UNIVERSIDADE DO SUL DE SANTA CATARINA
PAULO SÉRGIO DA SILVA

AVALIAÇÃO DA VIABILIDADE DE SUBSTITUIÇÃO DO ADITIVO TIPO LONGA VIDA NA ETAPA DE FOSQUEAMENTO ALCALINO NO PROCESSO DE ANODIZAÇÃO

Tubarão
2020

PAULO SÉRGIO DA SILVA

AVALIAÇÃO DA VIABILIDADE DE SUBSTITUIÇÃO DO ADITIVO TIPO LONGA VIDA NA ETAPA DE FOSQUEAMENTO ALCALINO NO PROCESSO DE ANODIZAÇÃO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Química da Universidade do Sul de Santa Catarina como requisito parcial à obtenção do título de Engenheiro Químico

Orientador: Prof. Marcos Marcelino Mazzucco, Dr.

Tubarão

2020

PAULO SÉRGIO DA SILVA

AVALIAÇÃO DA VIABILIDADE DE SUBSTITUIÇÃO DO ADITIVO TIPO LONGA VIDA NA ETAPA DE FOSQUEAMENTO ALCALINO NO PROCESSO DE ANODIZAÇÃO

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado à obtenção do título de Engenheiro Químico e aprovado em sua forma final pelo Curso de Engenharia Química da Universidade do Sul de Santa Catarina.

Tubarão, 03 de dezembro de 2020.

_____
Professor e Orientador Marcos Marcelino Mazzucco, Dr.
Universidade do Sul de Santa Catarina

_____
Prof. César Renato Alves da Rosa, Ms.
Universidade do Sul de Santa Catarina

_____
Prof. Domingos Pignatel Marcon, Ms.
Universidade do Sul de Santa Catarina

_____
Prof. Suzana Cimara Batista, Dra.
Universidade do Sul de Santa Catarina

Dedico esse trabalho a minha avó Terezinha (in memoriam). Sei o quanto a senhora. ficaria feliz e orgulhosa dessa conquista.

AGRADECIMENTOS

Ao término do trabalho é impossível não expressar agradecimentos às pessoas, sem as quais, não teria conseguido chegar até aqui.

Primeiramente, agradeço aos meus pais, Regiane e Sérgio, que fizeram de tudo que esteve ao seu alcance, para que conseguisse realizar esse sonho. Essa conquista é mais de vocês do que minha.

Agradeço a empresa que possibilitou a realização deste estudo, não deixando de agradecer nominalmente as pessoas estiveram ao meu lado, seja auxiliando, discutindo ou compartilhando ideias. Saibam que sem suas ajudas, não seria possível alcançar os objetivos do presente estudo, assim, agradeço a Ana, Carlinhos, Marcos e Sidi.

Agradeço a Daniele Cararo, que mesmo com toda distância, não mediu esforços para me ajudar. Se não fossem suas dicas, sugestões e questionamentos – dos quais muitos já sabia as respostas – não teria conseguido desenvolver metade do que pretendia.

Agradeço aos amigos que a engenharia química me deu. Tenham certeza de que a jornada valeu a pena só de ter conhecido cada um de vocês. Muito obrigado por tudo Brenda, Bruna, Jéssica, Lyssani, Milena, Nathalia, Nicolly.

Aos meus amigos Matheus e Matheus, agradeço por estarem ao meu lado nos momentos em que quis desistir e por ajudarem a acreditar no meu potencial. Sem a amizade de vocês, tenho plena convicção de que não teria chego até aqui. Mais uma vez, muito obrigado.

E por fim, mas não menos importante, agradeço a todos os professores da Universidade do Sul de Santa Catarina. Sou grato por compartilharem seus saberes e suas experiências. Vocês sempre farão parte da minha história.

"O correr da vida embrulha tudo. A vida é assim: esquenta e esfria, aperta e daí afrouxa, sossega e depois desinquieta. O que ela quer da gente é coragem"

- Guimarães Rosa

RESUMO

Anodização é um processo eletroquímico no qual a superfície do alumínio metálico é convertida em óxido de alumínio. É realizado através da submersão do metal em uma variedade de produtos químicos, popularmente chamados de banhos. O fosqueamento alcalino é a etapa responsável pelo acabamento superficial. Sendo composto por solução de soda cáustica e de aditivos, confere um aspecto fosco homogêneo. A soda cáustica é o produto responsável pelo acabamento superficial, nivelando a superfície do metal e, por remover defeitos de etapas anteriores, bem como o óxido de alumínio residual (decorrente do processo de passivação); já o uso de aditivo, tem o intuito de prolongar a vida útil do banho, assegurando que não haja a formação de óxido de alumínio, além de contribuir para a redução do consumo de soda cáustica e a prevenção de possível contaminação nas etapas posteriores por arraste. O presente trabalho traz um estudo comparativo entre dois aditivos longa vida de diferentes fornecedores, buscando identificar qual dos produtos apresentará a melhor performance. Para tal, foram empregadas metodologias e análises que confrontassem informações sobre ambos os produtos, como consumo específico e os custos operacionais envolvidos, além de suas influências sobre a estabilidade e qualidade ao término do processo. Por meio destas, foi identificado que caso a empresa opte por substituir o produto homologado pelo produto do concorrente, haverá um ganho financeiro estimado em aproximadamente R$280.000,00 por ano, bem como um acréscimo na capacidade da linha de aproximadamente 56 ton/ano sem apresentar nenhum impacto negativo em termos de qualidade dos produtos.

Palavras-chave: Anodização. Fosqueamento alcalino. Aditivo longa vida.

ABSTRACT

Anodizing is an electrochemical process in which the surface of metallic aluminum is converted into aluminum oxide. It is carried out by submerging the metal in a variety of chemicals, popularly known as baths. One important process step is the etching, responsible for giving the product a satin aspect. It is composed mainly by caustic soda, which determines the surface finish, leveling the metal surface and removing defects from previous steps as well as residual aluminum oxide (resulting from natural passivation); Additives are added to the solution in order to extend its life, ensuring that there is no formation of aluminum oxide. In addition, by controlling bath's viscosity, it prevents drag out to subsequent rinsing steps and reduces caustic soda consumption. This study brings a comparison between two long-life additives from different suppliers, aiming at identifying which product has the best performance. To achieve that methodologies and analysis have been used to compare data such as chemical consumption, process capability, end-product quality and operational costs. Test results confirm that the replacement of product A by product B generates cost savings of R$ 280.000,00 per year, increase in production capacity of 56 tones/year and no negative impact in quality.

Keywords : Anodizing. Etching. Additives Long Life.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Produção de alumínio no mundo no ano de 2014 em mil toneladas 20
Figura 2 – Processo de extrusão 23
Figura 3 – Estrutura da camada anódica 29
Figura 4 – Célula eletrolítica 29
Figura 5 – Métodos de coloração do alumínio anodizado 31
Figura 6 – Formulação de uma coloração eletrolítica baseada em sais de estanho 32
Figura 7 – Poro aberto vs. poro fechado da camada anódica 33

LISTA DE FLUXOGRAMAS

Fluxograma 1 – Etapas básicas do processo de anodização 24

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Consumo e produção de alumínio no Brasil 21
Gráfico 2 – Comparativo do consumo específico de soda cáustica com os aditivos A e B . 43
Gráfico 3 – Comparativo dos consumos específicos dos aditivos A e B 44
Gráfico 4 – Comparativo de custo de processamento com os aditivos A e B 45
Gráfico 5 – Carta de controle da [NaOH] no tanque 1 com o aditivo A 47
Gráfico 6 – Carta de controle da [NaOH] no tanque 1 com o aditivo B 48
Gráfico 7 – Carta de controle da [Al3+] no tanque 1 com o aditivo A 48
Gráfico 8 – Carta de controle da [Al3+] no tanque 1 com o aditivo B 49
Gráfico 9 – Carta de controle da [aditivo A] no tanque 1 50
Gráfico 10 – Carta de controle da [aditivo B] no tanque 1 50
Gráfico 11 – Análise da capacidade de processo da [NaOH] no tanque 1 com o aditivo A 51
Gráfico 12 – Análise da capacidade de processo da [NaOH] no tanque 1 com o aditivo B 52
Gráfico 13 – Análise da capacidade de processo da [Al3+] no tanque 1 com o aditivo A .. 53
Gráfico 14 – Análise da capacidade de processo da [Al3+] no tanque 1 com o aditivo B .. 54
Gráfico 15 – Análise da capacidade de processo da [aditivo A] no tanque 1 54
Gráfico 16 – Análise da capacidade de processo da [aditivo A] no tanque 55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Produtos transformados de alumínio 22
Tabela 2 – Classificação de espessuras de camadas anódicas para aplicações interiores/exteriores 30
Tabela 3 – Formulação de uma coloração eletrolítica baseada em sais de estanho 32
Tabela 4 – Comparativo entre os aditivos das empresas A e B 36
Tabela 5 – Relação da qualidade com o índice C_p 41
Tabela 6 – Defeitos ocasionados no fosqueamento alcalino 56
Tabela 7 – Percentual médio de perda de massa com os aditivos A e B 56
Tabela 8 – Impacto da perda de massa em termos financeiros 57

LISTA DE ABREVIATURAS

ABAL	Associação Brasileira do Alumínio
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
BI	Bussiness Intelligence
CCF	Controle de Chão de Fábrica
CEP	Controle Estatístico de Processo
C_p	Índice de capacidade potencial
C_{pk}	Índice de capacidade efetiva
EPI	Equipamento de Proteção Individual
LIC	Limite Inferior de Controle
LIE	Limite Inferior de Especificação
LSC	Limite Superior de Controle
LSE	Limite Superior de Especificação
KPI	Key Performance Indicator
NBR	Norma Brasileira
P_p	Índice de *performance* de processo
P_{pk}	Índice de *performance* efetiva

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 17
1.1 JUSTIFICATIVA E PROBLEMA 18
1.2 OBJETIVOS 19
1.2.1 Geral 19
1.2.2 Objetivos específicos 19

2 REFERENCIAL TEÓRICO 20
2.1 O ALUMÍNIO 20
2.1.1 O alumínio no mundo 20
2.1.2 O alumínio no Brasil 21
2.1.3 Produção de produtos transformados de alumínio no Brasil 22
2.2 PROCESSO DE EXTRUSÃO 23
2.3 PROCESSO DE ANODIZAÇÃO 23
2.3.1 Montagem 24
2.3.2 Desengraxe/ Limpeza 25
2.3.3 Lavagem 25
2.3.4 Fosqueamento 26
2.3.4.1 Mecanismos de reações que ocorrem no banho de fosqueamento 26
2.3.4.2 Resíduos no tanque de fosqueamento alcalino 27
2.3.5 Neutralização 27
2.3.6 Anodização 28
2.3.6.1 Eletrólise 29
2.3.6.2 Espessura da camada anódica 30
2.3.7 Coloração 30
2.3.7.1 Coloração eletrolítica com sais de estanho 32
2.3.8 Selagem 33
2.3.8.1 Selagem a quente 33
2.3.8.2 Selagem a frio 34
2.3.9 Desmontagem 34
2.4 ADITIVOS UTILIZADOS NO FOSQUEAMENTO ALCALINO 34
2.4.4 Aditivo A 34
2.4.4.1 Descrição 34

2.3.4.1 Condições operacionais 35
2.3.5 Aditivo B 35
2.3.5.1 Condições operacionais 35
2.3.6 Plano de controle de variáveis 36

3 METODOLOGIA 37
3.1 CONSUMO ESPECÍFICO DE PRODUTOS QUÍMICOS 37
3.2 CUSTO DE PROCESSAMENTO 38
3.3 RESÍDUOS 38
3.4 CONTROLE ESTATÍSTICO DE PROCESSO 39
3.4.1 Cartas de controle 39
3.4.2 Análises da capacidade do processo 40
3.4.2.1 Índices de capacidade (C_p e C_{pk}) 40
3.4.2.1 Índices de performance (P_p e P_{pk}) 41
3.5 INDICADOR DE QUALIDADE INTERNO: REPROCESSO 41
3.6 TESTES DE PERDA DE METAL 42

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO 43
4.1 CONSUMO ESPECÍFICO DE PRODUTOS QUÍMICOS 43
4.1.1 Comparativo de consumo específico de soda cáustica com os aditivos A e B . 43
4.1.2 Consumo específico dos aditivos A e B 44
4.2 CUSTO DE PROCESSAMENTO 44
4.2.1 Comparativo dos custos de processamento com os aditivos A e B 45
4.3 RESÍDUO 46
4.4 CONTROLE ESTATÍSTICO DE PROCESSO 46
4.4.1 Cartas de controle 46
4.4.1.1 Soda cáustica com o aditivo A 47
4.4.1.2 Soda cáustica com o aditivo B 47
4.4.1.3 Alumínio dissolvido com o aditivo A 48
4.4.1.4 Alumínio dissolvido com o aditivo B 49
4.4.1.5 Aditivo A 49
4.4.1.6 Aditivo B 50
4.4.2 Análises de capacidade de processo 51

4.4.2.1 Soda cáustica com o aditivo A 51
4.4.2.2 Soda cáustica com o aditivo B 52
4.4.2.3 Alumínio dissolvido com o aditivo A 53
4.4.2.4 Alumínio dissolvido com o aditivo B 53
4.4.2.5 Aditivo A 54
4.4.2.6 Aditivo B 55
4.5 INDICADORES DE QUALIDADE INTERNO: REPROCESSO 56
4.6 PERDA DE METAL 56
4.7 PRODUTIVIDADE 57
4.8 GANHOS FINANCEIROS 57

5 CONCLUSÃO 59

REFERÊNCIAS 60

APÊNDICES 63

1 INTRODUÇÃO

Obtido pela primeira vez pelo químico e físico Hans Christian Ørsted (1777-1851) no ano de 1825, o alumínio ocupa a primeira posição no que diz respeito ao uso de metais não ferrosos. Devido às suas propriedades físicas e químicas, pode ser considerado um dos materiais mais versáteis, economicamente viáveis e atraente para inúmeras finalidades.

Leve, altamente refletivo, resistente a corrosão e abrasão, bom condutor térmico e elétrico (no seu estado mais puro), torna-se quase impossível listar todas as possibilidades de aplicabilidade deste metal. É usado na construção civil como elemento estrutural e de arquitetura, na indústria automotiva e aeroespacial, e na produção de diversos bens de consumo, podendo-se citar como exemplos: eletrodomésticos, eletrônicos, móveis e metais sanitários.

Segundo informações da Associação Brasileira do Alumínio (ABAL, 2018), no ano de 2018, o mercado brasileiro apresentou um crescimento de 9,1% em relação ao ano anterior no que tange ao consumo de produtos transformados de alumínio. Esta informação testifica o potencial do alumínio na atualidade, considerando-se o cenário conturbado que o Brasil tem vivenciado nos últimos anos.

E certamente, uma das principais características que contribui e vem estimulando o uso do alumínio defronte a outros metais, é a sua resistência natural a corrosão. Graças ao efeito de passivação, tem a sua superfície coberta por óxido de alumínio. Entretanto, a formação natural do óxido que envolve a área superficial, não possui homogeneidade e apresenta uma pequena espessura, onde com o passar do tempo e com a sua exposição nas mais diversas condições, tem sua resistência comprometida. Todavia, existem processos que possibilitam a criação de uma camada mais espessa e homogênea, garantindo uma maior durabilidade, além de propiciar acabamentos decorativos. Um dos processos mais usuais com tal finalidade é o processo de anodização.

Anodização é um processo eletroquímico que converte a superfície do alumínio em óxido de alumínio, conferindo-lhe aspectos decorativos e uma resistência a corrosão e abrasão superiores à natural. O processo é realizado através da submersão do metal em uma variedade de produtos químicos, popularmente chamados de “banhos”.

1.1 JUSTIFICATIVA E PROBLEMA

Um bom gerenciamento aliado ao ato de assegurar-se que as melhores condições operacionais sejam seguidas e aplicadas em um processo produtivo, garantem que os resultados almejados por uma instituição, sejam eles de interesse econômico-financeiro, de produtividade, ambientais ou de qualquer outro âmbito, possam ser alcançados. Assim, a busca por novas tecnologias e alternativas para uma boa manutenção do negócio da empresa não pode ser cessada.

Atualmente, sendo considerado um ponto com oportunidades de melhoria no setor de anodização em uma indústria de produtos extrudados de alumínio, o consumo de produtos químicos chegou a representar mais de 40% dos custos no ano de 2018. Destes, a etapa de fosqueamento alcalino foi a que representou o maior custo de processamento.

O banho é composto por solução de soda cáustica e de aditivo do tipo longa vida. No qual, a soda cáustica é responsável pelo acabamento superficial, remoção de impurezas, alguns defeitos oriundos de processos anteriores e a camada natural de óxido de alumínio; já o uso de aditivos, tem o intuito de prolongar a vida útil do banho, assegurando que não haja a formação de hidróxido e de óxido de alumínio, além de contribuírem para a redução do consumo de soda cáustica e a prevenção de possível contaminação nas etapas posteriores por arraste (estes aumentam a fluidez do banho). Atuam ainda como inibidores de ataque superficial, resultando em menor perda de massa do metal por corrosão.

O emprego de aditivo no banho é de extrema relevância, pois, além dos benefícios já supracitados, garante que não haja uma interrupção no fluxo produtivo para realizar a remoção do resíduo no fundo e nas laterais dos tanques de processo. Como consequência, as atividades de limpezas expõem os funcionários a condições inseguras, uma vez que, são realizadas de forma manual, exigindo a necessidade de entrada nos tanques.

A linha de produção na qual este estudo foi direcionado faz uso de um aditivo fornecido pela da “Empresa A” que atende às necessidades do processo, entretanto, a falta de um segundo fornecedor e/ou produto homologado, coloca a empresa em uma posição delicada no mercado devido ao risco de problemas no fornecimento do insumo e de aumento inesperado de preço. Existem atualmente no mercado diversas empresas que fornecem insumos para o tratamento de superfície. Portanto, buscou-se um aditivo com as mesmas características do aditivo fornecido pela “Empresa A”, mas que de acordo com informações, possibilitariam redução de consumo de soda cáustica, melhoria do acabamento superficial,

além de redução significativa na formação de resíduo, o que resultaria em menor necessidade de paradas da linha para limpeza dos tanques.

Assim, chega-se à pergunta central: **é viável substituir o aditivo longa vida fornecido pela "Empresa A" pelo aditivo ofertado pela "Empresa B", levando em consideração fatores como qualidade, custos, produtividade e, sua influência sobre a geração de resíduo?**

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Geral

Avaliar a viabilidade da substituição de um aditivo longa vida no tanque de fosqueamento alcalino no processo de anodização.

1.2.2 Objetivos específicos

a) Comparar o consumo específico (em g/m²) de soda cáustica e dos aditivos A e B;
b) Comparar o custo de processamento do material (R$/m²) com os aditivos A e B;
c) Realizar estudos sobre controle estatístico de processo;
d) Comparar a formação de resíduo com os aditivos A e B;
e) Confrontar um indicador de qualidade interno: reprocesso;
f) Realizar testes de perda de metal;
g) Estimar o impacto da substituição do insumo na capacidade de produção da linha (ton/ano).

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 O ALUMÍNIO

As vantagens do alumínio frente a outros metais, estão sobretudo relacionadas às suas propriedades e características físicas e químicas. Leve, flexível, resistente e, principalmente, infinitamente reciclável, fazem dele hoje o metal não ferroso mais utilizado.

De acordo com Davis (1993, apud Alves, 2012, pg. 13), é o terceiro metal mais abundante da crosta terrestre. Progressivamente, vem sendo empregado nos mais diversos setores, isso em decorrência de alguns fatores técnicos e econômicos. É encontrado naturalmente na forma de minérios, sendo a bauxita atualmente o que apresenta a melhor viabilidade comercial para a sua produção.

2.1.1 O alumínio no mundo

Fazendo parte direta ou indiretamente do cotidiano de todos, o alumínio é empregado em diversos setores, como: na indústria de alimentos, na construção civil, indústria automotiva, aeroespacial, além dos bens de consumo. A diversidade de locais onde é empregado só comprova o quanto é um dos materiais mais versáteis atualmente, servindo de substituto para muitas aplicações. Características como a resistência natural a corrosão, baixo peso específico, ou a possibilidade de obter o metal nos mais diversos formatos, torna-o uma alternativa a materiais tradicionais. Desse modo, é produzido em larga escala em todo o mundo. A figura 1 apresenta a contribuição dos continentes em resultados percentuais referente à produção do metal no ano de 2014.

Figura 1 – Produção de alumínio no mundo no ano de 2014 em mil toneladas

Fonte: UC Rusal, 2014.

O continente asiático é atualmente o maior produtor de alumínio no mundo, sendo que, no ano de 2014, contribuiu com quase que 70% da produção mundial, seguido pela Europa e Rússia, que contribuíram com 14,1% da produção; já a América do Norte, a Oceania, a África, e América Latina e Caribe tiveram contribuições de 8,35%, 3,72%, 3,15% e 2,78% respectivamente.

