

Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba

**FERRAMENTAS DE ANÁLISE DE FALHAS EM
PROCESSOS PRODUTIVOS.**

**Esliel Moreira Martins
Marco Vinicius Ecard Da Silva**

**Pindamonhangaba - SP
2021**

Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba

**FERRAMENTAS DE ANÁLISE DE FALHAS EM
PROCESSOS PRODUTIVOS.**

**Esliel Moreira Martins
Marco Vinicius Ecard Da Silva**

Monografia apresentada à Faculdade de
Tecnologia de Pindamonhangaba para
graduação no Curso Superior de Tecnologia
em Processos Metalúrgicos.

Orientador: Professor Me. Alexandre Sartori

**Pindamonhangaba - SP
2021**

M862f Martins, Esliel Moreira.
Ferramentas de análise de falhas em processos produtivos / Esliel
Moreira Martins; Silva, Marco Vinícius Ecard da / FATEC
Pindamonhangaba, 2021.
52f.; il.

Orientador: Professor Me. Alexandre Sartori
Monografia (Graduação) – FATEC – Faculdade de Tecnologia de
Pindamonhangaba. 2021

1. Análise de falhas. 2. Alumínio. 3. Inclusões. I. Silva, Emily
Mariane Roque da. II. Oliveira, Gabriel Caique de Jesus. III. Sartori,
Alexandre. IV. Título.

CDD 669

Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba

**FERRAMENTAS DE ANÁLISE DE FALHAS EM
PROCESSOS PRODUTIVOS.**

**Esliel Moreira Martins
Marco Vinicius Ecard Da Silva**

Monografia apresentada à Faculdade de
Tecnologia de Pindamonhangaba para
graduação, no Curso Superior de
Tecnologia em Processos Metalúrgicos.

Prof. Me. Alexandre Sartori
Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba

Prof. Me. João Mauricio Godoy
Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba

Prof. Especialista Eng. Romulo Lucas Borges
Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba

Pindamonhangaba, 09 de Dezembro de 2021.

AGRADECIMENTO

Agradecemos primeiramente a Deus, por ter nos ajudado a superar todas as dificuldades que surgiram durante o caminho até aqui. Somos gratos pelo apoio dos nossos familiares e amigos. E por último e não menos importante agradecemos aos funcionários e a todos os professores dessa instituição, que com muita dedicação, se reinventaram para nos proporcionar uma boa qualidade no ensino a distância.

MARTINS, E.M.; SILVA, M. V. E. **Ferramentas de Análise de Falhas em Processos Produtivos**. 2021. 50 p. Trabalho de Graduação (Curso de Tecnologia em Processos Metalúrgicos). Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba. Pindamonhangaba. 2021.

RESUMO

Esta pesquisa busca demonstrar a metodologia utilizada no gerenciamento de uma crise na produção de placas de alumínio, e de que maneira as ferramentas de análise de falhas contribuíram efetivamente na identificação das causas de inclusões na matriz do alumínio. Durante o processo de fundição do alumínio pode ser gerado alguns problemas como o surgimento de inclusões, esse tipo de defeito é sempre indesejado e prejudicial ao processo, pois são concentradores de tensões que irão ocasionar danos aos processos futuros de conformação mecânica, devido a isso é fundamental que seja feito um controle muito rígido do processo produtivo, desde a preparação da carga a ser fundida até o vazamento das placas, através de procedimentos e instruções de trabalho, quando é identificado esse tipo de impureza no produto é fundamental que seja realizado uma investigação acerca da origem dessas inclusões, nessa etapa se utiliza as ferramentas de análise de falhas que auxiliam no levantamento de informações e variáveis do processo de forma objetiva, a fim de identificar a causa raiz e gerar planos de ação para corrigir os desvios identificados e minimizar futuras falhas.

Palavras chave: Análise de Falhas, Alumínio, Inclusões

MARTINS, E.M.; SILVA, M. V. E. **Failure Analysis Tools in Productive Processes**. 2021. 50 p. Graduation project (Course of Technology in Metallurgical Processes). Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba. Pindamonhangaba. 2021.

ABSTRACT

This research seeks to demonstrate the methodology used in managing a crisis in the production of aluminum slabs, and how the failure analysis tools effectively contributed to the identification of the causes of inclusions in the aluminum matrix. During the aluminum casting process, some problems can be generated, such as the appearance of inclusions, this type of defect is always unwanted and harmful to the process, as they are stress concentrators that will cause damage to future processes of mechanical forming, due to this It is essential that a very strict control of the production process is carried out, from the preparation of the load to be melted to the leakage of the plates, through procedures and work instructions, when this type of impurity in the product is identified, an investigation is essential about the origin of these inclusions, at this stage, failure analysis tools are used that help in the collection of information and process variables in an objective way, in order to identify the root cause and generate action plans to correct the identified deviations and minimize future glitches.

Keywords: 1. Analyze 2. Failure 3. Aluminum 4. Inclusion 5. Matrix

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diagrama de Pareto	17
Figura 2 – 6 M's.....	18
Figura 2.3 – Produto com defeito.....	19
Figura 2.4 – Refinaria.....	23
Figura 3.5 – Redução do alumínio	24
Figura 3.6 – Redução do alumínio 2.....	24
Figura 3.7 – Reciclagem de alumínio.....	26
Figura 3.8 – Laminação.....	28
Figura 3.9 – Estampagem.....	28
Figura 4.10 – Remoção do hidrogênio.	33
Figura 5.11 – Processo de desgaseificação.....	34
Figura 5.12 – Fluxo do metal.....	36
Figura 5.13 – Diagrama de Ishikawa.....	42

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Seis Sigma.....	12
Tabela 2.2 – Grupo de pessoas que podem se envolver durante uma análise de falhas.....	15
Tabela 2.3 – Modelo plano de ação 5W3H – planejamento p redução de extravios de enxoval.....	21
Tabela 5.4 – Teores médios dos metais alcalinos contidos no alumínio primário.....	35
Tabela 5.5 – Equipamentos/processos mais utilizados na indústria do alumínio para filtragem.....	36
Tabela 5.6 – Eficiência de filtragem com contagem de particulados (como medida).....	37
Tabela 5.7 – Tipos de inclusões em alumínio fundido.....	39
Tabela 5.8 – Possíveis causas.....	42
Tabela 5.9 – Os 5 Porquês.....	43
Tabela 5.10 – Plano de ação.....	44

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

GE	General Electric
6Ms	Máquina, Materiais, Mão de obra, Meio-ambiente, Método e Medidas
5W3H	What, Why, Who, When, Where, How, How much e How measure
ABAL	Associação Brasileira do Alumínio
IACS	International Annealed Copper Standard
ASTM	American Society for Testing and Materials
DBF	Deep Bed Filter
CFF	Ceramic Foam Filter - Filtro de Espuma Cerâmica
TKR	Tokyo Koyu Rozal
PoDFA	Porous Disk Filtration Apparatus
NC	Não Conformidade

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	
.....		11
1.1 PROBLEMA.....		11
1.2 OBJETIVOS.....		11
1.3	OBJETIVOS	
ESPECIFICOS.....		12
2.	REVISÃO	
BIBLIOGRÁFICA.....		12
2.1 METODOLOGIA SEIS SIGMAS.....		12
2.2 ANÁLISE DE FALHA E SUAS FERRAMENTAS.....		13
2.2.1	Etapas	da
Falha.....	Análise	da
		15
2.2.2	Utilização	de
.....	Ferramentas	de
		16
2.2.3	Diagrama de Pareto.....	16
2.2.4	Diagrama	de
Peixe.....	Ishikawa/Espinha	de
		18
2.2.5	Cinco Porquês na Análise de Falha.....	19
2.2.6	Plano de Ação.....	20
2.2.7	Gerar	um
Final.....	Relatório	21
2.3 O ALUMÍNIO.....		22
2.3.1 Mineração.....		22
2.3.2	Refino	da
Bauxita.....		23
2.3.3	Redução	de
Alumínio.....		23
2.3.4	Características	Químicas
Físicas.....		24
2.3.5 Conformação Mecânica; Discordâncias e Coeficiente Anisotrópico.....		27
2.3.5.1 Laminação.....		27
2.3.5.2 Estampagem.....		28

2.4 INCLUSÕES.....	29
2.4.1 Origem.....	29
2.4.2 Composição Química.....	30
2.4.3 Propósito.....	30
2.4.4 Formação Inclusões Não Metálicas.....	31
2.4.5 Efeitos Da Inclusão Nos Processos De Deformação.....	32
2.5 TRATAMENTO DO METAL LÍQUIDO: ALUMÍNIO.....	32
2.5.1 Minimização das impurezas.....	32
2.5.1.1 Remoção do Hidrogênio.....	32
2.5.1.2 Remoção dos Metais Alcalinos.....	35
2.5.1.3 Remoção de Inclusões.....	35
3 METODOLOGIA.....	38
4. APLICAÇÃO DAS TÉCNICAS DE ANÁLISE DE FALHA PARA IDENTIFICAR A CAUSA RAIZ DOS DEFEITOS DE INCLUSÃO NO ALUMÍNIO.....	39
4.1 ANÁLISE DO PROCESSO: POSSÍVEIS CAUSAS.....	42
CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	45
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.	48

1. INTRODUÇÃO

Em meio a um ambiente altamente competitivo e dinâmico, a qualidade torna-se fator preponderante nas organizações, na busca e manutenção da padronização de processos, com foco na melhoria contínua da produção e na redução de custos por perdas. Para alcançar um crescimento na produtividade e melhorar resultados econômicos e financeiros, o controle dos processos internos é o ponto crucial para obter racionalização, agilidade e redução de custos (PIMENTEL, 2016).

As ferramentas da qualidade são empregadas para auxiliar as empresas na definição de padrões, mensurar, analisar e propor soluções para problemas que possam ser encontrados eventualmente e que interfiram no bom desempenho dos processos de trabalho. Este trabalho foi desenvolvido com a abordagem da aplicação das ferramentas da qualidade em um processo produtivo de uma fábrica da região destinada a produção de alumínio. A revisão bibliográfica e o estudo de caso formaram parte da metodologia empregada neste trabalho.

Neste estudo procurou-se aplicar uma metodologia para verificação e mensuração do problema, através da utilização de várias ferramentas da gestão da qualidade, com o objetivo de diagnosticar as principais causas das não conformidades verificadas no produto e propor soluções que possam implicar em melhorias no processo produtivo, para que a empresa se torne ainda mais competitiva no mercado mantendo o alinhamento no sentido das diretrizes de manutenção do crescimento sustentável.

1.1 Problema

Falhas detectadas no processo de Laminação do Alumínio e que quantificadas se mostraram fora do padrão de ocorrências mantidos sobre controle.

1.2 Objetivos

Utilização das ferramentas de análise de falhas no processo produtivo para contribuição no processo de identificação das causas de falhas ocorridas, em específico, inclusões no alumínio, contribuindo de forma efetiva na elaboração de planos de ação, para solucionar os problemas identificados durante as análises.

1.3 Objetivos Específicos

Como objetivos específicos pretendeu-se, analisar as principais características dos defeitos identificados pelo laboratório, realizar um levantamento estatístico dos números de casos, identificar as principais partes do processo produtivo, escolher a melhor ferramenta de análise de falha para auxiliar no gerenciamento da crise, identificar as principais variáveis que contribuem para a ocorrência dos casos de defeitos, elaborar planos de ação para corrigir os desvios identificados como causas raízes e monitorar a efetividade dos planos de ação implementados.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 METODOLOGIA SEIS SIGMA

Desenvolvida pela empresa Motorola na década de 80 e tornado famoso na GE (General Electric) pelo lendário Jack Welch, Seis Sigmas é sem dúvidas a maior mudança ocorrida desde a concepção de qualidade contemporânea nos anos 50.

Existem diferentes perspectivas sobre o que é “Seis Sigma”, para alguns é descrito como; “Um método altamente técnico utilizado por engenheiros e estatísticos para dar sintonia a produtos e processos”, ou seja, através de medições e estatísticas tornar o processo o mais eficiente possível evitando perdas e falhas do produto.

Outra definição de Seis Sigma é constituir uma meta de quase perfeição no atendimento as exigências de clientes, isso também é correto pois o próprio termo Seis Sigma refere-se ao desempenho de operar com apenas 3,4 defeitos para cada milhão de atividades ou oportunidades.

Tabela 1 – Seis Sigma.

