



**NICOLE OLIVEIRA VIDAL CAMPOS SILVA**

**ESTUDO DA INCIDÊNCIA DE EVENTOS DE  
SUPERSATURAÇÃO DE ALUMINA EM CUBAS  
ELETROLÍTICAS DE PRODUÇÃO DE ALUMÍNIO**

**LAVRAS – MG  
2020**

**NICOLE OLIVEIRA VIDAL CAMPOS SILVA**

**ESTUDO DA INCIDÊNCIA DE EVENTOS DE SUPERSATURAÇÃO DE ALUMINA  
EM CUBAS ELETROLÍTICAS DE PRODUÇÃO DE ALUMÍNIO**

Monografia apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Engenharia Química, para a obtenção do título de Bacharel.

Prof. Dr. Irineu Petri Júnior  
Orientador

Me. Diego Cota Marinho  
Coorientador

**LAVRAS – MG  
2020**

**Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca  
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Silva, Nicole Oliveira Vidal Campos.

Estudo da incidência de eventos de supersaturação de alumina  
em cubas eletrolíticas de produção de alumínio/Nicole Oliveira  
Vidal Campos Silva. - 2020.

39 p. : il.

Orientador(a): Irineu Petri Júnior.

Coorientador(a): Diego Cota Marinho.

Monografia (graduação) - Universidade Federal de Lavras,  
2020.

Bibliografia.

1. cubas eletrolíticas. 2. supersaturada. 3. derivada da  
resistência. I. Júnior, Irineu Petri. II. Marinho, Diego Cota. III.  
Título.

**NICOLE OLIVEIRA VIDAL CAMPOS SILVA**

**ESTUDO DA INCIDÊNCIA DE EVENTOS DE SUPERSATURAÇÃO DE ALUMINA  
EM CUBAS ELETROLÍTICAS DE PRODUÇÃO DE ALUMÍNIO  
*STUDY OF THE INCIDENCE OF ALUMINA SUPERSATURATION EVENTS IN  
ELECTROLYTIC CELLS OF ALUMINIUM PRODUCTION***

Monografia apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Engenharia Química, para a obtenção do título de Bacharel.

APROVADO em 18 de dezembro de 2020.

---

Prof. Dra. Suellen Mendonça Nascimento  
DEG/UFLA

---

Prof. Dr. Gilson Campani Junior  
DEG/UFLA

---

Me. Diego Cota Marinho  
CBA

---

Prof. Dr. Irineu Petri Júnior  
DEG/UFLA

**LAVRAS – MG  
2020**

*À todas as mulheres que trabalham na indústria e que um dia se sentiram incapazes. Sejam a inspiração de alguém um dia e, assim, sempre teremos umas às outras!*

## AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer a Deus primeiramente por ser meu companheiro de jornada, parceiro incansável e por me acompanhar em todas as horas.

À minha mãe, Jacqueline, e minha eterna avó, Solange, que são minhas inspirações e combustível para os meus sonhos, obrigada por terem feito de tudo por mim! Ao meu tio e padrinho, Deivson, que esteve sempre comigo me apoiando, acreditando e investindo no meu potencial. Ao meu pai, Benhur, minha segunda mãe, Eliane e meus amados irmãos, Davi e Duany, por serem minha motivação em busca de ser uma profissional de sucesso. E à toda minha família, por serem minha base de apoio para os momentos de queda e trampolim para os saltos.

Ao meu eterno companheiro Marcos, que esteve ao meu lado ao longo desses últimos anos da graduação e que me segurou e amparou nos momentos que mais precisei. E à minha sogra Érika, que me acolheu como filha em Lavras e foi fundamental nesses últimos anos.

Aos meus amigos fiéis Lidiane, Daniel, Cristiano, Lia e a todos os Abacaxi Friends, que foram meus companheiros de graduação para todas as horas. Aos meus companheiros de curso da engenharia química que estiveram comigo na busca pelo aprendizado e nas incansáveis horas de estudo.

Aos meus professores ao longo da vida, desde o maternal, que me ensinaram a ter sede de conhecimento. Em especial, aos professores do corpo docente da engenharia química que estiveram junto conosco desde o início do curso. Ao Professor Irineu, que me acolheu de braços abertos e se disponibilizou a me orientar em um tema tão específico e me auxiliou nesse momento crucial da minha vida. O meu muito obrigada!

À Universidade Federal de Lavras, que foi minha casa e minha escola da vida por todos esses anos. Por ter me acolhido e ter me desenvolvido enquanto ser humano e profissional. E ao Brejão, por ser meu lar e abrigo no momento mais difícil da minha vida e a todos os companheiros que ele me proporcionou. À todas as formações que o apartamento 102 já teve e a tudo que eu vivi e aprendi ali.

À ProcEQ Jr. e ao Movimento Empresa Júnior que me desenvolveram enquanto profissional, ensinaram a ser inconformada e a lutar em busca de um Brasil melhor. À Associação Atlética Acadêmica das Engenharias da UFLA – Xarada e à primeira equipe de *cheerleading* da UFLA, a Máfia X, que me introduziram no esporte e me ajudaram a me superar a cada dia, obrigada pelas inúmeras conquistas juntos e aos amigos proporcionados.

À Companhia Brasileira de Alumínio que me proporcionou a realização desse trabalho, me fornecendo todos os recursos necessários.

Ao meu querido supervisor Cleverson Mota, parceiro e amigo para todas as horas, por toda disponibilidade em ensinar, por todos os *feedbacks*, por acreditar no meu potencial e por ser minha inspiração enquanto líder.

Ao meu gestor e mestre Marco Aurélio, pelas conversas sobre desenvolvimento profissional e gestão de pessoas, por contribuir tanto para o meu desenvolvimento profissional, acreditar no meu potencial e ter passado tanto conhecimento. Obrigada por ser tão incrível e brilhante!

Ao Diego, por ser fonte de inspiração, me coorientar, me auxiliar nessa jornada pelo conhecimento e a visualizar o mundo da indústria pela lente acadêmica.

À toda a equipe de produção, supervisores, técnicos e operadores, por terem me auxiliado, se disponibilizarem a mudar a rotina de atividades e compartilhado todo o conhecimento. Em especial, agradeço ao Cássio e Jair por me acompanharem nas incansáveis rotinas de amostragem e ao supervisor Gleisson por todas as reflexões sobre desenvolvimento profissional, gestão de pessoas e carreira.

À equipe do Laboratório de análises químicas, em especial ao técnico Ednilson, que me passou todo o conhecimento e se colocou à disposição sempre que necessário.

À toda a equipe de Engenharia de Processo e Automação, em especial Bruno e Daniel por me auxiliarem e me instruírem nos testes realizados. E ao Carlos Eduardo por todos os conhecimentos passados.

A todos os meus colegas estagiários que estiveram comigo na busca pelo desenvolvimento e pelo conhecimento. Em especial, Natan, Felipe, Júlia e Luana por serem amigos e tão presentes sempre me ouvindo e me auxiliando.

Ao José Limeira e Francisco por serem sempre tão solícitos e me salvarem com todo o apoio e descontração nos momentos de agonia. Obrigada por terem me acolhido como família! Serei eternamente grata.

Na CBA eu aprendi a trabalhar com humildade, a tratar as pessoas de forma única, a ter uma equipe que se possa chamar de família, a ser uma profissional de excelência e que preza pela segurança da equipe acima de tudo! Agora é hora de me desenvolver ainda mais e alcançar voos ainda maiores!

*“Afinal, sonhar grande e sonhar pequeno dá o mesmo trabalho”*

*Jorge Paulo Lemann*

## RESUMO

A produção do alumínio primário ocorre por meio de um processo eletrolítico em cubas que são periodicamente alimentadas de alumina. No caso das cubas com alimentação lateral em batelada, manter a estabilidade do processo é um grande desafio devido às diversas variáveis do processo e atividades operacionais envolvidas. Alguns dos grandes problemas envolvidos no processo são os eventos de supersaturação de alumina no banho eletrolítico, que favorecem a formação de alumina cristalizada no fundo da cuba e o desvio de corrente elétrica, o que ocasiona uma perda de eficiência do processo e diversos transtornos operacionais. Para resolver isso, se faz necessário um eficiente sistema de controle do processo para prever, em tempo real, o comportamento do teor de alumina no eletrólito e possibilitar as tratativas de forma mais assertiva. No presente trabalho, foram coletadas amostras de banho eletrolítico ao longo dos intervalos de alimentação de algumas cubas com diferentes idades e foram comparados os valores de teor de alumina e os dados de variação da resistência a passagem de corrente no eletrólito. Os resultados mostraram que o comportamento das curvas de teor de alumina e variação temporal da resistência elétrica das cubas supersaturadas são mais estáveis ao longo das alimentações, enquanto as cubas com operação normal apresentam maiores variações de consumo e elevação do teor de alumina, o que é mais positivo para o processo. Além disso, as cubas com idade mais avançada apresentaram melhor desempenho de reação aos eventos de supersaturação em comparação com as cubas mais novas. Os teores de alumina médios para as cubas mais novas, com operação normal e supersaturada foram  $3,79 \pm 0,58\%$  e  $4,43 \pm 0,40\%$ , respectivamente, e os valores de derivada histórica da resistência foram de  $0,13 \pm 0,79 \mu\Omega/s$  e  $0,33 \pm 0,37 \mu\Omega/s$ , respectivamente. Já nas cubas com idade mais avançada o teor de alumina com operação normal foi de  $3,91 \pm 0,41\%$  e supersaturada de  $3,85 \pm 0,32\%$ , já os valores de derivada histórica da resistência foram de  $0,16 \pm 0,18 \mu\Omega/s$  e  $-0,12 \pm 0,14 \mu\Omega/s$ , respectivamente. A análise dos valores médios não é a melhor maneira de avaliar esses eventos, já que não houve diferença estatisticamente significativa entre as médias; sendo mais coerente avaliar o comportamento e tendência das curvas. Através dessa análise foi possível notar que o comportamento mais estável da curva do teor de alumina e da variação temporal da resistência das cubas supersaturadas é decorrente dos fenômenos de reoxidação do alumínio e retroalimentação da alumina no eletrólito. Nas cubas de faixa etária mais avançada esses fenômenos são atenuados devido a uma capacidade de recuperação maior aos eventos de supersaturação atrelados à espessura da camada de eletrólito solidificado na sua cavidade.

**Palavras-chave:** cubas eletrolíticas, alumina, supersaturação, derivada da resistência, alumínio primário.

## ABSTRACT

*The primary aluminum production takes place through an electrolytic process in cells that are periodically fed with alumina. In the case of batch cells with side feeding, maintaining the stability of the process is the biggest challenge given the different variables of the process and the operational activities involved. Some of the major problems involved in the process are the events of alumina supersaturation in the electrolytic bath, which favor the formation of crystallized alumina at the bottom of the cell and the diversion of electric current, which causes a loss of process efficiency and several operational disorders. To solve this, an efficient process control system is necessary to predict in real time the behavior of the alumina content in the electrolyte and to make the treatments more assertive. In the present work, samples of electrolytic bath were taken along the feeding intervals of some cells with different ages and the values of alumina content were compared with the resistance to the passage of current in the electrolyte. The results showed that the behavior of the alumina curves and slope from the resistance of the supersaturated cells are more stagnant throughout the feeds, while the cells with normal operation show greater variations in consumption and increased alumina content, which is more positive for the process. In addition, cells with older age showed better performance in reaction to supersaturation events compared to newer cells. The average alumina contents for the newer cells, with normal and supersaturated operation, were  $3.79 \pm 0.58\%$  and  $4.43 \pm 0.40\%$  and the values of the historical resistance slope were  $0.13 \pm 0.79 \mu\Omega/s$  and  $0.33 \pm 0.37 \mu\Omega/s$ , respectively. In the older cells, the alumina content with normal operation was  $3.91 \pm 0.41\%$  and in the supersaturated  $3.85 \pm 0.32\%$ , the values of the historical resistance slope were  $0.16 \pm 0.18 \mu\Omega/s$  and  $-0.12 \pm 0.14 \mu\Omega/s$ , respectively. These average values show that they were not the best way to evaluate these events, since there was no statistically significant difference between the means; being more coherent to evaluate the behavior and trend of the curves. Through this analysis it was possible to notice that the more stable behavior of the alumina content curve and the temporal variation of the resistance of the supersaturated vats is due to the phenomena of aluminum reoxidation and alumina feedback in the electrolyte. In the older cells, these phenomena are attenuated due to a greater recovery capacity to supersaturation events linked to the thickness of the solidified electrolyte layer in its cavity.*

**Keywords:** *electrolytic cells, alumina, supersaturation, slope of resistance, primary aluminum*

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquema processo produtivo do alumínio. ....	4
Figura 2 – Amostras de minério de bauxita e óxido de alumínio.....	5
Figura 4 – Esquema de uma cuba Soderberg. ....	6
Figura 5 – Linha de redução eletrolítica da Votorantim CBA (Sala Fornos 5).....	7
Figura 6 – Quebra da crosta da cuba eletrolítica pelo “Rodão”. ....	9
Figura 7 – Alimentação da cuba eletrolítica pelo “Gemback”. ....	10
Figura 8 – Esquema didático da distância entre anodo e catodo da cuba.....	11
Figura 9 – Catodo com deformações na superfície devido à formação de “lama” e “cascão”. 14	
Figura 10 – Relação da derivada da resistência ( <i>slope</i> ) e teor de alumina.....	16
Figura 11 – Pinça de amostragem. ....	19
Figura 12 – Aquecimento da pinça de amostragem. ....	19
Figura 13 – Lubrificação da pinça de amostragem.....	20
Figura 14 – Coleta da amostra de banho eletrolítico.....	20
Figura 15 – Análise de contaminação da amostra. ....	20
Figura 16 – (a) Bandeja de amostras e (b) amostras etiquetadas.....	21
Figura 17 – Britador utilizado na preparação das amostras.....	21
Figura 18 – Amostra preparada para análise. ....	21
Figura 19 – Difratômetro de raios X (Cubix).....	22
Figura 20 – Interface do sistema de controle SCORE com sinalização de Efeito Anódico....	22
Figura 21 – Sinalização do evento de Derivada Baixa no SCORE. ....	24
Figura 22 – Teor de alumina ao longo do intervalo de amostragem para as cubas mais novas. .....	25
Figura 23 – Teor de alumina ao longo do intervalo de amostragem para as cubas mais velhas. .....	26
Figura 24 – Esquema didático da cuba eletrolítica ocorrendo retroalimentação e reoxidação.28	
Figura 25 – Catodo de uma cuba nova e esquema didático do catodo de uma cuba velha. ....	29
Figura 26 – Teor de alumina e $R_{SDH}$ para a cuba 1167 (operação normal). ....	31
Figura 27 – Teor de alumina e $R_{SDH}$ para a cuba 1168 (supersaturada).....	32
Figura 28 – Teor de alumina e $R_{SDH}$ para a cuba 1169 (operação normal). ....	32
Figura 29 – Teor de alumina e $R_{SDH}$ para a cuba 1272 (supersaturada). ....	33