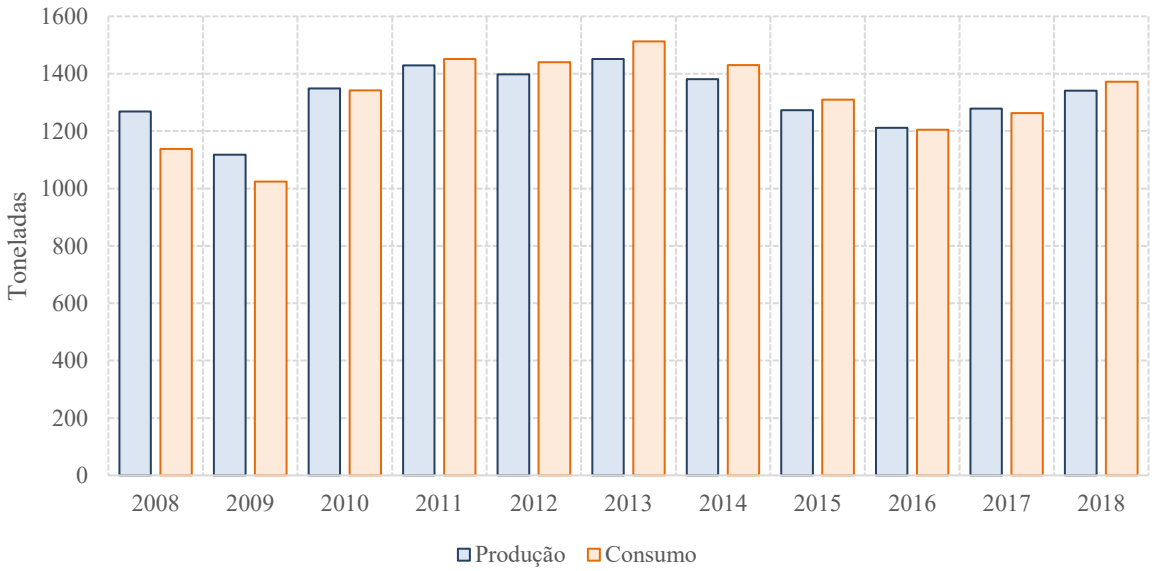
2.1.2 O alumínio no Brasil

Tendo em vista o cenário conturbado no qual o Brasil se situa nos últimos anos, pode-se dizer que o mercado do alumínio se moveu em um panorama de incertezas. Fatos ocorridos no Brasil no ano de 2018 (como a greve dos caminhoneiros, a guerra comercial entre a China e os Estados Unidos, o ambiente político controverso e uma eleição que dividiu o País), impactaram de forma decisiva e deletéria o ambiente dos negócios no mercado nacional. Assim, o mercado do alumínio, como os demais, foi atingido negativamente. Ainda assim, segundo informações da ABAL (2018, pg. 8), no ano de 2018 o mercado de consumo doméstico de produtos transformados de alumínio, apresentou um crescimento de 9,1%, totalizando 1372 mil toneladas.

O gráfico 1 apresenta os valores referentes à produção e ao consumo de alumínio no Brasil do ano de 2009 ao ano de 2018.

Gráfico 1 – Consumo e produção de alumínio no Brasil

*Unidade: em mil toneladas | '000 tons



Fonte: Adaptado de ABAL, 2018.

Como fica evidenciado no gráfico 1, apesar de todos os dilemas vivenciados pelo país nos últimos anos, tanto a produção quanto o consumo de alumínio, vêm apresentando crescimento constante. Os anos de 2014, 2015 e 2016 foram árduos para o setor, apresentando decrescimento em termos gerais, mas em 2017 o mercado volta a reagir, entregando resultados positivos.

2.1.3 Produção de produtos transformados de alumínio no Brasil

O Brasil é um dos países que se encontra em toda a cadeia produtiva do alumínio, e um dos setores mais consolidados é o de produtos transformados. Pela facilidade e possibilidade de transformação do metal em inimagináveis formatos e produtos, torna-o um mercado extremamente atrativo. Fios, chapas, produtos extrudados, são alguns exemplos dos produtos obtidos a partir do alumínio.

A tabela 1 apresenta os principais produtos transformados produzidos no Brasil e suas respectivas produções nos anos de 2015, 2016, 2017 e 2018.

Tabela 1 – Produtos transformados de alumínio

*Unidade: em mil toneladas

Produtos	2015	2016	2017	2018
Chapas	592,0	580,2	558,1	628,1
Extrudados	270,5	218,2	233,8	238,0
Folhas	78,0	81,6	87,6	94,1
Fios e Cabos	109,6	134,5	129,7	150,7
Fundidos e forjados	138,0	120,3	156,1	169,4
Pó	22,8	17,4	23,6	25,9
Usos destrutivos	39,6	36,0	41,0	41,4
Outros	22,5	23,9	27,8	24,9
Total	**1.273,0**	**1.212,1**	**1.257,7**	**1.372,5**

Fonte: Adaptado de ABAL, 2019.

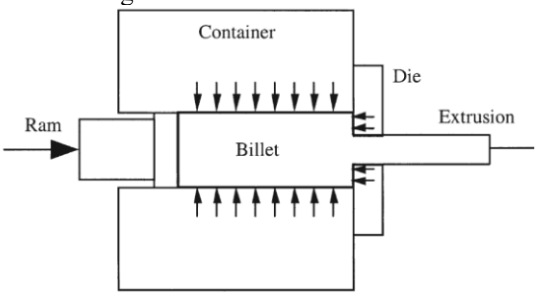
A produção de chapas, representa quase 50% dos produtos transformados no país, onde grande parte do seu emprego é em embalagens alimentícias. Já a segunda posição é atribuída a produtos extrudados.

A empresa onde o estudo foi realizado trabalha com soluções em produtos extrudados, onde grande parte dos produtos são destinados para o setor de construção civil.

2.2 PROCESSO DE EXTRUSÃO

"Extrusão é um processo de deformação plástica, no qual um bloco de metal é forçado a fluir por compressão através de uma abertura (matriz) com uma área de seção transversal menor do que a original" (SAHA, p. 1, 2000 tradução nossa)[1]. A figura 2 ilustra de forma simplificada o processo de extrusão.

Figura 2 – Processo de extrusão



Fonte: SAHA, 2000.

Após aquecido, o tarugo de alumínio é forçado a fluir mecanicamente, sendo conformado ao formato de abertura da matriz. Após a extrusão, os perfis de alumínio podem passar por processos de beneficiamento, melhorando algumas características estéticas e incrementando de forma significativa, propriedades como a resistência à corrosão. Para tais fins, os processos mais usais são o de pintura e de anodização.

2.3 PROCESSO DE ANODIZAÇÃO

Lu et al. (2018), afirmam que o tratamento da superfície do alumínio é indispensável para aumentar sua dureza, resistência a corrosão, prolongar sua vida útil e aumentar a sua aplicabilidade, sendo o processo de anodização um dos mais comuns para tais finalidades. "Geralmente, o processo de anodização se refere ao revestimento da superfície do alumínio e de suas ligas em óxido de alumínio. O nome do processo deriva do fato de que a parte de alumínio a ser revestida se torna o ânodo em uma célula eletrolítica" (COTELL, SPRAGUE e SMIDT, p. 482, 1994 tradução nossa)[2].

---

[1] Extrusion is a plastic deformation process in which a block of metal is forced to flow by compression through the die opening of a smaller cross-sectional area than that original.

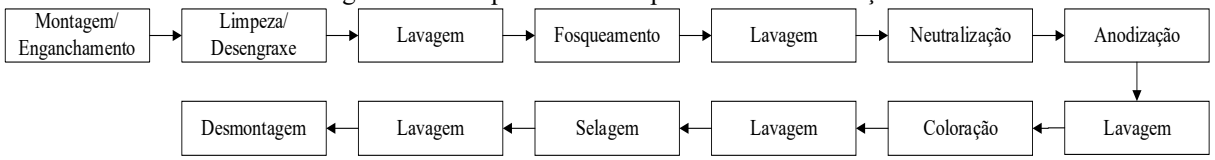
[2] IN GENERAL, anodizing refers to conversion coating of the surface of aluminum and its alloys to porous aluminum oxide. The process derives its name from the fact that the aluminum part to be coated becomes the anode in an electrolytic cell.

A ABAL (p. 13, 2005) descreve o processo de anodização como:

> A anodização é um processo eletrolítico que produz uma camada penetrante e integral de óxido em superfície de Alumínio. É um método bastante aceito e bem definido para produzir uma película decorativa e protetiva de alta qualidade nas ligas de alumínio, cobrindo uma ampla gama de aplicações.

O processo de anodização é composto por algumas etapas comuns a todas as linhas, sendo alterados geralmente o layout, o tamanho e capacidade de cada processo de acordo com as necessidades do mercado a ser atendido. O fluxograma 1 traz a representação de uma linha básica de anodização.

Fluxograma 1 – Etapas básicas do processo de anodização



Fonte: do Autor, 2020.

Para um melhor entendimento a respeito do processo de anodização, serão descritas as etapas básicas de uma linha de anodização, bem como os seus aspectos gerais e as funcionalidades de cada uma delas.

2.3.1 Montagem

A formação de óxido de alumínio na superfície do alumínio, depende diretamente da corrente elétrica sobre ele aplicado. Assegurando-se de que haja um bom contato entre o material e a gancheira, a realização montagem das peças de alumínio é de extrema importância.

Segundo Meneghesso (2006) a etapa de montagem:

> Consiste em fixar os perfis ou peças nas gancheiras de alumínio ou titânio, de tal forma que permita um bom contato elétrico. O contato peça-gancheira deve ser bem firme para não permitir deslocamentos durante a movimentação da carga entre os vários estágios da anodização ou pela agitação de ar utilizado em alguns tanques da linha de anodização.

E além de garantir um bom contato para que possa ser aplicado sobre as peças metálicas uma corrente elétrica, a montagem adequada garante que não ocorra queda do

metal nos tanques por conta de movimentação e agitação, nem acúmulo de resíduos durante as etapas do processo. A montagem também tem um impacto direto na qualidade das etapas de desengraxe, anodização e coloração. Se não houver inclinação adequada, haverá formação de zonas mortas /bolhas, consequentemente, não possibilitando que as etapas de desengraxe, anodização e de coloração aconteçam da forma adequada.

2.3.2 Desengraxe/ Limpeza

O desengraxe (também chamado de limpeza) é efetuado para remover óleos, gorduras, partículas (limalhas de alumínio e cavacos) e outros resíduos aderentes ao metal que são provenientes de processos anteriores. É feita a submersão das peças após a etapa da montagem.

Geralmente, empregam-se soluções aquosas de ácido sulfúrico ou agentes surfactantes, a escolha é tomada em função do objetivo principal (de remover óleo e gordura ou filme de óxidos). O tempo de imersão irá variar em função de algumas variáveis, como: quantidade de peças e suas sujidades, temperatura, concentração do banho. Existe ainda o uso de tecnologia ultrassom para aumentar a eficiência da limpeza (empregada geralmente em peças que serão usadas na composição de dispositivos eletrônicos).

2.3.3 Lavagem

Após a etapa de desengraxe das peças, a gancheira é direcionada para um tanque de lavagem, removendo os resíduos do tanque de desengraxe. A lavagem é feita unicamente em água e, posteriormente a cada uma das etapas de processo, existe um tanque de lavagem.

Para Meneghesso (2006):

> A lavagem em água é feita após o desengraxe e após cada uma das subsequentes fases do processo aplicado, (pré-tratamento para pintura, anodização, etc.). Sua finalidade é garantir a ausência de resíduos na superfície das peças provenientes da etapa anterior. É a fase mais importante do processo, pois pode ser uma fonte permanente de contaminação. Exige dimensionamento correto das vazões de água, estabelecendo um perfeito balanceamento entre a lavagem e o consumo de água, utilizando-se técnicas como sistema de spray, cascata e agitação para esse fim.

Sendo assim, os tanques de lavagens têm três propósitos principais, que são: encerrar reações químicas, diluir produtos químicos de etapas anteriores e prevenir a contaminação das etapas subsequentes por meio de arraste.

2.3.4 Fosqueamento

O acabamento fosco é o tipo de pré-tratamento mais comum para o alumínio anodizado, podendo ser definido como um processo de corrosão acelerado e controlado. É uma etapa do processo que tem finalidades decorativas e funcionais. Nela é outorgado um acabamento fosco acetinado homogêneo à superfície, além de ser responsável pela remoção de óxido residual que não tenha sido removido na etapa de desengraxe, defeitos e resíduos provenientes de outros processos, como linhas de extrusão ou resíduos de grafites, além de arranhões e outras imperfeições. Usualmente, é feito o emprego de soluções aquosas de soda cáustica à quente (geralmente com concentrações que variam entre 5% e 10% v/v), transformando o brilho metálico em um acabamento uniforme, não revelando (ou revelando pouquíssimo) da estrutura de grãos do metal, mas, em alguns casos, se faz uso de fosqueamentos ácidos para situações especiais. Entretanto, caso haja contaminantes e estes não forem removidos antes de chegarem na etapa de fosqueamento, o banho acentuará essas imperfeições (BRACE e SHEASBY, 1968; KAPE, 1969; CHATTERJEE, 1977; COTELL, SPRAGUE e SMIDT, 1994; MENEGHESSO, 2006; ÇAKIR, 2008 e NEWMAN, 2018).

2.3.4.1 Mecanismos de reações que ocorrem no banho de fosqueamento

A reação química que acontece entre o alumínio e a solução à base de soda cáustica no fosqueamento alcalino é descrita por Meneghesso (2006) como:

$$2Al + 2\,NaOH + \ 2H_2O \rightarrow 2\,NaAlO_2 + 3H_2^{\uparrow}$$

Como pode ser visto, existe a formação de aluminato de sódio no banho. Segundo Meneghesso (2006), ele permanece solúvel no banho se algumas condições operacionais forem controladas. Sendo descritas a seguir:

- Manutenção de uma boa relação entre soda cáustica livre e alumínio dissolvido no banho;
- Acrescer à solução um poderoso agente complexante de aluminato de sódio (aditivos longa vida);
- Manter a temperatura do banho acima de 20ºC.

Meneghesso (2006) afirma ainda que caso alguma das condições citadas forem ignoradas, ocorrerá o desbalanceamento da reação química, formando hidróxido de alumínio na forma de precipitado que irá se fixar nas laterais dos tanques ou irá decantar.

A reação representada a seguir, demonstra o desbalanceamento da reação, formando hidróxido de alumínio e hidróxido de sódio.

$$NaAlO_2 + 2\,H_2O \rightarrow Al(OH)_3 + NaOH$$

O precipitado de hidróxido de alumínio gerado torna-se duro devido à perda de água e transforma-se em alumina pela ocorrência da seguinte reação:

$$2Al(OH)_3 \rightarrow\ Al_2O_3 + 3\,H_2O$$

Conclui que se trata de uma reação química irreversível, que ocorre em soluções velhas e/ou soluções que sofreram um resfriamento abaixo de 20 º C, sendo necessário remover todo precipitado endurecido por meio de ação mecânica.

2.3.4.2 Resíduos no tanque de fosqueamento alcalino

Caso ocorra a formação de resíduo no tanque, faz-se necessário interromper o fluxo produtivo para que possa ser feita a limpeza do tanque. As limpezas são feitas de forma manual, sendo necessária a entrada de funcionários habilitados para realização da atividade.

Para realizar a limpeza, os operadores precisam utilizar EPI (equipamentos de proteção individual) especiais, que evitarão qualquer tipo de contato com os resíduos ou líquidos que possam ter ficados retidos no tanque.

2.3.5 Neutralização

Durante o fosqueamento, parte da solução fica aderida à superfície do material e, mesmo passando por tanques de lavagens, não é completamente removida. Desta forma, existe a necessidade de neutralização das reações químicas, que por consequência, removerá o filme aderido à superfície do metal.

Segundo Meneghesso (2006), a etapa de neutralização:

> Consiste em neutralizar o filme de solução de fosqueamento que permanece aderido ao material, após a lavagem com água. A neutralização é realizada para remover quaisquer partículas de intermetálicos ou hidróxidos presentes na superfície do alumínio, após o ataque alcalino e lavagem. Esse é um processo a temperatura ambiente não consumindo energia. Tem como finalidade neutralizar os efeitos dos resíduos alcalinos, bem como dissolver compostos formados em decorrência das reações químicas dos elementos de liga do alumínio, durante a fase de fosqueamento.

Além de remover os filmes alcalinos formados no fosqueamento, a neutralização garante com que ocorra a dissolução dos compostos que são formados em função dos elementos de ligas. O banho é constituído por uma solução de ácido sulfúrico, operando em temperatura ambiente. E ainda que se haja aditivos para esta etapa, não são comumente utilizados.

2.3.6 Anodização

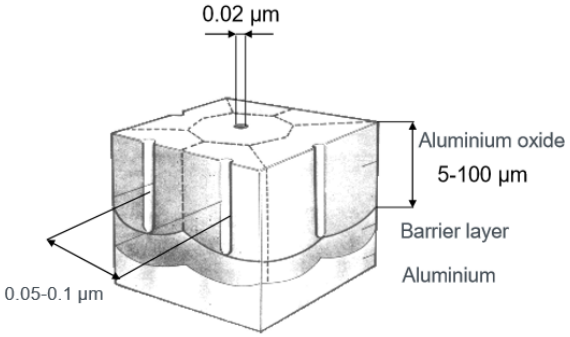
Anodização é a conversão da superfície do alumínio em óxido de alumínio. Pode ser aplicado em outros metais, como o zinco e magnésio. É formada uma camada com elevada espessura (se comparada com a camada formada naturalmente) de forma controlada e acelerada. (STEVENSON, 1994; PEREIRA, 2008).

Segundo a ABAL (p. 39, 2005)

> A estrutura básica da camada anódica é constituída por células hexagonais, cada uma delas com um poro central. No fundo dos poros forma – se uma fina camada barreira, que separa o óxido em formação do alumínio. Essencialmente, o tamanho das células é determinado pela voltagem, enquanto a espessura da camada é determinada pelo número de coulombs que passam através dela (relação corrente x tempo). As características da camada anódica dependem do tamanho e do volume dos poros e estão diretamente ligadas à remoção do calor gerado no processo".

A camada anódica eleva a resistência à corrosão e à abrasão do alumínio. Sendo representada na figura 3.

Figura 3 – Estrutura da camada anódica



Fonte: NILSSON, 2018.

É formada por uma camada barreira e por uma camada porosa que terá sua espessura definida de acordo com o ambiente no qual se pretende aplicar o metal. Groves [20--?], afirma que a camada barreira apresenta geralmente uma espessura de até 0,08 µm, enquanto que a escolha da espessura da camada porosa será escolhida em função do local de aplicação do alumínio.

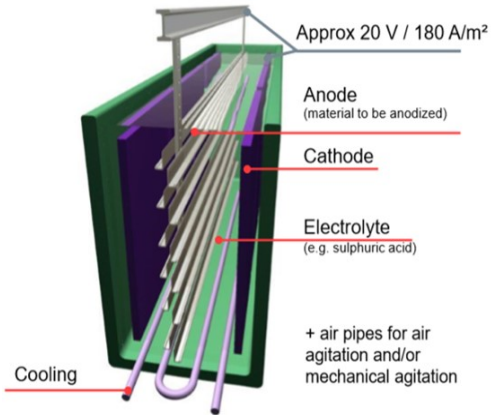
A formação da camada anódica é obtida através do processo de eletrólise.

2.3.6.1 Eletrólise

Eletrólise é um processo eletroquímico, no qual a energia elétrica atua como força eletromotriz para que as reações químicas aconteçam. As substâncias são decompostas pela passagem de corrente elétrica através delas (ZOULIAS, et al., tradução nossa)[3].

A figura 4 ilustra os componentes de uma célula eletrolítica.

Figura 4 – Célula eletrolítica



Fonte: NILSSON, 2018.

[3] Electrolysis is an electrochemical process in which electrical energy is the driving force of chemical reactions. Substances are decomposed, by passing a current through them.

As reações químicas que acontecem em função da aplicação da corrente elétrica aplicada à célula eletrolítica, são:

$$2Al \rightarrow 2Al^{3+}6^{e-}$$

$$3H_2O \rightarrow 6H^+ + 3O^{2-}$$

$$2Al^{3+} + 3H_2O \leftrightarrow 2Al_2O_3 + 6H^+$$

Por meio das reações químicas apresentadas, constata-se que a superfície do alumínio é convertida em óxido de alumínio, entretanto, necessita da passagem de corrente elétrica para que a reação ocorra.

2.3.6.2 Espessura da camada anódica

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), pela normativa NBR 12609, estabelece a especificação da espessura da camada anódica de acordo com a exposição do alumínio a diferentes ambientes. A tabela 2 representa as classes de espessuras de camadas (ideais) para os mais diferentes ambientes.

Tabela 2 – Classificação de espessuras de camadas anódicas para aplicações interiores/exteriores

Classe	**Espessura (µm)**	**Nível de agressividade**	**Ambiente típico**
A13	11 a 15	Baixo/Média	Urbano/Rural
A18	16 a 20	Alta	Litorâneo
A23	21 a 25	Excessiva	Marítimo

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 12609, 2003.

A espessura da camada anódica é determinada em função do tempo em que as peças ficam submergidas no tanque sob aplicação de corrente elétrica, onde quanto maior o tempo, maior será a espessura obtida.

2.3.7 Coloração

Etapa opcional, têm caráter mais decorativo do que protetivo. A coloração do alumínio anodizado ocorre pelo preenchimento dos poros formados na etapa de anodização, sendo a eletrocoloração um dos métodos mais comuns.

Meneghesso (2006), descreveu que:

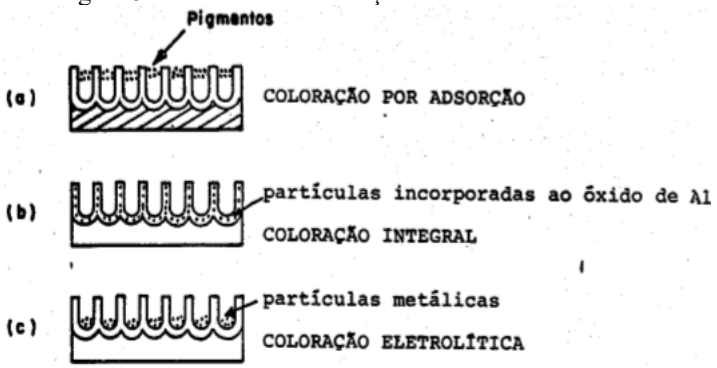
> O sistema de coloração eletrolítica é muito usado no momento e consiste na obtenção de uma camada anódica de óxido produzida pelos métodos convencionais com ácido sulfúrico, com subsequente tratamento eletrolítico em uma solução ácida (ou levemente ácida) de um sal de metal, normalmente através do uso de corrente alternada.

Pedroso [198-?] afirma que além do método de eletrocoloração, existem mais dois métodos para colorir o alumínio anodizado. Sendo:

- Coloração por adsorção;
- Coloração integral.

A figura de número 5 demonstra os três métodos de coloração do alumínio anodizado, sendo eles: (a) coloração por adsorção; (b) coloração integral; (c) coloração eletrolítica.

Figura 5 – Métodos de coloração do alumínio anodizado



Fonte: PEDROSO, [198-?].

Na coloração por adsorção é feito o uso de pigmentos orgânicos ou inorgânicos, que irão preencher os poros formados na etapa de anodização. Já a coloração integral é realizada com ácido sulfúrico em conjunto com ácidos orgânicos, onde a coloração é feita em uma única etapa – a coloração ocorre simultaneamente à formação da camada anódica. Partículas metálicas que se desprendem do substrato de alumínio ou presentes na solução são incorporadas na camada de óxido.

