

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
CURSO DE ENGENHARIA QUÍMICA**

CAROLINE DE OLIVEIRA COELHO

**AVALIAÇÃO DO INDICADOR DE DESEMPENHO “FREQUÊNCIA
DE EFEITO ANÓDICO” NA INDÚSTRIA DE ALUMÍNIO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**Londrina
2025**

CAROLINE DE OLIVEIRA COELHO

**AVALIAÇÃO DO INDICADOR DE DESEMPENHO “FREQUÊNCIA
DE EFEITO ANÓDICO” NA INDÚSTRIA DE ALUMÍNIO**

**PERFORMANCE EVALUATION OF THE INDICATOR “ANODE
EFFECT FREQUENCY” IN THE ALUMINUM INDUSTRY**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Química da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, *Campus* Londrina, como requisito parcial à obtenção do título de Engenheira Química.

Orientador: Prof. Dr. Lucas Bonfim Rocha

Londrina

2025



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

Esta licença permite download e compartilhamento do trabalho desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es), sem a possibilidade de alterá-lo ou utilizá-lo para fins comerciais. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

CAROLINE DE OLIVEIRA COELHO

AVALIAÇÃO DO INDICADOR DE DESEMPENHO “FREQUÊNCIA DE EFEITO ANÓDICO” NA INDÚSTRIA DE ALUMÍNIO

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação apresentado como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 18/janeiro/2025

Lucas Bonfim Rocha
Doutorado
Orientador
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Felipi Luiz de Assunção Bezerra
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Luciano de Jesus Miranda
Graduação
Companhia Brasileira de Alumínio

LONDRINA

2025

AGRADECIMENTOS

À minha mãe, Elaine, e meu pai, Renato, que com seu amor incondicional, apoio incansável e sacrifícios, me permitiram crescer e perseguir meus sonhos. Sua força e determinação são minha inspiração. Vocês são os meus heróis, os meus modelos de vida e o meu amor por vocês é eterno.

À minha avó, Maria, que embora não esteja mais conosco, deixou um legado de amor, sabedoria e força. Sua memória vive em meu coração e me deu forças ao longo de minha jornada.

À minha irmã, Yasmin, que é minha amiga, minha confidente e minha parceira de aventuras.

Ao meu irmão, Adam, que me traz alegria e energia com sua curiosidade e entusiasmo pelas coisas.

À minha sobrinha e afilhada, Alice, por nos presentear com sua personalidade e carisma únicas.

À minha irmã mais velha, Renata, que desde pequena foi minha parceira de brincadeiras e melhor amiga. Agradeço por te ter em minha vida.

À minha prima, Ellen, que compartilhou comigo momentos inesquecíveis durante o tempo em que moramos juntas.

Às minhas amigas, Ana Laura, Giovana e Júlia, pelo apoio, motivação, risadas e lágrimas. Vocês são minhas irmãs de alma e amigas verdadeiras.

Ao meu professor orientador, Lucas Bonfim, que me guiou com sabedoria e paciência. Sua orientação foi fundamental para o sucesso deste trabalho.

Ao meu supervisor, Luciano Miranda, e ao meu coordenador, Hildo Severino, que me proporcionaram a oportunidade de desenvolver este projeto e me apoiaram em todos os momentos.

Agradeço a todos vocês por fazerem parte desta jornada. Este trabalho é dedicado a vocês, com amor, gratidão e admiração.

COELHO, Caroline de Oliveira. Avaliação do indicador de desempenho “frequência de efeito anódico” na indústria de alumínio. 94 f. TCC (Curso de Engenharia Química), Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Londrina, 2025.

RESUMO

O alumínio é o terceiro elemento mais comum na crosta terrestre e o metal mais abundante. Suas principais características incluem leveza, boa condutividade elétrica, alta resistência à corrosão e baixo ponto de fusão, o que facilita seu uso em diversos produtos. O alumínio é central na economia global, sendo utilizado em setores como transporte, construção, embalagens, tintas, produtos químicos e farmacêuticos, além de ser importante na busca pela transição energética e por materiais leves e recicláveis necessários na produção de veículos elétricos. Ao longo do processo de obtenção do alumínio, o óxido de alumínio é consumido progressivamente e, quando sua concentração reduz abaixo de 2%, começa a ocorrer o fenômeno de efeito anódico, devido ao favorecimento de reações paralelas, resultando na formação de gases perfluorcarbono que se aderem ao anodo e formam uma fina camada isolante de gás e elevam a tensão na cuba, o que gera impactos ambientais e energéticos. Este estudo de caso, realizado na Companhia Brasileira de Alumínio, visa analisar o efeito anódico na produção de alumínio primário, buscando entender suas causas, consequências e métodos de gerenciamento. Para isso, investigou-se como monitorar e controlar a frequência do efeito anódico abaixo de 0,55 e estimou-se seu impacto no consumo de energia e na emissão de poluentes. A metodologia utilizada foi o ciclo PDCA, em formato de relatório A3. Foram realizados, ao longo do estudo, dois relatórios A3, o primeiro em outubro de 2023 e o segundo em abril de 2024, que tiveram como ações as análises da influência dos parâmetros de processo na frequência de efeito anódico, plano de conscientização de técnicos e operadores, com direcionamento à realização de funil de resolução de problemas, criação de aplicativo para realização desses funis e análise e acompanhamento da granulometria do óxido de alumínio. O método PDCA foi uma ferramenta eficaz para a análise da frequência de efeito anódico na indústria de alumínio, uma vez que se atingiu o objetivo de mantê-la abaixo de 0,55. O último mês obteve frequência de 0,52, mostrando uma redução de 36% em comparação ao início do estudo, com frequência de 0,81 em abril de 2023. O consumo de energia por efeito anódico foi estimado em 960 MWh por mês, o que idealmente seria em torno de 320 MWh, aumentando o custo de produção em R\$400 mil. As emissões mensais de gás carbônico foram estimadas em 5,5 mil toneladas. Além disso, os gases perfluorcarbonos, apesar de serem gerados em menores quantidades, possuem alto potencial de aquecimento global e são responsáveis diretos pelo aumento de tensão e consumo de energia na ocorrência de efeito anódico.

Palavras-chave: Efeito anódico. Alumínio. Consumo energético. Gestão da qualidade.

COELHO, Caroline de Oliveira. Assessment of the performance indicator “anodic effect frequency” in the aluminum industry. 94 p. TCC (Course of Chemical Engineering) - Federal University of Technology – Paraná (UTFPR). Londrina, 2025.

ABSTRACT

Aluminum is the third most common element in the Earth's crust and the most abundant metal. Its main characteristics include lightness, good electrical conductivity, high resistance to corrosion, and low melting point, which facilitates its use in several products. Aluminum is central to the global economy, being used in sectors such as transport, construction, packaging, paints, chemicals, and pharmaceuticals, as well as being important in the search for the energy transition and for lightweight and recyclable materials needed in the production of electric vehicles. Throughout the aluminum emission process, aluminum oxide is progressively consumed and when its concentration reduces below 2%, the anodic effect begins to occur due to the favoring of parallel reactions, resulting in the formation of perfluorocarbon gases that adhere to the anode and form a thin layer of gas insulation and increase the voltage in the tank, which generates environmental and energy impacts. This case study, carried out at Companhia Brasileira de Alumínio, aims to analyze the anode effect in the production of primary aluminum, seeking to understand its causes, consequences and management methods. To this end, was investigated how to monitor and control the frequency of the anode effect below 0.55 and estimated its impact on energy consumption and pollutant emissions. The methodology used was the PDCA cycle, in A3 report format. During the study, two A3 reports were carried out, the first in October 2023 and the second in April 2024, which included analyzes of the influence of process parameters on the frequency of the anode effect, an awareness plan for technicians and operators aimed at carrying out problem-solving funnels, creating an application to carry out these funnels and analyzing and monitoring the granulometry of aluminum oxide. The PDCA method was an effective tool for analyzing the anode effect frequency in the aluminum industry since the objective of keeping it below 0.55 was achieved. In the last month, there was a frequency of 0.52, a 36% reduction compared to the beginning of the study, with a frequency of 0.81 in April 2023. Anode effect energy consumption was estimated at 960 MWh per month, which ideally would be around 320 MWh, increasing the production cost by R\$400 thousand. Monthly carbon dioxide emissions were estimated at 5.5 thousand tons. Furthermore, perfluorocarbon gases, despite being generated in smaller quantities, have a high global warming potential and are directly responsible for the increase in voltage and energy consumption in the event of the anode effect.

Keywords: Anode effect. Aluminum. Energy consumption. Quality management.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Produção anual de alumínio primário	11
Figura 2 – Crescimento no consumo de alumínio por mercados no terceiro trimestre de 2024	11
Figura 3 – Processo de obtenção de alumínio primário.....	20
Figura 4 – Etapas do Processo Bayer	21
Figura 5 – Etapas do Processo Hall-Hérout.....	23
Figura 6 – Desenho esquemático de uma célula eletrolítica de redução.....	24
Figura 7 – Metodologia 5S.....	30
Figura 8 – Ciclo PDCA	32
Figura 9 – Fluxograma da metodologia PDCA.....	37
Figura 10 – Primeiro Relatório A3.....	41
Figura 11 – Gráfico da frequência de efeito anódico entre abril de 2023 e outubro de 2023	42
Figura 12 – Gráfico da frequência de efeito anódico por turno.....	43
Figura 13 – Gráfico da frequência de efeito anódico por grupo de cubas.	44
Figura 14 – Gráfico de Pareto de Causas entre os meses de abril e outubro de 2023	51
Figura 15 – Gráfico de Pareto de Causas dos Grupos A/B entre os meses de abril e outubro de 2023	52
Figura 16 – Gráfico de Pareto de Causas dos Grupos C/D/E entre os meses de abril e outubro de 2023	52
Figura 17 – Gráfico de Pareto de Causas do Turno 1 entre os meses de abril e outubro de 2023	53
Figura 18 – Gráfico de Pareto de Causas do Turno 2 entre os meses de abril e outubro de 2023	53
Figura 19 – Gráfico de Pareto de Causas do Turno 3 entre os meses de abril e outubro de 2023	54
Figura 20 – Análise da influência de Quebra Preventiva na frequência de efeito anódico.	57
Figura 21 – Análise da influência de Afogamento na frequência de efeito anódico.	57
Figura 22 – Análise da influência de Pata na frequência de efeito anódico.	58
Figura 23 – Análise da influência de Temperatura na frequência de efeito anódico.	58

Figura 24 – Análise da influência de Nível de Banho na frequência de efeito anódico.....	59
Figura 25 – Análise da influência de Nível de Metal na frequência de efeito anódico.....	59
Figura 26 – Análise da influência de Nível de Líquidos na frequência de efeito anódico.....	60
Figura 27 – Exemplo de resumos contidos no e-mail de acompanhamento da frequência de efeito anódico.....	61
Figura 28 – Gráfico da frequência de efeito anódico entre outubro de 2023 e abril de 2024.....	63
Figura 29 – Segundo Relatório A3.....	64
Figura 30 – Gráfico de Pareto de Causas entre novembro de 2023 e abril de 2024.....	70
Figura 31 – Gráfico de Pareto de Causas dos Grupos A/B entre novembro de 2023 e abril de 2024.....	71
Figura 32 – Gráfico de Pareto de Causas dos Grupos C/D/E entre novembro de 2023 e abril de 2024.....	71
Figura 33 – Gráfico de Pareto de Causas do Turno 1 entre novembro de 2023 e abril de 2024.....	72
Figura 34 – Gráfico de Pareto de Causas do Turno 2 entre novembro de 2023 e abril de 2024.....	72
Figura 35 – Gráfico de Pareto de Causas do Turno 3 entre novembro de 2023 e abril de 2024.....	73
Figura 36 – Análise da influência granulométrica na frequência de efeito anódico - Grupo A/B.....	77
Figura 37 – Análise da influência granulométrica na frequência de efeito anódico - Grupo C/D/E.....	77
Figura 38 – Interface do modelo antigo (manuscrito) do funil de resolução de problemas.....	80
Figura 39 – Interface do aplicativo atual (online) do funil de resolução de problemas.....	81
Figura 40 – Análise dos problemas relatados nos funis.....	82
Figura 41 – Gráfico da frequência de efeito anódico entre abril de 2023 e abril de 2024.....	83

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Problemas relatados entre os meses de abril e outubro de 2023. .	46
Tabela 2 – Problemas relatados nos grupos A/B entre os meses de abril e outubro de 2023	47
Tabela 3 – Problemas relatados nos grupos C/D/E entre os meses de abril e outubro de 2023	48
Tabela 4 – Problemas relatados no turno 1 entre os meses de abril e outubro de 2023.....	49
Tabela 5 – Problemas relatados no turno 2 entre os meses de abril e outubro de 2023.....	50
Tabela 6 – Problemas relatados no turno 3 entre os meses de abril e outubro de 2023.....	51
Tabela 7 – Planos de ação definidos em brainstorming no primeiro A3 realizado	56
Tabela 8 – Problemas relatados entre novembro de 2023 e abril de 2024.....	65
Tabela 9 – Problemas relatados nos grupos A/B entre novembro de 2023 e abril de 2024	66
Tabela 10 – Problemas relatados nos grupos C/D/E entre novembro de 2023 e abril de 2024	67
Tabela 11 – Problemas relatados no turno 1 entre novembro de 2023 e abril de 2024	68
Tabela 12 – Problemas relatados no turno 2 entre novembro de 2023 e abril de 2024	69
Tabela 13 – Problemas relatados no turno 3 entre novembro de 2023 e abril de 2024	70
Tabela 14 – Planos de ação definidos no segundo A3 realizado.....	74
Tabela 15 – Análise da influência granulométrica na frequência de efeito anódico - Grupo A/B.....	75
Tabela 16 – Análise da influência granulométrica na frequência de efeito anódico - Grupo C/D/E.....	76
Tabela 17 – Agrupamento da análise granulométrica vs efeito anódico no Grupo A/B	78
Tabela 18 – Agrupamento da análise granulométrica vs efeito anódico no Grupo C/D/E	78

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
1.1	PRODUÇÃO DE ALUMÍNIO	10
1.2	ANÁLISE DE QUALIDADE NA INDÚSTRIA DE ALUMÍNIO	14
1.3	JUSTIFICATIVA	18
1.4	OBJETIVO	18
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1	PROCESSO DE OBTENÇÃO DO ALUMÍNIO	19
2.2	ESTUDOS DA LITERATURA SOBRE O EFEITO ANÓDICO	25
2.3	FERRAMENTAS DE GESTÃO DA QUALIDADE	29
2.3.1	Programa 5S	29
2.3.2	Ciclo PDCA	31
2.3.3	Relatório A3	33
2.3.4	Ferramentas básicas da qualidade	34
3	METODOLOGIA	36
3.1	PLANEJAMENTO	38
3.2	DESENVOLVIMENTO	38
3.3	CHECAGEM	39
3.4	AÇÃO	39
3.5	ASPECTOS ENERGÉTICOS E AMBIENTAIS	40
3.5.1	Cálculo do consumo de energia	40
3.5.2	Cálculo da emissão de gases de efeito estufa	40
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	41
4.1	PRIMEIRO RELATÓRIO A3	41
4.1.1	Planejamento 1	42
4.1.2	Desenvolvimento 1	56
4.1.3	Checagem 1	63
4.1.4	Ação 1	64
4.2	SEGUNDO RELATÓRIO A3	64
4.2.1	Planejamento 2	65
4.2.2	Desenvolvimento 2	74
4.2.3	Checagem 2	82
4.2.4	Ação 2	83
4.3	ASPECTOS ECONÔMICOS E AMBIENTAIS	83
4.3.1	Cálculo do consumo de energia	83
4.3.2	Cálculo da emissão de gases de efeito estufa	84
5	CONCLUSÕES	85
	REFERÊNCIAS	87
	ANEXO A – FERRAMENTAS DE MELHORIA CONTÍNUA (A3)	93

1 INTRODUÇÃO

1.1 PRODUÇÃO DE ALUMÍNIO

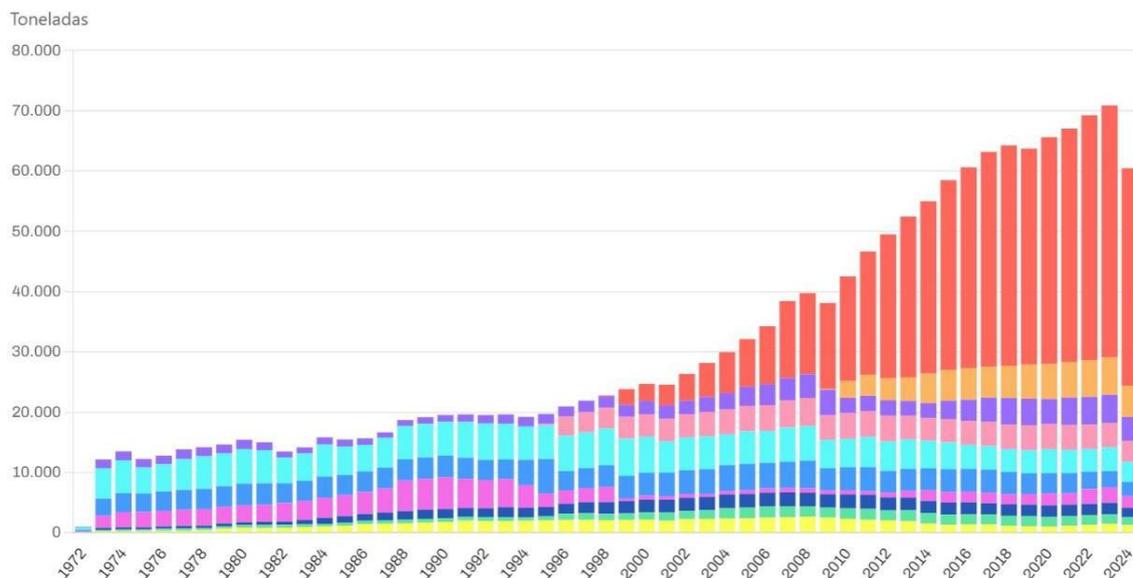
O alumínio ocupa a posição de terceiro elemento mais prevalente na crosta terrestre e destaca-se como o metal mais abundante. Suas características são leveza, excelente condutividade elétrica, alta resistência à corrosão e ponto de fusão relativamente baixo, que favorecem sua aplicação na fabricação de diversos produtos, como ligas metálicas, materiais laminados e extrudados. A produção de alumínio traz um destaque central na economia mundial, devido ao seu uso diversificado em setores como transporte, construção civil, embalagens, tintas, produtos químicos e farmacêuticos (CARDOSO, J. G. R. et al., 2011).

Nos últimos anos, a utilização do alumínio tem crescido pela transição energética e pela busca por materiais leves e recicláveis, indispensáveis na produção de veículos elétricos e infraestrutura de energia renovável (REVISTA ALUMÍNIO, 2023).

Como mostra o gráfico da Figura 1, fica evidente o crescimento da produção de alumínio ao longo dos anos, o qual mostra um aumento de 5,1% em 2022 em relação ao ano anterior, produzindo 811 mil toneladas e de 24% no ano de 2023, alcançando 1,006 milhões de toneladas, de acordo com informações da Metalthaga (2024). Vale ressaltar que, com o crescimento da capacidade de refinarias e smelters no Brasil nos últimos anos, uma significativa parte da produção de bauxita começou a ser utilizada internamente. Esse fato levou o nosso país a alcançar a autossuficiência na fabricação de alumínio primário, o que permitiu que a indústria nacional de produtos processados fosse devidamente abastecida.

O aumento expressivo na produção é atribuído à reabertura do complexo industrial da Alumar, situado no Maranhão, em 2022, após um extenso período de paralisação que teve início em 2015 (METALTHAGA, 2024). O ano de 2024 apresentou uma redução na produção de alumínio primário, segundo a produtora de alumínio Hydro (2024), principalmente devido à redução da contribuição das vendas de energia, aumento do custo de alumina, energia e inflação.

Figura 1 – Produção anual de alumínio primário.



Fonte: International Aluminium Institute (IAI), 2024.

Apesar desse declínio na produção em 2024, no terceiro trimestre do mesmo ano, a Figura 2 mostra que o consumo do metal aumentou em diversos setores, como energia, construção civil, bens de consumo, embalagens, transportes, máquinas e equipamentos. Isso pode ser atribuído às características positivas desse material e à sua versatilidade.

Figura 2 – Crescimento no consumo de alumínio por mercados no terceiro trimestre de 2024.



Fonte: Associação Brasileira do Alumínio (ABAL), 2024.

De acordo com o portal de notícias O Económico (2024), a China tem se mostrado o maior produtor mundial de alumínio, o que representa mais da metade da produção global. Possui uma vantagem competitiva que se baseia em uma ampla disponibilidade de matérias-primas e nas últimas décadas obteve uma capacidade industrial significativamente ampliada. No entanto, a produção chinesa vem enfrentando críticas internacionais por causa do uso intensivo de carvão como fonte de energia, o que aumenta sua pegada de carbono. Paralelamente, outros países, como Rússia, Austrália, Estados Unidos, Noruega e Índia, representados pelas empresas Rusal, Rio Tinto, Alcoa, Hydro e Vedanta, respectivamente, investem na produção de alumínio de baixo carbono, utilizando energia hidrelétrica e outras fontes renováveis como diferencial competitivo (CHALCO ALUMINUM, 2024).

Por outro lado, o mercado global de alumínio também vem sofrendo impactos por tensões geopolíticas, como sanções econômicas e disputas comerciais, que afetam a cadeia de suprimentos e os custos de produção. A guerra na Ucrânia, por exemplo, trouxe incertezas para a produção russa, que é uma das principais exportadoras de alumínio do mundo, de acordo com Cooper Metal (2022). Ao mesmo tempo, há esforços crescentes para aumentar a reciclagem de alumínio, que consome apenas 5% da energia necessária na produção de alumínio primário, promovendo uma economia mais circular e sustentável para o setor.

O Brasil ocupa uma posição de destaque na cadeia de produção de alumínio, devido à abundância de bauxita, a matéria-prima essencial para sua fabricação. O país é um dos maiores produtores e exportadores de bauxita no mundo, concentrando suas principais jazidas na região Norte, especialmente no estado do Pará, onde está localizada a maior mina de bauxita do planeta, em Trombetas, segundo o Observatório da Mineração (2020). Essa riqueza natural permite que o Brasil se destaque na exportação de alumina e alumínio primário, apesar de enfrentar desafios relacionados à competitividade internacional e aos altos custos de energia elétrica, um insumo essencial para o processo de eletro-redução.

Além disso, a matriz energética do Brasil também desempenha um papel importante na produção de alumínio, pois apresenta uma forte predominância de

fontes renováveis e limpas. Com mais de 60% da sua energia elétrica gerada por usinas hidrelétricas, o país oferece um cenário propício para a produção desse metal, que demanda grandes quantidades de energia para o processo de eletrólise. Essa característica da matriz energética brasileira torna a produção de alumínio mais sustentável e competitiva em relação a outros países, onde a geração de energia depende mais de fontes fósseis.

O crescimento da produção de alumínio no Brasil nos últimos anos tem sido impulsionado pela expansão de setores estratégicos como construção civil, transporte e embalagens (METALTHAGA, 2024). A leveza e durabilidade do alumínio o tornam um material muito utilizado na fabricação de janelas, portas, cabos elétricos, automóveis e latas de bebidas.

O segmento de reciclagem também é um ponto forte do mercado nacional, destacando-se como um exemplo de excelência global. O Brasil assume a liderança mundial em reciclagem de latas de alumínio, com taxas acima de 95%, conforme apontado pelo O Económico (2024). Esse desempenho notável demonstra a eficácia do país em promover uma economia circular no segmento, reforçando o compromisso com práticas sustentáveis e responsabilidade ambiental.

Apesar desses avanços, o setor enfrenta desafios para sustentar seu crescimento, como a dependência de energia elétrica a custos competitivos e a necessidade de investimentos em tecnologia de baixo carbono. Iniciativas recentes, como a adoção de fontes renováveis para alimentar os processos produtivos e o fortalecimento da infraestrutura logística, têm buscado tornar a produção nacional mais sustentável e eficiente. Além disso, as empresas do setor estão cada vez mais alinhadas às demandas do mercado internacional, que prioriza produtos com menor impacto ambiental, garantindo competitividade e relevância do Brasil no cenário global.

Com relação às aplicações, as ligas de alumínio desempenham um papel essencial em diversos setores industriais devido à sua combinação única de leveza, resistência mecânica, durabilidade e alta resistência à corrosão, como aponta Cooper Metal (2024). No setor automotivo, essas ligas são amplamente utilizadas para a fabricação de componentes como chassis, rodas, painéis de carroceria e blocos de motor, contribuindo para a redução de peso dos veículos.

Isso resulta em maior eficiência energética e menor emissão de gases de efeito estufa, especialmente em veículos elétricos, nos quais a demanda por materiais leves é de extrema importância para otimizar a autonomia das baterias.

Na indústria aeronáutica, as ligas de alumínio são fundamentais para a construção de fuselagens, asas e outros componentes estruturais. Sua alta relação resistência-peso permite a fabricação de aeronaves mais leves e eficientes, reduzindo os custos operacionais e o consumo de combustível. Outro aspecto relevante é que as ligas de alumínio tratadas termicamente oferecem excelente desempenho em condições extremas de pressão e temperatura, tornando-as ideais para aplicações aeroespaciais. A evolução tecnológica neste setor tem impulsionado o desenvolvimento de novas ligas com propriedades ainda mais avançadas (COOPER METAL, 2023a).

