

**UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS - UNISINOS
UNIDADE ACADÊMICA DE GRADUAÇÃO
CURSO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

FÁBIO DOS SANTOS BUENO

**APLICAÇÃO DA METODOLOGIA SEIS SIGMA PARA REDUÇÃO DOS CUSTOS
DE PRODUÇÃO EM PROCESSO DE SINTERIZAÇÃO CONTÍNUA EM UMA
METALÚRGICA MULTINACIONAL**

**São Leopoldo
2021**

FÁBIO DOS SANTOS BUENO

**APLICAÇÃO DA METODOLOGIA SEIS SIGMA PARA REDUÇÃO DOS CUSTOS
DE PRODUÇÃO EM PROCESSO DE SINTERIZAÇÃO CONTÍNUA EM UMA
METALÚRGICA MULTINACIONAL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Produção, pelo Curso de Engenharia de Produção da Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS).

Orientador: Prof. Ms. Renato Luis Valente de Boer

São Leopoldo

2021

Para minha filha Sofia, em acreditar que todos os seus sonhos são possíveis.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus por me proporcionar saúde e as condições necessárias para superar as adversidades e me iluminar nessa trajetória.

Agradeço a minha família por me prestarem todo apoio e incentivo necessário para vencer esta etapa.

Agradecimento especial a minha esposa e meu amor Juliana dos Santos Castro, que por muitas vezes supriu a minha ausência na educação de nossa filha e teve um papel fundamental nas minhas motivações. A minha Sofia Castro Bueno, meu bem mais precioso e com certeza é a maior realização da minha vida.

Agradeço de forma especial ao Mestre Renato Luís Valente, pela inspiração, as orientações que foram essenciais para este trabalho, e dizer que foi uma honra ter minha trajetória acadêmica enriquecida com seu conhecimento.

Agradeço meus colegas de Unisinos do Curso de Engenharia de Produção, pelo companheirismo, pelo sacrifício de ser estudante, nas realizações de trabalho e discussões, em especial aos amigos que levo além do ambiente acadêmico, Andrew Prado, Cristian Oliveira, Mateus Braga e Ricardo Carvalho.

Aos professores da Unisinos que contribuíram não somente na parte técnica, mas essencialmente com os exemplos de cidadãos.

Agradeço a Universidade Unisinos, pela estrutura, suporte disponível e as condições necessárias para nos tornar bons profissionais, deixo aqui meu compromisso em honrar a instituição.

RESUMO

O objetivo do trabalho passa pela aplicação da metodologia Seis Sigma em uma metalúrgica multinacional, no setor de fabricação de componentes MIM, no setor de metalurgia, com enfoque no controle de variáveis de processo, reduzindo custos relacionados a sucata pelo modo de falha Carbono alto.

O trabalho foi desenvolvido seguindo as etapas da metodologia DMAIC, sendo a primeira etapa a definição do tema a ser abordado, estruturação da equipe de trabalho e definição dos entregáveis do projeto. Na segunda etapa, foi explorado a medição do problema, validando o sistema de medição existente por meio da ferramenta MSA, mapeamento de processo e estudos relacionados ao desempenho de processos. Na terceira etapa, foi realizado a análise do problema, identificando os potenciais causadores do modo de falha estudado, realização de um plano de ação para endereçar a correção dos potenciais causadores do problema e a realização de um projeto de experimento fracionado. Nas últimas etapas de melhoria e verificação das ações definidas em projeto, foi implementado e avaliado a eficácia das ações definidas na terceira fase.

O resultado obtido neste trabalho foi a redução dos índices de sucata a partir da melhoria e controle dos parâmetros de processo, reduzindo a variabilidade, com isso foi possível reduzir aproximadamente 90% do modo de falha, gerando uma economia para companhia de R\$ 2 milhões.

Palavras-chave: Seis Sigma; DMAIC; Projetos de Experimentos; Sinterização Contínua.

ABSTRACT

The objective of the work is the application of the Six Sigma methodology in a multinational metallurgical sector, in the MIM component manufacturing sector, in the metallurgy sector, focusing on the control of process variables, reducing costs related to scrap by the high carbon failure mode.

The work was developed following the steps of the DMAIC methodology, the first step being the definition of the topic to be addressed, structuring the work team and defining the project deliverables. In the second stage, the measurement of the problem was explored, validating the existing measurement system through the MSA tool, process mapping and studies related to process performance. In the third step, the problem analysis was carried out, identifying the potential causes of the failure mode studied, carrying out an action plan to address the correction of the potential causes of the problem and carrying out a fractional experiment project. In the last stages of improvement and verification of the actions defined in the project, the effectiveness of the actions defined in the third phase was implemented and evaluated.

The result obtained in this work was the reduction of scrap rates from the improvement and control of process parameters, reducing variability, with this it was possible to reduce approximately 90% of the failure mode, generating savings for the company of BRL 2 million .

Keywords: Six Sigma; DMAIC; Experimental Projects; Continuous Sintering.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Carta de Controle.....	33
Figura 2 – Diagrama de Causa e Efeito	34
Figura 3 – Diagrama de Pareto	35
Figura 4 – Estratificação.....	36
Figura 5 – Simbologia do Fluxograma.....	36
Figura 6 – Folha de Verificação.....	37
Figura 7 – Gráfico de Correlação	38
Figura 8 – Histograma	39
Figura 9 – Etapas processo MIM.....	42
Figura 10 – Processo de fabricação indicado de acordo com o volume de peças e complexidade do componente.....	43
Figura 11 – Configuração básica da Injetora.....	46
Figura 12 – Configuração Bico de Injeção.....	46
Figura 13 - Injeção	47
Figura 14 – Medição.....	47
Figura 15 – Recuo da Unidade de Injeção	48
Figura 16 – Abertura do Molde.....	48
Figura 17 - Ejeção	48
Figura 18 – Modelo teórico de extração do ligante.....	52
Figura 19 – Estágio inicial da formação de pescoços	53
Figura 20 – Estágios de densificação do material	54
Figura 21 - <i>Layout</i> do Setor.....	62
Figura 22 – Fluxograma Produção MIM	63
Figura 23 - Produtos.....	63
Figura 24 – Diagrama de Causa e Efeito: Carbono Alto.....	72
Figura 25 – Fluxograma Sinterização.....	74
Figura 26 – Diagrama de Afinidade com Priorização	77
Figura 27 – Estrutura MSA Aninhado	81

LISTA DE FOTOGRAFIAS

Fotografia 1 – Exemplo de Forno de Sinterização Contínua	64
Fotografia 2 – Barca de Transporte.....	65
Fotografia 3 – Peça Marrom.....	66
Fotografia 4 – Analisador de Carbono LECO C744	79
Fotografia 5 – Presença de Polímero Pré-Sinter	93
Fotografia 6 – Presença de Polímero no Crossconveyor	93
Fotografia 7 – Carburização Top Cover	94
Fotografia 8 – Carburização das Resistência de Sinterização	94
Fotografia 9 – Obstrução parcial de Polímero Throttle Valve	95
Fotografia 10 – Obstrução total de Polímero no Duto de Exaustão	95
Fotografia 11 – Vista lateral Projeto 2D forno FC08.....	96
Fotografia 12 – Posição Correta do Refratário	97
Fotografia 13 – Montagem Incorreta do Refratário.....	97
Fotografia 14 – Vazamento no Termopar	98
Fotografia 15 – Vazamento na válvula de N2 aquecido	98
Fotografia 16 – Região de vazamento na gaxeta Módulo 1	99
Fotografia 17 – Ensaio de Tração para Validação Retorno de Produção	100
Fotografia 18 – Procedimento Atualizado.....	111

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Custo de Sucata Mensal 2019 em %.....	16
Gráfico 2 – Custo de Sucata Mensal 2020 em %.....	17
Gráfico 3 – Principais Modos de Falha 2019 em R\$	18
Gráfico 4 – Principais Modos de Falha 2020 em R\$	18
Gráfico 5 – Custo de Sucata Mensal 2021 em %.....	19
Gráfico 6 – Principais Modos de Falha 2021 em R\$	20
Gráfico 7 – Comparativo Custos Sucata entre Anos	21
Gráfico 8 – Indicador de Sucata Carbono Alto	68
Gráfico 9 – Estratificação Forno % Carbono Alto	70
Gráfico 10 – Cronograma etapas DMAIC	71
Gráfico 11 – Pareto Priorização	78
Gráfico 12 – Análise Gráfica MSA Medição % Carbono.....	84
Gráfico 13 – Boxplot de Métodos de Preparação de Amostra.....	85
Gráfico 14 – Diferença entre Médias Método de Preparo	86
Gráfico 15 – Diferença entre Desvios Método de Preparo	86
Gráfico 16 – Carta I Variabilidade entre 2019 e 2021	87
Gráfico 17 – Relatório Capacidade % Carbono 2021	90
Gráfico 18 – Curva Tensão x Deformação Aços 8740, 8620 e 42CrMo4.....	101
Gráfico 19 – Efeitos Padronizados Carbono	104
Gráfico 20 – Gráfico de Resíduo Carbono	105
Gráfico 21 – Normalidade de Dados Medições Experimento	105
Gráfico 22 – Efeitos Principais por Fator	106
Gráfico 23 – Fatores Principais	108
Gráfico 24 – Interação entre Fatores Principais	108
Gráfico 25 – Carta I-AM Comparação de Períodos pós Testes	113
Gráfico 26 – Relatório Capacidade % Carbono Período DOE 2022	115
Gráfico 27 - Relatório Capacidade % Carbono Período Pós melhorias 2022	117
Gráfico 28 – Indicador % Custo de Sucata Carbono 2021 versus 2022	119

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Quadro Simplificado de Conversão Sigma	27
Quadro 2 – Plano de Atividades do Trabalho.....	59
Quadro 3 – Mapeamento do Processo - SIPOC	69
Quadro 4 – Potenciais Causas.....	76
Quadro 5 – Causas Analisadas.....	107
Quadro 6 – Plano de Ação	110

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Pesquisa do assunto Seis Sigma	24
Tabela 2 – Pesquisa do assunto Seis Sigma e sinterização contínua	24
Tabela 3 – Projeção de vendas produtos MIM até 2026 em todo mundo.	43
Tabela 4 – Técnicas de extração e suas vantagens e desvantagens	49
Tabela 5 – Temperatura remoção de ligantes secundários.....	51
Tabela 6 – Medições Realizadas pelos Tecnicos.....	82
Tabela 7 – Resultado R&R Medição % Carbono	83
Tabela 8 – Estatística Descritiva Dados de Medição	85
Tabela 9 – Estatística Ajuste de Distribuição	89
Tabela 10 – Cronograma de Manutenção Forno FC08.....	92
Tabela 11 – Propriedade Mecânicas.....	100
Tabela 12 – Parâmetros de Processo	102
Tabela 13 – Resumos dos Experimentos.....	103
Tabela 14 – Resultado DOE Análise de Variância	103
Tabela 15 – Teste de Hipóteses uma Variância.....	112
Tabela 16 – Estatística Ajuste de Distribuição Período DOE	114
Tabela 17 - Estatística Ajuste de Distribuição Período Melhorias	116
Tabela 18 – Comparação entre Períodos.....	118
Tabela 19 – Resumo Índices de Processo pós Melhorias.....	118

LISTA DE SIGLAS

5W1H	<i>What, Why, Where, When, Who, How.</i>
CNC	Comando Numérico Computadorizado
CO	Monóxido de Carbono
CO2	Dióxido de Carbono
CP	Capacidade do Processo – Dispersão
CPK	Capacidade do Processo – Centralização
DMAIC	<i>Define, Measure, Analyze, Improve and Control</i>
DOE	<i>Design of Experiments</i>
ERP	<i>Enterprise Resource Planning</i>
H2	Gás Hidrogênio
IR	<i>Infrared</i> (Raio Infravermelho)
LIE	Limite Inferior de Especificação
LSE	Limite Superior de Especificação
MIM	<i>Metal Injection Molding</i>
MPI	Moldagem de Pós por Injeção
MSA	<i>Measurement System Analysis</i>
N2	Gás Nitrogênio
NDIR	<i>Nondispersive Infrared</i> (Sensor Infravermelho Não Dispersivo)
NGT	<i>Nominal Group Technique</i> (Técnica Nominal de Grupo)
PCP	Planejamento e Controle de Produção
PP	Capacidade Global de Processo – Dispersão
PPK	Capacidade Global de Processo – Centralização
PPM	Parte Por Milhão
PPM	Partes Por Milhão
SAP	<i>Systeme, Anwendungen und Produkte</i>
SIPOC	<i>Suppliers, Input, Process, Outputs, Customers</i>
SO2	Dióxido de Enxofre
SO3	Trióxido de Enxofre
μ	Mi
σ	Sigma

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	14
1.2 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA.....	15
1.3 OBJETIVOS	22
1.3.1 Objetivo Geral	22
1.3.2 Objetivos específicos	22
1.4 JUSTIFICATIVA	23
1.5 DELIMITAÇÃO DO TRABALHO	25
1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	25
2 REFERENCIAL TEÓRICO	26
2.1 CONCEITO DE SEIS SIGMA.....	26
2.2 METODOLOGIA SEIS SIGMA	27
2.3 PARTICIPANTES DO PROJETO SEIS SIGMA	29
2.4 FERRAMENTAS E TÉCNICAS INTEGRADAS NO SEIS SIGMA.....	30
2.5 <i>METAL INJECTION MOLDING - MIM</i>	41
2.5.1 Feedstock	43
2.5.2 Injeção	45
2.5.3 Debind	49
2.5.3.1 Extração dos Ligantes Primários	49
2.5.3.2 Extração dos Ligantes Secundários	51
2.5.4 Sinterização	52
2.5.4.1 Atmosfera de Sinterização	55
3 METODOLOGIA	57
3.1 MÉTODO DE PESQUISA	57
3.2 MÉTODO DE TRABALHO	58
4 ESTUDO DE CASO	60
4.1 APRESENTAÇÃO DA EMPRESA.....	60
4.2 APRESENTAÇÃO DOS SETOR	61
4.2.1 Produção de Componentes	61
4.2.2 Forno Contínuo	64
4.3 FASE DEFINIR (D).....	67
4.3.1 Business Case	67

4.3.2 Métricas Principais do Projeto	67
4.3.3 Mapeamento de Alto Nível.....	68
4.3.4 Definição do escopo do Projeto.....	69
4.3.5 Definição de Meta	70
4.3.6 Restrições e Suposições	70
4.3.7 Equipe de Trabalho	70
4.3.8 Cronograma do Projeto	71
4.4 FASE MEDIR (M)	71
4.4.1 Descoberta do Processo	71
4.4.2 Mapeado do Processo	73
4.4.3 Priorização das Causas Potenciais	75
4.4.4 Análise do Sistema de Medição (MSA).....	79
4.4.5 Análise da Capacidade do Processo	87
4.5 FASE ANÁLISE (A)	91
4.5.1 Potenciais Causas.....	91
4.5.1.1 Estabilização e correção de Causas Especiais	91
4.5.1.2 Validação para Retorno de Produção.....	99
4.5.2 Realização experimento DOE.....	101
4.5.3 Análise de Causas Potenciais.....	107
4.6 FASE IMPLEMENTAÇÃO (I).....	107
4.6.1 Plano de Ação.....	109
4.6.1.1 Atualização do Documentos e Treinamento	111
4.6.1.2 Validação dos Ajustes	112
4.7 FASE CONTROLE (C)	113
5 CONCLUSÃO DO ESTUDO	120
6 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS	122
REFERÊNCIAS.....	123
APÊNDICE A – TABELA RESULTADOS EXPERIMENTO FRACIONADO	128

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A necessidade das grandes companhias se manterem competitivas no âmbito global se faz necessário cada vez mais soluções de contorno para melhoria contínua do produto ofertado, e de seus processos de fabricação (CORONADO, 2008). Reforçando a necessidade de cada vez mais oferecer produtos atrativos, com nível alto confiabilidade, preços atrativos e qualidade percebida pelo usuário, de modo que as companhias estão sempre em busca de novas metodologias para tornar mais robustos os processos de fabricação (FERNANDES, 2013).