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros operacionais das cubas selecionadas. ....	18
Tabela 2 – Quantidade de amostras retiradas de acordo com o tempo de alimentação. ....	18
Tabela 3 – Quantidades de alumina alimentadas em cada cuba. ....	25
Tabela 4 – Médias de teor de alumina ao longo da amostragem para cada cuba. ....	30
Tabela 5 – Médias da derivada histórica da resistência ao longo da amostragem para cada cuba. ....	31

## LISTA DE SÍMBOLOS

*ACD* – *Anode cathode distance*

EA – Efeito Anódico

DB – Derivada Baixa

$R_A$  - Resistência Alvo

$R_{CCB}$  - Resistência de Ciclo de Controle Bruta

*Rerro* – Resistência Erro

$R_{SD}$  – Derivada Instantânea da Resistência

$R_{SDH}$  – Derivada Histórica da Resistência

$V_D$  – Velocidade de dissolução

$V_S$  - Velocidade de sedimentação

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	1
2	REFERENCIAL TEÓRICO .....	4
2.1	Processo de produção do alumínio primário.....	4
2.2	Estrutura e funcionamento da cuba eletrolítica.....	6
2.3	Composição do banho eletrolítico .....	7
2.4	Sistema de alimentação das cubas eletrolíticas.....	8
2.5	Distância anodo catodo (ACD).....	10
2.6	Sistema de controle e automação .....	11
2.6.1	Funcionamento do algoritmo de controle.....	12
2.6.2	Cálculo da derivada da resistência.....	12
2.6.2.1	Efeito anódico .....	12
2.6.2.2	Derivada baixa.....	13
2.7	Alumina não dissolvida .....	13
2.8	Teor de alumina em função da variação da resistência elétrica.....	15
3	METODOLOGIA .....	17
3.1	Condições operacionais das cubas da CBA .....	17
3.2	Coleta das amostras de banho eletrolítico.....	17
3.3	Preparação e análise das amostras de banho eletrolítico .....	21
3.4	Monitoramento do sistema de controle.....	22
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	25
4.1	Variação do teor de alumina .....	25
4.2	Variação da Derivada Histórica da Resistência ( $R_{SDH}$ ) com o teor de alumina.....	31
5	CONCLUSÕES.....	35
5.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	36
	REFERÊNCIAS .....	38

# 1 INTRODUÇÃO

O alumínio compõe cerca de 8,3% da crosta terrestre, sendo ultrapassado apenas pelo oxigênio e pelo silício (MOURA, 2001). Por ser um material versátil, o alumínio vem substituindo outros metais nas indústrias de materiais de transporte, embalagens e na construção civil. Suas características justificam seu amplo uso doméstico, comercial e industrial, principalmente por possuir propriedades de condutibilidade, resistência à corrosão, impermeabilidade, leveza, resistência mecânica, aparência agradável em diferentes aplicações, moldabilidade e, a característica mais importante como diferencial, reciclabilidade. Essa última o diferencia dos outros metais, já que os produtos de alumínio podem ser reciclados infinitamente sem perder suas qualidades (CASTRO, 2011).

O alumínio não é encontrado em estado metálico na natureza, sua obtenção vem por meio da mineração de bauxita (ABAL, 2020). A bauxita é um minério de coloração avermelhada que, após passar pela refinaria, onde ocorre o processo Bayer, se transforma em óxido de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), a alumina (CASTRO, 2011). Segundo dados da USGS (*United States Geological Survey*), a reserva brasileira de bauxita é a 4ª maior no mundo, chegando a aproximadamente 2,6 bilhões de toneladas (USGS, 2020).

A alumina obtida pela bauxita é transformada em alumínio metálico por meio do processo Hall-Héroult. Esse processo consiste em produzir alumínio a partir da passagem de corrente elétrica em um eletrólito formado por, majoritariamente, criolita fundida ( $\text{Na}_3\text{AlF}_6$ ) e alumina dissolvida. Por meio dessa técnica o processo pode ser realizado a temperatura em torno de  $1000^\circ\text{C}$ , mediante a passagem de corrente elétrica por um banho de sais fundidos, tendo a criolita como eletrólito responsável por promover a dissociação iônica da alumina. Esse processo ocorre dentro de células eletrolíticas, denominadas cubas, no fundo das quais o alumínio é depositado. A corrente elétrica transita do anodo para o catodo da célula. Este processo é utilizado até os dias de hoje pelas indústrias produtoras de alumínio, por ser o mais economicamente viável (SILVA, 2012).

Mesmo sendo o processo mais economicamente viável, a técnica de Hall-Héroult vem sendo estudada por pesquisadores de vários países, devido à alta complexidade de obtenção do alumínio metálico e ao alto custo financeiro causado principalmente pela grande demanda de energia elétrica, indispensável para a realização da eletrólise. Nas últimas duas décadas, diversos estudos foram feitos com o intuito de diminuir cada vez mais o consumo de energia, por meio do aperfeiçoamento da qualidade física e química da alumina e do eletrólito. Entretanto, os maiores progressos foram no setor da tecnologia operacional, como na

alimentação automática de alumina e no controle do processo pelo computador. Dessa maneira, as cubas eletrolíticas ficariam mais simples de serem monitoradas e operacionalmente mais estáveis. A estabilidade não é uma tarefa simples de se alcançar, os principais parâmetros, como porcentagem de alumina no eletrólito, resistência elétrica da cuba, temperatura e composição do eletrólito, devem estar em constante monitoramento, tanto pelo time operacional quanto pelo computador (MOURA, 2001).

Para garantir uma boa eficiência das cubas, é necessário que a maior parte da alumina dissolvida no eletrólito seja transformada, por meio da passagem de corrente elétrica, em alumínio metálico. Dessa maneira, se faz necessário um rigoroso controle de alimentação dessas cubas. Para fazer esse controle de adição de alumina é utilizado um sistema de controle de resistência a passagem de corrente elétrica automatizado e, mediante fornecimento de dados de corrente e voltagem ao processo, são determinados, em pequenos intervalos de tempo, valores de resistência à passagem de corrente elétrica nesse eletrólito. Com base nas variações temporais de resistência apresentadas em cada cuba, ocorrem as sinalizações dos momentos de adição de alumina ou de supersaturação e, por consequência, corte de adição.

Um dos fatores que mais impactam no processo é a manutenção da concentração de alumina dentro dos limites de solubilidade, já que supersaturando o eletrólito, essa alumina em excesso deposita-se no fundo da cuba e ocorre a formação de “lama” (alumina precipitada) e “cascão” (alumina cristalizada no fundo da cuba) (MARINHO, 2019). Com a formação desses dois fenômenos, há um aumento da resistência à passagem de corrente elétrica e perda de produtividade e eficiência energética, já que vão sendo formadas camadas de alumina no fundo dessas células eletrolíticas que, conseqüentemente, deformam a superfície do catodo e aumentam os desvios de corrente elétrica (SILVA, 1997).

Além disso, a alumina precipitada no fundo das cubas não é transformada em alumínio, visto que ela não está dissolvida no eletrólito. Portanto, parte da corrente que circula nessas cubas é desperdiçada, o que ocasiona perda de eficiência do processo. Conseqüentemente, a alta incidência desses eventos de supersaturação ocasiona gasto energético e custo desnecessários.

Assim, se faz importante entender como o teor de alumina varia dentro das cubas ao longo do tempo e como esse comportamento se relaciona com a resistência a passagem de corrente no eletrólito. Alguns trabalhos, como o de Marinho (2019) e Moura (2001), abordam a variação de teor de alumina ao longo do tempo em cubas eletrolíticas, porém o diferencial deste trabalho é o estudo dessa variação relacionando-a com a resistência elétrica.

Dessa forma, o objetivo geral desse trabalho é estudar os eventos de supersaturação de alumina em cubas eletrolíticas produtoras de alumínio, dada a importância de minimizar a incidência desses eventos e as consequências que eles podem gerar no processo.

Sendo assim, para atender ao objetivo geral, foram determinados os seguintes objetivos específicos:

- a) Realizar amostragens do eletrólito e analisar o teor de alumina em cubas que apresentam eventos de supersaturação de alumina e em cubas que não apresentam esse problema;
- b) Analisar o comportamento do teor de alumina nessas cubas no intervalo de alimentação;
- c) Comparar o comportamento da curva do teor de alumina frente ao comportamento da curva da variação da resistência do eletrólito.

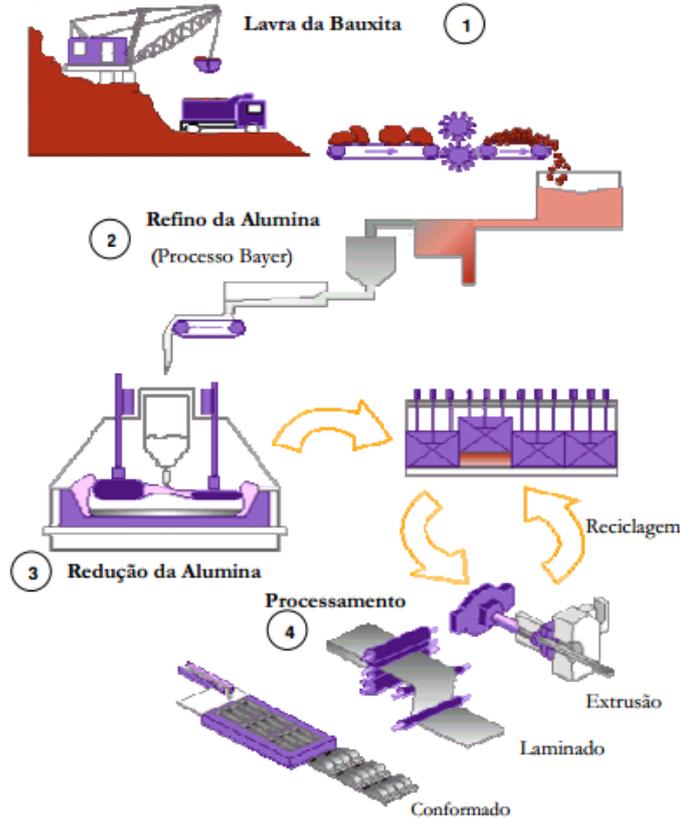
## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

Nesta seção são apresentados uma visão geral do processo produtivo do alumínio, mais especificamente do processo de Hall-Héroult, a estrutura e funcionamento de uma cuba eletrolítica, uma abordagem mais profunda de alguns parâmetros do processo e do sistema de controle e alguns trabalhos correlatos da literatura.

### 2.1 Processo de produção do alumínio primário

O processo de produção do alumínio primário começa na lavra da bauxita, passa pela refinaria, onde é produzido o óxido de alumínio pelo processo Bayer, em seguida segue para as cubas eletrolíticas, onde o óxido de alumínio é reduzido em alumínio metálico. Posteriormente, o alumínio líquido segue para a fundição onde é beneficiado em ligas e pode ser transformado em tarugos, placas, lingotes, etc. Além disso, esses produtos podem seguir para a transformação plástica, onde podem ser ainda mais processados e transformados em perfis extrudados, folhas e chapas, por exemplo. Ainda existe o alumínio secundário, que é produzido a partir de alumínio reciclado (ABAL, 2020). O fluxo produtivo mencionado anteriormente é ilustrado na Figura 1.

Figura 1 – Esquema processo produtivo do alumínio.



Fonte: Qualitecr (2020).

A matéria prima do alumínio é o óxido de alumínio, cuja coloração é esbranquiçada e é originado de um minério avermelhado chamado bauxita, como mostra a Figura 2 (ABAL, 2020).

Figura 2 – Amostras de minério de bauxita e óxido de alumínio.



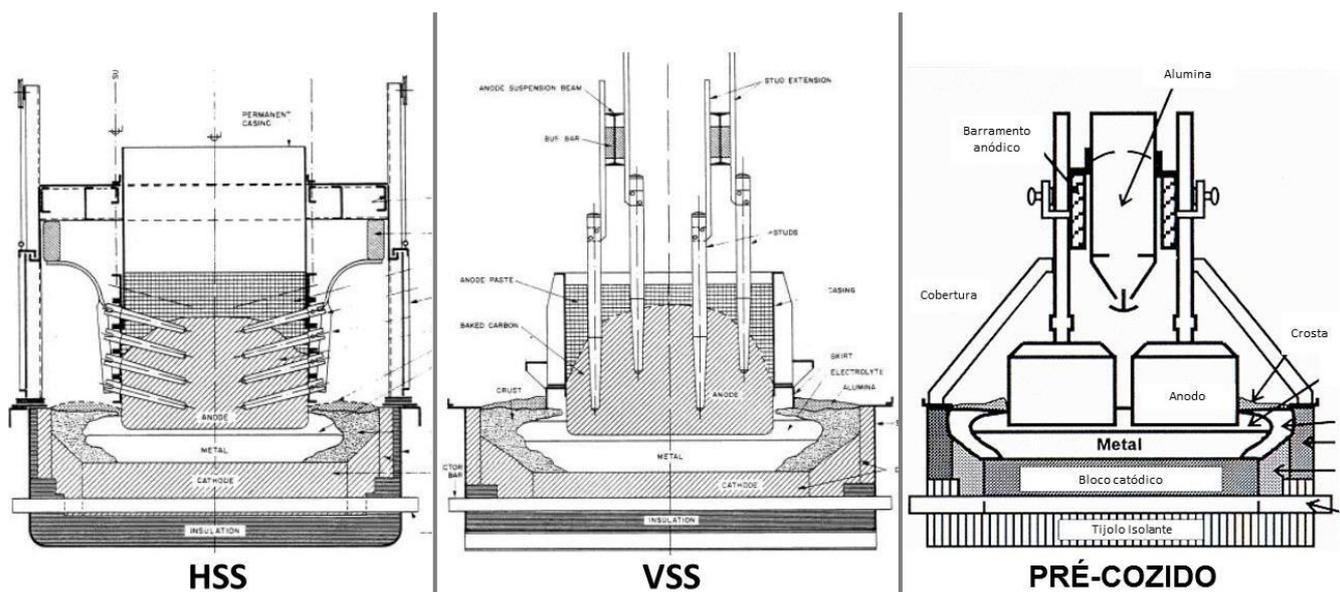
Fonte: CBA (2020).