2.3.7.1 Coloração eletrolítica com sais de estanho

Pedroso [198-?] descreveu o método de coloração eletrolítica, como a deposição de sais metálicos na base dos poros do alumínio previamente anodizado, pela passagem de corrente elétrica. Além dos sais à base de estanho, pode ser feito uso de outros sais metálicos na coloração, sendo que os mais comuns são a base de níquel, cobre e cobalto.

Meneghesso (2006), descreveu a formulação básica de um banho de eletrocoloração com sais de estanho, sendo representado na tabela 3.

Tabela 3 – Formulação de uma coloração eletrolítica baseada em sais de estanho

Sulfato de estanho	18 g/L
Ácido sulfúrico	18 g/L
Aditivo	10 a 30 g/L
Voltagem	14 a 20 Volts (Corrente alternada)
Densidade de corrente	0,2 a 0,8 A/dm²
Contra-eletrodos	Grafite, aço, inox e estanho
Tempo de coloração	1 a 10 minutos
Temperatura	21 +/- 1 ºC
Cores	Champanhe, bronze e preta

Fonte: Adaptado de MENEGHESSSO, 2006.

As cores que podem ser obtidas através da coloração usando sais de estanho são o champanhe, bronze e preto. A figura 6 mostra o catálogo das cores fornecidas pela empresa onde o estudo foi realizado.

Figura 6 – Formulação de uma coloração eletrolítica baseada em sais de estanho

Fonte: do Autor, 2020.

As diferentes tonalidades serão obtidas em função do tempo de imersão no tanque sob aplicação de corrente elétrica. Quanto maior o tempo, mais escura a tonalidade obtida. As cores podem ser obtidas tanto no acabamento fosco tradicional (fosqueamento alcalino à base de soda cáustica), quanto no fosqueamento ácido.

2.3.8 Selagem

É a última etapa do processo de anodização. Tem como finalidade o fechamento dos poros formados na etapa de anodização, mantendo a aparência inicial (cor) do material anodizado (GAZAPO e GEA, 1994).

Existem dois processos que podem ser empregados para o fechamento dos poros, o mecanismo a quente e a frio. Sendo descritos a seguir.

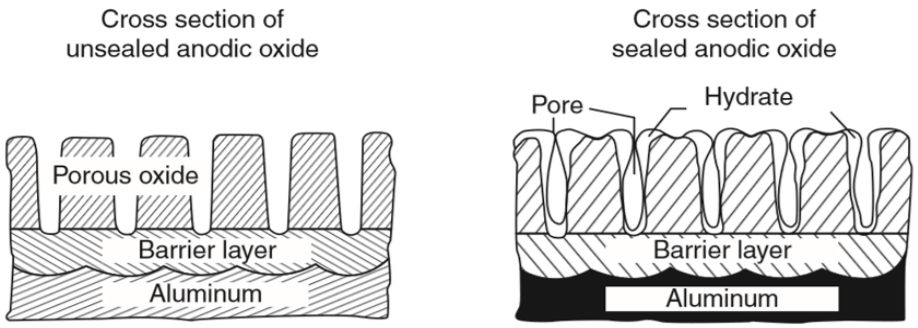
2.3.8.1 Selagem a quente

O fechamento dos poros nessa selagem ocorre pela hidratação do óxido de alumínio que é convertido em boemita. A reação é descrita como:

$$Al_2O_3 + H_2O \rightarrow 2AlOOH$$

A figura 7 descreve as etapas que ocorrem no processo de selagem a quente. A temperatura usual nesse tipo de selagem é controlada entre 80ºC e 100ºC.

Figura 7 – Poro aberto vs. poro fechado da camada anódica



Fonte: PATEL e PATEL, 2018.

A selagem ocorre pela obstrução do poro quando a boemita é hidratada. Por ser ligeiramente maior do que a o óxido de alumínio, a boemita consegue fechar o poro da camada por completo.

2.3.8.2 Selagem a frio

A selagem a frio produz um filme de óxido a base de produtos químicos, geralmente a base de sais de níquel e sais de flúor, que irão se depositar no interior da camada. Os poros serão preenchidos pela precipitação de $Ni(OH)_2$, Al(OH) e de AlF, todos na forma hidratada (KALANTARY 1990; QUALANOD 2017).

2.3.9 Desmontagem

A desmontagem dos perfis de alumínio é a última das etapas do processo, mas é também uma das mais importantes. Nesta etapa, o material anodizado é retirado das gancheiras e inspecionado. O material é inspecionado de forma visual, ocasião em que é realizada uma verificação do acabamento, para identificar se há ocorrência de defeitos superficiais, espessura da camada anódica, brilho e o controle da cor (para materiais coloridos).

Para que o material possa ser liberado para o cliente, é feito uma comparação da cor com amostras padrão mínimos (amostra mais clara), alvo (cor ideal) e máximo (cor mais escura) e a verificação da cor através de um espectrofotômetro, onde são medidos variáveis.

2.4 ADITIVOS UTILIZADOS NO FOSQUEAMENTO ALCALINO

Ambos os aditivos são caracterizados como aditivo longa vida para tanques de fosqueamento alcalino, prolongando a vida útil dos banhos, além de assegurarem um acabamento homogêneo e uniforme.

O Aditivo A era utilizado no processo de anodização da linha até meados de fevereiro do ano de 2019; a partir dessa data, passou-se a utilizar o Aditivo B. As seções 2.4.4 e 2.4.5 se destinam a descrição das informações de ambos os aditivos.

2.4.4 Aditivo A

2.4.4.1 Descrição

O Aditivo A é um produto de última geração, líquido, neutro, utilizado como Aditivo no Processo de Fosqueamento Longa Vida. Este sistema de fosqueamento vem obtendo preferência mundial devido ao acabamento constante e uniforme que proporciona.

2.3.4.1 Condições operacionais

- Concentração de NaOH: 40 – 100 g/L;
- Concentração de Alumínio: 20 – 150 g/L;
- Concentração Aditivo A: 30 – 40 g/L;
- Tempo de Imersão: 3 – 30 minutos, depende do grau de fosqueamento desejado;
- Temperatura: 45 – 55 ºC.

2.3.5 Aditivo B

É um aditivo para o fosqueamento alcalino de vida longa e extremamente baixa formação de espuma e elevado rendimento, conseguindo um excelente desempenho na drenagem para aplicações especiais. Este produto funciona com um melhor potencial a um teor de alumínio de cerca de 140 g/L ou superior. Torna-se possível, mesmo com elevados teores de alumínio na solução, uma excelente drenagem.

O Aditivo B distingue-se pelo bom nivelamento visual, com menor abrasão. Aditivos especiais garantem que a espuma que se desenvolve normalmente com maiores cargas de produtos seja reduzida a um mínimo.

2.3.5.1 Condições operacionais

- Densidade: cerca de 1,25 g/mL;
- Tempo de imersão: 10 – 20 minutos, dependendo da temperatura, concentração e do grau fosqueamento requerido;
- Temperatura: 55 – 65 ºC.
- Aditivo B: 80 a 100 g/L;
- Hidróxido de Sódio: 50 – 80 g/L;
- Conteúdo de Alumínio: mínimo de 140 g/L.

A forma como o produto atua é fortemente influenciado pelo material e pela composição da superfície. Em casos individuais, os parâmetros ideais de operação podem variar entre os parâmetros dados.

2.3.6 Plano de controle de variáveis

Como supramencionado, tanto o aditivo da Empresa A quanto o aditivo da Empresa B, têm a mesma finalidade, entretanto, contam com algumas distinções, como os limites operacionais. De modo a elucidar essas distinções, elaborou-se a tabela 4, que faz o comparativo das distinções dos aditivos A e B, sendo representada a seguir:

Tabela 4 – Comparativo entre os aditivos das empresas A e B

VARIÁVEL DE CONTROLE	UNIDADE DE MEDIDA	ADITIVO A		ADITIVO B	
		LIE	LSE	LIE	LSE
[NaOH]	g/L	40	100	50	80
[Al^{3+}]	g/L	20	150	140	200
[Aditivo]	g/L	30	40	80	100
Temperatura de operação	ºC	45	55	55	65
Densidade	g/cm³	1,2 a 1,24		1,20 a 1,40	
pH	-	9 a 12		10,5 a 12	
Aspecto	-	Líquido incolor		Líquido incolor	
Odor	-	Inodoro		Inodoro	
Tempo de imersão	segundos	180	1800	600	1200
Frequência de limpeza	-	A cada 2 meses		A cada 6 meses	
Preço (aditivo)*	R$/kg	5,00		11,00	

Fonte: do Autor, 2020.

*Preço médio de compra, a fim de eliminar o impacto das flutuações de câmbio.

Apesar de apresentarem variáveis de controle iguais e características muito similares quando se fala sobre suas propriedades físico-químicas, os aditivos apresentam limites operacionais bem distintos. E apesar de possuírem as mesmas finalidades, o aditivo fornecido pela empresa B, custa mais do que o dobro do aditivo fornecido pela empresa A

3 METODOLOGIA

Com o intuito de confirmar a viabilidade de substituição do aditivo A pelo aditivo fornecido pela empresa B, é necessário definir as métricas que irão servir para a tomada decisória quanto à troca. Assim, juntamente com o time de engenharia de processo do setor, foram definidos quais seriam os Indicadores Chaves de Desempenho (KPI)[4], que estão representados a seguir:

- Consumo específico de produtos químicos;
- Custos.
- Geração de resíduo.
- Controle estatístico de processo: cartas de controle e análises de capacidade;
- Indicadores de qualidade: rejeição e reprocesso;
- Perda de metal.

A partir dos indicadores acima listados, foram definidas quais seriam as metodologias mais adequadas de acordo com as necessidades da empresa. É importante ressaltar que para fins gerenciais, o processo de anodização mensura grande parte de seus indicadores em função da área processada, como é o caso do consumo de produtos químicos e dos custos de processamento; entretanto, alguns indicadores serão apresentados em função da massa processada de metal.

3.1 CONSUMO ESPECÍFICO DE PRODUTOS QUÍMICOS

O consumo específico de produtos químicos é definido como a quantidade de produto químico necessário para processar determinada área de metal. O cálculo é realizado pela equação a seguir

$$Consumo\ específico = \frac{Consumo\ de\ produto\ químico\ (g)}{Área\ processada(m^2)} \quad (1)$$

A empresa conta com um sistema de dosagens automático para correção dos banhos de processo, assim, o controle do consumo dos produtos químicos é feito de forma manual.

[4] Do inglês: Key Performance Indicator, são indicadores de gestão utilizados como métricas para definir metas e medir o desempenho de um processo ou de uma empresa.

O controle é realizado diariamente, sendo calculado pela diferença do estoque atual em relação ao dia anterior. Após sua aferição, é alimentada uma planilha eletrônica para controle e acompanhamento.

Como o presente trabalho trata da substituição dos aditivos utilizados no tanque de fosqueamento alcalino, serão calculados os consumos de soda cáustica e do aditivo B. Para o aditivo A, fez-se uso de históricos de controles anteriores.

3.2 CUSTO DE PROCESSAMENTO

Um dos indicadores mais relevante para o processo de anodização é o custo de processamento de material. Quando avaliado de forma individual, possibilita encontrar a etapa mais dispendiosa. Já se avaliado considerando todas as etapas, permite mensurar o desempenho do processo e realizar comparativos para medir o progresso e a eficiência da linha.

É calculado a partir da relação dos custos com a área processada, sendo representado pela seguinte equação:

$$Custo\ de\ processamento = \frac{Custo\ com\ insumos\ (R\$)}{Área\ processada(m^2)} \quad (2)$$

Serão avaliados os custos de processamento com os aditivos A e B, considerando somente a etapa de fosqueamento. Os dados para a realização do trabalho foram fornecidos pelo setor de controladoria da empresa, obtidos através da plataforma *Bussiness Intelligence* (BI) de Custos.

3.3 RESÍDUOS

Para determinar a quantidade de resíduo nos tanques de fosqueamento alcalino, é necessário que o processo produtivo esteja inoperante. Desta forma, é possível realizar a transferência da solução para um outro local (tanque de lavagem), a fim de verificar o quanto de resíduo foi formado e, se há necessidade de que estes sejam removidos. Assim, elaborou-se um cronograma de paradas mensais, para que fosse feito o acompanhamento da quantidade do resíduo gerado.

3.4 CONTROLE ESTATÍSTICO DE PROCESSO

O controle estatístico de processo (CEP) é uma ferramenta de qualidade implementada com o intuito de fornecer um diagnóstico rápido e eficaz das variáveis críticas de processo, as quais têm impacto direto na qualidade e no custo do produto. Tem-se estabelecido limites de especificação, dados pelos fabricantes dos insumos, e limites de controle, determinados pela equipe de engenharia de processo através de cálculos estatísticos.

Neste trabalho, estudos relacionados ao controle estatístico do processo foram realizados com o auxílio do *Minitab® Statistical Software*. Analisando:

- Se o processo está estável e sob controle;
- As curvas de distribuição de dados;
- A capacidade global (P_p, P_{pk}) e capacidade potencial (C_p, C_{pk}).

A empresa conta com um laboratório interno que realiza as análises físico químicas diariamente, assim, para a elaboração das cartas de controle e análises de capacidade, serão utilizados os dados do controle analítico do laboratório da empresa.

As variáveis analisadas foram:

- Concentração de soda cáustica – [NaOH];
- Concentração de alumínio dissolvido – [Al^{3+}];
- Concentração do aditivo A – [aditivo A];
- Concentração do aditivo B – [aditivo B].

3.4.1 Cartas de controle

A carta de controle é uma das ferramentas da qualidade mais usuais na indústria. São utilizadas com o intuito de monitorar o desempenho de um processo e constatar se este encontra-se sob controle estatístico, além de possibilitarem a detecção de quaisquer alterações indesejadas, permitindo uma ação corretiva imediata.

Trazem consigo uma série de benefícios. Por facilitar a identificação dos tipos de variação, se comuns (variação inerente do processo produtivo de causas não controláveis) ou especiais (falhas ocasionais que acontecem no processo), é possível, por exemplo, reduzir o tempo e a necessidade de retrabalhos, redução de custos e a garantia de qualidade dos produtos ofertados.

No presente trabalho, a carta de controle escolhida para análise dos dados foi a de Valores Individuais. É utilizada quando o tamanho da amostra do processo é $n = 1$, isto é, a amostra consiste em uma única unidade individual. Em situações nas quais as medidas repetidas do processo irão diferir somente por erros analíticos ou de laboratórios, como é o caso de processos químicos, é o tipo de carta de controle mais adequada (SAMOHYL, 2009; MONTGOMERY, 2012).

Juntamente com a carta de controle para valores individuais, serão plotadas as cartas de controle da amplitude móvel, possibilitando avaliar a variabilidade do processo.

3.4.2 Análises da capacidade do processo

Enquanto as cartas de controle avaliarão a estabilidade do produto químico ao longo do tempo, sua capacidade de manter-se dentro dos limites de especificação, será analisada através dos índices de capacidade e de *performance* de processo. É importante salientar que mesmo estando sob controle estatístico, um processo pode apresentar itens não conformes. Para tal, serão estimados os índices C_p, C_{pk}, P_p e P_{pk}.

3.4.2.1 Índices de capacidade (C_p e C_{pk})

O índice de capacidade potencial (C_p), relaciona a variabilidade permitida no processo (limites de especificação) com a variabilidade natural do processo. Entretanto, considera que os dados estão centrados no valor nominal da especificação, desta forma, é preciso que seja estimado o índice de capacidade efetiva (C_{pk}), que leva em consideração a distância da média do processo em relação aos limites de especificação (GONÇALEZ e WERNER, 2009; OLIVEIRA et al., 2011). Assim, os índices C_p e C_{pk} irão predizer o comportamento do processo, bem como apresentar qual é o seu potencial em atender as especificações, porém, a dispersão dos dados deve seguir uma distribuição normal de probabilidade e as causas especiais de variação devem ser eliminadas.

Kaya e Kahraman (2010), relacionaram os índices de capacidade com a qualidade, onde quanto maior for o valor de C_p, maior é a qualidade. A tabela a seguir apresenta a relação da qualidade com os índices de capacidade

Tabela 5 – Relação da qualidade com o índice C_p

Condição de qualidade	**Valor do índice C_p**
Excelente	$2{,}00 \leq C_p$
Ótimo	$1{,}67 \leq C_p \leq 2{,}00$
Satisfatório	$1{,}33 \leq C_p \leq 1{,}67$
Capaz	$1{,}00 \leq C_p \leq 1{,}33$
Insatisfatório	$0{,}67 \leq C_p \leq 1{,}00$
Ruim	$C_p \leq 0{,}67$

Fonte: Adaptado de KAYA e KAHRAMAN, 2010.

Por meio da tabela supracitada, é possível constatar que quanto maior o valor do índice C_p, maior é a qualidade de um produto/processo, entretanto, faz-se um adendo a respeito da centralização dos dados avaliados quanto a sua localização em relação aos limites de especificação. Caso não esteja posicionado no centro dos limites de especificação ou muito próximo disso, recomenda-se que seja levado em consideração o índice C_{pk} ao invés do índice C_p.

3.4.2.1 Índices de performance (P_p e P_{pk})

O índice de capacidade global (P_p), indica o desempenho real do processo, representando o que é experimentado pelo cliente ao longo do tempo. Entretanto, assim como no caso do índice C_p, considera a centralização dos dados no valor nominal, para tal, faz-se uso do índice de P_{pk}, que representa a capacidade global efetiva do processo em questão (LLC, Minitab, 2020).

3.5 INDICADOR DE QUALIDADE INTERNO: REPROCESSO

Caso o produto apresente defeitos leves (defeitos superficiais como diferença de tonalidade, algumas manchas, camada anódica com espessura incorreta) ao final do processo, existe a possibilidade de retrabalho. Ainda que o retrabalho represente perda de capacidade produtiva e aumento de custo do produto nesta etapa, o custo total é menor que o sucateamento, que implica em nova produção da peça desde o início do processo de manufatura. Defeitos mecânicos ou corrosão acarretam o sucateamento direto da peça.

É importante ressaltar que o retrabalho é delicado e apresenta um grande risco de não ser bem-sucedido, portanto, o foco deve ser sempre em se obter a qualidade desejada no primeiro ciclo.

Os dados de retrabalho são registrados no sistema de Controle de Chão de Fábrica (CCF), permitindo sua rastreabilidade futura. Convertidos em indicadores de qualidade, têm seu impacto em produtividade da linha e custo analisados diariamente.

3.6 TESTES DE PERDA DE METAL

Um banho de fosqueamento alcalino extremamente reativo pode ser tanto benéfico para o processo quanto ruim. Pode atacar a estrutura de grãos do metal, deixando o material "rugoso", fazendo com que haja a necessidade de reprocessá-los, entretanto, em algumas situações, podem dar um acabamento fosco acetinado extremamente atraente.

O teste de perda de metal é realizado para averiguação do quanto de massa está sendo perdida no fosqueamento alcalino.

Para realizar o teste é necessário retirar uma amostra de material a ser anodizado e, pesar em uma balança analítica. Após as medições, a peça é processada normalmente em um lote regular. Ao final do processo, a peça tem seu peso aferido novamente.

Para realizar os cálculos da perda de massa, faz-se uso das seguintes equações:

$$Perda\ de\ massa = massa\ inicial - massa\ final \quad (2)$$

$$Perda\ de\ massa\ (\%) = \left(\frac{Perda\ de\ massa}{Massa\ inicial}\right) * 100 \quad (3)$$

Toda quantidade de metal perdida por corrosão na etapa de fosqueamento alcalino corresponde à matéria-prima utilizada, mas não convertida em produto. Assim como sucata, pode ser vista como um desperdício, apesar de inerente ao processo. Uma vez que o produto é vendido em quilo ao cliente, menores valores de perda de massa ao longo de todo o processo são de extremo interesse financeiro para a empresa.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

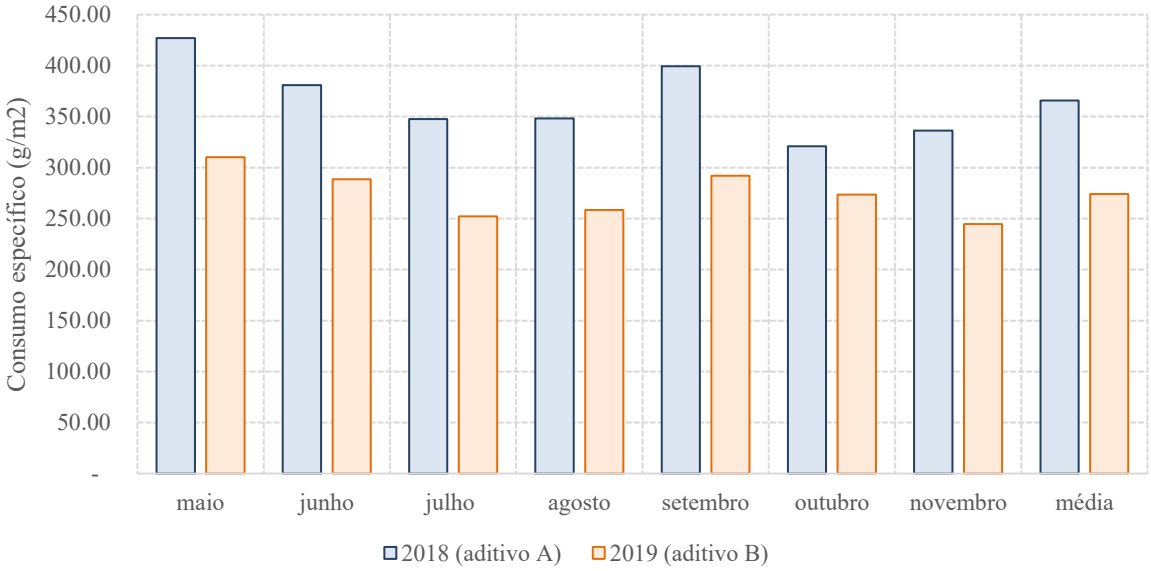
4.1 CONSUMO ESPECÍFICO DE PRODUTOS QUÍMICOS

Através do CCF, foi possível coletar dados referentes à produtividade dos anos de 2018 e de 2019 e, a partir da coleta diária de informação referente ao consumo dos produtos químicos, foi possível mensurar o consumo específico de soda cáustica e dos aditivos A e B. Sendo apresentados os resultados a seguir.

4.1.1 Comparativo de consumo específico de soda cáustica com os aditivos A e B

Os dados referentes aos consumos específicos de soda cáustica com o aditivo da empresa A e da empresa B estão representados no gráfico 2.