Perdas durante o processo de fabricação do produto ou componentes, como, sucata, retrabalhado e desvios de engenharia, geram custos financeiros e ocupação do tempo de forma desnecessária da estrutura física e da mão de obra, trazendo impacto direto nos resultados financeiros das companhias. Quando custos e desperdícios com a não conformidade são altos, eles confirmam a necessidade de elaboração de planos de ações a fim de prevenir, reduzir ou eliminar a ocorrência de problemas (ROLT, 1998). De tal modo que, quando um produto é fabricado de forma correta pela primeira vez não ocorrem perdas no processo, não gerando desperdícios (CROSBY, 1994).

Para McCarthy e Stauffer (2001), a metodologia seis sigma é a mais poderosa ferramenta para corporações que precisam mudar suas operações e seus processos de desenvolvimento de produtos e serviços.

A metodologia Seis Sigma foi criada pela Motorola no ano de 1987, no momento que a empresa enfrentava dificuldades financeiras, devido à competitividade de empresas estrangeiras que ofertavam um produto de melhor qualidade percebida pelo consumidor, desta forma a metodologia foi desenvolvida com o objetivo de mitigar a taxa de perdas de seus produtos manufaturados (WERKEMA, 2002).

A partir do ano de 1988 além da Motorola outras empresas adotaram a metodologia, Ford, Kodak, AlliedSignal, ABB, Sony e General Electric são exemplos de empresas que aderiram à metodologia à seus negócios (HARRY E SCHROEDER, 2000). De acordo com Antony e Banuelas (2002) empresas de qualquer atividade, independentemente do tamanho, podem utilizar o programa seis

Sigma para reduzir os custos, melhorar seus processos e, conseqüentemente aumentar sua representatividade no mercado.

O desenvolvimento desta monografia foi realizado em uma empresa multinacional de grande porte, tendo seu portfólio de produtos destinado ao seguimento estratégico de defesa, atuando no mercado Militar, Segurança Pública e Civil, visando excelência no produto ofertado, atendo os mais severos requisitos de segurança. A realização do trabalho ocorreu no setor de Componentes MIM – *Metal Injection Molding*, mais especificamente no processo de sinterização por forno contínuo, onde posteriormente os componentes obtidos serão aplicados em Revólver, Pistolas e Armas Táticas.

O processo de sinterização é uma das etapas que compõem a fabricação utilizando as tecnologias MIM ou MPI – Moldagem de Pós por Injeção, utiliza a técnica de injeção de plástico conjunto a metalurgia do pó, obtendo componentes de alta complexidade com um alto volume de produtividade, o controle da atmosfera de sinterização é primordial para garantia da qualidade das propriedades mecânicas, dimensionais e acabamento superficial dos componentes.

O objetivo deste trabalho é implementar a metodologia Seis Sigma no processo de sinterização por forno contínuo, buscando reduzir a variabilidade dos índices de carbono encontrado nos componentes pós sinterização, obtendo melhores resultados nos custos operacionais, reduzindo os índices de custo da não qualidade.

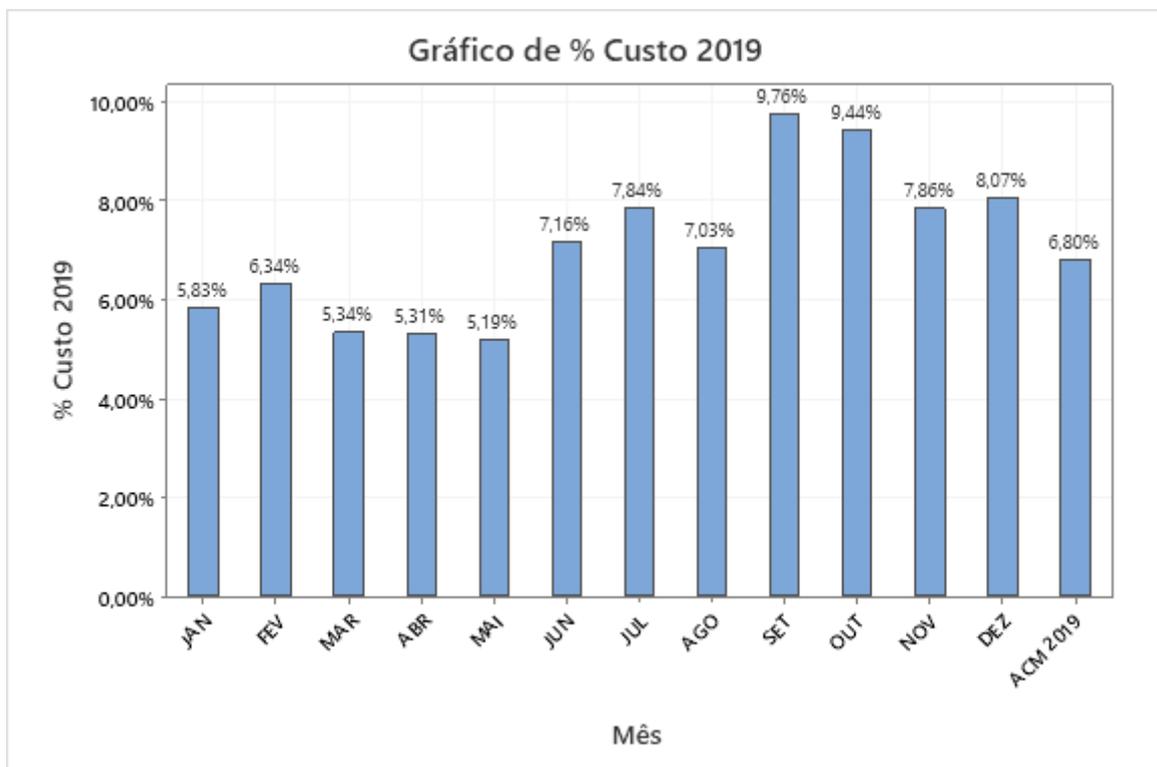
1.2 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

A empresa integralizou no ano de 2019 os controles de índices de sucata via ERP – *Enterprise Resource Planning*, ou seja, um sistema integrado de gestão empresarial, com a utilização do *Software SAP (Systeme, Anwendungen und Produkte)*. Os controles do indicador de sucata era acompanhado via planilha eletrônica nos anos anteriores a implantação do SAP, sendo responsabilidade de cada setor, não havendo um banco de dados confiável. Desta forma, que a análise delimita-se em dados obtidos somente pós ano de 2019. O movimento realizado pela empresa teve como objetivo principal aumentar o nível de competitividade no mercado nacional e internacional, além de melhorar o gerenciamento e controle das informações. Conforme Evangelista (2019) para manter-se competitiva no cenário

atual, as empresas necessitam investimentos em tecnologias e equipamentos modernos.

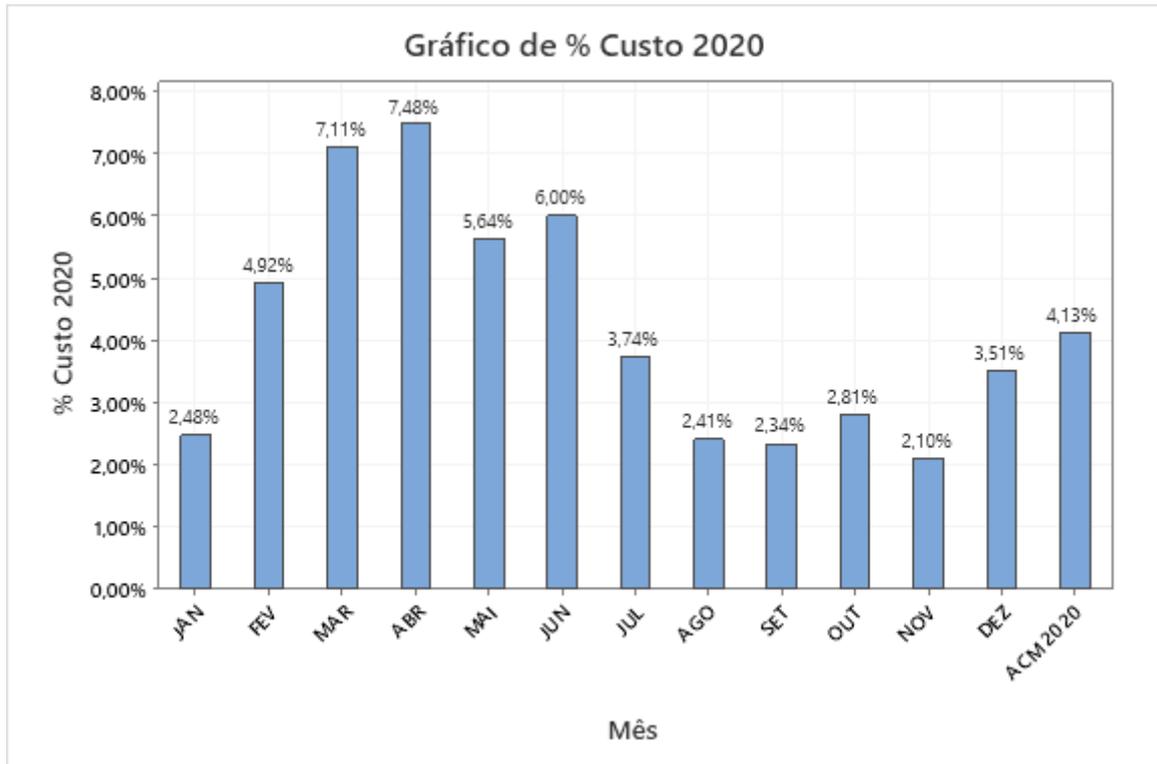
Parte dos problemas está na estratificação dos custos em função dos principais modos de falhas apresentados, que representam uma análise mais completa do que apenas os custos relacionados à sucata. Os Gráficos 1 e 2 apresentam o indicador do setor de componentes, relacionado aos custos de sucata nos anos de 2019 e 2020 em valores percentuais, com estratificação mensal.

Gráfico 1 – Custo de Sucata Mensal 2019 em %



Fonte: ERP da empresa.

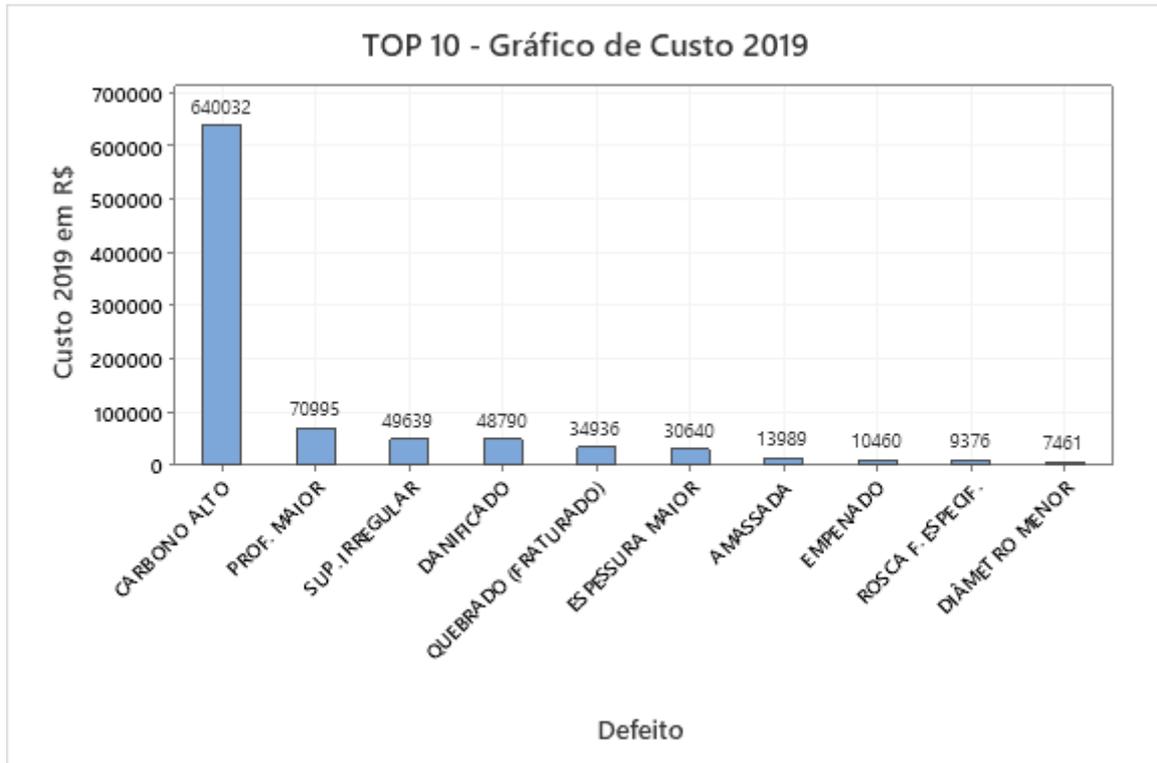
Gráfico 2 – Custo de Sucata Mensal 2020 em %



Fonte: ERP da empresa.