Por meio da técnica de Hall-Héroult é realizada a redução do óxido de alumínio em alumínio metálico em cubas eletrolíticas, por meio da reação química mostrada na Equação 1.



Existem três tipos de células eletrolíticas de produção de alumínio primário: Soderberg de pinos horizontais (HSS - *Horizontal Soderberg Stud*), Soderberg de pinos verticais (VSS - *Vertical Soderberg Stud*) e anodos pré-cozidos com alimentadores pontuais (*pre-baked point feeder*), como mostra a Figura 3. As duas primeiras são mais antigas e a última a mais moderna, cujo diferencial são sistemas de controle automatizados de alimentação que garantem melhores indicadores operacionais e ambientais (MARINHO, 2019). Nesse trabalho será abordado um estudo nas cubas com tecnologia VSS, que possuem alimentação distribuída em suas laterais em batelada. Sua estrutura e funcionamento serão abordados a seguir.

Figura 3 – Tipos de cubas eletrolíticas de produção de alumínio primário

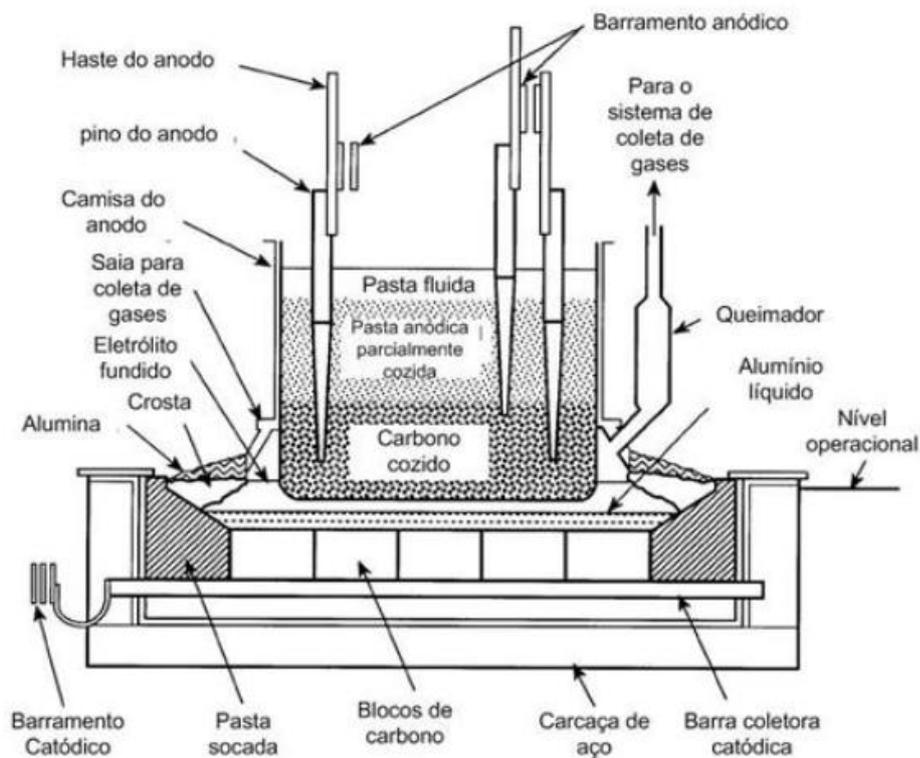


Fonte: Marinho (2019).

## 2.2 Estrutura e funcionamento da cuba eletrolítica

A cuba eletrolítica é composta por alguns componentes como mostra o esquema da Figura 4. Basicamente ela funciona pela passagem de corrente elétrica que chega pelo anodo, por meio dos barramentos anódicos, passa pelo anodo e eletrólito e chega no catodo sendo coletada pelos barramentos catódicos.

Figura 4 – Esquema de uma cuba Soderberg.



Fonte: Marquitti (2014).

O anodo é um bloco de carbono sustentado por pinos ligados ao barramento anódico; esse bloco é formado por pasta anódica, que contém em sua composição coque de petróleo e piche. O bloco é cozido na própria cuba ao longo do seu funcionamento e fica em parte imerso no eletrólito, que é chamado de banho eletrolítico. O carbono presente nesse anodo é consumido e transformado em  $\text{CO}_2$  (MARINHO, 2019). Já o catodo é formado por blocos de revestimento feitos também de carbono que são sustentados por uma carcaça de aço; os mesmos são responsáveis por conduzir corrente elétrica e servir como armazenamento do banho eletrolítico e do metal produzido (MARQUITTI, 2014).

A reação eletrolítica ocorre com o fornecimento de energia elétrica que proporciona a passagem de elétrons pelo sistema. Dessa forma, primeiro a alumina sofre a dissociação no

banho eletrolítico como mostra a Equação 2, depois os íons de oxigênio doam seus elétrons e se oxidam a oxigênio molecular como acontece na Equação 3, estes se ligam às moléculas de carbono do anodo, formando  $\text{CO}_2$  como explicita a Equação 4. Já os íons de alumínio livre são reduzidos a alumínio metálico através do recebimento de elétrons como representado pela Equação 5 (MARQUITTI, 2014).



Em uma linha industrial, essas cubas são colocadas lado a lado formando um circuito em série ligado a uma fonte de energia elétrica que atua fornecendo corrente contínua para a eletrólise, como mostra a Figura 5. Essa corrente, dependendo da linha, atinge valores em torno de 130 kA (SILVA, 1997). Para cada quilograma de alumínio produzido são necessários cerca de 1,9 kg de alumina, 0,5 kg de carbono proveniente do anodo e um consumo de energia de 14-17 kWh (ZANGIACOMI, 2006). Para garantir a estabilidade desse processo é fundamental manter o equilíbrio da composição do eletrólito.

Figura 5 – Linha de redução eletrolítica da Votorantim CBA (Sala Fornos 5)



Fonte: Do autor (2020).

### 2.3 Composição do banho eletrolítico

Como proposto pela técnica de Hall-Heroult, o principal componente do eletrólito de sais fundidos é a criolita ou também chamada de hexafluoraluminato de sódio ( $\text{Na}_3\text{AlF}_6$ ). A criolita tem como finalidade a dissolução da alumina, a condução de corrente elétrica e a redução da temperatura de operação (MOURA, 2001).

Para melhorar algumas propriedades físico-químicas desse eletrólito, podem ser adicionados alguns aditivos como fluoreto de cálcio, também conhecido como fluorita ( $\text{CaF}_2$ ); fluoreto de magnésio ( $\text{MgF}_2$ ); fluoreto de lítio ( $\text{LiF}$ ); cloreto de sódio ( $\text{NaCl}$ ) e fluoreto de alumínio  $\text{AlF}_3$ , sendo este último o mais utilizado. A proporção de cada um desses aditivos, também chamada de química de banho, é que vai determinar as características do eletrólito. Apesar de não ter um padrão definido para a química de banho, a maioria das indústrias procuram trabalhar com uma composição maior que 80% de criolita fundida, um excesso de fluoreto de alumínio entre 8 e 12% e fluorita entre 3 e 6% (SEVERO e GUSBERTI, 2015). Entretanto, a principal finalidade do enriquecimento do eletrólito com esses aditivos é diminuir a temperatura de fusão do banho eletrolítico, sendo possível obter uma temperatura de operação em torno de 960 °C (SILVA, 1997).

Dentre os aditivos citados, o fluoreto de alumínio recebe posição de destaque, pois, devido à sua importância e seu custo, necessita um monitoramento rigoroso para controle do processo. Dentre as propriedades proporcionadas pelo mesmo, as que se destacam são: redução da temperatura de fusão; redução da solubilidade do alumínio no banho; aumento da tensão interfacial metal/eletrólito, da viscosidade e da densidade do banho eletrolítico. Os principais impactos indesejados são a redução da solubilidade da alumina e aumento da resistividade elétrica do eletrólito (MARINHO, 2019).

Como há uma perda expressiva desse aditivo devido a reação com a umidade da alumina formando o fluoreto de hidrogênio, e devido a volatilização, é feito um reaproveitamento do fluoreto de alumínio por meio da lavagem dos gases de exaustão e enriquecimento da alumina. Isso ocorre por meio da captação dos gases da cuba, que são direcionados a lavadores à seco e por meio de uma operação contracorrente com a alumina, onde são lavados, o que proporciona uma adsorção do fluoreto de hidrogênio na alumina. O restante dos gases, livres de fluoreto de hidrogênio e particulados, podem ser eliminados para a atmosfera após seu devido tratamento (MARQUITTI, 2014).

O teor de alumina no banho eletrolítico varia de acordo com o tipo da cuba utilizada e com o sistema de alimentação adotado.

## **2.4 Sistema de alimentação das cubas eletrolíticas**

Existem diferentes formas de alimentação das cubas eletrolíticas. Nas indústrias mais antigas, como é o caso da Companhia Brasileira de Alumínio (CBA), a alimentação é feita pela parte lateral da célula eletrolítica, seguida da quebra de uma crosta solidificada, e é chamada de *side break* (MOURA, 2001).

Apenas adicionar alumina nas laterais não é o suficiente, pois, para introduzi-la no eletrólito, é imprescindível a quebra da crosta formada na superfície. Essa quebra é feita por meio de um equipamento que possui uma coroa de broca, denominado industrialmente por “Rodão”, como mostra a Figura 6.

Figura 6 – Quebra da crosta da cuba eletrolítica pelo “Rodão”.



Fonte: Do autor (2020).

Após a quebra da crosta, é adicionada mais alumina com o objetivo de selar novamente a cuba e preservar os gases produzidos em seu interior, para que sejam captados e tratados pelo sistema de exaustão. Além disso, a alumina adicionada irá trocar calor na crosta de forma a ser aquecida até a próxima alimentação. Essa adição é feita por outro veículo chamado “Gemback” que possui um sistema de medição de quantidade de alumina adicionada por cuba, como mostra a Figura 7.

Figura 7 – Alimentação da cuba eletrolítica pelo “Gemback”.



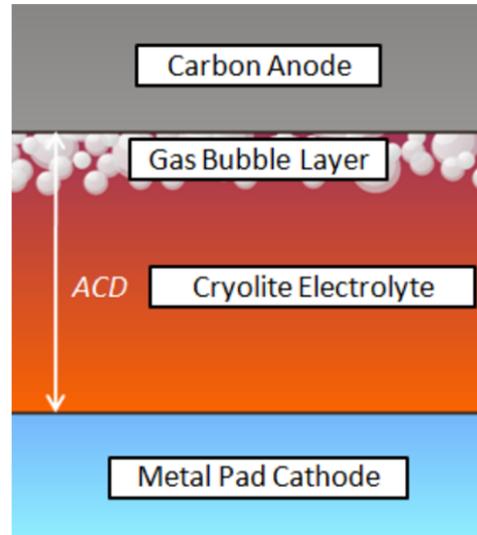
Fonte: Do autor (2020).

O intervalo das alimentações programadas varia de acordo com a empresa, com o setor e com a situação da cuba. A sinalização dessa alimentação é realizada por um terminal no interior desses veículos que pertence ao sistema de controle. Esse sistema de controle funciona baseado em alguns parâmetros, mas basicamente a sua função é manter a distância anodo catodo (ACD) estável.

### **2.5 Distância anodo catodo (ACD)**

A chamada ACD (*Anode Cathode Distance*) é compreendida pela distância interpolar entre a extremidade inferior do anodo e a camada superior de metal, como mostra a Figura 8. É por meio dessa distância que é feito o controle da voltagem de cada cuba (SILVA, 1997).

Figura 8 – Esquema didático da distância entre anodo e catodo da cuba.



Fonte: Votorantim CBA.

Manter essa distância equilibrada é importante, pois quanto maior for a ACD, maior a dificuldade do alumínio se encontrar com o  $\text{CO}_2$ , o que propicia uma menor reoxidação do alumínio e maior eficiência de corrente. Um aumento da ACD propicia uma menor taxa de reoxidação, porém desencadeia um maior consumo energético, já que aumentando a tensão da cuba, há por consequência um aumento de potência. Os valores industriais de ACD giram em torno de 5 cm para a tecnologia Soderberg (MARINHO, 2019). Para manter um bom controle da ACD é utilizado um sistema de controle e automação.

## 2.6 Sistema de controle e automação

A tensão na cuba varia de acordo com o consumo do anodo e com a variação no teor da alumina no eletrólito, ocasionada pela perda ôhmica (THONSTAD, 1977). Dessa maneira, em um processo de produção contínua e alimentação em regime de batelada, se faz imprescindível o uso de um sistema de controle da resistência elétrica da cuba. Para isso, é preciso a realização de leituras de corrente elétrica e tensão e a atuação em tempo real, de maneira automática, na movimentação do anodo da cuba para proporcionar maior estabilidade da voltagem do processo. Além disso, é por meio da variação temporal da resistência da cuba que o sistema deve sinalizar os momentos de adição de alumina na cuba. Adição essa, que nesse caso, é feita de forma manual através do maquinário apresentado.

