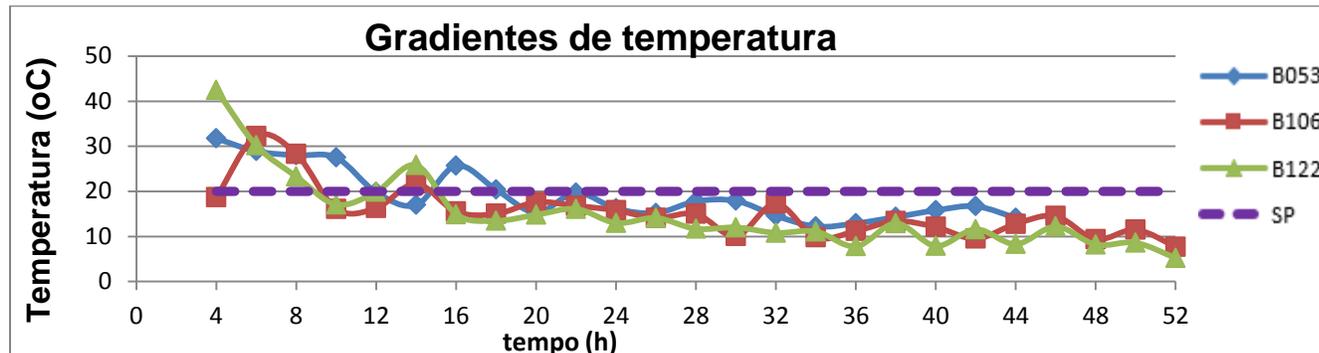


Gráfico 1. Perfis de temperatura de pré-aquecimento das células.

É possível notar que a tendência da evolução da temperatura média do B053 após 36h aproxima-se da linha ideal do pré-aquecimento (*set point*). Isto indica que a célula estava no caminho certo para alcançar condições ótimas de inicialização mais cedo. Em contraste, as outras duas células, B106 e B122, necessitaram de um tempo de pré-aquecimento mais longo. Esta comparação destaca o desempenho superior do B053 em termos da eficiência do pré-aquecimento.

#### 4.1.2. Taxa de pré-aquecimento das células



**Gráfico 2.** Gradientes de temperatura das células em pré-aquecimento.

Ficou evidente que em todos os três casos, o processo começa com gradientes significativamente acima da linha ideal, particularmente durante as primeiras 10 horas, e diminuem gradualmente para cerca de 10 °C/h no final do processo. A linha de B053 permanece consistentemente acima das outras duas e flutua mais perto da linha ideal, resultando em um pré-aquecimento mais rápido para esta célula em comparação com as outras.

#### 4.1.3. Distribuição da temperatura do cátodo

No que concerne a consistência e uniformidade da distribuição de temperatura dentro de um determinado processo de pré-aquecimento, o desvio padrão relativo (RSD) é uma medida estatística que frequentemente é usada para essa avaliação. Analisando o gráfico 3, é evidente que a célula B053 demonstrou uma consistência louvável para manter os valores de RSD abaixo do limiar de 10%. Isto indica que o seu processo de pré-aquecimento manteve uma distribuição de temperatura aceitavelmente uniforme ao longo da duração do processo, o que é um resultado positivo reflectindo a gestão térmica eficaz.

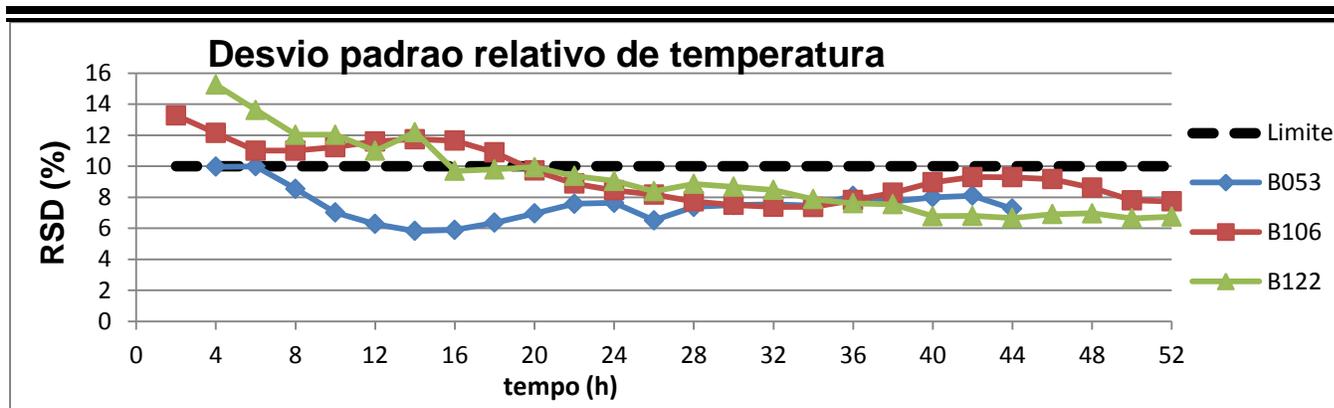


Gráfico 3. Desvio padrão relativo das temperaturas das células em pré-aquecimento.

Por outro lado, as células B106 e B122 apresentaram um comportamento diferente. Nas primeiras 20 horas do processo, B106 registou valores de RSD que excederam o limiar de 10%, evidenciando uma deficiência na distribuição de temperatura durante esse período. O mesmo aconteceu com o B122 nas primeiras 16 horas do processo.

#### 4.1.4. Distribuição da corrente dos ânodos (ACD)

O RSD da corrente é um sinalizador da condição de distribuição da electricidade na célula. Por meio do ACD realizado a cada duas horas nas três células, foi possível analisar a distribuição da corrente na entrada, passando pelos 20 ânodos que a conduzem ao cátodo. Pode observar-se no gráfico 4, que nos três casos analisados, o RSD da corrente de entrada foi bastante elevado, oscilando durante todo o processo entre 25 – 40%, acima das condições ideais (abaixo de 10%).

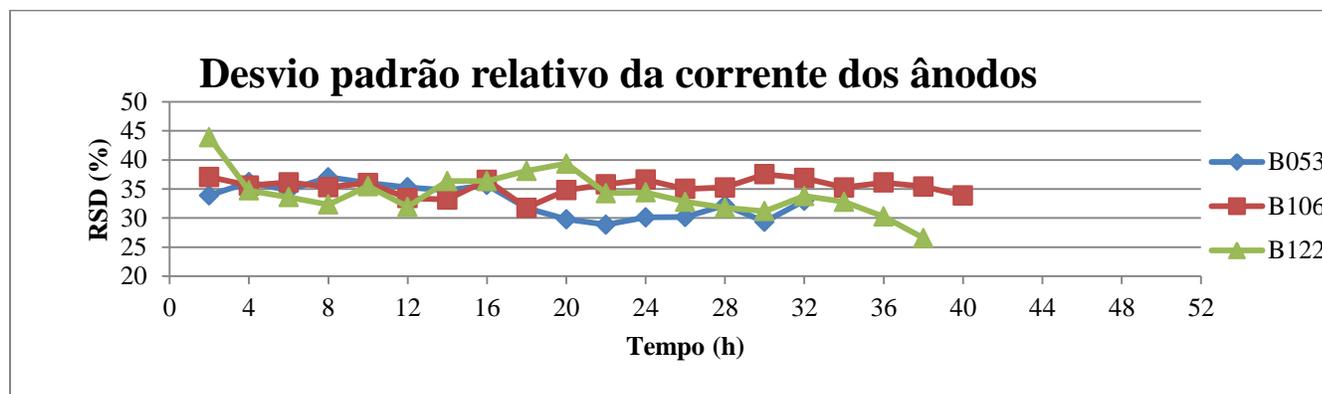


Gráfico 4. Desvio padrão relativo da corrente dos ânodos.

## 4.2. Período primórdio de operação (*Early Life*)

A partir dos dados colhidos durante o *early life* (ver os anexos A3-1, A3-2 e A3-3), foi possível elaborar os gráficos que permitem analisar o comportamento das células em estudo.

Conforme pode se observar nos gráficos de temperatura, altura e excesso de  $\text{AlF}_3$ , os *set points* variam ao longo do *early life*. Esta variação depende fundamentalmente do estado da cura térmica dos materiais catódicos e da impregnação do electrólito nas trincas e fissuras geradas durante a fase do pré-aquecimento. Nestes gráficos, o valor medido da variável em análise é representado pela linha contínua. Das linhas tracejadas, a verde representa o *set point* da variável, a laranja representa o seu valor máximo admissível e a vermelha representa o seu valor mínimo admissível.

### 4.2.1. Temperatura do banho

A regulação da temperatura do banho é crucial para o bom funcionamento das células electrolíticas, impactando directamente tanto a eficiência da corrente como a integridade do material catódico. Durante os 45 dias de observação da célula B053, a temperatura se manteve próxima ao ponto de ajuste (*set point*), com ligeiras flutuações entre os limites máximos e mínimos admissíveis. Isso indica uma regulação térmica favorável e condições operacionais estáveis. Por outro lado, as células B106 e B122 apresentaram ligeiras oscilações fora dos limites admissíveis em alguns intervalos do *early life*.

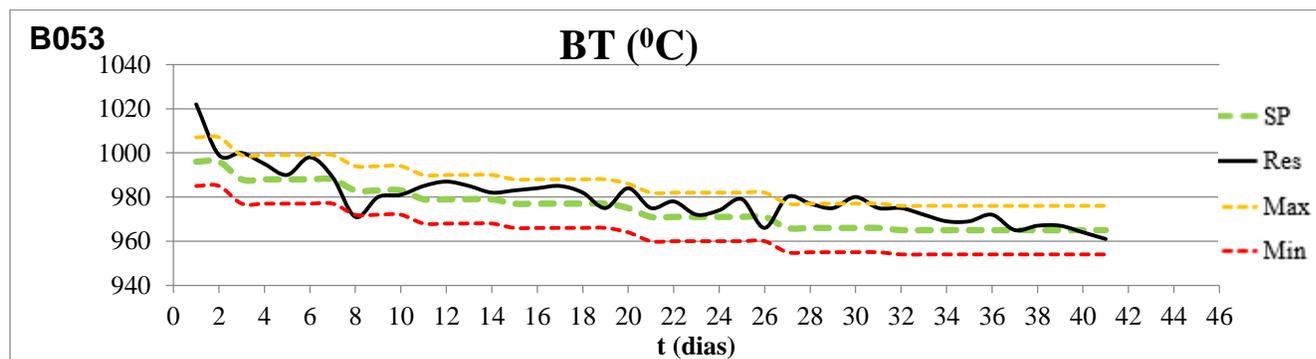


Gráfico 5. Temperatura do banho da célula B053.

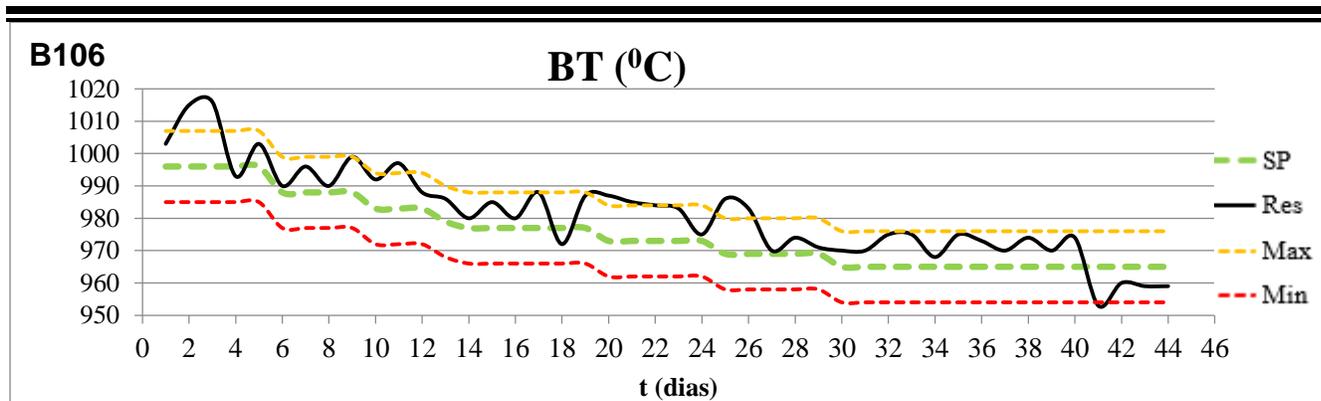


Gráfico 6. Temperatura do banho da célula B106.