Gráfico 2 – Comparativo do consumo específico de soda cáustica com os aditivos A e B



Fonte: do Autor, 2020.

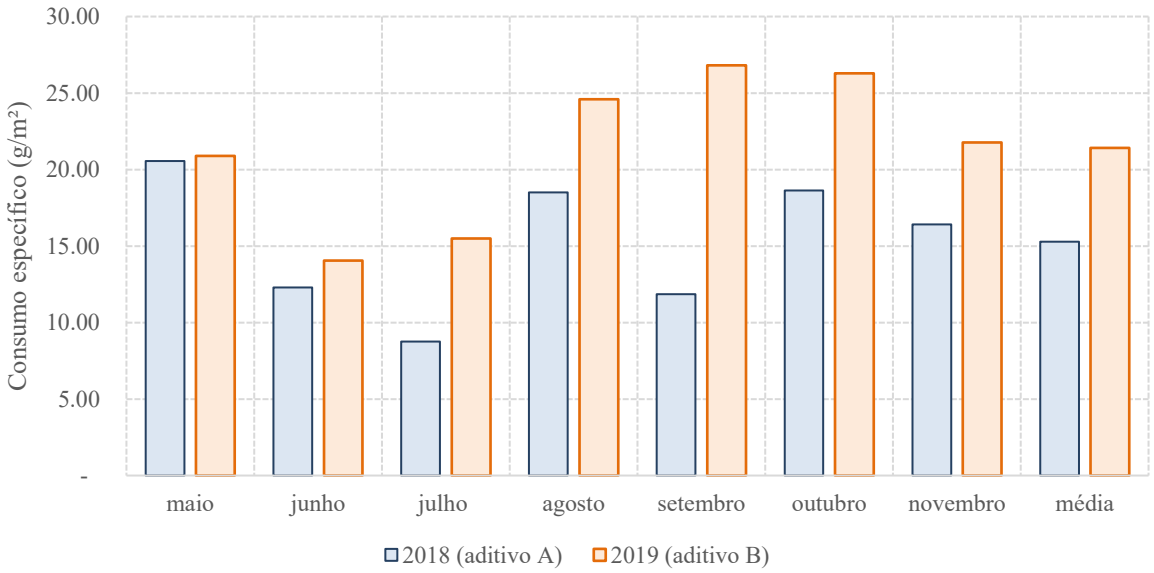
A partir da análise do gráfico 2, constata-se a redução no consumo de soda cáustica no ano de 2019 em relação ao ano anterior. Enquanto o consumo médio de soda cáustica de 2018 se situou em torno de 365 g/m², o consumo no ano de 2019 foi de aproximadamente 274 g/m², uma redução aproximada de 25% do consumo. Alguns fatores, como o aumento da fluidez por conta da adição do aditivo B no banho e a possibilidade de completar o nível com a lavagem estática, contribuíram para que fossem obtidos esses resultados. Anteriormente havia grande formação de resíduo no tanque da lavagem estática (tanque que

sucede a etapa de fosqueamento alcalino), impossibilitando que fosse utilizado para completar os tanques de fosqueamento alcalino. Como parte da solução é perdida por arraste, o uso da lavagem estática faz com que não sejam necessárias dosagens para manter a concentração dentro dos limites de controle.

4.1.2 Consumo específico dos aditivos A e B

Já a partir dos dados referente a produção e o consumo dos aditivos A e B, foi possível realizar o cálculo do consumo específico de ambos, sendo representados no gráfico 3.

Gráfico 3 – Comparativo dos consumos específicos dos aditivos A e B



Fonte: do Autor, 2020.

O consumo específico médio do aditivo A no ano de 2018 foi de 15,29 g/m², já o aditivo B apresentou um consumo específico médio de 21,41 g/m², representado um acréscimo no consumo específico de aproximadamente 40%.

4.2 CUSTO DE PROCESSAMENTO

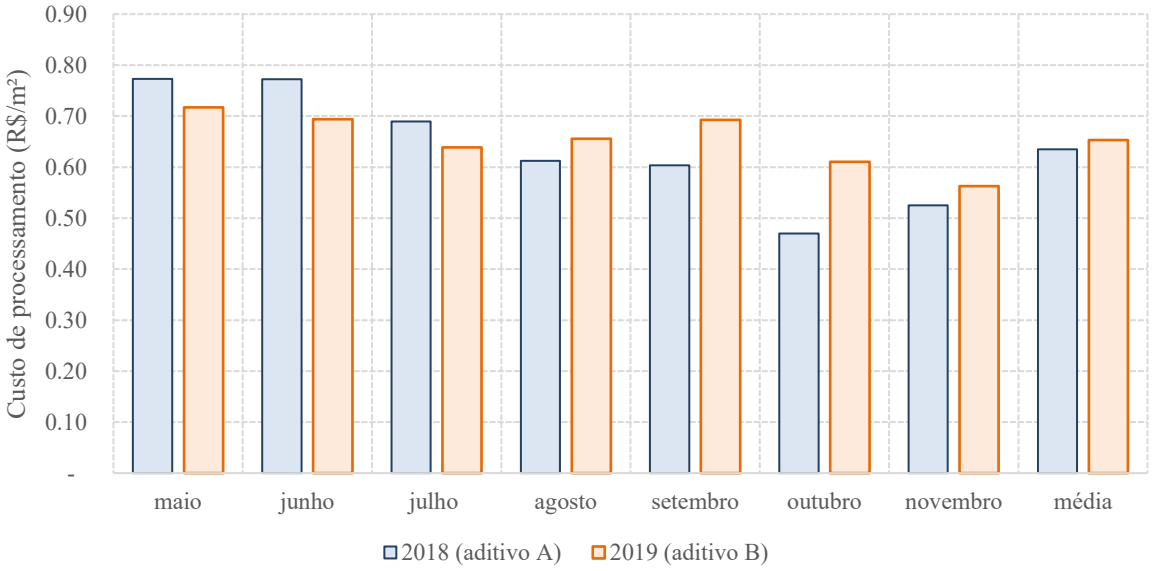
A partir dos dados de consumo específico obtidos na seção anterior, é possível encontrar qual dos aditivos obtém um menor custo de processamento, considerando somente os produtos químicos usados na etapa de fosqueamento alcalino. Entretanto, como o preço da soda cáustica é altamente volátil, para que seja possível realizar um comparativo, os dados referentes ao ano de 2018 devem ser equiparados. Sendo assim, o custo do ano de 2018 representa de forma teórica o que seria gasto no ano de 2019, se não fosse realizada a troca

do aditivo A pelo aditivo B; já o custo de processamento com o aditivo B representa o custo real.

4.2.1 Comparativo dos custos de processamento com os aditivos A e B

O gráfico 4 representa o comparativo dos custos de processamento com o uso dos aditivos A e B.

Gráfico 4 – Comparativo de custo de processamento com os aditivos A e B



Fonte: do Autor, 2020.

O gráfico evidencia que optar pela substituição do aditivo, fez com o que houvesse uma elevação no custo de processamento do material em aproximadamente 3%. Conclui-se então, que, mesmo com uma redução aproximada de 25% no consumo de soda cáustica, um consumo mais elevado do aditivo da empresa B tem um impacto decisivo no resultado deste indicador. Resultado diretamente relacionado com o seu preço de compra, que é muito superior ao aditivo fornecido pelo concorrente. Entretanto, em situações inesperadas onde haja um aumento no preço da soda cáustica, favorecerá o uso do aditivo B. Existe ainda, a possibilidade de negociação do preço do aditivo com a empresa B, podendo reduzir de forma significativa os custos quando se fala da etapa de fosqueamento alcalino.

Assim, considerando a elevação do custo de processamento do material, estima-se que a empresa teve um prejuízo estimado em R$ 6.877,80.

4.3 RESÍDUO

Até a realização do estudo, a empresa não contava com nenhum tipo de controle sobre a quantidade de resíduo gerado na etapa de fosqueamento alcalino, bem como do lodo resultante do tratamento do efluente do processo. O único histórico que se tinha disponível era da quantidade de lodo que era destinado para aterro sanitário. A partir do mês de maio do ano de 2019, passou-se a controlar diariamente a geração de resíduo na ETE, permitindo verificar a relação entre quantidade gerada e produtividade da linha.

O resíduo gerado é armazenado em sacos big-bag e disposto em um local isolado. O apêndice M apresenta a disposição dos resíduos na empresa.

Embora não tenha sido possível comparar numericamente a diferença na geração de resíduo na etapa de fosqueamento alcalino devido à falta de informações, pode-se afirmar que houve uma redução na quantidade de resíduo formado. Anteriormente, a empresa realizava paradas mensais para que fossem realizadas limpezas em um dos dois tanques de processo, após a substituição do aditivo, as paradas passaram a ser realizadas semestralmente. Desta forma, reduziu-se o número de paradas para limpeza de 12 para 4 paradas por ano.

4.4 CONTROLE ESTATÍSTICO DE PROCESSO

Para que fosse possível realizar o estudo do controle estatístico do processo, fez-se necessário confirmar se os dados em estudo apresentavam uma distribuição normal. Assim, foram plotados os gráficos de normalidade apresentados nos Apêndices A, B, C, D, E e F. Como apresentado, todos os dados apresentam um Valor-P superiores a 0,005, possibilitando prosseguir com as análises estatísticas.

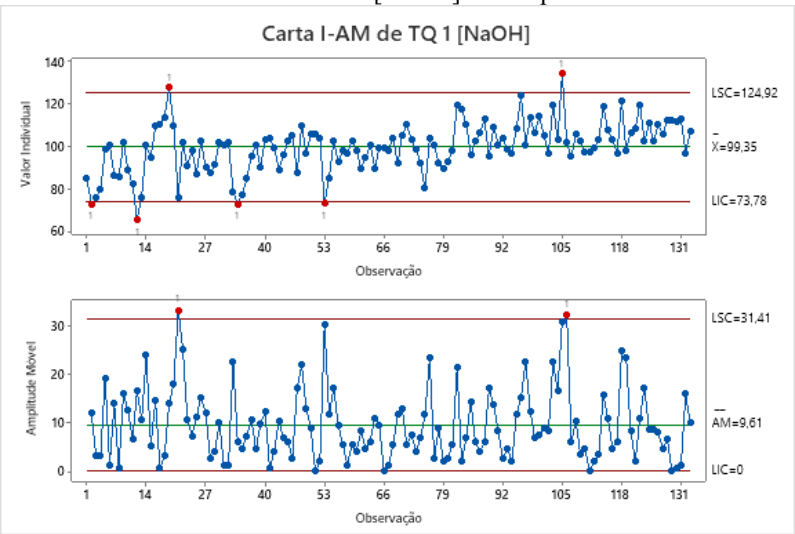
4.4.1 Cartas de controle

A linha onde o presente trabalho foi realizado conta com dois tanques de fosqueamento alcalino, assim, serão plotadas 2 cartas para cada uma das variáveis analisadas. Entretanto, optou-se por apresentar somente uma carta de controle na seção de resultados. As demais serão apresentadas nos Apêndices G, H, I, J, K e L.

4.4.1.1 Soda cáustica com o aditivo A

O gráfico 5 se refere à carta de controle elaborada para a concentração de soda cáustica no tanque 1, quando aditivada pelo produto fornecido pela empresa A.

Gráfico 5 – Carta de controle da [NaOH] no tanque 1 com o aditivo A



Fonte: do Autor, 2020.

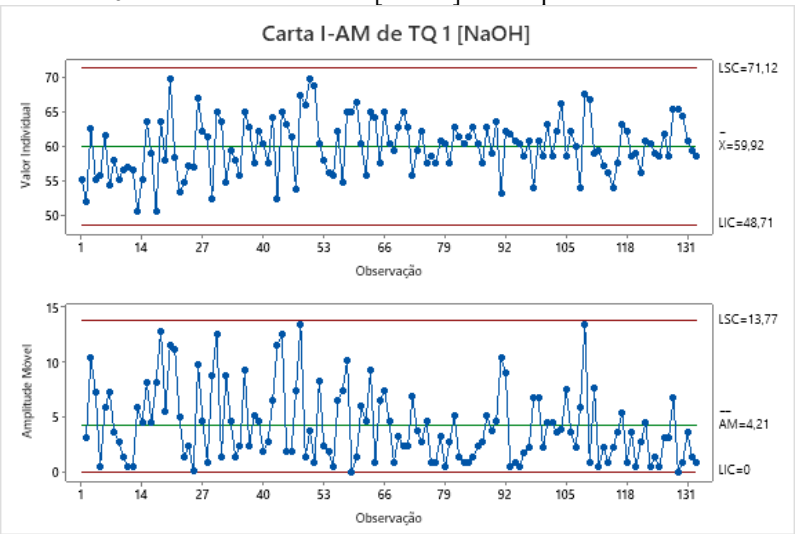
A presença de pontos fora dos limites de controle, tanto na carta de valores individuais como na carta da amplitude móvel, evidencia que o processo não se encontrava sob controle estatístico.

A partir da análise gráfica da carta de controle de valores individuais, é possível inferir que o processo, sofreu um deslocamento do LIC para o LSC, o que, de acordo com o time de engenharia de processo, é facilmente explicado. Alguns defeitos de etapas anteriores como os oriundos do processo de extrusão são facilmente resolvidos com uma maior concentração de soda cáustica. Entretanto, pontos fora dos limites de controle podem trazer como consequência a presença de produtos não conformes. Manchas por incrustação de soda cáustica, devido a uma concentração elevada, ou problemas como corrosão são algumas das situações que podem ser experimentadas. Já em baixa concentração, resultam em um acabamento superficial de baixa qualidade.

4.4.1.2 Soda cáustica com o aditivo B

Por sua vez, as cartas de controle de valores individuais e amplitude móvel representadas pelo gráfico 6, referem-se à concentração de soda cáustica quando aditivada com o produto fornecido pela empresa B.

Gráfico 6 – Carta de controle da [NaOH] no tanque 1 com o aditivo B



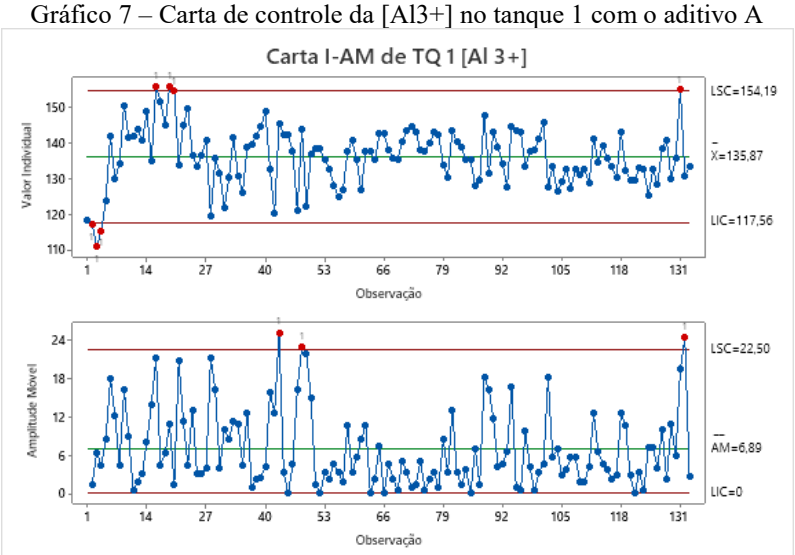
Fonte: do Autor, 2020.

Não foram evidenciados pontos fora dos limites de controle, atestando que com o produto da empresa B, o processo se encontra sob controle estatístico. A partir de uma análise visual comparativa entre os gráficos 5 e 6, é possível afirmar que houve uma redução na variação da concentração diária (carta de amplitude móvel), resultando em um acabamento superficial mais homogêneo.

4.4.1.3 Alumínio dissolvido com o aditivo A

O gráfico 7 apresenta as cartas de valores individuais e amplitude móvel obtidas.

Gráfico 7 – Carta de controle da [Al3+] no tanque 1 com o aditivo A



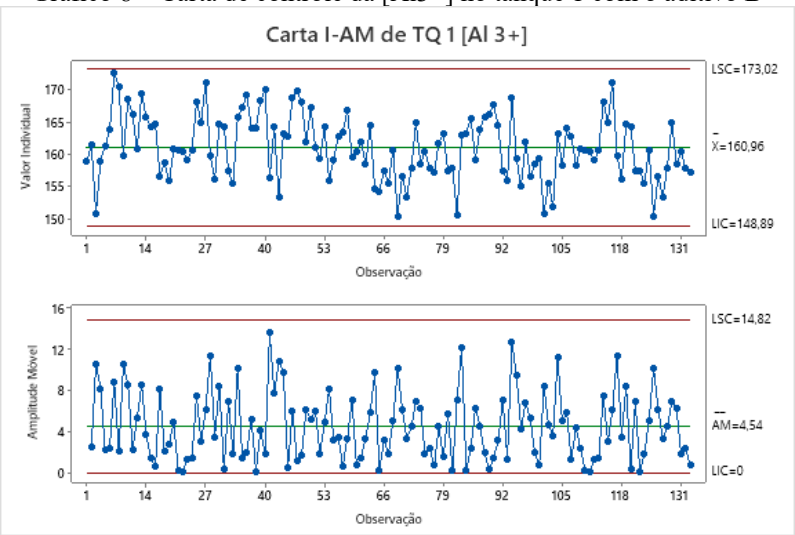
Fonte: do Autor, 2020.

Assim, como apresentado nas cartas de controle da concentração de soda cáustica com o aditivo A, a concentração de alumínio dissolvido também não se encontrava sob controle estatístico, representada pela presença de pontos acima e abaixo dos limites de controle.

4.4.1.4 Alumínio dissolvido com o aditivo B

Após a substituição do aditivo, como evidenciado com a concentração de soda cáustica, a concentração de alumínio dissolvido se encontra sob controle estatístico. O gráfico 8 apresenta as cartas de controles de valores individuais e de amplitude móvel.

Gráfico 8 – Carta de controle da [Al3+] no tanque 1 com o aditivo B



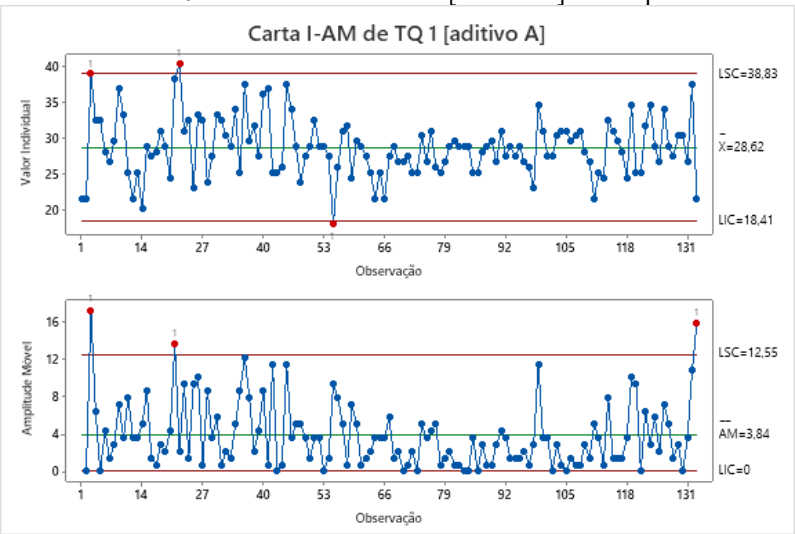
Fonte: do Autor, 2020.

Não foram evidenciados pontos acima ou abaixo dos limites de controle em nenhuma das cartas (valores individuais e amplitude móvel). Além da ausência de pontos fora dos limites de controle, nota-se uma redução na variação da concentração de alumínio dissolvido, o que confere um acabamento mais homogêneo aos perfis.

4.4.1.5 Aditivo A

O gráfico 9 apresenta as cartas de controle elaboradas para o aditivo A no tanque 1.

Gráfico 9 – Carta de controle da [aditivo A] no tanque 1



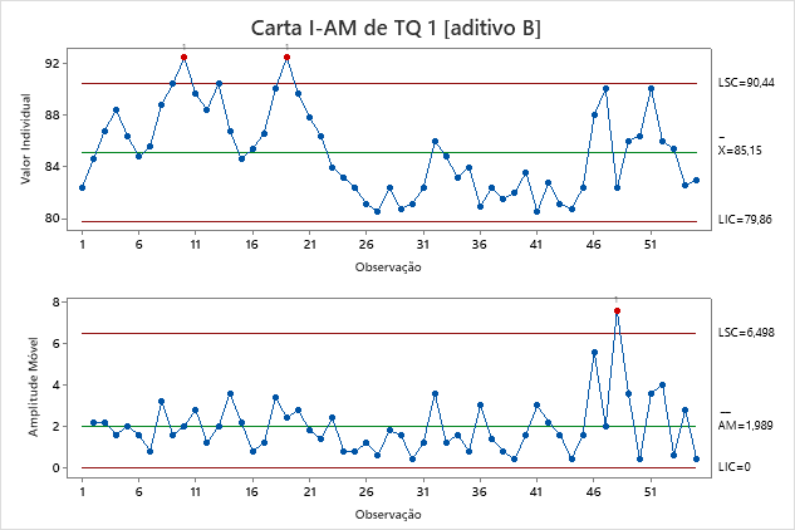
Fonte: do Autor, 2020.

Como identificado nas cartas de controle da concentração de soda cáustica e de alumínio dissolvido aditivados pelo produto da empresa A, a concentração do aditivo em questão não se encontra sob controle estatístico de processo, sendo identificados diversos pontos acima e abaixo dos limites de controle, tanto na carta de valores individuais, como nas cartas de amplitude móvel.

4.4.1.6 Aditivo B

O gráfico 10 se refere a carta de controle da concentração do aditivo B no tanque 1.

Gráfico 10 – Carta de controle da [aditivo B] no tanque 1



Fonte: do Autor, 2020.

Através da análise gráfica, constata-se a presença de pontos acima dos limites de controle nas cartas de valor individual e amplitude móvel, evidenciando que o processo em questão não se encontra sob controle estatístico.

Diferente das demais variáveis, as análises referentes a concentração de aditivo B não são realizadas diariamente. Assim, para elaboração das cartas de controle e, posteriormente as análises de capacidade, foram utilizados os resultados das análises laboratoriais obtidos até a realização do presente trabalho (uso de 55 dados). Como nos demais gráficos, foram avaliados se a distribuição dos dados era aparentemente normal, portanto, prosseguiu-se com as análises, mas orienta-se que sejam plotadas novas cartas de controle quando forem levantados os dados mínimos recomendados.