Na Companhia Brasileira de Alumínio, esse sistema é chamado de SCORE. Ele apresenta uma estrutura modular que recebe sinais analógicos e digitais, e de maneira

ininterrupta faz os cálculos da resistência e atua no controle individual das cubas em tempo real. Além disso, esse sistema também atua na tratativa de ruídos do processo e fornece sinalização de eventos para atuação operacional, geração de gráficos em tempo real e relatórios históricos e instantâneos. O sistema faz leituras a cada 0,5 segundo e calcula as variáveis a cada dois minutos de ciclo de controle. Por meio dessas informações, o sistema atua na ACD através das movimentações de anodo e realiza as correções necessárias (LABANCA, 2008). Para entender como o sistema atua, é importante entender com quais parâmetros de controle ele trabalha.

### ***2.6.1 Funcionamento do algoritmo de controle***

O controle do processo é feito por um algoritmo do tipo proporcional, que toma como base de funcionamento a resistência a passagem de corrente elétrica em cada cuba. Para explicar de maneira mais didática, se faz necessário o uso de três variáveis: a primeira que indica o valor de resistência desejada ( $R_A$ ), a segunda que indica o valor que a resistência assume no processo ( $R_{CCB}$ ), que é calculada e refinada com base nas variáveis medidas de corrente e tensão, e por último a variável de erro (*Erro*), que é a diferença entre as duas primeiras (IVO, 2007).

O algoritmo de controle de resistência é responsável por controlar a ACD de forma a manter o ponto de operação ideal de cada cuba. Dessa forma, ao trabalhar com o controle da resistência, fica-se menos suscetível às flutuações de corrente da linha (IVO, 2007).

### ***2.6.2 Cálculo da derivada da resistência***

Para identificar um perfil de comportamento da resistência, é feito o cálculo da derivada instantânea dessa variável em função do tempo, denominada ( $R_{SD}$ ). O cálculo é feito levando em conta o valor de resistência atual e o do ciclo de controle anterior. Entretanto, é mais interessante identificarmos um perfil de comportamento dessa variável em um período maior de tempo, já que os valores instantâneos oscilam demasiadamente e não seria possível uma interpretação mais clara e sem ruídos. A variável que armazena esse cálculo levando em consideração o tempo é a derivada histórica da resistência ( $R_{SDH}$ ), e é por meio dela que são identificados alguns eventos das cubas, dentre eles o efeito anódico e a derivada baixa. Um gráfico do seu comportamento é mostrado em tempo real nas telas de monitoramento de controle, assim como os eventos sinalizados.

#### ***2.6.2.1 Efeito anódico***

O Efeito Anódico (EA) é um evento que ocorre nas cubas eletrolíticas quando são alcançados teores muito baixos de alumina no eletrólito, em torno de 2%. A corrente elétrica aplicada na cuba, sem ter alumina suficiente para continuar a produção, começa a dissociar os sais do eletrólito, quebrando as ligações químicas da criolita. Essa dissociação gera gases como o ácido fluorídrico (HF), o tetrafluoraluminato de sódio (NaAlF<sub>4</sub>), o tetrafluormetano (CF<sub>4</sub>) e o monóxido de carbono (CO). As bolhas, em especial do CF<sub>4</sub> e CO, se posicionam na interface anodo-eletrólito formando um isolante elétrico, o que faz aumentar significativamente a resistência e a voltagem da cuba, que normalmente sobe de 4 volts para 25 volts em um segundo, chegando a 40 volts em dois minutos (MOURA, 2001).

Além da emissão de gases poluentes e danosos à camada de ozônio, Haverkamp (1999) considera como dois dos principais problemas do efeito anódico a geração de turbulência do campo eletromagnético e as condições de instabilidade da cuba. Como consequência, é provocada uma perda em eficiência de corrente devido às reações de reoxidação e um aumento no consumo de energia causado por abruptas elevações de voltagem.

Como há uma elevação da resistência da cuba à medida em que o efeito anódico se aproxima, este dado é utilizado pelo sistema de controle para a previsão desse evento. Através da derivada da resistência da cuba, o algoritmo de previsão de efeito anódico tenta identificar um comportamento que sinalize a provável entrada em efeito anódico da cuba (IVO, 2007).

#### 2.6.2.2 *Derivada baixa*

Como uma boa prática de técnicos e profissionais da Companhia Brasileira de Alumínio (CBA), a Derivada Baixa (DB) surgiu com o intuito de sinalizar no sistema de controle um evento que significasse a supersaturação do eletrólito. Por meio de uma análise do comportamento da derivada da resistência ao longo do tempo mostrada em gráficos nas interfaces de controle, é possível inferir se a alumina alimentada na cuba está sendo consumida ao longo do tempo ou não.

Nesse trabalho será estudado como se comportam os teores de alumina nas cubas que apresentam a sinalização desse evento e as que não apresentam, considerando que é por meio dele que é inferido se o eletrólito está supersaturado ou em previsão de efeito anódico.

## **2.7 Alumina não dissolvida**

Nas indústrias, o teor de alumina no eletrólito varia entre 2 e 6%, sendo que o teor mais baixo corresponde à condição de efeito anódico e o superior ao limite de solubilidade (MARINHO, 2019).

Segundo BAGSHAW *et al.* (1985), a taxa de dissolução da alumina diminui com o aumento do teor de alumina no banho, isto é, conforme o banho vai se saturando em alumina, torna-se cada vez mais difícil a sua dissolução em maior quantidade. Além disso, o aumento do teor de alumina no banho durante a alimentação é seguido de uma queda da temperatura, já que a alumina está na crosta a uma temperatura inferior ao do eletrólito. Essa queda de temperatura prejudica ainda mais a dissolução, que é um processo endotérmico, o que favorece a formação de alumina precipitada no fundo da célula sempre que se fizer adição em excesso (MARINHO, 2019).

O excesso de alumina que é adicionado no banho eletrolítico e que não se dissolve, precipitando abaixo da camada de metal na cuba, é denominado de “lama”. As principais causas de formação da “lama” são: falha do controle de alimentação e falha nos alimentadores (MARINHO, 2019). Essas falhas operacionais provocam grande instabilidade na célula, já que com a formação de alumina cristalizada (“cascão”), ocorrem grandes irregularidades na superfície do catodo, como mostra a Figura 9. Com essas irregularidades, a distribuição de corrente é prejudicada, pois são formados caminhos preferenciais para passagem da corrente elétrica, as chamadas correntes horizontais. Essas correntes fazem com que a movimentação do metal seja na vertical, ao invés de apenas ocorrer na horizontal; com isso há um aumento na possibilidade de reoxidação do metal ao encostar na superfície do anodo e, conseqüentemente, uma perda de eficiência de corrente (SILVA, 1997). Além disso, essas correntes podem provocar um aumento demasiado na temperatura e no ruído da resistência elétrica da cuba, atenuando sua capacidade de realizar a eletrólise, reduzindo assim a eficiência do processo (MOURA, 2001).

Figura 9 – Catodo com deformações na superfície devido à formação de “lama” e “cascão”.



Fonte: Votorantim CBA (2020).

## 2.8 Teor de alumina em função da variação da resistência elétrica

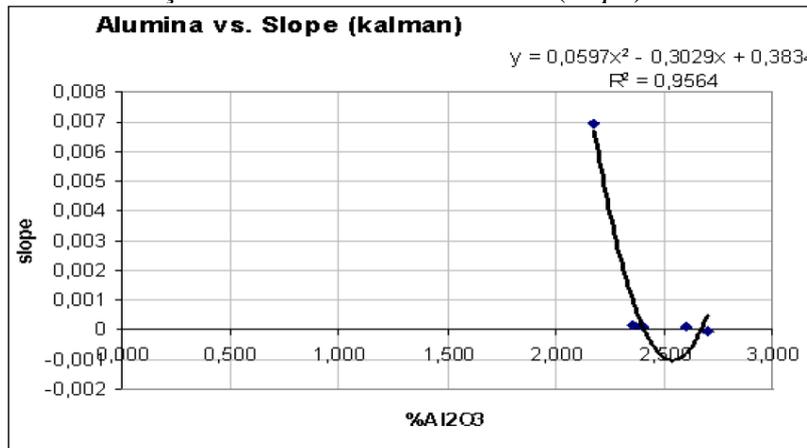
Moura (2001) analisou os teores de alumina em cubas eletrolíticas comparando sistemas de alimentação automática. Os resultados obtidos foram teores de alumina em média de 3% durante o período de alimentação e em torno de 2% em períodos pré-alimentação, onde o eletrólito estava desprovido de alumina. Esses valores são menores que os valores encontrados na literatura para cubas com alimentação manual na lateral. Isso acontece, pois essa tecnologia de alimentação automática visa trabalhar com os menores teores de alumina possíveis para evitar supersaturação, e ao mesmo tempo evitar sua escassez, o que resultaria em uma alta incidência de efeitos anódicos. Segundo Moura (2001), esse tipo de alimentação proporciona um controle maior do processo e melhores resultados de dissolução de alumina, porém não é o tipo de alimentação abordado neste trabalho, visto que na CBA ainda não foi implementada essa tecnologia em todos os setores.

Marinho (2019), realizou estudos em cubas de alimentação lateral manual. Segundo os resultados obtidos, cubas que passaram por um processo de raspagem da sua cavidade e foram submetidas à uma caracterização da sua “lama”, obtiveram um resultado em torno de 51% de criolita e 42% de alumina em sua composição. Além disso, foi analisado o teor de alumina de algumas cubas ao longo do tempo. Para uma cuba com o mesmo intervalo de alimentação deste trabalho, de 4 horas, antes da alimentação obteve-se um resultado de 3,40% de alumina, chegando a 4,06% após 1 hora de alimentação.

Segundo Braga (2008), a relação entre teor de alumina no banho e resistência elétrica da cuba é inversamente proporcional, pois à medida que a quantidade de alumina diminui, a tensão e a resistência da cuba aumentam. Isso acontece pois com uma menor quantidade de alumina, se reduz também a disponibilidade de oxigênio para a formação de  $\text{CO}_2$ , e o carbono do anodo passa a reagir com o flúor disponível no eletrólito, formando uma camada de gás  $\text{CF}_4$  na superfície anódica (entre anodo e banho). Essa camada age como uma barreira para a passagem de corrente elétrica, o que gera um aumento de resistência e tensão.

Braga (2008), avaliou o teor de alumina de acordo com a derivada da resistência (*slope*) usando variações no sistema de controle em cubas com sistema de alimentação automática, conforme segue na Figura 10. Dessa forma, é possível avaliar que à medida que o teor de alumina aumenta, a derivada da resistência diminui, com um coeficiente de determinação ( $R^2$ ) de 95,64%.

Figura 10 – Relação da derivada da resistência (*slope*) e teor de alumina.



Fonte: Braga (2008).

Contudo, nesses trabalhos não houve um estudo relacionando à resistência a passagem de corrente com o teor de alumina no eletrólito em cubas sinalizadas como supersaturadas. Dessa forma, se faz necessário o estudo deste trabalho, que aborda a relação entre esses parâmetros, bem como os teores de alumina nas cubas que apresentam eventos de supersaturação.

### **3 METODOLOGIA**

Neste capítulo são descritos os padrões operacionais das cubas eletrolíticas da CBA, os procedimentos realizados para a coleta das amostras de banho eletrolítico, o preparo das amostras e procedimento de análise e, por fim, como foi feito o monitoramento dos dados no sistema de controle das cubas.

#### **3.1 Condições operacionais das cubas da CBA**

A Votorantim CBA trabalha com um único projeto de cuba eletrolítica em todas as suas linhas de produção (Salas 1, 2, 3, 4 e 5), sendo este trabalho realizado na Sala 5, que possui 288 cubas eletrolíticas em funcionamento e um nível de corrente elétrica de 130 kA. A vida das cubas pode chegar em até, aproximadamente, 3500 dias.

O processo acontece em um regime de operação contínua, 24 horas por dia, sendo a alimentação realizada em batelada, com 240 kg de alumina em intervalos de 4 horas. Dessa forma, uma cuba é programada para receber seis alimentações no dia. Para fazer a alimentação é utilizado o carro quebra crosta, “Rodão”, responsável por quebrar a crosta do banho eletrolítico de maneira a introduzir e misturar a alumina no banho. Além disso, há também o carro alimentador, “Gemback”, composto por um silo que faz a adição de alumina na crosta formada após a quebra realizada pelo “Rodão”, de modo a selar a cuba e iniciar o processo de aquecimento da alumina depositada na crosta. Essa alumina permanecerá na crosta efetuando a troca térmica, até ser introduzida na próxima quebra da crosta realizada na alimentação seguinte. O metal produzido é depositado no fundo das cubas e é retirado uma vez ao dia.

Além disso, o efeito anódico é programado para ocorrer a cada três dias em condições operacionais normais. Apesar de ser um evento indesejado, ele é uma das formas de monitoramento e controle do processo, para se averiguar se a reação está acontecendo regularmente.

#### **3.2 Coleta das amostras de banho eletrolítico**

Para realizar a amostragem, foram selecionadas quatro cubas: duas que apresentaram sinalização de supersaturação e duas que não tiveram essa sinalização. Para facilitar a comparação entre as que supersaturaram e as que não obtiveram essa sinalização, foram analisadas duas cubas mais novas, com faixa de vida entre 400 e 600 dias, e duas mais velhas, entre 2800 e 3010 dias. Os parâmetros de temperatura do eletrólito, percentual de excesso de

AlF<sub>3</sub> e percentual de CaF<sub>2</sub> fornecidos pela equipe de processo seguem conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 – Parâmetros operacionais das cubas selecionadas.

<b>Identificação das cubas</b>	<b>Condição sinalização da cuba</b>	<b>Idade (dias)</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>% AlF<sub>3</sub> em excesso</b>	<b>% CaF<sub>2</sub></b>
1167	Operação normal	600	961	9,0	7,3
1168	Supersaturada	436	958	9,7	6,3
1169	Operação normal	3008	958	10,1	6,1
1272	Supersaturada	2849	955	8,9	5,7

Fonte: Do autor (2020).

Foi coletada uma amostra de banho eletrolítico de cada cuba em intervalos pré-estabelecidos de tempo entre as alimentações. Dessa forma, as amostragens foram feitas durante um intervalo de 4,5 horas, totalizando 44 amostras, como mostra a Tabela 2.