Nível de qualidade	Defeitos por milhão	% de conformidade
1 Sigma	691.463	30,85%
1,5 Sigma	500.000	50%
2 Sigma	305.537	69,15%
3 Sigma	66.807	93,2%

4 Sigma	6.210	99,38%
5 Sigma	233	99,97%
6 Sigma	3,4	99,99966%

Fonte: Os Autores (2021)

Também podemos definir “Seis Sigma” como um abrangente esforço de “mudança de cultura” visando aumentar a satisfação de clientes, lucratividade e competitividade da empresa.

Conforme definido por Pande (2001), a metodologia Seis Sigma é:

Um sistema abrangente e flexível para alcançar, sustentar e maximizar o sucesso empresarial. [...] os benefícios comprovados do “Seis Sigma” são diversos, incluindo: Redução de custo, melhoria de produtividade, crescimento de fatia de mercado, retenção de clientes, redução de tempos de ciclo, redução de defeitos, mudança cultural, muitos outros. (PANDE, 2001, p.13)

Devido as necessidades de crescimento e sobrevivência das organizações no atual cenário empresarial, é fundamental que haja uma mudança nas atuais práticas adotadas pelas empresas, pois a grande maioria dos sistemas de qualidade enfatiza a detecção e ocorrência das falhas, elevando os custos devido à baixa qualidade. Entretanto não é possível atingir patamares tão altos de qualidade, sem eliminar as falhas mais recorrentes e compreender suas respectivas causas. Para isso utilizamos as ferramentas de análise de falhas.

2.2 ANÁLISE DE FALHA E SUAS FERRAMENTAS

Definimos como análise de falha, uma investigação lógica e planejada, que envolve um grupo de pessoas treinadas, com mentes abertas, bem-intencionadas e envolvidas com ciência, prontas para coletar dados, observar fatos, planejar ensaios, promover discussões e inferir causas que levaram um sistema a apresentar um desempenho insatisfatório. A análise de falha não é algo exclusivo do ramo industrial, ela também pode ser aplicada na vida pessoal de cada um, por isso uma definição mais simples de análise de falha é “uma ação planejada que visa prevenir e avaliar não conformidades.” (RIZZOTO, 2018).

Para compreendermos como funciona uma análise de falha, precisamos primeiramente definir o que é uma falha.

Falha é um acontecimento indesejável, que acaba gerando perdas e danos, podendo ter um impacto catastrófico; por exemplo, a quebra de uma engrenagem de uma máquina de produção, é um tipo de falha que irá gerar perdas e danos. Os danos são os prejuízos sofridos no próprio acontecimento, no caso, os custos da compra de uma nova engrenagem e a mão de obra para fazer a intervenção no equipamento, já as perdas, são os impactos ocasionados pelo tempo em que o equipamento ficar parado, como; perda de produtividade, atrasos nos prazos de entrega de produção, deixando a empresa sujeita a indenizações ou qualquer outro dano secundário (SGOTTI, 2018), porém esse tipo de ocorrência não gerou nenhum impacto catastrófico.

Exemplos bem marcantes de falhas que geraram impactos catastróficos, foram os rompimentos das barragens de Brumadinho e Mariana, foram falhas que trouxeram perdas e danos não apenas para a empresa responsável, mas também a terceiros, principalmente para a população e ao meio ambiente, por isso consideramos os impactos dessas falhas como catastróficos.

Os tipos de falhas mais comum em processos produtivos são: Falha de projeto, falha de instalação, falha de pessoal, falha de fornecedores e falha de clientes. Falha de projeto: É um tipo muito comum de falha, existe um mapeamento e controle de todo o processo do início ao fim, porém muitas das vezes surgem diversas dificuldades que impossibilita a realização daquele projeto que foi desenvolvido anteriormente, nesses casos é preciso fazer uma adaptação ou mudança no projeto inicial. Layouts, procedimentos, materiais a serem utilizados durante o processo produtivo, fazem parte do projeto.

Falha de instalação: Quando ocorre algum tipo de falha em máquinas, equipamentos, acessórios ou edifícios. É comum acontecer esse tipo de falha principalmente em partes elétricas.

Falha de pessoal: Pode ocorrer por falta de treinamentos ou até mesmo por falta de atenção durante a execução da atividade. Um dos principais motivos das falhas durante o processo produtivo pode estar associado a mão de obra.

Falha de Fornecedores: Todo sistema produtivo necessita de insumos, a falha ocasionada pelos fornecedores pode ser devido a um atraso na entrega do pedido, o que iria gerar também atrasos na produção, ou a qualidade do produto estar abaixo

do padrão exigido, nesse caso poderá gerar diversas não conformidades para o meu processo e consecutivamente afetara o produto final.

Falha de cliente: Todo produto tem suas limitações e maneiras corretas de serem utilizados. Algumas vezes, os clientes acabam utilizando o produto adquirido de maneira incorreta, isso provavelmente irá ocasionar uma falha de aplicação ou diminuirá a vida útil do produto em questão. Para evitar esse tipo de falha é fundamental ler as especificações do fabricante.

Em todos os processos a falha é sempre indesejada, porém esse tipo de acontecimento acaba proporcionando possibilidades de melhorias, para que isso ocorra é necessário realizar uma boa análise de falha.

2.2.1 Etapas da análise de falha

A primeira etapa da análise de falha consiste em: detectar a falha ocorrida, levantar dados, definir os objetivos e planejar a condução da análise, como explicitado na assertiva abaixo:

Uma análise de falha pode ser iniciada desde uma simples curiosidade profissional até como uma necessidade legal (forense) para a resolução de casos de interesse público. Pode ser iniciada como resposta a um problema que afeta um processo produtivo ou porque a falha pode acarretar um potencial efeito negativo de segurança ou qualidade (GODOFROID E CÂNDIDO, 2015. p.409)

Após iniciado o processo de análise é fundamental levantar o maior número de informações possíveis sobre o caso, como; frequência da ocorrência, características da falha, datas e horários. Essa etapa irá nortear toda a condução da análise.

Uma análise de falha completa visa não só caracterizar a falha em si, mas, principalmente, permitir o estabelecimento de medidas para se evitar ou, ao menos, minimizar o seu ressurgimento (GODOFROID E CÂNDIDO, 2015. p.407).

Para atingir os objetivos da análise de falha, é fundamental que haja uma boa condução da análise desde o primeiro momento, convocar pessoas para contribuir no estudo da investigação, delegar análises e teste e estipular prazos. A Tabela 2 mostrada abaixo exemplifica a estratificação de um grupo envolvidos em um caso de análise de falhas.

Tabela 2 - Grupos de pessoas que podem se envolver durante a análise de falhas.

Grupo	Nome	Descrição
I	<u>Envolvidos</u>	peças mais diretamente ligadas à estrutura ou componente que falhou, seja pela utilização, seja pela fabricação deste.
II	<u>Fornecedores</u>	estão indiretamente ligados à falha por ter sido, o fornecedor da peça/componente/estrutura falhada, ou da matéria-prima que falhou no processo de produção ou de algum equipamento correlacionado
III	<u>Analistas</u>	peças teoricamente alheias às relações entre os dois primeiros grupos e que realiza a análise de falhas de maneira sistemática, isenta e imparcial
IV	<u>Públicos/clientes</u>	aquele grupo das pessoas a quem se destinava a peça falhada, podendo ser as mesmas pessoas do primeiro grupo

Fonte: Godefroid e Cândido (2015)

2.2.2 Utilização de Ferramentas de Análise

Segundo Rizzoto, acerca das ferramentas de análise se pode afirmar que:

Existe uma variedade de ferramentas de análise de falhas e solução de problemas. Para que os profissionais de manutenção e da área de confiabilidade possam selecionar a ferramenta correta e propor uma solução com maior eficiência e menor custo, os diferentes métodos devem ser descritos e comparados. (RIZZOTO, Robson. 2018)

Ainda segundo o mesmo autor o funcionamento de cada ferramenta pode ser descrito como:

A verdade é que cada ferramenta tem seu funcionamento melhor em uma determinada condição. Portanto, o profissional responsável por essa análise deve saber como selecionar essas soluções e como combiná-las para chegar a uma conclusão tecnicamente satisfatória e, assim, tomar uma decisão. (RIZZOTO, Robson. 2018)

Cabe ao condutor da análise utilizar a ferramenta que melhor se aplica ao seu processo, existem diversas ferramentas que irão auxiliá-lo a solucionar o seu problema. É muito comum fazer a utilização de mais de um tipo de ferramenta pois

as mesmas se complementam, aumentando a eficiência da análise e a assertividade na tomada de decisão. Algumas das principais ferramentas são:

2.2.3 Diagrama de Pareto

O diagrama criado pelo economista italiano Vilfredo Pareto, no século XIX pode ser definido como uma das sete ferramentas básicas da qualidade e constitui-se através de gráfico que é utilizado na identificação de quais os itens, ou causas de perdas necessitam ser sanadas, por serem responsáveis pela maioria das perdas (FARIA, s.d)

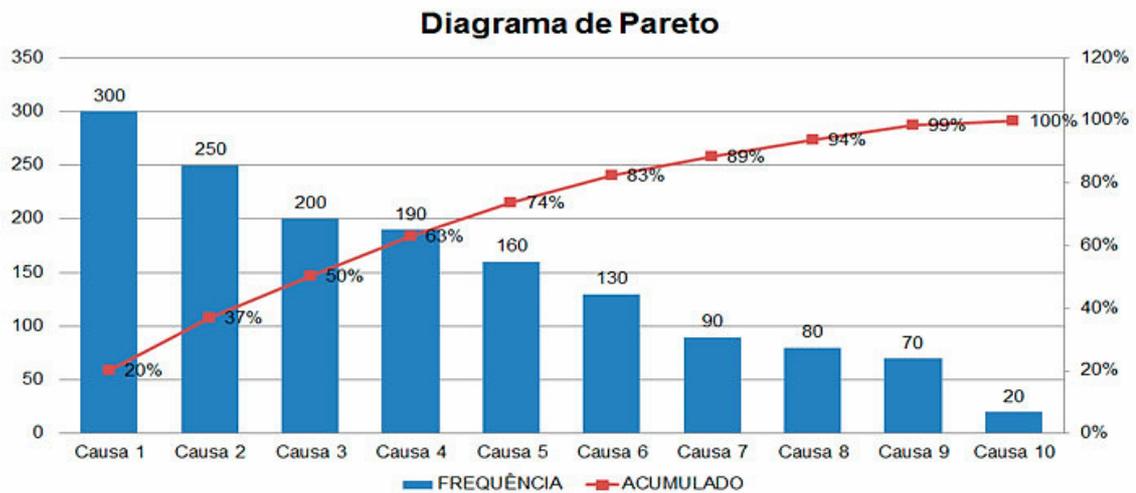
Nas palavras de Rizzoto (2018) acerca deste ele pode ser: “também chamado de Análise de Pareto, [...] uma metodologia usada no intuito de quantificar e discutir as causas de um evento com o seu consequente efeito.”

Cabe destacar ainda que:

O objetivo é conflitar as causas de falhas com o número de paradas de uma máquina. Ou seja, com ela é possível enxergar quais são as causas que mais impactam na confiabilidade e disponibilidade do equipamento. Por fim, o diagrama é uma representação gráfica dos desafios da gestão de processos em ordem de classificação do mais ao menos frequente, e demonstra a regularidade dos tipos de defeitos. Assim, você tem a oportunidade de decidir qual é o evento prioritário para ser solucionado. (RIZZOTO, Robson, 2018).

O diagrama, conforme mostrado na Figura 1, se apresenta sobre a forma de um gráfico de barras, demonstrando as várias causas ou características dos defeitos ou falhas, as barras são dispostas em ordem decrescente com a causa principal vista do lado esquerdo do diagrama e as causas menores são mostradas em ordem decrescente do lado direito.