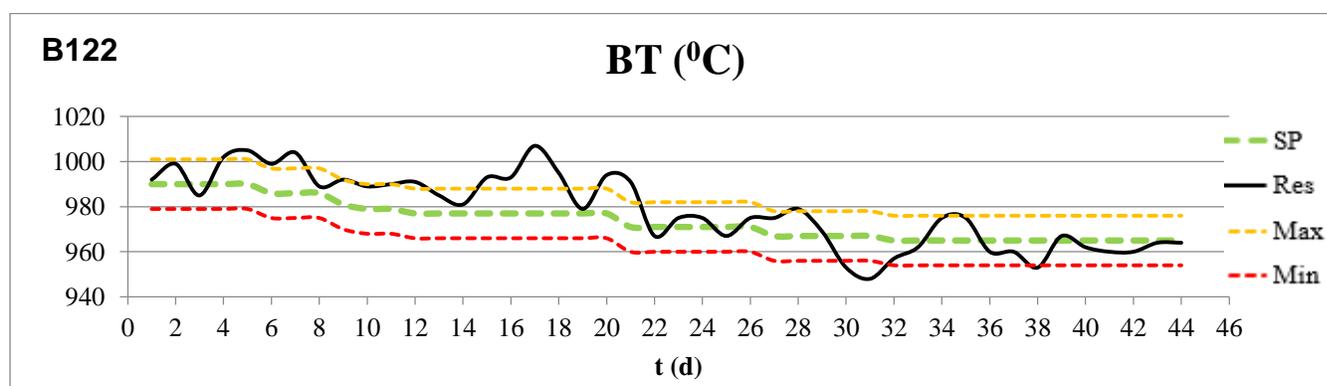


Gráfico 7. Temperatura do banho da célula B122.

#### 4.2.2. Altura do banho

A altura do banho (BH), é a medida que determina a quantidade do banho electrolítico na célula. Nota-se que as três células enfrentaram momentos tanto de excesso como deficiência de banho, o que pode ter afectado de certa forma a sua estabilidade em alguns intervalos do *early life*. Os efeitos mais comuns de quantidades excessivas de banho são: aumento da composição do Fe (devido à contaminação através dos pinos dos ânodos), risco de partes avermelhadas na carcaça (*red Shell*), risco de ocorrência de AE (devido ao bloqueio dos equipamentos de alimentação da alumina), movimento desordenado de electrões, etc. Por outro lado, a deficiência do banho na célula pode causar aumento de temperatura, fraca dissolução da alumina (a alumina não dissolvida desloca-se para o fundo do cátodo, criando *sludge*), aumento da resistência catódica devido ao *sludge*, risco de ocorrência de AE (quando se bloqueiam as entradas de alumina), risco de circuito aberto.

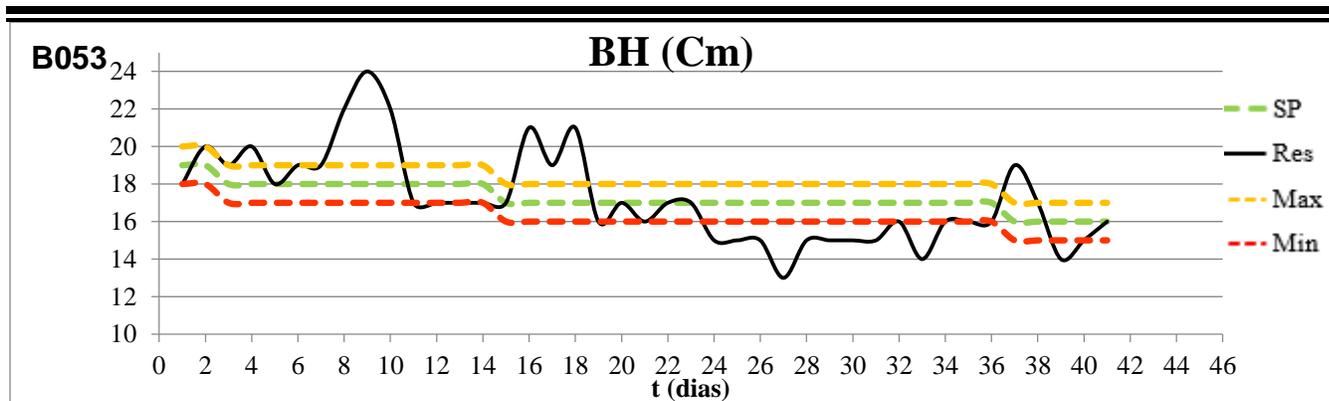


Gráfico 8. Variações da altura do banho da célula B053.

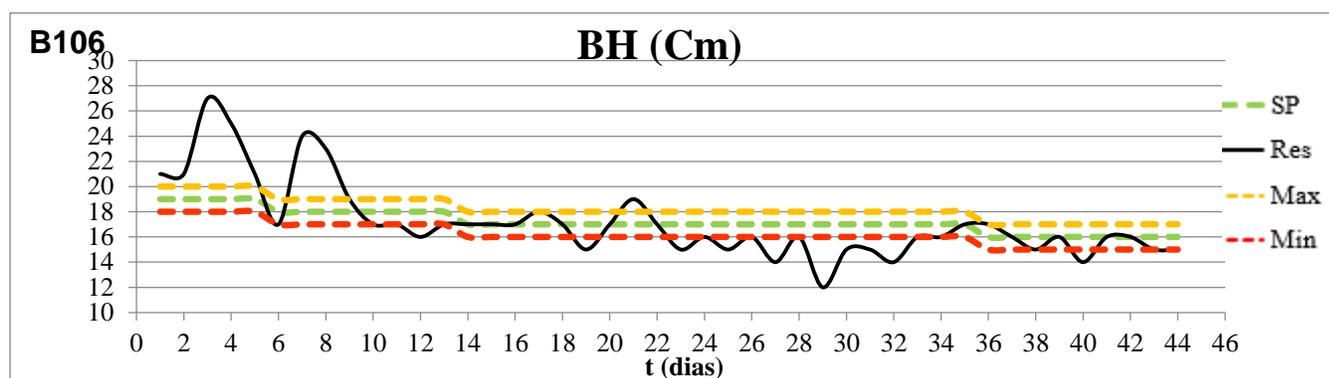


Gráfico 9. Variações da altura do banho da célula B106.

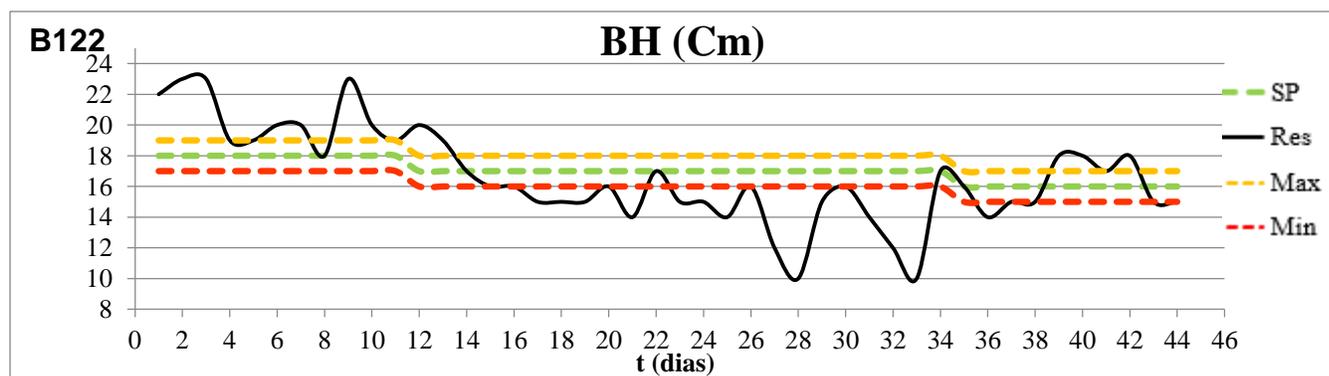


Gráfico 10. Variações da altura do banho da célula B122.

### 4.2.3. Excesso de $\text{AlF}_3$

O excesso de  $\text{AlF}_3$  no banho é crucial para regulação térmica da célula. As três células apresentam variações do excesso de  $\text{AlF}_3$  dentro dos limites admissíveis, na maior parte do período de *early life*. O excesso de  $\text{AlF}_3$  em níveis elevados pode baixar a temperatura do banho, aumentar a sua viscosidade, enfraquecendo a dissolução da alumina, deixando a célula instável e conseqüentemente menos eficiente. Por outro lado, excesso de  $\text{AlF}_3$  em níveis mais baixos eleva a temperatura do electrólito, tornando-o leve (em casos mais graves pode dissolver o metal e favorecer a formação do sódio em grande escala), gerando instabilidade e conseqüentemente baixando a eficiência da célula.

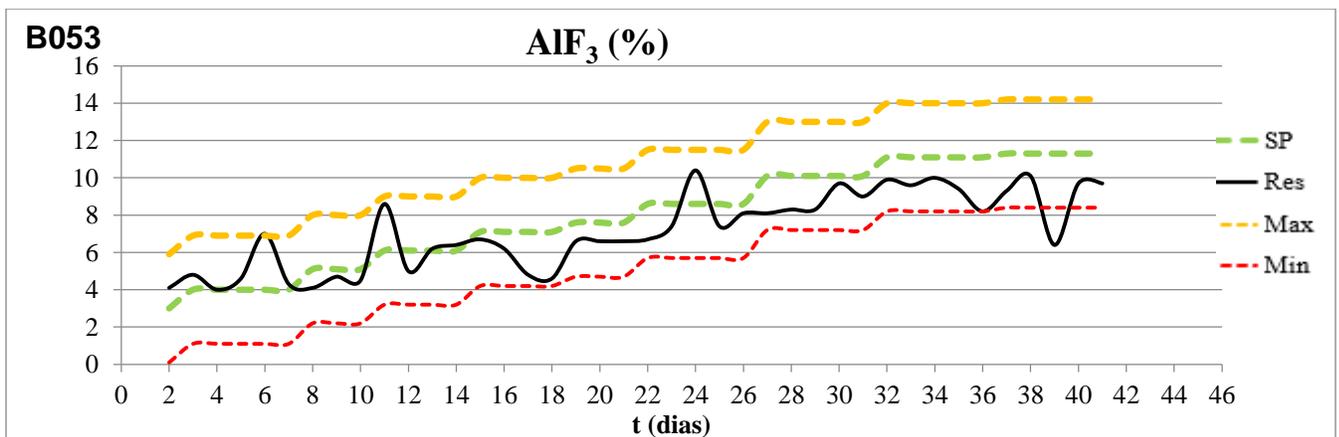


Gráfico 11. Excesso do  $\text{AlF}_3$  na célula B053.

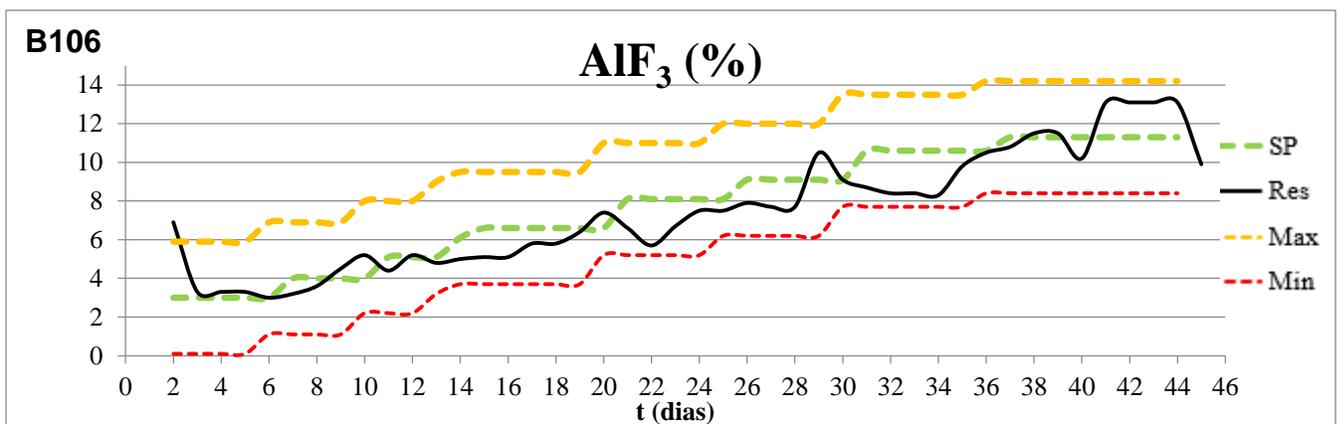


Gráfico 12. Excesso do  $\text{AlF}_3$  na célula B106.