Tabela 2 – Quantidade de amostras retiradas de acordo com o tempo de alimentação.

<b>Condição em relação à alimentação</b>	<b>Quantidade de amostras</b>
15 min antes	4
Pré alimentação	4
Pós alimentação	4
15 min depois	4
30 min depois	4
1 hora depois	4
2 horas depois	4
15 min antes	4
Pré alimentação	4
Pós alimentação	4
15 min depois	4

Fonte: Do autor (2020).

A coleta das amostras foi realizada por um operador especializado e de acordo com procedimento e treinamento da equipe de processo. Para essa coleta foi utilizada uma ferramenta chamada pinça, como indicada na Figura 11. Inicialmente foi feito um aquecimento da pinça de amostragem para evitar choques térmicos, conforme é mostrado na Figura 12.

Figura 11 – Pinça de amostragem.



Fonte: Do autor (2020).

Figura 12 – Aquecimento da pinça de amostragem.



Fonte: Do autor (2020).

Após o aquecimento, a pinça era envolvida em uma mistura de óleos lubrificantes que ficam armazenados em um compartimento dentro do carro de transporte de ferramentas, como mostrado na Figura 13. Esse procedimento foi feito a cada nova amostragem para que houvesse o resfriamento e lubrificação da pinça.

Com o auxílio de uma estanca, foi feito um furo na crosta de banho eletrolítico da cuba e esperou-se aproximadamente 5 minutos para evitar que a crosta rompida influenciasse na concentração de alumina no momento da amostragem. Além disso, com a inserção de uma vara de eucalipto foi feita uma limpeza superficial na área de coleta do banho. Após esse procedimento, inseriu-se a pinça no eletrólito e foi coletada a amostra, conforme Figura 14.

Figura 13 – Lubrificação da pinça de amostragem.



Fonte: Do autor (2020).

Figura 14 – Coleta da amostra de banho eletrolítico.



Fonte: Do autor (2020).

Após sua solidificação, a amostra foi colocada na superfície e analisada visualmente com o auxílio de um pequeno martelo, com o intuito de verificar se havia alguma contaminação de carvão, metal líquido ou sólido e excesso de alumina, como segue na Figura 15. As amostras isentas desses contaminantes foram colocadas na bandeja, colocadas em saquinhos de alumínio e etiquetadas conforme numeração da cuba e da amostra, como é mostrado na Figura 16. Após serem organizadas, as amostras seguiram para a preparação e análise laboratorial.

Figura 15 – Análise de contaminação da amostra.



Fonte: Do autor (2020).

Figura 16 – (a) Bandeja de amostras e (b) amostras etiquetadas.



Fonte: Do autor (2020).

### 3.3 Preparação e análise das amostras de banho eletrolítico

O preparo das amostras para análise foi iniciado passando-as por um Britador, fabricante Retsch, modelo BB 50, como segue na Figura 17, que tem o intuito de reduzir as partículas para granulometrias menores que 5 mm. Após essa etapa, as amostras britadas foram homogeneizadas e foram pesados  $15,0 \pm 0,5$  g em copos de inox com numeração sequencial. Em seguida, as amostras seguiram para a moagem e prensagem nos equipamentos da marca Herzog, modelo HP-MA e HP-PA, onde foram pulverizadas, prensadas e liberadas na esteira. No final, as amostras preparadas prensadas apresentam a aparência mostrada na Figura 18. Em seguida, elas seguiram para a análise de teor de alumina utilizando um Difratômetro de Raios-X – DRX, fabricante PANanalytical, modelo CubiX, mostrado na Figura 19. Com as amostras devidamente analisadas, foram coletados alguns dados do sistema de controle.

Figura 17 – Britador utilizado na preparação das amostras. Figura 18 – Amostra preparada para análise.



Fonte: Votorantim CBA (2020).



Fonte: Votorantim CBA (2020).

Figura 19 – Difratorômetro de raios X (Cubix)

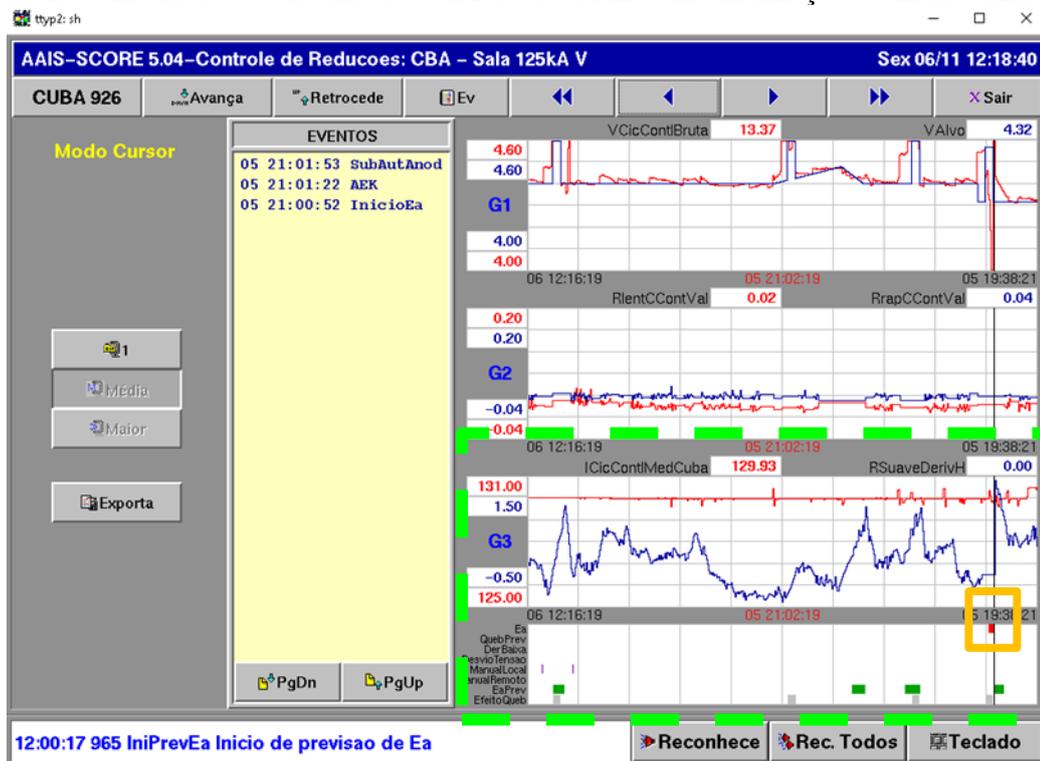


Fonte: Do autor (2020).

### 3.4 Monitoramento do sistema de controle

Para monitoramento dos dados do sistema de controle (SCORE), foram utilizadas as telas de interface do sistema (Figura 20 e 21). Nessas telas são mostradas, em gráficos, algumas variáveis em tempo real. Na Figura 20, na região pontilhada em verde, pode-se visualizar a curva azul da variável  $R_{SDH}$  e logo abaixo é mostrada a sinalização de um Efeito Anódico, marcada na região laranja. Esse evento foi sinalizado devido à elevação da  $R_{SDH}$ .

Figura 20 – Interface do sistema de controle SCORE com sinalização de Efeito Anódico.



Fonte: Adaptado de Votorantim CBA (2020).

Ainda na Figura 20, na caixa intitulada “EVENTOS” à esquerda dos gráficos, ficam registrados todos os eventos da cuba. Nesta cuba houve um Efeito Anódico, às 21:00:52 do dia

05 de novembro de 2020, que é sinalizado como *InicioEA* e o *AEK* sinalizado logo acima às 21:01:22, que corresponde à intensidade máxima de voltagem da cuba durante o efeito anódico. Dentre os eventos sinalizados, o principal para o estudo deste trabalho é a Derivada Baixa, que representa a supersaturação da cuba eletrolítica.

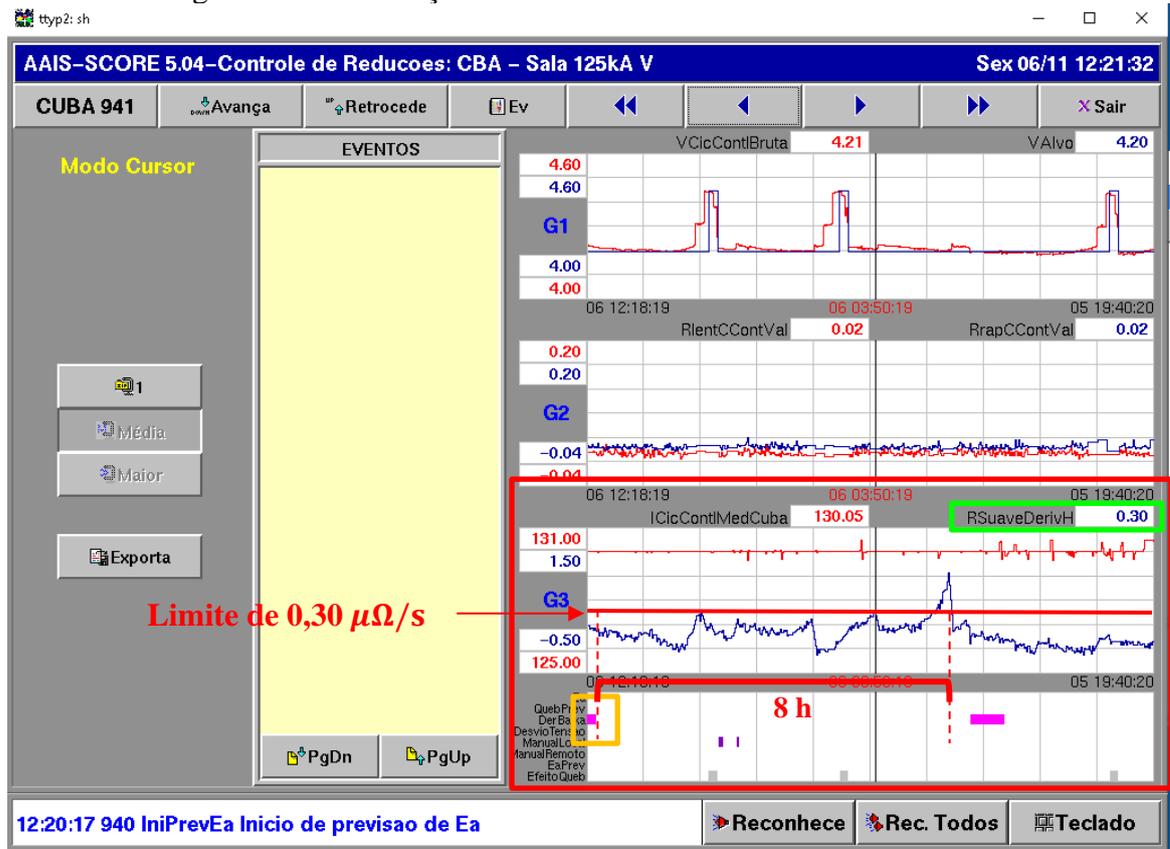
Para entender como esse evento é gerado, é importante analisar primeiramente como a derivada histórica da resistência ( $R_{SDH}$ ) é calculada. Como mencionado anteriormente, essa variável leva em conta um período maior de tempo, e não apenas o ciclo de controle anterior, como é o caso da derivada instantânea ( $R_{SD}$ ). Para calcular a  $R_{SDH}$  utiliza-se o valor da própria variável do ciclo de controle anterior com 92% de peso e 8% do valor da  $R_{SD}$ , como demonstra a Equação 6:

$$R_{SDHT} = 0,92 R_{SDHT-1} + 0,08 R_{SDT} \quad (6)$$

Onde:  $R_{SDHT}$  é a derivada histórica no ciclo de controle atual;  $R_{SDT}$  é a derivada instantânea no ciclo de controle atual;  $R_{SDHT-1}$  é derivada histórica da resistência no ciclo de controle anterior.

Para análise de Derivada Baixa, a curva azul  $R_{SDH}$  é monitorada por um período de 8 horas anteriores ao horário programado para a alimentação das cubas, período este que se encontra demarcado em vermelho na barra do gráfico na Figura 21. Para gerar o evento de Derivada Baixa, demarcada em laranja na Figura 21, a curva azul do  $R_{SDH}$  não deve ultrapassar mais que  $0,30 \mu\Omega/s$  durante essas 8 horas; caso ultrapasse, o evento só será anulado se ela permanecer por mais que 12 minutos (6 ciclos de controle) acima de  $0,30 \mu\Omega/s$ .

Figura 21 – Sinalização do evento de Derivada Baixa no SCORE.



Fonte: Adaptado de Votorantim CBA (2020).

Além disso, o valor de  $R_{SDH}$  aparece no canto superior direito do gráfico com a nomenclatura de  $RSuaveDerivH$ , conforme destacado em verde. Esse gráfico é lido da direita para a esquerda, dessa forma os dados mais atuais são os apresentados na extremidade esquerda da área plotada. Como é possível notar, a  $R_{SDH}$  permaneceu por 8 horas abaixo de  $0,30 \mu\Omega/s$  sem apresentar qualquer subida por mais que 12 min, sendo, portanto, gerado o evento de Derivada Baixa (ponto rosa).

Por meio da sinalização desses eventos de Derivada Baixa são contabilizados os eventos de supersaturação na rotina operacional da CBA e foram escolhidas as cubas supersaturadas a serem analisadas no trabalho. As cubas selecionadas com condições normais de operação foram as que apresentaram comportamento esperado de  $R_{SDH}$  ao longo dos intervalos das últimas alimentações, ou seja, de subida nos momentos pré alimentação e descida após a quebra da crosta e introdução da alumina no banho eletrolítico.

Para coletar os dados de  $R_{SDH}$  ao longo do intervalo de amostragem, foram exportados os dados do sistema de controle. Os resultados obtidos serão apresentados a seguir.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos nas análises do teor de alumina nas cubas eletrolíticas e posteriormente, comparados com a variação da resistência das cubas.