Outro segmento que se beneficia consideravelmente das ligas de alumínio é a construção civil. Elas são usadas tanto em projetos de infraestrutura, como pontes e sistemas de transporte ferroviário, quanto na fabricação de esquadrias, fachadas, coberturas e sistemas estruturais, devido à sua estética moderna, resistência à corrosão e facilidade de manutenção. A versatilidade dessas ligas também se aplica em equipamentos eletrônicos, embalagens de alimentos e bebidas, e até mesmo na fabricação de equipamentos médicos, evidenciando sua relevância em praticamente todos os segmentos industriais (COOPER METAL, 2023b).

1.2 ANÁLISE DE QUALIDADE NA INDÚSTRIA DE ALUMÍNIO

Com base na fabricante dinamarquesa de braços robóticos colaborativos industriais, Universal Robots (2022), os Indicadores-Chave de Desempenho (KPIs, do inglês Key Performance Indicators) são ferramentas fundamentais para a gestão organizacional, pois permitem medir, monitorar e avaliar o desempenho de processos e atividades em uma empresa. Sua contribuição para a solução de problemas reside na capacidade de transformar dados em informações acionáveis, proporcionando insights claros sobre o que precisa ser ajustado ou melhorado. Com KPIs bem estabelecidos, as organizações podem identificar gargalos, desvios e ineficiências antes que eles se convertam em problemas

maiores.

Uma das principais formas pelas quais os KPIs ajudam na resolução de problemas é por meio da identificação de tendências e padrões. Monitorando continuamente os indicadores, é possível perceber variações ou anomalias que sinalizam potenciais problemas. Por exemplo, uma queda na taxa de conversão de vendas pode indicar falhas no atendimento ao cliente ou estratégias de marketing ineficazes. A análise detalhada desses indicadores auxilia na identificação da causa raiz, facilitando a implementação de soluções direcionadas (UNIVERSAL ROBOTS, 2022).

Os KPIs também promovem uma comunicação clara e objetiva entre as equipes, alinhando todos os envolvidos em torno de metas e objetivos comuns. Quando os indicadores são compartilhados de maneira transparente, as equipes conseguem trabalhar de forma colaborativa para resolver problemas com base em dados concretos, em vez de suposições. Isso aumenta a eficiência na tomada de decisão e reduz o tempo necessário para implementar melhorias. Em contraste, um KPI mal definido pode direcionar esforços para áreas inadequadas (ARECO, 2019).

Por fim, os KPIs possibilitam a mensuração do impacto das soluções implementadas, garantindo que os ajustes efetuados realmente solucionem os problemas identificados. Eles permitem comparar o desempenho antes e depois de uma intervenção, fornecendo evidências objetivas sobre a eficácia das ações tomadas. Dessa forma, os KPIs não apenas ajudam a resolver problemas existentes, mas também contribuem para a melhoria contínua dos processos, auxiliando na otimização e eficiência organizacional.

Na indústria de alumínio são utilizados alguns Indicadores-Chave de Desempenho, que auxiliam na gestão do processo, como, por exemplo, pureza do alumínio produzido, consumo de energia, taxa de produção de alumínio, rendimento do processo e frequência de efeito anódico.

O parâmetro de pureza do alumínio mede a proporção de alumínio puro em comparação com as impurezas presentes no produto, sendo fundamental para assegurar que o material atenda às especificações de diversas aplicações, como construção civil, eletrônicos e aeroespacial. Expressa em percentuais, a pureza é monitorada por análises químicas avançadas, como espectroscopia,

essa métrica identifica problemas no processo e assegura a conformidade com padrões exigidos, melhorando a qualidade, eficiência e competitividade do alumínio produzido (PCC GROUP, 2020).

O indicador de desempenho do consumo de energia, expresso em quilowatt-hora por tonelada de alumínio produzido (kWh/t), mede a eficiência energética do processo, altamente intensivo em energia elétrica. Esse consumo reflete a energia necessária para converter a alumina em alumínio, sendo influenciado por fatores como a composição do banho eletrolítico, o design das cubas, a ocorrência de efeitos anódicos e perdas térmicas. Monitorado por sistemas automatizados, o indicador identifica ineficiências e orienta melhorias operacionais, como isolamento térmico, manutenção e controle de parâmetros. Sua otimização reduz custos, emissões de gases de efeito estufa e o impacto ambiental, além de aumentar a competitividade da produção (BURGHETTI e DANIEL, 2014).

O indicador de taxa de produção mede a eficiência e produtividade da fabricação de alumínio, geralmente expresso em toneladas por dia ou por cuba. Ele mede a quantidade de alumínio gerada em relação ao tempo e aos recursos utilizados, sendo impactado pela eficiência de corrente, design das cubas, qualidade da alumina e gestão operacional. É monitorado por sistemas automatizados e reflete a capacidade da planta de cumprir as metas de produção e identificar problemas operacionais, como falhas no sistema ou interrupções. Uma alta taxa de produção indica eficiência, redução de custos unitários e competitividade, enquanto melhorias podem ser alcançadas por meio de manutenção, modernização de equipamentos e gestão eficaz dos processos (ARECO, 2019).

O indicador de desempenho rendimento do processo mede a eficácia com que a alumina é convertida em alumínio no processo de eletrólise. Ele é calculado como a porcentagem de alumina convertida em alumínio em relação à alumina alimentada nas cubas eletrolíticas. Fatores como a eficiência eletrolítica, a qualidade da alumina e do eletrólito e o controle dos parâmetros operacionais (como temperatura e corrente elétrica) afetam esse rendimento. Um alto rendimento indica maior conversão de alumina em alumínio, reduzindo perdas de matéria-prima e energia, enquanto um baixo rendimento aponta

ineficiências no processo. Esse indicador é relevante na otimização de custos, aumento da sustentabilidade e competitividade na produção de alumínio (ARECO, 2019).

O índice de frequência de efeito anódico quantifica a incidência do efeito anódico em um intervalo específico durante o processo de eletrólise do alumínio. Este KPI é fundamental para analisar a estabilidade operacional das células de eletrólise e o grau de efetividade no gerenciamento do fornecimento de alumina, uma vez que são ocasionados pela escassez de matéria-prima no meio eletrolítico. A frequência do efeito anódico é calculada pela fórmula: *Frequência de Efeito Anódico (EA) = (Número de Efeitos Anódicos Totais em um Período) / (Número de Células em Operação × Tempo Operacional)*, sendo comumente utilizado um intervalo de 1 dia (CETESB, 2010).

Destes indicadores, um dos mais relevantes para a indústria química, tanto pelo fator ambiental, quanto energético é a frequência de efeito anódico. Segundo a Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) (2010), o efeito anódico, que ocorre durante a produção de alumínio, é resultado de um desequilíbrio eletroquímico na célula de eletrólise causado pela alimentação inadequada da matéria-prima: alumina. Esse fenômeno provoca a liberação de gases perfluorocarbonos (PFCs), como o tetrafluormetano (CF_4) e o hexafluoretano (C_2F_6), que possuem um impacto ambiental significativo devido ao seu elevado potencial de aquecimento global, sendo milhares de vezes mais potentes que o dióxido de carbono (CO_2). Ainda, esses gases permanecem na atmosfera por milhares de anos, contribuindo de forma expressiva para a intensificação das mudanças climáticas. No âmbito local, o efeito anódico também pode gerar poluentes que prejudicam a qualidade do ar em torno do ambiente, impactando diretamente a saúde dos funcionários.

No que tange à energia, o efeito anódico representa uma ineficiência substancial, já que a interrupção no equilíbrio da célula incrementa o consumo de energia elétrica, dado que o sistema requer energia adicional para restabelecer seu funcionamento apropriado. Considerando que o processo de eletrólise é altamente demandante em termos energéticos, consumindo cerca de 40% dos custos totais da produção primária de alumínio, esses episódios de efeito anódico impactam diretamente os custos operacionais do processo. Além

disso, o desgaste acelerado dos ânodos durante esses eventos exige trocas e manutenção mais regulares, resultando em custos adicionais e maior consumo de insumos (MASSARENTE, M. et al., 2013).

1.3 JUSTIFICATIVA

O controle eficiente do efeito anódico é essencial na indústria do alumínio, pois evita desequilíbrios na eletrólise, reduzindo o consumo de energia, emissões de gases poluentes (como PFCs) e o desgaste dos ânodos. Logo, seu acompanhamento e a proposta de ações de melhorias podem aumentar a eficiência do processo, prolongar a vida útil dos equipamentos e melhorar a qualidade do alumínio produzido, contribuindo para uma produção mais sustentável e economicamente viável, caracterizando um trabalho de ganhos efetivos para a indústria.

1.4 OBJETIVO

Como objetivo geral deste estudo de caso, busca-se acompanhar e analisar o efeito anódico no processo de produção de alumínio primário, compreendendo suas causas, consequências e métodos de gerenciamento, com o objetivo de aprimorar a eficiência operacional, reduzir custos energéticos e atenuar os impactos ambientais associados. Para atingir esse propósito, busca-se, de forma específica, identificar as causas centrais do efeito anódico durante o processo de eletrólise; avaliar os impactos do efeito anódico em termos de consumo de energia e emissões de gases poluentes; investigar as tecnologias e práticas empregadas para monitorar e controlar a frequência do efeito anódico; propor melhorias nos processos industriais que reduzam a frequência do efeito anódico e promovam a sustentabilidade na produção de alumínio.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

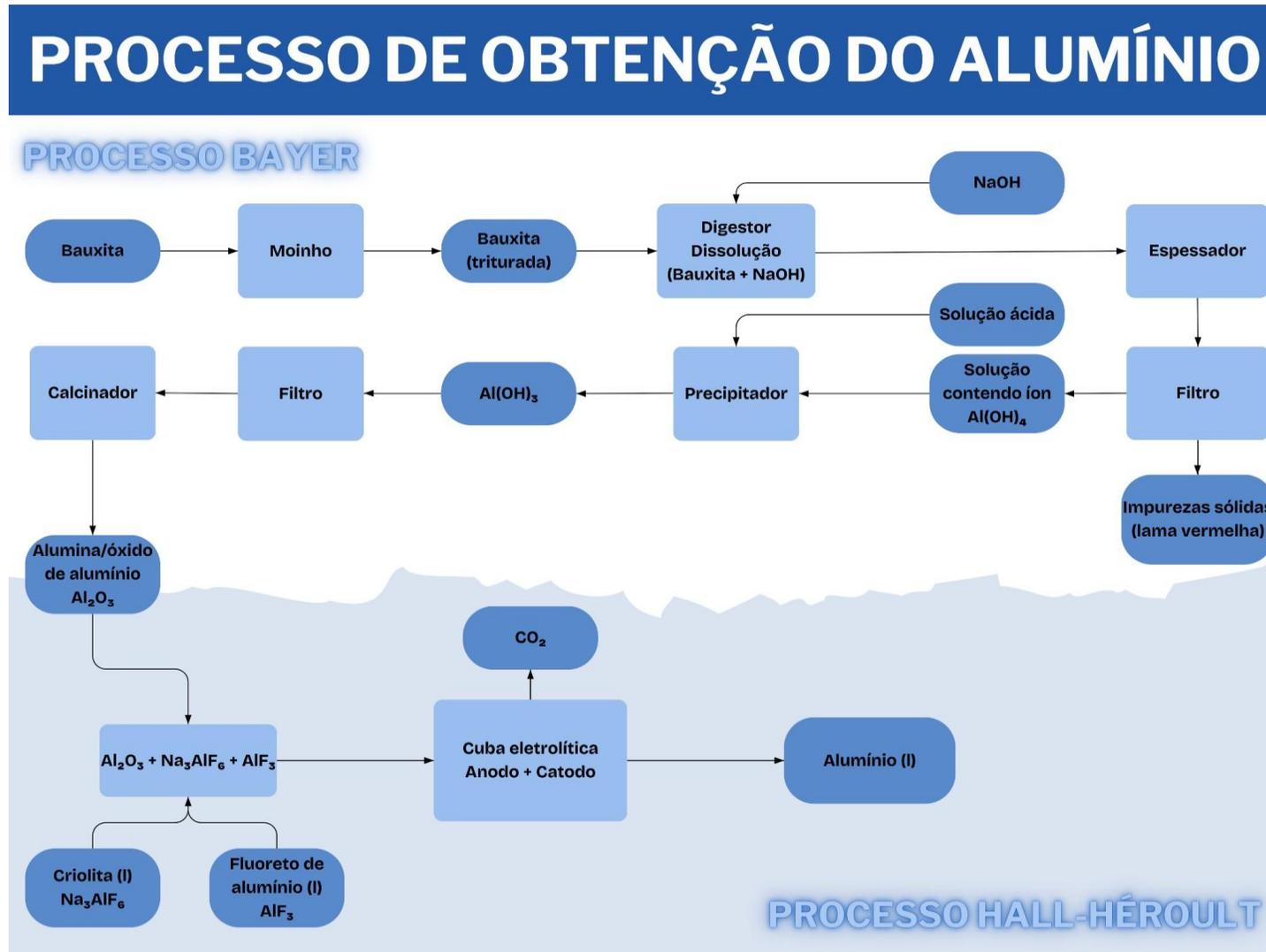
2.1 PROCESSO DE OBTENÇÃO DO ALUMÍNIO

O processo de obtenção de alumínio, descrito na Figura 3, tem início na bauxita, que é a sua principal matéria-prima, segundo informações da Associação Brasileira do Alumínio (2013). Essa rocha argilosa é encontrada em áreas próximas à Linha do Equador e ocorre predominantemente em três tipos climáticos: Tropical, Mediterrâneo e Subtropical. A extração da bauxita ocorre a cerca de 8 metros abaixo do solo (MINERAÇÃO RIO DO NORTE, 2021).

Durante a fase inicial de processamento da bauxita, o único resíduo gerado pela lavagem do minério é a argila, que não contém aditivos químicos. O resíduo é compactado e parte da água é reutilizada, reduzindo a chance de rompimentos nas barragens. Com o tempo, a argila se acumula e desidrata. A água residual é removida gradualmente até que as condições para o replantio de vegetação sejam adequadas, permitindo a reintegração da área ao ecossistema (ABAL, 2013).

O método predominante para a produção de alumina a partir da bauxita é conhecido como Processo Bayer, o qual utiliza a lixiviação química a úmido com hidróxido de sódio. No início do Método Bayer, como mostra a Figura 4, a bauxita é combinada com soda cáustica, moída até formar uma polpa e filtrada para separar as partículas finas das mais grossas, que são retornadas aos moinhos. A seguir, na etapa conhecida como digestão, essa polpa é submetida ao aquecimento a 95°C em reatores, nos quais são adicionados soda cáustica e cal para dissolver a alumina e eliminar impurezas. As condições durante a digestão mudam de acordo com a composição da bauxita, e a taxa de dissolução dos minerais presentes afeta a quantidade de soda a ser utilizada. Uma reação significativa nesse processo é o dessilicamento, que envolve minerais como a caulinita para interagir com a solução, removendo a sílica. Em certos procedimentos, a sílica é eliminada por meio de decantação em um reservatório antes da digestão, enquanto em outros casos, sua remoção ocorre na saída dos digestores, utilizando hidrociclones que reduzem a pressão para que o licor chegue aos tanques flash (LARA, 2020).

Figura 3 – Processo de obtenção de alumínio primário.



Fonte: Autor, 2025.

Figura 4 – Etapas do Processo Bayer.



Fonte: Associação Brasileira do Alumínio (ABAL), 2013.

Na seguinte etapa de clarificação do processo, como explica Lara (2020), os resíduos sólidos da bauxita são separados da solução por diferentes equipamentos, dependendo da quantidade e das propriedades desses resíduos. Normalmente, os resíduos apresentam uma distribuição bimodal de tamanho de partículas: a fração grosseira (diâmetro acima de 100 μm), chamada de areia, é separada por ciclones, enquanto as partículas finas (menores que 10 μm) são removidas por espessadores. A solução que transborda do espessador contém menos de 0,3 g/L de sólidos e é o produto concentrado, enquanto o *underflow*, com 15% a 35% de sólidos em peso, é tratado como rejeito. Para aumentar o teor de sólidos e recuperar a solução clarificada, o *underflow* pode passar por espessadores em série ou filtros-prensa antes de ser descartado.

Então, na próxima etapa de precipitação, são usados os precipitadores, os quais são cilindros verticais que podem ter até 30m de altura e 2,5 a 3 vezes seu diâmetro, recebendo o licor concentrado. O fluxo dentro do tubo é descendente, tornando os fundos dos tanques quase planos para inverter o fluxo e mover o licor para cima. A solução filtrada tem uma temperatura de 102°C e deve ser resfriada a 65°C antes da precipitação, normalmente em tanques flash, que também recuperam o vapor gerado. A reação no precipitador é o oposto da do digestor. Os núcleos crescem pelo acúmulo de $\text{Al}(\text{OH})_3$ e aumentam por

aglomeração. A adição de Al(OH)_3 catalisa a precipitação e aumenta a concentração de Al_2O_3 sólido. O hidrato é retirado do processo, chamado Hidrato Úmido, e pode ser seco com aquecimento acima de 100°C . O processo final é a calcinação, onde a temperatura do Al(OH)_3 chega acima de 1107°C , resultando na reação (1).



A solução de soda tem ciclos e é reciclada continuamente na planta. A água de lavagem usada deve ser evaporada para controlar o volume da solução, garantindo sua concentração para voltar ao processo. Em altas temperaturas nos digestores, há o processo de evaporação instantânea em volumes maiores (LARA, 2020).

Há também o processo Hall-Héroult, apresentado na Figura 5, no qual o alumínio é obtido por meio da redução eletrolítica da alumina (Al_2O_3) que está dissolvida em um banho de fluoretos líquidos. Por ser o solvente mais eficaz para a alumina, utiliza-se a criolita (Na_3AlF_6) como banho eletrolítico. As principais funções do eletrólito são proporcionar uma dissolução adequada da alumina e possibilitar uma separação eficiente das fases de banho e metal geradas durante o processo de eletrólise (LAZARINOS, 2007).

Embora o processo Hall-Héroult seja contínuo, a alimentação da matéria-prima e a retirada do metal produzido ocorrem de forma batelada. Isso significa que a alumina e o alumínio líquido são retirados e removidos em lotes, enquanto o processo de eletrólise continua ininterruptamente. Essa combinação de processo contínuo com operações bateladas permite uma produção eficiente e controlada do metal.

Figura 5 – Etapas do Processo Hall-Hérout.



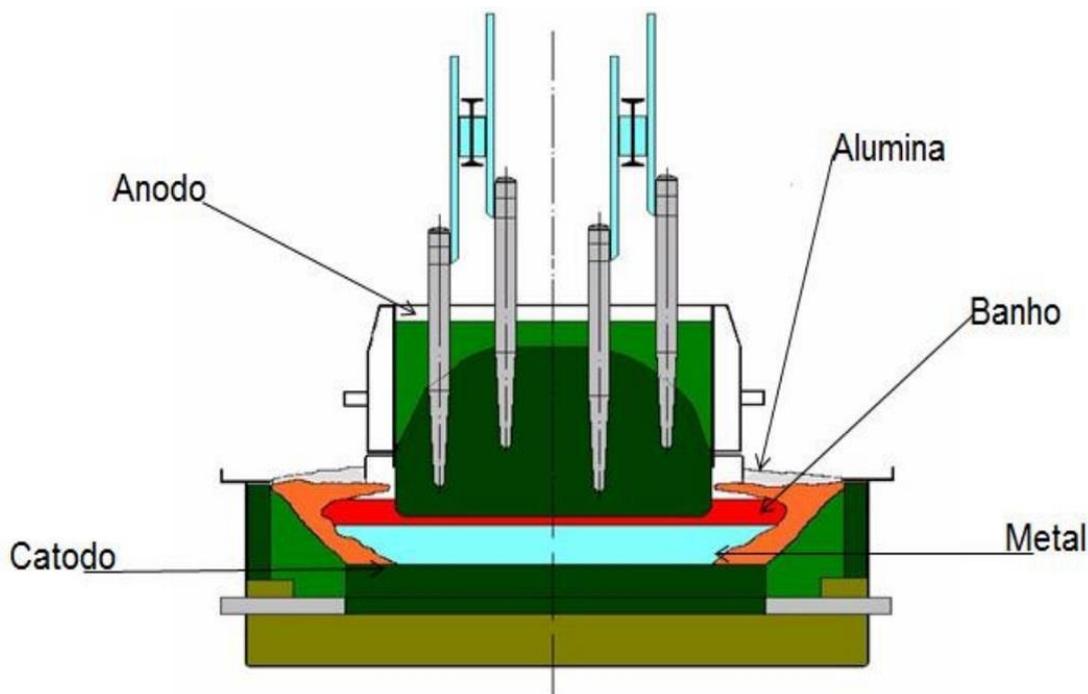
Fonte: Associação Brasileira do Alumínio (ABAL), 2013.

O procedimento Hall-Hérout ocorre em fornos especializados, esquematizados na Figura 6, que são revestidos com carbono, conhecidos como cubas eletrolíticas, funcionando a cerca de 960°C. A cuba é composta por dois elementos principais: os ânodos, localizados na parte superior, e o cátodo, que é a própria cuba, onde ocorre o processo de eletrólise, de acordo com a equação (2).



O alumínio líquido, obtido através da eletrólise, é removido periodicamente das células eletrolíticas e transferido para cadinhos, seguindo para os fornos de espera. Em seguida, esse metal é encaminhado para máquinas de lingotamento, onde é moldado e resfriado para a fabricação de lingotes (LAZARINOS, 2007).

Figura 6 – Desenho esquemático de uma célula eletrolítica de redução.



Fonte: Marinho, 2019.

O processo Hall-Héroult, como esclarece Vry (2013), utiliza duas tecnologias distintas, que se diferenciam pelo tipo de ânodo utilizado: as células com ânodo Pre-baked (pré-cozido) e as células com ânodo Soderberg. Em ambas as modalidades, a cuba eletrolítica é composta por uma estrutura de aço que envolve um cátodo de carbono, contendo alumínio fundido na parte inferior, um eletrólito fundido e uma camada de alumina na parte superior. Atualmente, novos processos estão sendo implantados utilizando a tecnologia Prebaked, onde os ânodos são preparados em um forno distinto antes de serem instalados na cuba, visando benefícios ambientais e econômicos, uma vez que proporciona maior eficiência na produção com menor consumo energético. Na tecnologia Soderberg, se utiliza o calor gerado pela própria cuba para cozinhar a pasta anódica e criar o ânodo.

Independentemente da tecnologia utilizada, os ânodos são elaborados a partir de materiais parecidos e passam por condições semelhantes, exceto pelas especificidades de cada tipo de tecnologia. Os componentes empregados na formulação dos ânodos incluem coque de petróleo e piche de alcatrão. Durante o processo de pirólise, o piche adere firmemente às partículas de coque, criando um bloco conhecido como ânodo. Como mencionado anteriormente, a tecnologia

Soderberg utiliza o calor gerado dentro da célula eletrolítica para carbonizar o piche associado ao coque, resultando na formação do ânodo (VRY, 2013).

As duas principais vantagens dos ânodos Soderberg, em comparação com os ânodos Prebaked, incluem um investimento de capital significativamente menor e a manutenção contínua de pasta, que reduz os problemas relacionados à substituição do ânodo. No entanto, essas vantagens são contrabalançadas pela qualidade inferior da pasta, que aumenta o consumo do ânodo, além de outros impactos ambientais. A temperatura de pirólise do piche, aproximando-se de 950°C, aliada à baixa compactação da pasta, que resulta apenas do peso do ânodo, e a sua cocção, que enfrenta várias dificuldades operacionais e de processo, juntamente com uma maior concentração de piche na pasta, são fatores que contribuem para a qualidade inferior em relação à Prebaked, expõe Vry (2013).

O método de alimentação da alumina nas cubas também apresenta diferenças significativas. Segundo Tiba (2020), na abordagem de Quebra Lateral, um aparelho especificamente projetado é responsável por quebrar a crosta de alumina na superfície lateral da cuba, assegurando que o óxido seja adequadamente misturado ao banho. Depois dessa etapa, um segundo dispositivo é ativado para realizar a reposição da alumina, formando uma nova crosta do óxido que também atua como um isolante térmico, evitando a liberação de gases para o ambiente. Em contraste, na abordagem Point-Feeder, o processo é mais controlado, pois a alumina é inserida automaticamente no banho por meio de uma quebra pontual com pistão, também conhecido como *plunger*, que é responsável tanto pela quebra, quanto pela alimentação da matéria-prima, enquanto a lateral da cuba permanece selada de forma permanente.