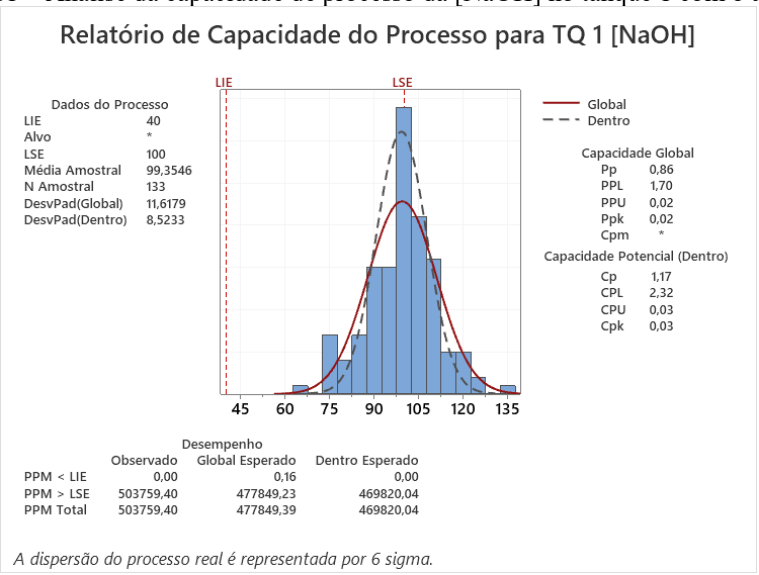
4.4.2 Análises de capacidade de processo

Assim, como feito com as cartas de controles, irão ser apresentadas somente uma das análises de capacidade na seção de resultados. As demais se encontram nos Apêndices M, N, O, P, Q e R.

4.4.2.1 Soda cáustica com o aditivo A

O gráfico 11 apresenta a distribuição dos dados e os índices de capacidade e de performance do processo.

Gráfico 11 – Análise da capacidade de processo da [NaOH] no tanque 1 com o aditivo A



Fonte: do Autor, 2020.

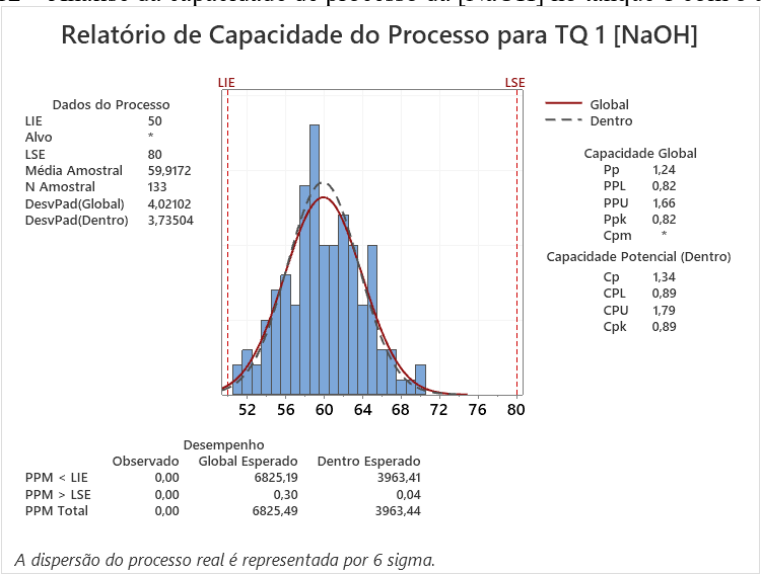
A partir da análise do histograma e dos índices de capacidade do processo (C_p e C_{pk}), denota-se que o processo em questão é considerado incapaz, ou seja, não consegue atender as especificações. Embora o valor de C_p seja superior a 1, o valor de C_{pk} indica que o processo está deslocado, com uma tendência de atingir o limite superior de especificação.

Os índices de *performance* (P_p e P_{pk}) também são inferiores a 1. Por representarem o que é experimentado pelo cliente ao longo do tempo (seja um cliente interno ou externo), infere-se que o processo não atendia plenamente os limites de especificação. Sendo definidos como as melhores condições operacionais, processos operantes acima ou abaixo dos limites de especificação, podem resultar na produção de itens não conformes. Desta forma, a presença de defeitos oriundos da etapa de fosqueamento alcalino podem estar diretamente ligados com índices de *performance* inferiores a 1.

4.4.2.2 Soda cáustica com o aditivo B

Já o gráfico de número 12 apresenta a distribuição dos dados, suas frequências, bem como os resultados das análises de capacidade da concentração de soda cáustica no tanque 1 quando aditivado pelo produto fornecido pela empresa B.

Gráfico 12 – Análise da capacidade de processo da [NaOH] no tanque 1 com o aditivo B



Fonte: do Autor, 2020.

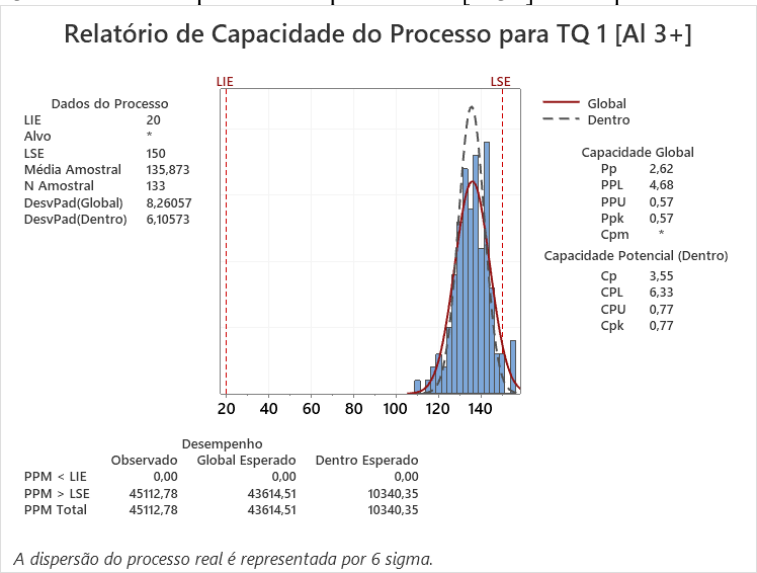
A partir da análise gráfica e dos índices de capacidade do processo, constata-se que a substituição do aditivo não tornou o processo em questão capaz. Mesmo que os índices C_p e P_p sejam superiores a 1, os índices C_{pk} e P_{pk} que levam em consideração o deslocamento em relação à média dos dados, constatam que o processo irá produzir itens fora da especificação.

Entretanto, nota-se uma melhora considerável, uma vez que, o valor de C_{pk} passou de 0,03 para 0,89. O mesmo aconteceu com o índice $P_{pk,}$ onde anteriormente, era igual a 0,02 e passou para 0,82.

4.4.2.3 Alumínio dissolvido com o aditivo A

O gráfico 13 apresenta o relatório de capacidade referente a concentração de alumínio dissolvido no tanque 1 com o aditivo da empresa A.

Gráfico 13 – Análise da capacidade de processo da [Al3+] no tanque 1 com o aditivo A



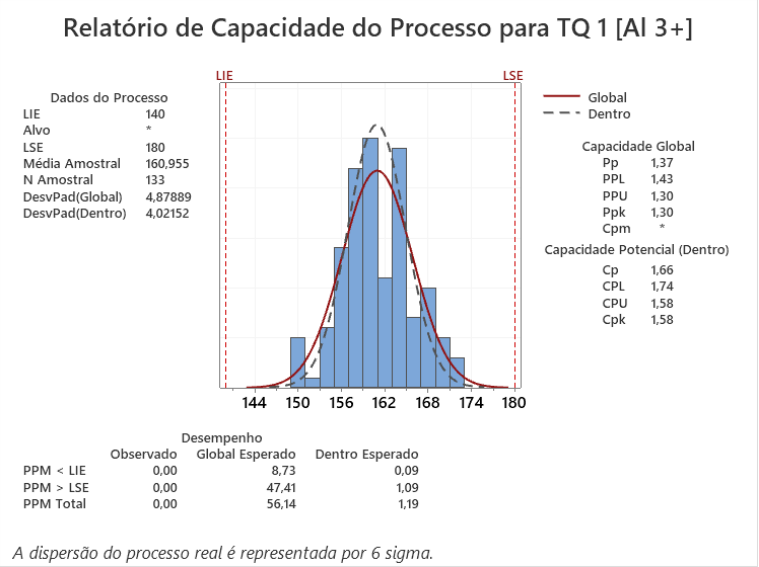
Fonte: do Autor, 2020.

Apesar de apresentar valores de C_p e P_p elevados, o processo se encontra descentralizado, apresentados diversos pontos acima do limite de especificação superior. Assim, infere-se que o processo é considerado incapaz de atender as especificações.

4.4.2.4 Alumínio dissolvido com o aditivo B

O gráfico 14 apresenta a análise de capacidade da concentração de alumínio dissolvido no tanque 1, aditivado pelo produto da empresa B.

Gráfico 14 – Análise da capacidade de processo da [Al3+] no tanque 1 com o aditivo B



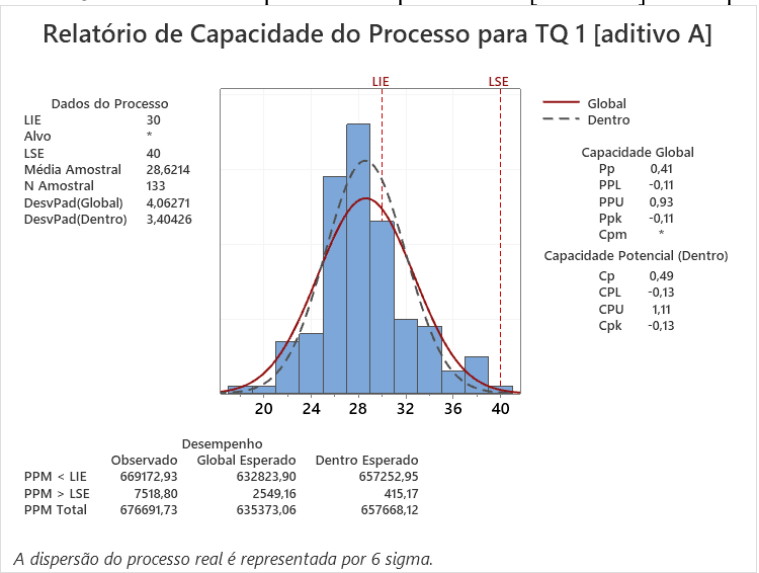
Fonte: do Autor, 2020.

O histograma apresentando os valores de concentração de alumínio dissolvido, denota que o processo está centralizado (ou muito próximo deste valor) nos limites de especificação. Os índices C_p, C_{pk}, P_p e P_{pk} são muito próximos e, todos acima de 1, denotando que o processo é potencialmente capaz.

4.4.2.5 Aditivo A

O gráfico 15 apresenta as análises de capacidade referente ao aditivo utilizado em 2018.

Gráfico 15 – Análise da capacidade de processo da [aditivo A] no tanque 1



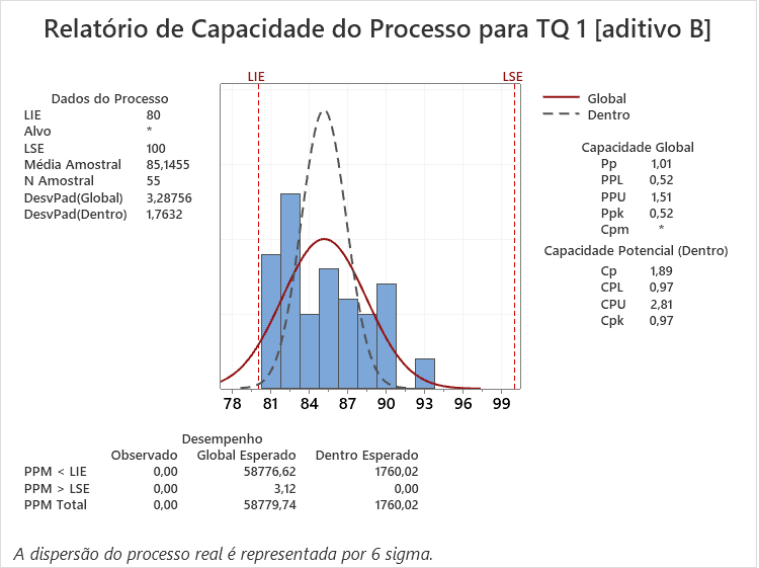
Fonte: do Autor, 2020.

A partir da avaliação do histograma e dos índices de capacidade do processo, evidencia-se que a concentração de aditivo A operava constantemente fora dos limites de especificação. Os resultados de C_p e P_p são menores do que 1 e, para C_{pk} e P_{pk}, os valores são negativos, isso ocorre quando a média do processo ou maior parte dos dados está fora dos limites de especificação. Das variáveis analisadas, foi a que se mostrou mais incapaz de atender as especificações. Acredita-se que a elevada geração de resíduo nos tanques de processo está relacionada diretamente a baixa concentração de aditivo.

4.4.2.6 Aditivo B

O gráfico 16 apresenta as análises de capacidade referente a concentração do aditivo da empresa B. Por meio da análise do histograma, é possível identificar que o processo está operando muito próximo ao limite inferior de especificação.

Gráfico 16 – Análise da capacidade de processo da [aditivo A] no tanque



Fonte: do Autor, 2020.

Os índices de C_p e P_p apresentados acima embora superiores a 1, não garantem o atendimento as especificações, uma vez que, os índices C_{pk} e P_{pk} são abaixo desse valor. Porém, ressalta-se que houve uma melhora em relação a sua capacidade. Comparando os gráficos 15 e 16, os índices C_{pk} e P_{pk} saíram de valores negativos (média do processo fora das especificações) para valores positivos.

4.5 INDICADORES DE QUALIDADE INTERNO: REPROCESSO

Assim como ocorrem com as demais etapas do processo, após o fosqueamento alcalino, o metal pode apresentar alguns defeitos provenientes da referida etapa. Assim, foram elencados os dois defeitos mais comuns na etapa de fosqueamento, sendo apresentados na tabela 6.

Tabela 6 – Defeitos ocasionados no fosqueamento alcalino

Ano	Defeito	Peso (kg)	% do índice de reprocesso
2018	Corrosão por soda	699,04	0,345
2018	Mancha de soda	6.113,91	3,013
2019	Corrosão por soda	17,70	0,009
2019	Mancha de soda	5.461,76	2,780

Fonte: do Autor, 2020.

A partir da tabela supracitada, nota-se que houve uma redução nos defeitos relacionados a etapa de fosqueamento, redução ligada diretamente a substituição do aditivo. Por aumentar a fluidez e apresentar menor reatividade,

É importante frisar que além de não haver nenhuma garantia de sucesso após o reprocesso quanto à qualidade, o custo e o tempo do material reprocessado representam o dobro, impactando negativamente em termos de custo e de produtividade da linha. Desta forma, por meio dos dados referentes aos índices de reprocesso, foi estimado o impacto em termos financeiros, representando um ganho de, aproximadamente, R$ 7.867,59.

4.6 PERDA DE METAL

A prática de mensurar a perda de massa no processo por corrosão é constante, uma vez que tem um impacto decisivo nos resultados financeiros do setor. Desta forma, foi elaborado um cronograma de análises para que fossem realizados testes mensais, possibilitando identificar com qual dos dois aditivos se obtém um menor valor de perda de massa. Sendo os resultados apresentados na tabela 7.

Tabela 7 – Percentual médio de perda de massa com os aditivos A e B

Aditivo	Perda de massa (%)
A	2,20
B	1,28

Fonte: do Autor, 2020.

Infere-se baseado nos resultados apresentados na tabela 7, que o aditivo fornecido pela empresa B apresenta ao final do processo, um valor menor de perda de massa por corrosão.

Por meio dos resultados apresentados na tabela supracitada, do preço da matéria-prima, bem como nos custos envolvidos na transformação do material e na produtividade da linha no ano de 2019, torna-se possível estimar o impacto de uma menor ou maior perda de massa por corrosão. Sendo apresentado os resultados na tabela 8.

Tabela 8 – Impacto da perda de massa em termos financeiros

Aditivo	**Perda (R$)**
A	668.418,55
B	399.370,79
Ganho	**287.047,76**

Fonte: do Autor, 2020.

Assim, afirma-se sobre a importância e a necessidade de avaliar a perda de massa por corrosão. Considerando o percentual de perda de massa média, tem-se um ganho estimado de R$ 287.047,76.

4.7 PRODUTIVIDADE

Embora a substituição do aditivo não tenha impactado no processo quanto ao tempo de fosqueamento, houve o aumento em termos de produtividade por conta de uma menor necessidade de paradas na linha para que fossem realizadas limpezas.

Como mencionado anteriormente, a empresa reduziu de 12 para 4 paradas por ano, representando um possível aumento de produtividade da linha.

Por meio da redução de 8 dias, estimou-se o impacto da substituição do produto A pelo produto B na capacidade da linha, apresentando um ganho de até 56 toneladas a mais por ano. Ressalta-se que o ganho com produtividade não é a garantia de que será produzido o valor acima referido, sendo uma representação do que a empresa poderia produzir a mais mediante a pedidos de clientes.

4.8 GANHOS FINANCEIROS

Uma vez avaliados os indicadores anteriores, se faz necessário, identificar se a referida troca impactou positivamente ou de forma negativa nos resultados financeiros do

setor. Assim, a partir dos custos relacionados ao consumo dos produtos químicos utilizados no fosqueamento, do indicador de qualidade (reprocesso) e do percentual médio de perda de massa, foi estimado um ganho de mais de 280 mil reais com a substituição do aditivo A pelo aditivo B.

5 CONCLUSÃO

A busca por novas tecnologias e por novos parceiros comerciais se torna cada vez mais imprescindível para o sucesso de uma instituição. Assim, encontrar alternativas para fornecimento de produtos químicos utilizado no processo de anodização é de extremo interesse da empresa onde presente trabalho foi realizado.

Dentre os benefícios observáveis perante a substituição do produto A pelo produto B, destaca-se a redução do consumo de soda cáustica. Os meses após a referida troca, apresentaram um consumo específico médio (g/m²) 25% menor se comparados com o ano anterior. Entretanto, para que a redução fosse experimentada, o consumo específico de aditivo teve um aumento de, aproximadamente, 40% em relação ao produto A. Esse aumento contribuiu para que houvesse uma elevação no custo de processamento, de 0,63 R$/m² para 0,65 R$/m², trazendo um prejuízo estimado em 6 mil reais no ano.

Aliado aos benefícios supracitados, encontram-se ainda a redução na quantidade de resíduo formado e por consequência, houve a redução de paradas para limpeza dos tanques de processo. Um menor número de paradas para limpeza impactou na produtividade da linha, possibilitando a produção de, até, 56 toneladas a mais por ano.

O estudo do controle estatístico do processo constatou-se que o processo não se encontrava sob controle estatístico, bem como era incapaz de atender os limites de especificação. Após a substituição, grande parte das variáveis se encontram sob controle, tornando o processo mais previsível e estável. Isso contribuiu para que houvesse uma diminuição na necessidade de retrabalhos, somando ao final um ganho estimado em 7 mil reais.

Por meio dos testes de metal, nota-se ainda uma redução da perda de massa por corrosão. Com a redução de perda de massa média de 2,20% para 1,28%, estima-se um ganho de aproximadamente 280 mil reais.

Embora o produto B não apresente somente resultados positivos, vide a elevação no custo de processamento, seu uso mostrou-se extremamente vantajoso em diversos aspectos, o que gerou interesse da empresa onde o estudo foi realizado pelo seu mantimento no processo. Assim, concluiu-se que a substituição do produto A pelo produto da empresa B é extremamente realizável, contribuindo para que os interesses da empresa sejam alcançados.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10004: **Resíduos Sólidos – Classificação**. Rio de Janeiro: 2004

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12609: **Tratamento de Superfícies do alumínio e suas ligas – anodização para fins arquitetônicos**. Rio de Janeiro: 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO. **Guia Técnico do alumínio: Tratamento de Superfície**. 2ªed. São Paulo: Associação Brasileira do Alumínio, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO. **Anuário estatístico Alumínio**. 1ªed. São Paulo: Associação Brasileira do Alumínio, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO. **Anuário estatístico Alumínio**. 1ªed. São Paulo: Associação Brasileira do Alumínio, 2018.

ÇAKIR, O. **Chemical etching of aluminium**. Deparment of Mechanical Engineering, Dicle University, 2008.

CHATTERJEE, B., THOMAS, R. W. DUNSTAN, G. R. **Factors Affecting the Matt Etching of Aluminium Alloys in Caustic Soda Solutions** (1997).

COTELL, C.M., SPRAGUE, J.A., SMIDT, F.A. **Surface Engineering of Aluminum and Aluminum Alloys.** ASM Handbook: Anodizing. Volume 5, p 482-493. Novelty: ASM International, 1994.

COTELL, C.M., SPRAGUE, J.A., SMIDT, F.A. **Surface Engineering of Aluminum and Aluminum Alloys.** ASM Handbook: Anodizing. Volume 5, p 784-804. Novelty: ASM International, 1994.

DAVIS, J. R. **ASM Speciality Handbook**: Aluminum and aluminium alloys. Novelty: ASM International, 1993.

EUROPEAN ALUMINIUM ASSOCIATION & EUROPEAN ANODISERS ASSOCIATION. **Diretivas para a Marca de Qualidade QUALANOD para Anodização do Alumínio Baseada em Ácido Sulfúrico**, 2017.

GAZAPO, J. L., GEA, J. **Anodizing of Aluminium**. INESPAL Laminación Alicante. European Aluminium Association. 1994.

GONÇALEZ, P. U.; WERNER, L. Comparação dos índices de capacidade do processo para distribuições não-normais, Rio Grande do Sul, mar./2009. Disponível em: https://www.scielo.br/pdf/gp/v16n1/v16n1a12.pdf. Acesso em: 31 maio 2020.

GROVES, G. **ANODIZING OF ALUMINIUM**. Ellesmere College. [20--?]

KALANTARY, M. R. **DEVELOPMENT OF COLD SEALING PROCESSES FOR ANODIZED ALUMINIUM**. 1990.

KAPE, J. M. **Chemical Etching of Aluminium in Caustic Soda Based Solutions**. Trans. Inst. Met. Finish. 1969.