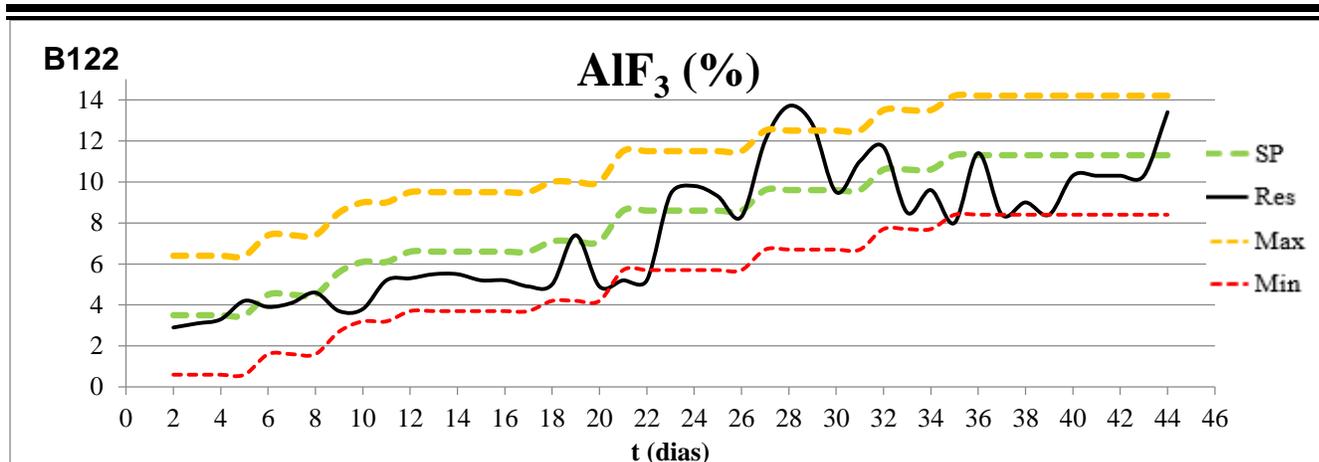


Gráfico 13. Excesso do  $\text{AlF}_3$  na célula B122.

#### 4.2.4. Concentração de Ferro e Silício no metal

A presença de ferro e silício no metal produzido é indesejável, pois esses elementos actuam como impurezas que podem afectar a qualidade do produto final. Porém, analisando os três gráficos abaixo notam-se concentrações Fe e Si elevadas no início, em todos eles. Este cenário deve-se ao critério de escolha das células doadoras de metal para a operação da adição do metal. É conveniente, sacrificar as células com maiores concentrações de Fe e Si para doar em células novas (geralmente são células mais antigas, com níveis de desgaste mais altos). Tanto o Fe como si, vão baixando até os níveis aceitáveis de qualidade ao longo do período de *early life*. A célula B106 apresenta uma notável subida de concentração de Fe no intervalo de 34-40 dias de operação. Esta subida provavelmente associa-se a contaminação através dos pinos dos ânodos mais desgastados na célula.

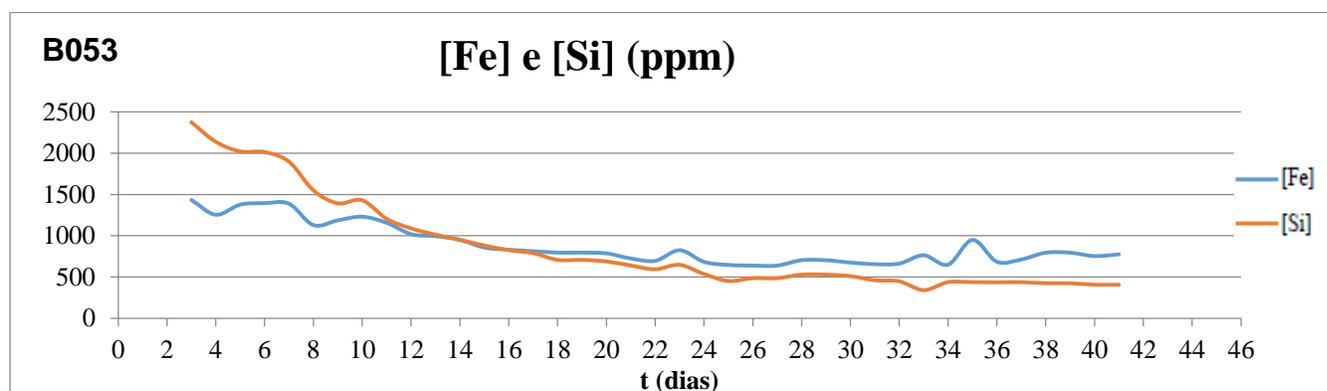


Gráfico 14. Concentrações de Ferro e Silício na célula B053.

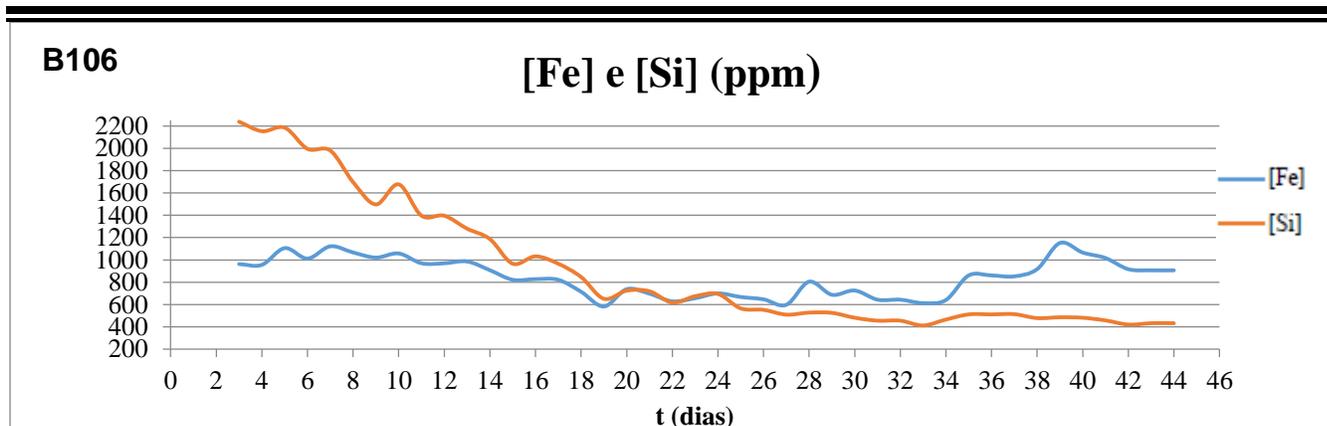


Gráfico 15. Concentrações de Ferro e Silício na célula B106.

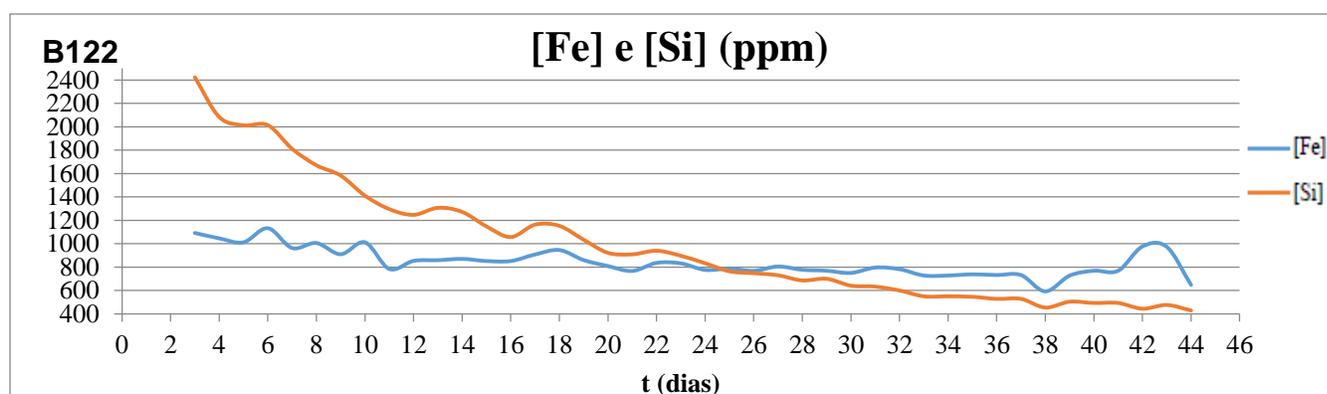


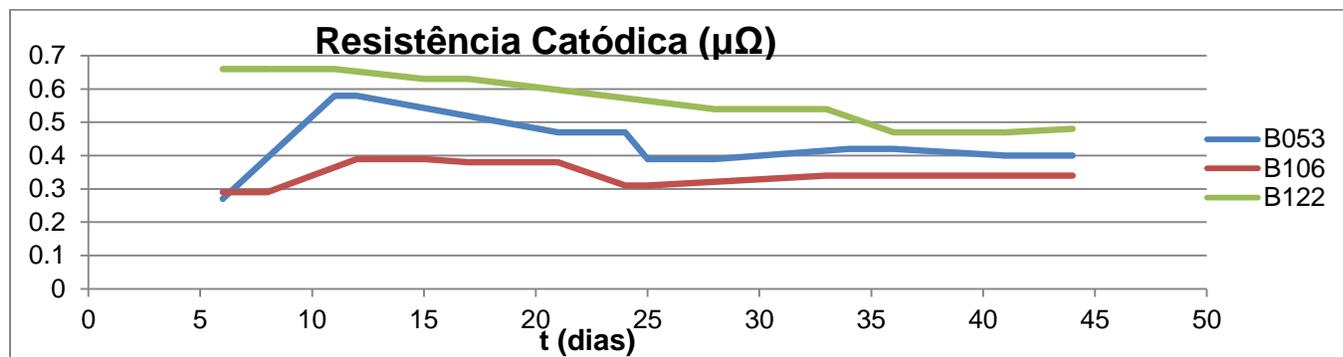
Gráfico 16. Concentrações de Ferro e Silício na célula B122.

#### 4.2.5. Resistência catódica

A resistência catódica pode ser associada tanto a eficiência da corrente como a longevidade da célula, isto é, menor resistência catódica proporciona melhor eficiência da corrente e indica bom estado de conservação do cátodo. Geralmente, a resistência catódica inicial diz muito sobre a magnitude do desgaste do cátodo após o processo de pré-aquecimento, enquanto a sua variação ao longo do período operacional da célula ajuda compreender o índice de desgaste do cátodo ao longo de sua vida útil.

Analisando os três gráficos abaixo, as células B053 e B106 apresentaram valores iniciais favoráveis, sugerindo um desgaste menos significativo no cátodo durante o processo de pré-aquecimento. A célula B122 apresenta uma resistência catódica muito elevada no início da sua operação e só começa a melhorar depois do período de cura dos materiais do cátodo. Isso pode significar que o B122 tenha sofrido algum desgaste significativo durante o pré-

aquecimento, mas, após a consolidação do preenchimento do electrólito nas zonas de desgaste e da cura térmica do cátodo, a resistência catódica começou a registar melhorias.



**Gráfico 17.** Variações da resistência catódica das células em estudo.

#### 4.2.6. Efeitos anódicos (AE)

O efeito anódico é causado pela insuficiência de alumina no banho, isto é, quando não há alumina suficiente para manter a electrólise normal, os iões de flúor começam a interagir directamente com o carbono do dos ânodos, produzindo perfluorocarbonetos (PFC's) como  $CF_4$  e  $C_2F_6$  (Tetrafluorometano e hexafluoreto de etano respectivamente), que são gases de efeito estufa. A deficiência da alumina no banho pode ser causada principalmente pela falha nos sistemas de alimentação de alumina, altura de banho fora do *set point* ou fraca dissolução de alumina no banho (deposição de *sludge*). O AE tem como consequência o aumento do consumo de energia (perda de eficiência), instabilidade, emissão de gases prejudiciais ao meio ambiente ( $CF_4$  e  $C_2F_6$ ), danificação dos equipamentos e redução de vida útil da célula.

O que os três gráficos abaixo apresentam em comum é o maior número de ocorrência de AE's nos primeiros 15 dias de operação. Tal facto, deve-se às maiores variações do BH durante este período, situação que facilmente pode causar bloqueios no sistema de alimentação ou afectar o grau de dissolução de alumina no banho.