2.2 ESTUDOS DA LITERATURA SOBRE O EFEITO ANÓDICO

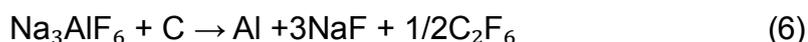
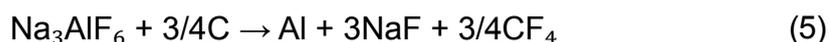
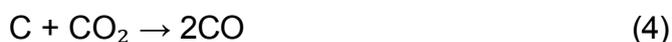
Conforme relato do trabalho de Ponciano (1994), ao longo do processo de obtenção do alumínio, o óxido de alumínio introduzido no banho começa a ser consumido progressivamente. Quando a concentração de óxido reduz abaixo do patamar de 2%, o processo eletrolítico sofre modificações. Nesse instante, as reações paralelas representadas em (4), (5) e (6) são favorecidas,

ao invés da reação padrão (3), resultando na formação de gases perfluorcarbono (PFC) que não se desprendem do ânodo e formam uma fina camada isolante de gás (CETESB, 2006). A tensão na cuba então se eleva abruptamente para além de 8 Volts, que é o menor valor considerado para efeito anódico, normalmente alcançando entre 25 e 35 V em poucos segundos (ALCÂNTARA, 2014). Este fenômeno é denominado de efeito anódico (EA) e é responsável pelo consumo dos compostos de flúor. Para que o efeito anódico seja eliminado, são inseridas varas de eucalipto à cuba, as quais, devido a seu teor de umidade, são responsáveis por garantir a agitação do sistema e, assim, eliminar os gases aderidos ao ânodo. Entretanto, caso o motivo principal do problema não seja sanado, o efeito anódico pode voltar a se repetir em minutos.

Reação padrão:



Reações paralelas:



Os impactos ambientais causados pela geração dos gases de efeito estufa tetrafluormetano (CF_4) e o hexafluoretano (C_2F_6) durante o efeito anódico possuem elevado potencial para o fenômeno de aquecimento global (NAGEM, 2009).

Além das questões relacionadas ao meio ambiente, o custo desempenha um papel importante, pois a energia elétrica utilizada na fabricação de alumínio primário é um elemento fundamental. Isso se deve ao fato de que, além de ser essencial para o processo de redução, ela também compõe uma parte considerável do total dos custos, estimando-se que represente cerca de 40% do custo total, de acordo com Massarente, et al. (2013).

Os processos que levam à manifestação do efeito anódico não são totalmente compreendidos. Contudo, acredita-se que tenha relação com algumas das eventuais razões, que serão descritas a seguir. A temperatura operacional é um dos elementos mais relevantes na produção de alumínio e seu

monitoramento é essencial para assegurar a eficiência da corrente, a solubilidade da alumina no eletrólito, assim como os consumos energéticos e de pasta anódica. Uma temperatura de operação reduzida permite a melhoria da eficiência da corrente, uma vez que diminui a solubilidade e a difusibilidade do metal no eletrólito, além de aumentar sua tensão interfacial e a viscosidade do banho, ajudando na redução da taxa de reoxidação do metal. Por outro lado, esse fator pode resultar em um acúmulo de lama e lombo (banho solidificado na parede das cubas devido a perdas térmicas), comprometendo a distribuição da corrente, o que pode impactar negativamente na eficiência (MARINHO, 2019).

Além disso, na tecnologia Point-Feeder, o banho eletrolítico a uma temperatura muito baixa pode se depositar em torno do pistão responsável por quebrar a crosta e depositar a alumina. O movimento de vai e vem do pistão faz com que esse banho troque calor com o meio e se solidifique ao redor do pistão, formando o que se chama de pata de elefante, o que impede a realização da quebra e compromete a alimentação da cuba. Sendo assim, uma vez que o processo é extremamente sensível às mudanças, torna-se necessário um bom controle da temperatura, a fim de manter-se sempre uma temperatura ideal que varia em torno de 950°C e 960°. O nível da camada de metal é outro parâmetro importante para o processo, uma vez que afeta diretamente sua estabilidade térmica e magnética da cuba eletrolítica. Além disso, um nível de líquidos (banho + metal) muito alto, pode favorecer a formação de pata no pistão, uma vez que permite que o pistão alcance o banho mais facilmente, gerando seu acúmulo (NAGEM, 2009).

A composição do banho eletrolítico também interfere diretamente no processo: o fluoreto de alumínio (AlF_3) é um aditivo que, não só reduz a temperatura de fusão da criolita de 1010°C para aproximadamente 960°C, permitindo o uso de uma quantidade menor de energia para manter o eletrólito em estado líquido, como também reduz a densidade do eletrólito e melhora a interface do banho com o metal, evitando que o metal suba acima dessa interface, o que resultaria na reoxidação do material e na diminuição da eficácia do processo. Além disso, de acordo com Moura (2001), impurezas no banho, como Fe_2O_3 , SnO_2 , $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ e P_2O_3 , contribuem negativamente, sendo as principais responsáveis pela redução de eficiência da corrente.

Em relação à matéria-prima principal, o óxido de alumínio, mais

conhecido como alumina, existem dois tipos utilizados em reduções eletrolíticas: a alumina primária e a alumina enriquecida. Ambas provêm da mesma origem, portanto, inicialmente, compartilham as mesmas propriedades. A distinção entre elas reside no fato de que a segunda foi submetida ao tratamento de gases de exaustão das cubas de redução, apresentando, então, um enriquecimento de elementos químicos. A utilização da alumina enriquecida com fluoretos resulta em uma significativa redução de custos ao processo, dado que o consumo desses elementos é reduzido (MARINHO, 2019).

A distribuição granulométrica do óxido de alumínio representa uma das características físicas de maior relevância no contexto de produção do metal, uma vez que grãos superiores a 200 μm , tendem a diminuir a taxa de solubilização da alumina no eletrólito, favorecendo a formação de lama no fundo da cuba eletrolítica, enquanto grãos menores até um determinado limite, apresentam maior área superficial e dissolvem-se mais rapidamente no banho. Por outro lado, grãos muito finos (inferior a 44 μm) reduzem a solubilidade, ocasionando perdas por partículas dispersas no ar, segundo Moura (2001). Além disso, as condições de transporte e armazenamento da alumina devem ser adequadas, já que a presença de partículas finas pode ser intensificada pela ocorrência de segregação (MARINHO, 2019).

Restivo (1994), em seu estudo sobre o processo de eletrólise em meio de sais fundidos para a produção de cério metálico, explica ainda o impacto de uma matéria-prima de granulometria muito reduzida sobre o efeito anódico: o pó do material que se deposita sobre o eletrólito pode permanecer em suspensão e não dissociar instantaneamente, permanecendo como uma segunda fase sólida, fenômeno conhecido como afogamento. Além de impedir a solubilização e, portanto, reduzir a concentração do material no banho eletrolítico, essas partículas atuam também como isolantes elétricas, diminuindo a área disponível para a condução da corrente elétrica no banho e aumentando, assim, a resistência entre os eletrodos, o que provoca o efeito anódico.

O efeito anódico é um tópico significativo e bastante discutido na indústria de alumínio, porém sua prevenção ou eliminação é um trabalho desafiador, já que se trata de um fenômeno transitório que ocorre em menos de um segundo e leva cerca de minutos para ser sanado, podendo voltar a se repetir se a causa principal não for solucionada. Nagem (2009) ressalta que o

fundamento para reduzir o efeito anódico está na aplicação de algoritmos que regulem o fornecimento de alumina, evitando que esse fenômeno aconteça.

2.3 FERRAMENTAS DE GESTÃO DA QUALIDADE

As ferramentas de qualidade tornam-se cada vez mais presentes nas empresas, pois permitem uma melhor organização dos processos, aprimoram a qualidade de produtos e serviços e atendem às demandas dos clientes. A maior parte dos desafios relacionados à qualidade no setor industrial pode ser solucionada com a aplicação das ferramentas de qualidade, cada qual com sua própria abordagem, e a forma de aplicá-las varia conforme o problema em questão, as informações disponíveis para coleta, os dados históricos e o conhecimento existente sobre o processo.

As vantagens dessas ferramentas abrangem a melhoria dos padrões de qualidade, a redução de despesas, a realização de projetos mais eficientes, o fortalecimento da colaboração em todas as etapas da organização, a detecção de problemas nos processos, fornecedores e produtos, além da identificação de causas fundamentais nas operações (SEBRAE, 2023).

Portanto, neste trabalho, serão exploradas algumas ferramentas que podem contribuir para a gestão organizacional e que serão abordadas mais adiante na metodologia, incluindo o Programa 5S, Ciclo PDCA, Relatório A3 e as ferramentas básicas da qualidade.

2.3.1 Programa 5S

Na sua essência, a abordagem 5S atua como um recurso para aprimorar o layout, a arrumação e a conservação do ambiente de trabalho, fundamentando-se nos cinco princípios apresentados na Figura 7: Seiri (senso de utilização), Seiton (senso de organização), Seiso (senso de limpeza), Seiketsu (senso de normalização) e Shitsuke (senso de disciplina).

Figura 7 – Metodologia 5S.



Fonte: Qualityteam, 2021.

Ao implementar corretamente esses cinco princípios, a organização melhora sua produtividade, segurança e organização. Contudo, para muitos, a abordagem 5S vai além de uma simples ferramenta gerencial: trata-se de uma cultura que deve estar presente em todos os níveis da empresa. Cada um dos 5S representa um princípio a ser adotado. Entretanto, juntos, formam uma metodologia, ou seja, um conjunto de etapas a serem seguidas, de acordo com a seguinte sequência de ações explicadas pela empresa inspetora de construção civil SB Gerenciamento de Obras (2023):

Seiri – Envolve a revisão das ferramentas e recursos disponíveis na organização, com o objetivo de identificar e descartar o que não é mais utilizado e que ocupa espaço de forma desnecessária. Esse princípio também se aplica a documentos e registros, sejam eles físicos ou digitais. Na prática, um exemplo do critério de utilidade seria a avaliação de todos os itens, como papéis e materiais de escritório, e sua relevância, com a ideia de conservar apenas o que é funcional.

Seiton – Enfatiza a importância da organização, portanto, é fundamental que tudo esteja em seu lugar adequado. Isso significa evitar mesas desordenadas, áreas bagunçadas e documentos dispersos. Uma boa prática é categorizar arquivos, ferramentas e materiais, mantendo os itens mais utilizados facilmente acessíveis no dia a dia. Assegurar um padrão elevado de arrumação impacta positivamente na produtividade, no bem-estar e no desempenho das

equipes.

Seiso – Promove a conscientização entre todos os colaboradores da empresa. Dessa maneira, cada pessoa assume a responsabilidade por organizar seus pertences e equipamentos, além de preservar os sistemas e ferramentas das áreas comuns. Adicionalmente, tanto os funcionários quanto o ambiente de trabalho devem manter uma aparência limpa e organizada. Embora esse conceito pareça evidente para alguns, o Seiso pode representar um desafio em determinados contextos organizacionais. Por isso, é aconselhável investir em ações de conscientização e capacitação contínuas.

Seiketsu – É realizada a padronização dos processos estabelecidos nos conceitos anteriores. Em essência, reconhece-se que práticas adequadas são eficazes somente quando incorporadas à rotina de trabalho. Dessa forma, manter um padrão de organização e limpeza é essencial para cultivar e preservar hábitos saudáveis. Para implementar essa padronização, os líderes devem investir na criação de organogramas que abranjam os diversos processos da empresa. Com o tempo, essas práticas se tornam parte integrante do cotidiano dos colaboradores, contribuindo para a formação de hábitos sustentáveis e mais eficientes.

Shitsuke – Representa a fase conclusiva, voltada para a manutenção das práticas adquiridas através da metodologia 5S. Isso significa que seu sucesso depende do envolvimento de cada membro da equipe. Portanto, é fundamental promover campanhas de conscientização que aprimorem os valores éticos e morais individuais. Além de aplicar e estimular as diretrizes dos 5S, é essencial garantir a continuidade dessas práticas. Assim que as equipes começam a perceber as vantagens resultantes da implementação, torna-se mais simples incentivar a autodisciplina e a persistência nas ações.

2.3.2 Ciclo PDCA

O método PDCA foi desenvolvido nos Estados Unidos na década de 1920 pelo estatístico Walter Andrew Shewhart. Originalmente denominado ciclo de Shewhart, ele consistia em três etapas: especificação, produção e inspeção. Anos mais tarde, em 1951, William Edwards Deming percebeu a importância de adicionar uma nova etapa, dando origem à “Roda de Deming”, que passou a

incluir quatro etapas repetidas continuamente: especificação, produção, comercialização e redesign. Após muitos anos de desenvolvimento, o PDCA se consolidou como uma abordagem amplamente aceita, servindo como uma ferramenta para a melhoria contínua, que consiste nas etapas da Figura 8 (NAPOLEÃO, 2018).

Figura 8 – Ciclo PDCA.



Fonte: Napoleão, 2018.

Plan – O planejamento consiste na fase em que se define o que será realizado. Nesta fase, o problema ou cenário em questão é examinado, levando à elaboração de um plano que delinea as etapas a serem executadas. É possível integrar outras ferramentas ao PDCA para aprimorar o planejamento, e é essencial que o problema ou o objetivo do ciclo estejam bem definidos, para que o planejamento seja realmente eficaz.

Do – A fase da execução é de extrema relevância, uma vez que a sua efetivação é necessária para dar início às etapas posteriores. É o momento de "colocar em ação" o que foi elaborado anteriormente. Deve-se destacar que, antes de começar a execução, é essencial que o planejamento esteja finalizado, que as tarefas a serem realizadas estejam bem compreendidas por todos os participantes, e que todos os materiais e ferramentas essenciais para a implementação do plano devem ser obtidos antecipadamente.

Check – A verificação corresponde ao momento em que se analisa o que ocorreu durante a fase de execução anterior, buscando reconhecer os aspectos que funcionaram bem e os que não saíram como esperado. É essencial que,

nesta fase, estejam claramente determinados os critérios de medição (por exemplo, indicadores – que idealmente devem ser estabelecidos durante o planejamento), pois isso possibilita a identificação dos resultados positivos e das áreas que ainda necessitam de aperfeiçoamento.

Act – A fase de atuar/agir demanda uma atenção especial. Ela se refere a tomar ações com base nas conclusões obtidas na etapa de verificação. Diante disso, podem surgir duas possibilidades: o resultado esperado pode ser alcançado ou não. Se o resultado for positivo, é necessário adotar o método ou processo efetivo na rotina ou em outras áreas. Por outro lado, se o resultado não corresponder às expectativas, é fundamental identificar os erros e reiniciar o ciclo.

2.3.3 Relatório A3

O relatório A3 é um recurso para identificar e solucionar problemas, criado pela Toyota nos anos 70. Naquele período, sua finalidade já era ajudar as organizações a alcançarem a excelência. Além do seu propósito principal, o pensamento A3 é hoje também empregado como uma ferramenta de capacitação e orientação para equipes de diversas empresas, seguindo os mesmos princípios do método PDCA.

O método consiste em uma representação gráfica elaborada em uma folha de papel de formato A3. Sua criação pode ocorrer de maneira simples, utilizando somente papel e caneta, ou através de programas como Word, PowerPoint e Excel. Adicionalmente, apresenta uma estrutura com etapas estabelecidas, que podem variar de 5 a 7 fases. A leitura ocorre da esquerda para a direita e de cima para baixo. Geralmente, o A3 é segmentado por um lado, que se encarrega de identificar o problema, enquanto o outro lado contém as ações corretivas. Rabello (2023) descreve as etapas do relatório A3:

Escolha de um título – Qual é o tema abordado?

Definição do problema – Neste momento, é estabelecido e detalhado o cenário do problema em questão. Qual é a razão de abordar o assunto? De que maneira o problema ocorre? Em qual momento? Em qual lugar? Quem são os impactados? Qual indicador particular necessita de aprimoramento?

Condição atual do problema – Agrupamento de informações e

estatísticas para fortalecer a narrativa, utilizando recursos visuais, como o Diagrama de Pareto e fluxogramas, para demonstrar a evolução da questão. É o momento de ressaltar as principais questões que essa situação tem gerado.

Objetivo – Qual é o objetivo ao realizar esta análise? Quais resultados pretende-se alcançar? É necessário apresentar de forma visual a quantidade, o prazo e a relevância desses resultados.

Análise das causas raiz – Elaboração de uma lista dos fatores que podem estar contribuindo para a situação. Para facilitar esse processo, o Diagrama de Ishikawa e a técnica dos 5 Porquês são ferramentas valiosas, permitindo assim reconhecer as causas potenciais e estruturar as reflexões.

Plano de ação – O planejamento de ação inclui atividades de análise macroeconômica do mercado, permitindo a reestruturação do orçamento conforme as características econômicas identificadas. Para isso, é essencial criar objetivos quantificáveis e ter uma compreensão clara da meta previamente definida.

Acompanhamento – Ao final, é essencial saber se as metas e o objetivo foram alcançados ou não. Para isso, é fundamental monitorar todo o processo e avaliar se o desempenho está melhorando, se as ações produziram os resultados esperados e quais aprendizados podem ser compartilhados com outras áreas.

2.3.4 Ferramentas básicas da qualidade

As ferramentas de qualidade estão interconectadas, o que resulta em uma melhoria nos processos da organização. Sendo as seguintes estratégias, conforme Santos, et al. (2020):

Diagrama de Ishikawa – Também chamado de espinha de peixe ou gráfico de causa e efeito, visa identificar todas as origens de um determinado problema. Pode ser aplicado a fatores tanto benéficos quanto prejudiciais. Com a estrutura semelhante a uma espinha de peixe, é possível obter uma compreensão mais abrangente das causas e suas repercussões.

Folha de Conferência – As folhas de conferência representam tabelas ou planilhas básicas que auxiliam na coleta e na análise de informações. A utilização dessas folhas poupa tempo ao dispensar a necessidade de traçar gráficos ou

anotar números que se repetem. Trata-se de formulários estruturados, nos quais os dados reunidos são inseridos de maneira prática, registrando os itens que precisam ser checados.

Diagrama de Pareto – O objetivo do diagrama de Pareto é evidenciar a relevância de várias condições, para que se possa determinar o ponto inicial na busca pela resolução de um problema, reconhecer a causa raiz e acompanhar os resultados. Esses diagramas podem ser aplicados para destacar os problemas mais significativos, utilizando diferentes parâmetros de avaliação, como a frequência ou os custos envolvidos.

Funil – O funil é uma ferramenta utilizada para estruturar e resolver problemas de forma sistemática e eficaz. Entre suas vantagens estão a promoção de uma abordagem sistemática e estruturada para resolver problemas, auxílio na identificação e análise do problema de forma clara e objetiva, possibilidade da geração e avaliação de soluções, suporte na seleção da melhor alternativa, implementação eficaz da solução e o incentivo ao monitoramento e à avaliação contínuos para garantir a eficácia da solução.

3 METODOLOGIA

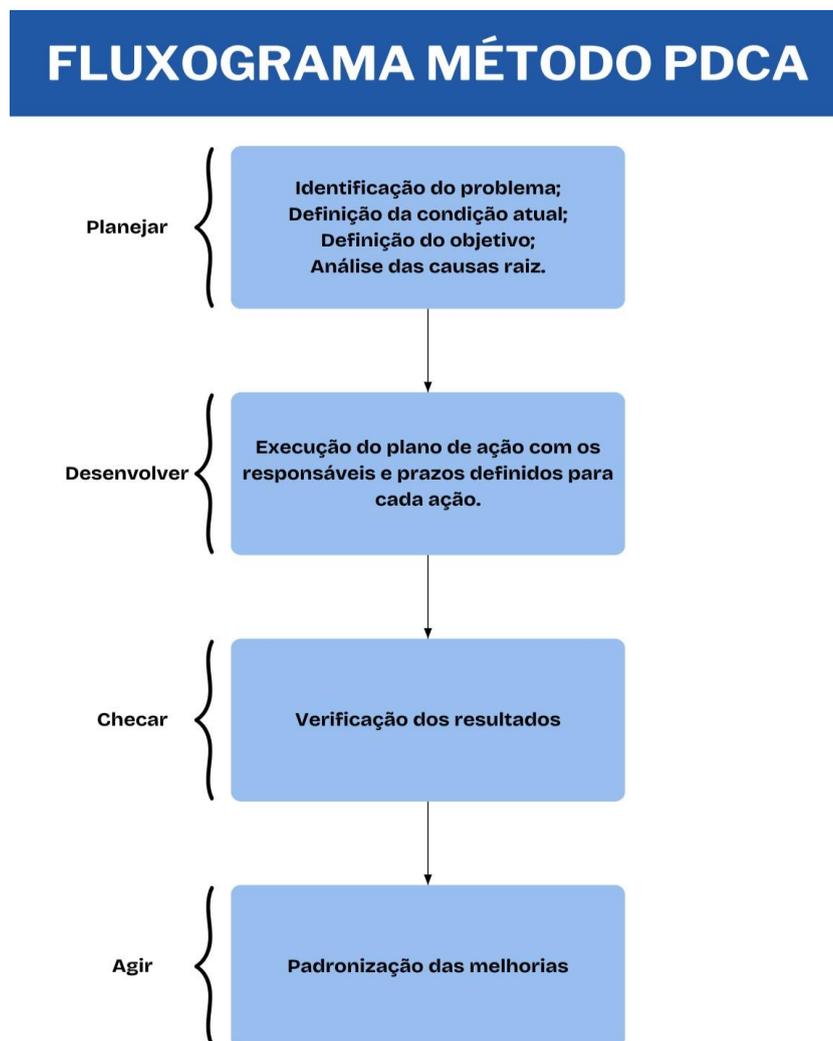
A instalação da fábrica de alumínio da Companhia Brasileira de Alumínio (CBA) encontra-se na cidade de Alumínio, no interior do estado de São Paulo. Desde 1955, a CBA produz alumínio de alta qualidade de forma integrada e sustentável. Com capacidade instalada para produzir 100% de energia vinda de hidrelétricas próprias, a CBA realiza a mineração da bauxita, transforma em alumínio primário e produtos transformados. A empresa busca produzir, cada vez mais, um alumínio de baixo carbono e oferecer soluções ecológicas aos desafios do mundo.

Assim como outras empresas do setor, a CBA busca reduzir e gerenciar a ocorrência do efeito anódico em seu processo produtivo, devido aos elevados custos operacionais com energia elétrica e aos impactos ambientais associados a esse fenômeno previamente descritos.

Para isso, o presente estudo buscou analisar a frequência de efeito anódico em uma das salas da fábrica, a Sala Fornos 3, composta por 150 cubas eletrolíticas e sendo a única sala da CBA a apresentar, no momento, o sistema de alimentação Point Feeder, ou seja, por quebra pontual, enquanto as outras salas ainda apresentam o sistema de quebra lateral, embora estejam sendo desenvolvidos projetos de modificação das demais salas para o sistema Point Feeder. A alimentação do óxido de alumínio no sistema Point Feeder é realizada por meio de ciclos e possui as fases de alimentação base, underfeed (subalimentação), overfeed (superalimentação) e check (suspensão da alimentação).

Para contribuir com a mitigação do efeito anódico, este estudo fundamentou sua metodologia nos procedimentos mostrados na Figura 9, sugerindo a aplicação de um programa para monitoramento e controle da frequência de efeito anódico, com base na metodologia PDCA (Plan, Do, Check, Act).

Figura 9 – Fluxograma da metodologia PDCA.



Fonte: Autor, 2025.

A metodologia PDCA foi aplicada no formato de relatório A3, conforme modelo padrão da empresa, ilustrado no Anexo A, com a finalidade de apresentar de maneira concisa e organizada a solução identificada para o problema. Como o PDCA se trata de um processo cíclico, durante o período de estágio, foram realizados 2 ciclos PDCA em formato A3, o primeiro em outubro de 2023 e, após, foi realizado o segundo, em abril de 2024. Ambos os relatórios A3 constituíram-se de cada uma das seguintes etapas abordadas nos seguintes subtópicos desta metodologia.

3.1 PLANEJAMENTO

A etapa inicial de planejamento visa estabelecer as fases do projeto. Uma vez que se identificou o tema, foi realizada uma análise das condições atuais, utilizando dados históricos obtidos do sistema de controle integrado da empresa (Score – Sistema de Controle de Redução). O Score é um programa utilizado nas Salas Fornos, capaz de operar de modo ininterrupto e é responsável por monitorar diversos parâmetros das cubas eletrolíticas, calculando a resistência e controlando as cubas individualmente em tempo real, incluindo a detecção de instabilidades e previsão de efeito anódico.

Durante essa etapa, também foi estipulado o objetivo principal, ou seja, a meta de redução do parâmetro da frequência de efeito anódico. Para a análise das causas raiz, a equipe técnica realizou um *brainstorming* e, em seguida, elaborou um diagrama de causa e efeito, listando as possíveis origens do problema que, se resolvidas, provavelmente favoreceriam a melhoria do processo.

Adicionado a isso, também foi realizado um levantamento dos principais problemas verificados na área pelos técnicos e operadores, o que possibilitou a criação de um diagrama de Pareto para identificar os problemas mais significativos que demandavam atenção prioritária. Esses problemas eram relatados em painéis de gestão à vista e discutidos nas reuniões de Gerenciamento da Rotina Diária (GRD).

3.2 DESENVOLVIMENTO

Para a etapa seguinte (desenvolver), foram definidos planos de ação necessários para atuar no problema, de acordo com a equipe técnica. E a cada uma das ações foram atribuídos seus respectivos responsáveis e definidos os prazos de realização.