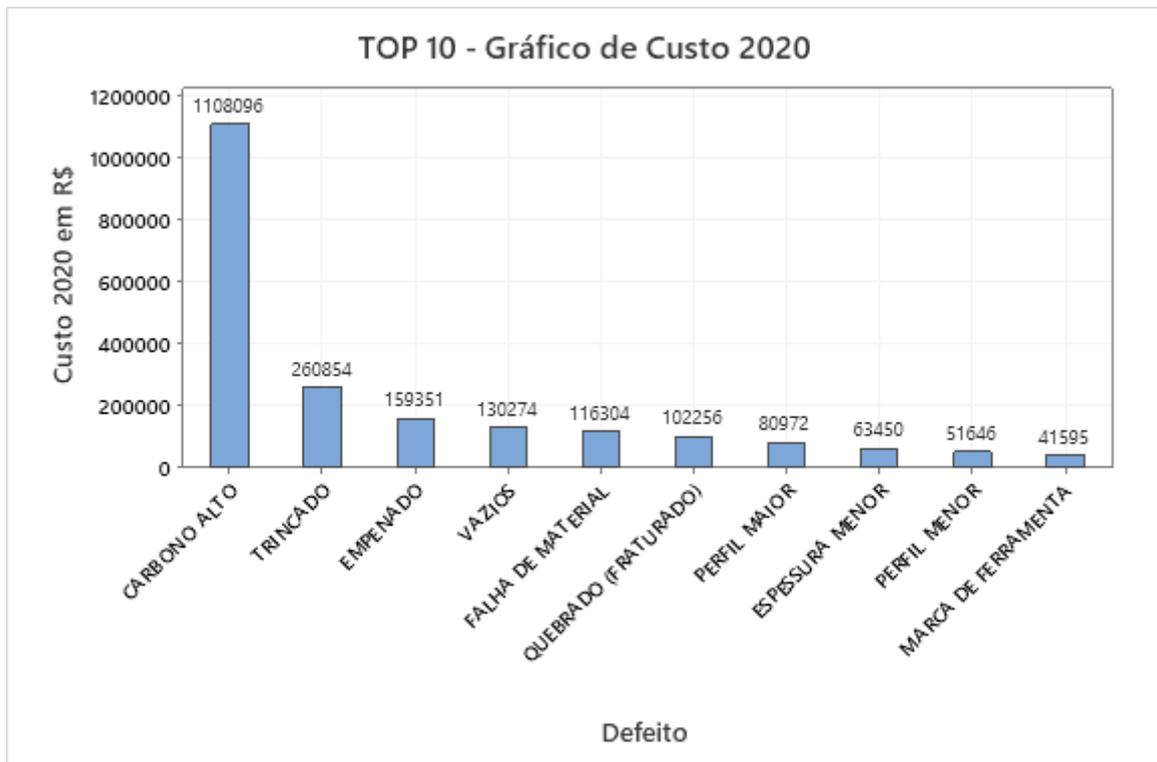
Os Gráficos 3 e 4 apresentam os indicadores relacionados aos custos dos principais modos de falha nos anos de 2019 e 2020. O modelo representa os custos em R\$, adotando uma estratégia de filtragem dos dez principais modos de falhas e seus respectivos custos.

Gráfico 3 – Principais Modos de Falha 2019 em R\$



Fonte: ERP da empresa.

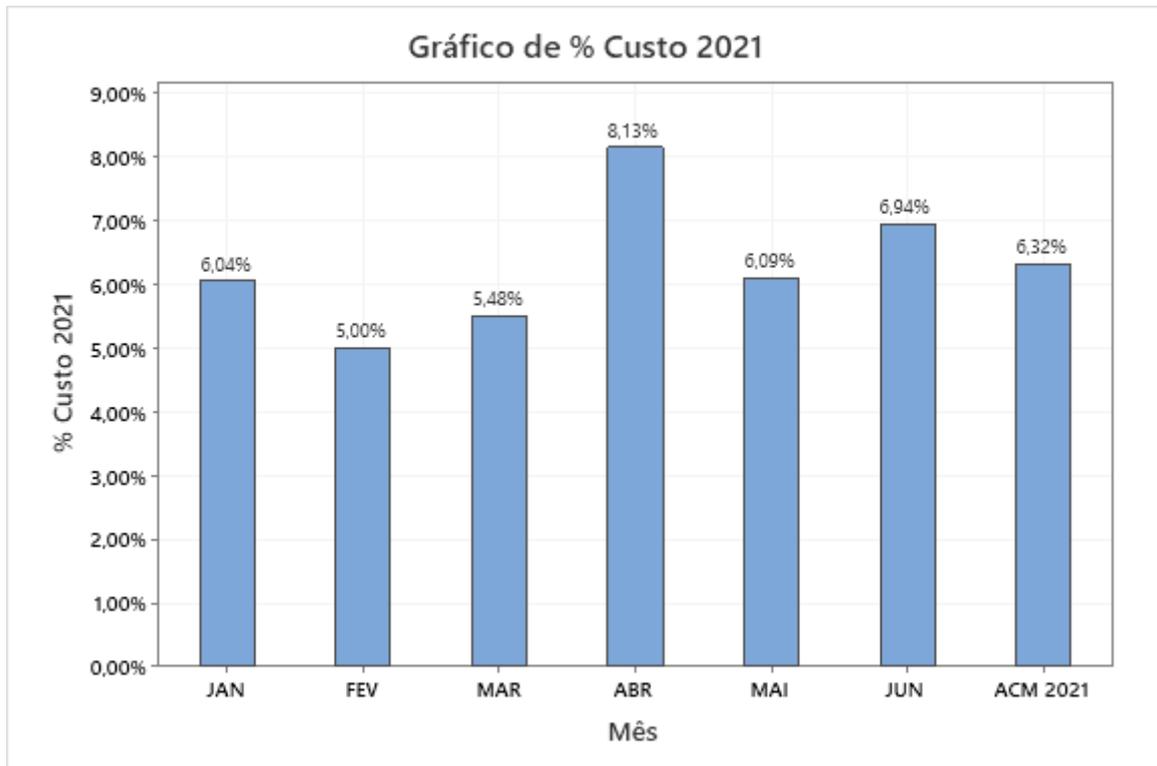
Gráfico 4 – Principais Modos de Falha 2020 em R\$



Fonte: ERP da empresa.

O Gráfico 5 representa a evolução mensal dos custos em percentual relacionado ao primeiro semestre de 2021, com estratificação entre os meses de janeiro à junho.

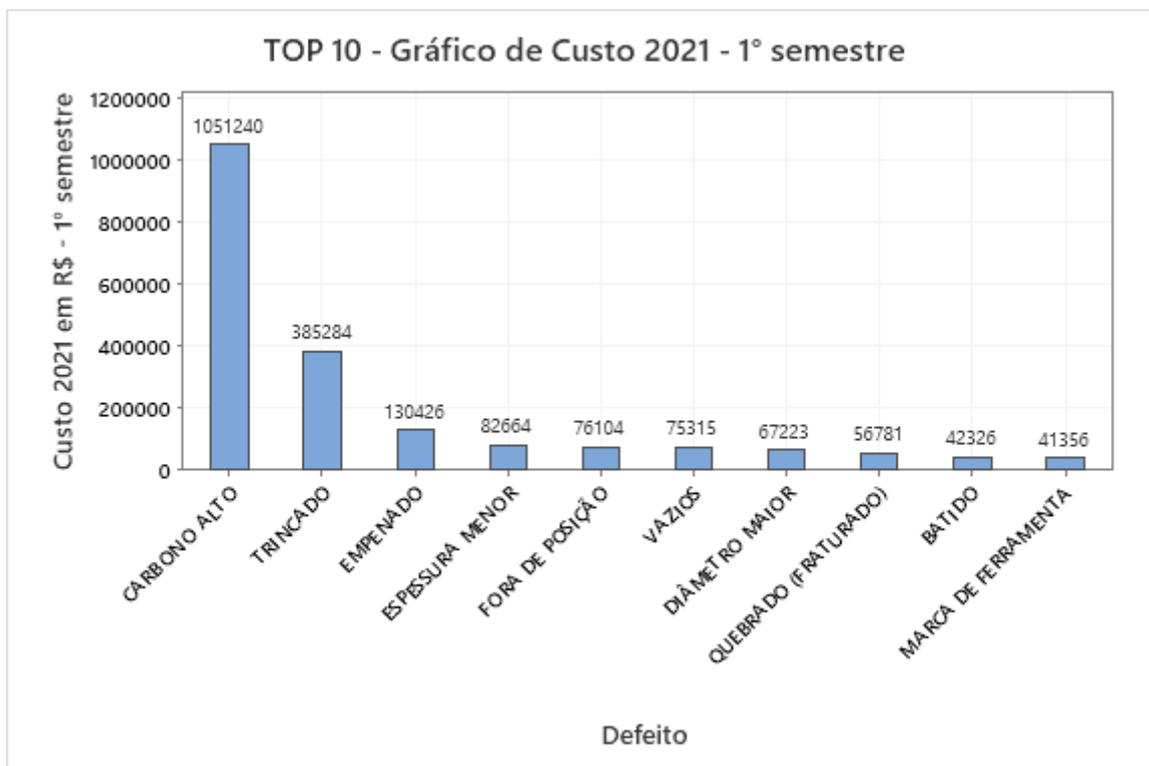
Gráfico 5 – Custo de Sucata Mensal 2021 em %



Fonte: ERP da empresa.

O Gráfico 6 apresenta o indicador relacionado aos custos dos principais modos de falha referente ao primeiro semestre de 2021. O modelo representa os custos em R\$, adotando uma estratégia de filtragem dos dez principais modos de falhas e seus respectivos custos

Gráfico 6 – Principais Modos de Falha 2021 em R\$



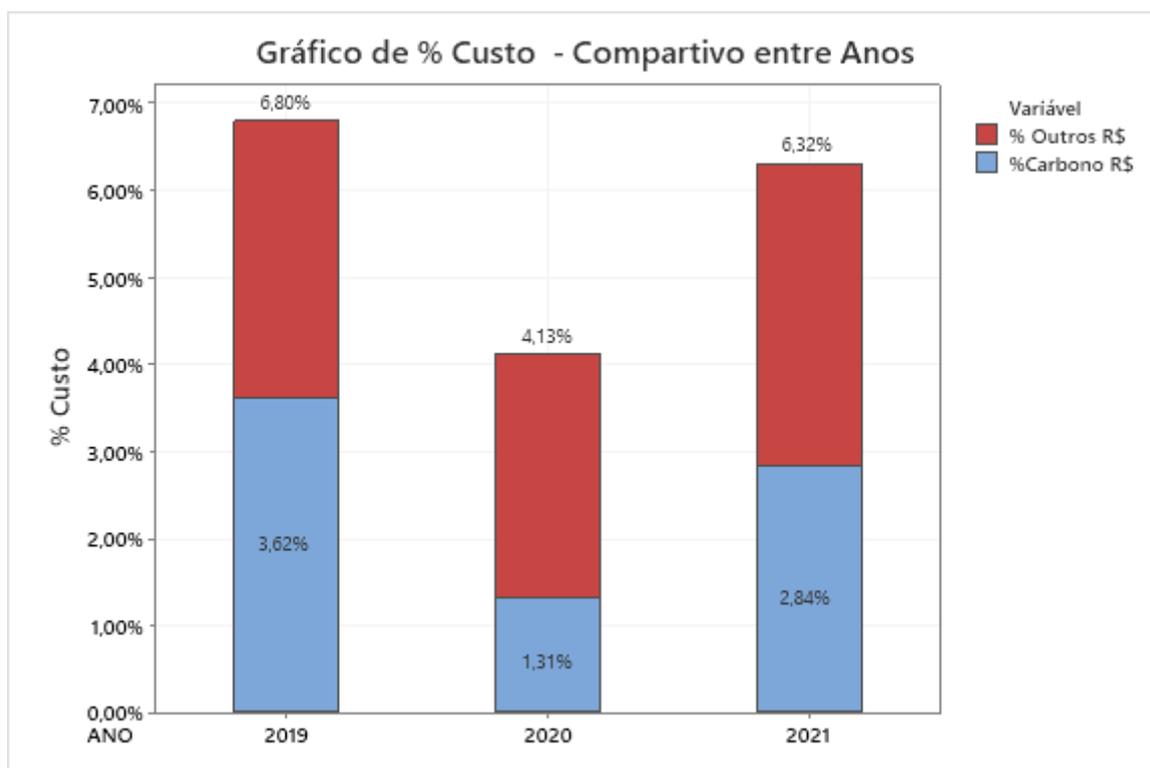
Fonte: ERP da empresa.

Desde a implantação e controle dos registros de sucata via SAP na empresa em 2019, o modo de falha “Carbano Alto”, figura de forma sistemática como o principal modo de falha do setor de componentes, gerando altos custos para companhia. No primeiro semestre de 2021 a empresa teve um gasto aproximado de um milhão de reais relacionados à sucata de componentes por carbono fora dos limites de especificação, reforçando uma tendência de aumento e figurar como o pior desempenho do modo de falha desde 2019.

Analisando criticamente os indicadores de sucata em um viés de comparação entre os anos de 2019, 2020 e primeiro semestre de 2021, identifica-se que no ano de 2020 apresentou uma redução significativa nos indicadores de sucata, principalmente nos custos relacionados à sucata por carbono fora do especificado, conforme apresentado no Gráfico 7. Entretanto no segundo semestre de 2020, a empresa iniciou um estudo para recuperação de produtos com índices de carbono fora do especificado, usando o processo de Descarbonetação para componentes com carbono até 0,60% (especificado 0,50%±0,05%), somente sendo encaminhado para sucata somente componentes com índices superiores a 0,60%, em função dos

estudos e validações necessárias para o retrabalho de Descarbonetação, os componentes foram armazenados até a conclusão dos estudos. No início do ano de 2021, chegou-se a conclusão que o processo de retrabalho não poderia ser validado devido a problemas de quebras e outros modos de falha inseridos por esse processo, trazendo riscos na funcionabilidade, durabilidade e no cumprimento dos requisitos de segurança, desta forma os lançamentos de sucata destes componentes foram realizados no ano de 2021, dado o evento, estes valores foram lançados como sucata especial, não incorporando os indicadores de sucata do ano 2021, entretanto o dado oficial do ano de 2020 dispôs deste desvio. Para fins contábeis, os valores percentuais do custo de sucata realizado em 2020 para o modo de falha Carbono Alto foi de 3,56%, totalizando o resultado de 6,38% de custo por sucata em 2020 contabilizando os demais modos de falha.

Gráfico 7 – Comparativo Custos Sucata entre Anos



Fonte: ERP da empresa.