### 4.1 Variação do teor de alumina

Por questões operacionais e de condições das cubas, algumas delas não receberam os 240 kg de alumina, que seria o padrão do processo. Caso a cuba apresente temperatura fora da faixa ideal, atraso do Efeito Anódico programado, problemas de concentração de corrente elétrica no anodo, ou algum outro problema, a quantidade de alumina programada para a alimentação pode ser alterada. Portanto, seguem na Tabela 3 as respectivas quantidades alimentadas em cada cuba na primeira e na segunda alimentação, que compreenderam o intervalo de amostragem. As cubas que apontaram evento de supersaturação, 1168 e 1272, apresentaram a sinalização de Derivada Baixa antes da primeira alimentação.

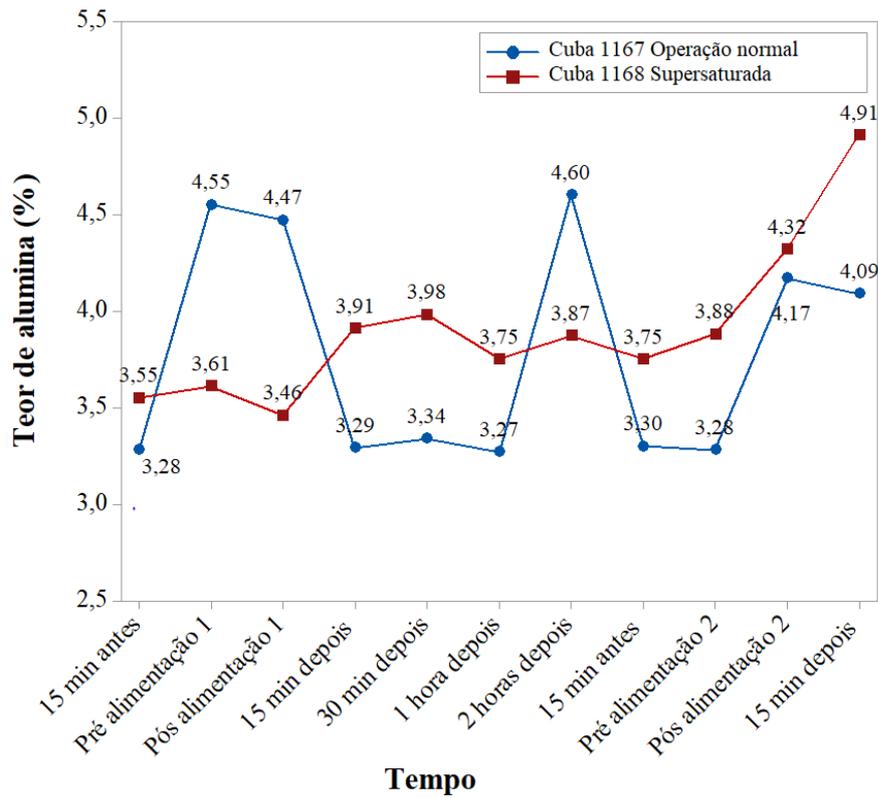
Tabela 3 – Quantidades de alumina alimentadas em cada cuba.

Identificação das cubas	Identificação da alimentação	Quantidade de alumina introduzida (kg)
1167	1 <sup>a</sup>	240,0
1167	2 <sup>a</sup>	120,0
1168	1 <sup>a</sup>	241,2
1168	2 <sup>a</sup>	243,6
1169	1 <sup>a</sup>	120,0
1169	2 <sup>a</sup>	242,4
1272	1 <sup>a</sup>	240,0
1272	2 <sup>a</sup>	240,0

Fonte: Do autor (2020).

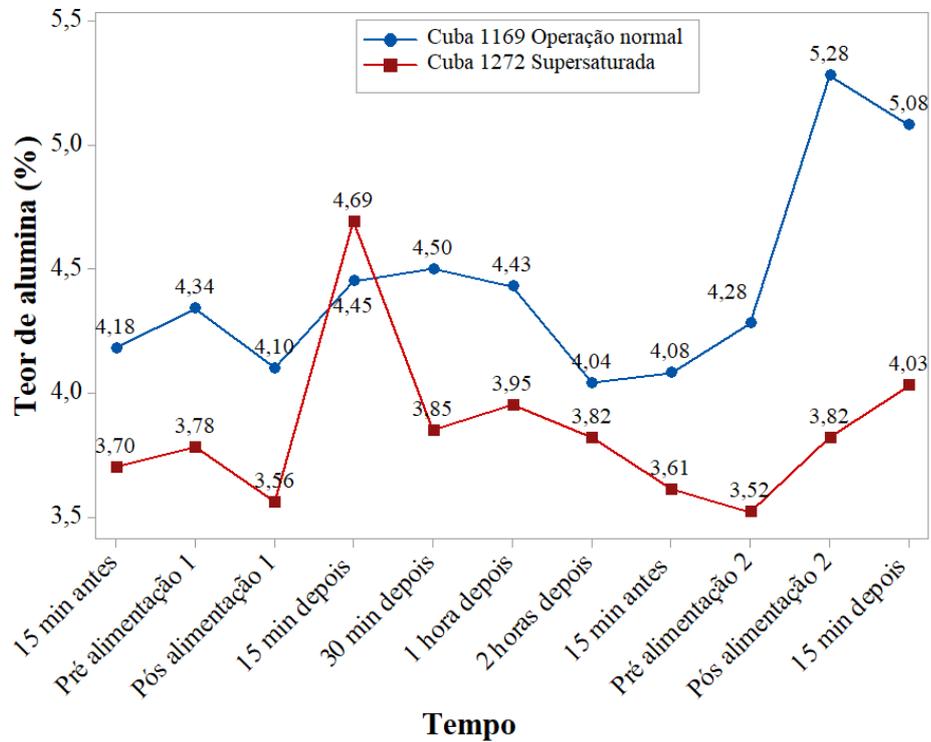
Utilizando o *software* MINITAB 19<sup>®</sup> foram realizadas as análises estatísticas. Os resultados obtidos de teor de alumina nas cubas mais novas, cujas identificações são 1167 e 1168, são mostrados na Figura 22. Os resultados obtidos das cubas mais velhas, 1169 e 1272, são mostrados na Figura 23.

Figura 22 – Teor de alumina ao longo do intervalo de amostragem para as cubas mais novas.



Fonte: Do autor (2020).

Figura 23 – Teor de alumina ao longo do intervalo de amostragem para as cubas mais velhas.



Fonte: Do autor (2020).

Ao avaliar as Figuras 22 e 23 é possível notar que há uma elevação do teor de alumina dos 15 minutos antes até a pré alimentação, que pode ter ocorrido devido a entrada de alumina da crosta no local de amostragem. Dessa forma, essa alumina, que pode ter sido introduzida ao

realizar o furo da crosta para amostragem, apareceu nos resultados depois desses 15 minutos iniciais. Além disso, para realizar a limpeza do banho e mantê-lo sem impurezas, utilizou-se a vara de eucalipto, o que ocasionou uma turbulência e pode ter elevado a alumina, presente mais ao fundo no eletrólito, para o local de amostragem, o que conseqüentemente pode ter contaminado a amostra.

Ademais, é possível notar nas Figuras 22 e 23 que, logo após a primeira alimentação em todas as cubas, há uma queda inicial no teor de alumina. Segundo Marinho (2019), isso acontece devido ao tempo necessário para que a alumina alimentada se dissolva no eletrólito e chegue até o local da amostragem, que se localiza do lado oposto ao da primeira alimentação. A amostragem do lado oposto se explica, pois, ao amostrar do mesmo lado que se alimenta, há mais chances de haver contaminação da amostra, já que é um local em que foi gerado mais turbulência após a quebra da crosta. Essa técnica de amostrar do lado oposto ao que é alimentado é seguida conforme o procedimento operacional padrão da CBA.

Já na segunda alimentação, ainda nas Figuras 22 e 23, é possível notar que há um aumento brusco no teor de alumina logo após a alimentação em todas as cubas. Isso se dá pois, ao longo de todo o procedimento de amostragem, foi mantido o lado de coleta da cuba para melhor comparar as amostras. Assim, mesmo após a segunda alimentação, foi realizado um novo furo na crosta no mesmo local em que já estava ocorrendo a amostragem.

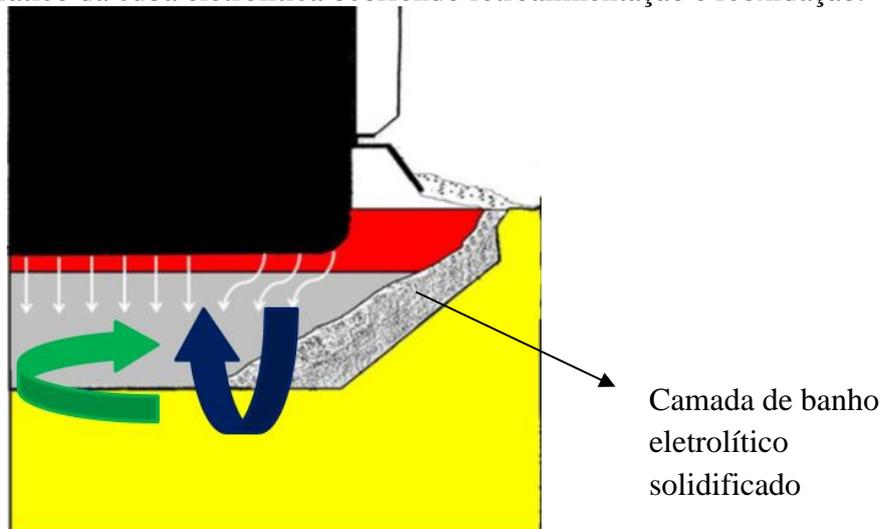
Na cuba 1169 é perceptível que na primeira alimentação há um menor aumento de teor de alumina do que na segunda alimentação. Isso ocorreu pois na primeira alimentação foi introduzida apenas metade da quantidade de alumina programada (120,0 kg). Já na segunda alimentação foram introduzidos 242,4 kg, o que elevou o teor de alumina de 4,28% para 5,28%. Além disso, a amostragem na segunda alimentação foi do mesmo lado em que houve a introdução de alumina, como já foi discutido.

Na Figura 22 é possível notar que a cuba mais nova supersaturada (1168) não apresenta um comportamento esperado de elevação do teor de alumina na sua alimentação e consumo após um tempo. A tendência de não acontecer uma variação brusca de consumo de alumina é o que se espera de uma cuba que apresentou o evento de Derivada Baixa, pois a alumina que precipitou começa a ser retroalimentada no eletrólito.

Na Figura 24 consta um esquema didático da cuba em uma vista transversal mostrando como esse fenômeno da retroalimentação ocorre. Isso acontece, pois dentro da cuba existe um campo magnético ocasionado pela alta corrente elétrica que proporciona um alinhamento dos polos dos elétrons do alumínio quando em estado líquido, já que o alumínio é um material classificado como paramagnético. Com isso, acontece uma movimentação da alumina que está

no fundo da cavidade da cuba em direção ao eletrólito. Essa movimentação deveria acontecer apenas na horizontal, como mostra a seta em verde na Figura 24, semelhante à uma colher mexendo um copo de sal, porém acontece também na vertical como mostra a seta em azul, devido às correntes horizontais ocasionadas por deformações no catodo e por alterações em suas paredes laterais (chamadas de lombo), que são formadas por banho eletrolítico solidificado (SILVA, 1997). Com esse fenômeno, o teor de alumina não sofre a variação que se espera de uma cuba em operação normal. Entretanto, não é toda a alumina presente no fundo da cavidade da cuba que consegue retornar e ser consumida e é nesse ponto que a cuba pode perder eficiência. Além disso, ocorre também o fenômeno da reoxidação causado pelo mesmo campo magnético criado pelas correntes horizontais. A reoxidação ocorre quando o alumínio metálico presente no fundo da cavidade da cuba entra em contato com a superfície do anodo, através da sua movimentação na vertical, mostrado também pela seta em azul na Figura 24. Como consequência esse metal sofre oxidação se transformando novamente em alumina, o que contribui ainda mais para a constância no teor de alumina no eletrólito.

Figura 24 – Esquema didático da cuba eletrolítica ocorrendo retroalimentação e reoxidação.



Fonte: Adaptado de Votorantim CBA (2015).

A longo prazo, isso gera um grande transtorno operacional, pois a cuba tem de ser desligada para uma retroescavadeira realizar a raspagem do catodo e retirar a alumina cristalizada e o banho eletrolítico solidificado. Toda essa alumina não dissolvida e cristalizada proporciona uma redução da passagem de corrente elétrica e favorece a formação de correntes horizontais, o que pode contribuir ainda para um futuro problema de concentração de corrente também no anodo (MARINHO, 2019).

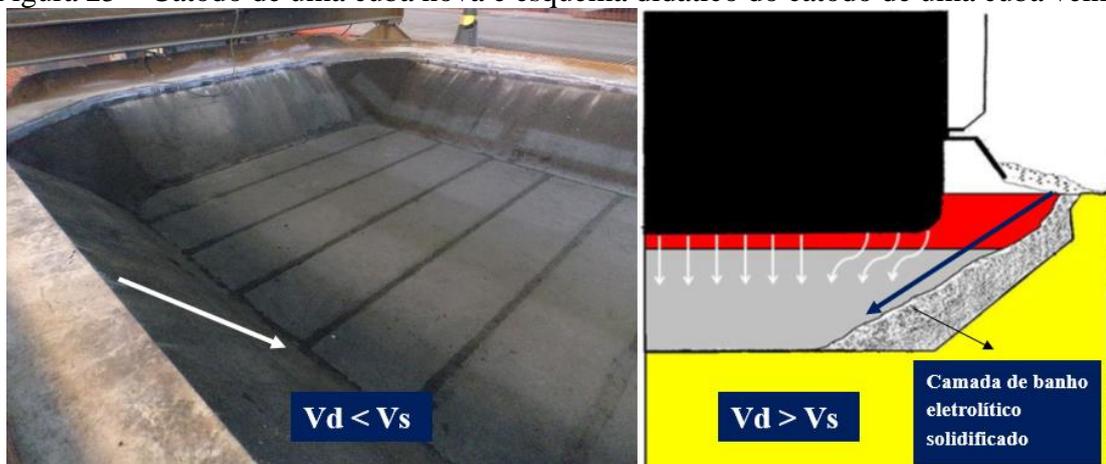
Já na Figura 23 é possível notar que, mesmo com a sinalização de evento de supersaturação, a cuba mais velha (1272) consegue se recuperar bem e apresentar consumo de

alumina após as alimentações e comportamento de elevação do teor após a segunda alimentação. Quando comparada com a curva da cuba mais nova também supersaturada (1169), apresenta inclusive desempenho superior. Isso se confirma com estudos realizados no próprio setor que constataram que as cubas mais velhas possuem menor incidência de eventos de supersaturação e, quando possuem, recuperam mais rapidamente.