Nos primeiros dias de operação da célula, grande parte do banho é consumido na impregnação do cátodo e formação *ledge* na parede lateral e na pasta catódica. Esta tem sido uma das razões pela qual o *set point* do BH no início é elevado e vai decrescendo ao longo do período de *early life*.

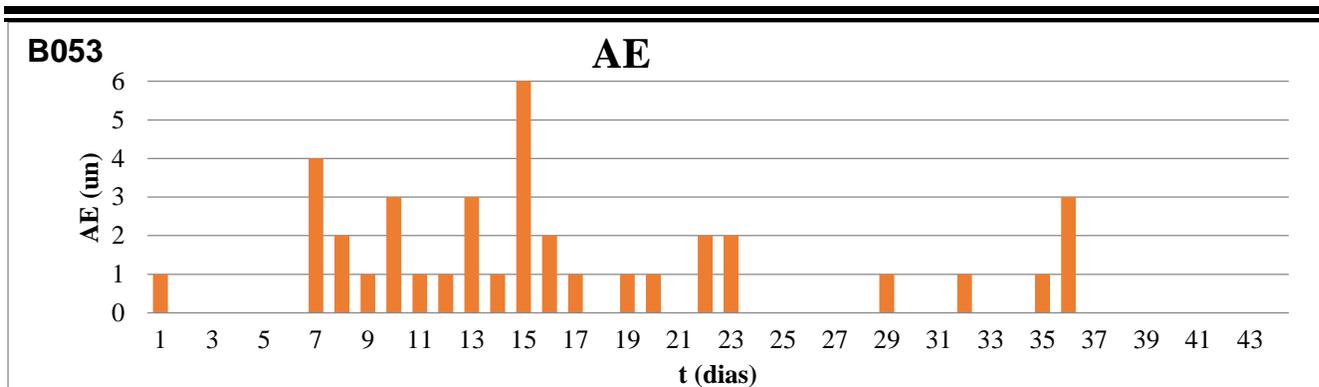


Gráfico 18. Número de efeitos anódicos na célula B053.

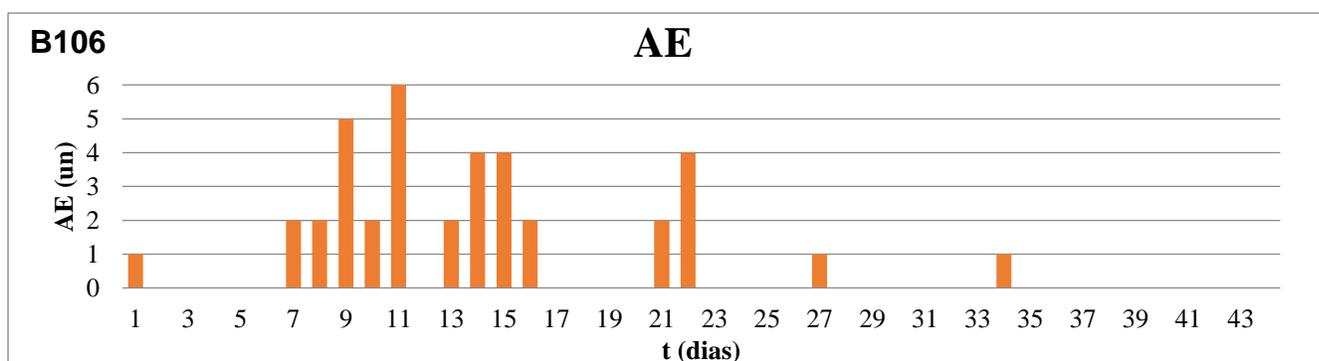


Gráfico 19. Número de efeitos anódicos na célula B106.

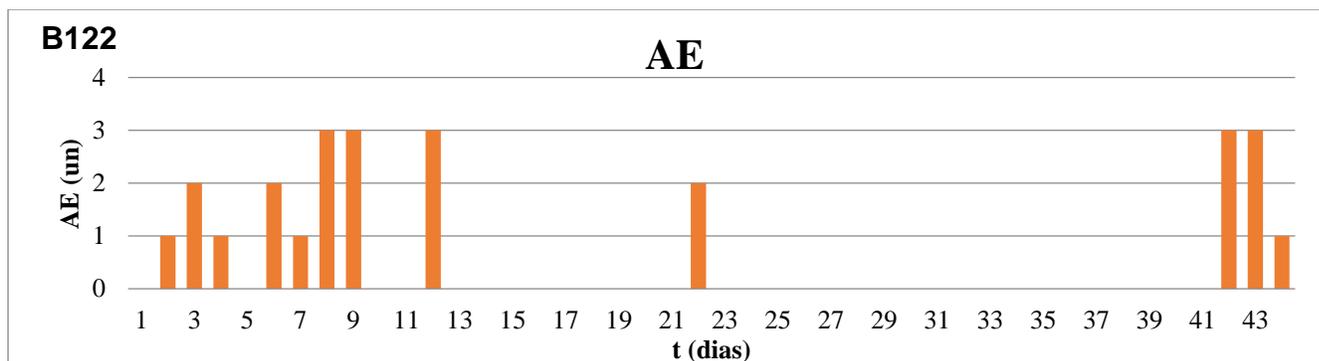


Gráfico 20. Número de efeitos anódicos na célula B122.

#### 4.2.7. Índice de Instabilidade (WRMI)

O parâmetro WRMI (*Wehrli-Rau-Morita* Instability) é um índice usado para avaliar a estabilidade magneto-hidrodinâmica da interface entre o metal e o banho electrolítico, isto é, durante a electrólise, a interacção entre as correntes eléctricas e os campos magnéticos pode causar instabilidades na interface metal-banho, gerando ondas ou oscilações, que podem resultar em perda de eficiência energética ou circuito aberto. Nos primeiros instantes após a inicialização da célula é bastante comum a elevada instabilidade devido a entropia gerada pelo movimento de entrada do electrólito, possíveis choques térmicos, preenchimento das rachaduras e poros gerados durante o pré-aquecimento, ausência de metal, o efeito anódico gerado para evitar o congelamento do electrólito, alta voltagem e muitos outros factores. Portanto, é comum que a instabilidade dure pelo período de impregnação do banho e comece a baixar logo após a adição do metal. Nos gráficos abaixo, nota-se um comportamento diferente por parte do B122, que desde a sua inicialização se manteve instável por aproximadamente 25 dias (um péssimo sinal para a preservação do cátodo). Esta pode ser mais uma evidência do índice de desgaste sofrido durante o pré-aquecimento desta célula, pois a sua instabilidade começa a baixar justamente após a melhoria da sua resistência catódica. O B106 pode destacar-se pela sua estabilidade ao longo de quase todo período de *early-life* e, o mesmo poderia ser dito do B053 se não fosse período de 8 dias entre o décimo e o décimo oitavo dia de operação. A instabilidade do B053, ainda que não tenha sido tão grave comparando com o B122, pode ter sido influenciada pela dificuldade enfrentada no controle do banho e o número de ocorrência de AE's registados coincidentemente no mesmo período.

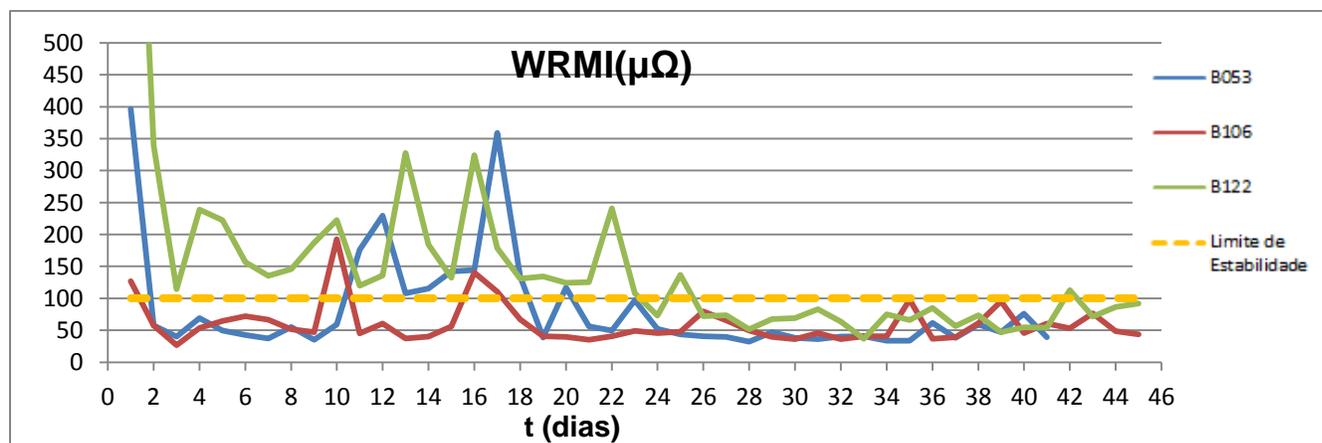


Gráfico 21. Índice de instabilidade das células em estudo.

#### 4.2.8. Eficiência da corrente (Ef)

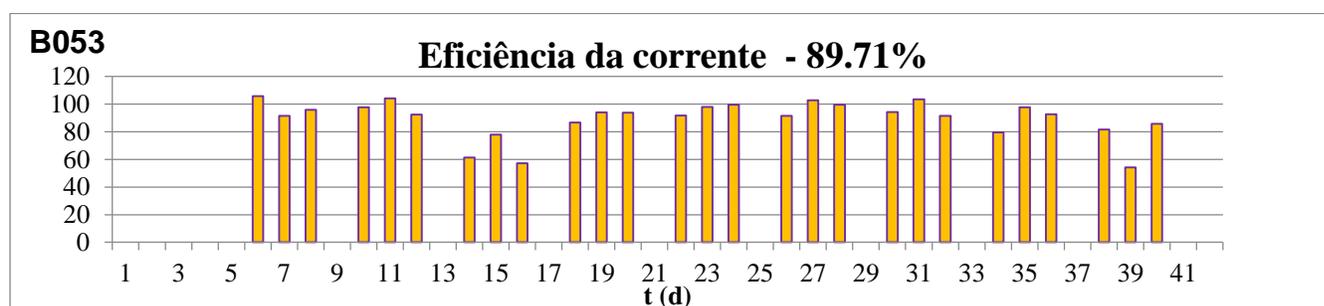
Na Mozal, a sucção do metal ocorre a cada 32 horas. Portanto, os valores de massa real que se encontram na base de dados correspondem a 32 horas. Neste caso, houve necessidade de se converter a fórmula do cálculo da eficiência para uma base diária.

$$Ef = [m_{\text{real}} / (8.0533 \times I)] \times 100$$

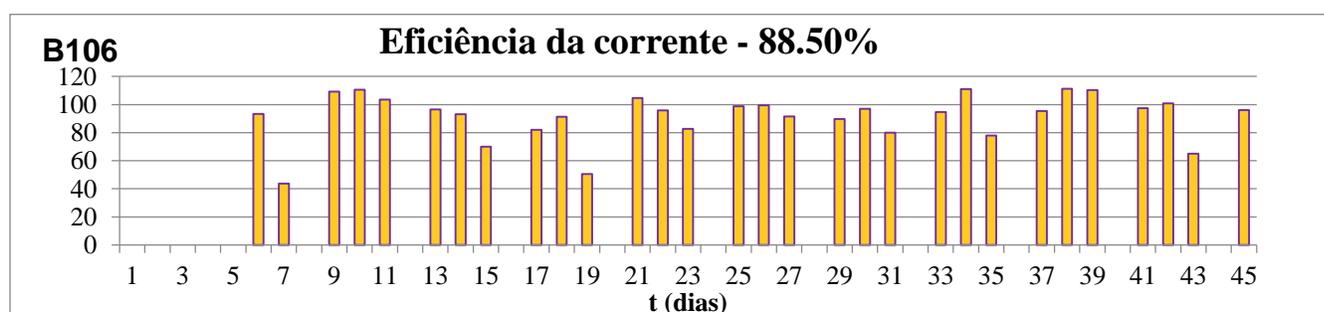
$$m_{\text{real}} = (24/32) \times m'_{\text{real}} \quad (m'_{\text{real}} - \text{massa produzida em 32 horas})$$

$$\text{Substituindo: } Ef = [(24/32) \times m'_{\text{real}} / (8.0533 \times I)] \times 100$$

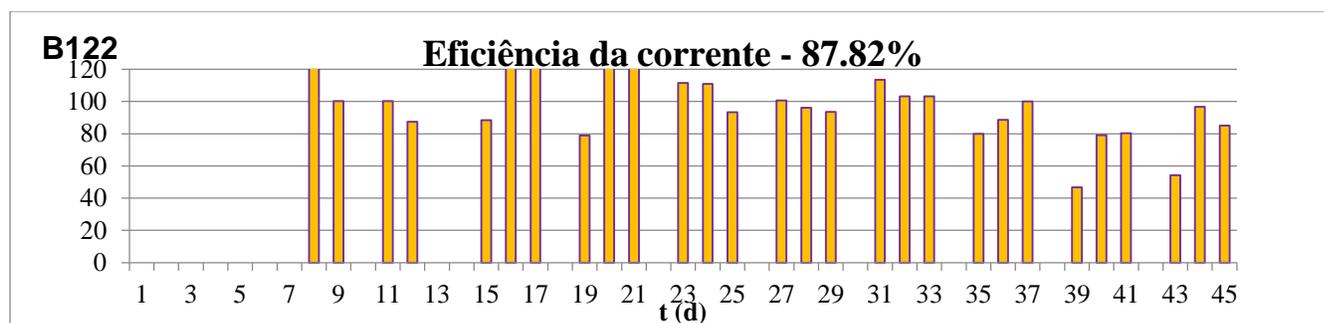
Como resultado do arranjo feito na fórmula da eficiência, foi possível elaborar os gráficos 22, 23 e 24 que ilustram a variação da eficiência ao longo do período do *early life*.