Para a definição dos planos de ação dos relatórios A3, a equipe reunida era composta pelos gestores – coordenador e supervisor, além da equipe técnica responsável pela área de processo. Realizaram-se reuniões nas quais todos os integrantes poderiam avaliar as possíveis causas e discutindo-se quais as

causas mais prováveis de estar contribuindo para o aumento da frequência de efeito anódico no momento.

Além disso, eram realizadas reuniões semanais (Gerenciamento de Rotina Semanal – GRS) com o coordenador e o supervisor para acompanhamento dos planos de ação e das frequências de efeito anódico dispostas em gráficos semanais e mensais, de forma geral, por grupo de cubas e por turno.

Nessa etapa de desenvolvimento, além do estudo acerca das possíveis causas que contribuem para o efeito anódico, também foram realizadas ações de conscientização para os técnicos de produção e para os operadores, bem como ações de melhoria para a área, como o desenvolvimento de um aplicativo para a realização de funis de resolução de problemas, que anteriormente eram preenchidos a mão em folhas impressas e passaram a ser feitos de forma online, sem que houvesse a necessidade da utilização de folhas de papel impressas, contribuindo para a indústria de forma econômica e ambiental.

3.3 CHECAGEM

Na etapa de checagem, foram verificadas as efetividades dos planos de ação, buscando compreender primeiramente se as ações foram realizadas ou não dentro do prazo estipulado, investigando se houve contribuições ocasionadas pela realização de tais ações e quais foram as implicações, sejam elas positivas ou negativas.

Após, procurou-se averiguar se o problema foi solucionado a partir de dados de frequência anódica provindos do sistema Score após a realização das ações contidas no plano de ação. Analisou-se a frequência de efeito anódico antes e após as ações realizadas, a fim de identificar se foram eficazes ou não.

3.4 AÇÃO

Por fim, a última etapa (agir), procurou garantir a padronização das melhorias realizadas, estipulando as medidas necessárias para que o problema não volte a ocorrer, além da projeção de expansão das melhorias para outras

áreas da empresa. Para o presente trabalho, foram realizados dois ciclos PDCA em formato de relatório A3, visto que o primeiro não obteve o resultado esperado, conforme será apresentado na seção de resultados.

3.5 ASPECTOS ENERGÉTICOS E AMBIENTAIS

3.5.1 Cálculo do consumo de energia

O consumo de energia em uma cuba é a quantidade de energia que se consome para produzir o alumínio em um determinado período. Quando ocorre o efeito anódico, o consumo de energia pode ser determinado a partir da Equação 7:

$$E = V \times I \times T \quad (7)$$

Na qual:

E é a quantidade de energia gasta, em kwh;

V é a tensão média, em volts;

I é a corrente média, em kA;

T é o tempo de supressão ao efeito anódico, em horas.

De acordo com o Ministério de Minas e Energia (2023), a tarifa média de energia elétrica para a região Sudeste é de R\$630,85 por MWh. Deste modo, será possível estimar o custo gerado por uma alta frequência de efeito anódico.

3.5.2 Cálculo da emissão de gases de efeito estufa

De acordo com Peter Entner (2008), durante o efeito anódico, são produzidos gases de efeito estufa, devido ao favorecimento das reações paralelas expressas nas equações (4), (5) e (6). Em relação ao dióxido de carbono, no processo de produção de alumínio, são produzidas cerca de 1,3 toneladas no gás para cada tonelada de alumínio produzida. Ademais, com relação aos gases tetrafluorometano e hexafluoretano, para cada tonelada de alumínio, são produzidos, na ocorrência de efeito anódico, em média 0,2 kg totais de gases perfluorcarbonos.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste tópico serão apresentados os resultados obtidos em todas as etapas descritas nos dois relatórios A3 realizados utilizando-se da metodologia PDCA. O primeiro relatório A3 foi realizado em outubro de 2023 e o segundo em abril de 2024, com a participação dos gestores e de toda a equipe técnica do setor da Sala Fornos 3.

4.1 PRIMEIRO RELATÓRIO A3

O primeiro relatório A3 está ilustrado na Figura 10, o qual será esclarecido nos tópicos seguintes, e é construído pela execução de cada uma das etapas do PDCA.

Figura 10 – Primeiro Relatório A3.

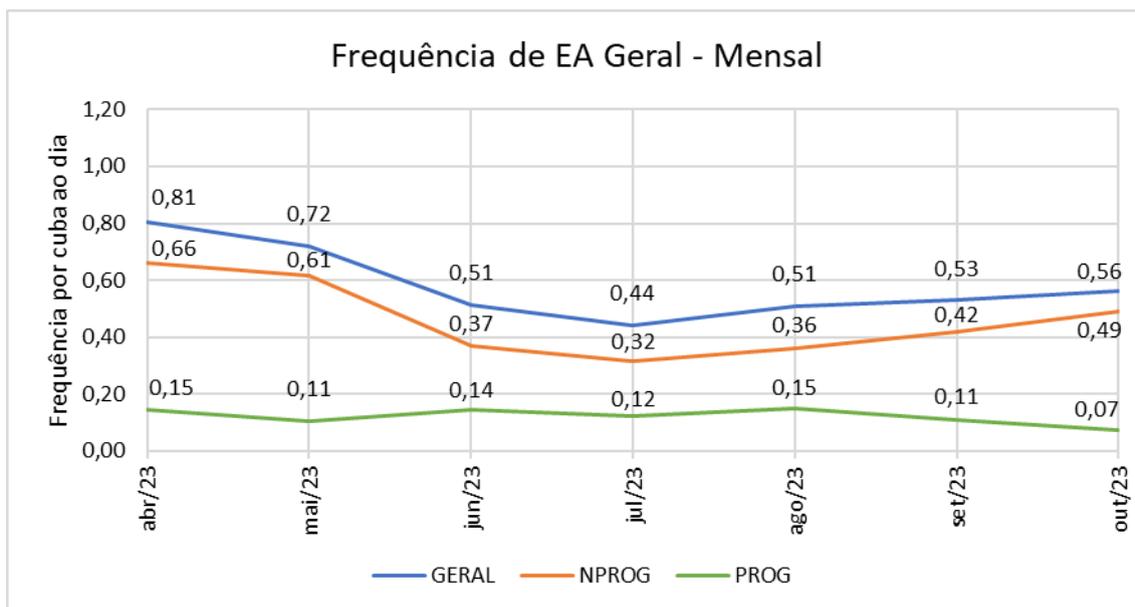
cba		FORMULÁRIO DE GESTÃO DA QUALIDADE		Código	FGQ-CBA-AL-1348	
		Título: FERRAMENTAS DE MELHORIA CONTINUA		Revisão	15 - 12/04/2024	
				Área	CBA-FGQ	
				Fase	Vigente	
Nome do Problema: Efeito anódico	Ponto de Causa: Frequência de EA elevada (acima de 0,55)	Relatado Por: Gerenciamento de Rotina Diária (GRD)	Data: Out/2023	Número do Problema: 24-1		
01 Ponto de causas (Local real do problema):		5. Contramedidas / ações de melhoria				
Cubas eletrolíticas Salas Fornos 3		Análises dos Parâmetros de Processos que contribuem para o efeito anódico (Quebra Preventiva, Afogamento, Pata, Temperatura, Banho e Metal). Criação de planilha para o direcionamento semanal das cubas com maior frequência de efeito anódico para realização de funis, com acompanhamento da aderência. E-mail de acompanhamento da frequência de EA geral, turnos e grupos.				
02 Equipe:	Área:	6 Plano de ação/Contramedidas:				
Hildo	Produção - SF3	Especifique os itens de ação para implementação das contramedidas	Quem	Até Quando	Status	
Miranda	Produção - SF3					
Caroline	Produção - SF3	Análise dos parâmetros de processo	Caroline	Abr/2024	Concluído	
Osvanildo	Processo					
Robson	Processo	Planilha e e-mail de aderência ao funil	Caroline	Perene	Concluído	
03 Objetivos e metas:		E-mail de acompanhamento de EA	Caroline	Perene	Concluído	
Redução da frequência de efeito anódico para abaixo de 0,55 até abril de 2024.						
04 Análise de causas-raiz		07 Avaliação:				
Relacione as potenciais causas-raiz		Problema resolvido: <input type="checkbox"/>	Parcialmente resolvido: <input checked="" type="checkbox"/>			
Homem: Falta de orientação dos operadores		08 Padronização:				
Materiais: Temperatura e nível de líquidos		Conscientização dos técnicos e operadores: Cubas com maiores frequência de EA, direcionamento de 3 funis para os técnicos e 1 funil a escolha do operador.				
Máquina: Falha no sistema de alimentação		Realização periódica de relatórios A3 para melhoria contínua.				
Método: Má qualidade da quebra preventiva						
Natureza:						
Especifique a provável causa-raiz:						
Parâmetros de processo, conscientização da equipe de produção.						

Fonte: Autor, 2025.

4.1.1 Planejamento 1

Neste primeiro momento, buscou-se o histórico de frequência de efeito anódico da Sala Fornos 3, a fim de verificar o comportamento do efeito anódico (EA) ao longo dos meses. No gráfico da Figura 11, estão contidos os efeitos anódicos programados (PROG), que são aqueles que fazem parte do processo e necessitam ocorrer para aferir o funcionamento da cuba eletrolítica, além dos efeitos anódicos não programados (NPROG), que são aqueles indesejados e que ocorrem por algum defeito ou mau funcionamento do processo. Além disso, constam também os efeitos anódicos totais, que são a soma dos dois anteriores. O verificado no gráfico foi uma intensa frequência de efeito anódico nos meses de abril e maio de 2023, chegando ao ápice de 0,81 efeitos por cuba ao dia, seguido de uma redução em junho e julho, e após, uma nova tendência de aumento, sem motivos aparentes, principalmente no que se refere a efeitos não programados, o que é o grande problema para o processo.

Figura 11 – Gráfico da frequência de efeito anódico entre abril de 2023 e outubro de 2023.

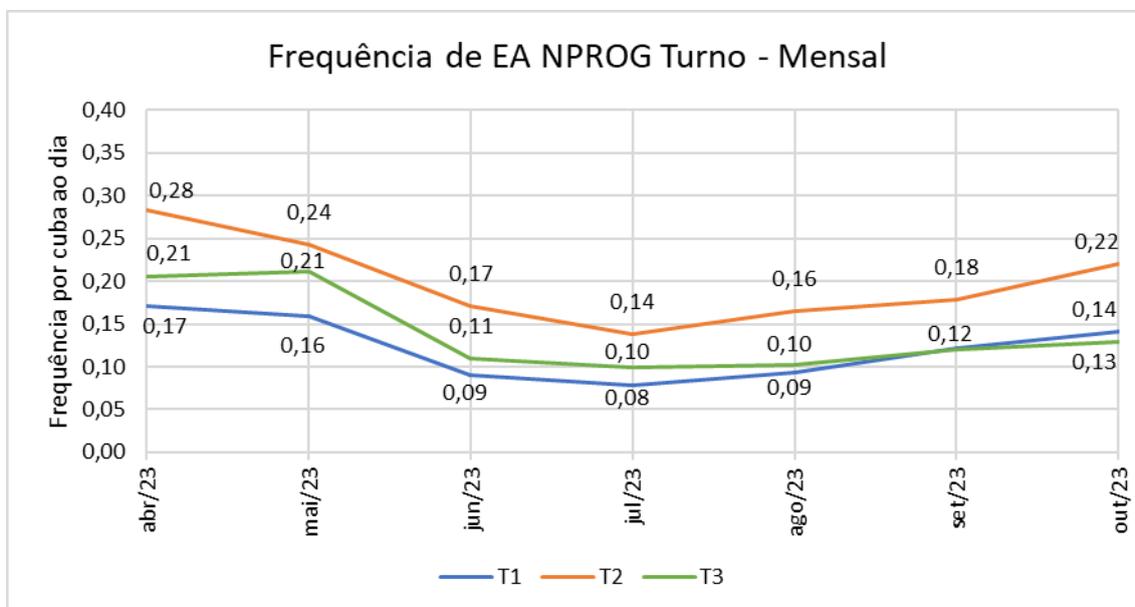


Fonte: Autor, 2025.

Na Figura 12, está representado o mesmo parâmetro, porém segmentado em turnos. Como o processo é contínuo e os funcionários se revezam em três turnos (noturno - turno 1 (T1), diurno - turno 2 (T2) e vespertino

- turno 3 (T3)), o intuito desta representação gráfica é analisar se algum destes apresentava maior dificuldade no controle de efeito anódico, e foi verificado que o turno 2 obteve a frequência mais elevada em todos os meses, o que pode ser explicado pela quantidade simultânea de atividades realizadas em sua maior parte no turno diurno ou por falta de treinamento e conscientização dos funcionários do setor.

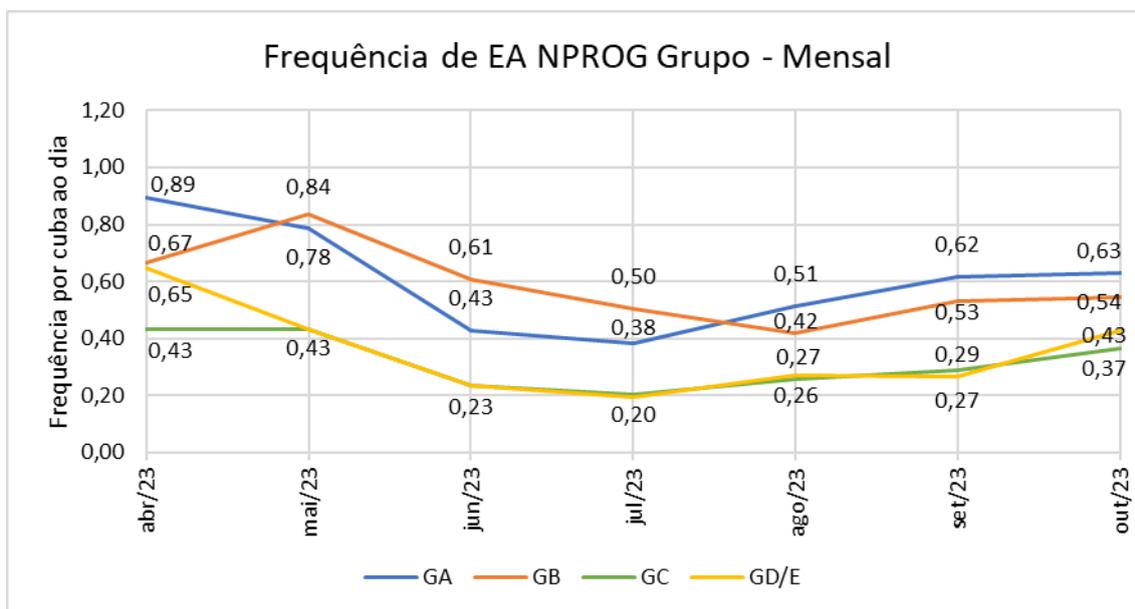
Figura 12 – Gráfico da frequência de efeito anódico por turno.



Fonte: Autor, 2025.

Ademais, decidiu-se analisar a frequência de efeito anódico por grupos de cubas. A Sala Fornos 3 possui 150 cubas eletrolíticas e é dividida em 5 grupos (A, B, C, D e E) compostos por 36 cubas cada, com exceção do grupo E que possui apenas 6 e é comumente analisado junto ao grupo D. Salvo pelo período em que foram instaladas as cubas dos referidos grupos, todos possuem a mesma finalidade no processo. No gráfico da Figura 13, verificou-se que os grupos A e B possuíram as maiores frequências de EA ao longo do tempo. Estes, por serem grupos de cubas instalados há mais tempo em relação aos outros grupos, são, portanto, mais gastos e necessitam de maiores cuidados em seu funcionamento.

Figura 13 – Gráfico da frequência de efeito anódico por grupo de cubas.



Fonte: Autor, 2025.

Para analisar mais profundamente o problema de ocorrência do efeito anódico, foram coletados dados preenchidos pelos funcionários no Gerenciamento de Rotina Diária (GRD) e dispostos em planilhas eletrônicas para, posteriormente, representação em gráficos de Pareto, de forma a entender quais eram os maiores problemas causadores de efeito anódico. Para tanto, além de representar os dados de forma geral, segundo a Tabela 1 e Figura 14, realizou-se também uma segmentação das informações de acordo com os grupos A/B (Tabela 2 e Figura 15) e C/D/E (Tabela 3 e Figura 16) e turnos 1 (Tabela 4 e Figura 17), 2 (Tabela 5 e Figura 18) e 3 (Tabela 6 e Figura 19).

Os possíveis problemas relatados na análise dos funcionários do GRD incluíram:

- (1.0) Quebra preventiva: Quebra lateral realizada quando a quebra pontual se encontra impossibilitada, geralmente por algum defeito no sistema de alimentação de alumina.
- (1.1) Pata: Acúmulo de banho eletrolítico no pistão/plunger, impossibilitando a quebra da crosta e, portanto, inserção da alumina na cuba.
- (1.2) Afogamento: Acúmulo de alumina sobre o banho, devido à falta de solubilidade.

- (1.3) *Plunger* travado: Mau funcionamento do sistema de alimentação, causado por falha mecânica do pistão/*plunger*.
- (1.4) Coeficiente angular baixo: O parâmetro coeficiente angular do sistema de controle (Score) indica a velocidade com que a tensão da cuba está se elevando, ou seja, indo para efeito anódico. Um valor de coeficiente angular baixo aponta que o sistema não foi capaz de prever o efeito.
- (1.5) Desligamento de linha: Interrupção temporária de fornecimento de energia elétrica para que se possa realizar algum serviço específico de manutenção na área, tem como impacto a falta de fornecimento de alumina e, portanto, efeitos anódicos.
- (1.6) Catraca de alumina com defeito: Mau funcionamento do sistema de alimentação, causado por falha mecânica da catraca - mecanismo responsável pela liberação da alumina na cuba.
- (1.7) Obstrução de duto: Entupimento do duto de alimentação de alumina, ocasionado pela presença de impurezas ou partículas muito finas do material, que se compactam e se unem fortemente umas às outras.
- (1.8) Retomada de over: Quando o sistema Score prevê um efeito anódico devido ao aumento de tensão, automaticamente a fase de alimentação muda para overfeed, na qual ocorre uma superalimentação de óxido, na tentativa de suprimir o efeito. Quando, mesmo na fase overfeed, ocorre o efeito anódico diz-se que ocorreu uma retomada de over e alguns motivos para sua ocorrência são a identificação tardia do efeito anódico ou falhas no sistema de alimentação, que não está fornecendo a quantidade necessária de alumina para a cuba.
- (1.9) Projeção de banho: Pode ocorrer por falhas/trincas no ânodo da cuba, permitindo a passagem e projeção do banho eletrolítico no pistão, favorecendo a formação de pata.
- (2.0) Silo vazio: Falta de abastecimento do silo de alumina por más condições operacionais.
- (2.1) Banho baixo: Nível baixo do eletrólito, que causa o desbalanceamento do sistema e reduz a solubilidade da alumina.
- (2.2) Causa desconhecida: Ocasões em quais não se conhece o motivo

que originou o efeito anódico.

Para as representações gráficas, foram utilizadas as numerações que antecedem os nomes dos problemas citados acima.

Tabela 1 – Problemas relatados entre os meses de abril e outubro de 2023.

Problema	Quantidade	Percentual (%)
Quebra preventiva	3974	37,0
Afogamento	3471	32,4
Coef. angular baixo	554	5,2
Pata	553	5,2
Obstrução de duto	534	5,0
Desligamento de linha	425	4,0
Causa desconhecida	329	3,1
Projeção de banho	302	2,8
Plunger travado	208	1,9
Retomada de over	182	1,7
Catraca de alumina	176	1,6
Banho baixo	14	0,1
Silo vazio	5	0,0

Fonte: Autor.

Tabela 2 – Problemas relatados nos grupos A/B entre os meses de abril e outubro de 2023.

Problema	Quantidade	Percentual (%)
Quebra preventiva	2383	35,7
Afogamento	2171	32,6
Coef. angular baixo	359	5,4
Obstrução de duto	340	5,1
Desligamento de linha	302	4,5
Pata	278	4,2
Causa desconhecida	222	3,3
Projeção de banho	218	3,3
Plunger travado	139	2,1
Catraca de alumina	123	1,8
Retomada de over	122	1,8
Banho baixo	10	0,1
Silo vazio	0	0,0

Fonte: Autor.

Tabela 3 – Problemas relatados nos grupos C/D/E entre os meses de abril e outubro de 2023.

Problema	Quantidade	Percentual (%)
Quebra preventiva	1591	39,2
Afogamento	1300	32,0
Causa desconhecida	275	6,8
Coef. angular baixo	195	4,8
Obstrução de duto	194	4,8
Desligamento de linha	123	3,0
Causa desconhecida	107	2,6
Projeção de banho	84	2,1
Plunger travado	69	1,7
Retomada de over	60	1,5
Catraca de alumina	53	1,3
Silo vazio	5	0,1
Banho baixo	4	0,1

Fonte: Autor.

Tabela 4 – Problemas relatados no turno 1 entre os meses de abril e outubro de 2023.

Problema	Quantidade	Percentual (%)
Quebra preventiva	1782	47,4
Afogamento	943	25,1
Coef. angular baixo	201	5,3
Obstrução de duto	189	5,0
Pata	168	4,5
Causa desconhecida	144	3,8
Desligamento de linha	94	2,5
Plunger travado	70	1,9
Projeção de banho	68	1,8
Retomada de over	58	1,5
Catraca de alumina	38	1,0
Banho baixo	3	0,1
Silo vazio	0	0,0

Fonte: Autor.

Tabela 5 – Problemas relatados no turno 2 entre os meses de abril e outubro de 2023.

Problema	Quantidade	Percentual (%)
Quebra preventiva	1490	36,4
Afogamento	1261	30,8
Obstrução de duto	233	5,7
Pata	217	5,3
Coef. angular baixo	208	5,1
Projeção de banho	167	4,1
Desligamento de linha	140	3,4
Causa desconhecida	139	3,4
Retomada de over	89	2,2
Catraca de alumina	69	1,7
Plunger travado	68	1,7
Banho baixo	9	0,2
Silo vazio	4	0,1

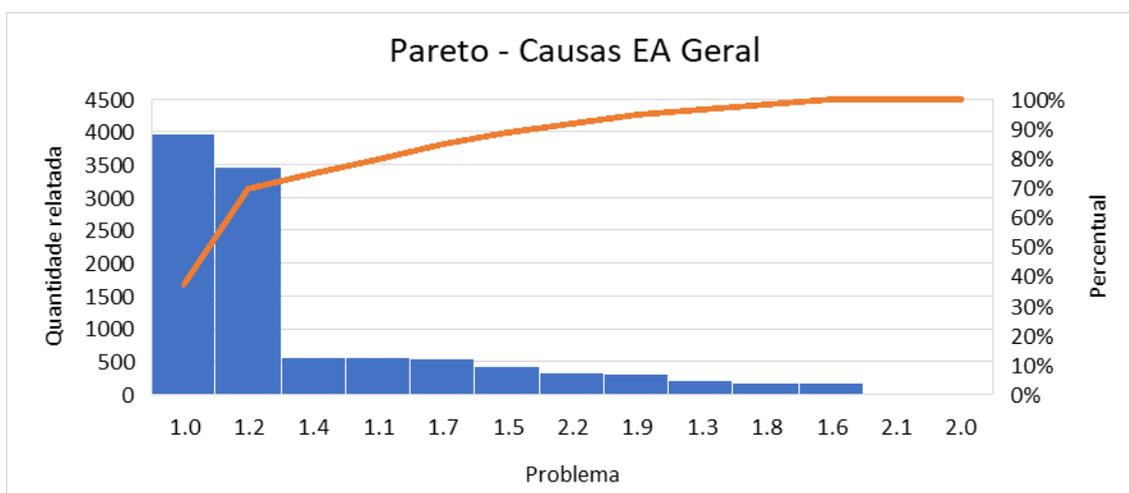
Fonte: Autor.

Tabela 6 – Problemas relatados no turno 3 entre os meses de abril e outubro de 2023.

Problema	Quantidade	Percentual (%)
Afogamento	1267	44,1
Quebra preventiva	702	24,4
Desligamento de linha	191	6,6
Pata	168	5,8
Coef. angular baixo	145	5,0
Obstrução de duto	112	3,9
Plunger travado	70	2,4
Catraca de alumina	69	2,4
Projeção de banho	67	2,3
Causa desconhecida	46	1,6
Retomada de over	35	1,2
Banho baixo	2	0,1
Silo vazio	1	0,0

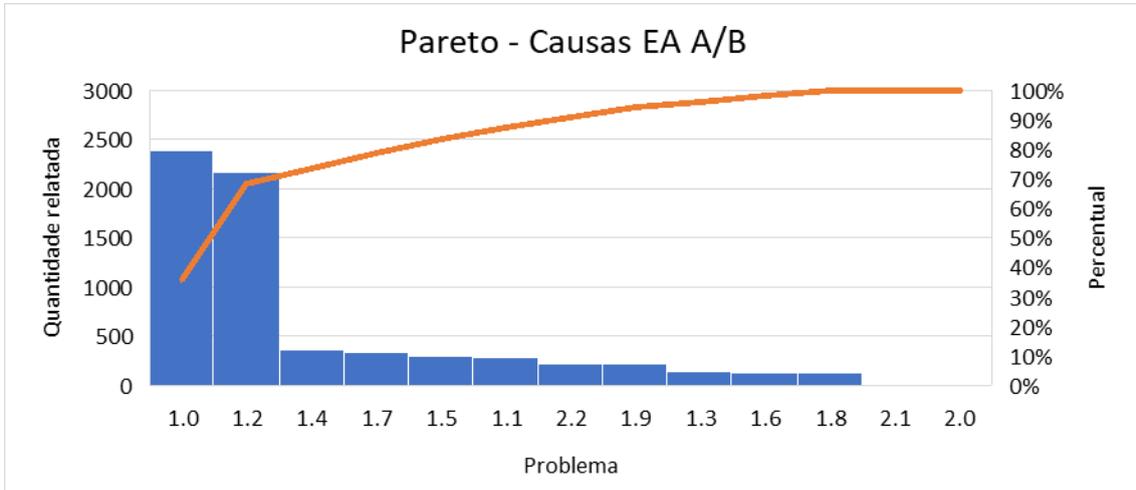
Fonte: Autor.