Os parâmetros de processo e seus níveis de ajustes são conhecidos há anos e foram determinados juntamente com o fabricante do forno contínuo de sinterização, muitos controles foram determinados de forma empírica. Recentemente a empresa realizou parcerias com algumas Universidades que pesquisam sobre o

tema com o objetivo de reduzir os problemas relacionados aos índices de carbono fora dos limites especificações, no entanto nenhuma destas parcerias obtiveram resultados positivos.

A inserção da marca em um dos maiores consumidores de armamentos do mundo, alavancando os indicadores de vendas e conseqüentemente os volumes de produção, o planejamento estratégico da empresa em se tornar a maior fabricante de armas leves do mundo até 2025, os constantes números expressivos negativos reportados geram desconforto não somente nos membros diretivos da empresa, mas como em toda equipe técnica, reforçando a necessidade de tornar o processo de fabricação mais robusto, previsível e controlável.

Dentro desse cenário, o trabalho busca responder como a aplicação da metodologia Seis Sigma pode diminuir a variabilidade do processo e reduzir os custos relacionados à sucata?

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

Reduzir a variabilidade do processo, estabelecendo níveis de ajustes do processo visando a redução dos custos operacionais.

1.3.2 Objetivos específicos

- Avaliação do sistema de medição;
- Analisar índices de capacidade de processo (Cp e Cpk);
- Identificar causas potenciais responsáveis pela variabilidade do processo;
- Identificar principais variáveis influentes do processo;
- Reduzir índice de sucata por carbono fora do especificado;
- Controlar as ações de melhoria;
- Padronizar processo de fabricação.

1.4 JUSTIFICATIVA

A metodologia Seis Sigma tem a finalidade de melhorar os processos, reduzindo variabilidade. A variabilidade é tratada como se fosse uma falha intrínseca ao processo, e desta forma, através de projetos de melhoria contínua e sustentável, se objetiva reduzi-la a níveis baixíssimos, visto que não existe processo sem variação (Rath & Strong, 2001).

A estruturação do estudo de caso com o uso da metodologia Seis Sigma, almeja a quantificação e a identificação de forma confiável os principais fatores influentes no processo de sinterização, que colabora para os índices de carbono na atmosfera de sinterização. A partir do estudo, será possível a empresa adotar um modelo que represente as melhores condições para controle dos índices de carbono a partir dos parâmetros de entrada reduzindo a variabilidade do processo de fabricação e tornando mais previsível e controlável a variável resposta.

O estudo de caso promoverá o conhecimento das pessoas envolvidas no processo o uso da metodologia, podendo no futuro ser expandidos aos demais setores da empresa, e utilizar os aprendizados deste projeto na operação e definição dos parâmetros de processos na aquisição do novo forno de sinterização previsto para o primeiro semestre de 2023, em um investimento aproximado de R\$30 milhões.

Dado a relevância, a realização do trabalho impulsionará os conhecimentos adquiridos durante o curso de Engenharia de Produção, tendo em vista a aplicação da metodologia Seis Sigma, hoje mundialmente difundida que objetiva a redução de variabilidades dos processos, maximizando a performance e lucratividade das companhias.

Diante dos temas Seis Sigma e Sinterização abordados neste estudo de caso será de grande importância acadêmica para estudos futuros, pois há pouca difusão acadêmica de forma conjunta dos temas abordados no presente estudo de caso.

Tendendo à compreensão de forma abrangente do assunto, dado a importância do tema, dirigiu-se uma busca em artigos científicos, dissertações, teses e periódicos relacionados à proposta do trabalho, em base de dados específicas.

Durante o processo de pesquisa não se restringiu aos anos de publicações. Os resultados obtidos das fontes pesquisadas, dos trabalhos publicados com relação ao

tema proposto. O produto da pesquisa apresenta resultados em português e inglês relacionado ao assunto “Seis Sigma”, independentes da localização do texto, título ou palavra-chave, conforme resultado apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 – Pesquisa do assunto Seis Sigma

Palavra Chave	Base de dados		
	Periódicos Capes	Scielo	Elsevier
Seis Sigma	3.095	52	69.149
<i>Six Sigma</i>	546.650	73	786.670
Quantidade de itens localizados			

Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

O resultado da pesquisa mostram que o assunto relacionado ao trabalho em ambos idiomas português e inglês são multiplamente trabalhados, ressaltando que cada publicação está relacionado a sua individualidade. Uma análise relacionada aos títulos com assuntos endereçados a sinterização com a utilização da metodologia Seis Sigma foi avaliada, com objetivo de maior agregação técnica e teórica para o trabalho.

Para filtrar resultados de pesquisa mais relacionados ao tema, foi acrescentado mais duas palavras no tema da busca, sendo em português “sinterização contínua” e em inglês “*continuous sintering*” relacionado ao tema proposto no trabalho, conforme resultado apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 – Pesquisa do assunto Seis Sigma e sinterização contínua

Palavra Chave	Base de dados		
	Periódicos Capes	Scielo	Elsevier
Seis Sigma em sinterização contínua	0	0	0
<i>Six Sigma and continuous sintering</i>	19	0	122
Quantidade de itens localizados			

Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

Após finalização da pesquisa, os títulos foram revisados com objetivo de correlacionar com o tema abordado no trabalho. Cada título corresponde a um tipo de particularidade, não havendo trabalhos relacionados a redução da variabilidade

de carbono nos componentes sinterizados ou relacionados a controle da atmosfera de carbono na câmara de sinterização utilizando a metodologia Seis Sigma.

Os trabalhos analisados exploram a aplicação da metodologia Seis Sigma na melhoria de processos relacionados a características dimensionais dos produtos, otimizando curvas de aquecimento, tempos de sinterização, densificação dos componentes e dureza do material. Reforçando a importância do presente trabalho é relevante para academia e para futuros trabalhos com ênfase em Seis Sigma.

1.5 DELIMITAÇÃO DO TRABALHO

O foco do trabalho está em estudo de caso, no setor de sinterização por forno contínuo, em uma empresa multinacional localizada em São Leopoldo no estado do Rio Grande do Sul, utilizando a metodologia Seis Sigma para redução do custo operacional relacionado à sucata.

O trabalho não estende aos demais setores da empresa, sendo somente realizado no setor de sinterização por forno contínuo, abrangendo todos os modelos fabricados neste processo.

1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO

No capítulo 1 apresenta a introdução do trabalho, conjunto a justificativa e delimitações do estudo. O capítulo 2 apresenta o referencial teórico, explorando os seguintes assuntos: histórico da metodologia Seis Sigma, conceito do método DMAIC e suas fases, por fim, o processo de fabricação MIM. No capítulo 3 está a explicação da metodologia aplicada ao trabalho. No capítulo 4 está descrito o estudo de caso, apresentando o setor que foi desenvolvido o projeto, juntamente com a aplicação da metodologia Seis Sigma através do DMAIC (*Define, Measure, Analyze, Improve and Control*) para controle dos principais parâmetros do processo de sinterização, que garantem a estabilidade dos níveis de carbono. No capítulo 5 está presente as conclusões derivadas do estudo de caso. Por fim, o capítulo 6 apresenta sugestões para trabalhos futuros.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo é apresentado o referencial teórico que sustenta o tema tratado no trabalho. Serão abordados temas relacionados à metodologia Seis Sigma e conhecimentos relacionados ao processo de fabricação MIM.

2.1 CONCEITO DE SEIS SIGMA

No ano de 1733 o matemático Abraham DeMoivre, publicou seu trabalho de desenvolvimento da equação matemática da curva normal, dando sequencia aos trabalhos de Jacob e Nicolaus Bernoulli, criando a base a partir da qual se explica grande parte da teoria da estatística indutiva. A distribuição normal é, em vezes, divulgada como a distribuição gaussiana, em homenagem a Karl Friedrich Gauss e possui dois indicadores distintos: o centro da distribuição que é a média, representado pela letra grega μ (mi), e a variação da distribuição, que é o desvio padrão, representada pela letra grega σ (sigma). Cada intervalo de um desvio padrão (σ) representa uma área debaixo da curva da distribuição normal, sendo capaz de obter a proporção equivalente sobre a área total da curva. Uma vez que μ e σ são especificados, a curva normal é completamente determinada. (WALPOLE et al., 2011).

“Sigma é a letra grega que representa a unidade estatística de medição que define o desvio-padrão de uma população. Mede a variabilidade ou distribuição dos dados” (CONE, 2001,p. 31).

De acordo com Cleto e Quinteiro (2011), a nomenclatura Seis Sigma é uma referência à letra Sigma “ σ ” do alfabeto grego, que representa a unidade de desvio-padrão de uma distribuição normal de valores ou medidas.

Seis Sigma é uma metodologia que busca melhorar seus processos, reduzindo a variabilidade, focando nas necessidades dos clientes (GISBERT;RODRIGO, 2016).

De acordo com Harry e Schoerder (2000), o Seis Sigma é um instrumento eficiente na estratégia de negócios, em razão de utilizar métodos estatísticos simples para alcançar excelência operacional.

Segundo Yang (2008), em relação à melhoria de processo, a metodologia Seis Sigma busca o aumento do desempenho e a diminuição da variação do processo, resultando na redução de defeitos e na melhoria da qualidade do produto.

De acordo com Cleto e Quinteiro (2011), dado às exigências cada vez maiores em termos de qualidade e produtividade no final da década de 80, a Motorola começou a utilizar um método de trabalho para melhoria de seus produtos e processos de fabricação, esta metodologia de trabalho passou a ser denominada de Seis Sigma. O sucesso obtido pelo programa fez com que outras empresas adotassem essa metodologia, tais como a Sony, a Asea Brown Boveri (ABB), e a principal a General Eletric.

Conforme Souza et al. (2009), as empresas médias tinham taxas de falhas numa faixa de 3000 a 10000 por milhão de procedimentos, o que é equivalente a um nível Sigma de 3 a 4. Enquanto empresas de melhores resultados correspondiam valores próximos a 3,4 falhas por milhão.

Um processo com nível de qualidade Seis Sigma é a redução da variabilidade entregue ao cliente, correspondente a probabilidade de gerar 3,4 defeitos por milhão (ECKES, 2001).

O Quadro 1 representa de forma simplificada a conversão de defeitos por milhão de acordo com o nível Sigma.

Quadro 1 – Quadro Simplificado de Conversão Sigma

Nível de Rendimento	Defeitos por milhão	Nível Sigma
30,9%	690.000	1,0
69,2%	308.000	2,0
93,3%	66.800	3,0
99,4%	6.120	4,0
99,98%	320	5,0
99,9997%	3,4	6,0

Fonte: Adaptado de Pande et al.(2001, p.31)

2.2 METODOLOGIA SEIS SIGMA

A aplicação da metodologia Seis Sigma, tem propiciado as empresas, produzirem com maior qualidade, além de melhorar o desempenho de produtos e

processos, alcançando maior produtividade, reduzindo custos e aumentando o nível de satisfação dos clientes (MAHANTI;ANTONY, 2009).

De acordo com Scatolin (2005), a metodologia DMAIC (*Define, Measure, Analyze, Improve and Control*) em português significa: Definir, Mensurar, Analisar, Melhorar e Controlar, trata-se de uma abordagem estruturada, disciplinada e rigorosa para alcançar melhorias de processos.

A metodologia DMAIC é composta por cinco etapas ou fases:

- *Define* (D): A descrição do problema necessita responder os questionamentos de qual é o problema e quais são as oportunidades que surgirão, do mesmo modo que os objetivos e metas que serão determinadas, local e momento que o problema é observado e por fim quais os ganhos financeiros relacionados à solução do problema (WERKEMA, 2014).
- *Measure* (M): De acordo com Rotondaro (2002), a fase Mensurar, tem como objetivo medir as principais variáveis do processo, como, análise do sistema de medição, coleta de dados através de uma metodologia que produz amostras representativas e aleatórias, a relação entre funções de entrada e saída e por fim a definição da capacidade do processo fabricar produtos dentro dos limites de especificação.
- *Analyse* (A): Na etapa de analisar, as causas são determinadas e associadas às fontes de variabilidade e de desempenho indesejado do processo. As causas fundamentais do problema necessitam estar relacionados a cada uma das metas definidas na primeira fase (WERKEMA, 2002). De acordo com Nave (2002), esta etapa tem o propósito de converter dados brutos ou não tratados em informações que possibilitem uma compreensão dos processos. Este entendimento permite a identificação das causas de defeitos ou problemas de maior relevância.
- *Improve* (I): Nesta fase de melhorar, são construídas as propostas de soluções e melhorias para eliminar as causas raízes responsáveis pela variabilidade do processo de fabricação. As soluções são validadas e em caso de necessidade, são realizados os ajustes para melhoria do resultado. Após conclusão das melhorias mapeadas, é realizada a verificação do alcance das metas (GIRMANOVÁ et al., 2017).

- *Control (C)*: Conforme Eckes (2001), na fase controlar, a equipe é responsável por selecionar e implementar os métodos para controlar e trabalhar na variabilidade do processo futuro. Podendo incluir procedimentos documentados, além de métodos de controle estatístico de processo. Sendo uma importante medida para garantia que o mesmo problema não se torne recorrente no futuro.

2.3 PARTICIPANTES DO PROJETO SEIS SIGMA

O programa Seis Sigma apresenta uma distinção relacionada à composição das equipes, que são mais capazes no desenvolvimento da *performance* organizacional, a partir dos resultados da implementação de projetos direcionados estrategicamente (CORONADO; ANTONY, 2002).

Para a implantação de um trabalho Seis Sigma é exigida a participação de pessoas de diversos setores e a escolha correta dos envolvidos é um fator decisivo para o seu sucesso (Ingle & Roe, 2001).

De acordo com Werkema (2010), para implementação do trabalho Seis Sigma cada integrante detém de uma função dentro da equipe do projeto, devendo trabalhar de forma integrada na implementação do projeto.

As funções detalhadas de membro da equipe estão descritas a seguir:

- *Sponsor* – é o patrocinador do projeto, sendo responsável por proporcionar e definir as diretrizes para a implementação do Seis Sigma, garantindo que estejam engajados com o planejamento estratégico da empresa;
- *Champion* – frequentemente são membros da gerência ou da diretoria da empresa, pessoas com um alto grau de conhecimento, comprometidas com a empresa, que conhecem e compreendem todo o funcionamento da organização;
- *Master Black Belts* – profissionais com o maior conhecimento técnico e organizacional que lideram o programa, apoiando os *Black Belts* e os *Green Belts* na suas rotinas e treinamentos;
- *Black Belts* – profissionais que lideram as equipes na condução dos projetos e dispõem conhecimentos em ferramentas técnicas,

matemáticas e estatísticas. Possuem um perfil de liderança, iniciativa e habilidades para condução de trabalho em equipe;

- *Green Belts* – profissionais que participam das equipes dos especialistas *Black Belts*, contribuem do início até o fim do projeto, com aplicação de ferramentas estatísticas, preparados e habilitados a formar e facilitar equipes nos setores;
- *White/Yellow Belts* – profissionais que atuam nas áreas de operação da empresa, são capacitados nos fundamentos da metodologia Seis Sigma e auxiliam na multiplicação das informações sobre ferramenta e processos.