**Gráfico 22.** Eficiência da corrente na célula B053.



**Gráfico 23.** Eficiência da corrente na célula B106.



**Gráfico 24.** Eficiência da corrente na célula B122.

Os dados das eficiências médias do *early life* demonstram claramente que a célula B053 teve melhor desempenho com uma eficiência média de 89.71%, seguida da célula B106 com 88.50% e a célula com menor desempenho foi B122 com 87.82%.

Com base nesses resultados, pode-se afirmar que três células tiveram um desempenho dentro dos padrões exigidos na indústria de produção do alumínio, na avaliação do *early life*. Estima-se que a eficiência das células electrolíticas deve estar entre 85-90% durante a fase do *early life* e 90-95% durante a fase normal de operação.

## **CAPÍTULO V**

### **5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES**

#### **5.1. Conclusões**

Com base nos objectivos e resultados adquiridos no trabalho pode se inferir as seguintes conclusões:

- Os resultados da pesquisa, mostram que o impacto do pré-aquecimento do cátodo no desempenho e tempo de vida útil das células electrolíticas depende fundamentalmente das seguintes variáveis: RSD da temperatura, gradientes de temperatura, temperatura final de pré-aquecimento e o RSD da corrente dos ânodos. Esta conclusão é sustentada pela comparação dos resultados obtidos nas três células avaliadas, pois o melhor desempenho foi verificado na célula B053, que obteve melhores resultados no pré-aquecimento (sobre tudo na avaliação da distribuição de temperatura e controlo da taxa de pré-aquecimento). Por outro lado, os sinais de boa conservação do cátodo (que conferem uma vida longa à célula) também foram observados nas células com melhores resultados na fase de pré-aquecimento (B053 e B106). Além disso, os desvios observados no pré-aquecimento da célula B122, principalmente o RSD da temperatura e sua temperatura final do processo, conferiram-lhe uma inicialização marcada por um período de instabilidade de 25 dias do *early life*. Os dados iniciais de CVD na célula B122 traduzem uma provável degradação causada tanto durante o período de pré-aquecimento, como o período de instabilidade observado;
- Os desafios observados no pré-aquecimento do B122 ajudam a compreender a importância das boas práticas de monitoramento durante o *early life* como medida de correcção em células electrolíticas cujo pré-aquecimento não tenha sido bem-sucedido.
- Observou-se que o pré-aquecimento adequado evitou falhas precoces nos cátodos, e por outro lado, as práticas da Mozal demonstraram ser eficazes tanto nas medidas de correcção das leituras dos dados fora do padrão no pré-aquecimento, como nas estratégias de monitoramento do *early life*. Tais práticas, contribuíram para a preservação do cátodo e no ganho da eficiência energética observada;
- A formação de carbeto de alumínio ( $Al_4C_3$ ), identificada como uma das principais causas de degradação dos cátodos, foi significativamente reduzida pela uniformidade térmica

alcançada durante o pré-aquecimento. No entanto, verificou-se que a ocorrência dos efeitos anódicos contribuía na elevação do parâmetro de instabilidade (WRMI), resistência catódica, destruição tanto da ledge nas paredes laterais como na desimpregnação do banho congelado nos poros e rachaduras no fundo do cátodo. Portanto, o efeito anódico para além de baixar o desempenho da célula, também cria condições de desgaste do cátodo, reduzindo sua vida útil;

- Foram identificados três principais mecanismos de falha que podem resultar de um pré-aquecimento deficiente: (1) Tensões geradas pelo choque térmico (que geram trincas e rachaduras durante a inicialização); (2) Tensões geradas pela deformação térmica excessiva (responsável pelo aumento da resistência catódica durante a operação da célula) e (3) Infiltração do metal nas juntas dos blocos catódicos (principal causa do derramamento pela barra colectora).

## **5.2. Recomendações**

Feitas as conclusões do presente trabalho, recomenda-se para futuras investigações:

- Investigar a distribuição de temperatura nos cátodos durante o pré-aquecimento usando simulações computacionais avançadas, permitindo prever pontos críticos de potenciais falhas com maior precisão, ilustração gráfica das variáveis de avaliação do pré-aquecimento em tempo real, permitindo a identificação de sobreaquecimentos localizados e maior flexibilidade nas medidas de correcção;
- Avaliar a possibilidade de introdução do uso de conectores flexíveis em substituição dos rolantes, visto que a análise do pré-aquecimento das três células estudadas evidencia uma certa fragilidade no controlo da distribuição da corrente eléctrica ao longo do processo;
- Investigar a influência das propriedades físico-químicas dos eléctrodos e material de resistência na eficiência do pré-aquecimento;
- Avaliar o impacto ambiental do processo de inicialização das células electrolíticas, incluindo a emissões de PFC's durante a ocorrência de AE's;

- Reforçar as medidas de controlo de AE's sobretudo durante a primeira quinzena do *early life*, visto que nos três casos estudados este período ficou marcado pela maior ocorrência desse fenómeno.
- Simular o mesmo estudo feito no presente trabalho usando mais amostras e recursos, de modo a obter resultados mais consistentes e conclusivos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ahmed, K. W., Jang, M. J., Park, M. G., Chen, Z., & Fowler, M. (2022). Effect of Components and Operating Conditions on the Performance of PEM Electrolyzers: A Review. *Electrochem*, 3(4), 581–612. <https://doi.org/10.3390/electrochem3040040>
- Alamdari, H. (2017). Aluminium production process: Challenges and opportunities. *Metals*, 7(4), 5–7. <https://doi.org/10.3390/met7040133>
- Altenpohl, D., Das, S. K., & Kaufman, J. (1998). Chapter 2 Production and processing of aluminum. *Aluminum: Technology, Applications, and Environment - TMS*, 7–25.
- Brekke, H., Sjulstad, H.I., Magnus, C., Williams, R.W. (2001); Sedimentary environment offshore Norway –Paleozoic to Recent: an overview. *Norwegian Petroleum Society, NPF Special publication*; no. 10, 7-37
- Cardoso, J. G. D. R., Pedro, S. L. D. C., Paulo, S. M. D. F., Marcelo, M. D. S., & Marco, A. R. R. (2011). A indústria do alumínio: estrutura e tendências. *BNDES Setorial*, 33, 43–88. <http://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/2499>
- Faanes, Craig A. and LeValley, Michael J. (1993), Is the Distribution of Sandhill Cranes on the Platte River Changing?. *Great Plains Research: A Journal of Natural and Social Sciences*. 127. <https://doi.org/10.1016/0020-7225>
- Gielen SC, Dekker J, Francke AL, Mistiaen P, Kroezen M. The effects of nurse prescribing: a systematic review. *Int J Nurs Stud*. 2014 Jul;51(7):1048-61. doi: 10.1016/j.ijnurstu.2013.12.003. Epub 2013 Dec 16. PMID: 24398118.
- Hankel, J., Kernebeck, S., Deuerler, F., & Weber, S. (2022). Investigation of phase transformation related electrical conductivity of long-term heat treated aluminium electrolysis cathodes. *SN Applied Sciences*, 4(8). <https://doi.org/10.1007/s42452-022-05101-0>
- Jäger, H., & Frohs, W. (2021). *Industrial Carbon and Graphite Materials*. WILEY-VCH GmbH, Boschstr.
- K. Grjotheim and B. J. Welch. (1987). Aluminium Smelter Technology – A Pure and Applied Approach,” 2nd Edition, Dusseldorf: *Aluminium Verlag*.
- Kvande, The 20th International Course on Process Metallurgy of Aluminium (Trondheim: NTNU, 2001), p. 41.9. H. Kvande, *The International Course on Process Metallurgy of*

*Aluminium* (Trondheim: NTNU, 2004), p. 29.

- Lefebvre, H. (1997). The Everyday and Everydayness. In S. Harris, & D. Berke (Eds.), *Architecture of the Everyday* (pp. 32-38). *New York: Princeton Architectural Press*.
- Massinguil, J. A. F. (2014). *Impacto das reacções de oxidação parasítica no consumo do ânodo de carbono na produção de alumínio*. Universidade Eduardo Mondlane.
- M.M. Ali, JES 41, 2354 (2013).
- M. Sørliie and H. Øye, *Cathodes in aluminium electrolysis*, 2nd ed. (Düsseldorf: Aluminium-Verlag GmbH, 1994).
- Neto, A. G. de J. (2019). New directions of Circulation in Mozambique: the exporting products in the 2010s. *AbeÁfrica: Revista Da Associação Brasileira de Estudos Africanos*, 3(3), 1–16.
- Rao, R. and Rao, P.R. (1985) MHD Flow of a Second Grade Fluid in an Orthogonal Rheometer. *International Journal of Engineering Science*, 23, 1387-1395.
- Reverdy, M., & Potocnik, V. (2022). *A Historical Review of Aluminum Reduction Cell Start-Up and Early Operation BT - Light Metals* (D. Eskin (ed.); pp. 991–997). Springer International Publishing.
- Rousseeuw, P.J. and Leroy, A.M. (1987) *Robust Regression and Outlier Detection*. Wiley Interscience, *New York (Series in Applied Probability and Statistics)*, 329 pages. <http://dx.doi.org/10.1002/0471725382>
- Schneider, G. L. (2012). *desenvolvimento de uma metodologia numérica para estimativa de espessura de ledge na produção de alumínio primário*. universidade federal do rio grande do sul.
- Sancho, Juana M. & Pons, Juan & Alonso, Ángel & Area-Moreira, Manuel & Ferrés, Joan & Alonso, Cristina & Roca, Octavi & Bartolomé, Antonio & Almenara, Julio & Castaño, Carlos & Frutos, Mario & Catasús, Montse & Penín, M & Simó Gil, Núria. (1994). Sancho, J.M (1994) *Para una tecnología educativa*.
- Šimko, František. (2011). Thermal analysis of (NaF/AlF<sub>3</sub>)-FeF<sub>3</sub> and (NaF/AlF<sub>3</sub>)-FeO systems. *Chemical Papers*. 66. 10.2478/s11696-011-0114-2.
- Sørliie, M., Gran, H., Øye, H.A. (2016). Property Changes of Cathode Lining Materials During Cell Operation. In: Tomsett, A., Johnson, J. (eds) *Essential Readings in Light Metals*. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-48200-2\\_124](https://doi.org/10.1007/978-3-319-48200-2_124)

- Tada, M., Uruga, T., & Iwasawa, Y. (2015). Key Factors Affecting the Performance and Durability of Cathode Electrocatalysts in Polymer Electrolyte Fuel Cells Characterized by In Situ Real Time and Spatially Resolved XAFS Techniques. *Catalysis Letters*, 145(1), 58–70. <https://doi.org/10.1007/s10562-014-1428-9>
- Thonstad, J. & Rolseth, Sverre & Rødseth, J. & Lund, O. & Tonheim, J. & Danielik, V. & Fellner, Pavel & Híveš, Ján. (2001). The Content of Sodium in Aluminum in Laboratory and in Industrial Cells. Light Metals: Proceedings of Sessions, *TMS Annual Meeting (Warrendale, Pennsylvania)*. 441-447.
- Tchamo, C. M. (2021). The Financial Impact of Mozal Company in Mozambique. In *Frontiers in Neuroscience* (Vol. 14, Issue 1). Instituto Superior de Gestão. Lisboa.
- Tremblay, S. O., Marceau, D., Tripathy, R. N., Godefroy, A., Kocaeffe, D., Charest, S., & Côté, J. (2023). Numerical Investigation of Thermal, Electrical, and Mechanical Behaviour of Aluminium Cell During Preheating Phase. *Minerals, Metals and Materials Series*, 765 – 772. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-22532-1\\_102](https://doi.org/10.1007/978-3-031-22532-1_102)
- W. Haupin and H. Kvande, “Thermodynamics of Electrochemical Reduction of Alumina,” Light Metals 2000, ed. R.D. Petersen (Warrendale, PA: TMS, 2000), pp. 379–384.
- Zhou, W., Shi, J., Yin, G., He, W., & Yi, J. (2020). Optimal Control for Aluminum Electrolysis Process Using Adaptive Dynamic Programming. *IEEE Access*, 8, 220374–220383. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3041834>