Figura 14 – Gráfico de Pareto de Causas entre os meses de abril e outubro de 2023.



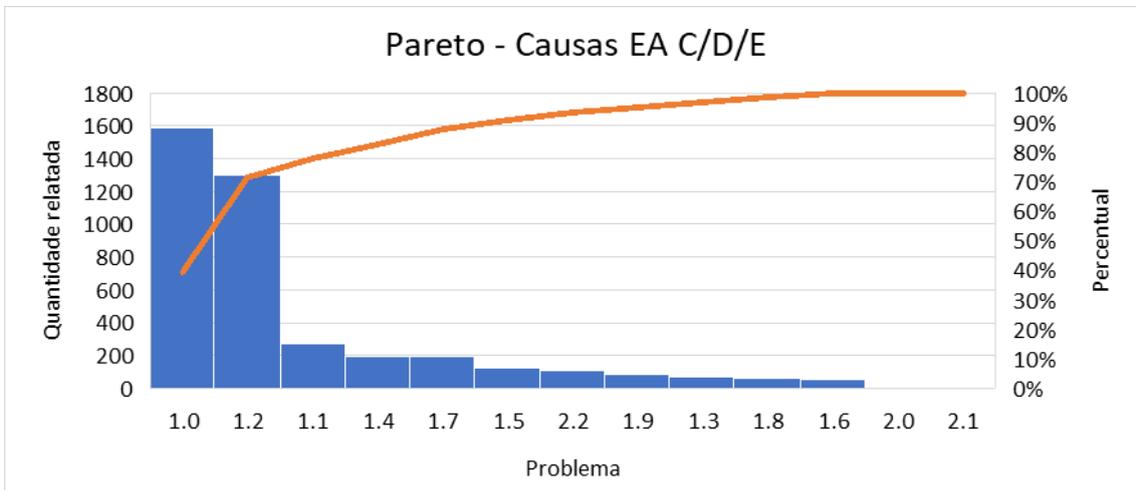
Fonte: Autor, 2025.

Figura 15 – Gráfico de Pareto de Causas dos Grupos A/B entre os meses de abril e outubro de 2023.



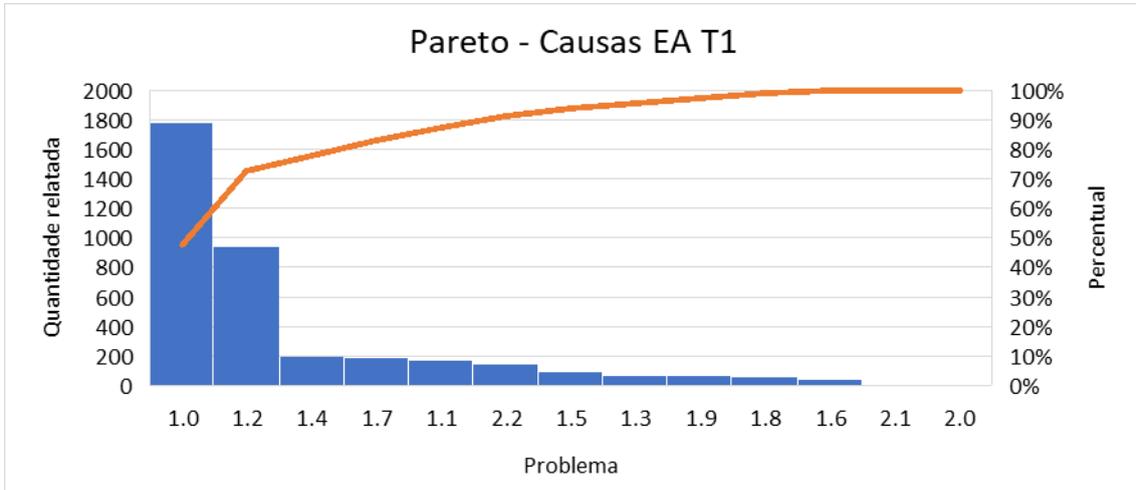
Fonte: Autor, 2025.

Figura 16 – Gráfico de Pareto de Causas dos Grupos C/D/E entre os meses de abril e outubro de 2023.



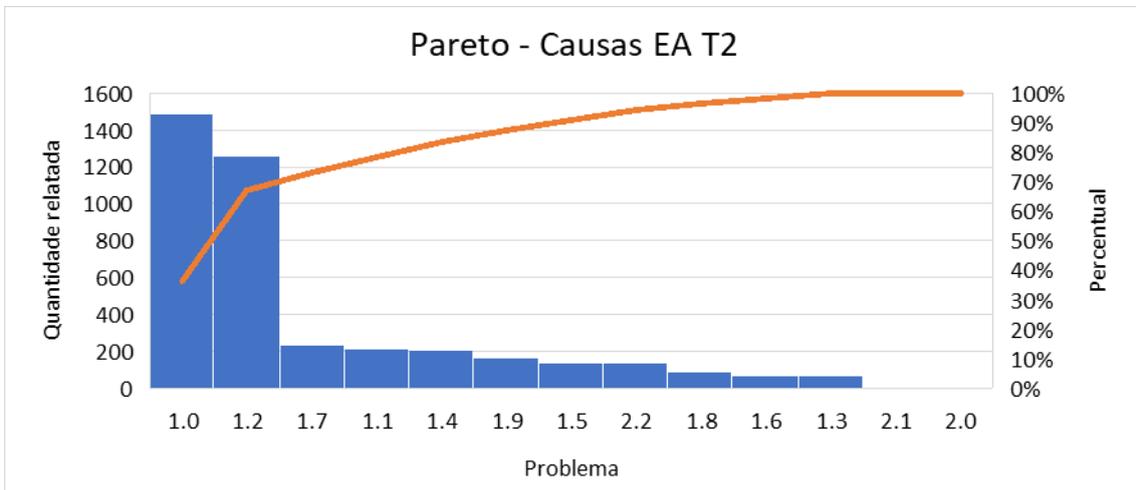
Fonte: Autor, 2025.

Figura 17 – Gráfico de Pareto de Causas do Turno 1 entre os meses de abril e outubro de 2023.



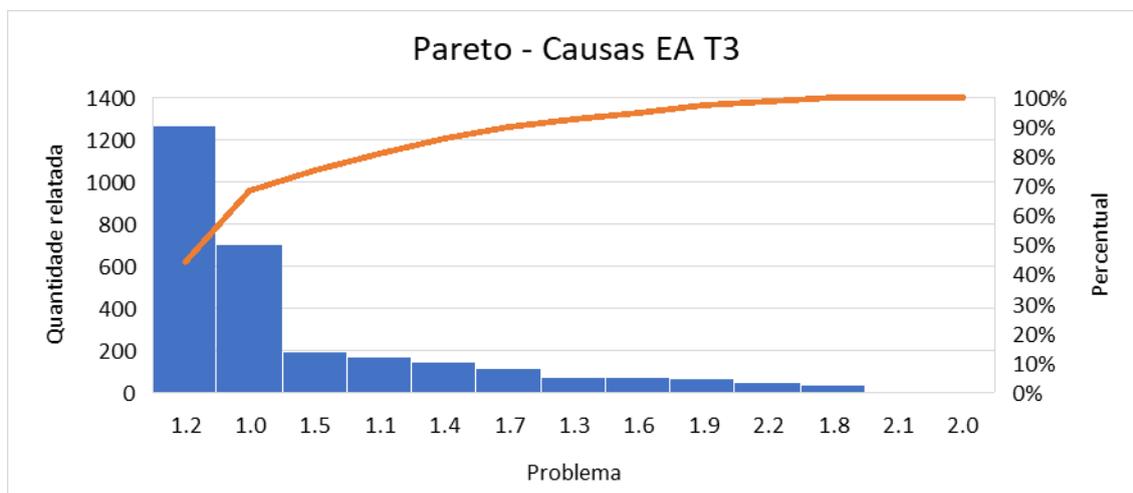
Fonte: Autor, 2025.

Figura 18 – Gráfico de Pareto de Causas do Turno 2 entre os meses de abril e outubro de 2023.



Fonte: Autor, 2025.

Figura 19 – Gráfico de Pareto de Causas do Turno 3 entre os meses de abril e outubro de 2023.



Fonte: Autor, 2025.

A análise dos gráficos de Pareto indicou como sendo as principais causas, de forma praticamente unânime: Quebra preventiva (1.0), afogamento (1.2), pata (1.1), obstrução de duto (1.7), coeficiente angular baixo (1.4) e desligamento de linha (1.5), sendo ainda quebra preventiva e afogamento os motivos responsáveis por 70% dos casos em média.

A partir de um *brainstorming* realizado com a gestão e equipe técnica da área, foram discutidos quais dessas causas mencionadas pelos operadores poderiam ser as maiores causadoras de efeitos anódicos não programados, se existiriam mais possíveis causas e quais os planos de ação que deveriam ser prioridades. Os resultados de cada uma das causas são descritos a seguir.

Na quebra preventiva, como o sistema de alimentação em quebra pontual não está habilitado, são adicionadas grandes quantidades de alumina em batelada pelas laterais da cuba e, portanto, a concentração de alumina permanece acima do limite para que o efeito anódico não ocorra (aproximadamente 2%). O que pode ocorrer é a falta de qualidade no procedimento da quebra por parte dos operadores, o que seria um problema de orientação e conscientização dos mesmos.

Em relação aos problemas de afogamento e pata, várias causas contribuem para suas ocorrências, incluindo granulometria reduzida da alumina, temperatura fora dos parâmetros de processo (muito baixa), e nível de líquidos (metal + banho) fora dos parâmetros. Portanto, o que deve ser estudado para

compreender melhor a ocorrência dos fenômenos de pata e afogamento são as interferências dos parâmetros de processo mencionados (granulometria, temperatura e nível de líquidos).

A obstrução dos dutos de alumina pode ser gerada tanto por granulometrias muito finas, quando por impurezas contidas na matéria-prima, portanto, deve ser analisada a influência da qualidade do óxido utilizado no processo, principalmente no que se refere à distribuição granulométrica, que é responsável por outros fenômenos explicados anteriormente.

O coeficiente angular baixo é um parâmetro que indica alguma falha do sistema de controle Score, pois, uma vez que o sistema não identifica um aumento de tensão da cuba, a fase de alimentação overfeed não é acionada, e o efeito ocorre por falta de quantidade adequada de alumina.

O desligamento de linha é um fator inevitável para que ocorra algumas manutenções dos sistemas de cubas, que só são possíveis realizar no estado de energia zero, ou seja, sem a passagem de corrente elétrica no local, garantindo a segurança dos funcionários.

Portanto, com o objetivo de manter controlada a frequência de efeito anódico abaixo de 0,55, tais análises deram origem aos seguintes planos de ação prioritários, citados na Tabela 7, as quais seriam mais viáveis por evitarem a necessidade de investimento.

Tabela 7 – Planos de ação definidos em brainstorming no primeiro A3 realizado.

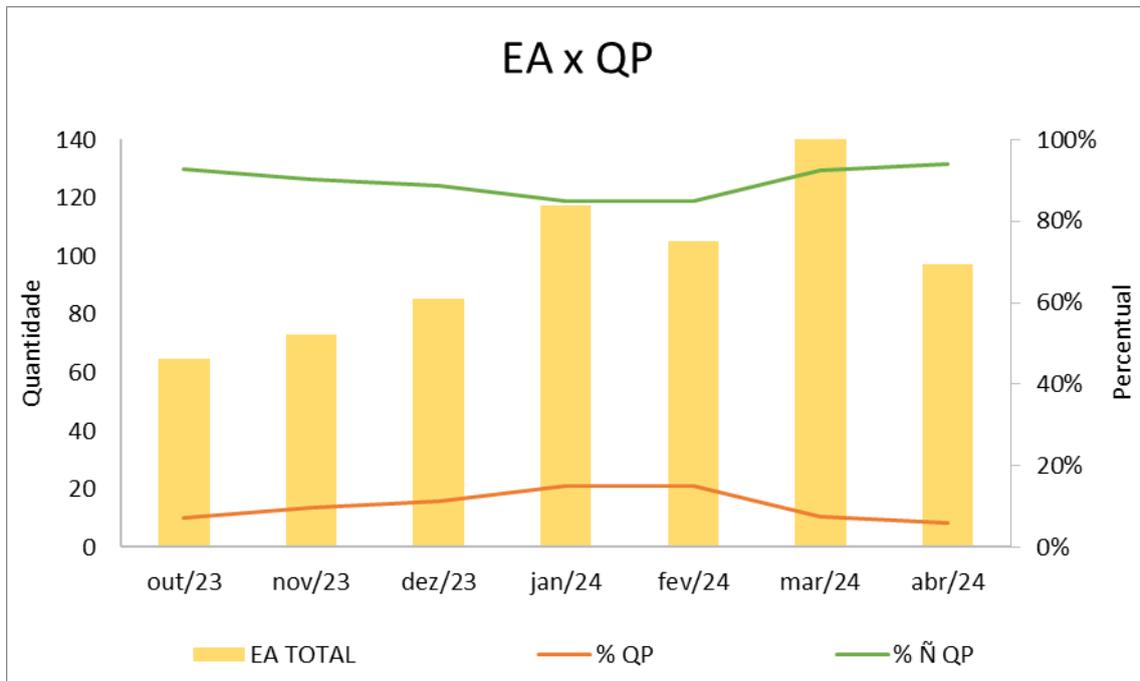
Plano de ação	Descrição	Prazo
1	Análises dos Parâmetros de Processos: Estudo das possíveis causas que contribuem para o efeito anódico (Quebra Preventiva, Afogamento, Pata, Temperatura, Banho e Metal)	Abril/2024
2	Conscientização: Criação de planilha para o direcionamento das cubas com maior frequência de efeito anódico semanal para haja a realização de funis de resolução de problemas por parte dos técnicos e dos operadores, com acompanhamento da aderência à ação.	Indefinido - Ação Contínua
3	Conscientização: Acompanhamento semanal, por meio de e-mails, da frequência de efeito anódico da sala em geral, em grupos e em turnos.	Indefinido - Ação Contínua

Fonte: Autor.

4.1.2 Desenvolvimento 1

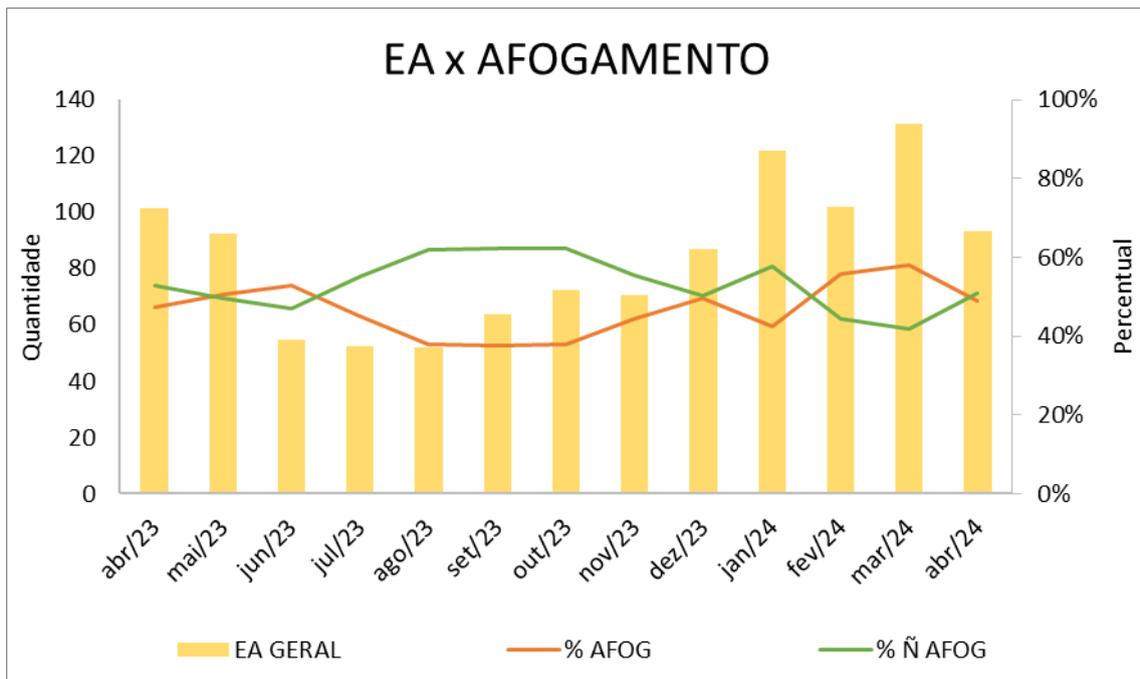
O primeiro plano de ação definido começou a ser implantado em outubro de 2023, com vigência até abril de 2024. Durante esse período foram coletados os dados e analisados os parâmetros operacionais de quebra preventiva, afogamento, pata, temperatura do banho, nível de banho, nível de metal e nível da coluna de líquidos (banho + metal). Para cada um destes parâmetros analisados, plotou-se um gráfico que reunia informações de quantidade total de efeitos anódicos mensais (representada em amarelo nos gráficos), porcentagem de cubas dentro da faixa estipulada para o parâmetro (representada em verde nos gráficos) e porcentagem de cubas fora da faixa (representada em laranja e azul nos gráficos). Para a maioria dos gráficos, foi possível obter dados retroativos para realizar as análises, apenas para o gráfico da influência de quebra preventiva da Figura 20, esses dados não estavam disponíveis e foram analisados de outubro de 2023 a abril de 2024.

Figura 20 – Análise da influência de Quebra Preventiva na frequência de efeito anódico.



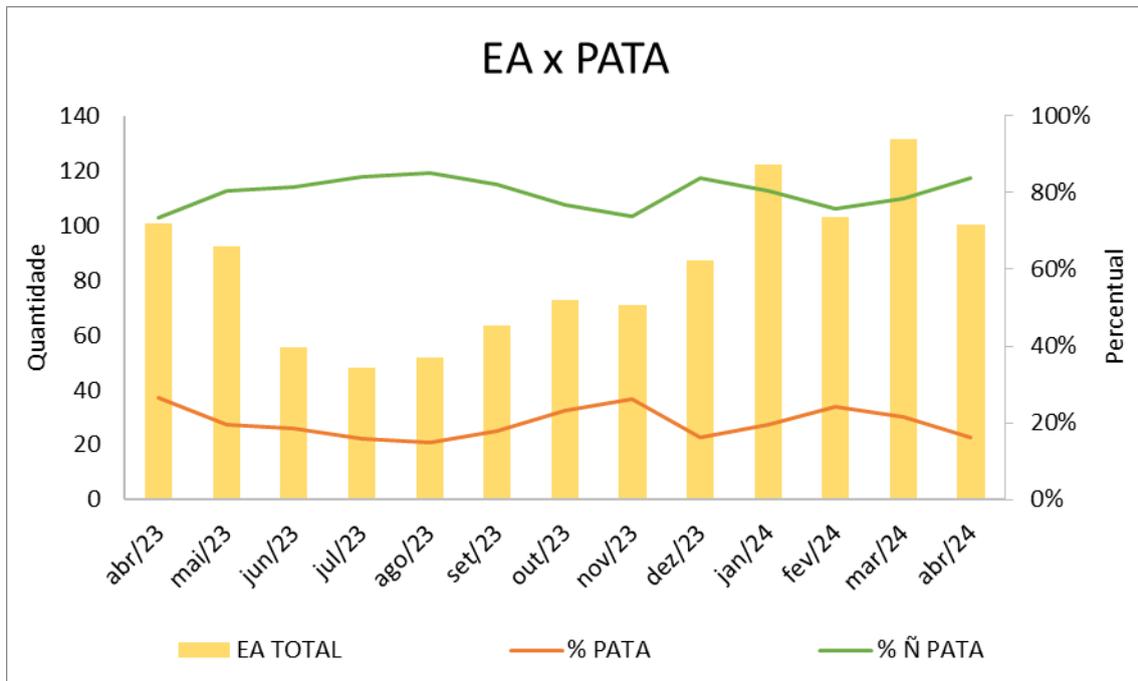
Fonte: Autor, 2025.

Figura 21 – Análise da influência de Afogamento na frequência de efeito anódico.



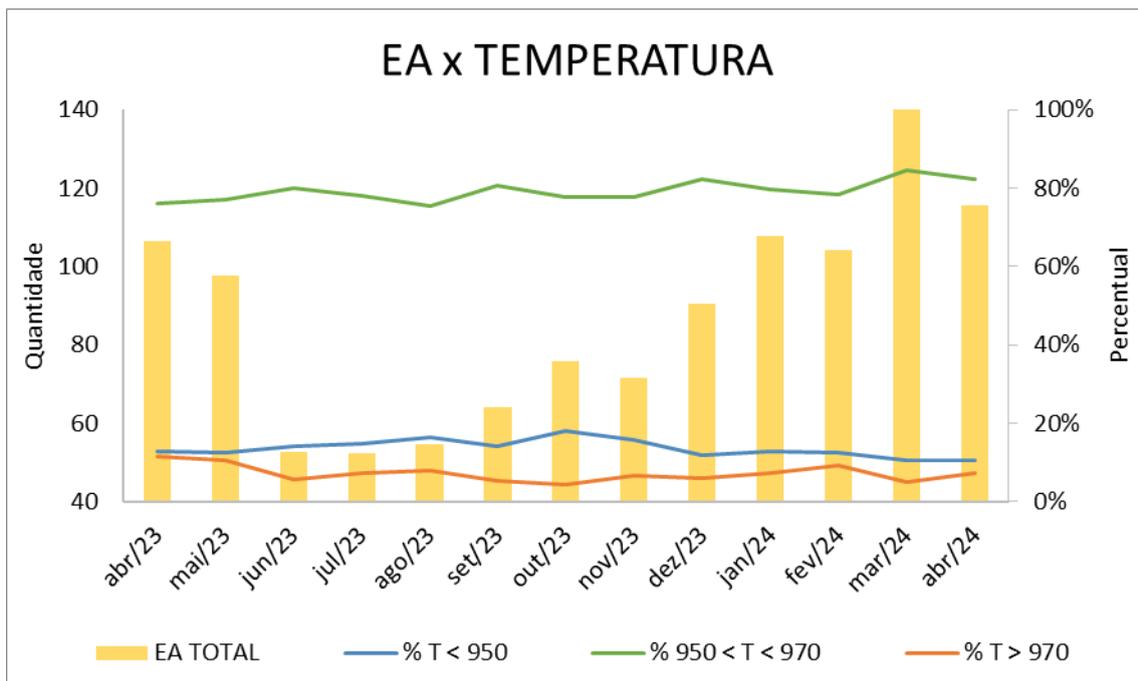
Fonte: Autor, 2025.

Figura 22 – Análise da influência de Pata na frequência de efeito anódico.



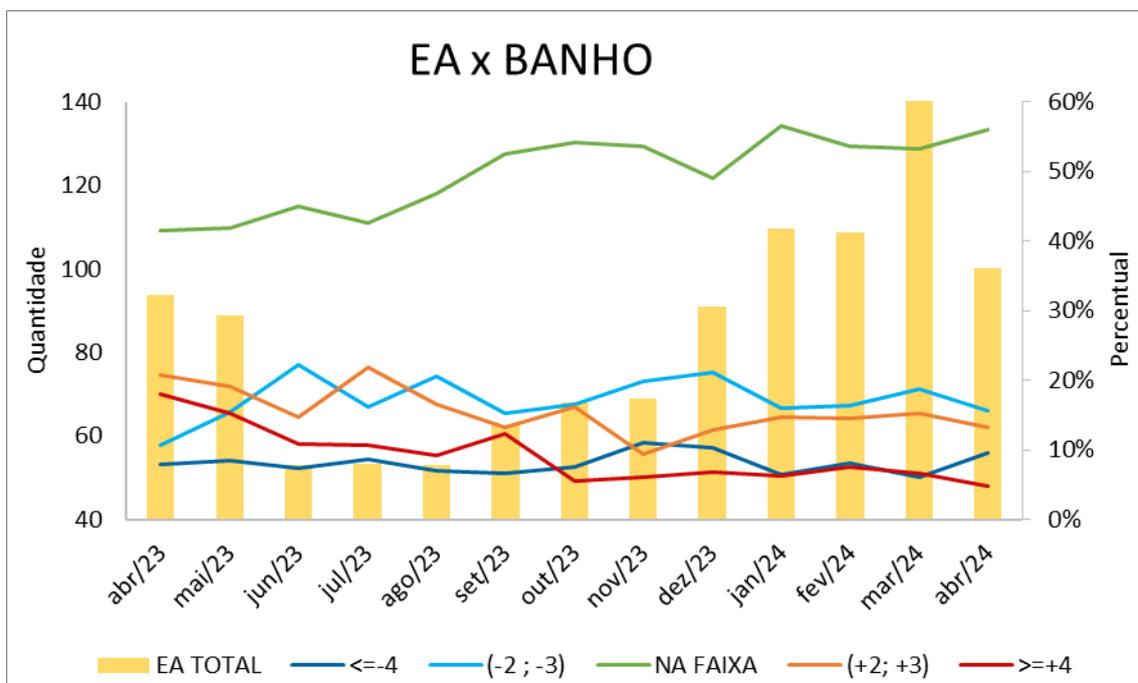
Fonte: Autor, 2025.