Figura 1 – Diagrama de Pareto



Fonte: MARCONDES (s.d)

2.2.4 Diagrama de Ishikawa (Espinha de Peixe)

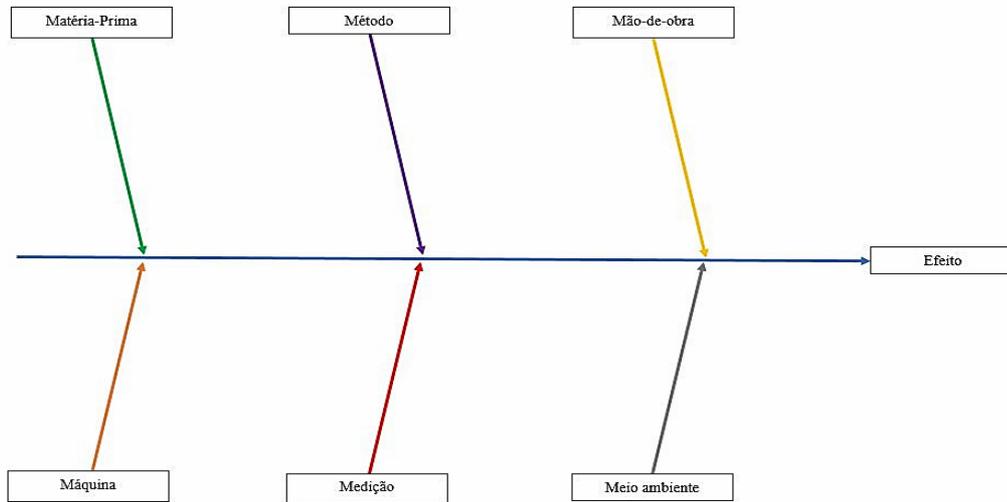
O diagrama de Ishikawa também conhecido como diagrama de causa e efeito, ou espinha de peixe devido ao seu formato é uma ferramenta que possibilita a identificação de possíveis causas de um determinado problema ou efeito. Esta ferramenta foi utilizada pela primeira vez em 1953 no Japão, pelo professor da universidade de Tokio, Kaoru Ishikawa, para sintetizar as opiniões de engenheiros durante a discussão de problemas de qualidade de uma fábrica.

Segundo Bastiani se pode definir esse diagrama como:

Criado na década de 60, por Kaoru Ishikawa, o diagrama também conhecido como “espinha de peixe” leva em conta todos os aspectos que podem ter levado à ocorrência do problema, dessa forma, ao utilizá-lo, as chances de que algum detalhe seja esquecido diminuem consideravelmente. (BASTIANI, Jeison, 2018).

Um diagrama de Ishikawa, conforme exemplificado na Figura 2, é composto por uma espinha central e ramos que parecem com o esqueleto de um peixe. Dessa forma, as ramificações categorizam as causas, são propostas 6 categorias pelo método, que são: Máquina, Materiais, Mão de obra, Meio-ambiente, Método e Medidas (os 6Ms). Por sua vez, as causas potenciais são listadas e testadas para validação com o uso de evidências ou outra ferramenta analítica em cada categoria.

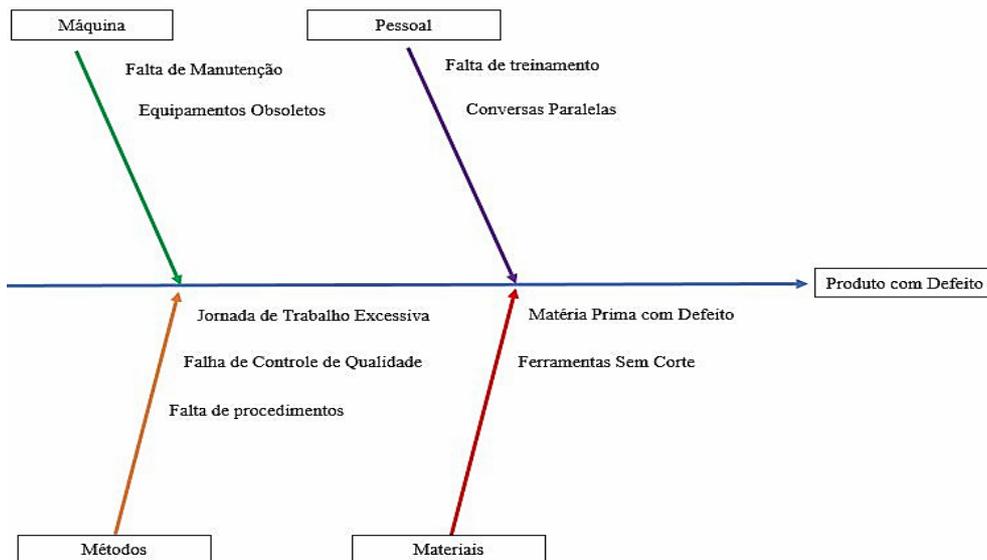
Figura 2 – 6 Ms.



Fonte: Os Autores (2021)

Na indústria, as “causas primarias potenciais” são conhecidas como fatores de manufatura ou “6 M” [...] entretanto, as causas “matriz” (6 M) podem ser adaptadas conforme a necessidade de cada instituição. (ALVES, 2012, p. 48)

Figura 3– Produto com Defeito.



Fonte: Os Autores (2021)

2.2.5 Cinco Porquês Na Análise De Falhas

Essa é uma das ferramentas mais simples a serem utilizadas na investigação de causa e efeito, a ideia consiste em perguntar o porquê de algum desvio, e sua resposta forma a estrutura para uma nova pergunta até que seja identificado a causa raiz de uma falha.

A técnica dos 5 porquês surgiu na década de 30 e foi criada por Sakichi Toyota, fundador das Indústrias Toyota. Desde o seu surgimento, a ferramenta vem sendo muito utilizada devido a sua simplicidade e eficiência. O 5 porquês é uma ferramenta que consiste em perguntar 5 vezes o porquê de um problema ou defeito ter ocorrido, a fim de descobrir a sua real causa, ou seja a causa raiz. Um ponto interessante e que vale mencionar é que, na prática, pode ser que não seja necessário perguntar 5 vezes “por que” ou seja necessário realizar mais de 5 questionamentos para identificar a causa raiz de um problema. Não há uma regra para isso, apesar de o criador da ferramenta afirmar que 5 é o número ideal de vezes, depende muito do contexto de cada situação e empresa. (NAPOLEÃO, Bianca, 2019)

A utilização dessa ferramenta não se restringe ao contexto industrial, por ser uma metodologia simples, pode ser aplicada no cotidiano para identificar a causa de problemas pessoais, financeiros entre outros.

No dia a dia do trabalho da enfermagem ocorrem várias “não conformidades” e em muitas situações, pude presenciar a preocupação da liderança em saber quem foi o “culpado”, sendo que o ideal é que a preocupação fosse “por quê?” [...] O que ainda é uma pratica comum é procurar o responsável pelo erro, muitas vezes utilizando punições, contribuindo com a diminuição da motivação do colaborador, além de não resolver o problema pois se a causa não for tratada, muito provavelmente haverá reincidência. (ALVES, 2012, p. 68)

Ainda segundo a mesma autora, segue o exemplo de uma investigação fazendo uso dessa ferramenta no ambiente de trabalho hospitalar:

- Pergunta 1: Por que o alarme da bomba de infusão está soando constantemente?
Resposta: Porque não foi programado de forma correta.
- Pergunta 2: Porque não foi programado de forma correta?
Resposta: Porque a programação está sendo feita por profissional não qualificado.
- Pergunta 3: Porque a programação está sendo feita por profissional não qualificado?
Resposta: Porque o profissional não teve treinamento.
- Pergunta 4: Porque o profissional não teve treinamento?
Resposta: Porque não passou pelo treinamento admissional.
Solução Final: [...] No caso do exemplo, solicitar que os colaboradores responsáveis em manipular as bombas de infusão tenham treinamento anteriormente.

Proibir que profissionais sem treinamento executem atividades sem supervisão. (ALVES, 2012, p. 69)

2.2.6 Plano de Ação

Na gestão da qualidade o plano de ação é uma ferramenta muito utilizada, pois auxilia na orientação das decisões e acompanha o desenvolvimento das atividades propostas.

O plano de ação pode ser estruturado pelo que se convencionou chamar 5W3H, utilizado para planejar a implementação de uma solução de modo organizado, identificando as ações definindo responsabilidades, métodos, prazos e recursos associados; é um modelo de plano de ação. O 5W3H representa as iniciais das palavras em inglês:

- What: O que será feito (etapas)
- Why: Por que deve ser executada a tarefa (justificativa)
- Who: Quem realizara as tarefas (responsabilidade)
- When: Quando cada uma das tarefas deverá ser executada (tempo)
- Where: Onde cada etapa será executada (local)
- How: Como deverá ser realizada cada etapa (método)
- How much: Quanto custa cada etapa (custo da ação)
- How measure: Como medir ou avaliar (monitoramento) (ALVES, 2012, p. 61)

Tabela 3 – Modelo Plano Ação 5W3H – Exemplo de Aplicação

SETOR: LAVANDERIA HOSPITALAR			
O QUE (What)	QUEM (Who)	QUANDO (When)	ONDE (Where)
Reduzir o extravio do enxoval em 80%	Enfermagem + Higiene hospitalar + lavanderia	01/05 a 30/07/20xx	Unidades de Internação

SETOR: LAVANDERIA HOSPITALAR			
POR QUE (Why)	COMO (Who)	CUSTOS (When)	COMO MEDIR (How measure)
Melhorar o controle e diminuir os gastos com a reposição do	Implantar controle de roupas desde a saída da lavanderia (roupa limpa) até o retorno ao setor	Valores gastos com este processo	Através de inventários mensais e monitoramento de indicadores.

enxoval. (roupa suja).

Fonte: Vera Alves (2009)

2.2.7 Gerar um Relatório Final.

No cenário industrial, é fundamental que todas as mudanças realizadas no processo produtivo sejam registradas em um relatório, principalmente quando necessário fazer intervenções em equipamentos ou criar planos de ação para corrigir as falhas. Segundo Godefroid e Cândido:

Como qualquer outro relatório de engenharia, um relatório de análise de falhas deve conter uma sequência lógica que permita ao leitor entender:

- O que está sendo investigado,
- As análises feitas,
- Os resultados encontrados,
- As conclusões obtidas (causas da falha) e
- O plano de ação ou medidas de controle da falha. (GODEFROID e CÂNDIDO, 2015, p. 426).

Após a realização de todas essas etapas é importante que haja um monitoramento em cima das mudanças realizadas, com o intuito de controlar a eficiência dos planos de ação, e minimizar os possíveis surgimentos de novas falhas.

2.3. O ALUMÍNIO

O alumínio é um metal prateado, o 13º elemento da tabela periódica. Um fato surpreendente sobre o alumínio é que ele é o 3º elemento químico mais abundante em nosso planeta, perdendo apenas para o oxigênio e para o silício. Observando apenas os elementos metálicos, o alumínio está em primeiro lugar, sendo o mais abundante na crosta terrestre, representando cerca de 8,3% de sua composição (BAIO, 2016).

Porém o alumínio “não é encontrado diretamente em estado metálico. Sua obtenção parte da Mineração da bauxita e segue para as etapas posteriores de Refinaria e Redução” (Associação Brasileira do Alumínio, (ABAL), s.d).

2.3.1 Mineração

A mineração é um processo extremamente importante para a economia e principalmente para o desenvolvimento de novas tecnologias pois a maioria dos metais utilizados em grande escala nas indústrias não são encontrados na natureza na forma em que temos acesso. Através da mineração e diferentes processos de transformações é possível extrair metais a partir de alguns minérios.

O alumínio é obtido a partir da bauxita, um minério encontrado em três principais grupos climáticos: Mediterrâneo, Tropical e Subtropical. A bauxita deve apresentar no mínimo 30% de óxido de alumínio (Al_2O_3) aproveitável para que a produção seja economicamente viável. As reservas brasileiras, além da ótima qualidade do minério, também estão entre as maiores do mundo." (ABAL, s.d).

O Brasil é um território muito rico em minérios, possui a quarta maior reserva de bauxita do mundo e cerca de 94% das reservas de Nióbio estão em nosso território, além de Carajás possuir a maior mina de minério de ferro do mundo. Todos esses metais são encontrados na forma de minérios.

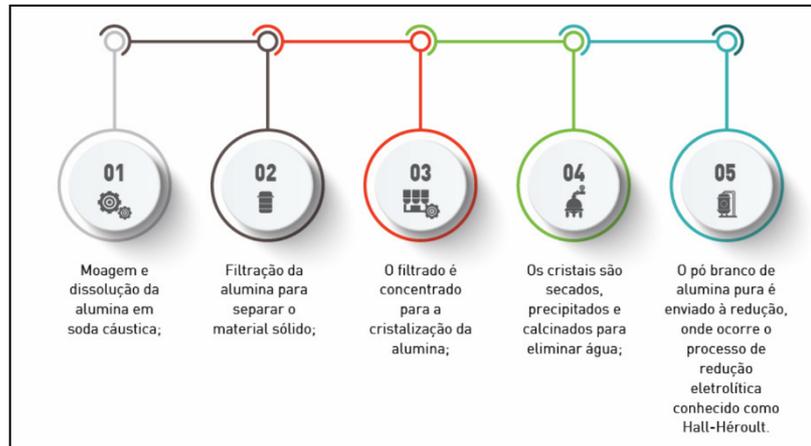
2.3.2 Refino da Bauxita

No caso do alumínio, após a obtenção da bauxita é realizado o processo de refino, onde será realizado a separação do elemento de interesse no caso a alumina, das demais substâncias denominadas gangas. De acordo com a assertiva abaixo:

Nessa fase do processo, a alumina, além de ser insumo para a obtenção do alumínio primário, tem diversas aplicações, como por exemplo, para a fabricação de materiais refratários, tratamento de água, uso em produtos abrasivos e para polimento, como retardante de chamas, na fabricação de velas de ignição, entre outros. (ABAL, s.d).