# **Anexos**

**A1. Dados do pré-aquecimento**

**Tabela A1-1. Célula B053**

<b>Número da Célula: B053</b>						<b>Data do energizamento: 30.04.24/18h40</b>				
<b>t</b>	<b>T1</b>	<b>T2</b>	<b>T3</b>	<b>T4</b>	<b>T5</b>	<b>Tm</b>	<b>V</b>	<b>E<sub>el</sub></b>	<b>ΔT</b>	<b>RSD</b>
<b>(h)</b>	<b>(°C)</b>	<b>(°C)</b>	<b>(°C)</b>	<b>(°C)</b>	<b>(°C)</b>	<b>(°C)</b>	<b>(Volt)</b>	<b>(KWh)</b>	<b>(°C)</b>	<b>(%)</b>
<b>4</b>	136	141	131	105	122	127	3.07	2	31.75	9.972
<b>6</b>	200	206	189	155	174	184.8	2.81	3.6	28.9	9.986
<b>8</b>	261	262	246	209	226	240.8	2.1	5.5	28	8.541
<b>10</b>	320	313	303	267	276	295.8	2.58	7.5	27.5	7.018
<b>12</b>	361	351	344	310	311	335.4	2.51	9.1	19.8	6.273
<b>14</b>	395	383	381	349	339	369.4	2.48	10.6	17	5.825
<b>16</b>	445	438	438	401	382	420.8	2.43	12.8	25.7	5.893
<b>18</b>	485	486	482	442	413	461.6	2.42	14.7	20.4	6.357
<b>20</b>	517	522	516	472	434	492.2	2.4	16.1	15.3	6.958
<b>22</b>	559	571	556	509	463	531.6	2.39	18	19.7	7.578
<b>24</b>	590	609	590	540	491	564	2.36	19.6	16.2	7.639
<b>26</b>	615	637	620	568	532	594.4	2.34	20.9	15.2	6.509
<b>28</b>	646	685	660	607	552	630	2.34	23	17.8	7.375
<b>30</b>	675	727	702	641	584	665.8	2.36	25	17.9	7.494
<b>32</b>	697	764	733	669	612	695	2.36	26.7	14.6	7.552
<b>34</b>	713	791	759	700	634	719.4	2.5	28	12.2	7.461
<b>36</b>	732	825	790	731	648	745.2	2.37	29.7	12.9	8.096
<b>38</b>	759	853	817	763	677	773.8	2.39	31.1	14.3	7.72
<b>40</b>	766	888	861	803	709	805.4	3.14	35.8	15.8	8.002
<b>42</b>	779	931	889	848	747	838.8	2.74	36.3	16.7	8.105
<b>44</b>	821	936	921	888	769	867	2.51	38.2	14.1	7.265
<b>46</b>							2.64	41.1		

**Tabela A1-2. Célula B106**

<b>Número da Célula: B106</b>						<b>Data do energizamento: 02.05.24/01h00</b>				
<b>t</b>	<b>T1</b>	<b>T2</b>	<b>T3</b>	<b>T4</b>	<b>T5</b>	<b>Tm</b>	<b>V</b>	<b>E<sub>el</sub></b>	<b>ΔT</b>	<b>RSD</b>
<b>(h)</b>	<b>(°C)</b>	<b>(°C)</b>	<b>(°C)</b>	<b>(°C)</b>	<b>(°C)</b>	<b>(°C)</b>	<b>(Volt)</b>	<b>(KWh)</b>	<b>(°C)</b>	<b>(%)</b>
<b>2</b>	79	106	92	79	75	86.2	3.26	1.1	43.1	13.3
<b>4</b>	105	144	138	119	112	123.6	2.94	2.8	18.7	12.1
<b>8</b>	202	283	272	253	253	252.6	2.58	6.7	32.25	11
<b>10</b>	226	320	305	286	287	284.8	2.53	8.1	16.1	11.2
<b>12</b>	249	358	338	320	322	317.4	2.48	9.6	16.3	11.6
<b>14</b>	282	407	385	364	366	360.8	2.44	11.6	21.7	11.7
<b>16</b>	308	442	421	397	391	391.8	2.37	13.2	15.5	11.7
<b>18</b>	337	471	452	426	423	421.8	2.3	14.7	15	10.9
<b>20</b>	376	505	488	463	453	457	2.28	16.6	17.6	9.73
<b>22</b>	413	537	521	505	477	490.6	2.27	18.3	16.8	8.88
<b>24</b>	447	569	551	545	499	522.2	2.3	20	15.8	8.45
<b>26</b>	478	599	580	576	519	550.4	2.3	21.5	14.1	8.17
<b>28</b>	514	631	611	605	541	580.4	2.26	23.3	15	7.73
<b>30</b>	540	654	631	624	554	600.6	2.25	24.5	10.1	7.51
<b>32</b>	584	692	666	659	575	635.2	2.21	26.7	17.3	7.38
<b>34</b>	610	715	687	675	587	654.8	2.2	28.1	9.8	7.38
<b>36</b>	633	735	705	716	597	677.2	2.17	29.4	11.2	7.82
<b>38</b>	663	764	728	754	611	704	2.15	31.2	13.4	8.28
<b>40</b>	687	791	755	787	621	728.2	2.13	32.7	12.1	8.96
<b>42</b>	709	808	787	804	628	747.2	2.13	33.8	9.5	9.31
<b>44</b>	734	832	809	839	650	772.8	2.15	35.9	12.8	9.29
<b>46</b>	752	856	849	871	681	801.8	2.19	37.1	14.5	9.17
<b>48</b>	766	873	876	880	708	820.6	2.24	39.1	9.4	8.62
<b>50</b>	796	888	893	904	737	843.6	2.28	40.4	11.5	7.81
<b>52</b>	812	901	911	920	751	859	2.15	41.9	7.7	7.73

**Tabela A1-3. Célula 122**

<b>Número da Célula: B122</b>						<b>Data do energizamento: 06.05.24/5h00</b>				
t	T1	T2	T3	T4	T5	Tm	V	E <sub>el</sub>	ΔT	RSD
(h)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(Volt)	(KWh)	(°C)	(%)
4	152	209	156	141	192	170	3.19	3.3	42.5	15.262
6	181	260	212	266	233	230.4	2.94	5.3	30.2	13.628
10	248	345	311	323	267	298.8	2.69	9.4	17.1	12.03
12	301	383	351	369	289	338.6	2.58	11.4	19.9	10.99
14	367	436	406	433	309	390.2	2.51	14.3	25.8	12.189
16	381	461	431	463	364	420	2.44	15.8	14.9	9.7054
18	405	488	459	496	387	447	2.4	17	13.5	9.7975
20	435	519	489	531	409	476.6	2.38	4	14.8	9.9354
22	489	547	517	563	428	508.8	2.4	19.3	16.1	9.3784
24	511	573	543	592	455	534.8	2.39	21	13	9.0578
26	535	600	569	622	489	563	2.38	22.6	14.1	8.3862
28	550	627	595	652	508	586.4	2.37	25.9	11.7	8.8602
30	571	650	618	680	533	610.4	2.29	27.6	12	8.673
32	584	672	640	704	560	632	2.28	29.2	10.8	8.4725
34	605	692	661	725	588	654.2	2.27	30.9	11.1	7.881
36	618	707	677	740	607	669.8	2.29	32.1	7.8	7.6101
38	638	740	709	760	631	695.6	2.3	34.7	12.9	7.5496
40	655	750	719	775	658	711.4	2.31	35.5	7.9	6.778
42	671	775	744	799	684	734.6	2.4	37.7	11.6	6.7991
44	688	793	762	814	699	751.2	2.44	39.1	8.3	6.6631
46	706	826	792	835	719	775.6	2.47	41.4	12.2	6.9157
48	720	845	807	853	735	792	2.54	42.7	8.2	6.9589
50	736	861	819	871	759	809.2	2.54	44.7	8.6	6.6496
52	741	871	821	888	777	819.6	2.48	46.3	5.2	6.7527

## A2. Distribuição da corrente no ânodo

**Tabela A2-1.** Distribuição da corrente no ânodo – célula B053

B053	Distribuição da corrente dos ânodos (V)										0.8<ACD<2.6										RSD
Ânodo t (h)	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	(%)
2	2	1.4	1.3	1.1	1.3	1.6	0.9	1.8	1.6	0.9	0.8	0.6	1.7	1.5	1.2	1.8	1.8	2	0.7	0.6	34
4	2.2	1.6	1.5	1.3	1.3	1.7	0.6	1.9	1.8	0.9	0.9	0.7	1.8	1.5	1.3	1.9	2	1.8	0.7	0.5	36
6	2.2	1.6	1.6	1.4	1.3	1.8	0.8	2	1.9	1	0.9	0.8	1.5	1.4	1.9	2	2.1	1.9	0.6	0.6	35
8	2.2	1.5	1.4	1.4	1.3	1.8	0.7	1.9	2	1.1	0.8	0.6	1.7	1.7	1.5	1.9	2	2	0.6	0.5	37
10	2.1	1.6	1.5	1.6	1.2	2.1	0.7	2.1	2	1.2	0.9	0.6	1.7	1.7	1.7	2	1.9	2	0.7	0.5	36
12	2.1	1.6	1.5	1.5	1.5	2	1	2.2	2.1	1.2	0.8	0.7	1.6	1.6	1.8	2	2.3	2.1	0.7	0.5	35
14	2.2	1.4	1.6	1.5	1.4	2.1	1	2.3	2.2	1.4	0.7	0.9	1.6	1.7	1.8	2	2.1	2	0.7	0.5	35
16	1.5	1.4	1.6	1.5	1.4	0.9	0.7	2	2	1.1	0.9	0.9	1.4	1.6	1.8	1.8	2.2	2	0.6	0.5	36
18	1.5	1.9	1.6	1.5	1.6	2	1.2	2.1	2.2	1.2	0.9	0.9	1.4	1.4	2.1	1.9	2.2	2.1	0.9	0.5	32
20	1.6	2	1.5	1.6	1.5	2.1	1.1	2.1	2.2	1.2	1	1.2	1.3	1.6	2	1.8	2.1	2	0.9	0.5	30
22	1.5	2.1	1.6	1.7	1.5	2.1	1.1	2	2.2	1.2	1.1	1.3	1.6	2.1	1.6	2.1	2.1	2	0.8	0.6	29
24	1.5	1.8	1.7	1.8	1.5	2.1	1.3	2.1	2.2	1.1	0.8	1.2	1.4	2.1	1.7	2.2	2	2.1	0.9	0.6	30
26	1.7	1.8	1.7	2	1.7	2.1	1.4	2.1	2.2	1.2	0.7	1.2	1.4	2.1	1.8	2.1	2.1	2	0.8	0.6	30
28	2.4	2.3	1.9	2.2	2.2	2.8	1.2	2.6	2.5	1.7	1.7	0.7	2	1.1	2	1.6	2.1	2.1	1	0.8	32
30	2.3	2	1.9	1.9	1.8	1.8	1.3	2.3	1.9	1.6	1.4	0.8	1.9	0.8	2.1	1.4	1.9	2	0.9	0.8	29
32	2.3	2	2	2.1	2.1	2.2	2.2	2.5	2	2	0.8	0.7	2	0.9	1.6	1.4	1.8	1.7	0.8	0.9	33