KAPE, J. M. **Etching as a Pretreatment for Anodizing**. Trans. Inst. Met. Finish. 1971.

KAYA, I., KAHRAMAN, C. A new perspective on fuzzy process capability indices: Robustness. Expert Systems with Applications, 37, 4593-4600, 2010.

LU, J. WEI, G. YU, Y. GUO, C. JIANG, L. **Aluminum alloy AA2024 anodized from the mixed acid system with enhanced mechanical properties.** 2018.

MENEGHESSO, A. A. **Noções básicas sobre Processo de Anodização do Alumínio e suas ligas – Parte I**. 2006.

MENEGHESSO, A. A. **Noções básicas sobre Processo de Anodização do Alumínio e suas ligas – Parte II**. 2006.

MENEGHESSO, A. A. **Noções básicas sobre Processo de Anodização do Alumínio e suas ligas – Parte IV**. 2006.

MENEGHESSO, A. A. **Noções básicas sobre Processo de Anodização do Alumínio e suas ligas – Parte VI**. 2006.

MENEGHESSO, A. A. **Noções básicas sobre Processo de Anodização do Alumínio e suas ligas – Parte VII**. 2006.

MENEGHESSO, A. A. **Noções básicas sobre Processo de Anodização do Alumínio e suas ligas – Parte VIII**. 2006.

MINITAB, LLC. **Capacidade global para Análise de capacidade normal.** Disponível em: https://support.minitab.com/pt-br/minitab/18/help-and-how-to/quality-and-process-improvement/capability-analysis/how-to/capability-analysis/normal-capability-analysis/interpret-the-results/all-statistics-and-graphs/overall-capability/. Acesso em 27 maio 2020.

MONTGOMERY, D. C. Introdução ao controle estatístico da qualidade. 4ª edição. LTC, 2012 – NA INTERNET TÁ QUE É DE 2004, MAS MEU LIVRO TÁ 2012....

NEWMAN, L. **Etching of Aluminum and Its Alloys**. ASM Handbook, V. 2, Aluminum Science and Technology. 2018.

NILSSON, J. O. **Training: Anodizing Process** – pt.2. Finspång, 2018. OLIVEIRA, J. B. *et al*. ANÁLISE DA CAPACIDADE DE UM PROCESSO: UM ESTUDO DE CASO BASEADO NOS INDICADORES CP E CPK. Belo Horizonte, MG, out./2011. Disponível em: http://www.abepro.org.br/biblioteca/enegep2011_tn_sto_136_863_19320.pdf. Acesso em: 31 maio 2020.

PATEL, P.; PATEL T. **Sealing of the Anodized Aluminum Coating.** ASM Handbook, Volume 2A, Aluminum Science and Technology, 2018.

PEDROSO, Carmen Beatriz. Alumínio anodizado colorido: alguns aspectos fundamentais. 1987. 60 f. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Física Gleb Wataghin, Campinas, SP. Disponível em: http://www.repositorio.unicamp.br/handle/REPOSIP/278362. Acesso em: 31 de maio 2020

PEREIRA, S. V. **Avaliação de método de reutilização do resíduo do processo de anodização**. 2008.

RUNGE, J. M. **The Metallurgy of Anodizing Aluminum: Connecting Science to Practice**. Springer International Publishing. 2018.

SAHA, P. K. **Aluminum Extrusion Technology**. ASM International, 2000.

SARTOR, M. N. **Utilização do resíduo de anodização do alumínio como matéria-prima para o desenvolvimento de produtos cerâmicos**. Tese de mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis: 2006.

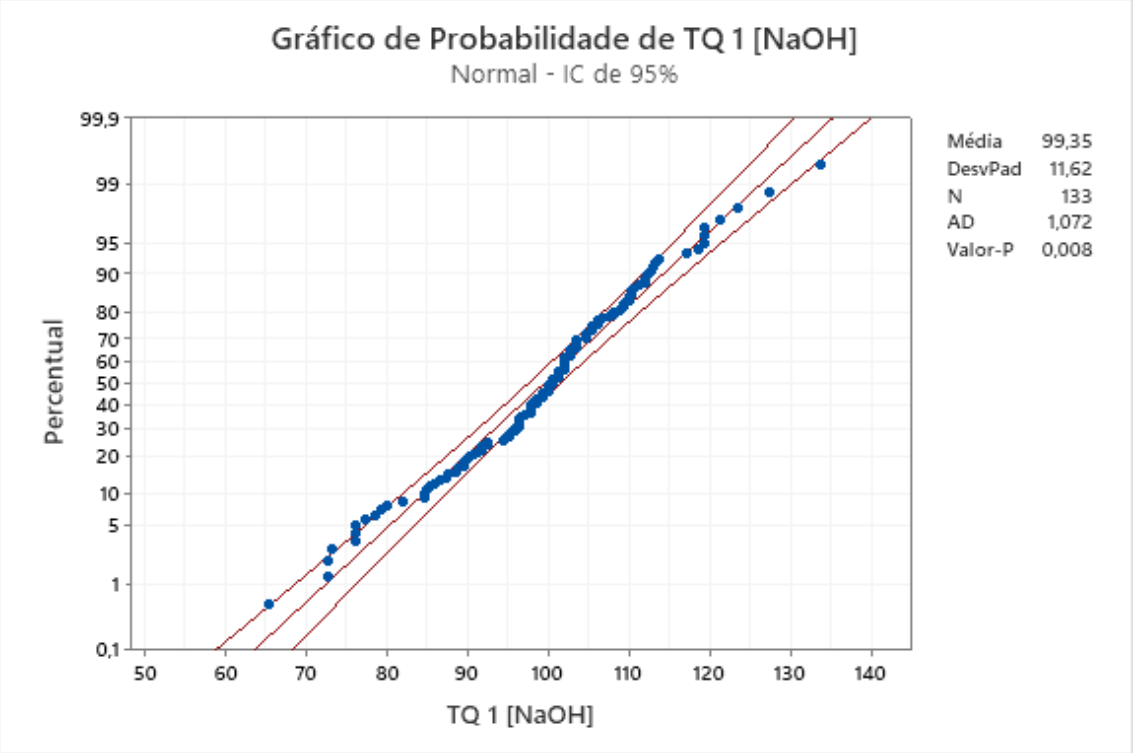
STEVENSON, M.F.J. Anodizing. In: Cotell, C.M., Sprague, J.A., Smidt, F.A.J. **Surface Engineering**. United States of America: ASM International Handbook Committee, 9a ed, v. 5, 1994.

UC RUSAL. **All about aluminium**. Disponível em: https://aluminiumleader.com/economics/world_market/. Acesso em 22 abr. 2020.

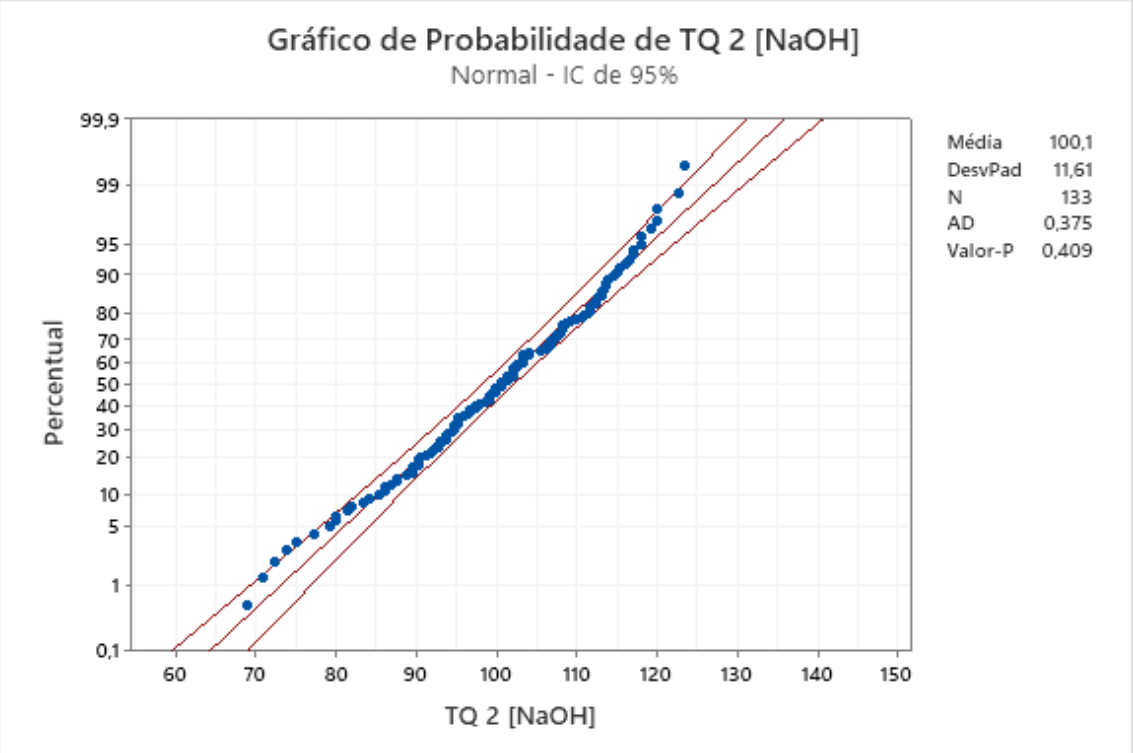
WIELAGE, B. et al., **Anodizing – A Key for Surface Treatment of Aluminium**, Key Engineering Materials, Vol. 384, pp. 263-281, 2008.

APÊNDICES

APÊNDICE A – GRÁFICOS DE PROBABILIDADE DOS TANQUES 1 E 2 DA CONCENTRAÇÃO DE SODA CÁUSTICA COM ADITIVO A

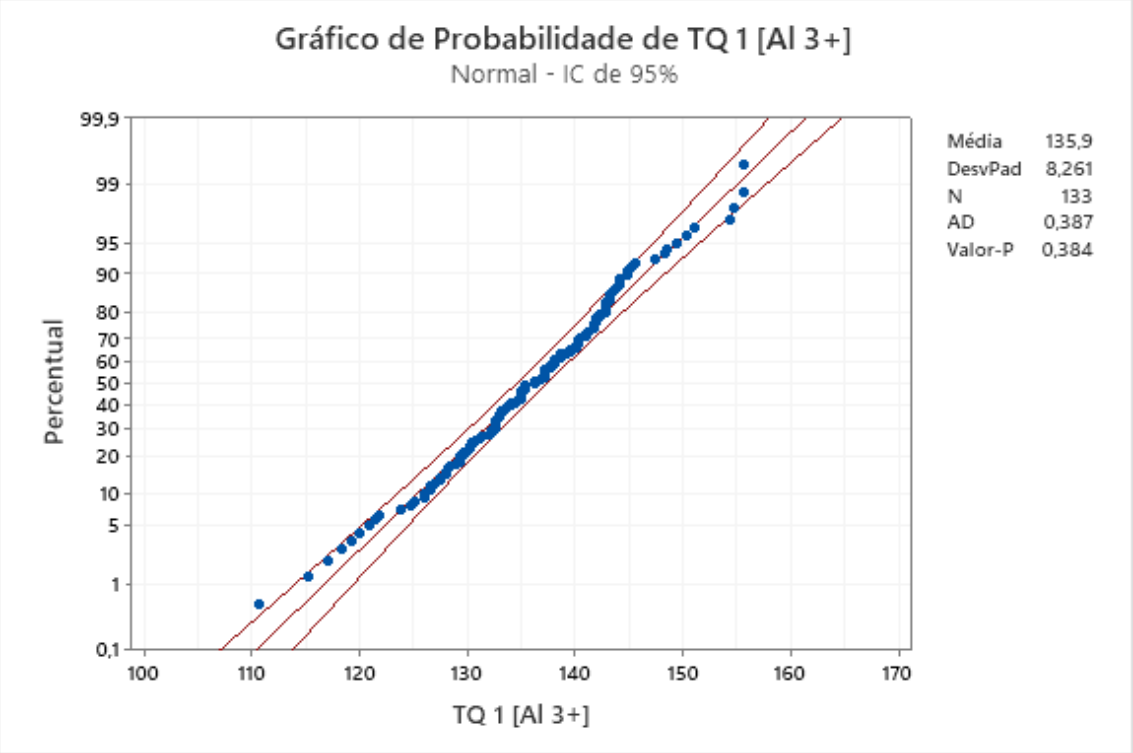


Fonte: do Autor, 2020.

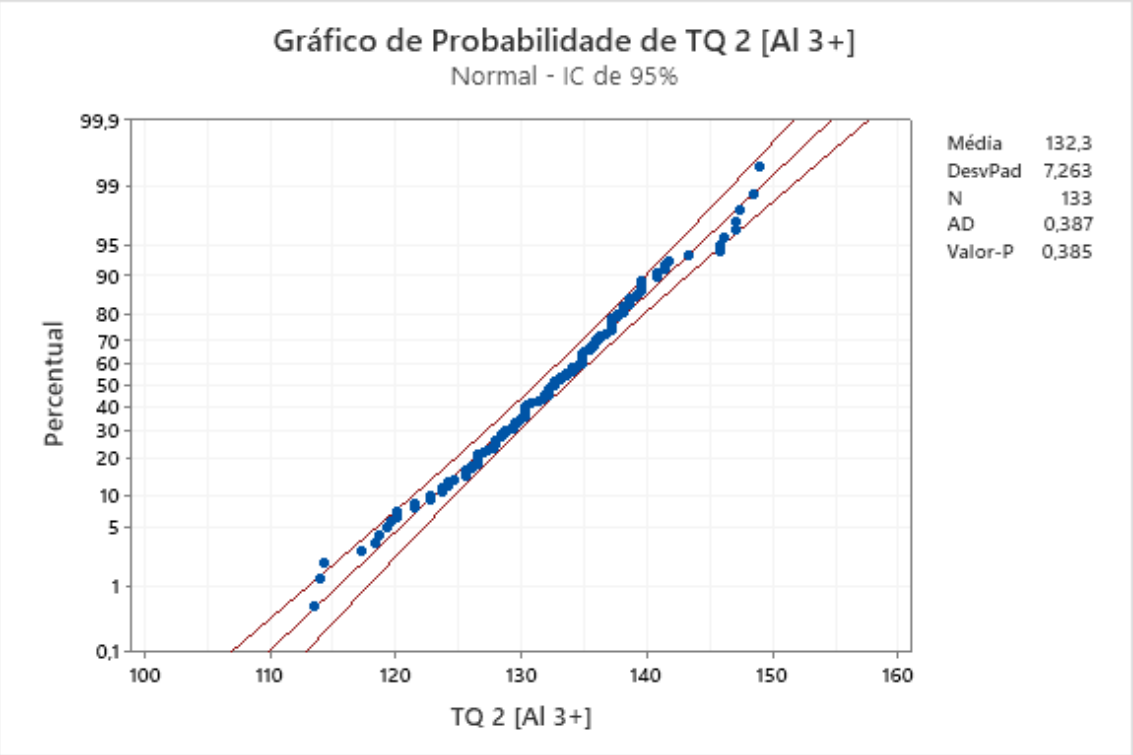


Fonte: do Autor, 2020.

APÊNDICE B – GRÁFICOS DE PROBABILIDADE DOS TANQUES 1 E 2 DA CONCENTRAÇÃO DE ALUMÍNIO DISSOLVIDO COM ADITIVO A

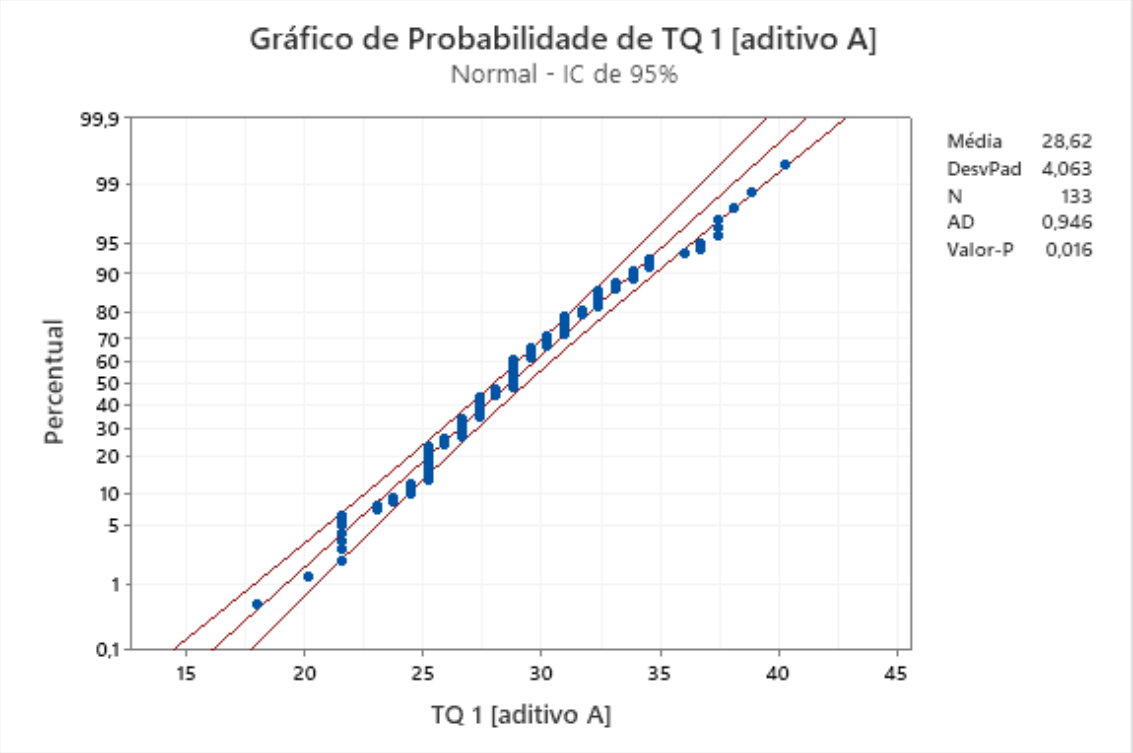


Fonte: do Autor, 2020.

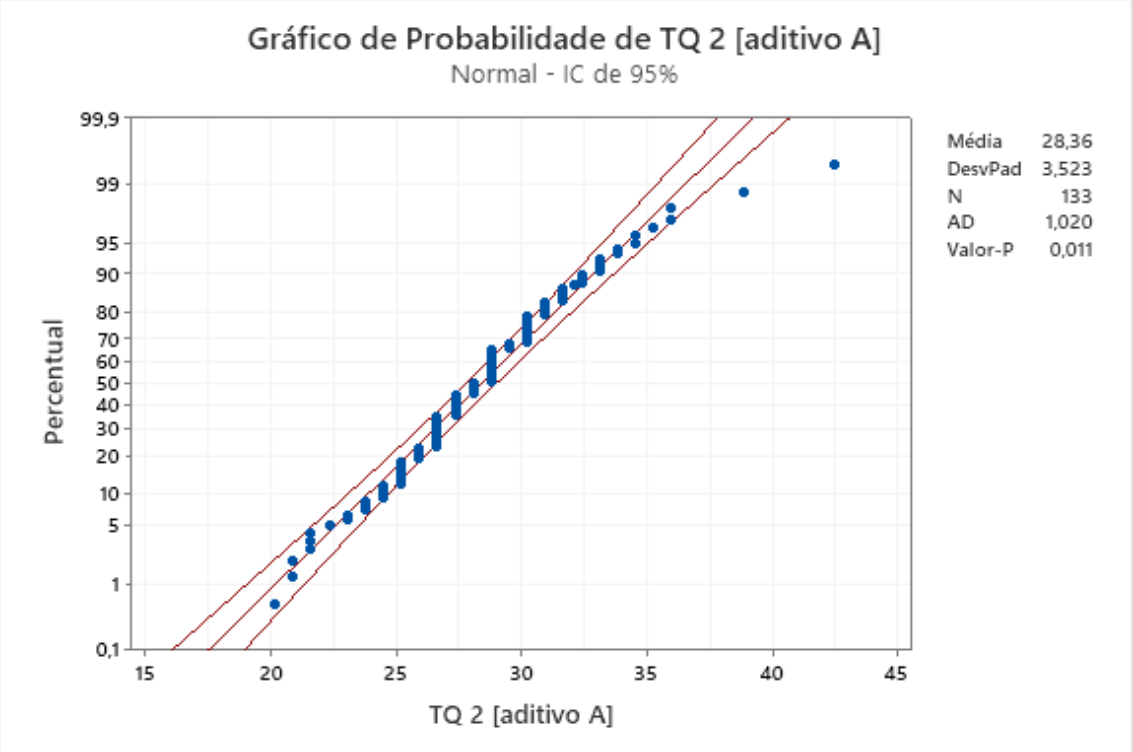


Fonte: do Autor, 2020.

APÊNDICE C – GRÁFICOS DE PROBABILIDADE DOS TANQUES 1 E 2 DA CONCENTRAÇÃO DO ADITIVO A

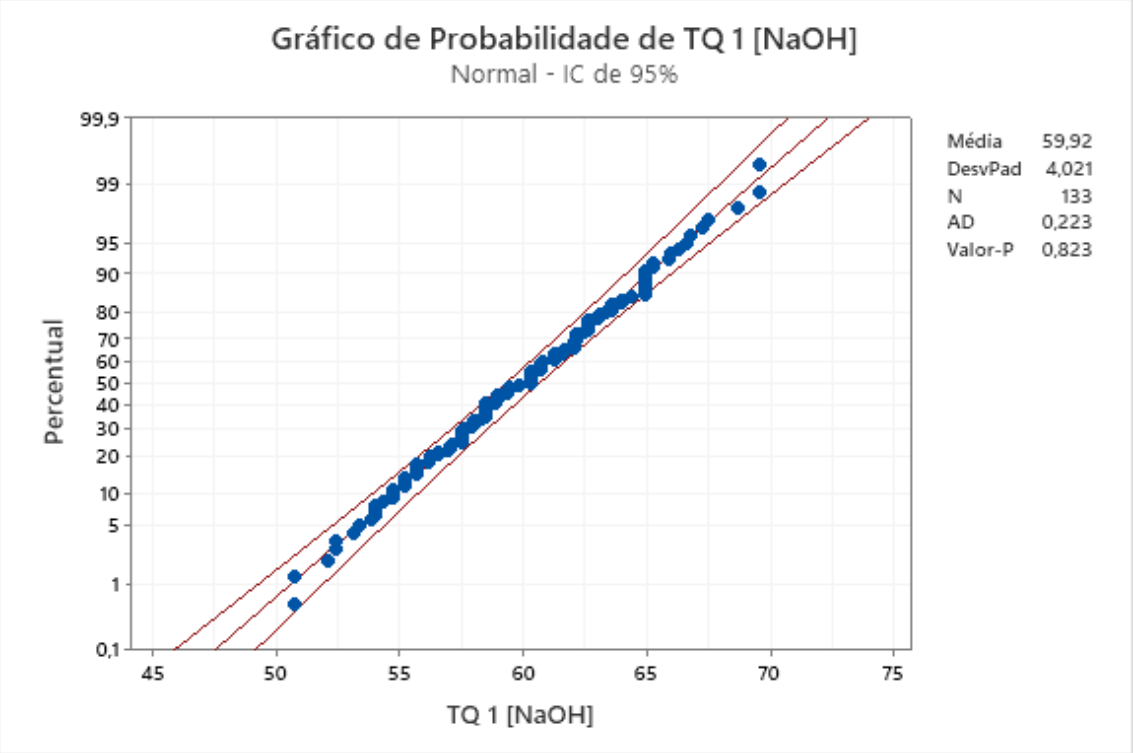


Fonte: do Autor, 2020.