Figura 23 – Análise da influência de Temperatura na frequência de efeito anódico.



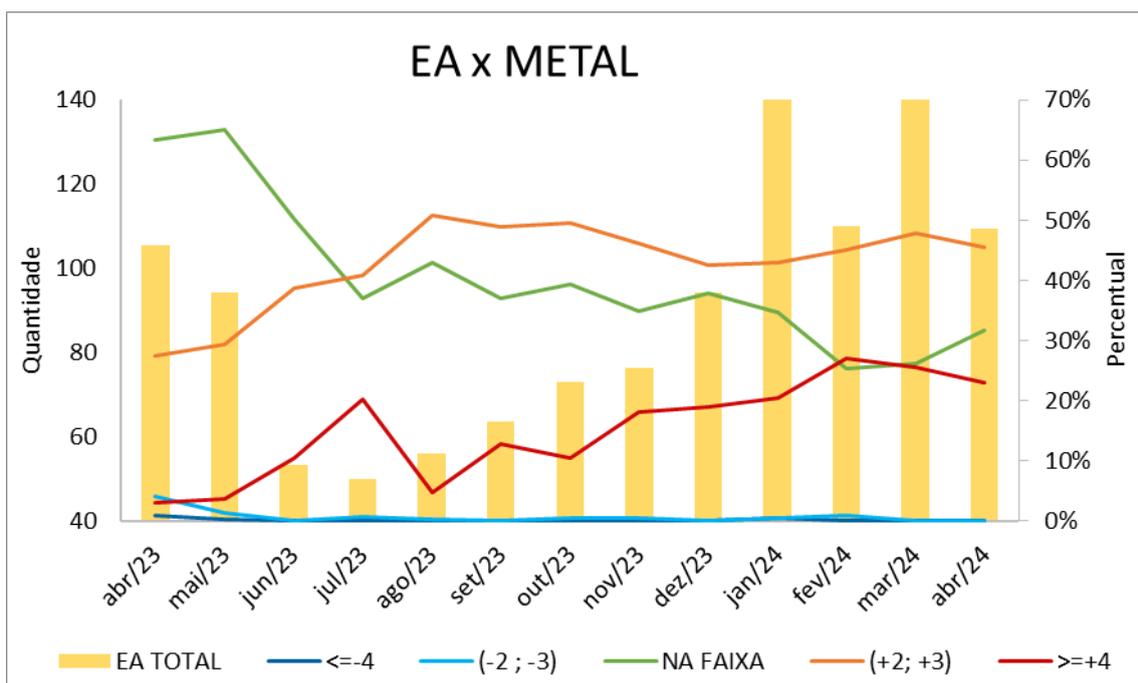
Fonte: Autor, 2025.

Figura 24 – Análise da influência de Nível de Banho na frequência de efeito anódico.



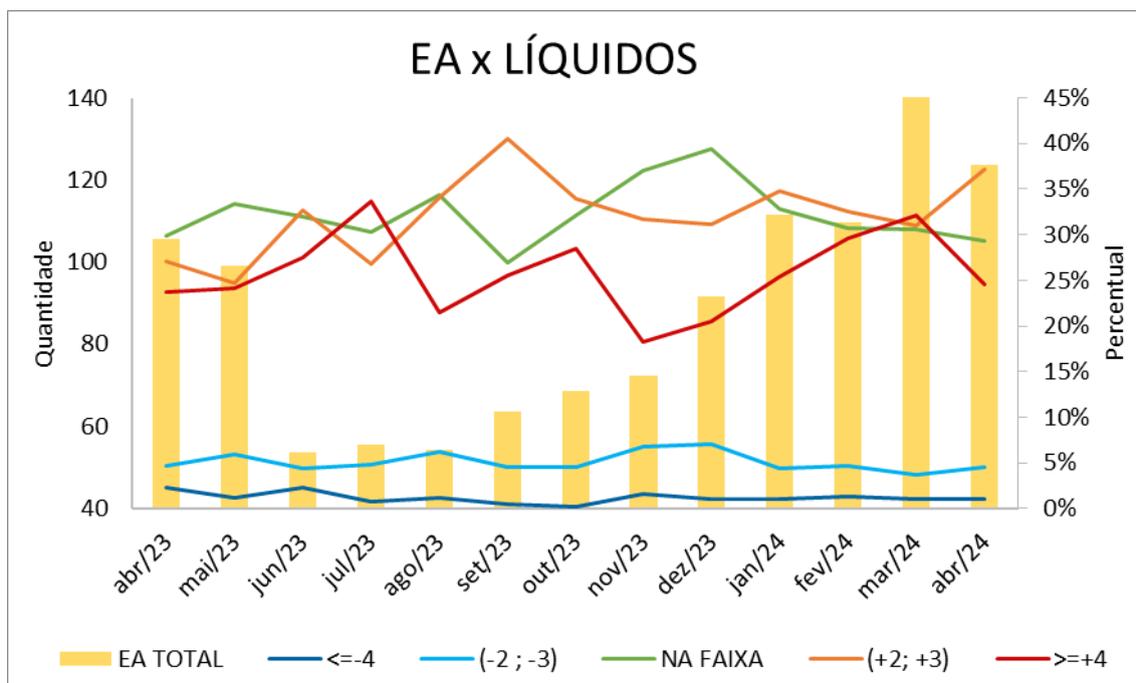
Fonte: Autor, 2025.

Figura 25 – Análise da influência de Nível de Metal na frequência de efeito anódico.



Fonte: Autor, 2025.

Figura 26 – Análise da influência de Nível de Líquidos na frequência de efeito anódico.



Fonte: Autor, 2025.

Esperava-se nos gráficos um comportamento das colunas amarelas semelhantes ao comportamento das linhas azuis e laranjas, ou seja, quanto maior a porcentagem de cubas fora de padrão do processo, maior a quantidade de efeitos anódicos ocorridos naquele período, porém, notou-se pouca relação entre os dados, o que pode ser explicado pela ampla quantidade de variáveis do processo que não podem ser analisadas individualmente na indústria, além de fatores humanos, associados a qualidade na realização dos procedimentos operacionais que, sem dúvidas, interferem no desempenho do processo como um todo.

A partir destas análises, vale ressaltar a realização do segundo e terceiro planos de ação simultaneamente às análises dos parâmetros durante o período entre outubro de 2023 e abril de 2024. Essas ações envolviam a conscientização dos operadores e, por serem ações contínuas, tinham prazos indefinidos.

Para essas ações, foram definidos os técnicos e operadores responsáveis por cada grupo de cubas, de modo que pudessem focar nos cuidados e melhorias necessários para aquele grupo específico. A cada semana eram direcionados, por e-mail, três cubas de cada grupo que tiveram maior frequência de efeito anódico para que os técnicos realizassem um funil de

resolução de problemas e, assim, pudessem dar atenção prioritária a essas cubas. Quanto aos operadores, poderiam definir uma cuba para a realização do funil, contanto que estivesse dentro de seu grupo proprietário. Nestes e-mails eram expostas também as aderências na realização dos funis semanais, tanto para os técnicos, quanto para os operadores. Além disso, o acompanhamento da frequência de efeito anódico era realizado por meio de gráficos de resumos diários e mensais, tanto por turno, quanto por grupo, como mostra a Figura 27.

Figura 27 – Exemplo de resumos contidos no e-mail de acompanhamento da frequência de efeito anódico.

Resumo da aderência em realização de funis:

Período		Semana		Cargo		Funil Técnicos																		
19/abr	25/abr	17		Turno	Técnico	Aderência	Aderência T	18/jan	25/jan	01/fev	08/fev	15/fev	22/fev	29/fev	07/mar	14/mar	21/mar	28/mar	04/abr	11/abr	18/abr	25/abr		
Turno 1	Silvio	100%	100%	●	●	-	-	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	
	Silvio	100%		●	●	-	-	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	Silvio	100%		●	●	-	-	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Turno 2	Leonardo	100%	100%	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	
	Leonardo	100%		●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	Leonardo	100%		●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Turno 3	Justo	100%	100%	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	
	Justo	100%		●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	Justo	100%		●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Turno 1	Renato	100%	100%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	Renato	100%		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Renato	100%		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Turno 2	Gervasio	100%	100%	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	
	Gervasio	100%		●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	Gervasio	100%		●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Turno 3	Ludgerio	-	100%	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	
	Ludgerio	-		●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	Ludgerio	-		●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Turno 1	Kalid	100%	100%	●	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	Kalid	100%		●	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Kalid	100%		●	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Turno 2	Coan	100%	100%	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	
	Coan	100%		●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	Coan	100%		●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Turno 3	Adilson	100%	100%	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	
	Adilson	100%		●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	Adilson	100%		●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Turno 1	Reginaldo	100%	63%	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	
	Reginaldo	100%		●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	Reginaldo	100%		●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●

Período		Semana		Cargo		Funil Operadores																	
19/abr	25/abr	17		Turno	Grupo	Aderência	Aderência T	18/jan	25/jan	01/fev	08/fev	15/fev	22/fev	29/fev	07/mar	14/mar	21/mar	28/mar	04/abr	11/abr	18/abr	25/abr	
Turno 1	A/B	100%	100%	-	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	C/D/E	100%		-	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Turno 2	A/B	100%	100%	-	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	C/D/E	100%		-	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Turno 3	A/B	100%	63%	-	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	C/D/E	25%		-	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●

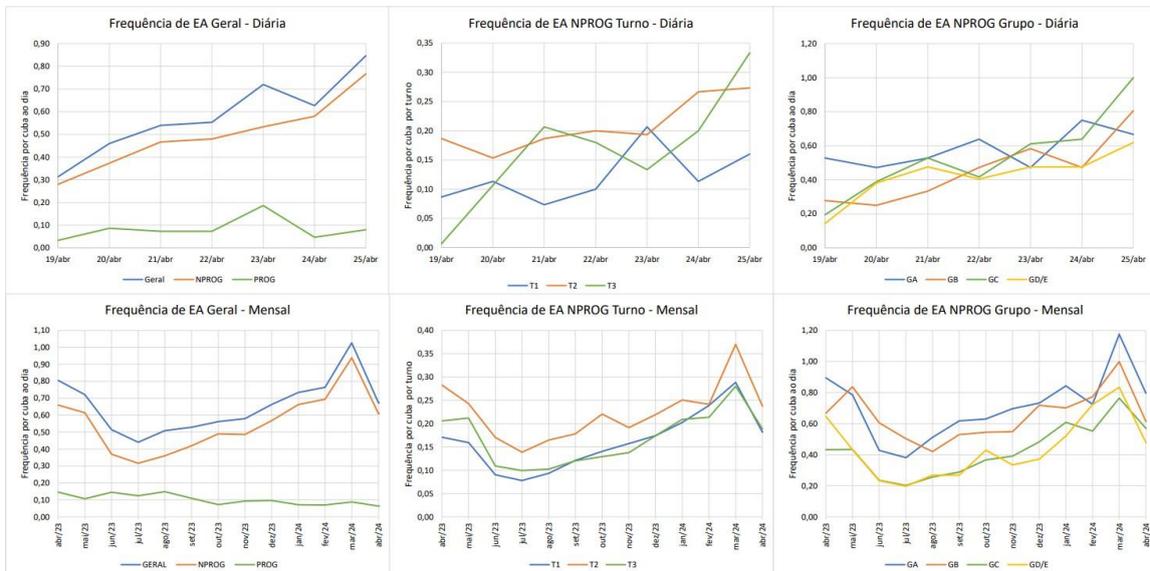
Resumo da frequência de efeito anódico das cubas direcionadas na semana anterior:

Forno	Turno Op. Proprietário	Técnico Responsável	Grupo Trabalho	Frequência Média 12/abr - 18/abr	Frequência Diária					Frequência Média 19/abr - 25/abr		
					19/abr	20/abr	21/abr	22/abr	23/abr		24/abr	25/abr
516	T1	Silvio	A2	2,7	4	3	2	2	1	1	1	2,0
536	T1	Silvio	B2	2,1	1	1	0	3	1	1	1	1,0
523	T1	Silvio	B1	0,3	0	1	0	0	1	0	0	0,3
559	T1	Leonardo	D1	2,4	5	3	9	5	5	3	3	4,7
541	T1	Leonardo	C1	0,7	1	0	0	0	0	0	0	0,1
558	T1	Leonardo	D1	0,1	2	0	1	2	3	2	0	1,4
501	T1	Justo	A1	0,1	1	2	0	0	0	0	0	0,4
517	T1	Justo	A2	3,1	3	5	1	2	1	3	3	2,6
504	T1	Justo	A1	0,3	0	1	0	0	0	0	0	0,1
636	T2	Renato	B2	0,7	0	0	0	0	0	0	0	0,0
632	T2	Renato	B2	0,0	0	2	3	1	1	0	0	1,0
615	T2	Renato	A2	0,0	0	0	0	0	0	0	0	0,0
656	T2	Gervásio	D1	0,3	1	1	0	0	0	0	0	0,3
642	T2	Gervásio	C1	0,1	0	0	0	0	0	0	1	0,1
668	T2	Gervásio	D2/E	1,1	0	0	0	0	0	0	0	0,0
622	T2	Ludgério	B1	0,4	0	0	0	0	0	0	2	0,3
623	T2	Ludgério	B1	0,0	0	0	0	0	0	0	0	0,0
616	T2	Ludgério	A2	2,3	0	3	0	0	0	0	0	0,4
527	T3	Kalid	B1	0,7	0	0	0	2	2	0	3	1,0
526	T3	Kalid	B1	0,3	0	0	0	3	2	0	2	1,0
530	T3	Kalid	B2	0,4	1	2	0	1	0	0	0	0,6
611	T3	Adilson	A2	0,6	0	2	0	0	0	2	0	0,6
509	T3	Adilson	A1	0,6	0	1	4	1	0	0	0	0,9
628	T3	Adilson	B2	0,9	0	0	0	0	0	0	0	0,0
648	T3	Reginaldo	C2	0,4	0	0	0	0	3	5	0	1,1
546	T3	Reginaldo	C2	1,7	2	1	0	0	1	1	1	0,9
547	T3	Reginaldo	C2	3,0	1	3	2	1	3	1	0	1,6

Cubas direcionadas para realização de funis na semana seguinte:

Forno	Turno Op. Proprietário	Técnico Responsável	Grupo Trabalho	Frequência Média 19/abr - 25/abr
516	T1	Silvio	A2	2,0
501	T1	Silvio	A1	0,4
518	T1	Silvio	A2	0,1
574	T1	Leonardo	D2/E	0,1
559	T1	Leonardo	D1	4,7
541	T1	Leonardo	C1	0,1
520	T1	Justo	B1	2,7
524	T1	Justo	B1	0,9
515	T1	Justo	A2	3,1
615	T2	Renato	A2	0,0
614	T2	Renato	A2	0,0
623	T2	Renato	B1	0,0
642	T2	Gervásio	C1	0,1
655	T2	Gervásio	D1	1,0
656	T2	Gervásio	D1	0,3
621	T2	Ludgério	B1	1,1
620	T2	Ludgério	B1	0,4
636	T2	Ludgério	B2	0,0
630	T3	Kalid	B2	0,4
529	T3	Kalid	B2	0,1
611	T3	Kalid	A2	0,6
628	T3	Adilson	B2	0,0
625	T3	Adilson	B1	0,1
664	T3	Adilson	D2/E	0,4
648	T3	Reginaldo	C2	1,1
647	T3	Reginaldo	C2	0,1
546	T3	Reginaldo	C2	0,9

Resumo da frequência de efeito anódico diária e mensal:



Fonte: Autor, 2025.

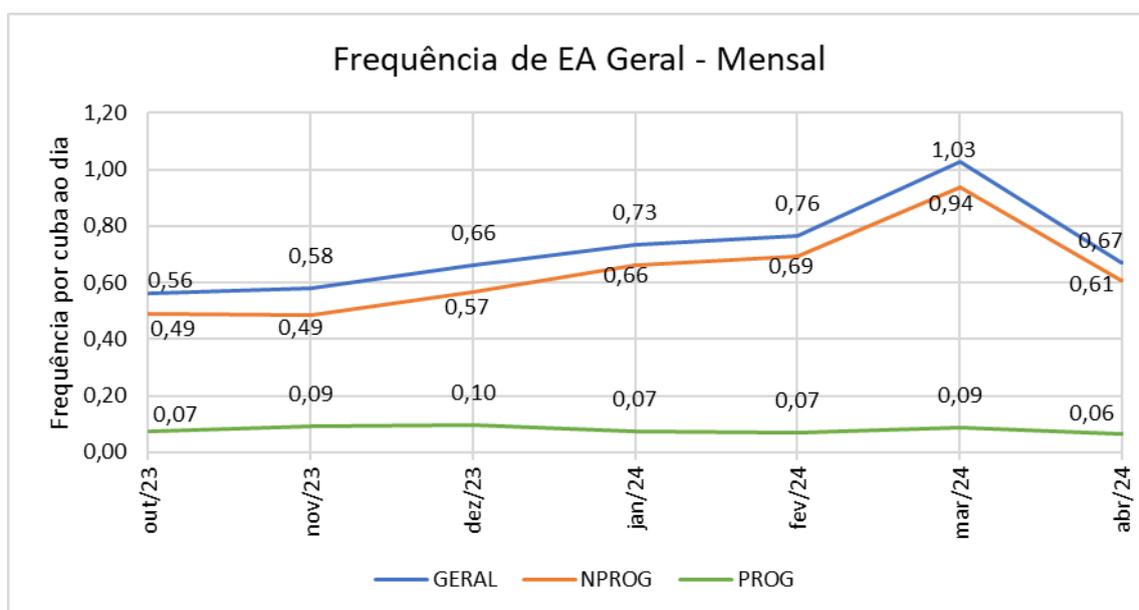
4.1.3 Checagem 1

Após o período de desenvolvimento, foi realizada a etapa de checagem, na qual verificou-se a execução dos planos de ação e sua influência na resolução do problema (frequência de efeito anódico elevada).

O plano de ação de análise de influência dos parâmetros de processo na frequência de efeito anódico foi realizado no prazo estipulado, porém, apesar da literatura descrever as influências desses parâmetros (quebra preventiva, afogamento, pata, temperatura e nível de líquidos) na frequência de efeito anódico, não foi possível comprovar tais fenômenos no ambiente da indústria, uma vez que acontecem simultaneamente e não é possível fixar todos os parâmetros para analisar somente um fator de influência específico.

Em relação aos planos de ação referentes à conscientização dos funcionários, notou-se um aumento na participação e aderência de realização dos funis de resolução de problemas ao passar dos meses, entretanto, como pode-se notar pela Figura 28, o problema de alta frequência de efeito anódico não foi solucionado, pelo contrário, atingiu patamares superiores aos que se encontrava anteriormente, chegando ao seu auge de 1,03 efeitos por cuba ao dia.

Figura 28 – Gráfico da frequência de efeito anódico entre outubro de 2023 e abril de 2024.



Fonte: Autor, 2025.

4.1.4 Ação 1

Como a metodologia A3 é um processo cíclico e uma vez que o primeiro A3 realizado não trouxe uma solução satisfatória ao problema, decidiu-se realizar um segundo A3 para análise de outros parâmetros relevantes ao processo e otimização das ferramentas de melhoria contínua utilizadas. Tais análises serão mais bem descritas no tópico 4.2.

4.2 SEGUNDO RELATÓRIO A3

Com a contribuição dos gestores e técnicos do setor, elaborou-se o segundo relatório A3 descrito na Figura 29, em abril de 2024. As próximas etapas deste tópico elucidarão o processo de PDCA desenvolvido no mesmo.

Figura 29 – Segundo Relatório A3.

cba		FORMULÁRIO DE GESTÃO DA QUALIDADE		Código	FGQ-CBA-AL-1348	
		Título: FERRAMENTAS DE MELHORIA CONTINUA		Revisão	15 - 12/04/2024	
				Área	CBA-FGQ	
				Fase	Vigente	
Nome do Problema:	Ponto de Causa:	Relatado Por:	Data:	Número do Problema:		
Efeito anódico	Frequência de EA elevada (acima de 0,55)	Gerenciamento de Rotina Diária (GRD)	Abr/2024	24-1		
01 Ponto de causas (Local real do problema):		5. Contramedidas / ações de melhoria				
Cubas eletrolíticas Salas Fornos 3		Análise granulométrica da alumina de acordo com os padrões requeridos no processo. Adição da análise de eficácia dos funis realizados por técnicos e operadores ao e-mail de acompanhamento de EA. Criação de aplicativo online para a realização dos funis de resolução de problemas.				
02 Equipe:		Área:		6. Plano de ação/Contramedidas:		
Hildo	Produção - SF3	Especifique os itens de ação para implementação das contramedidas		Quem	Até Quando	Status
Miranda	Produção - SF3					
Caroline	Produção - SF3	Análise de granulometria da alumina		Caroline	Out/2024	Concluído
Osvanildo	Processo					
Robson	Processo	Planilha e e-mail de aderência ao funil		Caroline	Perene	Concluído
03 Objetivos e metas:		E-mail de acompanhamento de EA		Caroline	Perene	Concluído
Redução da frequência de efeito anódico para abaixo de 0,55 até outubro de 2024.		Adição da análise de eficácia dos funis		Caroline	Perene	Concluído
		Criação de aplicativo de funil		Caroline	Mai/2024	Concluído
04 Análise de causas-raiz		07 Avaliação:				
Relacione as potenciais causas-raiz		Problema resolvido: <input checked="" type="checkbox"/>		Parcialmente resolvido: <input type="checkbox"/>		
Homem: Falta de orientação dos operadores		08 Padronização:				
Materiais: Granulometria da alumina		Granulometria da alumina: <25µm (até 6%) e <44µm (até 14%).				
Máquina:		Conscientização dos técnicos e operadores: Cubas com maiores frequência de EA, direcionamento de 3 funis para os técnicos e 1 funil a escolha do operador.				
Método:		Expansão das melhorias a outras áreas da fábrica.				
Natureza:						
Especifique a provável causa-raiz:						
As duas causas contribuem para o aumento da frequência de efeito anódico.						

Fonte: Autor, 2025.

4.2.1 Planejamento 2

Para esta etapa, para analisar se os principais responsáveis pelos efeitos anódicos continuaram sendo os mesmos, foram novamente coletados os dados disponibilizados pelos operadores no GRD, dispostos em planilhas e, posteriormente, em gráficos de Pareto. Os dados tanto na forma geral, quanto por grupos e por turnos estão representados nas Tabelas 8 a 13 e gráficos das Figuras 30 a 35.

Tabela 8 – Problemas relatados entre novembro de 2023 e abril de 2024.

Problema	Quantidade	Percentual (%)
Afogamento	2602	38,7
Quebra preventiva	1547	23,0
Obstrução de duto	468	7,0
Causa desconhecida	460	6,8
Pata	375	5,6
Retomada de over	347	5,2
Coef. angular baixo	271	4,0
Desligamento de linha	219	3,3
Plunger travado	179	2,7
Projeção de banho	152	2,3
Catraca de alumina	91	1,4
Silo vazio	17	0,3
Banho baixo	0	0,0

Fonte: Autor.

Tabela 9 – Problemas relatados nos grupos A/B entre novembro de 2023 e abril de 2024.

Problema	Quantidade	Percentual (%)
Afogamento	1713	43,4
Quebra preventiva	734	18,6
Obstrução de duto	309	7,8
Causa desconhecida	273	6,9
Retomada de over	234	5,9
Coef. angular baixo	158	4,0
Desligamento de linha	157	4,0
Pata	141	3,6
Plunger travado	92	2,3
Projeção de banho	77	2,0
Catraca de alumina	47	1,2
Silo vazio	9	0,2
Banho baixo	0	0,0

Fonte: Autor.

Tabela 10 – Problemas relatados nos grupos C/D/E entre novembro de 2023 e abril de 2024.

Problema	Quantidade	Percentual (%)
Afogamento	889	31,9
Quebra preventiva	813	29,2
Pata	234	8,4
Causa desconhecida	187	6,7
Obstrução de duto	159	5,7
Coef. angular baixo	113	4,1
Retomada de over	113	4,1
Plunger travado	87	3,1
Projeção de banho	75	2,7
Desligamento de linha	62	2,2
Catraca de alumina	44	1,6
Silo vazio	8	0,3
Banho baixo	0	0,0

Fonte: Autor.

Tabela 11 – Problemas relatados no turno 1 entre novembro de 2023 e abril de 2024.