O esquema apresentado na Figura 4, descreve o processo de obtenção da alumina:

Figura 4 – Refino



Fonte: ABAL (s.d)

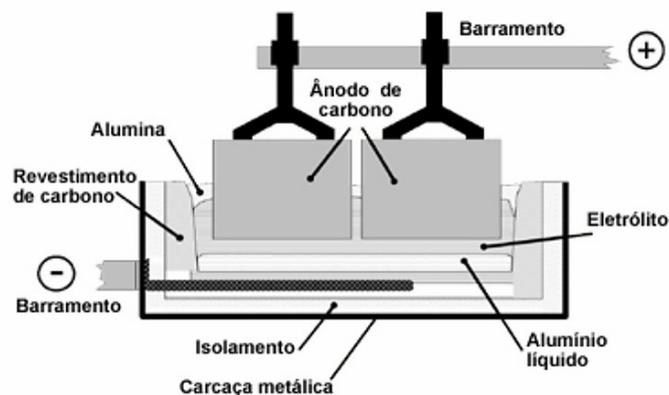
2.3.3 Redução do Alumínio

Após a obtenção da alumina é necessário realizar a redução eletrolítica deste insumo, através do processo conhecido como Hall-Héroult. Segundo a Associação Brasileiro do Alumínio:

A obtenção do alumínio ocorre pela redução da alumina calcinada em cubas eletrolíticas, a altas temperaturas, no processo conhecido como Hall-Héroult. São necessárias duas toneladas de alumina para produzir uma tonelada de metal primário pelo processo de Redução.

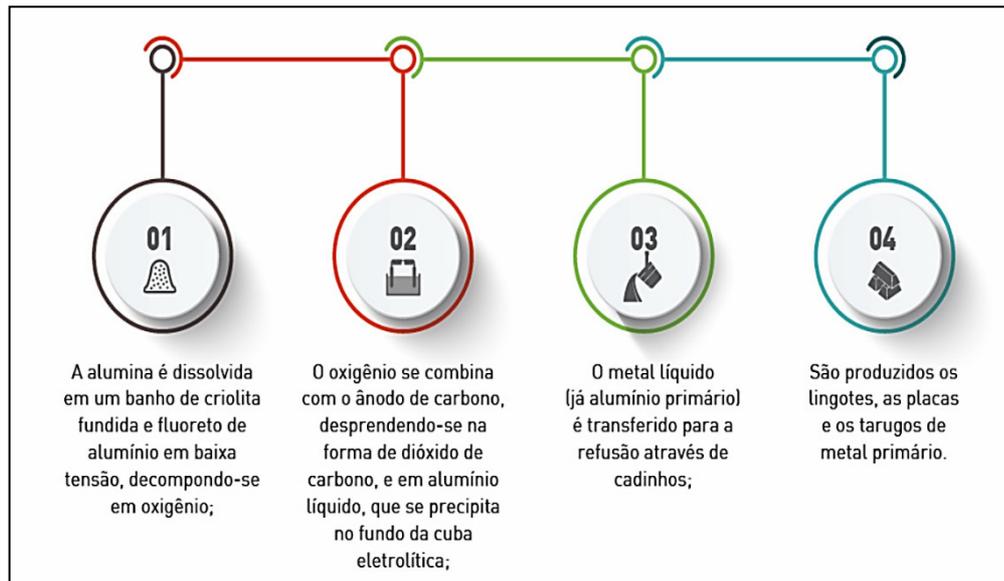
O processo Hall-Héroult, para melhor compreensão, está esquematizado na Figura 5, onde a alumina se transforma em alumínio primário. Na Figura 6, está apresentado um fluxograma esquemático do processo de obtenção em 4 etapas.

Figura 5 – Redução Eletrolítica do Alumínio



Fonte: ABAL (s.d)

Figura 6– Etapas da Redução do Alumínio



Fonte: ABAL (s.d)

2.3.4 Características Químicas e Físicas

O alumínio possui propriedades físicas e químicas que o tornam um dos metais mais utilizados no mundo, seja no ramo tecnológico ou doméstico, de acordo com a assertiva abaixo, se pode afirmar que:

Uma excepcional combinação de propriedades faz do alumínio um dos mais versáteis materiais utilizados na engenharia, arquitetura e indústria em geral. (ABAL, s.d)

Por possuir um ponto de fusão de 660°C, o alumínio não precisa de muita energia para se fundir, diferente do aço que tem um ponto de fusão em torno de 1570° C, outra vantagem é que o alumínio possui um peso específico de 2,70 g/cm³, três vezes mais leve que o aço e o cobre, e como apresenta uma condutividade elétrica de aproximadamente 62%, esse material é muito utilizado na transmissão de energia para grandes distancias, na maioria dos sistemas essa transmissão é composta por linhas aéreas e estruturas de sustentação, com o uso de condutores de alumínio o peso depositado nas estruturas será menor tornando a linha mais segura e também proporcionando uma grande economia financeira pois o alumínio é mais barato que o cobre, de acordo com a Associação Brasileira do Alumínio:

O alumínio puro possui condutividade elétrica de 62% da IACS (International Annealed Copper Standard), a qual associada à sua baixa densidade significa que um condutor de alumínio pode conduzir tanta corrente quanto um condutor de cobre que é duas vezes mais pesado e proporcionalmente mais caro. (ABAL, s.d)

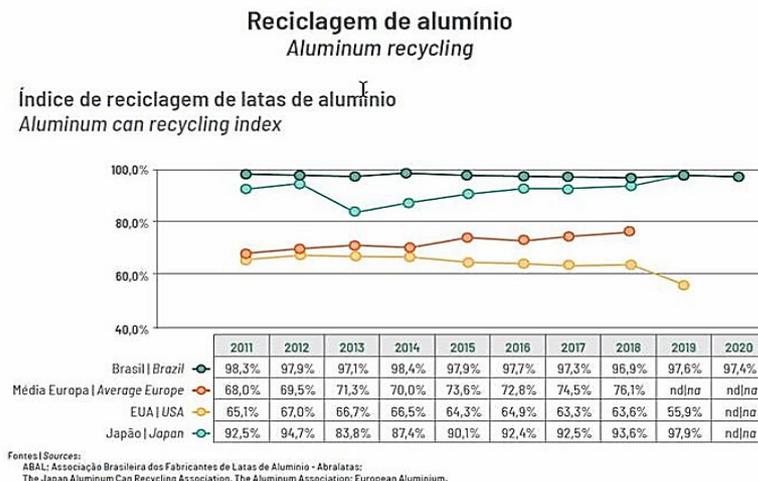
O alumínio ainda apresenta outras propriedades muito atraentes e superiores ao aço, segundo Associação brasileira do alumínio a condutibilidade térmica do alumínio é 4,5 vezes maior que o aço. “O alumínio possui condutibilidade térmica 4,5 vezes maior que a do aço.” (ABAL, s.d)

Para determinadas situações o alumínio também é considerado um material muito seguro, ideal para armazenar substâncias inflamáveis, por apresentar propriedades antimagnéticas, pode se afirmar então que:

Por não ser magnético, o alumínio é frequentemente utilizado como proteção em equipamentos eletrônicos. Além disso, o metal não produz faíscas, o que é uma característica muito importante para garantir sua utilização na estocagem de substâncias inflamáveis ou explosivas, bem como em caminhões-tanque de transporte de combustíveis. (ABAL, s.d)

A durabilidade dos produtos fabricados atualmente está muito associada a resistência à corrosão, o alumínio possui uma fina camada de oxido que protege o metal da oxidação tornando o assim um metal extremamente atrativo para aplicação em diversos seguimentos industriais e tecnológicos, além de ser um metal infinitamente reciclável, conforme dados apontados de 2011 a 2020 na Figura 7.

Figura 7 – Comparativos Mundiais do Índice de Reciclagem de Latas de Alumínio.



Fonte: ABAL (s.d)

Conforme assertiva a seguir:

A característica de ser infinitamente reciclável, sem perda de suas propriedades físico-químicas é uma das principais vantagens do alumínio. Todas essas características apresentadas conferem ao alumínio uma extrema versatilidade. Na maioria das aplicações, duas ou mais destas características entram em jogo, por exemplo: baixo peso combinado com resistência mecânica; alta resistência à corrosão e elevada condutibilidade térmica. (ABAL, s.d)

Vale ressaltar a característica de barreira desse metal, graças a essa versatilidade ele é empregado em praticamente em todos os tipos de embalagens, para proteger os alimentos e produtos contra a umidade e luz, conforme destacado abaixo:

O alumínio é um importante elemento de barreira à luz, é também impermeável à ação da umidade e do oxigênio, tornando a folha de alumínio um dos materiais mais versáteis no mercado de embalagens. (ABAL, s.d)

2.3.5 Conformação Mecânica; Discordâncias e Coeficiente Anisotrópico.

A habilidade de um metal se deformar plasticamente depende da habilidade das discordâncias se moverem, então o aumento da resistência e da dureza desse metal ocorre através do impedimento da movimentação das discordâncias, ou seja, conforme o material se deforma começa a ocorrer o encruamento, ou seja, aumento da resistência mecânica, endurecimento e mudança na forma dos grãos.

Toda a teoria da deformação plástica e endurecimento de metais é fundamentada na movimentação de discordâncias. Quando ocorre o movimento de muitas discordâncias, ocorre a deformação no material, essa quantidade de movimentos pode ser controlada pelo grau de deformação e/ou por tratamentos térmicos como recuperação ou recozimento. Quando os metais são deformados plasticamente, de toda energia gerada pelo trabalho, cerca de 5% é retida internamente na forma de defeitos, o restante é dissipado na forma de calor.

Outra variável muito importante nos processos de conformação de um material é seu coeficiente de anisotropia, um fenômeno no qual as propriedades de um

material variam dependente da direção em que são deformados, porém as inclusões têm um impacto maior nas movimentações das discordâncias (SANTOS, 2007).

2.3.5.1 Laminação

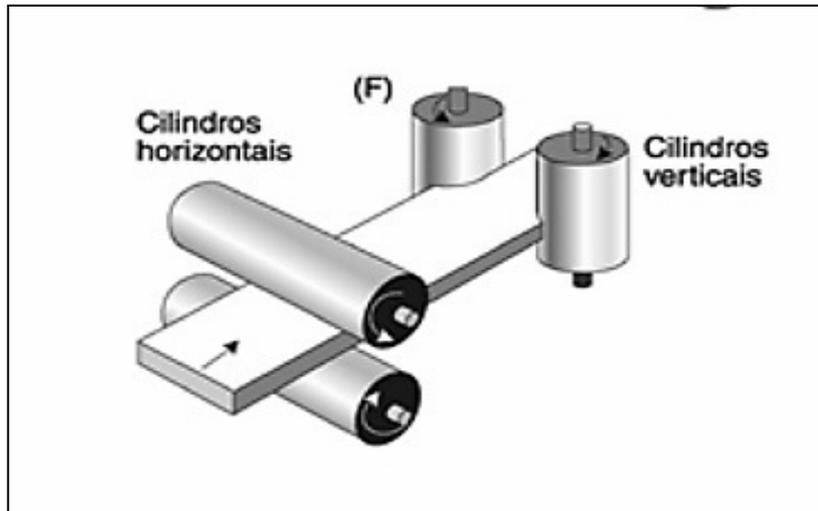
O alumínio é extremamente submetido a trabalhos de conformação mecânica como a laminação, exemplificado na Figura 8. Esse tipo de processo utiliza equipamentos complexos chamados de laminadores, que aplicam uma força no material com o objetivo de reduzir sua espessura e aumentar seu comprimento, de acordo com a assertiva abaixo:

É um processo de transformação mecânica que consiste na redução da seção transversal por compressão do metal, por meio da passagem entre dois cilindros de aço ou ferro fundido com eixos paralelos que giram em torno de si mesmos. (ABAL, s.d)

É fundamental definir a aplicabilidade que o material irá receber antes do mesmo sofrer o processo de laminação, pois cada produto precisa sair com uma espessura e formato ideal para atender os requisitos de aplicabilidade, podendo se afirmar que:

Esta seção transversal é retangular e refere-se a produtos laminados planos de alumínio e suas ligas, compreendendo desde chapas grossas com espessuras de 150 mm, usadas em usinas atômicas, até folhas com espessura de 0,005 mm, usadas em condensadores. Existem dois processos tradicionais de laminação de alumínio: laminação a quente e laminação a frio. Atualmente, a indústria também utiliza-se da laminação contínua. Os principais tipos de produtos laminados são: chapas planas ou bobinadas, folhas e discos. Esses semimanufaturados têm diversas aplicações em setores como transportes (carrocerias para ônibus, equipamentos rodoviários, elementos estruturais, etc.), construção civil (telhas, fachadas, calhas, rufos, etc.), embalagens (latas, descartáveis e flexíveis) e bens de consumo (painéis, utensílios domésticos, etc.). (ABAL, s.d)

Figura 8– Laminação



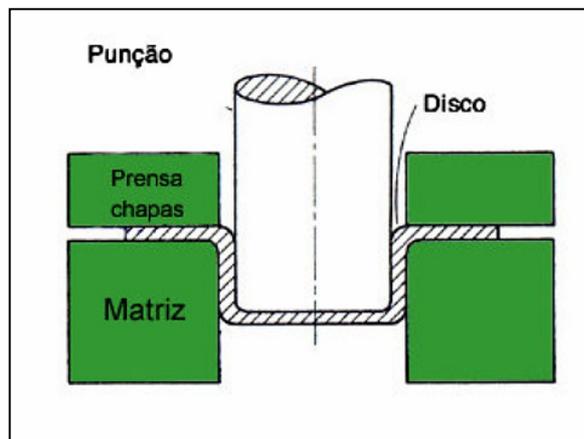
Fonte: ABAL (s.d)

2.3.5.2 Estampagem

Outro tipo de processo muito bem conhecido é a estampagem, que se utiliza de punção e uma matriz para dar forma ao seu produto desejado, deformando o disco de alumínio que deverá apresentar boas propriedades físicas para resistir ao processo de conformação. O processo de estampagem de forma esquemática está apresentado na Figura 9. De acordo com a Associação Brasileira do Alumínio:

Chapas e discos de alumínio são amplamente utilizados para repuxo e estampagem profunda. Nesse processo, o material é pressionado por um punção contra uma matriz, como acontece com os utensílios domésticos e latas de bebidas. Estas operações requerem material com grande plasticidade, alta ductilidade e com uma baixa taxa de encruamento. (ABAL, s.d)

Figura 9 – Estampagem do Alumínio



Fonte: ABAL (s.d)

Existem outros tipos de processos em que a aplicação do alumínio é muito comum; como extrusão, forjamento, usinagem, soldagem, isso mostra como esse material possui uma versatilidade muito grande, devido suas propriedades físicas e químicas.

2.4 INCLUSÕES

As inclusões são extremamente prejudiciais ao alumínio, são impurezas que afetam diretamente as propriedades do metal, definindo se então que elas:

São impurezas originadas durante o processo de fundição do material, “estas inclusões podem ser originadas a partir das escórias, do desgaste do refratário e dos produtos de adição durante o tratamento do metal (RIZZO, 2007, p. 223).

As inclusões podem ser classificadas quanto a origem, composição química e propósito.

2.4.1 Origem

Acerca da origem podem ser classificadas como endógenas e exógenas. Pode se definir como:

Inclusões Endógenas são formadas durante o resfriamento da fase líquida, que por cristalização, quer por reação química, a partir dos elementos do banho”. Ou seja, de origem interna, resultantes das transformações, reações e precipitações que ocorrem dentro de um metal. Exemplos, óxidos, sulfetos, nitretos, carbonetos e precipitação de cobre e chumbo. (RIZZO, 2007, p. 223).

No caso do alumínio os tipos de inclusões mais preocupantes são os óxidos de alumínio e magnésio, resultado das reações ocorridas no próprio metal, ou seja, de origem interna, e também existem as inclusões exógenas, podendo ser resultado de alguma reação ou arraste de materiais refratários; nas palavras de Rizzo:

Inclusões exógenas são formadas a partir de escórias ou de materiais refratários que são arrastados pelo líquido e retidas durante a solidificação”. Ou seja, de origem externa, resultante da entrada de escoria juntamente

com o metal, da erosão do refratário do forno, do material da calha de vazamento ou molde de solidificação. (RIZZO, 2007, p. 223).

Independente da origem, quando falamos de inclusão, deseja-se evitar ao máximo que esse tipo de impureza apareça na matriz do alumínio após a solidificação.

2.4.2 Composição Química

Acerca de sua composição podem ser classificadas em metálicas e não metálicas: Metálicas- Quando estão sob a forma de elemento puro, como chumbo ou cobre. Não metálicas- Quando estão na forma combinada, exemplos, óxidos, sulfetos, fosfetos carbonetos e nitretos.

Há muitos tipos de inclusões, mas as mais importantes e preocupantes são os óxidos de alumínio e magnésio. Estes óxidos são introduzidos no metal com o retalho carregado e são gerados no processo de fusão da carga pela exposição do metal líquido a atmosfera oxidante do forno; também podem ser originados quando a adição de elementos de liga, agitação do metal e nas operações de esquimagem". (ABAL, 2006, p.13)

Muito raramente é possível encontrar inclusões metálicas no alumínio, normalmente os metais estão reagidos na forma de óxidos.

2.4.3 Propósito

Podem ser classificados em desejáveis e indesejáveis e de acordo com Milani (2009, p.1) se classificam como "desejáveis- quando são produzidas propositalmente, com fim específico como no caso dos aços resulfurados, (free cutting steels). E ainda segundo o mesmo autor:

O enxofre é deliberadamente adicionado para permitir a formação de inclusões em excesso de sulfetos de manganês. A presença de sulfetos de manganês nos aços promove a redução da soldabilidade e provoca perda da ductilidade a frio, mas confere maior usinabilidade comparativamente àqueles com baixos teores de enxofre devido à produção de cavacos quebradiços criados pelas inclusões de enxofre. (MILANI, 2019, p.1)

Existem cartas Padrões que por meio de desenhos representativos de microestruturas indicamos tipos, formas, tamanhos, quantidades e distribuição das inclusões. Entre as diversas classificações, a mais representativa para os aços é a

JK, elaborada pela Jernkontoret- Associação dos Siderurgicos Suecos – e adotada pela ASTM – E45 (ASTM, 2013).

As Indesejáveis se classificam quando surgem de forma não intencional. No caso do alumínio as inclusões são sempre indesejadas.

2.4.4 Formação De Inclusões Não Metálicas

Segundo Milani, a formação das inclusões obedece a três estágios, sendo eles; primeiro a nucleação, onde ocorre a formação de uma nova fase como resultado da supersaturação de algum soluto, por exemplo o magnésio e o oxigênio ou em consequência do resfriamento do metal. O segundo estágio seria o crescimento da inclusão, essa impureza irá crescer até que o equilíbrio seja alcançado, ou seja não haja mais supersaturação daquele elemento no banho e por último a aglomeração dessas inclusões, provocadas pelo movimento do metal líquido devido à convecção térmica (movimento de matéria e um fluido) ou agitação forçada do banho, como descreve a assertiva a seguir:

A formação de inclusões não metálica obedece a três estágios:

1- Nucleação, onde são formados núcleos de uma nova fase como resultado de supersaturação por solutos como, por exemplo, o alumínio e o oxigênio, ou em consequência do resfriamento do metal. O processo de nucleação é determinado pela tensão superficial na fronteira inclusão-aço líquido. Quanto menor a tensão superficial, menos supersaturação é requerida para a formação do núcleo da nova fase. A nucleação é facilitada pela presença de uma outra fase (outras inclusões) no metal líquido. Nesse caso, a formação de uma nova fase é determinada pelo ângulo de contato (wetting angle) entre o núcleo e o substrato da inclusão.

2- Crescimento da inclusão, até que é alcançado o equilíbrio (ausência de supersaturação). No estado sólido, o crescimento de inclusões é um processo muito lento, então um certo nível de supersaturação não em equilíbrio pode permanecer retido, como, por exemplo, a martensita.

3- Coalescência e aglomeração. O movimento do aço líquido devido à convecção térmica ou agitação forçada provoca coalescência (união de inclusões líquidas) ou aglomeração (união de inclusões sólidas). O processo de coalescência/aglomeração é impulsionado pelo benefício energético obtido pelo decréscimo da superfície de 2 fronteira entre a inclusão e o aço líquido. As inclusões com energias de superfície mais elevadas têm maiores chances de união quando colidem. (MILANI, 2019, p.1)

Após a formação das inclusões, caso não seja realizado uma boa filtragem no metal, a fim de impedirem que essas impurezas sejam solidificadas na matriz, todos processos subsequentes que esse material for submetido estará suscetível a falhas.

2.4.5 Efeitos da Inclusão nos Processos de Deformação

Conforme citado anteriormente, sabemos que ductibilidade está diretamente associado a capacidade das discordâncias se movimentarem quando é submetido uma força no material. Como as inclusões atuam como concentradores de tensões, essas impurezas impedem a movimentação das discordâncias, afetando assim as propriedades mecânicas do material que está sofrendo um esforço, dependendo da quantidade e distribuição dessas inclusões na matriz, quanto maior a deformação maior chance do material falhar, conforme Rizzo:

A boa conformabilidade dos materiais utilizados na fabricação de produtos utilizando como matérias-primas os metais e suas ligas, depende da ductibilidade, do coeficiente de anisotropia e da concentração e distribuição das inclusões presentes no material. As inclusões atuam como concentradores de tensão e como sítios nucleadores da falha do material durante os processos de conformação mecânica ou durante a utilização das peças. (Rizzo, 2007, p. 223)

2.5 TRATAMENTO DO METAL LÍQUIDO: ALUMÍNIO

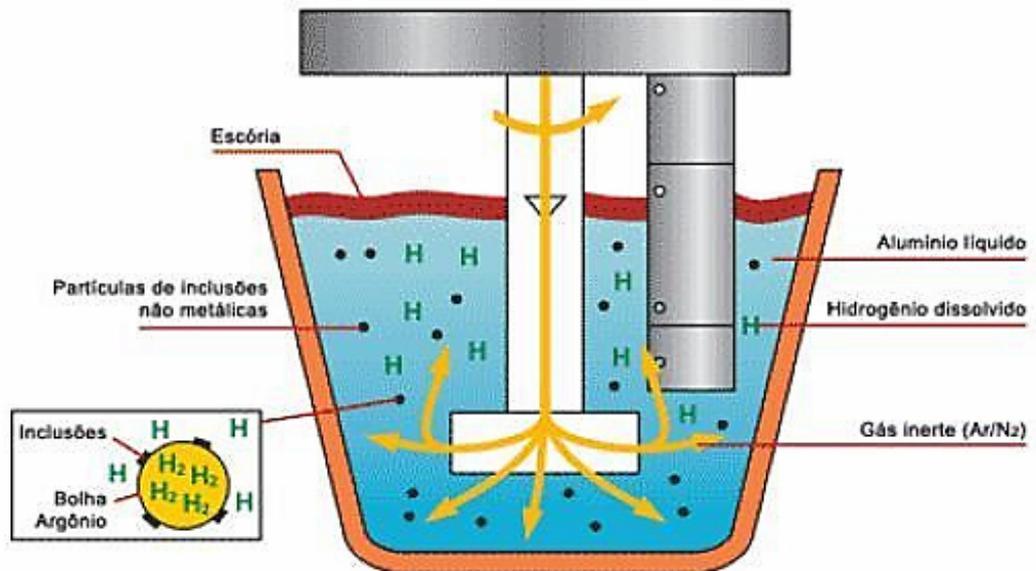
Para que o produto possa atender as propriedades necessárias de conformação no cliente, é fundamental ter um ótimo controle de qualidade durante o processo de fusão do alumínio, pois todas as etapas subsequentes que o material for submetido, dependerá exclusivamente da qualidade do metal durante o processo de fusão até a solidificação.

2.5.1 Minimização das Impurezas

2.5.1.1 Remoção do Hidrogênio

Esta operação é realizada através da fluxação com gás inerte ou sais, que tem o objetivo de formar bolhas para arrastar o hidrogênio dissolvido no metal líquido para a superfície da massa líquida dentro do forno. Há diversos tipos de gases que podem ser utilizados, como; nitrogênio, argônio e cloro. Na Figura 10 está ilustrada a remoção de Hidrogênio do metal líquido por meio de injeção.