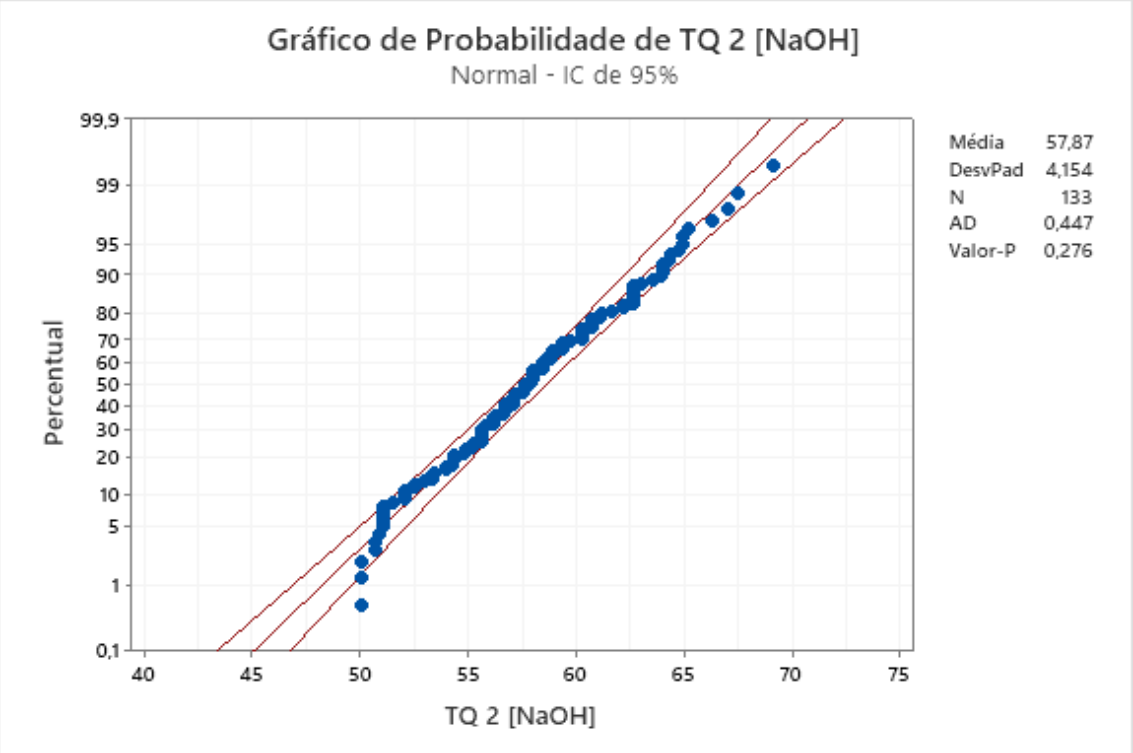


Fonte: do Autor, 2020.

APÊNDICE D – GRÁFICOS DE PROBABILIDADE DOS TANQUES 1 E 2 DA CONCENTRAÇÃO DE SODA CÁUSTICA COM ADITIVO B

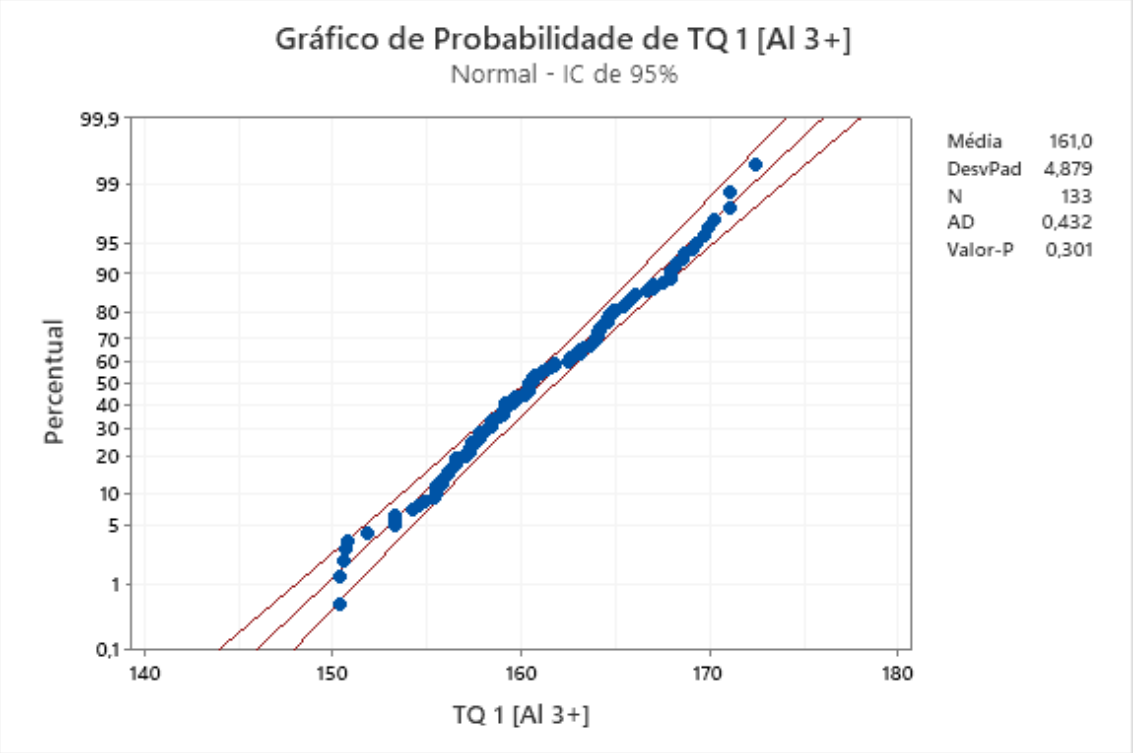


Fonte: do Autor, 2020.

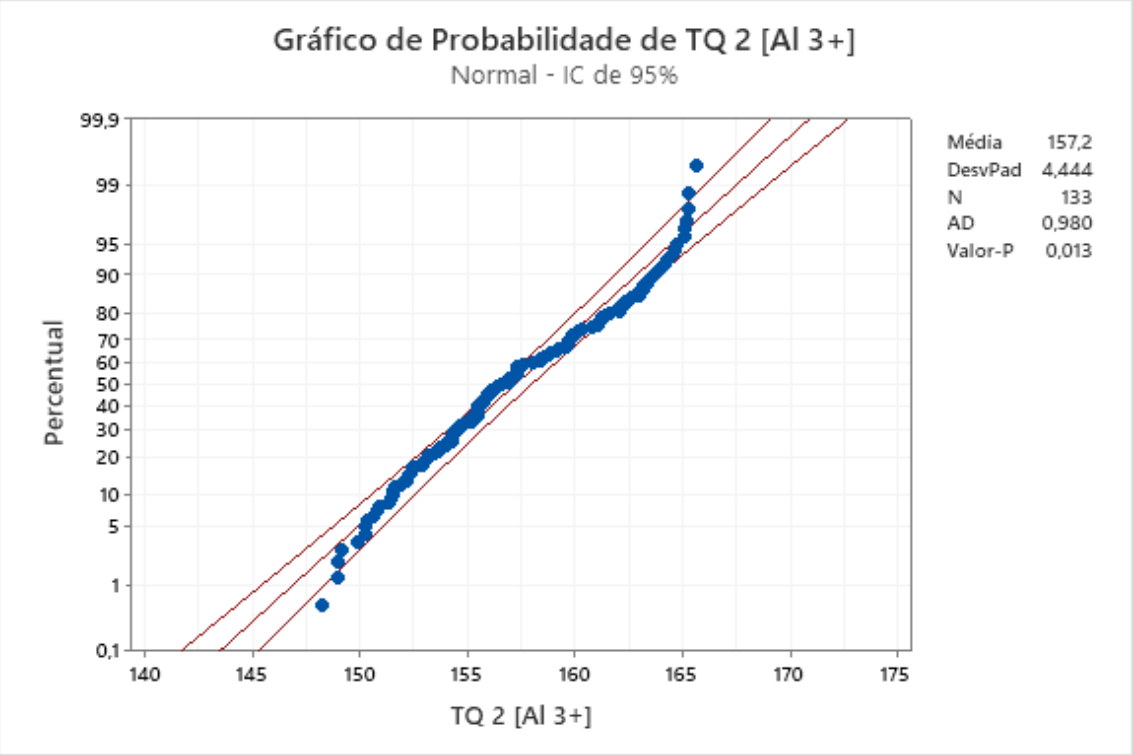


Fonte: do Autor, 2020.

APÊNDICE E – GRÁFICOS DE PROBABILIDADE DOS TANQUES 1 E 2 DA CONCENTRAÇÃO DE ALUMÍNIO DISSOLVIDO COM ADITIVO B

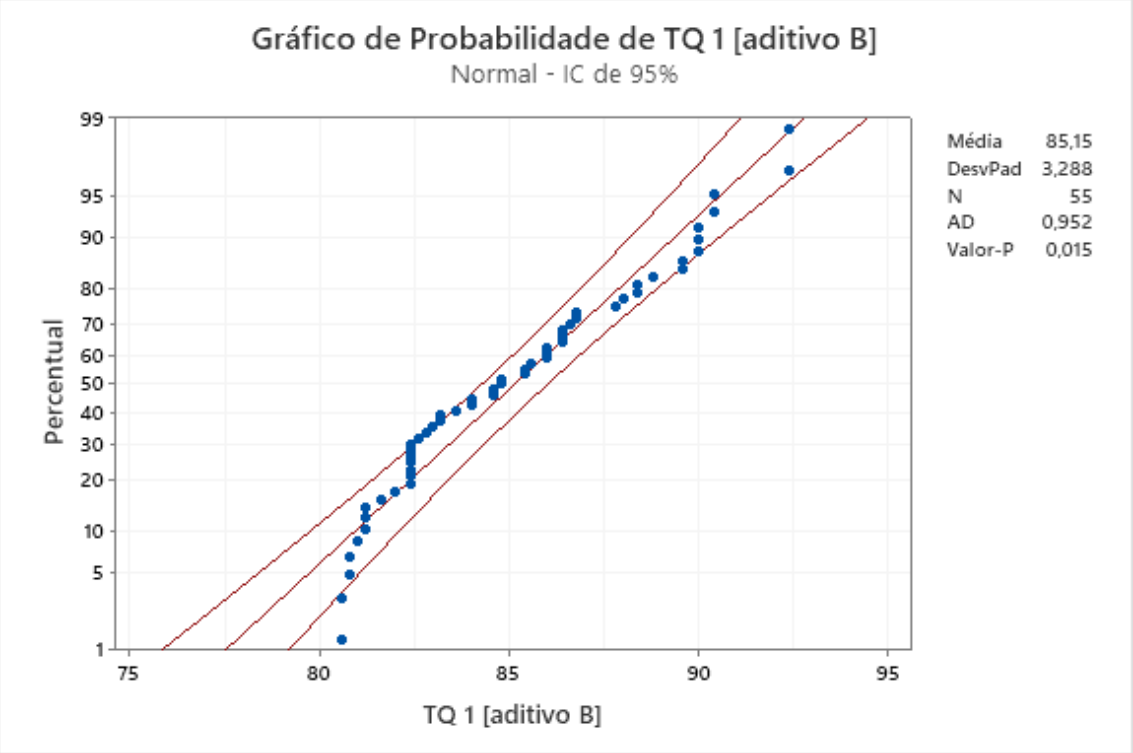


Fonte: do Autor, 2020.

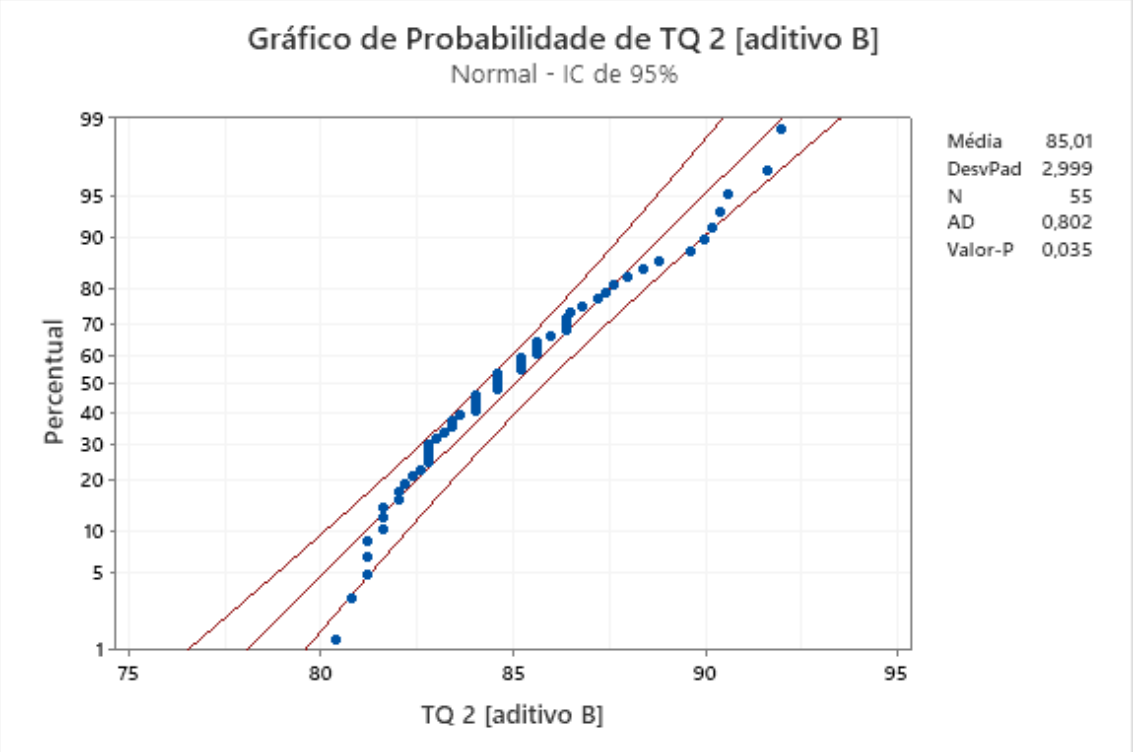


Fonte: do Autor, 2020.

APÊNDICE F – GRÁFICOS DE PROBABILIDADE DOS TANQUES 1 E 2 DA CONCENTRAÇÃO DO ADITIVO B

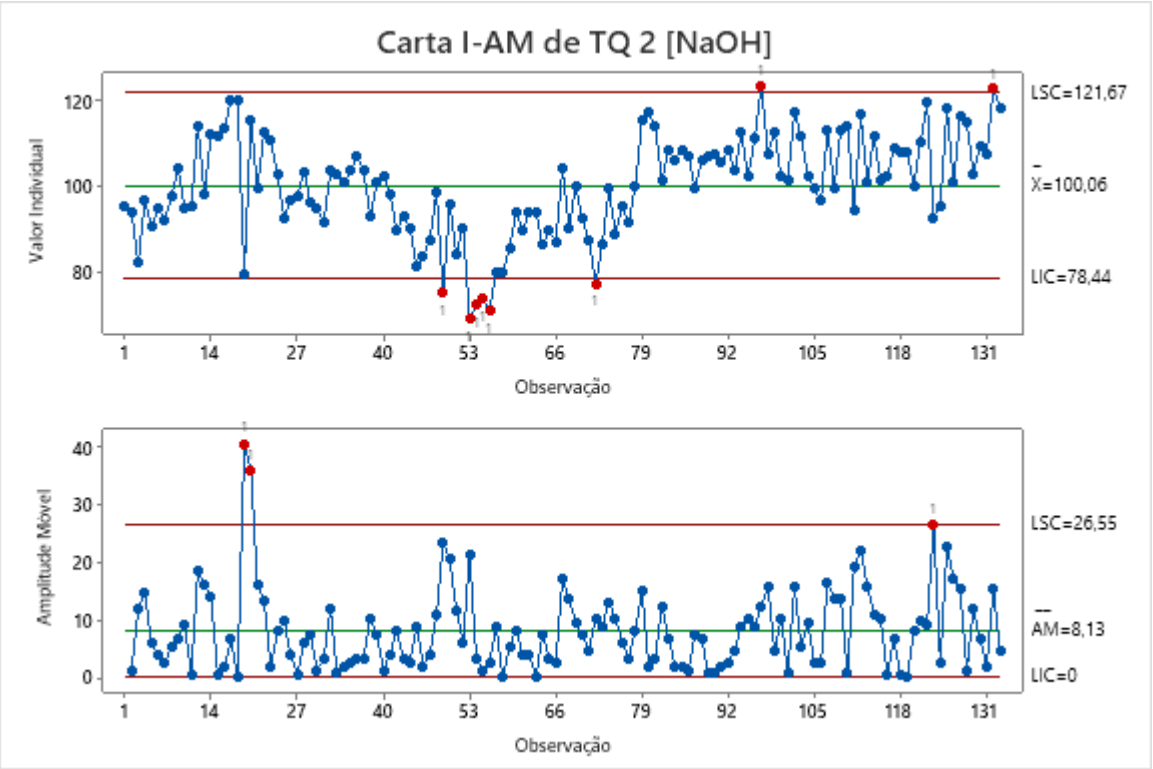


Fonte: do Autor, 2020.



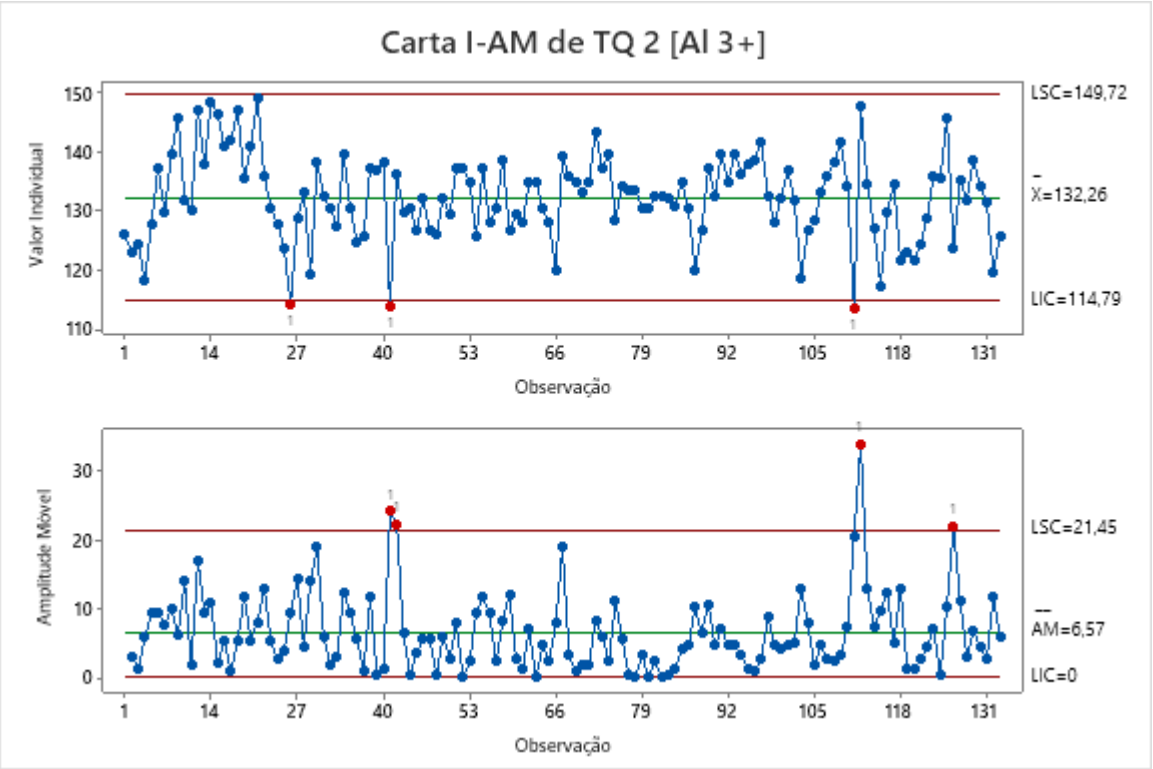
Fonte: do Autor, 2020.