De acordo com Werkema (2012), o sucesso de programas da qualidade como o Seis Sigma está ligado à existência de pessoas com o perfil apropriado e que serão transformados em especialistas na metodologia e nas ferramentas do Seis Sigma.

Para efetivar o programa Seis Sigma nas companhias, além de especialistas treinados é necessária a adoção de uma metodologia sólida, que auxilie na implantação do programa e nos processos de melhoria contínua.

2.4 FERRAMENTAS E TÉCNICAS INTEGRADAS NO SEIS SIGMA

De acordo com Werkema (2004) a metodologia Seis Sigma, busca entender e analisar a variação de um determinado processo, analisando as falhas através de uma metodologia estruturada de técnicas das ferramentas da qualidade.

Para Chen (2008) a combinação das metodologias resulta na maior capacidade para resolver problemas desde o nível operacional até o estratégico.

A vantagem do uso integrado se dá no enfoque quantitativo fornecido pelo Seis Sigma através de ferramentas da qualidade junto a visão de fluxo do Lean (Pacheco, 2014).

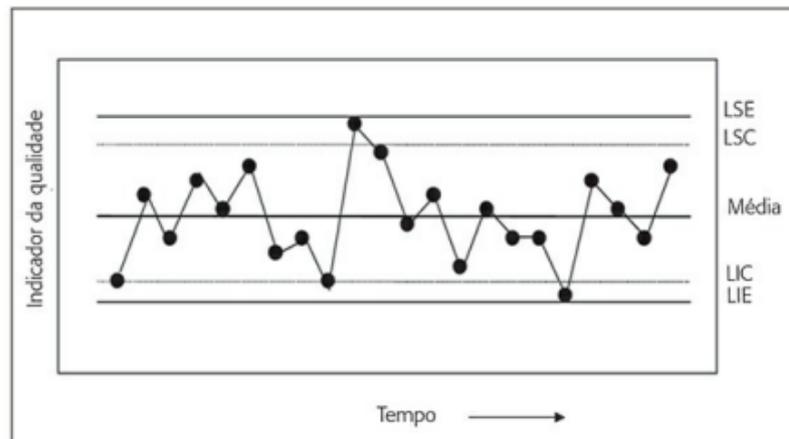
As descrições das ferramentas da qualidade utilizadas no sistema de gestão ou em projetos Seis Sigma, conforme estudos e pesquisas realizadas por: Pyzdek e Keller (2011), Rotondaro *et al.* (2011), Siqueira (1997), Campos (1999), Werkema (1995), Drumond (1994), Meireles (2001), Maximiano (2012), Silva (1995), Carpinetti (2012), Marshall (2010), Oliveira (2002), Oliveira (1996), dispostas em ordem alfabética:

- Amostragem: é uma técnica aplicada para uma coleta de dados de uma análise de forma apropriada, sendo formulada a partir de tamanhos ideais de amostras, de tal forma que seja representativa e confiável para descrever um comportamento de uma população como um todo;
- Análise Multivariada: ferramenta estatística utilizada para processar e condensar informações, estruturar os dados e descrever padrões de forma possível em caracterizar relações entre as variáveis.
- Análise do Tempo de Ciclo: mensura a quantidade de tempo necessária para a geração completa de um produto ou serviço;
- Análise de Tempos de Falhas: análise estatística, baseada em dados amostrais quantitativos, capaz de realizar estimativa probabilística de um possível evento indesejado ocorrer;
- Análise de Regressão: análise de estatística que almeja estabelecer a relação entre uma variável de entrada e variável resposta, permitindo inferir estatisticamente os valores obtidos na variável independente Y_s de acordo com a variável dependente X_s .
- Análise de Séries Temporais: técnica estatística de previsão fundamentada em eventos observados, como objetivo principal estudar os dados antigos e atuais para modelar um comportamento futuro;
- Análise do Sistema de Medição – MSA: tem como objetivo principal validar se o sistema de medição é apropriado ou não para avaliar um produto ou processo. Na avaliação do sistema de medição é aplicado diversos estudos estatístico para analisar tendência, linearidade, estabilidade, vício de medição, reprodutibilidade e repetibilidade. Um sistema de medição para ser considerado aceitável, o estudo de R&R (repetitividade e reprodutibilidade) precisa ser igual ou menor à 10% do valor da tolerância, obtendo um número de categorias distintas (NDC) > 5 , índices maiores de 10% e igual ou menor que 30% do valor de tolerância, o sistema pode ser aceito com base na importância, valores superiores a 30%, o sistema de medição é inaceitável. A repetibilidade é a variação média das medições realizadas com um instrumento de medição, quando utilizado por diversas vezes pelo mesmo operador,

realizando medições na mesma característica, a reprodutibilidade é a variabilidade na média das medidas obtidas por diferentes operadores com uso do mesmo instrumento de medição, mesma característica de controle e no mesmo produto.

- **Boxplot:** é uma ferramenta estatística descritiva gráfica que representa de forma sincrônica diversas características, ilustrando variações de um conjunto de dados sendo possível identificar a simetria, valores mínimos e máximos do conjunto de dados, localização dos valores centrais e valores de dados atípicos;
- **Brainstorming:** técnica conhecida como tempestade de ideias, atividade realizada a partir de uma dinâmica de grupo, para apontar todas as possíveis causas de um problema que se deseja eliminar ou reduzir. A técnica utiliza como base o pensamento criativo, sendo necessário para obtenção de um resultado satisfatório a realização de nenhum julgamento sobre alguma ideia, mesmo que aparente ser despropositada;
- **Carta de Controle:** gráfico que monitora estatisticamente o processo, buscando orientar a centralização e visualizar a variação ao longo do tempo, coletando amostras planejadas de forma periódica. Através da carta de controle é possível analisar e monitorar se o processo está se deteriorando ao longo do tempo, a identificação de causas especiais interagindo no processo de fabricação, e a orientação do momento de atuação para ações corretivas para centralização e estabilização do processo de fabricação, a figura 1 apresenta um exemplo de carta de controle;

Figura 1 – Carta de Controle



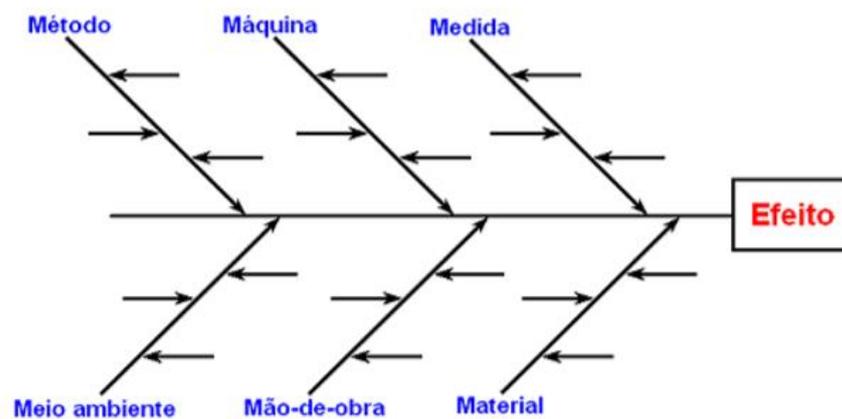
Fonte: Marshall (2010, p.88)

- Carta Farol: gráfico de pré-controle, dividida em três zonas identificadas pelas cores verde, amarelo e vermelho, sendo um análogo ao semáforo de trânsito. A cor verde representa 50% da tolerância, posicionados nos dois quartis centrais, valores posicionados nesta região significam peças conforme. A cor amarela representa os 50% restantes, posicionados nos dois quartis externos aos valores centrais, os pontos valores registrados nessa área são peças dentro dos limites de especificação, porém recorrem de maior atenção podendo ser necessária intervenção no processo para centralização, de acordo com as regras de negócio. A cor vermelha representa as peças que estão fora dos limites de especificação, sendo necessária a intervenção imediata do processo e segregação do produto não conforme;
- Cartas “Multi-Vari”: ferramenta de representação gráfica que permite análise preliminar dos possíveis relacionamentos entre as principais causas de variação do processo de fabricação;
- Diagrama de Afinidades: ferramenta utilizada para o gerenciamento de idéias, propostas e ações. Tem por objetivo suportar e organizar de forma qualitativa o conteúdo gerado de acordo com padrões e afinidade de cada tema;
- Diagrama de Árvore: é uma ferramenta utilizada para decompor um evento em seus componentes e representar diversas alternativas

possíveis para conclusão de uma tarefa ou resultado. Segue uma estrutura em forma de ramificação ou árvore, permitindo o diagrama construir um detalhamento de níveis de cima para baixo;

- Diagrama de Causa e Efeito ou Ishikawa: é uma representação gráfica no formato de espinha de peixe criado por Kaoru Ishikawa em 1953, sendo dividida em seis campos: meio ambiente, máquina, mão de obra, medição, matéria-prima e método, utilizada para exibir uma relação entre as causas e/ou possíveis causas a um efeito do objeto investigado, representado conforme na figura 2.

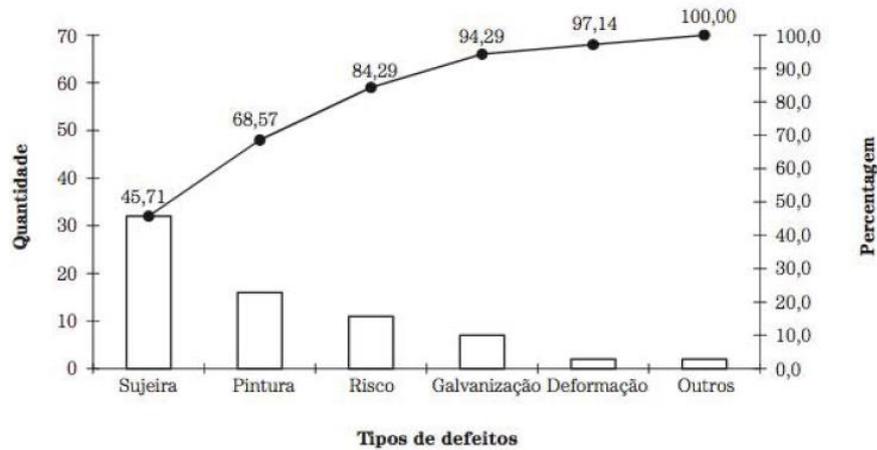
Figura 2 – Diagrama de Causa e Efeito



Fonte: Oliveira (2002, p.76)

- Diagrama de Gantt: ferramenta gráfica que permite a visualização e o acompanhamento de multitarefas e ações de um projeto de acordo com a interdependência das mesmas, dentro de um intervalo de tempo.
- Diagrama de Pareto: representação gráfica que possibilita classificar as causas por ordem e importância, origem, tipos, falhas, sendo expostos em barras verticais do maior para o menor. Segue um formato visual de fácil compreensão, sustentado na relação 80/20, onde se localiza 80% dos efeitos ligados a 20% das causas, conforme esquema de relação estudado por Vilfredo Pareto, conforme exemplo ilustrado na figura 3;

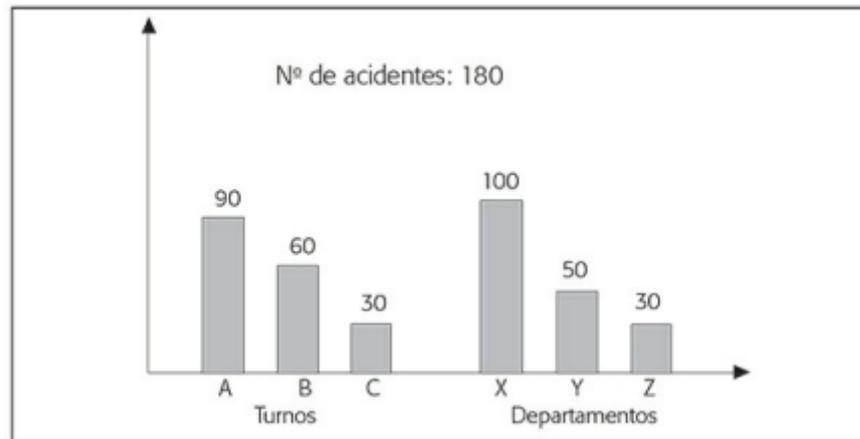
Figura 3 – Diagrama de Pareto



Fonte: Ramos *et al.* (2013, p.17)

- Diagrama de Processo Decisório: é uma ferramenta que tem por objetivo alcançar as metas, busca identificar possíveis problemas por diagrama de árvore e as possíveis inter-relações que possam impactá-las e as alternativas possíveis para atingir do objetivo, possibilitando o acontecimento dos eventos, ações de contingência e contramedida para não haver prejuízos ao planejado;
- Diagrama de Relações: ferramenta de raciocínio direto e lógico que analisa relações de causa e efeito para variáveis qualitativas. Utilizado para entendimento de relações complexas;
- Estratificação: é um procedimento de tratamento de dados, onde é realizado a segmentação de dados por meio de diversas categorias, objetivando analisar os dados de forma independente, de tal modo que seja possível análises de forma distintas ou por agrupamento, a figura 4 apresenta um exemplo de estratificação;

Figura 4 – Estratificação



Fonte: Marshall (2010, p.92)

- Fluxograma: utiliza uma técnica de sequenciar atividades através de símbolos específicos, com o objetivo de facilitar o entendimento do fluxo das atividades por meio de desenhos. As principais vantagens do fluxograma são:
 - Simplificar a compreensão das atividades;
 - Padronizar o método de trabalho;
 - Descrever procedimentos utilizados;
 - Adaptar-se a qualquer atividade;
 - Elevar o método de análise do problema.