Figura 10 – Remoção do hidrogênio



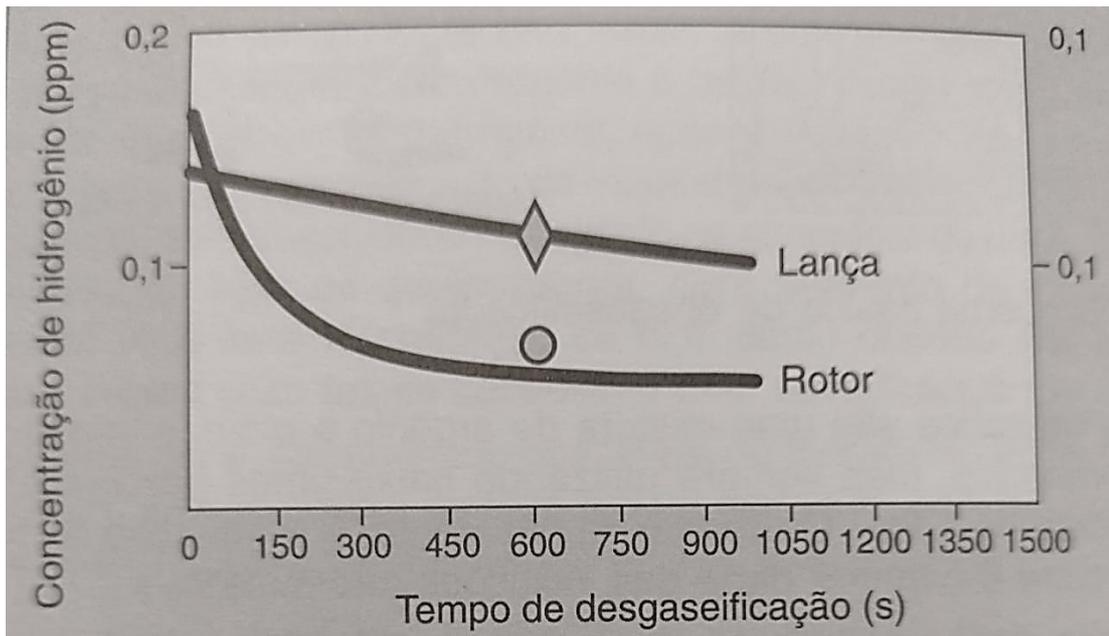
Fonte: Menegon (2012)

Existe uma diferença considerável entre esses gases, no caso do nitrogênio e argônio, eles não reagem com o alumínio, apenas formam bolhas que arrastam o hidrogênio e que também não tem nenhuma ação na remoção de inclusões não metálicas. Já o gás de cloro é muito utilizado, pois além de ter a capacidade de arrastar o hidrogênio ele também proporciona uma flotação das inclusões, o que acaba melhorando a limpeza do metal, em contrapartida o gás de cloro reage com o alumínio, gerando materiais particulados, que podem causar diversos problemas ambientais e provocar corrosão em partes metálicas adjacentes como; telhas, painéis, estruturas em aço etc. Em virtude das características desses gases e seus respectivos impactos, se tem adotado a prática de utilizar gases de nitrogênio ou argônio com baixos teores de cloro, entre 15 a 30%, conforme já apresentado a adição de cloro é importante para a flotação das inclusões não metálicas, melhorando a qualidade do metal.

A aplicação desses gases podem ser feitas de duas maneiras, injeção através de lanças (tubos) de grafite ou aço recoberto, que são operadas pelo forneiro que procura “varrer” toda a superfície do metal, ou a injeção pode ser feita por rotores que imergem no metal líquido, esse rotor é preso por uma haste com um furo interno para permitir que o gás chegue até o rotor de saída e se espalhe pelo metal, a principal vantagem dessa técnica é a velocidade de rotação desse equipamento, que é da ordem de 300 a 400 rpm gerando assim múltiplas pequenas bolhas, tornando essa pratica mais eficiente que a lança “manual”.

O gráfico da Figura 11 a seguir mede a eficiência do processo de desgaseificação de acordo com o tipo de injetor em um forno de 250kg:

Figura 11 - Processo de Desgaseificação.



Fonte: ABAL (2006)

Com relação a utilização de sais, a aplicação pode ser feita de duas maneiras, manualmente na superfície do metal líquido e com posterior agitação do banho, ou sobre o metal remanescente após a operação do último vazamento e que posteriormente recebera metal sólido ou líquido para recarregar o forno. Entretanto consideramos a prática da utilização de sais através de pastilhas uma prática obsoleta, segundo a Associação Brasileira do Alumínio (2006), essas pastilhas contêm sais de cloro [...] a mais utilizada é a de hexacloretano de eficiência duvidosa e inconsistente.

Entretanto há uma vantagem considerável no uso de sais em relação ao meio ambiente, pois as emissões atmosféricas são inferiores às do uso de gases reativos.

2.5.1.2 Remoção dos Metais Alcalinos

Conforme já mencionado os metais alcalinos são oriundos do processo de redução da alumina para a produção do alumínio primário. Com uma boa operação de fluxação com gás reativo cloro, é possível reduzir os níveis aceitáveis os teores

dos 3 principais elementos, são eles Na, Ca e Li. A Tabela a seguir mostra os teores médios dos metais alcalinos contidos no alumínio primário.

Tabela 4 – Teores médios dos metais alcalinos contidos no alumínio primário

Metais alcalinos	Metal primário (ppm)
Na	30-150
Ca	2-5
Li	0-20

Fonte: ABAL (2006)

Segundo a ABAL (2006), os teores de Na acima de 8 ppm tem efeitos danosos a laminação a quente, por provocar rachaduras laterais durante a laminação, e o Li em teores superiores a 5 ppm pode dificultar o vazamento do alumínio na forma de placas e tarugos, além de já ter sido diagnosticado a influência do lítio no aparecimento de manchas azuladas em folhas de alumínio.

2.5.1.3 Remoção de Inclusões

Através de algumas práticas industriais e mecanismos de filtragem, como ilustrado na Tabela 5, pode-se atingir excelentes níveis de remoção de impurezas no metal líquido. A Sedimentação é uma técnica de filtragem por meio da força de gravidade limitados a tamanhos de inclusões maiores do que 100 µm embora relativamente eficiente na remoção de inclusões o período de espera para a sedimentação acaba tornando dispendioso do ponto de vista de produtividade. A sedimentação é uma operação para ser realizada em forma de espera ou de fusão muitas empresas usam o tratamento com os seguintes objetivos: aumentar a vida da camada filtrante dos filtros que serão utilizados durante o vazamento do metal líquido e para minimizar o nível de impurezas no produto fundido, levando se em conta que eficiência de filtragem da ordem de 60-95 % podem ser obtidas

É bastante comum a prática de “descansar” o metal por 30 minutos para permitir que as inclusões mais pesadas que o metal líquido decante no forno (...) *o ideal é que* seja deixado cerca de 5% de metal líquido da capacidade do forno para as próximas fusões pois esse metal está com um grande volume de inclusões decantadas. (ABAL, 2006, p.44, grifo nosso)

A flotação, também conhecida como fluxação, é uma técnica muito importante para minimizar as inclusões e o teor de hidrogênio do metal líquido e aumentar a vida dos filtros utilizados durante o vazamento do metal, esta prática promove uma agitação do metal com conseqüente exposição a oxidação tendendo assim a gerar mais escoria, entretanto se for utilizado rotores é minimizado a oxidação do metal e como resultado uma menor geração de escoria

Acerca da Filtragem, existem diversos equipamentos/processos utilizados na indústria do alumínio para filtragem do metal são eles:

Tabela 5-Equipamentos/processos mais utilizados na filtragem do alumínio

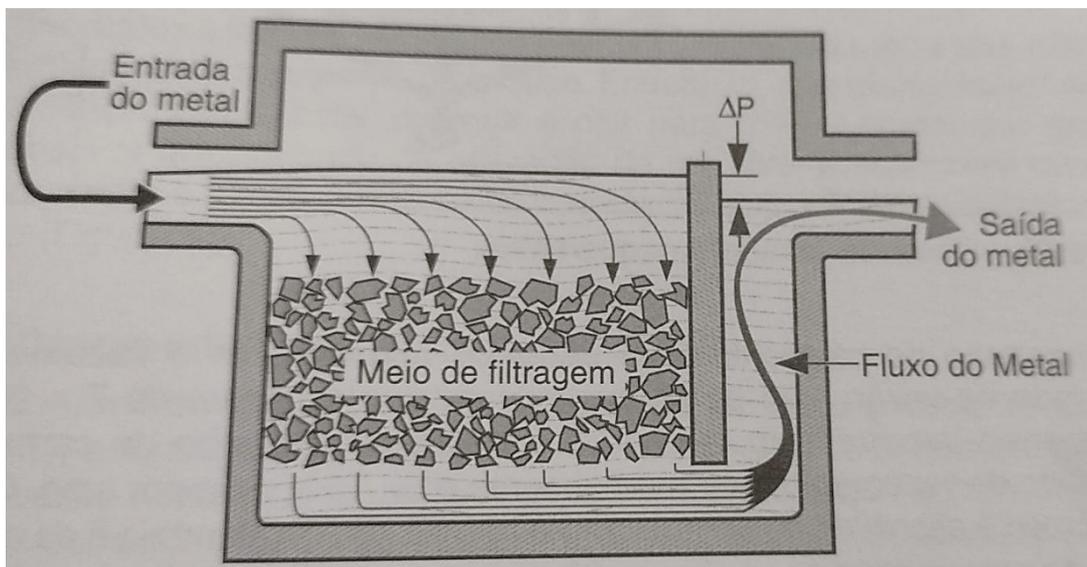
Equipamentos	Fabricante	Processo
Tecido de fibra de vidro	Vários	Processo que utiliza a filtragem por bolo (cake). Não tem eficiência boa e serve somente para reter inclusões grandes (acima de 100 micrômetros).
DBF (Deep Bed Filter)	Vários	Processo de filtragem por leito espesso. Possui várias camadas uniformes de alumina tabular, em dimensões de 3mm até 12mm de diâmetro. Indicado para altas vazões e recomendado para fabricação de produtos que exigem baixíssimos níveis de inclusões.
Filtro de espuma cerâmica (CFF)	Vários	Na forma de placas de espessura 50mm (2 polegadas). Diferentes tipos de granulometria, sendo as mais comuns 20, 30 e 40 ppi. Há filtros duplos que estão sendo desenvolvidos.
Filtro TKR	Tokyo Koyu Rozal	Processo de filtragem por tubo rígido. Definição de vazão de metal determina o número de tubos que devem compor a caixa de filtragem. Apresenta excelente eficiência de filtragem (~95%).

Fonte: ABAL (2006)

A eficiência desses filtros pode ser calculada com uma conta simples: ***amostra inicial menos amostra final dividido pela amostra inicial vezes 100***. A amostra inicial é retirada antes do processo de filtragem e a amostra final após o metal ter passado pelos filtros. A unidade de medida do nível de inclusões é feita com PoDFA

(Porous Disk Filtration Apparatus) uma técnica metalográfica, é mm^2/kg , sendo mm^2 a soma da área de todas as inclusões encontradas na massa filtrada expressa em kg. Dessa forma quanto maior essa unidade maior o número de inclusões, ou seja, mais sujo é o metal. Para compreender como é realizada a filtragem segue o exemplo de um filtro de leito espesso: como mostrado na Figura 12.

Figura 12 – Filtragem de Leito Espesso



Fonte: ABAL (2006)

A Tabela 6 mostra a eficiência de alguns tipos de filtros:

Tabela 6 – Eficiência de filtragem com contagem de particulados (como medida)

Tipo de filtro	Porcentagem de todas as partículas removidas
Tubos rígidos	>95%
Leito espesso	>90%
Espuma cerâmica	30-60%

Fonte: ABAL (2006)

O PoDFA Pode ser definido como:

Um processo desenvolvido e comercializado pelo Brown Boverly Co. basicamente, as amostras de formato padronizado, retiradas da calha de

vazamento, são refundidas e vazadas numa câmara de pressão. Na parte inferior desta câmara há um disco poroso, chamado de filtro PoDFA, os filtros têm um diâmetro constante de abertura de 11,8mm. A sobrepressão da câmara acima do líquido força o metal através do filtro [...]. A quantidade de inclusões é medida por meio de um microscópio. (ABAL, 2006, p.64)

3. METODOLOGIA

Para o desenvolvimento deste trabalho foi realizado uma pesquisa bibliográfica sobre ferramentas da qualidade, para uma revisão dos conceitos das ferramentas da qualidade aplicadas para diagnosticar problemas e propor melhorias no processo produtivo de uma indústria metalúrgica fabricante de alumínio e que já tem implantado o uso destas ferramentas. Posteriormente, realizou-se um estudo de caso nesta fábrica, utilizando o seguinte roteiro para análise do problema estudado:

- 1- Identificação do problema e decisão de aplicar a técnica de Análise de Falhas;
- 2- Retirada de amostras de itens segregados por defeitos de laminação;
- 3- Elaboração do Diagrama de Pareto;
- 4- Realização de Brainstorming, para compor resultados mais expressivos e listar as sugestões de soluções para o problema em estudo;
- 5- Elaboração do diagrama de Ishikawa ou diagrama de causa e efeito; para relacionar as possíveis causas para o problema;
- 6- Elaboração de Planilha com as causas prováveis já descartadas as que não tinham relação com o problema.
- 7- Elaboração do diagrama do 5 Porquês (5 W)
- 8- Elaboração do Plano de Ação.