APÊNDICE G – CARTA DE CONTROLE DA [NaOH] COM O ADITIVO A NO TANQUE 2



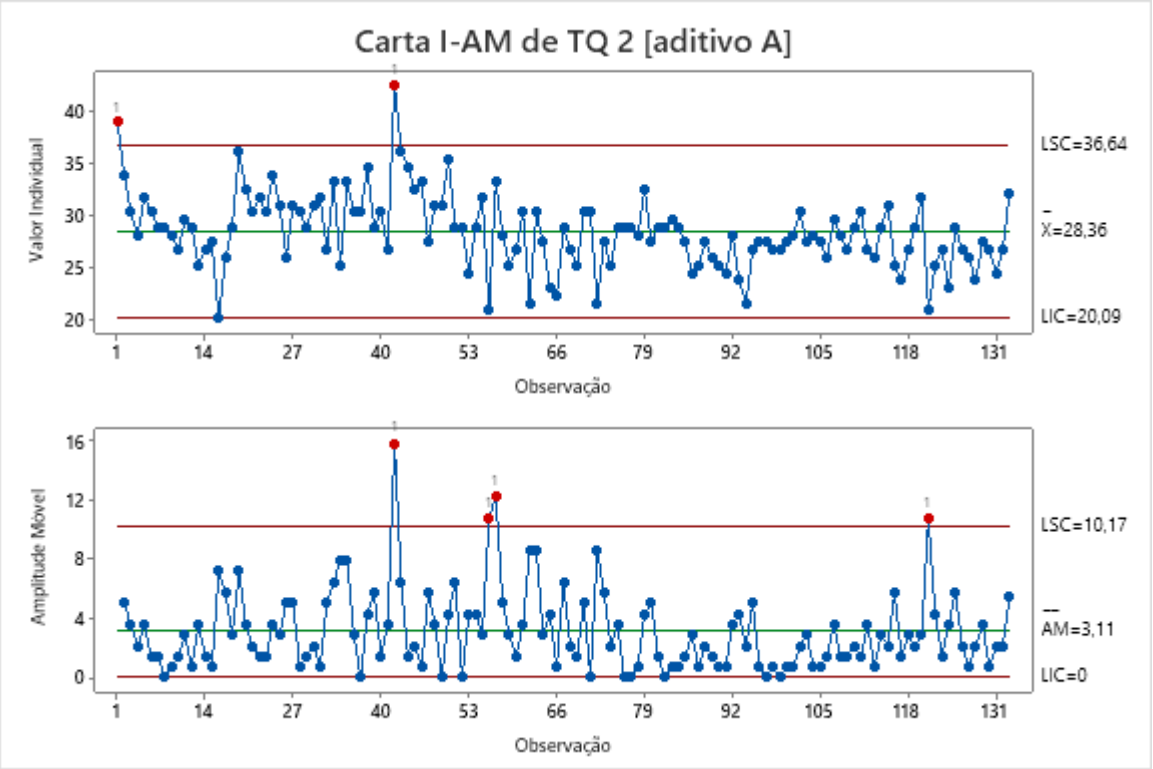
Fonte: do Autor, 2020.

APÊNDICE H – CARTA DE CONTROLE DE [Al^{3+}] COM O ADITIVO A NO TANQUE 2



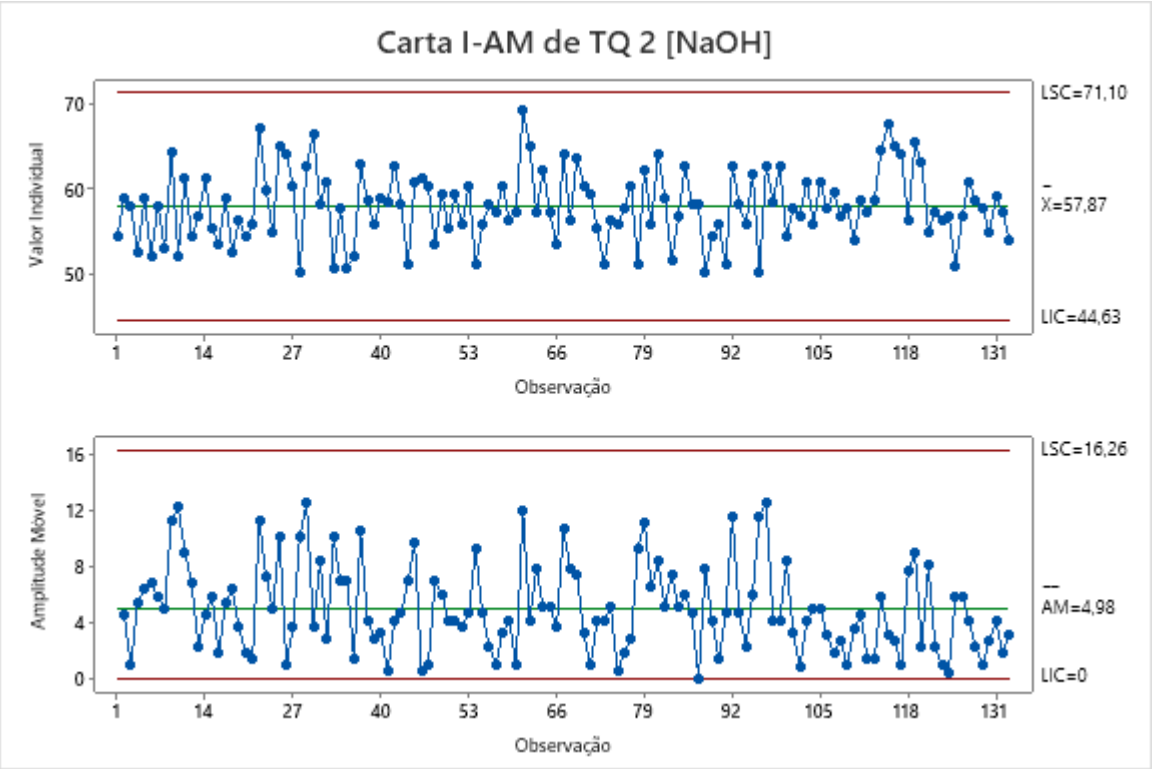
Fonte: do Autor, 2020.

APÊNDICE I – CARTA DE CONTROLE DA [aditivo A] NO TANQUE 2



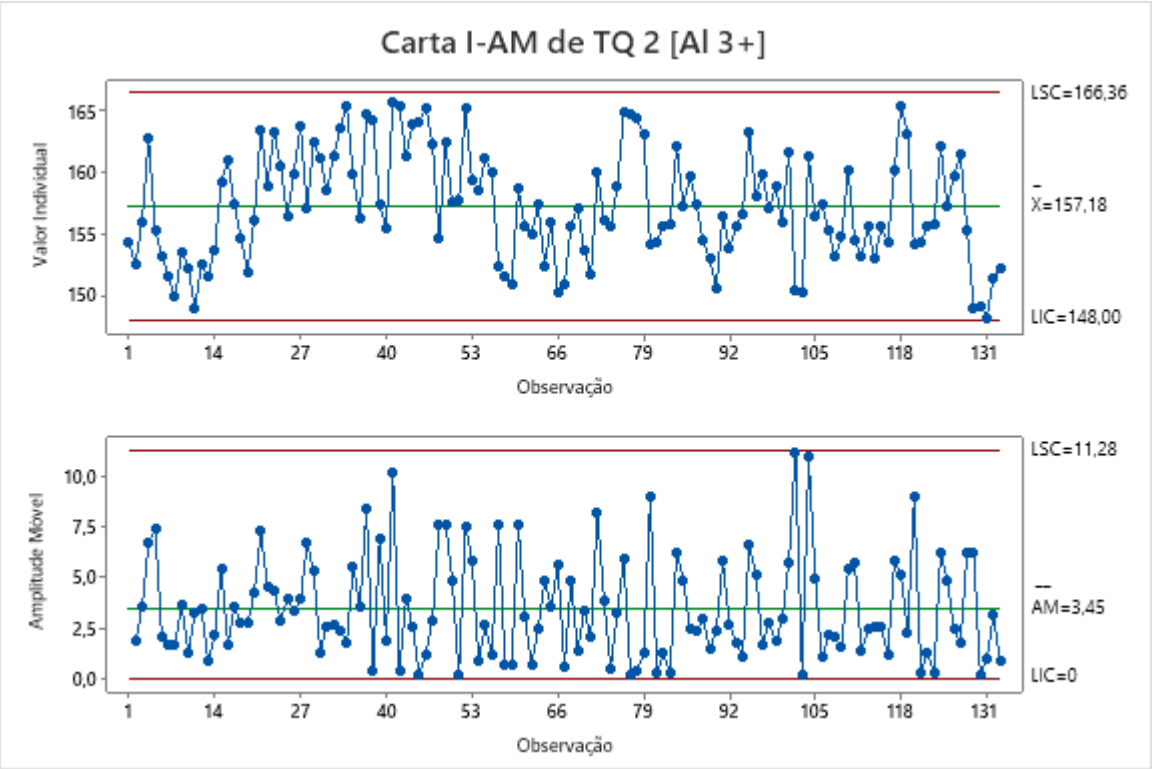
Fonte: do Autor, 2020.

APÊNDICE J – CARTA DE CONTROLE DA [NaOH] COM O ADITIVO B NO TANQUE 2



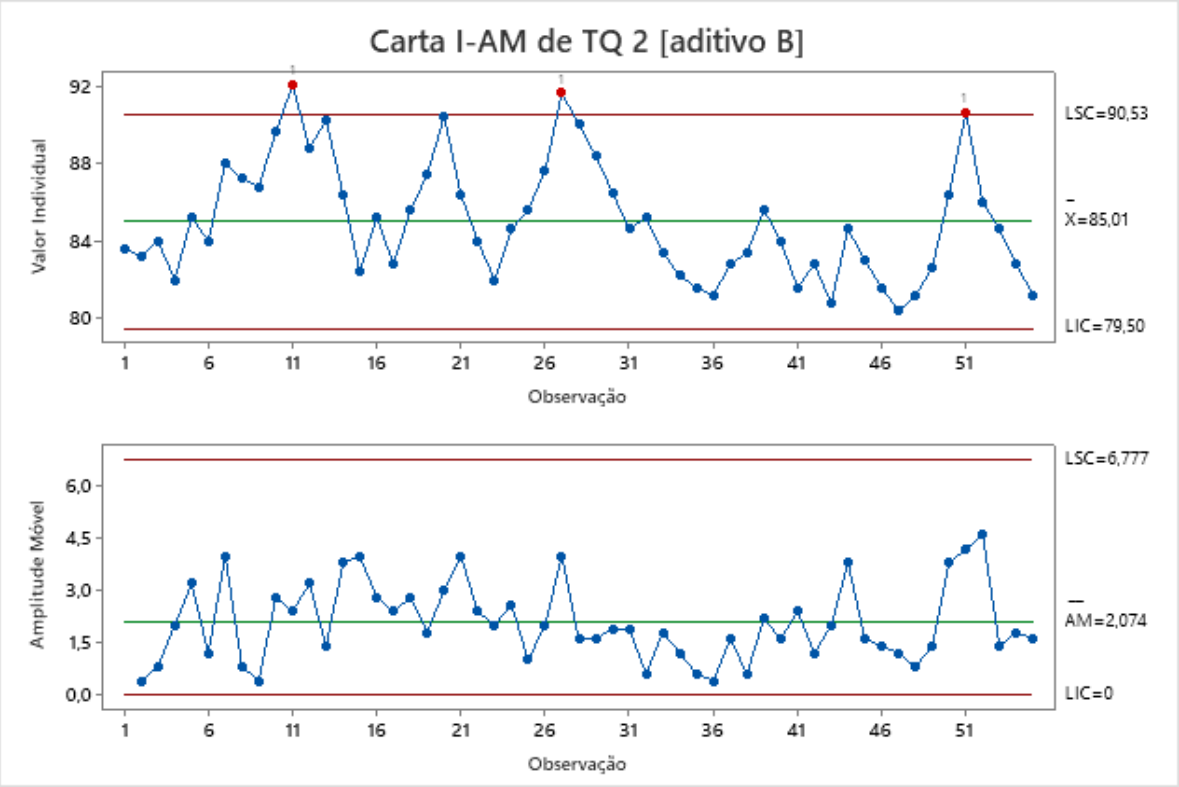
Fonte: do Autor, 2020.

APÊNDICE K – CARTA DE CONTROLE DA [Al $^{3+}$] COM O ADITIVO B NO TANQUE 2



Fonte: do Autor, 2020.

APÊNDICE L – CARTA DE CONTROLE DA [aditivo B] NO TANQUE 2

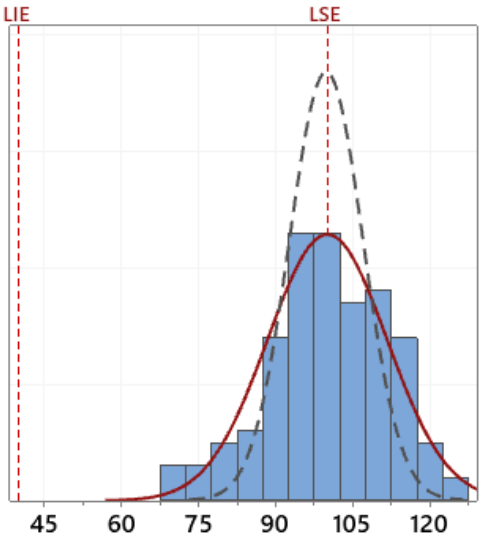


Fonte: do Autor, 2020.

APÊNDICE M – ANÁLISE DE CAPACIDADE DA [NaOH] COM O ADITIVO A NO TANQUE 2

Relatório de Capacidade do Processo para TQ 2 [NaOH]

Dados do Processo	
LIE	40
Alvo	*
LSE	100
Média Amostral	100,056
N Amostral	133
DesvPad(Global)	11,6141
DesvPad(Dentro)	7,20478



Global
Dentro

Capacidade Global	
Pp	0,86
PPL	1,72
PPU	-0,00
Ppk	-0,00
Cpm	*

Capacidade Potencial (Dentro)	
Cp	1,39
CPL	2,78
CPU	-0,00
Cpk	-0,00

	Desempenho Observado	Global Esperado	Dentro Esperado
PPM < LIE	0,00	0,12	0,00
PPM > LSE	511278,20	501939,76	503126,88
PPM Total	511278,20	501939,88	503126,88

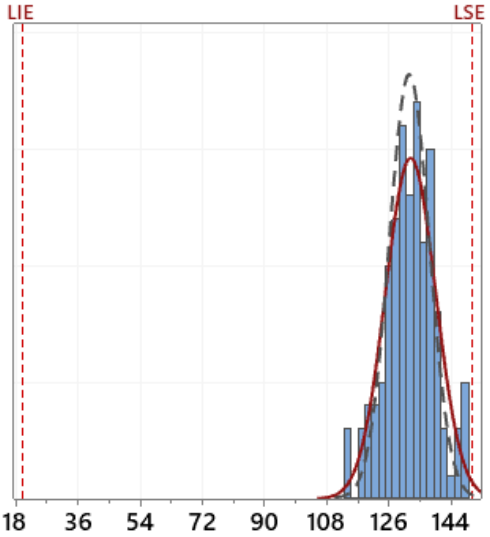
A dispersão do processo real é representada por 6 sigma.

Fonte: do Autor, 2020.

APÊNDICE N – ANÁLISE DE CAPACIDADE DA [Al 3+] COM O ADITIVO A NO TANQUE 2

Relatório de Capacidade do Processo para TQ 2 [Al 3+]

Dados do Processo	
LIE	20
Alvo	*
LSE	150
Média Amostral	132,256
N Amostral	133
DesvPad(Global)	7,26349
DesvPad(Dentro)	5,82123



Global
Dentro

Capacidade Global	
Pp	2,98
PPL	5,15
PPU	0,81
Ppk	0,81
Cpm	*

Capacidade Potencial (Dentro)	
Cp	3,72
CPL	6,43
CPU	1,02
Cpk	1,02

	Desempenho		
	Observado	Global Esperado	Dentro Esperado
PPM < LIE	0,00	0,00	0,00
PPM > LSE	0,00	7286,08	1151,56
PPM Total	0,00	7286,08	1151,56

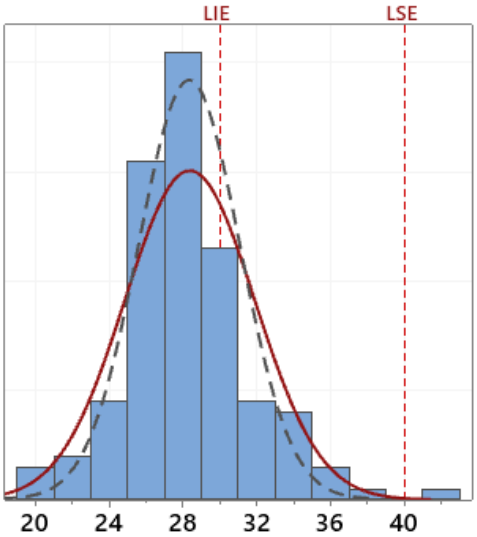
A dispersão do processo real é representada por 6 sigma.

Fonte: do Autor, 2020.

APÊNDICE O – ANÁLISE DE CAPACIDADE DA [aditivo A] NO TANQUE 2

Relatório de Capacidade do Processo para TQ 2 [aditivo A]

Dados do Processo	
LIE	30
Alvo	*
LSE	40
Média Amostral	28,365
N Amostral	133
DesvPad(Global)	3,52279
DesvPad(Dentro)	2,75938



Global
Dentro

Capacidade Global	
Pp	0,47
PPL	-0,15
PPU	1,10
Ppk	-0,15
Cpm	*

Capacidade Potencial (Dentro)	
Cp	0,60
CPL	-0,20
CPU	1,41
Cpk	-0,20

	Desempenho		
	Observado	Global Esperado	Dentro Esperado
PPM < LIE	684210,53	678723,28	723255,13
PPM > LSE	7518,80	478,64	12,40
PPM Total	691729,32	679201,92	723267,53

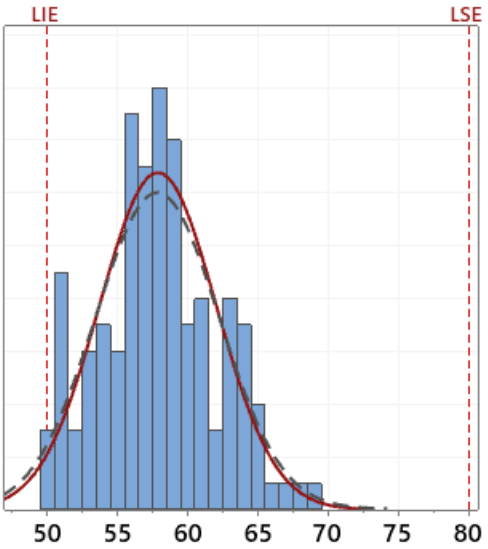
A dispersão do processo real é representada por 6 sigma.

Fonte: do Autor, 2020.

APÊNDICE P – ANÁLISE DE CAPACIDADE DA [NaOH] COM O ADITIVO B NO TANQUE 2

Relatório de Capacidade do Processo para TQ 2 [NaOH]

Dados do Processo	
LIE	50
Alvo	*
LSE	80
Média Amostral	57,8684
N Amostral	133
DesvPad(Global)	4,15362
DesvPad(Dentro)	4,41198



Global
Dentro

Capacidade Global	
Pp	1,20
PPL	0,63
PPU	1,78
Ppk	0,63
Cpm	*

Capacidade Potencial (Dentro)	
Cp	1,13
CPL	0,59
CPU	1,67
Cpk	0,59

	Desempenho		
	Observado	Global Esperado	Dentro Esperado
PPM < LIE	0,00	29089,72	37259,62
PPM > LSE	0,00	0,05	0,26
PPM Total	0,00	29089,77	37259,88

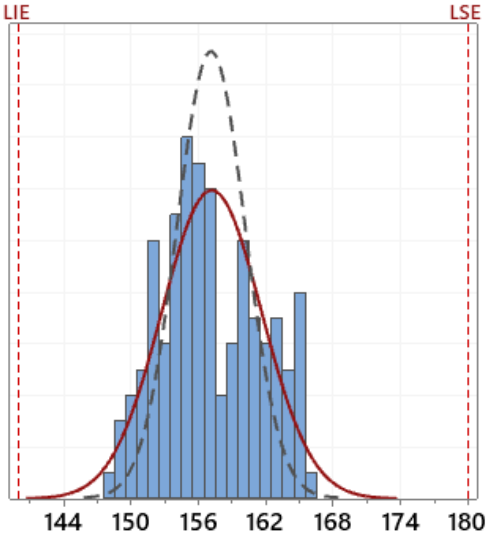
A dispersão do processo real é representada por 6 sigma.

Fonte: do Autor, 2020.

APÊNDICE Q – ANÁLISE DE CAPACIDADE DA [Al3+] COM O ADITIVO A NO TANQUE 2

Relatório de Capacidade do Processo para TQ 2 [Al 3+]

Dados do Processo	
LIE	140
Alvo	*
LSE	180
Média Amostral	157,179
N Amostral	133
DesvPad(Global)	4,44386
DesvPad(Dentro)	3,05965



Global
Dentro

Capacidade Global	
Pp	1,50
PPL	1,29
PPU	1,71
Ppk	1,29
Cpm	*

Capacidade Potencial (Dentro)	
Cp	2,18
CPL	1,87
CPU	2,49
Cpk	1,87

Desempenho	Observado	Global Esperado	Dentro Esperado
PPM < LIE	0,00	55,37	0,01
PPM > LSE	0,00	0,14	0,00
PPM Total	0,00	55,51	0,01

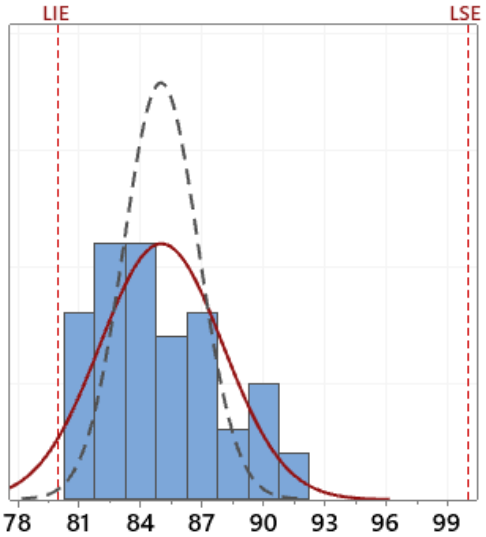
A dispersão do processo real é representada por 6 sigma.

Fonte: do Autor, 2020.

APÊNDICE R – ANÁLISE DE CAPACIDADE DA [aditivo B] NO TANQUE 2

Relatório de Capacidade do Processo para TQ 2 [aditivo B]

Dados do Processo	
LIE	80
Alvo	*
LSE	100
Média Amostral	85,0127
N Amostral	55
DesvPad(Global)	2,99902
DesvPad(Dentro)	1,83872



Global
Dentro

Capacidade Global	
Pp	1,11
PPL	0,56
PPU	1,67
Ppk	0,56
Cpm	*

Capacidade Potencial (Dentro)	
Cp	1,81
CPL	0,91
CPU	2,72
Cpk	0,91

	Desempenho Observado	Global Esperado	Dentro Esperado
PPM < LIE	0,00	47315,67	3203,34
PPM > LSE	0,00	0,29	0,00
PPM Total	0,00	47315,96	3203,34

A dispersão do processo real é representada por 6 sigma.

Fonte: do Autor, 2020.