Problema	Quantidade	Percentual (%)
Afogamento	942	36,2
Quebra preventiva	737	28,3
Causa desconhecida	232	8,9
Obstrução de duto	162	6,2
Retomada de over	157	6,0
Pata	135	5,2
Coef. angular baixo	67	2,6
Plunger travado	64	2,5
Desligamento de linha	59	2,3
Projeção de banho	30	1,2
Catraca de alumina	17	0,7
Silo vazio	2	0,1
Banho baixo	0	0,0

Fonte: Autor.

Tabela 12 – Problemas relatados no turno 2 entre novembro de 2023 e abril de 2024.

Problema	Quantidade	Percentual (%)
Afogamento	898	35,5
Quebra preventiva	547	21,6
Obstrução de duto	219	8,7
Causa desconhecida	171	6,8
Pata	160	6,3
Retomada de over	130	5,1
Coef. angular baixo	106	4,2
Desligamento de linha	103	4,1
Projeção de banho	83	3,3
Plunger travado	63	2,5
Catraca de alumina	41	1,6
Silo vazio	9	0,4
Banho baixo	0	0,0

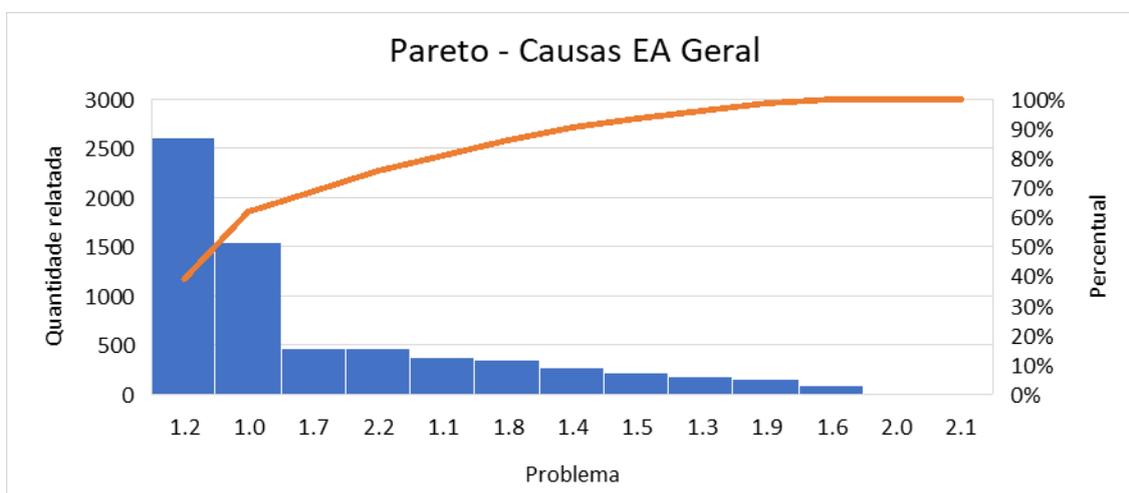
Fonte: Autor.

Tabela 13 – Problemas relatados no turno 3 entre novembro de 2023 e abril de 2024.

Problema	Quantidade	Porcentagem
Afogamento	762	47,8%
Quebra preventiva	263	16,5%
Coef. angular baixo	98	6,1%
Obstrução de duto	87	5,5%
Pata	80	5,0%
Retomada de over	60	3,8%
Causa desconhecida	57	3,6%
Desligamento de linha	57	3,6%
Plunger travado	52	3,3%
Projeção de banho	39	2,4%
Catraca de alumina	33	2,1%
Silo vazio	6	0,4%
Banho baixo	0	0,0%

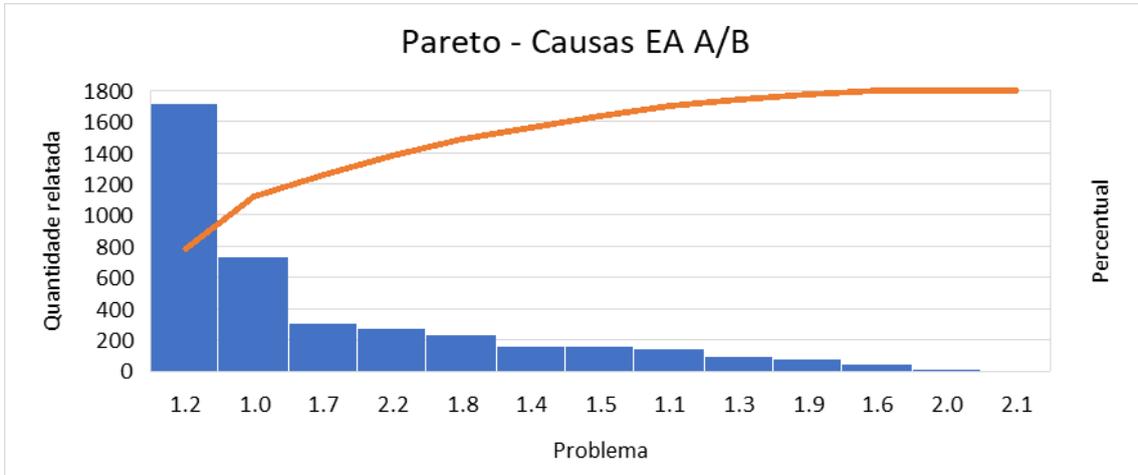
Fonte: Autor.

Figura 30 – Gráfico de Pareto de Causas entre novembro de 2023 e abril de 2024.



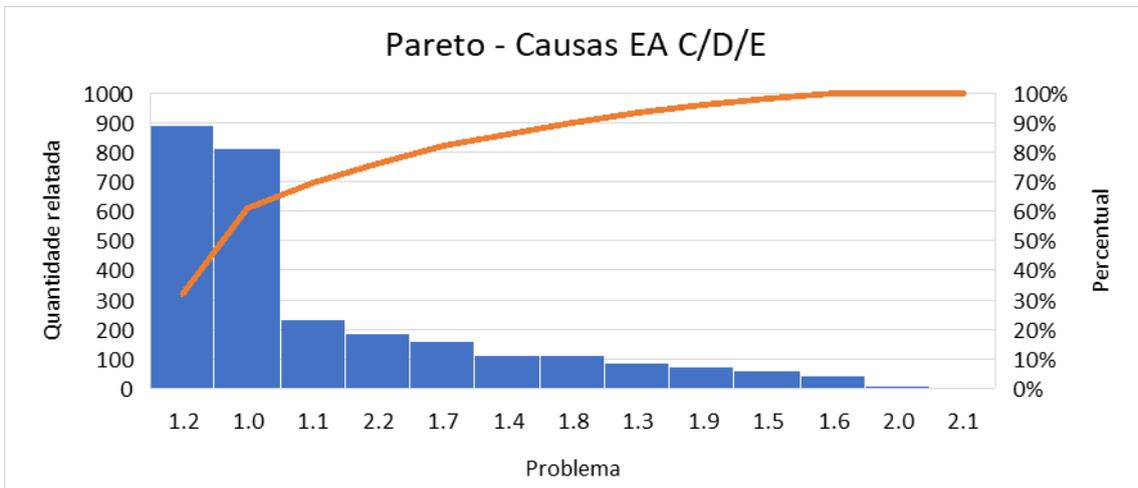
Fonte: Autor, 2025.

Figura 31 – Gráfico de Pareto de Causas dos Grupos A/B entre novembro de 2023 e abril de 2024.



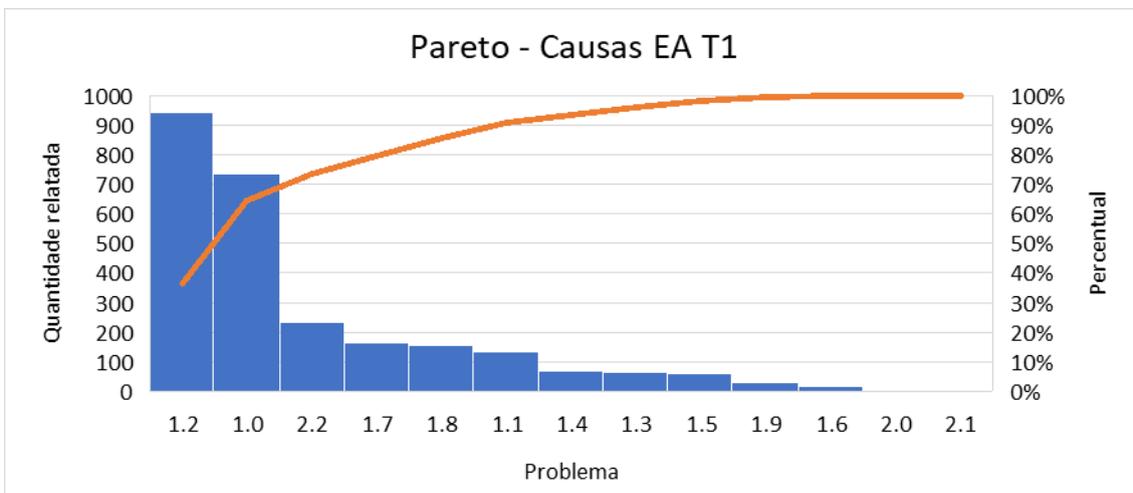
Fonte: Autor, 2025.

Figura 32 – Gráfico de Pareto de Causas dos Grupos C/D/E entre novembro de 2023 e abril de 2024.



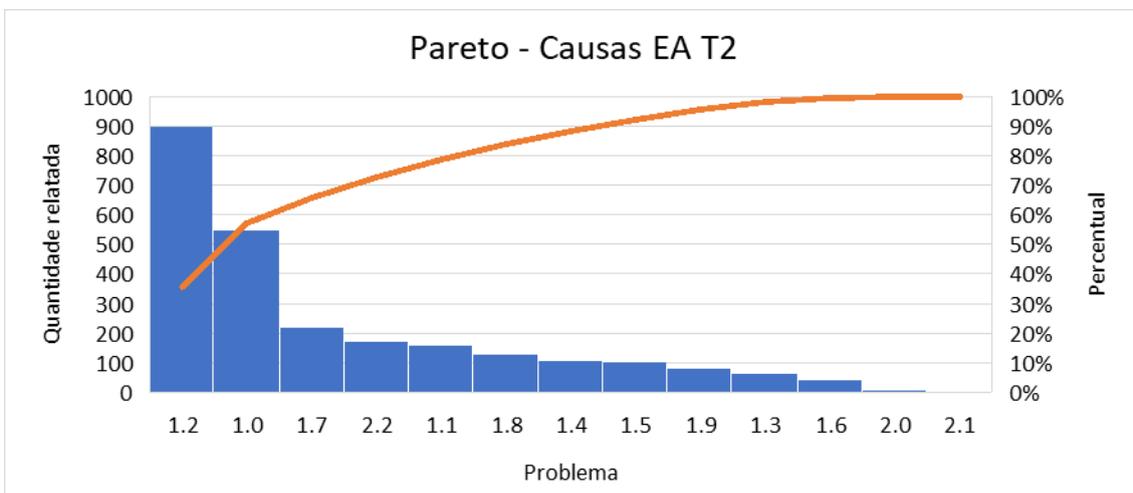
Fonte: Autor, 2025.

Figura 33 – Gráfico de Pareto de Causas do Turno 1 entre novembro de 2023 e abril de 2024.



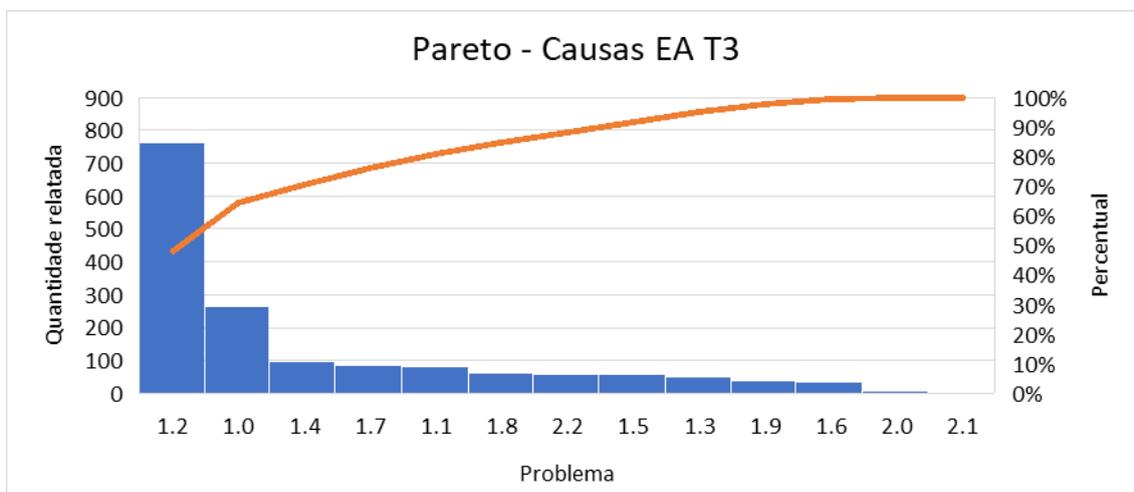
Fonte: Autor, 2025.

Figura 34 – Gráfico de Pareto de Causas do Turno 2 entre novembro de 2023 e abril de 2024.



Fonte: Autor, 2025.

Figura 35 – Gráfico de Pareto de Causas do Turno 3 entre novembro de 2023 e abril de 2024.



Fonte: Autor, 2025.

Pela análise dos gráficos de Pareto, notou-se novamente algumas das causas relatadas anteriormente no primeiro A3, com exceção do fator Causa desconhecida/não identificada (2.2), o que indica uma necessidade ainda maior de conscientização dos técnicos e operadores com relação às práticas operacionais e utilização adequada da ferramenta funil de resolução de problemas.

Além disso, como os fatores Afogamento (1.2), Pata (1.1) e Obstrução de duto (1.7) permaneceram sendo relevantes, de acordo com os gráficos de Pareto, verificou-se a necessidade de acompanhamento e análise da distribuição da alumina alimentada no processo, uma vez que a granulometria é um causa em comum entre os três fatores mencionados.

Tabela 14 – Planos de ação definidos no segundo A3 realizado.

Plano de ação	Descrição	Prazo
1	Acompanhamento da granulometria da alumina.	Outubro/2024
2	Continuidade de conscientização: Direcionamento das cubas com maior frequência de efeito anódico semanal para haja a realização de funis de resolução de problemas por parte dos técnicos e dos operadores, com acompanhamento da aderência à ação. Além disso adicionou-se também o acompanhamento de eficácia dos funis realizados. Acompanhamento semanal, por meio de e-mails, da frequência de efeito anódico da sala em geral, em grupos e em turnos.	Indefinido - Ação Contínua
3	Conscientização: Criação de aplicativo de funil online para técnicos e operadores.	Maio/2024

Fonte: Autor.

4.2.2 Desenvolvimento 2

Para o primeiro plano de ação foi conversado com a equipe do laboratório da fábrica para que houvesse a realização de análises de caracterização granulométrica da alumina, porém como essas análises demandariam um custo e tempo adicionais, seriam realizadas apenas uma ou duas vezes semanais. Eram coletadas uma amostra de uma cuba do grupo A/B e uma amostra de uma cuba do grupo C/D/E e encaminhadas para o laboratório.

Para a construção das tabelas e gráficos, considerou-se o parâmetro já utilizado na fábrica, que permitia o máximo de 6% de partículas menores que 25µm e o máximo de 14% de partículas menores que 44µm. As porcentagens de partículas de alumina menores que 25µm, além das menores que 44µm foram comparadas com efeito anódico do período em que foram retiradas as amostras, a fim de analisar se havia alguma relação entre os parâmetros. Inicialmente foram analisados os dados por dia, porém, como a quantidade de dias era extensa e dificultava a visualização gráfica, os dados foram dispostos em semanas, para o conjunto dos grupos A/B (Tabela 15 e Figura 36) e C/D/E

(Tabela 16 e Figura 37).

Tabela 15 – Análise da influência granulométrica na frequência de efeito anódico - Grupo A/B.

Semana	< 25 µm	< 44 µm	EA
16	4,69	9,42	0,38
17	5,48	12,34	0,62
18	5,08	9,81	0,44
19	4,51	12,57	0,65
20	4,12	13,30	0,89
21	4,76	14,54	0,77
22	6,88	16,77	0,96
23	4,75	11,37	0,56
24	3,31	8,39	0,74
25	5,30	13,71	0,63
26	8,23	20,28	0,67
27	7,57	14,90	0,61
28	3,43	8,70	0,53
29	6,21	15,99	0,59
30	4,09	15,81	0,56
31	2,69	7,30	0,40
32	5,41	12,12	0,38
33	4,44	9,92	0,56
34	4,45	8,66	0,38
35	4,83	12,75	0,49
36	5,15	13,37	0,47

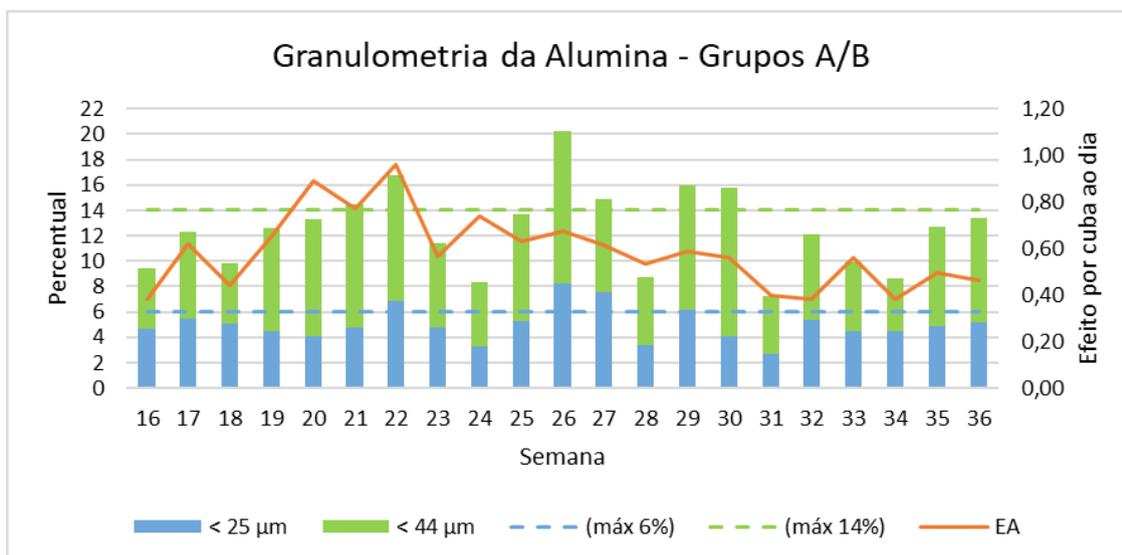
Fonte: Autor.

Tabela 16 – Análise da influência granulométrica na frequência de efeito anódico - Grupo C/D/E.

Semana	< 25 µm	< 44 µm	EA
16	5,08	11,02	0,28
17	7,53	16,17	0,59
18	6,60	13,76	0,46
19	7,33	16,72	0,54
20	7,34	16,56	0,63
21	5,72	17,55	0,53
22	7,89	18,68	0,52
23	4,69	11,44	0,38
24	3,58	9,26	0,63
25	4,85	14,29	0,48
26	5,26	13,26	0,61
27	8,04	14,04	0,42
28	9,44	19,82	0,51
29	3,39	10,38	0,48
30	2,58	11,53	0,18
31	4,57	12,22	0,14
32	4,07	11,42	0,21
33	5,25	12,20	0,31
34	5,94	11,75	0,20
35	5,39	13,38	0,41
36	5,45	15,91	0,39

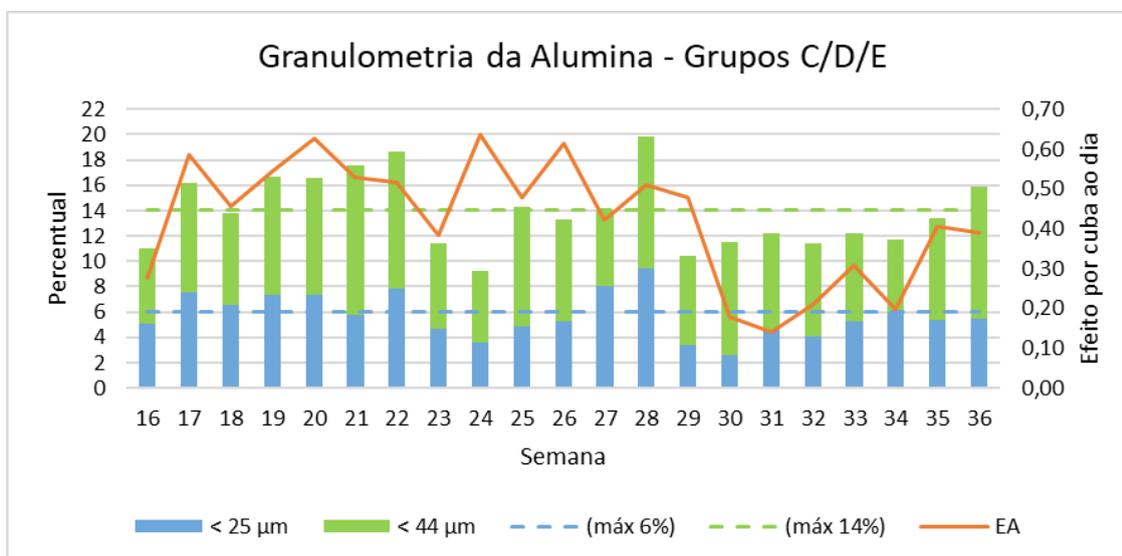
Fonte: Autor.

Figura 36 – Análise da influência granulométrica na frequência de efeito anódico - Grupo A/B.



Fonte: Autor, 2025.

Figura 37 – Análise da influência granulométrica na frequência de efeito anódico - Grupo C/D/E.



Fonte: Autor, 2025.

Para o Grupo C/D/E, observou-se uma relação um pouco mais acentuada da influência da granulometria da alumina na frequência de efeito anódico médio da semana, em relação ao grupo A/B. Entretanto, ambos os gráficos apresentaram valores fora do esperado, ou seja, mesmo com granulometrias mais finas, fora do padrão estabelecido para o processo, a frequência de efeito anódico não foi tão elevada, o que pode ser explicado pela

influência de outros inúmeros parâmetros de processo, como mencionado anteriormente. Para uma visão mais clara da influência, fez-se também o agrupamento das informações coletadas: analisou-se os dados que estavam dentro da faixa estipulada (menores que 6% para a peneira de 25 μ m e menores que 14% para a peneira de 44 μ m) e o que estavam fora dessa faixa e relacionou-se essas informações com a frequência de efeito anódico dos parâmetros dentro da faixa e dos parâmetros fora da faixa, o que pode ser visualizado nas Tabelas 17 e 18.

Tabela 17 – Agrupamento da análise granulométrica vs efeito anódico no Grupo A/B.

Peneira	Percentual	EA
25 μm	<= 6%	0,56
	> 6%	0,71
44 μm	<= 14%	0,54
	> 14%	0,69

Fonte: Autor.

Tabela 18 – Agrupamento da análise granulométrica vs efeito anódico no Grupo C/D/E.

Peneira	Percentual	EA
25 μm	<= 6%	0,37
	> 6%	0,52
44 μm	<= 14%	0,36
	> 14%	0,51

Fonte: Autor.

Ambos os grupos A/B e C/D/E apresentaram o mesmo comportamento: quando a fração de partículas menores que 25 μ m se encontravam dentro da faixa do processo, ou seja, era menor que 6%, a frequência de efeito anódico era relativamente menor, se comparada à frequência dos dados fora do parâmetro (maiores que 6%), o mesmo foi válido para a análise das partículas menores que 44 μ m. Portanto, na média, percebeu-se uma grande influência da granulometria na frequência de efeito anódico, a quantidade de partículas muito

finas, leva a uma frequência anódica elevada.

Simultaneamente a isso, realizava-se o plano de ação de conscientização dos técnicos e operadores. Para tanto foi desenvolvido um aplicativo para a realização online do funil de resolução de problemas, além de sua simplificação. O modelo anterior de funil, representado na Figura 38, era preenchido a mão, e, além de demandar um tempo maior, pela quantidade de informações dissertativas, também dependia sempre da disponibilidade do material impresso. De modo a facilitar o preenchimento pelos funcionários, desenvolveu-se o aplicativo de funil online representado na Figura 39, o qual podia ser acessado tanto pelo computador quanto pelo celular, e possuía a maior parte das informações de forma selecionável, permitindo que o funcionário relatasse os problemas de forma mais rápida e assertiva. Além disso, os dados fornecidos podiam ser extraídos e exportados para planilha eletrônica, permitindo as análises dos problemas relatados de forma muito mais fácil e rápida, o que não era possível por meio do modelo antigo do funil.

Figura 38 – Interface do modelo antigo (manuscrito) do funil de resolução de problemas.