A melhor recuperação em cubas mais velhas pode ser devido ao fato de que a área disponível para introdução da alumina na alimentação é menor quando comparada com a área das cubas mais novas. Além disso, as paredes do catodo dessas cubas possuem perfis diferentes, pois acima dos blocos e da pasta catódica que constituem o catodo, se forma, ao longo da vida da cuba, uma camada de banho eletrolítico solidificado nas paredes do catodo, o que serve como revestimento para a bacia catódica.

As cubas mais antigas possuem uma camada de banho eletrolítico solidificado mais espessa, como é mostrado a direita da Figura 25, com o formato de uma parede menos inclinada, o que contribui para que a alumina seja dissolvida aos poucos no banho eletrolítico. Dessa maneira, a velocidade de sedimentação ( $V_s$ ) pode ser menor que a de dissolução ( $V_D$ ), o que, segundo Marinho (2019), é fundamental para ocorrer um bom funcionamento do processo. Já nas cubas mais novas, como segue a esquerda da Figura 25, essa parede do catodo constituída de banho eletrolítico solidificado, pode ainda não estar completamente formada ou não estar espessa como nas mais velhas, fazendo um perfil de rampa mais inclinada. Isso pode contribuir para a alumina ser introduzida de uma só vez no banho eletrolítico, o que dificulta o processo de dissolução, já que a velocidade de sedimentação ( $V_s$ ) nesse caso tem grandes possibilidades de ser maior que a de dissolução ( $V_D$ ).

Figura 25 – Catodo de uma cuba nova e esquema didático do catodo de uma cuba velha.



Fonte: Adaptado de Votorantim CBA (2015).

Na Tabela 4 são apresentadas as médias de teor de alumina nas cubas ao longo do intervalo de amostragem.

Tabela 4 – Médias de teor de alumina ao longo da amostragem para cada cuba.

<b>Identificação das cubas</b>	<b>Condição</b>	<b>Média Teor alumina (%)</b>
1167	Operação normal	3,79±0,58
1168	Supersaturada	3,91±0,41
1169	Operação normal	4,43±0,40
1272	Supersaturada	3,85±0,32

Fonte: Do autor (2020).

Quando se compara as médias do teor de alumina nas cubas 1167 e 1168, de 3,79 e 3,91%, respectivamente, percebe-se que considerando o desvio padrão as médias não são estatisticamente diferentes. Isso também ocorre nas cubas mais velhas, em que se observa que considerando o desvio padrão, não se pode afirmar que o teor de alumina da cuba com operação normal (1169) é estatisticamente maior que o da cuba 1272 (supersaturada). O teor de alumina dessas cubas, na verdade irão se diferenciar principalmente devido a solubilidade do seu eletrólito. Esses limites de solubilidade vão variar sendo motivados pelas alterações de temperatura, pelo teor de fluoreto de alumínio em excesso e de fluorita, portanto não sendo possível interpretar a solubilidade apenas com os teores de alumina. Vale ressaltar, ainda, que esses limites de solubilidade irão variar ao longo do tempo, já que os parâmetros que influenciam na sua variação não são constantes.

O que realmente é esperado que diferencie uma cuba supersaturada de uma cuba com operação normal é o comportamento do teor de alumina ao longo do tempo e não os valores médios. Na cuba com operação normal espera-se um aumento na alimentação e um consumo perceptível após um tempo, já na cuba supersaturada espera-se que a alumina não tenha esse poder de reação e se mantenha mais estagnada com o decorrer do tempo. Isso se comprova analisando a Figura 22 com as cubas mais novas.

Para avaliar a influência no teor de alumina nos valores de derivada histórica da resistência, foram apresentados os dados de  $R_{SDH}$  em comparação aos teores de alumina ao longo do tempo. Com os comportamentos de ambas as curvas foi possível comparar e discutir sua relação.

#### 4.2 Variação da Derivada Histórica da Resistência ( $R_{SDH}$ ) com o teor de alumina

Para cada cuba foram coletados os dados do sistema de controle de  $R_{SDH}$  no intervalo de amostragem e selecionados os valores correspondentes aos horários de retirada de amostra de alumina. As médias dos valores de derivada histórica da resistência para cada cuba seguem na Tabela 5.

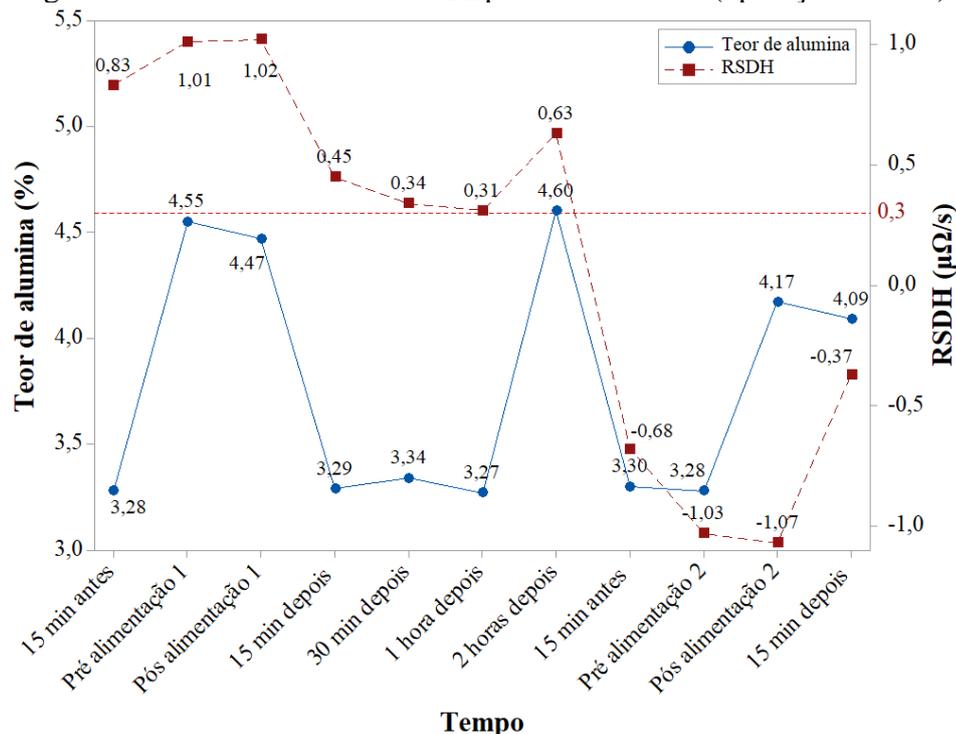
Tabela 5 – Médias da derivada histórica da resistência ao longo da amostragem para cada cuba.

Identificação das cubas	Condição	Média $R_{SDH}$ ( $\mu\Omega/s$ )
1167	Operação normal	$0,13 \pm 0,79$
1168	Supersaturada	$0,16 \pm 0,18$
1169	Operação normal	$0,33 \pm 0,37$
1272	Supersaturada	$-0,12 \pm 0,14$

Fonte: Do autor (2020).

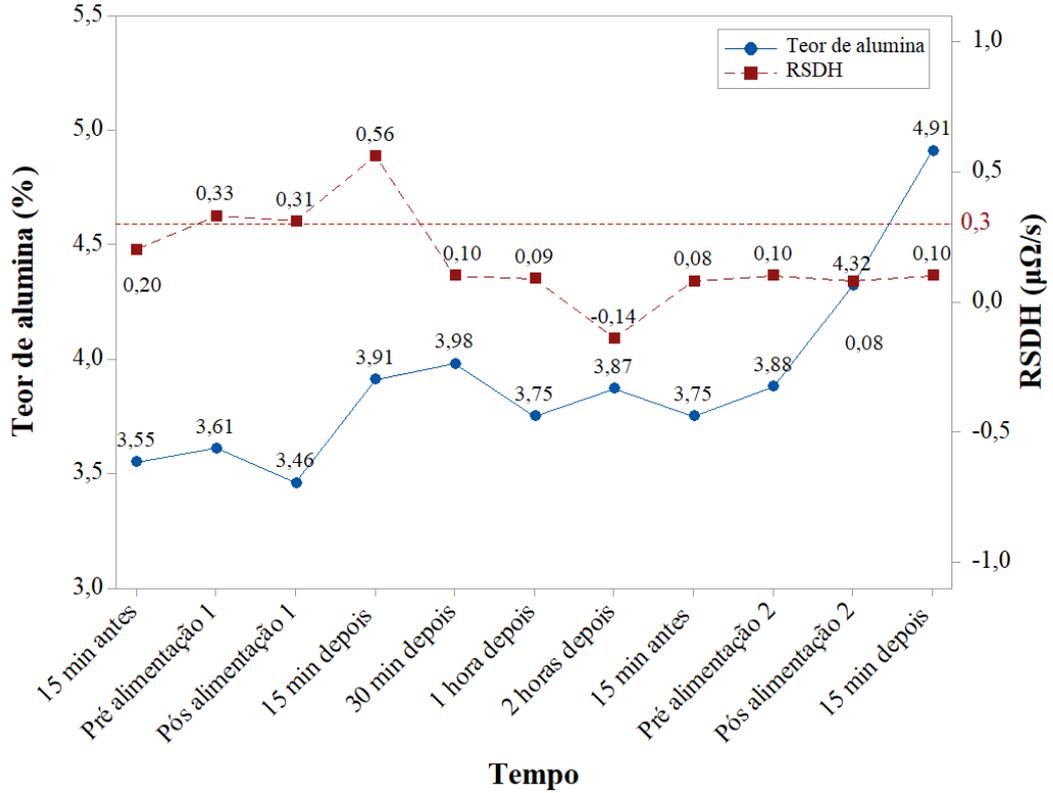
Os valores de teor de alumina e  $R_{SDH}$  ao longo do intervalo de amostragem para as cubas mais novas com operação normal (1167) e supersaturada (1168), são apresentados nas Figuras 26 e 27, respectivamente. Para as cubas mais velhas com operação normal (1169) e supersaturada (1272), os teores de alumina e  $R_{SDH}$  ao longo do intervalo de amostragem se encontram nas Figuras 28 e 29, respectivamente.

Figura 26 – Teor de alumina e  $R_{SDH}$  para a cuba 1167 (operação normal).



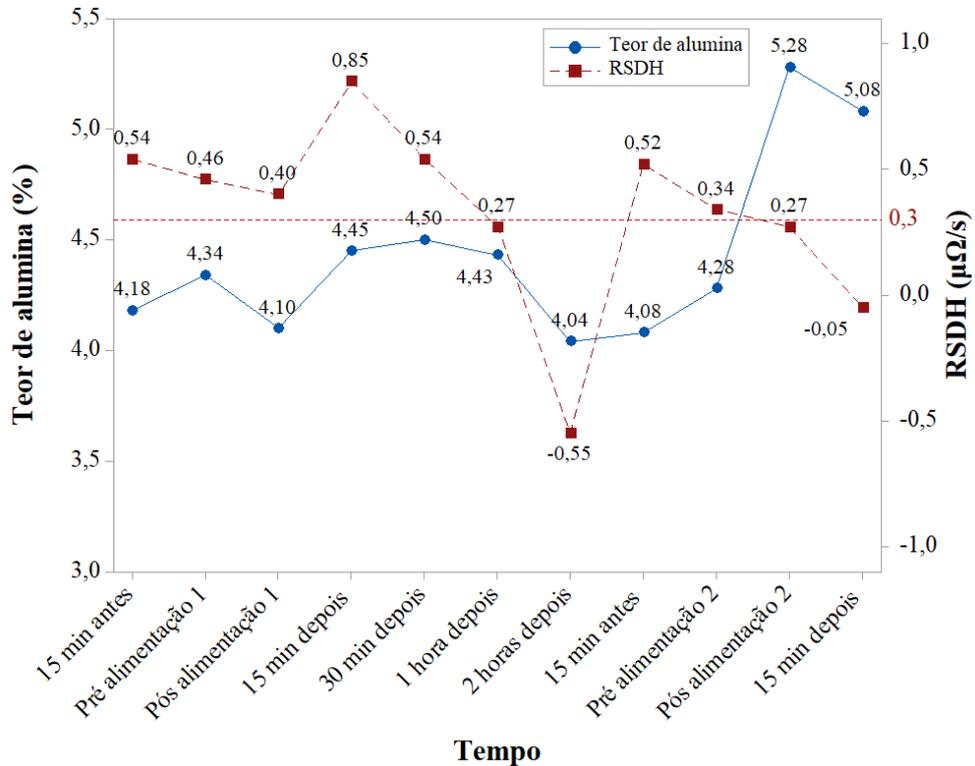
Fonte: Do autor (2020).

Figura 27 – Teor de alumina e RSDH para a cuba 1168 (supersaturada).