**Tabela A2-2.** Distribuição da corrente no ânodo – célula B106

<b>B106</b>	<b>Distribuição da corrente dos ânodos (V)</b>										<b>0.8&lt;ACD&lt;2.6</b>										<b>RSD</b>
<b>Ânodo</b>	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	<b>(%)</b>
<b>t (h)</b>																					
<b>2</b>	1.4	2.1	0.5	1.2	1.4	1.3	1.4	0.9	0.9	1.2	0.8	0.8	1.1	0.4	1.3	1.7	1.6	0.9	0.5	1.1	37
<b>4</b>	1.3	2.3	0.9	1.2	1.4	1.5	1.5	0.8	1	1.2	1	1.5	1	0.5	1.3	1.9	1.6	0.9	0.4	1.2	36
<b>6</b>	1.2	2	1	1.4	1.5	1.5	1.9	0.8	1.2	1.1	0.6	1.1	0.7	0.5	1.3	1.9	1.6	0.6	0.9	1.3	36
<b>8</b>	1.2	1.9	1	1.4	1.3	1.6	1.9	0.8	1.3	0.8	0.7	1	0.8	0.6	1.9	1.8	1.6	0.9	0.7	1.2	35
<b>10</b>	1.2	2	1.3	1.5	1.4	1.5	2.1	0.9	1.4	0.7	0.7	1.2	0.8	0.6	1.9	1.8	1.7	1	0.6	1.2	36
<b>12</b>	1.9	1.3	1	1.6	1.3	1.1	2	1	1.5	0.7	0.9	0.9	1.2	0.8	0.6	1.8	1.7	1.1	0.7	1.5	33
<b>14</b>	1.1	1.9	1.1	1.7	1.2	1.5	2.2	1.1	1.6	0.7	0.7	1.2	0.9	0.7	1.9	2	1.7	1.4	0.9	1.5	33
<b>16</b>	0.9	1.8	1.2	1.6	1.3	1.5	1.7	1.1	1.7	0.7	0.6	1.5	1	0.2	1.9	2	1.7	1.5	0.7	1.5	37
<b>18</b>	0.9	1.8	1.1	1.6	1.3	1.6	2	1.2	1.9	0.7	0.7	2	1.1	0.9	1.8	1.8	1.7	1.7	0.8	1.1	32
<b>20</b>	1	1.8	1.2	1.7	1.3	1.7	2.1	1.2	2.1	0.6	0.8	1.9	1	0.7	1.8	2	1.8	1.9	0.7	1.2	35
<b>22</b>	1	1.8	1.1	1.8	1.3	1.4	2	1.3	2.2	0.6	0.8	1.7	1	0.7	1.8	2	1.8	1.9	0.6	1.1	36
<b>24</b>	1	1.7	1.3	1.7	1.3	1.4	2	1.3	2.3	0.5	0.9	1.6	1	0.8	2	2	2	2	0.5	1.2	37
<b>26</b>	1.1	1.5	1.1	1.7	1.4	1.5	2	1.4	2.4	0.7	1	1.3	0.9	1.1	2	2.1	2	2.1	0.5	1.2	35
<b>28</b>	1	1.4	1.1	1.8	1.2	1.6	1.9	1.4	2.4	0.7	0.9	1.4	1	1	2	2.1	2	2	0.6	1.1	35
<b>30</b>	0.9	1.5	1.2	1.7	1.2	1.4	1.7	1.4	2.3	0.7	1	1.3	0.6	0.9	2	2	2	1.8	0.4	1.1	38
<b>32</b>	0.9	1.5	1.1	1.7	1.1	1.3	1.7	1.3	2.3	0.7	0.9	1.3	0.8	1.1	2.1	2	2	1.9	0.4	1.3	37
<b>34</b>	1	1.5	1	1.7	1.2	1.5	1.7	1.5	2.3	0.7	0.9	1.3	0.9	1.1	2.1	2.1	2	1.9	0.5	1.2	35
<b>36</b>	1.1	1.5	1.1	1.7	1.1	1.4	1.8	1.5	2.3	0.7	0.9	1.3	0.8	1.2	2.2	2	2	1.9	0.4	1.2	36
<b>38</b>	1.1	1.6	1	1.7	1.2	1.5	1.8	1.4	2.2	0.7	0.9	1.3	0.9	1.2	2.2	2	2	2	0.4	1.2	35
<b>40</b>	1.1	1.6	1.1	1.8	1.2	1.6	1.8	1.5	2.2	0.7	0.9	1.3	0.9	1.2	2.1	2.1	2	1.9	0.5	1.2	34

**Tabela A2-3. Distribuição da corrente no ânodo – célula B122**

<b>B122</b>																					
<b>Distribuição da corrente dos ânodos</b>																					
<b>Ânodo</b>	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	RSD
<b>t (h)</b>																					<b>(%)</b>
<b>2</b>	1	0.8	0.6	0.7	1.5	0.8	0.6	1.2	1.1	2	1	1.5	1	2.5	0.7	1.1	0.9	0.8	1.8	0.8	44
<b>4</b>	1	0.8	0.7	1.2	1.4	0.9	0.7	1.6	1.6	1.2	2	1	1.4	1.3	2.3	0.8	1.1	0.9	1.6	0.9	35
<b>6</b>	1	0.7	0.9	1.1	1.5	1.3	0.8	1.9	1.3	1.5	0.9	1.3	2	2.3	1	1.1	1.2	0.8	1.3	0.9	34
<b>8</b>	1	0.9	0.9	0.8	1.6	1.5	0.8	1.7	1.8	0.9	0.8	1.4	2.1	2	1.3	1.1	1.3	0.8	1.3	1.1	32
<b>10</b>	1.1	0.6	1	1	1.7	1.7	1	1.6	1.9	0.9	0.7	1.4	2.2	1.8	1.4	1.1	1.1	0.6	1.1	0.9	35
<b>12</b>	1.1	0.9	1.1	1.1	1.7	1.9	1.1	1.5	1.9	0.8	0.9	1.4	2.2	1.9	1.5	1.2	1.3	0.7	1.2	0.8	32
<b>14</b>	1	0.6	0.8	1	1.8	1.7	1.2	1.5	1.8	0.6	0.9	1.5	2.3	2	1.6	1	1.2	0.8	1.3	1	36
<b>16</b>	1.1	0.8	0.7	1.3	1.8	1.8	1.3	1.4	1.5	0.5	0.8	1.4	2.4	1.7	1.8	0.8	1.3	1	1.3	0.8	36
<b>18</b>	1.1	0.8	0.6	1	1.7	1.4	1.5	1.5	1.3	0.5	0.7	1.4	2.4	1.9	1.8	1.7	1.3	0.8	1.4	0.7	38
<b>20</b>	1.1	0.8	0.8	1	1.7	1.9	1.3	1.6	1.2	0.5	0.7	1.3	2.5	1.8	2	1.7	1.2	0.9	1.1	0.7	39
<b>22</b>	1.1	0.9	0.8	1.1	1.7	1.9	1.6	1.6	1	0.9	0.8	1.3	2.5	1.6	2.1	1.6	1.3	1	1.3	0.8	34
<b>24</b>	0.9	0.9	0.9	1.1	1.8	2	1.6	1.8	1.1	1	0.8	1.4	2.4	1.9	2.1	1.8	1.3	1	1.3	0.8	34
<b>26</b>	0.8	1	1	1.2	1.8	2	1.6	1.2	2	0.9	0.8	1.3	2.4	1.4	2	1.7	1.4	1	1.4	0.9	33
<b>28</b>	0.8	1.1	1	1.2	1.8	2	1.6	1.2	2	0.9	0.9	1.3	2.4	1.8	2	1.6	1.5	1	1.5	0.9	32
<b>30</b>	0.9	1.1	1	1.2	1.7	2	1.7	1.1	2	0.9	0.8	1.5	2.4	1.7	2	1.7	1.5	1	1.6	1	31
<b>32</b>	1	0.8	0.9	1.2	1.9	2.5	2	1.6	2.1	0.7	1.2	1.6	2.2	2	2.2	1.9	1.4	1.3	1.3	1	34
<b>34</b>	1	0.8	0.9	1.2	1.8	2.4	1.9	1.6	2.1	0.7	1.3	1.5	2.1	1.9	2.4	1.9	1.5	1.4	1.3	1	33
<b>36</b>	1	1	0.6	0.8	1.2	1.9	1.6	2.1	1.7	1.8	1.1	1.4	1.6	1.8	2	2.2	1.8	1.3	1.4	1	30
<b>38</b>	1.1	1.7	1.8	1.4	1.1	1.7	2	1.6	2	1.1	1.2	1.2	1.3	1.9	2.2	1.6	1.6	1.1	2.3	0.8	27

**A3. Early Life das células**

**Tabela A3-1. Early life da célula B053**

B053				Data da Inicialização da Célula: 02-05-24						Data da Adição de Metal: 03-05-24							
T	[AlF <sub>3</sub> ] (%)			BT (°C)			BH (cm)			[Fe]	[Si]	CVD	WRMI	AE	I	m'real	Ef
(d)	SP	Res	Dev	SP	Res	Dev	SP	Res	Dev	(ppm)	(ppm)	(μΩ)	(μΩ)	(un)	(A)	(Kg)	(%)
1	-	-	-	996	1022	26	19	18	-1	1325	2816	-	396.5	3	362457	-	-
2	3	4.1	1.1	996	999	3	19	20	1	1359	2782	-	57.33	1	362442	-	-
3	4	4.8	0.8	988	1000	12	18	19	1	1434	2375	-	40.17	0	362439	-	-
4	4	4	0	988	995	7	18	20	2	1255	2138	0.27	69	0	362441	-	-
5	4	4.6	0.6	988	990	2	18	18	0	1377	2022	-	49.5	0	363390	-	-
6	4	7	3	988	998	10	18	19	1	1395	2014	-	42.67	0	363445	4127	106
7	4	4.3	0.3	988	989	1	18	19	1	1388	1897	-	37	0	363435	3569	91.5
8	5.1	4.1	-1	983	971	-12	18	22	4	1129	1550	-	54.83	4	345962	3564	95.9
9	5.1	4.7	-0	983	980	-3	18	24	6	1187	1393	-	35.33	2	363444	-	-
10	5.1	4.5	-1	983	981	-2	18	22	4	1231	1430	-	58.83	1	363439	3813	97.7
11	6.1	8.6	2.5	979	985	6	18	17	-1	1157	1205	0.58	176.3	3	363449	4063	104
12	6.1	5	-1	979	987	8	18	17	-1	1020	1090	-	229.7	1	364412	3620	92.5
13	6.1	6.2	0.1	979	985	6	18	17	-1	995	1014	-	107.7	1	364441	-	-
14	6.1	6.4	0.3	979	982	3	18	17	-1	951	951	-	115.5	3	346262	2282	61.4
15	7.1	6.7	-0	977	983	6	17	17	0	857	882	-	142.2	1	364440	3048	77.9
16	7.1	6.2	-1	977	984	7	17	21	4	831	826	-	144.2	6	364445	2240	57.2
17	7.1	4.8	-2	977	985	8	17	19	2	813	789	-	359	2	364441	-	-
18	7.1	4.6	-3	977	982	5	17	21	4	796	708	-	134.5	1	364443	3392	86.7
19	7.6	6.6	-1	977	975	-2	17	16	-1	796	708	-	38.67	0	364447	3682	94.1
20	7.6	6.6	-1	975	984	9	17	17	0	787	689	-	116.8	1	347554	3504	93.9
21	7.6	6.6	-1	971	975	4	17	16	-1	725	640	0.47	56.17	1	364454	-	-
22	8.6	6.7	-2	971	978	7	17	17	0	696	594	-	49.33	0	364439	3586	91.6
23	8.6	7.4	-1	971	972	1	17	17	0	825	648	-	97	2	364439	3834	98
24	8.6	10	1.8	971	974	3	17	15	-2	684	537	-	52	2	364445	3899	99.6
25	8.6	7.4	-1	971	979	8	17	15	-2	647	452	0.39	43.67	0	364446	-	-
26	8.6	8.1	-1	971	966	-5	17	15	-2	639	486	-	40.83	0	364833	3586	91.5
27	10	8.1	-2	966	980	14	17	13	-4	639	486	-	39.83	0	347439	3834	103
28	10	8.3	-2	966	977	11	17	15	-2	704	529	-	32.33	0	364445	3899	99.6
29	10	8.3	-2	966	975	9	17	15	-2	704	529	-	47.17	0	364446	-	-
30	10	9.7	-0	966	980	14	17	15	-2	675	511	-	38.33	1	364833	3694	94.3
31	10	9	-1	966	975	9	17	15	-2	656	461	-	36	0	347429	3858	103
32	11	9.9	-1	965	975	10	17	16	-1	663	448	-	40	0	364961	3585	91.5
33	11	9.6	-2	965	972	7	17	14	-3	764	342	-	40.4	1	364957	-	-
34	11	10	-1	965	969	4	17	16	-1	650	438	0.42	33.67	0	364966	3120	79.6
35	11	9.4	-2	965	969	4	17	16	-1	950	438	-	33.5	0	364961	3826	97.6