	FORMULÁRIO DE GESTÃO DA QUALIDADE		Código	FGQ-CBA-AL-1348
	Título: FERRAMENTAS DE MELHORIA CONTINUA		Revisão	15 - 12/04/2024
			Área	CBA-FGQ
			Fase	Vigente
Operação	1°: INFORMAÇÃO			
	NOME:		DATA:	HORA:
	2°: DESCRIÇÃO DA OCORRÊNCIA			
	Como foi identificado o problema?			
Operação	3°: IDENTIFICAÇÃO DA CONTRA MEDIDA			
	Qual foi a ação tomada para reestabelecer a atividade?			
	4°: IDENTIFICAÇÃO DO PONTO DE CAUSA			
	Qual a origem do problema?			
Administrativo	5°: IDENTIFICAÇÃO DA CAUSA DIRETA			
	Qual a origem do problema?			
	6°: ANÁLISE DOS 5 POR QUÊS			
	1°			
	2°			
	3°			
	4°			
	5°			
7°: IDENTIFICAÇÃO DA CAUSA RAIZ				
8°: DEFINIÇÃO DO PLANO DE AÇÃO				
			Responsável	Prazo

Fonte: Autor, 2025.

Figura 39 – Interface do aplicativo atual (online) do funil de resolução de problemas.

×

FUNIL – SF 3

✓

1º: INFORMAÇÃO

MATRÍCULA:	NOME:	FORNO:	DATA:		TURNO:
<input style="width: 100%;" type="text"/>					

2º: DESCRIÇÃO DA OCORRÊNCIA

QUAIS SÃO OS PROBLEMAS?

Localizar itens▼

COMO FOI IDENTIFICADO O PROBLEMA?

Localizar itens▼

3º: IDENTIFICAÇÃO DO PONTO DE CAUSA

QUAIS AS ORIGENS DO PROBLEMA?

Localizar itens▼

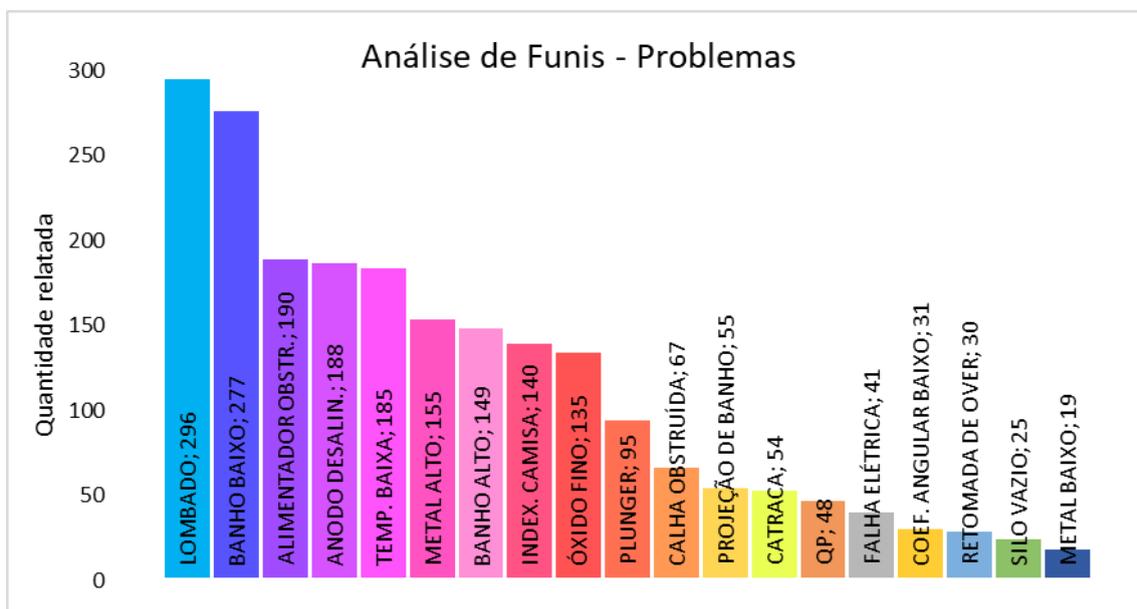
4º: DEFINIÇÃO DO PLANO DE AÇÃO

PLANO DE AÇÃO:	RESPONSÁVEL:	PRAZO:
<div style="border: 1px solid #0056b3; height: 100px;"></div>	<div style="border: 1px solid #0056b3; height: 100px;"></div>	<div style="border: 1px solid #0056b3; height: 100px;"></div>

Fonte: Autor, 2025.

Os e-mails de acompanhamento da realização de funis e de frequência de efeito anódico continuaram sendo enviados, e foi somado a eles tanto a eficácia dos funis realizados, ou seja, se foram efetivos na resolução do problema e se reduziram a frequência de efeito anódico da cuba em questão, quanto as análises dos problemas relatados nos funis, como mostra a Figura 40.

Figura 40 – Análise dos problemas relatados nos funis.



Fonte: Autor, 2025.

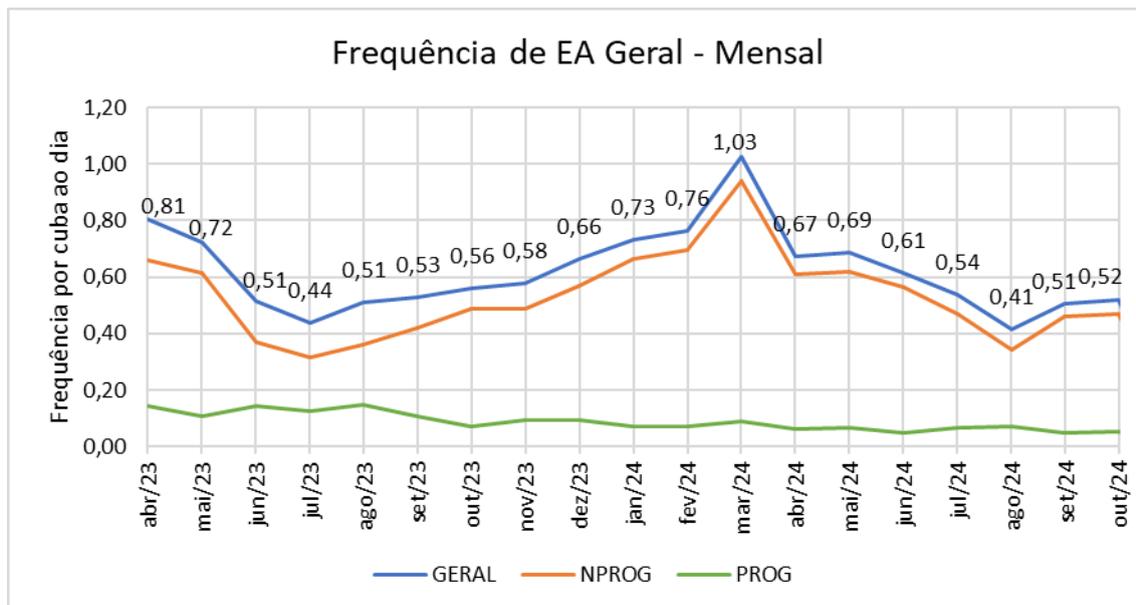
A Figura 40 evidencia que alguns outros problemas foram adicionados ao funil, conforme relatos dos operadores e técnicos da Sala Fornos 3. O problema de forno lombado, ou seja, com a presença de lombo (banho solidificado em suas laterais), que não era contemplado anteriormente, apresentou a maior quantidade de relatos, totalizando 296 entre abril e outubro de 2024, e está diretamente relacionado a outros parâmetros de processo, como a temperatura baixa e nível baixo de banho eletrolítico, a segunda causa mais relatada. Os dados extraídos diretamente dos funis auxiliarão a identificar os problemas mais recorrentes de forma muito mais rápida e automática.

4.2.3 Checagem 2

Na etapa de checagem do segundo A3 realizado, verificou-se que todos os planos de ação foram realizados dentro do prazo e notou-se a diminuição da frequência de efeito anódico nos últimos meses. O objetivo de manter-se controlado a frequência abaixo de 0,55 foi alcançado, chegando-se até o valor de 0,41 em agosto de 2024, como é demonstrado na Figura 41. A análise de granulometria da alumina foi essencial para que se pudesse requisitar aos fornecedores uma matéria prima de qualidade, com os parâmetros dentro do estipulado para o processo. Quanto à conscientização dos funcionários, se

mostrou positiva, uma vez que procuravam cada vez mais entender melhor o problema e buscar uma solução, para elevar a eficácia dos funis realizados.

Figura 41 – Gráfico da frequência de efeito anódico entre abril de 2023 e abril de 2024.



Fonte: Autor, 2025.

4.2.4 Ação 2

Na etapa de ação, iniciou-se uma projeção de expansão das ações de melhoria realizadas para outras áreas, o que incluiu a replicação do aplicativo de funil de resolução de problemas e a construção da planilha de acompanhamento de efeito anódico e de funil para as Salas Fornos 2 e 4. Além disso, nessa nova planilha também estariam contidas não só as informações de monitoramento da frequência de efeito anódico, mas também o tempo de duração médio dos efeitos, o que também são responsáveis diretos pelo consumo de energia e liberação de gases de efeito estufa.

4.3 ASPECTOS ECONÔMICOS E AMBIENTAIS

4.3.1 Cálculo do consumo de energia

A partir da equação 7 apresentada na metodologia, estimou-se a

quantidade de energia consumida durante um efeito anódico. Para isso utilizou-se como base uma média de efeito anódico de tensão média de 28 volts, com duração média de 3,5 minutos e corrente média da sala de 130,5 kA. Obteve-se uma energia de aproximadamente 213 kWh para um único efeito anódico. Se considerarmos uma frequência de 1 efeito anódico por cuba ao dia, um total de 150 cubas existentes na Sala Fornos 3 e 30 dias referentes a um período mensal, estimou-se um total de quase 960 MWh por mês apenas para a Sala Fornos 3.

Em situações ideais, a frequência de efeito anódico programado da sala fornos é de aproximadamente 0,3, ou seja, 1 efeito por cuba a cada 3 dias, o que é suficiente para verificar o funcionamento do forno. A partir da equação 7, para as condições ideais e considerando a mesma voltagem, corrente e duração do efeito utilizada anteriormente, o total de energia elétrica seria de aproximadamente 320 MWh por mês, o que gera uma diferença de 640 MWh em relação à quando há uma frequência elevada de efeito anódico, acarretando prejuízos econômicos para a empresa. Considerando o custo de energia elétrica de R\$630,85 por MWh apresentado na metodologia, essa diferença levaria a um gasto de R\$404 mil mensais a mais, em relação às condições ideais.

4.3.2 Cálculo da emissão de gases de efeito estufa

Para o cálculo da emissão de gases de efeito estufa, considerou-se a produção diária de 945 kg de metal por cuba eletrolítica e 150 cubas existentes na Sala Fornos 3, totalizando uma produção mensal de 4,25 mil toneladas de alumínio. A partir das premissas de indicadores de impacto ambiental estabelecidas na metodologia, estimou-se uma produção mensal de 5,5 mil toneladas de gás carbônico e 0,85 kg de perfluorcarbonos (tetrafluorometano e hexafluoretano). Apesar das quantidades de gases PFCs não serem muito elevadas, se forem convertidos para CO₂ equivalente, representariam cerca de 6,5 toneladas. Os PFCs possuem um alto potencial de aquecimento global, apresentando risco à saúde dos operadores, caso a frequência de efeito anódico esteja descontrolada, além de serem os principais responsáveis pelo aumento no consumo de energia elétrica, já que a formação da barreira causada pela presença destes gases isolantes aumenta a tensão na cuba.

5 CONCLUSÕES

Neste trabalho, conduzido na Companhia Brasileira de Alumínio, o método PDCA se mostrou uma ferramenta de melhoria contínua eficiente, por se tratar de um processo cíclico, e permitiu a análise satisfatória do indicador de qualidade frequência de efeito anódico na indústria de alumínio, atingindo-se o objetivo de mitigar e manter-se a frequência de efeito anódico da Sala Fornos 3 controlada em valores abaixo de 0,55, uma vez que este fenômeno apresenta impactos energéticos e ambientais relevantes. Nos últimos três meses analisados (ago/24, set/24 e out/24), as frequências de efeito anódico foram de 0,41, 0,51 e 0,52, respectivamente, o que representa uma diminuição significativa se comparada ao início do estudo, quando a frequência de efeito anódico era de 0,81, em abril de 2023. Avaliando, ainda, somente o último mês de estudo, agosto de 2024, essa redução se dá em torno de 36%.

Em relação ao consumo de energia, calculou-se um total de 960 MWh por mês utilizando os parâmetros indicados no tópico de discussões. Supondo-se situações ideais nas quais cada cuba eletrolítica teria 1 efeito anódico programado a cada 3 dias, o total de energia consumida seria de, aproximadamente, 320 MWh por mês. Essa diferença de 640 MWh aumentaria o custo mensal em mais de R\$400 mil. Ademais, com relação às emissões de gases de efeito estufa, estimou-se a produção mensal 5,5 mil toneladas de gás carbônico. Os gases tetrafluorometano e hexafluoretano, apesar de apresentarem produção mensal reduzida, no valor total de 0,85 kg, na ocorrência de efeito anódico, possuem alto potencial de aquecimento global e influenciam diretamente no consumo da energia mencionada, uma vez que são responsáveis por criar uma camada isolante de gás, elevando abruptamente a tensão da cuba, representando cerca de 6,5 toneladas se convertidos em CO₂ equivalente.

Por fim, pela implementação da metodologia do PDCA foi possível estudar a influência de diversos fatores no parâmetro em questão, como afogamento, pata, temperatura, nível de líquidos e granulometria, e ainda achar uma correlação do efeito anódico com a granulometria da alumina introduzida nas cubas, permitindo, dessa forma, a aquisição de matéria-prima de qualidade e com as especificações requeridas para o processo.

Ademais, a conscientização dos técnicos e operadores, com o devido acompanhamento da situação da sala e definição de responsáveis por cada grupo de cubas favoreceu a melhoria do indicador analisado, pois a amplificação do senso de dono, faz com que almejem contribuir para a melhoria contínua do ambiente de trabalho.

Para trabalhos futuros, sugere-se ainda a análise de outros parâmetros relevantes para o processo, como tempo de efeito anódico, qualidade das quebras preventivas realizadas e estudos de melhorias do Sistema de Controle de Redução (Score) que busquem por um sistema de alimentação mais preciso do óxido de alumínio nas cubas eletrolíticas e tecnologias de automação do processo.

REFERÊNCIAS

ALCÂNTARA, P. C. **Melhoria Contínua do Processo de Produção de Alumínio Primário na Novelis do Brasil em Ouro Preto.** In: SIMPÓSIO ACADÊMICO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 2014. Anais IX SAEPRO. Viçosa. Universidade Federal de Viçosa. Disponível em: <https://saepro.ufv.br/ix-saepro/>. Acesso em: 05 jan. 2025.

ARECO. **As principais métricas da produtividade na fábrica.** 2019. Disponível em: <https://site.areco.com.br/principais-metricas-da-produtividade-na-fabrica/>. Acesso em: 19 dez. 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ALUMÍNIO (ABAL). **Cadeia Primária.** 2013. Disponível em: <https://abal.org.br/aluminio/cadeia-primaria/>. Acesso em: 05 jan. 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ALUMÍNIO (ABAL). **Crescimento no consumo de alumínio por mercados.** 2024. Disponível em: https://www.instagram.com/abal_oficial/p/DD7EXAVTTvp/. Acesso em: 11 jan. 2025.

BURGHETTI, B. S.; DANIEL, E. **Medição do desempenho energético na indústria do Alumínio através de Indicadores de Desempenho Energético (EnPIs) e Linhas de Base de Energia (EnBs).** 2014. Disponível em: https://iconsultare.com.br/downloads/IV%20Congresso%20Internacional%20do%20Alumínio_Medição%20desempenho%20energético%20na%20indústria%20do%20Alumínio.pdf. Acesso em: 19 dez. 2024.

CARDOSO, J. G. R. et al. **A indústria do alumínio: estrutura e tendências.** 2011. Disponível em: https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/2499/3/A%20BS%2033%20A%20ind%20c3%20b%20a%20s%20t%20r%20u%20c%20t%20u%20r%20a%20e%20t%20e%20n%20d%20e%20n%20c%20i%20a%20n%20c%20i%20a%20s%20_P.pdf. Acesso em: 04 jan. 2025.

CHALCO ALUMINUM. **Top 10 Melhores Fabricantes de Alumínio.** 2024. Disponível em: <https://www.chalcoaluminum.com/pt/blog/top-10-aluminum-manufacturer/>. Acesso em: 04 jan. 2025.

Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB). **Emissões de gases de efeito estufa nos processos industriais – Produção de Metais.** 2010. Disponível em: https://cetesb.sp.gov.br/inventario-gee-sp/wp-content/uploads/sites/34/2014/04/brasil_mcti_aluminio.pdf. Acesso em: 18 dez. 2024.

Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB). **Emissões de gases de efeito estufa nos processos industriais e por uso de solventes.** 2006. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/inventario-gee-sp/wp-content/uploads/sites/34/2014/04/5.pdf>. Acesso em: 05 jan. 2025.

COOPER METAL. **Alumínio aeronáutico: características e sua importância.** 2023a. Disponível em: <https://www.coppermetal.com.br/blog/aluminio-aeronautico-caracteristicas-e-importancia/>. Acesso em: 19 dez. 2024.

COOPER METAL. **Alumínio automotivo: características e aplicações.** 2024. Disponível em: <https://www.coppermetal.com.br/blog/aluminio-automotivo/>. Acesso em: 19 dez. 2024.

COOPER METAL. **O impacto da Guerra na Ucrânia no preço do alumínio.** 2022. Disponível em: <https://www.coppermetal.com.br/blog/o-impacto-da-guerra-na-ucrania-no-preco-do-aluminio/>. Acesso em: 19 dez. 2024.

COOPER METAL. **O uso do alumínio na construção civil.** 2023b. Disponível em: <https://www.coppermetal.com.br/blog/aluminio-na-construcao-civil/>. Acesso em: 19 dez. 2024.

HYDRO. **Resultados do segundo trimestre de 2024 da Hydro: resultados sólidos de upstream, mercados mistos.** 2024. Disponível em: <https://www.hydro.com/br/global/imprensa/noticias/2024/resultados-do->

segundo-trimestre-de-2024-da-hydro-resultados-solidos-de-upstream-mercado/. Acesso em: 11 jan. 2025.

INTERNATIONAL ALUMINIUM INSTITUTE (IAI). **Primary Aluminium Production.** 2024. Disponível em: <https://international-aluminium.org/statistics/primary-aluminium-production/>. Acesso em: 05 jan. 2025.

LARA, C. H. **Um resumo sobre o Processo Bayer.** 2020. Disponível em: <https://www.linkedin.com/pulse/um-resumo-sobre-o-processo-bayer-carlos-henrique-lara/> Acesso em: 11 jan. 2025.

LAZARINOS, J. G. C. **Tratamento de Revestimentos Gastos de Cuba Eletrolítica da Indústria de Alumínio.** Dissertação (Mestrado em Ciência dos Materiais e Metalurgia) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro/RJ, 2007.

MARINHO, D. C. **Estudo da dissolução da alumina no banho eletrolítico na produção de alumínio primário em cubas de tecnologia VSS Soderberg.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo/SP, 2019.

MASSARENTE, M. et al. **Alumínio no Brasil: Transformações nos últimos 15 anos.** 2013. Disponível em: https://www.bain.com/contentassets/72257f7e6955482199a362c50c017aae/aluminio20brasil_port.pdf. Acesso em: 18 dez. 2024.

METALTHAGA. **O mercado do alumínio no Brasil e no mundo.** 2024. Disponível em: <https://metalthaga.com.br/artigos/o-mercado-do-aluminio-no-brasil-e-no-mundo/>. Acesso em: 19 dez. 2024.

MINERAÇÃO RIO DO NORTE. **Conheça as etapas do nosso processo produtivo.** 2021. Disponível em: <https://mrn.com.br/index.php/pt/o-que-fazemos/processo-produtivo>. Acesso em: 14 jan. 2025.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Informativo tarifário do setor elétrico.** 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/secretaria-nacional-energia-eletrica/publicacoes/informativo-setor-eletrico/informativo-tarifario-do-setor-eletrico-ano-2023.pdf>. Acesso em: 28 jan. 2025.

MOURA, F. E. **Avaliação do sistema de alimentação de alumina no processo Hall-Hérout na Alumar.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal da Paraíba. Campina Grande/PB, 2001.

NAGEM, N. F. **Automação e otimização de controle via MQ e RNA para redução das emissões de gases causadores de efeito estufa (GHG) por plantas de alumínio.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Maranhão. São Luís/MA, 2009.

O ECONÓMICO. **Alumínio estável a US\$ 2.635: China e Rússia dominam produção, Ásia impulsiona demanda.** 2024. Disponível em: <https://www.oeconomico.com/aluminio-estavel-a-us-2-635-china-e-russia-dominam-producao-asia-impulsiona-demanda/>. Acesso em: 19 dez. 2024.

OBSERVATÓRIO DA MINERAÇÃO. **Mineração Rio do Norte amplia exploração de bauxita no Pará sem ouvir as comunidades afetadas.** 2023. Disponível em: <https://observatoriodamineracao.com.br/mineracao-rio-do-norte-amplia-exploracao-de-bauxita-no-para-sem-ouvir-as-comunidades-afetadas/>. Acesso em: 19 dez. 2024.

PCC GROUP. **Indústria de alumínio. Como o alumínio de alta pureza é obtido?** 2020. Disponível em: <https://www.products.pcc.eu/pt/blog/industria-de-aluminio-como-o-aluminio-de-alta-pureza-e-obtido/>. Acesso em: 19 dez. 2024.

PETER ENTNER. **Greenhouse Gases.** 2008. Disponível em: <https://peter-entner.com/E/Theory/Environment/GreenhouseGases.aspx#CarbonFootprint>. Acesso em: 19 jan. 2025.

PONCIANO, A. **Estudo comparativo entre as cubas eletrolíticas de redução de alumínio nas diferentes amperagens existentes na Companhia Brasileira de Alumínio.** Tese (Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo/SP, 1994.

QUALYTEAM. **Metodologia 5S: o que é, como executar e como implementar.** 2021. Disponível em: <https://qualyteam.com/pb/blog/o-que-e-e-como-aplicar-metodologia-5s-em-sua-empresa/>. Acesso em: 11 jan. 2025.

RABELLO, G. **Relatório A3: melhore seus processos com a metodologia da Toyota.** 2023. Disponível em: <https://www.siteware.com.br/metodologias/relatorio-a3/>. Acesso em: 11 jan. 2025.

RESTIVO, T. A. G. **Desenvolvimento de processo de eletrólise em meio de sais fundidos para a produção de metais de terras-raras leves. A obtenção do cério metálico.** Dissertação (Mestrado em Ciências) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares. São Paulo/SP, 1994.

REVISTA ALUMÍNIO. **Entenda como a indústria do alumínio administra as emissões de carbono.** 2023. Disponível em: <https://revistaaluminio.com.br/entenda-como-a-industria-do-aluminio-administra-as-emissoes-de-carbono/>. Acesso em: 19 dez. 2024.

SANTOS, A. P. et al. **Utilização da ferramenta Diagrama de Pareto para auxiliar na identificação dos principais problemas nas empresas.** 2020. Disponível em: <https://unisalesiano.com.br/aracatuba/wp-content/uploads/2020/12/Artigo-Utilizacao-da-ferramenta-Diagrama-de-Pareto-para-auxiliar-na-identificacao-dos-principais-problemas-nas-empresas-Pronto.pdf>. Acesso em: 11 jan. 2025.

SB GERENCIAMENTO DE OBRAS. **Metodologia 5S.** 2023. Disponível em: <https://sbgerenciamento.com.br/wp-content/uploads/2023/12/5S-Plano-5.pdf>.

Acesso em: 11 jan. 2025.

TIBA, P. R. T. **Análise sistêmica dos fornos de cozimento de anodo para a indústria de alumínio.** Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de São Carlos. São Carlos/SP, 2010.

UNIVERSAL ROBOTS. **Indicadores de produção industrial: conheça os 7 principais.** 2022. Disponível em: <https://www.universal-robots.com/br/blog/indicadores-de-produc%C3%A3o-industrial-conheca-os-7-principais/>. Acesso em: 19 dez. 2024.

VRY, B. F. **Otimização da densidade de empacotamento de agregado seco utilizado na produção de pasta anódica para a indústria do alumínio.** Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Alfenas. Poços de Caldas/MG, 2013.

ANEXO A – Ferramentas de Melhoria Contínua (A3)

		FORMULÁRIO DE GESTÃO DA QUALIDADE			Código	FGQ-CBA-AL-1348
		Título: FERRAMENTAS DE MELHORIA CONTINUA			Revisão	15 - 12/04/2024
					Área	CBA-FGQ
					Fase	Vigente
Nome do Problema:	Ponto de Causa:	Relatado Por:	Data:	Número do Problema:		
01 Ponto de causas (Local real do problema):		5. Contramedidas / ações de melhoria				
02 Equipe:	Área:	6 Plano de ação/Contramedidas:				
		Especifique os itens de ação para implementação das contramedidas	Quem	Até Quando	Status	
03 Objetivos e metas:						
04 Análise de causas-raiz		07 Avaliação:				
Relacione as potenciais causas-raiz		Problema resolvido: <input type="checkbox"/>		Parcialmente resolvido: <input type="checkbox"/>		
Homem:		08 Padronização:				
Materiais:						
Máquina:						
Método:						
Natureza:						
Especifique a provável causa-raiz:						

Fonte: Companhia Brasileira de Alumínio, 2024.