A figura 5 apresenta a simbologia utilizada no fluxograma;

Figura 5 – Simbologia do Fluxograma

Símbolo	Significado	Símbolo	Significado
	Documento		Conector de página
	Terminal		Conector de rotina
	Operação		Executante ou responsável
	Decisão		Conferência
	Arquivo		Material

Fonte: Oliveira (1996, p.58)

- *Failure Mode and Effect Analysis* - FMEA: em português, Análise dos Modos e Efeitos de Falha, é uma técnica de abordagem estruturada utilizada para identificar e avaliar os potenciais riscos do processo (PFMEA) ou produto (DFMEA) de acordo com os índices de severidade, capacidade de detecção e ocorrência dos problemas, produzindo conhecimento e ações preventivas;
- *Fault-Tree Analysis* - FTA: a Análise da Árvore de Falha, ferramenta de análise dedutiva que tem por objetivo estabelecer um raciocínio lógico observando as possíveis causas de uma falha primária, identificando ligações entre as falhas primárias no nível do componente e as falhas no nível principal causando efeito indesejado no sistema, através de uma estrutura ramificada em forma de árvore;
- Folha de Verificação: ferramenta de coleta de dados de simples preenchimento, que visa coletar informações para posterior análise, podendo ser modeladas em vários formatos ou categorias, de acordo com a necessidade e regras de negócio, figura 6 trás um exemplo de folha de verificação;

Figura 6 – Folha de Verificação

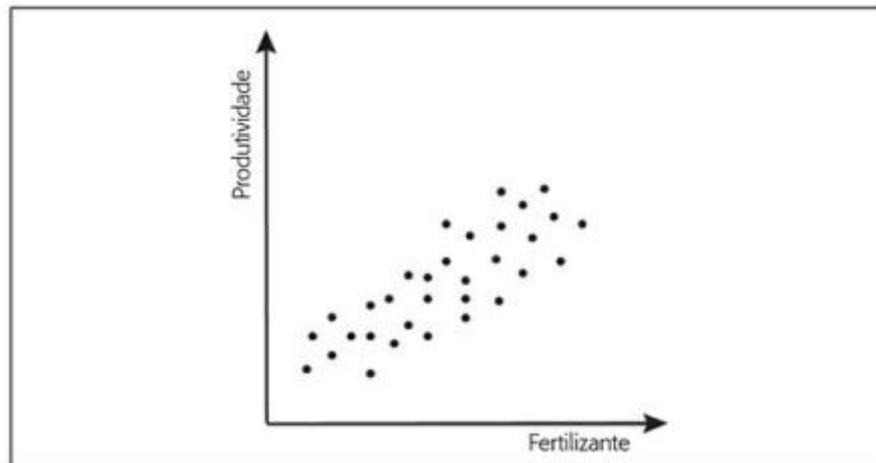
Categoria das reclamações	Mês: abril	Total
1. <i>Check in e check out</i>		10
2. Limpeza não realizada		5
3. Demora na entrega de refeições		15
4. Defeitos na TV ou no ar-condicionado		3
5. Problemas com o chuveiro		6
6. Defeitos no sistema telefônico		9
7. Falta de toalhas ou cobertas		10
8. Outras categorias		20
Total		78

Fonte: Marshall (2010, p.94)

- Gráfico de Correlação: ferramenta gráfica utilizada para investigar relação de causas e efeitos entre fatores quantitativos. O gráfico ilustra de forma simultânea como duas variáveis de um mesmo processo de

correlacionam quando uma ou outra é alterada, conforme ilustrado na figura 7 de forma didática;

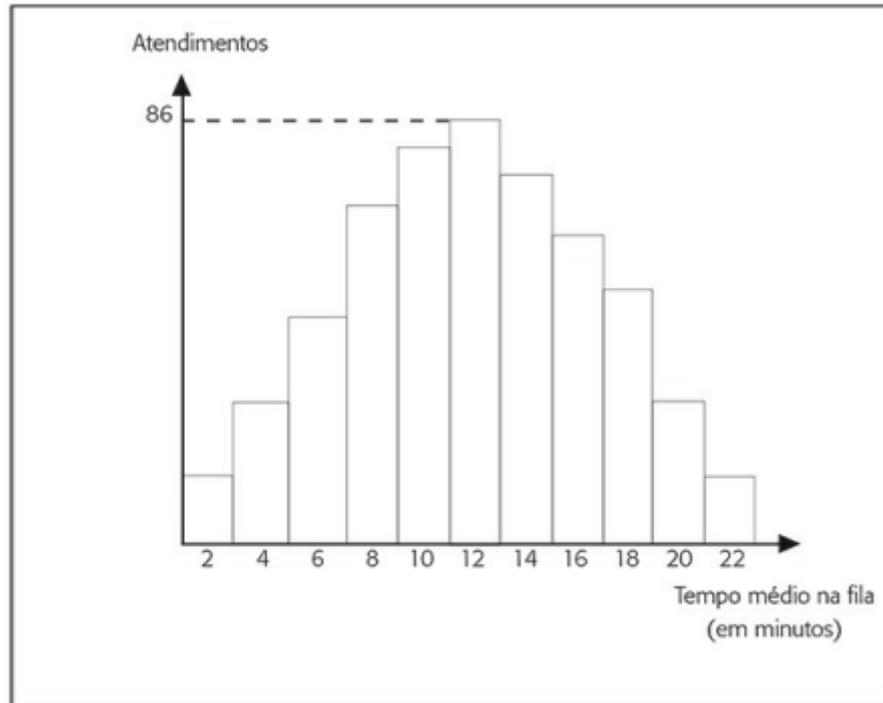
Figura 7 – Gráfico de Correlação



Fonte: Marshall (2010, p.91)

- Gráfico Sequencial: é uma representação gráfica de fácil interpretação que converte dados em informações para descrever tendências dentro de um processo ao longo do tempo;
- Histograma: é uma ferramenta gráfica de dados quantitativos que indica a frequência absoluta, centralização, distribuição e dispersão do conjunto de dados de um processo, por meio de um gráfico de barras a partir de dados coletados por meio de amostragem, além de ilustrar a amplitude do conjunto de dados contribui para identificar o comportamento do processo, conforme representado na figura 8;

Figura 8 – Histograma



Fonte: Marshall (2010, p.96)

- Índices de Capacidade (Cp e Cpk): são valores calculados a partir da dispersão do conjunto de dados em relação à diferença absoluta entre limite superior e o limite inferior de especificação, o valor obtido a partir desta razão indica a capacidade do processo em atender os limites estabelecidos baseado na variação e centralização da dispersão de dados.
- Mapa de Processo: é uma ferramenta que objetiva identificar os principais fluxos, objetivos e as atividades de um processo, ilustra as entradas e saídas de todo processo, descrevendo as principais relações entre as etapas;
- Mapa de Produto: é um diagrama que descreve de forma simplificada a função do produto, colaborando na organização e investigação dos componentes;
- Mapa de Raciocínio: documentação progressiva, que serve para registrar todos os acontecimentos, questionamentos e ações de cada fase do projeto;
- PERT/CPM – *Program Evaluation and Review Technique/Critical Path*: ferramenta similar ao Diagrama de Gantt contempla todos os controles

sobre o plano de ação, sendo capaz de criar interrelações e dependências entre ações, sendo possível o monitoramento de atrasos de uma ou mais atividades que causará impactos no projeto;

- Planejamento de Experimentos: técnica utilizada para solução de problemas e no desenvolvimento de novos processos. São análises complexas que tem como objetivo encontrar as principais variáveis, estabelecendo os parâmetros que traduzem a maximização, minimização ou atingimento de um resultado alvo;
- *Project Charter*: documento de abertura de projeto, que serve como uma espécie de contrato entre o gestor da empresa e o líder do projeto, tendo como objetivo o registro do escopo do projeto, principais entregas, responsáveis e período;
- SIPOC – *Suppliers, Input, Process, Outputs, Customers*: ferramenta que auxilia no mapeamento dos principais elementos de um processo e visa adquirir conhecimento do processo e identificação de oportunidades de melhorias;
- *Stakeholder Analysis*: análise que tem como objetivo identificar o nível de responsabilidade de cada um dos funcionários e gestores envolvidos no projeto;
- Testes de Hipóteses: teste estatístico que possibilita a decisão entre duas ou mais hipóteses. A hipótese formulada após o teste pode ser aceita ou rejeitada se o resultado obtido da amostra for muito improvável. A hipótese existente é chamada de hipótese nula (H_0) e a hipótese complementar é chamada de alternativa (H_1). Hipótese nula (H_0) é a afirmação sobre um parâmetro da população (média, desvio padrão ou proporção) que será considerada verdadeira até o teste demonstrar contrário. Hipótese alternativa (H_1), será confirmada somente se a hipótese nula for reprovada. O nível de significância do teste de hipótese é a probabilidade de uma hipótese nula ser rejeitada, quando ela é verdadeira. É utilizado como parâmetro um α de 0,05, ou seja, 5% de chance de rejeitar uma hipótese nula, quando ela é verdadeira. Um P-valor $> 0,05$ não fornece evidências para rejeitar a

hipótese nula, nesse caso a diferença entre parâmetros provavelmente é oriunda de um erro aleatório.

- Testes de Operação: testes realizados em pequenas escalas pela equipe de projeto para concluir se a ação é adequada antes de alterar definitivamente o processo;
- Testes de Vida Acelerados: testes normalmente executados em novos produtos com o objetivo de observar o comportamento dos componentes durante sua vida útil;
- Voz do Cliente (VOC): ferramenta utilizada para entender as expectativas e necessidades dos clientes, procurando compreender, através do ponto de vista do consumidor, os principais aspectos da empresa;
- 5W2H: é uma metodologia estratégica utilizada para estruturar um plano de ação, que tem como objetivo detalhar de forma rápida e eficaz: o que, quem, onde, por que, quando, como e quanto.

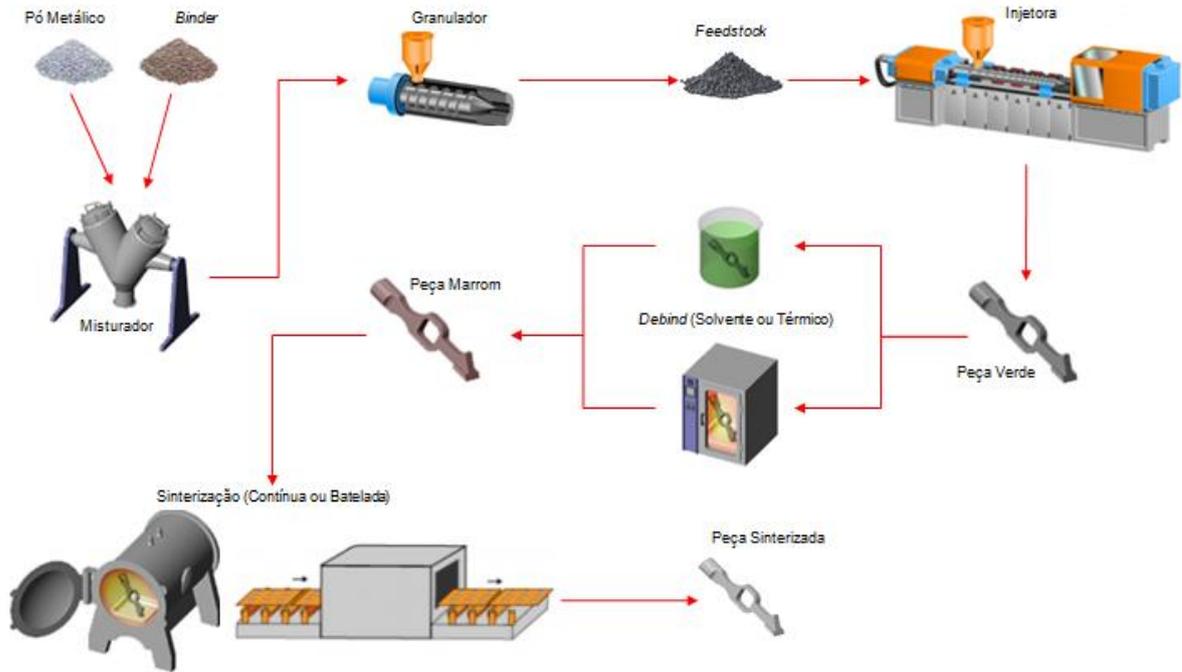
2.5 METAL INJECTION MOLDING - MIM

A moldagem de pós por injeção é um processo de fabricação que utiliza as técnicas da moldagem por injeção de plásticos em conjunto com a metalurgia do pó. A carga injetável produzida a partir da combinação de um sistema aglutinante com o pó metálico, denominado *feedstock*. Este processo combina uma pequena quantidade de polímero com pós-inorgânicos para formar a carga que a ser injetada. O sistema aglutinante, denominado como *binder*, exerce a função de veículo para o pó até as cavidades do molde (GERMAN, 1997).

O material é injetado em um molde para obtenção da forma final do plastificado, solidificando o mesmo ganhando resistência mecânica. Após a peça injetada é extraída do molde, o produto desta fase do processo recebe o nome de peça a verde, onde é conduzida para a etapa de extração do ligante, denominado *debind* onde o polímero é removido formando poros restando as partículas de pó metálico interconectadas recebendo o nome de peça marrom, por fim a peça é levada ao forno para ser sintetizada ganhando a densidade final e suas características (E.KLAR, 2007).

Na Figura 9, estão representadas as etapas do processo de moldagem de pós por injeção, desde a etapa da mistura do aglutinante com o pó metálico até o produto sinterizado final.

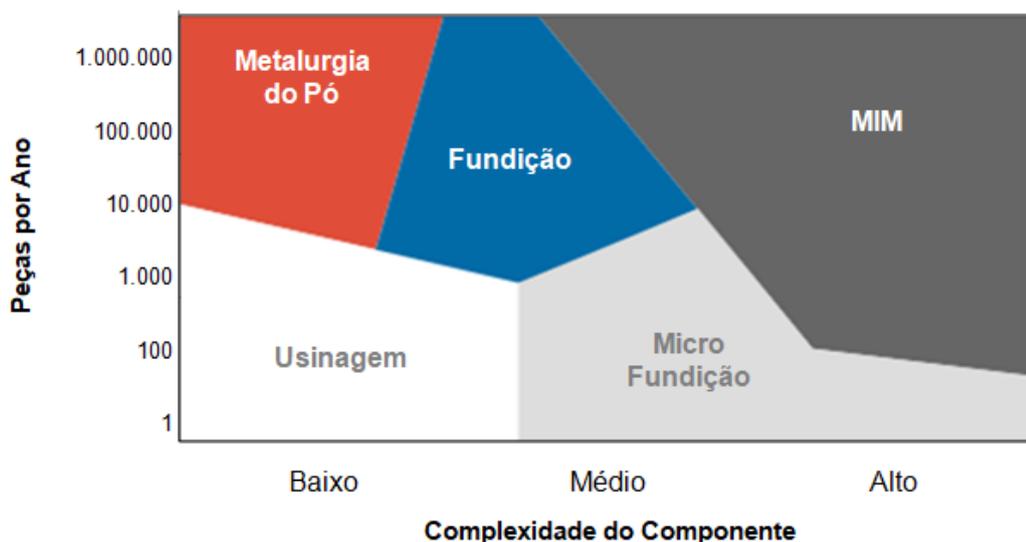
Figura 9 – Etapas processo MIM



Adaptado de < <https://carbosystem.com/wp-content/uploads/mimprocess>>. Acesso em: 28 outubro. 2021

O processo de moldagem de pós por injeção tem ganhado relevância devido a vários fatores, entre eles, produção de componentes com geometrias complexas, altos índices de produtividade, produção de peças em séries, obtenção de microestrutura uniforme e ganhos relacionados à necessidade às etapas de acabamento (ZAUNER, 2006). A Figura 10 representa o processo de fabricação mais indicado de acordo com a relação entre volume de peças produzidas e complexidade geométrica do componente.