*Avaliação do impacto do pré-aquecimento do cátodo no desempenho e tempo de vida útil da célula electrolítica – Caso de estudo Mozal S.A*

36	11	8.2	-3	965	972	7	17	16	-1	685	436	-	61.5	1	364967	3628	92.6
37	11	9.3	-2	965	965	0	16	19	3	713	438	-	38.33	3	364959	-	-
38	11	10	-1	965	967	2	16	17	1	795	425	-	58.83	0	364962	3194	81.5
39	11	6.4	-5	965	967	2	16	14	-2	795	425	-	47	0	365433	2123	54.1
40	11	9.7	-2	965	964	-1	16	15	-1	754	407	-	75.83	0	348036	3201	85.7
41	11	9.7	-2	965	961	-4	16	16	0	775	407	0.40	39	0	365843	-	-
42																	

Tabela A3-2. Early life da célula B106

B106		Data da Inicialização da Célula: 04-05-24									Data da Adição de Metal: 05-05-24						
t	[AlF <sub>3</sub> ] (%)			BT (°C)			BH (cm)			[Fe]	[Si]	CVD	WRMI	AE	I	m <sup>real</sup>	Ef
(d)	SP	Res	Dev	SP	Res	Dev	SP	Res	Dev	(ppm)	(ppm)	(μΩ)	(μΩ)	(un)	(A)	(Kg)	(%)
1	3	4.8	-	996	1003	7	19	21	2	-	-	-	127	1	362445	-	-
2	3	6.9	3.9	996	1015	19	19	21	2	963	2238	-	57.5	0	362442	-	-
3	3	3.3	0.3	996	1016	20	19	27	8	956	2153	-	26.67	0	363390	-	-
4	3	3.3	0.3	996	993	-3	19	25	6	1106	2185	-	53.67	0	363445	-	-
5	3	3.3	0.3	996	1003	7	19	21	2	1012	1995	-	64.5	0	363436	-	-
6	4	3	-1	988	990	2	18	17	-1	1122	1980	0.29	72.17	0	345959	3468	93.4
7	4	3.2	-0.8	988	996	8	18	24	6	1067	1697	-	66.33	2	363444	1708	43.8
8	4	3.6	-0.4	988	990	2	18	23	5	1021	1497	-	51.67	2	363440	-	-
9	4	4.5	0.5	988	999	11	18	19	1	1058	1677	-	47	5	363449	4259	109
10	5.1	5.2	0.1	983	992	9	18	17	-1	970	1396	-	192.5	2	364413	4323	110
11	5.1	4.4	-0.7	983	997	14	18	17	-1	970	1396	-	45.33	6	364442	4054	104
12	5.1	5.2	0.1	983	988	5	18	16	-2	986	1280	0.39	60.67	0	346262	-	-
13	6.1	4.8	-1.3	979	986	7	18	17	-1	908	1187	-	37	2	364441	3778	96.5
14	6.6	5	-1.6	977	980	3	17	17	0	822	966	-	40	4	364445	3641	93
15	6.6	5.1	-1.5	977	985	8	17	17	0	828	1032	-	56.17	4	364441	2740	70
16	6.6	5.1	-1.5	977	980	3	17	17	0	822	966	-	140.2	2	364444	-	-
17	6.6	5.8	-0.8	977	988	11	17	18	1	715	847	0.38	110.2	0	364447	3207	82
18	6.6	5.8	-0.8	977	972	-5	17	17	0	583	652	-	67.17	0	347555	3408	91.3
19	6.6	6.4	-0.2	977	987	10	17	15	-2	738	725	-	40.83	0	364455	1980	50.6
20	8.1	7.4	-0.7	973	987	14	17	17	0	698	719	-	39.5	0	364441	-	-
21	8.1	6.6	-1.5	973	985	12	17	19	2	629	618	-	35.33	2	364439	4097	105
22	8.1	5.7	-2.4	973	984	11	17	17	0	657	675	-	40.83	4	364446	3754	95.9
23	8.1	6.7	-1.4	973	983	10	17	15	-2	700	695	-	49	0	364447	3237	82.7
24	8.1	7.5	-0.6	973	975	2	17	16	-1	668	566	0.31	45.5	0	364834	-	-
25	9.1	7.5	-1.6	969	986	17	17	15	-2	647	553	-	47.5	0	347429	3683	98.7
26	9.1	7.9	-1.2	969	983	14	17	16	-1	598	510	-	79.33	0	364962	3898	99.5
27	9.1	7.7	-1.4	969	970	1	17	14	-3	805	528	-	65.5	1	364958	3585	91.5
28	9.1	7.7	-1.4	969	974	5	17	16	-1	688	526	-	49.33	0	364966	-	-
29	9.1	11	1.4	969	971	2	17	12	-5	726	482	-	39.83	0	364962	3514	89.7
30	11	9.1	-1.5	965	970	5	17	15	-2	644	456	-	36	0	364968	3803	97
31	11	8.7	-1.9	965	970	5	17	15	-2	644	456	-	45.67	0	364961	3134	80
32	11	8.4	-2.2	965	975	10	17	14	-3	613	413	-	36	0	364963	-	-
33	11	8.4	-2.2	965	975	10	17	16	-1	641	466	0.34	40.5	0	365434	3715	94.7
34	11	8.3	-2.3	965	968	3	17	16	-1	861	512	-	40.67	1	348045	4146	111
35	11	9.8	-0.8	965	975	10	17	17	0	861	512	-	97.83	0	365844	3065	78
36	11	11	-0.8	965	973	8	16	17	1	853	514	-	36.83	0	365965	-	-

*Avaliação do impacto do pré-aquecimento do cátodo no desempenho e tempo de vida útil da célula electrolítica – Caso de estudo Mozal S.A*

37	11	11	-0.5	965	970	5	16	16	0	917	479	-	39.17	0	365972	3747	95.4
38	11	12	0.2	965	974	9	16	15	-1	1152	486	-	61	0	348511	4159	111
39	11	12	0.2	965	970	5	16	16	0	1066	482	-	95.33	0	365970	4335	110
40	11	10	-1.1	965	974	9	16	14	-2	1017	458	-	45.67	0	365974	-	-
41	11	13	1.8	965	953	-12	16	16	0	917	421	0.37	60.33	0	358700	3756	97.5
42	11	13	1.8	965	960	-5	16	16	0	907	433	-	53	0	366374	3969	101
43	11	13	1.8	965	959	-6	16	15	-1	907	433	-	76.5	0	366476	2556	65
44	11	13	1.8	965	959	-6	16	15	-1	919	430	-	48.33	0	366473	-	-
45	11	9.9	-1.4	965	970	5	16	15	-1	780	402	-	43.67	0	366474	3783	96.1

**Tabela A3-3. Early life da célula B122**

B122			Data da Inicialização da Célula: 08-05-24								Data da Adição de Metal: 09-05-24						
t	[AlF <sub>3</sub> ] (%)			BT (°C)			BH (cm)			[Fe]	[Si]	CVD	WRMI	AE	I	m'real	Ef
(d)	SP	Res	Dev	SP	Res	Dev	SP	Res	Dev	(ppm)	(ppm)	(μΩ)	(μΩ)	(un)	(A)	(Kg)	(%)
1	-	-	-	990	992	2	18	22	4	-	-	-	1104	0	363428	-	-
2	3.5	2.9	-0.6	990	999	9	18	23	5	-	-	-	339.3	1	345960	-	-
3	3.5	3.1	-0.4	990	985	-5	18	23	5	1092	2423	-	114.5	2	363445	-	-
4	3.5	3.3	-0.2	990	1002	12	18	19	1	1046	2084	-	238.7	1	363440	-	-
5	3.5	4.2	0.7	990	1005	15	18	19	1	1012	2013	-	222.7	0	363449	0	0
6	4.5	3.9	-0.6	986	999	13	18	20	2	1133	2014	0.66	156.5	2	364413	-	-
7	4.5	4.1	-0.4	986	1004	18	18	20	2	963	1812	-	135.2	1	364442	0	0
8	4.5	4.6	0.1	986	989	3	18	18	0	1006	1671	0.66	145.7	3	346262	4984	134
9	5.6	3.7	-1.9	981	992	11	18	23	5	910	1583	-	186.8	3	364442	3925	100
10	6.1	3.8	-2.3	979	989	10	18	20	2	1012	1411	-	222.3	0	364446	-	-
11	6.1	5.2	-0.9	979	990	11	18	19	1	784	1296	-	119.8	0	364441	3925	100
12	6.6	5.3	-1.3	977	991	14	17	20	3	853	1247	-	135.8	3	364444	3418	87.3
13	6.6	5.5	-1.1	977	985	8	17	19	2	859	1307	-	327.7	0	364447	0	0
14	6.6	5.5	-1.1	977	981	4	17	17	0	870	1272	-	184.2	0	347559	-	-
15	6.6	5.2	-1.4	977	993	16	17	16	-1	852	1148	0.63	132.3	0	364454	3456	88.3
16	6.6	5.2	-1.4	977	993	16	17	16	-1	852	1057	-	324	0	364441	4729	121
17	6.6	4.9	-1.7	977	1007	30	17	15	-2	908	1163	-	178.5	0	364439	4858	124
18	7.1	5	-2.1	977	995	18	17	15	-2	946	1153	-	130.8	0	364445	-	-
19	7.1	7.4	0.3	977	979	2	17	15	-2	860	1034	-	134.2	0	364445	3092	79
20	7.1	4.9	-2.2	977	994	17	17	16	-1	809	922	-	124.5	0	364833	4854	124
21	8.6	5.2	-3.4	971	991	20	17	14	-3	767	909	-	125.5	0	347432	4763	128
22	8.6	5.2	-3.4	971	967	-4	17	17	0	836	940	-	241.1	2	364961	-	-
23	8.6	9.4	0.8	971	975	4	17	15	-2	832	897	-	107.7	0	364958	4371	112
24	8.6	9.8	1.2	971	975	4	17	15	-2	776	833	-	73	0	364966	4344	111
25	8.6	9.3	0.7	971	967	-4	17	14	-3	787	764	-	136.8	0	364962	3654	93.2
26	8.6	8.3	-0.3	971	975	4	17	16	-1	768	748	-	71.83	0	364968	-	-
27	9.6	12	2.4	967	975	8	17	12	-5	805	730	-	73.5	0	364961	3942	101
28	9.6	14	4.1	967	979	12	17	10	-7	777	686	0.54	51.5	0	364963	3765	96.1
29	9.6	13	3.2	967	969	2	17	15	-2	769	700	-	67.67	0	365434	3674	93.6
30	9.6	9.5	-0.1	967	953	-14	17	16	-1	750	641	-	69.17	0	348047	-	-
31	9.6	11	1.4	967	948	-19	17	14	-3	796	633	-	83	0	365844	4457	113
32	11	12	1.1	965	957	-8	17	12	-5	782	600	-	63.67	0	365965	4055	103
33	11	8.5	-2.1	965	962	-3	17	10	-7	728	550	-	36.83	0	365972	4054	103
34	11	9.6	-1	965	975	10	17	17	0	728	550	-	74.84	0	348514	-	-
35	11	8	-3.3	965	975	10	16	16	0	738	546	-	66	0	365970	3141	79.9
36	11	11	0.1	965	960	-5	16	14	-2	732	528	0.47	84.83	0	365974	3478	88.5

*Avaliação do impacto do pré-aquecimento do cátodo no desempenho e tempo de vida útil da célula electrolítica – Caso de estudo Mozal S.A*

37	11	8.4	-2.9	965	960	-5	16	15	-1	732	528	-	56.5	0	358701	3854	100
38	11	9	-2.3	965	953	-12	16	15	-1	592	454	-	73.5	0	366374	-	-
39	11	8.4	-2.9	965	967	2	16	18	2	727	504	-	47	0	366476	1836	46.7
40	11	10	-1	965	962	-3	16	18	2	769	493	-	54.33	0	366473	3117	79.2
41	11	10	-1	965	960	-5	16	17	1	769	493	-	54.17	0	366474	3164	80.4
42	11	10	-1	965	960	-5	16	18	2	977	444	-	113	3	349110	-	-
43	11	10	-1	965	964	-1	16	15	-1	973	476	-	71.5	3	366966	2140	54.3
44	11	13	2.1	965	964	-1	16	15	-1	648	429	0.48	86.33	1	366969	3811	96.7
45			0			0			0			-	92.17		366981	3353	85.1