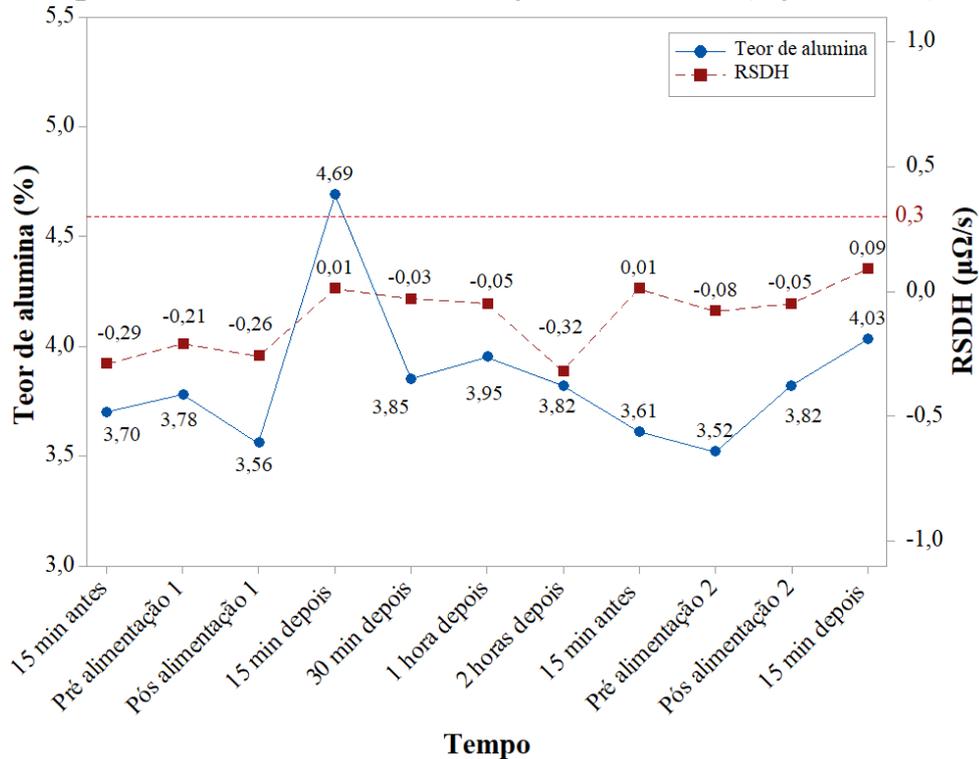
Fonte: Do autor (2020).

Figura 28 – Teor de alumina e RSDH para a cuba 1169 (operação normal).



Fonte: Do autor (2020).

Figura 29 – Teor de alumina e  $R_{SDH}$  para a cuba 1272 (supersaturada).



Fonte: Do autor (2020).

Ao analisar as médias das cubas mais novas (1167 e 1168) na Tabela 5, é perceptível que, considerando o desvio padrão, novamente é não é possível afirmar que há uma diferença estatística entre os valores médios de  $R_{SDH}$ . Entretanto, ao analisar a Figura 26 e 27, é notável que o comportamento da curva da derivada histórica da resistência da cuba 1168 (supersaturada) é mais constante, bem como o comportamento da sua curva de teor de alumina. Dessa forma, julgar os resultados apenas pelo valor médio é um erro, visto que o comportamento das curvas e sua tendência são relevantes para a interpretação do processo.

Ao avaliar os dados das cubas mais velhas na Tabela 5 e nas Figuras 28 e 29, é possível notar que a cuba 1272 (supersaturada) apresentou uma média de  $R_{SDH}$  negativa, enquanto a 1169 apresentou valores de operação razoáveis. Ao avaliar o desvio padrão de ambas as cubas, observa-se que a com operação normal (1169) possui um maior desvio que a 1272 (supersaturada). E esse dado comprova que a cuba com operação normal (1169) tem maior capacidade de consumo e dissolução de alumina, como se comprova na Figura 28. Já a cuba 1272 (supersaturada), nota-se que não possui capacidade de consumo (queda no teor de alumina) nem elevação e queda abrupta de resistência nas alimentações. Sendo assim, é possível observar na Figura 29 que a curva  $R_{SDH}$  permanece abaixo de  $0,30 \mu\Omega/s$  ao longo de todo o intervalo amostrado, tendo, portanto, grandes possibilidades de que em uma próxima alimentação ocorra sinalização de supersaturação novamente (Derivada Baixa).

Como é possível observar nas Figura 26 e 28, em cubas com operação normal há um aumento da  $R_{SDH}$  quando se aproxima da alimentação; isso se deve ao fato de a derivada da resistência aumentar na ausência de alumina e diminuir quando há presença da mesma no banho (BRAGA, 2008). Já nas cubas supersaturadas, 1168 e 1272, é possível notar que a elevação e descida nas alimentações atingem patamares menores de  $R_{SDH}$  na primeira alimentação e não apresentam variação notável na segunda alimentação, como mostram as Figuras 27 e 29. Quando são comparadas as cubas com operação normal (1167 e 1169) com as de operação supersaturada (1168 e 1272), é possível notar que as de operação normal atingem patamares bem maiores de  $R_{SDH}$  na pré alimentação e comportamento de queda abrupta na pós alimentação.

Assim, foi possível observar a influência da derivada histórica da resistência em função do teor de alumina no eletrólito, bem como avaliar esse comportamento em cubas eletrolíticas supersaturadas.

## 5 CONCLUSÕES

Foi possível avaliar que o comportamento da derivada histórica da resistência se relaciona de forma significativa com o teor de alumina. Além disso, foi comprovado que o comportamento das cubas supersaturadas em comparação das com operação normal é destoante e impactante na capacidade produtiva, já que suas curvas de teor de alumina e de  $R_{SDH}$  se mantêm mais estáveis. Sendo assim, não há um consumo de alumina significativo nessas cubas supersaturadas e conseqüentemente não há produção de alumínio. Portanto, continuar alimentando-as sem tomar diferentes medidas de correção relacionadas a outros parâmetros de processo seria negligência.

As cubas com operação normal, 1167 e 1169, tiveram uma média de teor de alumina de  $3,79 \pm 0,58$  e  $4,43 \pm 0,40$ , respectivamente. Já as cubas supersaturadas, 1168 e 1272, apresentaram uma média de teor de alumina de  $3,91 \pm 0,41$  e  $3,85 \pm 0,32$ , respectivamente. Quando avaliadas em comportamento, as supersaturadas possuem maior estabilidade da curva, o que é prejudicial ao processo.

Quando comparadas em relação à idade, foi possível comprovar que as cubas com idade mais avançada possuem maior capacidade de recuperação aos eventos de supersaturação e, por isso, possuem menor incidência dos mesmos. Dessa forma, se faz necessário tomar tratativas diferentes para corrigir esse problema nas cubas mais novas, bem como avaliar a sistemática de alimentação de maneira distinta e os parâmetros de processo individualmente.

Além disso, foram obtidos os resultados da média da derivada histórica da resistência ( $R_{SDH}$ ) para as cubas com operação normal (1167 e 1169), de  $0,13 \pm 0,79 \mu\Omega/s$  e  $0,33 \pm 0,37 \mu\Omega/s$ , respectivamente. Com relação ao comportamento da curva de  $R_{SDH}$ , apresentou tendência de subida antes da alimentação e descida após a introdução da alumina, ultrapassando o limite de  $0,30 \mu\Omega/s$  em alguns momentos. Esse comportamento se relaciona de forma inversamente proporcional com a curva da alumina, já que ao contrário da  $R_{SDH}$ , a curva do teor de alumina tem comportamento de queda na pré alimentação e subida após a introdução da alumina.

As cubas supersaturadas, 1168 e 1272, apresentaram resultados de  $R_{SDH}$  de  $0,16 \pm 0,18 \mu\Omega/s$  e  $-0,12 \pm 0,14 \mu\Omega/s$ , respectivamente. Mesmo com um valor médio maior de  $R_{SDH}$  em uma das cubas supersaturadas, nota-se que seu comportamento possui perfil constante com relação as cubas com operação normal.

Dessa maneira, foi possível observar nesse trabalho que maiores valores médios de teor de alumina não significam que a cuba está supersaturada. Portanto, percebe-se que não é válido avaliar o teor de alumina e a derivada histórica da resistência pelo valor médio dentro do

intervalo de tempo amostrado e sim pela tendência e comportamento da curva. Com base nesses comportamentos, foi possível observar que as cubas supersaturadas possuem um comportamento mais estável de teor de alumina e derivada histórica da resistência, devido aos fenômenos de reoxidação e retroalimentação que ocorrem nessas cubas. Além disso, foi possível observar uma maior capacidade de recuperação das cubas mais velhas possivelmente devido a característica da sua camada de banho solidificado, o que proporciona paredes do catodo menos inclinadas, o que, conseqüentemente propicia uma melhor velocidade de dissolução da alumina no banho eletrolítico.

Sendo assim, para entender melhor os eventos de supersaturação, se faz importante analisar os parâmetros de processo de cada cuba, como temperatura de operação, %AlF<sub>3</sub> em excesso, fluorita, e avaliar como eles interferem na variação da solubilidade ao longo do tempo em comparação com o teor de alumina presente.

Através desse trabalho houve a implementação e padronização de ações de melhoria relacionadas a procedimento operacionais e sugestões de alterações no sistema de controle que precisam ser estudadas e analisadas mais profundamente.

## **5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

Considerando o ambiente industrial e um processo tão complexo e com tantas variáveis de processo, o desenvolvimento desse trabalho foi repleto de desafios e adversidades, que são completamente diferentes dos que habitualmente são encontrados em um estudo acadêmico. Trabalhar com metalurgia tendo como base a formação generalista da engenharia química, foi uma grande oportunidade de especialização e desenvolvimento de um potencial diferencial.

Para a CBA, esse trabalho representa uma oportunidade de início de melhoria do processo produtivo em uma área ainda pouco explorada e repleta de oportunidades. Além disso, esse estudo visa contribuir para um futuro com resultados ainda mais promissores para a empresa.

Esse trabalho apresenta inúmeras oportunidades de melhoria e diante do que foi abordado, algumas sugestões para futuros estudos foram elencadas. Para melhor comparação entre cubas, seria mais adequado utilizar a mesma quantidade de alumina adicionada. Outro ponto considerável seria avaliar em faixas de vida mais específicas a frequência de eventos de Derivada Baixa e propor tratativas e sistemáticas de alimentações específicas para cada faixa etária.

Ademais, para evitar contaminações na amostragem de banho eletrolítico se faz importante não utilizar a vara de eucalipto e realizar a raspagem da crosta, retirando a alumina depositada em sua superfície antes de realizar o furo.

Seria interessante também realizar a amostragem ao longo das 8 horas anteriores a alimentação, intervalo esse em que são avaliados os valores de derivada histórica da resistência para geração de evento de Derivada Baixa. Além disso, seria relevante analisar valores de  $\%AlF_3$  em excesso, fluorita e temperatura a cada amostra retirada, para então calcular a solubilidade a cada ponto e analisar como esses parâmetros impactam na dissolução da alumina no banho.

Outros dois parâmetros que têm grande impacto no processo e na solubilidade são o nível de banho eletrolítico e de metal. Para diferentes níveis de banho e mesma quantidade de alimentação de alumina, seria interessante avaliar a frequência dos eventos de supersaturação. Em relação ao nível de metal, o mesmo é relevante pois quanto maior a coluna de metal líquido, menor a chance de reoxidação. Isso acontece pois, com uma coluna de metal mais elevada e conseqüentemente mais pesada, o campo magnético tem maior dificuldade de projetar o metal em direção ao anodo, evitando ocorrer a reoxidação do alumínio metálico e conseqüente geração de alumina.

## REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO. **Alumínio: cadeia primária**. 2020. Disponível em: <http://abal.org.br/aluminio/vantagens-do-aluminio/>. Acesso em: 17 out. 2020.
- BAGSHAW, A. W. *et al.* **Effect of Operating Conditions on Dissolution of Primary and Secondary (reacted) Alumina Powders in Electrolytes**. University of Auckland. New Zeland. Light Metals 1985. p. 649-58.
- BRAGA, C. A. P. *et al.* **Sintonia do filtro de Kalman para medição indireta das variáveis de estado no banho eletrolítico**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2008.
- CASTRO, E. C. C. **A dinâmica da cadeia produtiva do alumínio no estado do Pará: uma análise de insumo-produto**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2011.
- COMPANHIA BRASILEIRA DE ALUMÍNIO. **Produtos: produtos primários**. Disponível em: <https://cba.com.br/produtos/produtos-primarios/>. Acesso em: 17 out. 2020.
- HAVERKAMP, R. G. **Eliminating Anode Effects**. Light Metals. 1999. p. 285-287.
- IVO, L. V. M. **Algoritmo de Controle, CBA – Sala 125 KA VII**. ATAN. 2007.
- MARINHO, D. C. **Estudo da dissolução da alumina no banho eletrolítico na produção de alumínio primário em cubas de tecnologia VSS Soderberg**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019.
- MARQUITTI, L. P. A. **Análise da Emissão de Fluoreto de Hidrogênio Durante Atividades Operacionais em Cubas Eletrolíticas**. Orientador: Maria Gabriela Nogueira Campos. 2014. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) - Universidade Federal de Alfenas, Alfenas, 2014.
- MOURA, F. E. *et al.* **Avaliação do sistema de alimentação de alumina no processo hall-hérout na alumar**. 2001. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, 2001.
- QUALITECR. **Anodo pré-cozido e Anodo Soderberg**. Disponível em: <http://qualitecr.blogspot.com/2013/07/anodo-pre-cozido-e-anodo-soderberg.html>. Acesso em: 14 nov. 2020.
- SEVERO, D.S; GUSBERTI, V. **Curso sobre revestimento e balanço térmico de cubas eletrolíticas de alumínio**. Votorantim CBA. 2015.

- SILVA, F. V. **Otimização de Modificadores de Resistência para Controle de Temperatura de Células de Produção de Alumínio Através da Metodologia de Planejamento de Experimentos**. 2012. 73f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Centro de Ciência e Tecnologia, Universidade de Campina Grande, Campina Grande, 2012.
- SILVA, G. **Manual de Metalurgia do Alumínio. Treinamento Operacional**. Votorantim CBA. Alumínio, 1997.
- THONSTAD, J. **Semicontinuous Determination of the Concentration of Alumina in Electrolyte of Aluminum Cells**. Metallurgical Transactions. V 8B, 1977, p.125-130.
- USGS. **Bauxite and Alumina Data Sheet. Mineral Commodity Summaries**. 2020. Disponível em: <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2020/mcs2020-bauxite-alumina.pdf>. Acesso em: 14 nov. 2020.
- ZANGIACOMI, C. E. **Projeto e operação de cubas eletrolíticas para a indústria de alumínio**. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2006.