Figura 10 – Processo de fabricação indicado de acordo com o volume de peças e complexidade do componente



Fonte: Adaptado de German (1997, p.301)

O processo de fabricação MIM tem sido cada vez mais utilizado nas indústrias para fabricação de geometrias complexas, altos volumes e baixo custo de produção, quando comparado a outros processos de fabricação metalúrgica (HEANEY, 2012).

A Tabela 3 indica uma expectativa de crescimento do mercado mundial de produtos manufaturados com a tecnologia MIM.

Tabela 3 – Projeção de vendas produtos MIM até 2026 em todo mundo.

	2018 (Bilhões de dólares)	2026 (Bilhões de dólares)
Vendas de produtos MIM	2,3	5,2

Fonte: Relatório Global Market Insights 2019

2.5.1 Feedstock

O *Feedstock* refere-se a mistura injetável, também chamado de massa de injeção ou carga injetável, é o resultante da combinação de forma homogenia e proporcional das propriedades do pó chamado de fração inorgânica com as do sistema polimérico denominado de fração polimérica incorporado a um elemento ligante tratado como surfactante (N.H. LOH, 2001).

De acordo com Thümmeler (1993) morfologia da mistura injetável possibilita um curso de alimentação ajustado através do funil para o canhão da máquina injetora seguido de cuidados durante o processo de fabricação dos componentes resultaram nas características químicas, físicas, microestruturais e dimensionais desejadas na peça, bem como, a produtividade.

A fração polimérica é responsável por conduzir a fração inorgânica até a cavidade a ser moldada, como função secundária, é responsável pela difusão e manutenção das partículas encapsuladas na forma homogênea desejada até o início da sinterização (BILOVOL, 2006). Regularmente, empregam-se sistemas com multicomponentes e diferentes temperaturas de fusão e decomposição, permitindo a remoção seletiva (GERMAN, 1994). Pode-se dividir a fração ligante em três partes distintas:

- **Polímero Estrutural:** Utiliza-se normalmente um material termoplástico, nos polímeros estruturais são desejadas cadeias moleculares mais curtas, tornando a mistura injetável com menor viscosidade, contribuindo com o processamento e o preenchimento da cavidade do molde, posteriormente o material termoplástico contribui para que os tempos extração se tornem menores. O polímero estrutural tem a função de proporcionar resistência mecânica à peça verde e manter a integridade dimensional da mesma durante as etapas de extração química e térmica do sistema ligante (KARATAS, 2004).
- **Elemento Auxiliar ou Fundente:** Elemento opcional constituído por um hidrocarboneto, com objetivo baixar o ponto de fusão, auxiliando o fluxo, servindo de agente lubrificante da mistura, esses materiais compreendem os parafínicos e as ceras, por exemplo, as de abelhas e carnaúba, além, do PEG (polietileno glicol). Os elementos auxiliares se caracterizam por seu baixo peso molecular e tem a função principal de facilitar o processo de mistura, atuando na alteração da molhabilidade da interface entre a fração inorgânica e a fração polimérica (GERMAN 1997).
- **Surfactante:** Agente responsável na geração uma ponte entre as moléculas polares orgânicas e as apolares inorgânicas. O ácido esteárico é um material amplamente empregado em misturas injetáveis, beneficiando na estabilidade do processo demonstrando

baixa resistência a tensão de escoamento aliada a uma viscosidade baixa, figurando como um material de relevância para o processo moldagem de pós por injeção (TSENG, 2000).

As partículas de pós metálicos utilizadas no processo MIM necessitam de uma distribuição granulométrica adequada resultando em uma densidade aparente apropriada, estes fatores somados a uma determinada área superficial proporciona um processamento homogêneo da composição química em sua totalidade. Para o processo de MPI, costuma-se utilizar pós com tamanho micrométrico com partículas abaixo de 25 μm que resulta em um melhor preenchimento da cavidade e melhor densificação dos componentes (THÜMLER, 1993).

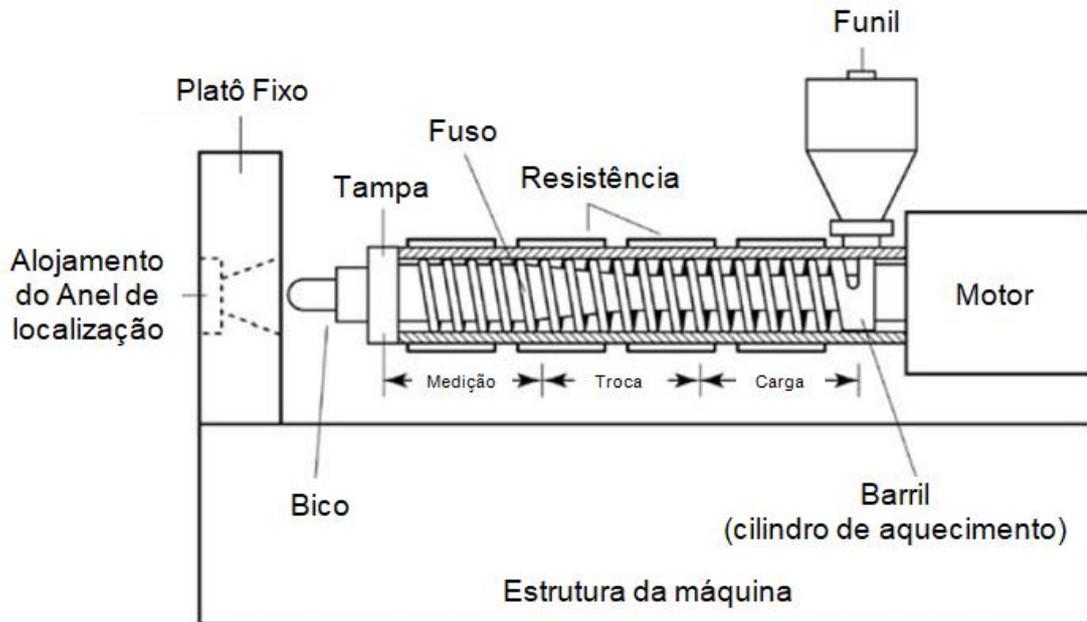
As partículas empregadas no processo MIM geralmente são equiaxiais e abaulado, dessa forma favorece um melhor empacotamento quando compactadas e podem possuir uma grande faixa de densificação, entre 30 e 80 % da densidade teórica (CHIAVERINI, 2001).

2.5.2 Injeção

As máquinas usadas para esta parte do processo MIM são substancialmente as mesmas usadas na indústria de plásticos, com pequenas modificações para reduzir o desgaste do parafuso e cilindro endurecidos, para garantir homogeneidade durante a plastificação (CHANG, 2013).

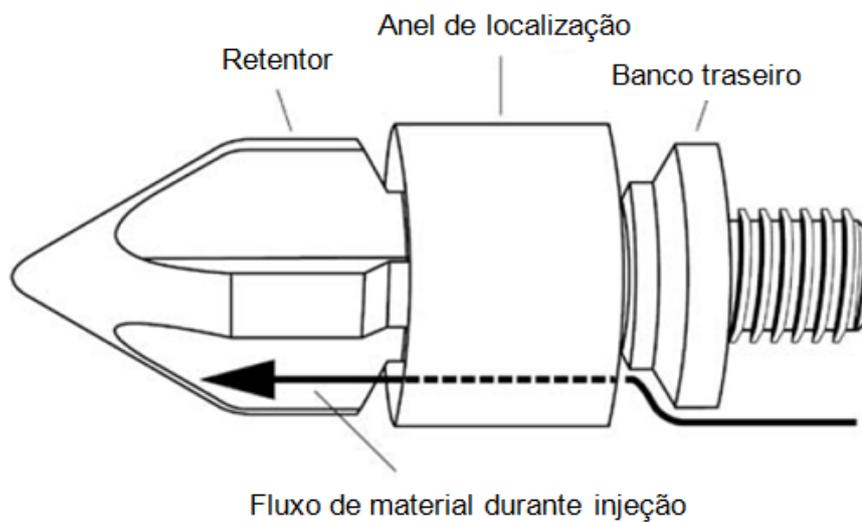
A injeção do *feedstock* no molde é obtida por aplicação de pressão e aumento da temperatura. A mistura injetável é transportada pela máquina de injeção, apresentada na Figura 11, por um fuso, onde o *feedstock* é aquecido. No bico de injeção apresentada na Figura 12, permanece anexado diretamente com o molde, sendo exercida uma pressão que direciona o material a encher a cavidade do molde. No molde existe um sistema de arrefecimento, para permitir a solidificação do material e aquisição da forma desejada. Durante o período em que o material arrefece, é necessário continuar a exercer uma pressão de recalque para evitar o retorno de material (MANSON, 1983).

Figura 11 – Configuração básica da Injetora



Fonte: Adaptado de Heaney (2012, p.111)

Figura 12 – Configuração Bico de Injeção



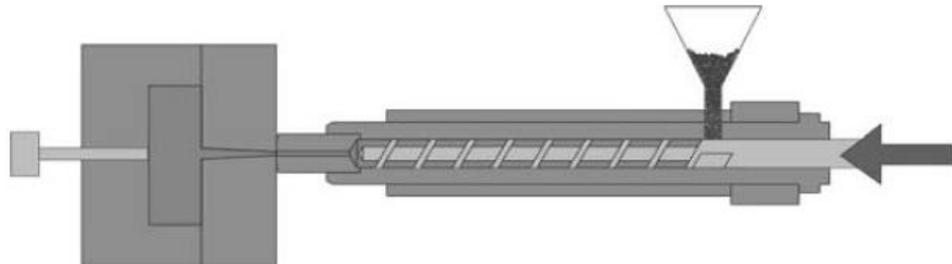
Fonte: Adaptado de Heaney (2012, p.111)

De acordo com Chang (2013), as peças verdes são formadas em um processo de moldagem por injeção equivalente à formação de peças de plástico. As variedades geométricas de peças que podem ser produzidas por esse processo são semelhantes à grande variedade de componentes plásticos.

Para Goodship (2004) o ciclo de injeção é composto por cinco fases, conforme descrito a seguir:

- Fase 1: O material é injetado na ferramenta, conforme representado na Figura 13;

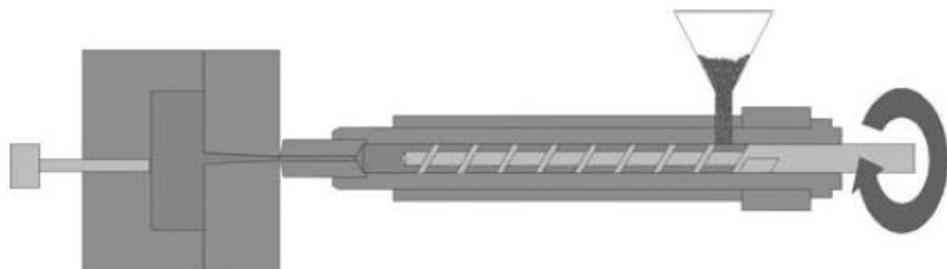
Figura 13 - Injeção



Fonte: Goodship (2004, p.5)

- Fase 2: O parafuso começa a girar e retrair, medindo o peso específico no material fundido para próxima injeção, neste momento o molde permanece fechado fazendo com que o material injetado seja resfriado, representado na Figura 14;

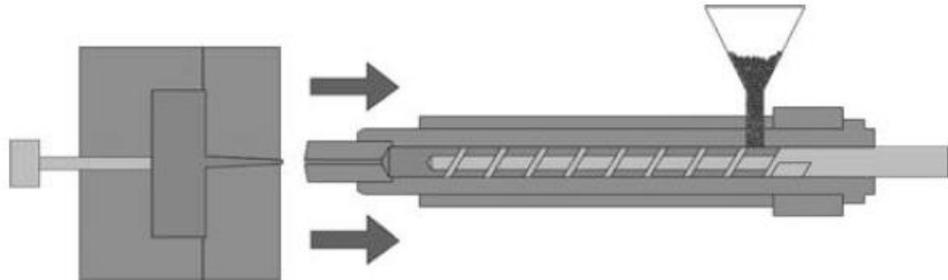
Figura 14 – Medição



Fonte: Goodship (2004, p.4)

- Fase 3: A unidade de injeção se move para trás da unidade de fixação, conforme ilustrado na Figura 15;

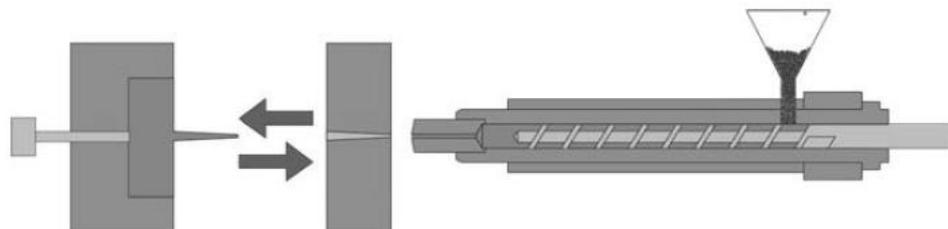
Figura 15 – Recuo da Unidade de Injeção



Fonte: Goodship (2004, p.4)

- Fase 4: Neste momento, o molde se abre revelando o componente moldado por injeção, representado na Figura 16;

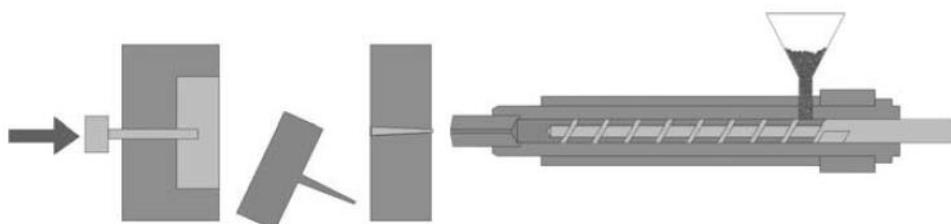
Figura 16 – Abertura do Molde



Fonte: Goodship (2004, p.4)

- Fase 5: É o estágio onde ocorre a ejeção da peça resfriada do molde, conforme representado na Figura 17, simultaneamente a unidade de injeção irá avançar até a unidade de grampo para dar início a um novo ciclo, retornando a Fase 1.