4. APLICAÇÃO DAS TÉCNICAS DE ANÁLISE DE FALHA PARA IDENTIFICAR A CAUSA RAIZ DOS DEFEITOS DE INCLUSÃO NO ALUMÍNIO

O estudo de caso se deu durante uma falha ocorrida no processo de laminação, conforme os números de casos foram aumentando, concluímos que não se tratava de casos isolados, mas sim de uma crise. A primeira ação tomada foi retirar uma amostra dos materiais que já estavam segregados para avaliação, as amostras foram encaminhadas para o laboratório metalográfico para realizar as análises necessárias e emitir um laudo de caracterização do defeito, após o laudo foi constatado que se tratava de uma crise de inclusão geradas durante o processo de

fundição do material a partir daí a equipe de qualidade e processos começou uma investigação para identificar a causa raiz do defeito e gerar planos de ações para corrigir o mesmo. A primeira ferramenta de qualidade que nos auxiliou nessa etapa inicial foi o diagrama de Pareto pois o número de casos aumentou consideravelmente elevando o defeito de inclusão para o top 3 principais falhas da fábrica.

Demos início a investigação de forma mais detalhada fazendo o levantamento do maior número possível de informações, como quantidade de casos, datas de produção, turnos de trabalho, linhas de tratamento, insumos utilizados e características específicas do defeito como o tipo de inclusão e quantidade.

A Tabela abaixo nos auxiliou a ter um ponto de partida pegando como referência as características da inclusão e as fontes em potencial.

Tabela 7 – Tipos de inclusões em alumínio fundido.

Classificação	Tipos observados	Fontes potenciais
Não-metálicas exógenas	Partículas variadas de refratários	Degradação do refratário, cadinho, reações entre refratário/metálico
Não-metálicas “ <i>in situ</i> ”	Agrupamento de películas de MgO, Al ₂ O ₃ e agrupamentos de MgAl ₂ O ₄	Fusão, ligas; turbulência da transferência do metal
Sais haloides homogêneos	MgCl ₂ -NaCl-CaCl ₂ , etc.	Separação insatisfatória dos produtos de reação da fluxação
Partículas/sais	MgCl ₂ -NaCl-CaCl ₂ /MgO, etc.	Sais gerados durante a fluxação com cloro das ligas de magnésio, desprendimentos dos sistemas de manuseio do metal e dos filtros

Fonte: Adaptado de ABAL, 2006.

Após obter as informações iniciais foi marcada uma reunião com os principais profissionais envolvidos no processo produtivo desde operadores até engenheiros de processo, nosso objetivo era fazer com que os diversos pontos de vista e ideias se confrontassem a fim de dar um norte em direção a possível causa da origem de inclusões.

A segunda ferramenta que utilizamos foi o diagrama de Ishikawa, levantamos todas as variáveis do nosso processo que estavam relacionadas ao 6 M's (Matéria prima, Método, Mão de obra, Máquina, Medição e Meio ambiente). No primeiro momento todos que estavam participando da reunião contribuíram com diversas variáveis que poderiam estar associadas a essa falha e nenhuma hipótese foi descartada. Posteriormente focamos a conversa em cada uma das variáveis anteriormente sugeridas como causa raiz, o objetivo era eliminar aquelas que tínhamos a certeza que não estavam contribuindo para aquela crise.

Nas variáveis classificadas como matéria prima foram levantadas 5 hipóteses (Anteligas, Alumínio reciclado líquido, Alumínio primário, Alumínio reciclado sólido e Sucata) das quais duas foram eliminadas durante uma discussão mais técnica, sendo elas alumínio primário e sucata, o que levou a tomarmos essa decisão foi a confiabilidade no produto do nosso fornecedor de alumínio primário e a eficiência do controle de sucata do nosso processo.

Foram classificadas três variáveis como método sendo elas: montagem de carga fora do especificado, tratamento do banho e tempo de repouso do banho, apenas uma foi desconsiderada no primeiro momento, como existe um procedimento muito rigoroso em cima da montagem de carga visando a produtividade e principalmente a segurança dos profissionais sabíamos que a possibilidade dessa variável estar impactando na falha identificada era praticamente nula.

Variáveis que foram associadas a mão de obra como: Limpeza dos fornos, quantidade de sal, esquimagem do banho e condições das ferramentas de processo, foi considerada somente duas variáveis sendo elas a limpeza e quantidade de sal, já que as ferramentas naquele período em específico estavam em ótimas condições de uso e graças as filmagens feitas por câmeras espalhadas pelo processo certificamos que a esquimagem do banho foi realizada corretamente, conforme o procedimento.

Sempre quando ocorre algum tipo de falha é muito comum estar associados as condições do equipamento, foram levantadas 4 variáveis classificadas como

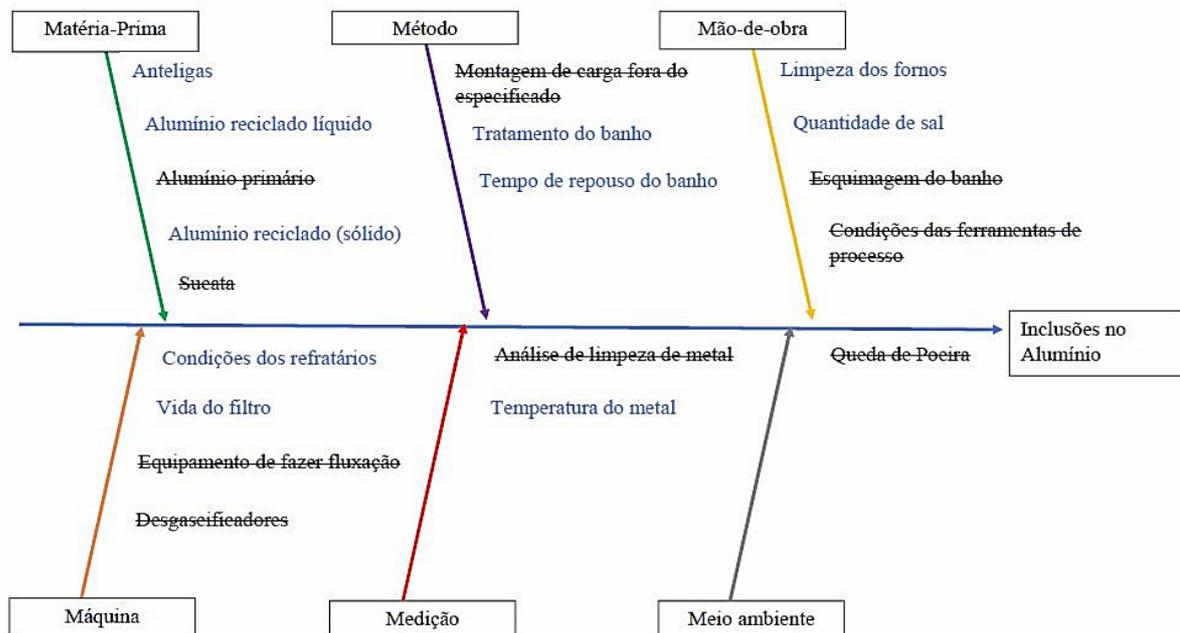
maquina, sendo elas: condições dos refratários, vida do filtro, equipamento de fazer fluxação e desgaseificadores; porém apenas as condições dos refratários e a vida do filtro seguiram como possíveis causas que poderiam estar contribuindo para os casos de inclusão, já que o equipamento de fazer fluxação e os desgaseificadores estão mais ligados a remoção de hidrogênio do metal.

Os equipamentos que fazem as medições das variáveis do processo são extremamente importantes, neste caso foi levantado duas hipóteses, sendo elas: a temperatura do metal e a análise de limpeza de metal, entretanto a análise não poderia ser a causa raiz mas poderia estar ocorrendo uma falha para certificar que o meu metal estivesse limpo, por isso levantamos essa possibilidade, mas no intuito de identificar a causa raiz da inclusão ela foi descartada.

Durante o processo produtivo é fundamental que haja um controle a fim de impedir que o meu metal líquido seja contaminado por partículas dispersas no meio ambiente como poeira, como estavam tendo algumas obras nas proximidades do processo levantamos a hipótese de queda de poeira no metal líquido, porém mais tarde foi descartado, já que as obras só foram iniciadas depois que 80% das placas rejeitadas já estavam produzidas.

A imagem a seguir descreve a utilização da ferramenta de análise de falha Diagrama de Ishikawa:

Figura 13 – Diagrama de Ishikawa



Fonte: Os autores (2021).

4.1 ANÁLISE DO PROCESSO: POSSÍVEIS CAUSAS

Após a utilização do diagrama de Ishikawa, levantamos 10 possíveis causas para serem investigadas de forma mais aprofundada em cada uma das causas, foi tomada uma ação e designada a um responsável para certificar se aquela causa poderia ou não ser a raiz dos casos de inclusão, foi estabelecido um prazo de 3 dias para que todos pudessem concluir as análises e trazer um resultado para a reunião futura.

A Tabela abaixo descreve as possíveis causas, as ações de investigação, o responsável pela averiguação, o prazo de conclusão e o resultado da análise.

Tabela 8 – Possíveis causas.

Possíveis Causas	Ações	Responsáveis	Prazos	Resultados
Anteligas	Realizar análise metalográfica, para atestar qualidade das anteligas	A (laboratório)	3 dias	Resultado do laboratório (anexo A), nenhuma NC (Não Conformidade) detectada, material dentro dos padrões aceitáveis
Alumínio reciclado líquido	Realizar análise metalográfica, para atestar qualidade do Alumínio reciclado líquido	A (laboratório)	3 dias	Resultado do laboratório (anexo B), foi evidenciado que o metal possui uma quantidade alta de impurezas
Alumínio reciclado sólido	Realizar análise metalográfica, para atestar qualidade do Alumínio reciclado sólido	A (laboratório)	3 dias	Resultado do laboratório (anexo A), nenhuma NC detectada, material dentro dos padrões aceitáveis
Tratamento do banho	Avaliar procedimentos, para verificar se ocorreu algum desvio durante processo	B	3 dias	Nenhuma NC detectada
Tempo de Repouso do banho	Analisar o tempo de repouso das fusões	B	3 dias	O tempo de repouso estipulado pelo processo está sendo cumprido, porém seria válido analisar um aumento no tempo de repouso
Limpeza dos fornos	Verificar na planilha de controle, a realização e efetividade da limpeza dos fornos, conforme procedimento	B	3 dias	Nenhuma NC detectada
Quantidade de sal	Verificar a quantidade de sal utilizado nas fusões	C	3 dias	Nenhuma NC detectada
Condições dos	Verificar as condições das calhas e refratários	C	3 dias	Nenhuma NC detectada

refratários				
Vida do filtro	Verificar a vida do filtro	C	3 dias	Nenhuma NC detectada
Temperatura do metal	Verificar a temperatura do metal durante o processo	C	3 dias	Foi evidenciado um desvio no equipamento que marca a temperatura do metal. Através de uma simples verificação com um termômetro a laser, verificou-se que a temperatura do banho estava acima da indicada pelo equipamento.

Fonte: Os autores (2021).

Passado o prazo de investigação das possíveis causas levantadas pelo diagrama de Ishikawa, a equipe se reuniu para discutir os resultados a fim de identificarmos a causa raiz dos casos de inclusão no alumínio, analisando a Tabela 8 verificamos que apenas três variáveis apresentavam potencial de causa raiz, sendo elas: o alumínio reciclado líquido, o tempo de repouso do banho e a temperatura do metal, para avançarmos nas investigações e sermos mais precisos fizemos a utilização de uma outra ferramenta de análise de falha os 5 porquês.

A Tabela a seguir demonstra a utilização dessa ferramenta:

Tabela 9 – Os 5 Porquês.

Causas	1 PQ	2 PQ	3 PQ	4 PQ	5 PQ
Alumínio reciclado líquido	Quantidade alta de impurezas	Não há especificação de quantidade máxima aceitável de impurezas para recebimento do material	X	X	X
Tempo de repouso do banho	Amostra retirada durante transferência e após tratamento, está com alto teor de impureza	Várias partículas não se decantaram	Tempo de repouso do banho não é suficiente	X	X
Temperatura do metal	Equipamento marcando temperatura incorreta	Uma peça do equipamento estava comprometida	Não foi realizado a manutenção preventiva	Cumprimento das metas de produção	X

Fonte: Os autores (2021).

Graças a metodologia dos 5 porquês conseguimos chegar a três causas raízes que estavam contribuindo com os casos de inclusão no nosso processo produtivo, isso não seria possível sem a contribuição de toda a equipe que se manteve focada para resolvermos esse problema, o próximo passo sem dúvidas o mais importante foi gerar planos de ação para corrigirmos os desvios anteriormente apresentados.

A Tabela a seguir descreve as causas raízes, os planos de ações para correções dos desvios identificados, os responsáveis, os prazos para conclusão e o status de cada uma das ações.

Tabela 10 – Plano de ação

Causa Raiz	Plano de ação	Responsável	Prazo	Status
Não há especificação de quantidade máxima aceitável de impurezas para recebimento do material	Elaborar procedimento que determina a quantidade máxima de impurezas aceitáveis por carga recebida.	A	1 semanas	Concluído
	Treinamento dos operadores no novo procedimento	A	3 semanas	Concluído
Tempo de repouso do banho não é suficiente	Modificar procedimentos do processo para aumentar o tempo de repouso do banho em 50%	B	1 semanas	Concluído
	Treinamento dos operadores no novo procedimento	A	3 semanas	Concluído
Uma peça do equipamento estava comprometida	Realizar troca da peça comprometida	C	Imediato	Concluído

Fonte: Os autores (2021).

Após a conclusão dos planos de ação é fundamental que haja um acompanhamento da equipe de processos e de qualidade a fim de certificar que a falha anteriormente evidenciada foi solucionada e também para que não haja o surgimento de novas falhas já que houve alteração em algumas partes do processo.

Depois de concluirmos todas essas etapas verificamos a importância das ferramentas de análise de falha no gerenciamento de uma crise no processo produtivo, com o auxílio de uma boa equipe e utilizando de maneira correta as ferramentas como: Diagrama de Pareto, Diagrama de Ishikawa e 5 Porquês, conseguimos resolver as falhas que estavam impactando na performance da fábrica.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

As ferramentas de análise de falha são extremamente importantes para o desenvolvimento e melhorias de processos produtivos, sempre que um ponto crítico se apresenta temos aí uma oportunidade de melhoria contínua, mas para isso é fundamental que todas as variáveis e causas dos desvios sejam compreendidas e tratadas com eficiência; utilizando as ferramentas apresentadas nesse trabalho é bem provável que o sucesso na investigação nas causas de efeitos seja alcançado desde que utilizadas de maneira correta e haja a contribuição mútua de todos os envolvidos no processo produtivo.

O alumínio é um metal muito complexo possui diversas propriedades físicas e mecânicas o que o torna como um dos materiais com uma gama de aplicabilidade muito grande no mercado atual como produção de latas, automotivo, filme protetor e embalagens para produtos perecíveis entre outros. Uma das principais vantagens do alumínio é que é um material infinitamente reciclável, nos últimos 5 anos o percentual de latas recicladas de alumínio no Brasil foi acima de 95% no ano de 2020 o número chegou próximo de 97,4%. A tendência é que o mercado do alumínio cresça ainda mais nos próximos anos por isso é fundamental que haja um investimento em pesquisas para sabermos ainda mais sobre as limitações e propriedades deste metal, aumentando sua eficiência e aplicabilidade e reduzindo as falhas ocorridas no mercado.

As inclusões são uma das principais causas que geram falhas nos processos de conformação mecânica que utilizam alumínio, esse tipo de defeito é gerado durante a fusão do metal por isso é extremamente importante que haja um tratamento de limpeza muito eficiente. Essas impurezas são partículas extremamente duras prejudiciais não apenas para a matriz metálica, mas também para o ferramental que irá processar este material, no caso da laminação é muito

comum as inclusões danificarem os cilindros e isso acaba gerando custos e perdas para a empresa.

Durante o tratamento do metal líquido uma série de fatores podem interferir no processo de eficiência de limpeza por isso existem normas e procedimentos que devem ser seguidos, o principal objetivo do tratamento do banho é remover as impurezas como o hidrogênio, metais alcalinos e inclusões, para que isso ocorra com efetividade é extremamente importante que os equipamentos e insumos utilizados durante o tratamento do metal estejam dentro dos padrões de qualidade.

É muito comum na vida pessoal que as pessoas reajam de formas diferentes quando se deparam com algum problema, cada um tem uma forma de pensar ou agir, outros mais impulsivos agem sem pensar, para que isso não ocorra dentro das empresas principalmente durante uma crise devemos utilizar as ferramentas de análise de falha, como vimos no trabalho apresentado umas das principais vantagens destas ferramentas é que elas nos ajudam a formar uma linha de raciocínio e auxiliam na direção do próximo passo a ser dado; de forma simples e bem objetiva ferramentas como Ishikawa e 5 porquês nos proporcionaram uma visão ampla do problema que estava sendo vivenciado no momento, os casos de inclusões na matriz do alumínio. Saber utilizar a ferramenta de maneira correta não é o único fator importante, mais imprescindível é a participação do maior número de pessoas possíveis durante a investigação, aumentando os pontos de vista e variáveis que podem estar impactando de forma negativa, como foi apresentado anteriormente no trabalho após o levantamento de diversas possíveis causas uma investigação mais detalhada se faz necessária, por isso profissionais técnicos e capacitados devem acompanhar o desenvolvimento deste trabalho, pois algumas sugestões podem ser descartadas com alguns diálogos mais técnicos, como foi o caso da eliminação do alumínio primário e montagem de carga fora do especificado no caso apresentado. Para restringirmos ainda mais as possíveis causas análises mais aprofundadas podem ser realizadas, como metalografia e inspeção de equipamentos e procedimentos, atuando desta forma foi possível chegarmos a três possíveis causas que posteriormente foram tratadas, resolvendo as falhas que estavam ocorrendo.

De modo geral as ferramentas de análise de falha podem e devem ser aplicadas em todos os cenários possíveis de problemas e falhas que estejam ocorrendo, sua simplicidade de utilização e eficiência nos resultados as tornam

imprescindíveis para soluções de problemas e melhorias contínuas, para as empresas isso representa redução de custos e aumento na produtividade, como a competitividade no mercado está cada vez maior as empresas que quiserem se manter e continuar crescendo devem se atentar a corrigir suas falhas e perdas; com este relatório foi possível evidenciar como as ferramentas de análise de falha auxiliam na identificação de causas de falhas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABAL. **Alumínio - Cadeia Primária.** (s.d.). Disponível em:
<http://abal.org.br/aluminio/cadeia-primaria/>. Acesso em agosto de 2021.

ABAL. **Alumínio - Características Químicas e Físicas.** (s.d.). Disponível em:
<http://abal.org.br/aluminio/caracteristicas-quimicas-e-fisicas/>. Acesso em agosto de 2021.

ABAL. **Alumínio: Processos De Produção – Estampagem.** (s.d.). Disponível em:
<https://abal.org.br/aluminio/processos-de-producao/estampagem/>. Acesso em agosto de 2021.

ABAL. **Alumínio: Processos de Produção – Laminação.** (s.d.). Disponível em:
<https://abal.org.br/aluminio/processos-de-producao/laminacao/>. Acesso em agosto de 2021.

ABAL. **Guia técnico do alumínio**: tratamento do metal líquido: vol 9 – 1ªed – São Paulo: Associação Brasileira do Alumínio, 2006.

ALVES, Vera L. de S. **Gestão da qualidade ferramentas utilizadas no contexto contemporâneo da saúde**. 2 ed. – São Paulo: Martinari, 2012.

ASTM - **Standard Test Methods for Determining the Inclusion Content of Steel - ASTM E45 – 13**. (s.d.) Disponível em: <https://www.astm.org/DATABASE.CART/HISTORICAL/E45-13.htm>. Acesso em agosto de 2021

BAIO, Cintia. **Clique Ciência**: Qual é o elemento químico mais abundante no Universo?. Tilt Uol, 2016. Disponível em: <https://www.uol.com.br/tilt/ultimas-noticias/redacao/2016/04/05/clique-ciencia-qual-e-o-elemento-quimico-mais-abundante-no-universo.htm>. Acesso em agosto de 2021.

BASTIANI, Jason. **Diagrama de Ishikawa**. Qualiex – Blog da Qualidade, 2018. Disponível em: <https://blogdaqualidade.com.br/diagrama-de-ishikawa-2/>. Acesso em agosto de 2021.

FARIA, Caroline. **Diagrama de Pareto**. InfoEscola, (s.d.). Disponível em: https://www.infoescola.com/administracao_/diagrama-de-pareto/. Acesso em agosto de 2021.

GODEFROID, Leonardo B.; CÂNDIDO, Luiz C. **Análise de Falhas**. Cursos ABM, 2015.

JUNIOR, Adair Borro; NOCERA, Eduardo. **WEBINAR - ABIMAQ/Análise de Falha em Componentes**, 2020. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=3iGyyGVbFfY>. Acesso em agosto de 2021.

MARCONDES, Jose S. Diagrama ou Gráfico de Pareto: Ferramenta da Gestão da Qualidade, **Blog gestão de segurança privada**. (s.d). Disponível em: <https://gestaodesegurancaprivada.com.br/diagrama-ou-grafico-de-pareto-conceito/>. Acesso em outubro de 2021.

MENEGON, Danusa R. **Estudo da Eficiência da Gaseificação e desoxidação com Nitrogênio na Fusão de Ligas de Alumínio SAE 305**. Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Química da Universidade de Caxias do Sul, 2012.

MILANI, Carlos. **Inclusões Não Metálicas Nos Aços**. Metalurgista Industrial, 2019. Disponível em: <http://metalurgistaindustrial.com.br/artigos.asp?tipo=E>. Acesso em agosto de 2021.

NAPOLEÃO, Bianca M. **5 Porquês**. Ferramentas da Qualidade, 2019. Disponível em: <https://ferramentasdaqualidade.org/5-porques/>. Acesso em agosto de 2021.

PANDE, Peter S. **Estratégia Seis Sigma**: como a GE a Motorola e outras grandes empresas estão aguçando seu desempenho. Rio de Janeiro, Qualitymark Ed., 2001.

PIMENTEL, L. C. S. **Aplicação de ferramentas da qualidade para o controle e melhoria da taxa de paradas no processo de laminação**. 2016. Monografia (Graduação em Engenharia de Produção) – Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas, Universidade Federal de Ouro Preto, João Monlevade, 2016.

RIZZO, Ernandes Marcos da S. **Processos de Laminação dos aços: uma introdução**. Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração, 2007.

RIZZOTO, Robson. **Análise de falhas: o que é e qual a importância na indústria?**. FOCCOERP, 2018. Disponível em: <https://www.foccoerp.com.br/gestao-industrial/analise-de-falhas/>. Acesso em agosto de 2021.

SANTOS, Rezende G. dos S. **Transformações de Fases em Materiais Metálicos**. Unicamp, 1ª edição, 2007. Disponível em: https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=eL2uDgAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA11&dq=Discord%C3%A2ncias+em+materiais+met%C3%A1licos&ots=iEUkOdoLS3&sig=i23fPFrvdGS3xEdz9uZY_xDyT2Y&redir_esc=y#v=onepage&q=Discord%C3%A2ncias%20em%20materiais%20met%C3%A1licos&f=false. Acesso em outubro de 2021.

SETLIK, Felipe. **5 porquês: O que é, como funciona e como aplicar esse método incrível!** Blog QualyTeam, 2021. Disponível em: <https://qualyteam.com/pb/blog/o-que-e-e-como-aplicar-tecnica-dos-5-porques-na-empresa/>. Acesso em agosto de 2021.

SGOTTI, Carlos Eduardo. **Investigação do Comportamento de Defeitos em Engrenagens Cilíndricas de Dentes Retos Utilizando Monitoramento da Condição**. Ilha Solteira, São Paulo, 2018.