Figura 17 - Ejeção



Fonte: Goodship (2004, p.5)

2.5.3 *Debind*

Extração do ligante é uma etapa crítica do processamento de peças moldadas por injeção, a remover o aglutinante pode afetar a forma final da peça caracterizando um processo vulnerável, sendo uma grande fonte de defeitos. Dado que o aglutinante sustenta a união das partículas de pó, determinando o sucesso ou insucesso da peça final (OLIVEIRA, 2004).

De acordo com German (1997), em caso de a remoção não for realizada com grande eficácia, as peças podem sofrer quebras, fissuras, distorção ou contaminação. A melhor forma de minimizar estes efeitos é a remoção em multi-etapas, que garante uma melhor retenção da forma, a qual é conseguida quando o ligante é multi-componente.

2.5.3.1 Extração dos Ligantes Primários

De acordo com German (1997) os ligantes primários são na grande maioria polímeros termoplásticos com baixos pesos moleculares. Existem diversas técnicas aplicadas para a remoção dos ligantes primários como pode ser observado na Tabela 4, cada um com suas vantagens e desvantagens.

Tabela 4 – Técnicas de extração e suas vantagens e desvantagens

Técnica de Extração	Principais Características	Vantagens	Desvantagens
Imersão em solvente	O componente é colocado em um solvente para extração seletiva de um ligante do sistema multicomponente via dissolução química.	O componente se mantém rígido sem reações químicas; há a abertura de uma estrutura porosa para subsequente fácil extração dos polímeros secundários.	Perigo devido ao solvente; cuidado com o manuseio e meio ambiente; requer secagem antes de aquecimento para a sinterização.
Extração supercrítica	Fluido aquecido e pressurizado acima ponto crítico para dissolver o ligante em um fluido.	Não há mudança de fase e a formação de defeitos é minimizada.	Rígido controle de temperatura e pressão; baixas taxas de extração (morosidade).

Condensação de vapor por solvente	Manutenção do injetado em vapor de solvente aquecido e permitir condensação para absorção de um ligante principal.	A baixa temperatura experimentada pelo componente diminui os defeitos e distorções.	Cuidados com o meio ambiente; saúde e toxicidade com o vapor de solvente; condensação e recobrimento; necessária secagem antes de aquecimento.
Despolimerização catalítica	Aquecimento do injetado em atmosfera contendo catalisador para continuação despolimerização e retirada do ligante.	Processo rápido que trabalha tanto com seções de espessura delgadas como grandes; com excelente retenção de forma e alta automação.	Necessidade de o molde ser aquecido; possíveis riscos com ácido nítrico e seus produtos de decomposição provenientes da catálise.
Difusão controlada por temperatura	Aquecimento lento do componente em um sistema de baixa pressão (Vácuo) com fluxo contínuo de gás para remoção dos produtos evaporados e fundidos.	Processo em uma etapa elimina o manuseio entre a extração de ligantes e sinterização (ciclo único).	O amolecimento do ligante permite a deformação do componente; equipamento caro; baixas taxas de extração; possível contaminação dos injetados e do forno.
Permeação controlada por temperatura	Passagem de gás sobre as peças em um aquecimento lento para contínua degradação do ligante.	Baixo custo de instalação; processo mais amplamente utilizado; não há desperdício de sólidos ou líquidos.	Pobre controle dimensional; processo relativamente lento com possibilidade de contaminação durante o aquecimento. Grande consumo de gás.
Sucção capilar	Aquecimento do injetado em um leito poroso (substrato) que absorve o	Taxas iniciais altas; aplicável em uma ampla gama de polímeros; fácil	Possibilidade de distorção devido aos múltiplos

	ligante fundido.	controle.	manuseios; problema com a disposição do ligante e separação da peça do leito.
Oxidação	Aquecimento do injetado em ar com simultânea queima do ligante e oxidação do pó para obtenção de resistência mecânica ao manuseio	Alta resistência ao manuseio após a extração de ligantes; efetiva remoção do carbono.	Baixo teor de carbono; processo lento; apenas aplicável para metais de baixa estabilidade de óxido e cerâmicos; possibilidade de reação exotérmica.

Fonte: Adaptado de German (1997, p.177)

A rede de poros alcançada após a remoção dos ligantes primários é necessária para facilitar a remoção dos ligantes secundários, estes sendo removidos na forma de vapor. A rede de poros é necessária para facilitar a saída dos gases provenientes da decomposição dos ligantes secundários. Caso não exista poros suficientes para beneficiar a saída dos gases, ocorre o aumento de pressões internas no produto o que responde pela maior quantidade de defeitos no mesmo, tais como deformidade localizada ou empenamento de todo o produto (HEANEY, 2012).

2.5.3.2 Extração dos Ligantes Secundários

Nas baixas temperaturas, onde os ligantes primários são removidos, não ocorre nenhuma ligação por difusão entre as partículas de pó. Os ligantes secundários são removidos termicamente. Isso é obtido aquecendo as peças lentamente até a temperatura em que o ligante secundário evapora e mantendo as peças nessa temperatura até que todos os ligantes sejam removidos, na Tabela 5 apresenta a temperatura necessária para extração dos principais ligantes secundários utilizados (HEANEY, 2012).

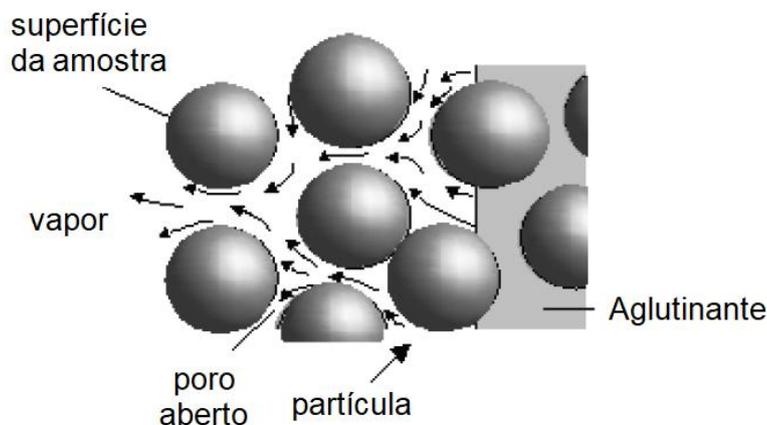
Tabela 5 – Temperatura remoção de ligantes secundários

Ligante Secundário	Temperatura de remoção térmica (°C)
Poliacetal	300 – 450
Polipropileno	450 – 500

Fonte: Adaptado de Heaney (2012, p.145)

A extração do ligante secundário ocorre quando o polímero começa a se decompor com o aumento de temperatura. O vapor gerado é a resultante da decomposição, este sendo eliminado através dos poros que se formou durante a extração dos ligantes primários, a evaporação ocorre primeiramente na superfície do material e de forma progressiva até o núcleo, conforme representado na Figura 18. Desta forma o aquecimento do componente deve ser dado de forma gradativa durante esta etapa, para evitar qualquer tipo de aumento de pressão interna que ocasionaria trincas ou defeitos internos, que influenciariam na qualidade final do componente injetado (GERMAN, 1997).

Figura 18 – Modelo teórico de extração do ligante



Fonte: Adaptado de German (1997, p.179)

De acordo com Barrière (2000), no final do ciclo de remoção térmica, pequenas ligações de difusão são formadas entre as partículas de metal em pó que aumentam o atrito entre as partículas e ajudam a reter a forma dada à peça pela moldagem por injeção.

2.5.4 Sinterização

Sinterização é a etapa de densificação da peça fabricada, onde serão alcançadas as propriedades. O processo consiste em transporte de matéria, termicamente

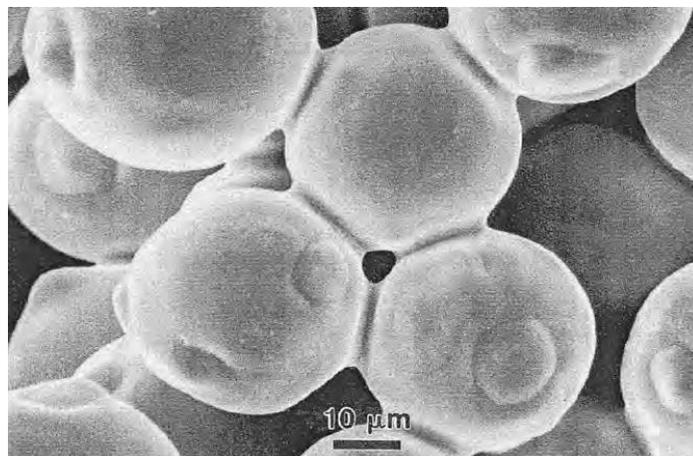
ativado, em uma massa de pós ou um compactado poroso, resultando na diminuição da superfície específica livre pelo crescimento de contatos entre as partículas, redução do volume do componente e alteração da geometria dos poros (GERMAN, 1997).

Para Banerjee (2012), nesta fase é necessário que ocorra a difusão entre as partículas metálicas por entre os vazios que anteriormente estavam preenchidos com o ligante. Os vazios formados após o processo de extração dos ligantes serão responsáveis pela contração do material, a contração volumétrica do material durante a fase de sinterização está diretamente relacionada com a quantidade de ligante aplicado ao *feedstock*.

De acordo com Thümmler (1993), o processo de sinterização pode ser subdividido em três estágios, conforme descrito a seguir:

- Estágio inicial: Os contatos entre as partículas são transformados em pontes sinterizadas, denominadas pescoços, representado na Figura 19. Mesmo antes da sinterização, os contatos existem na forma de microplanos, sua extensão dependente da pressão de compactação na fase de injeção. Durante esta fase, as partículas de pó permanecem discretas. Os limites dos grãos são freqüentemente formados entre duas partículas adjacentes no plano de contato. O centro das partículas se aproxima apenas ligeiramente, obtendo pequenos índices de encolhimento.

Figura 19 – Estágio inicial da formação de pescoços

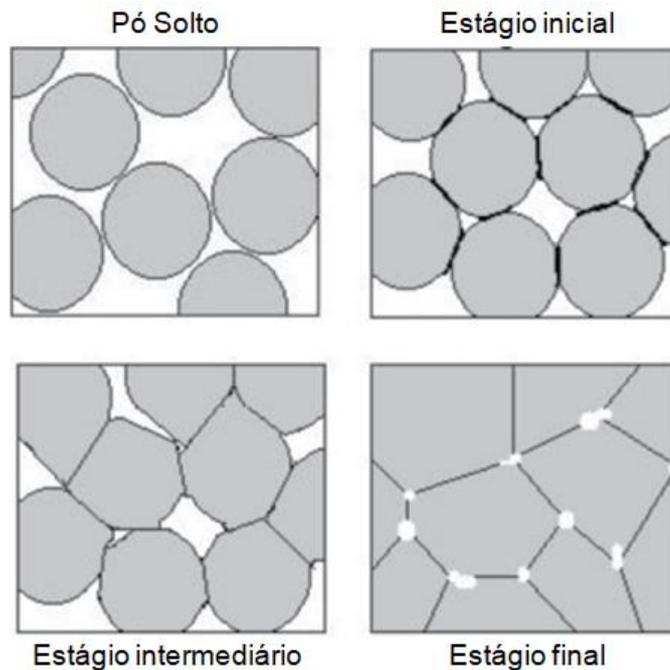


Fonte: German (1997, p.221)

- Estágio intermediário: As partículas individuais começam a perder sua identidade devida alto crescimento dos pescoços. Uma rede de poros é formada e ocorre o crescimento do grão, o que resulta em uma nova microestrutura.
- Estágio final: entre 90 e 95% da densidade teórica, a proporção relativa do espaço de poro fechado aumenta rapidamente. Os poros isolados tornam-se cada vez mais esferoidizados. Nos casos em que os gases não podem se difundir, eles ficam presos na porosidade e a densificação adicional torna-se impraticável assim que a pressão do gás atinge o equilíbrio com a pressão devido à tensão superficial.

A Figura 20 representa de forma resumida as três principais etapas do processo de densificação, resultante do processo de sinterização.

Figura 20 – Estágios de densificação do material



Fonte: Adaptado de German (1997, p.226)

A densificação devido ao processo de sinterização ocorre em uma temperatura próxima à temperatura de fusão do material. O aumento da união entre as partículas ocorre devido ao movimento dos átomos, a velocidade movimento atômico ocorre mais rapidamente quando a temperatura aumenta, e de acordo com a temperatura de fusão de cada material, quanto mais próximo da temperatura de fusão mais rapidamente ocorre a sinterização. Em conjunto com a densificação

ocorre um significativo aumento de dureza resistência mecânica entre outras propriedades mecânicas (GERMAN, 1997).

2.5.4.1 Atmosfera de Sinterização

A prevenção da oxidação é a função primária das atmosferas de sinterização na metalurgia do pó, além de prevenir a oxidação dos componentes oxidados, a atmosfera de sinterização tem a finalidade de (THÜMMLER, 1993):

- Impedir ou mitigar as reações químicas - oxidação, redução, cementação, decarbonetação, nitretação e decomposição, incluindo a eliminação de impurezas;
- Impedir a evaporação indesejada do componente principal ou dos elementos de liga;
- Remover misturas voláteis e seus produtos de decomposição, como lubrificantes ou plastificantes, do processo de moldagem por injeção;
- Fornecer transferência de calor por convecção no forno;
- Fornecer a pressão hidrostática externa necessária na prensagem isostática a quente.

A atmosfera de sinterização é contida no forno para controlar as reações durante a sinterização, podendo ser ajustado a composição química final, dimensões e propriedades mecânicas do material. Diversos fatores são considerados na seleção de uma atmosfera de sinterização, em grande parte dos metais requer proteção contra a oxidação pela atmosfera. Os óxidos na superfície do pó impedem a ligação por sinterização, reforçando a necessidade de uma atmosfera redutora para o fornecimento da proteção contra a oxidação e a redução dos óxidos existentes na superfície do pó. O hidrogênio (H_2) puro produz a maior densidade, devido à redução do óxido, mas oferece a menor dureza e resistência, obtendo um componente com maior ductilidade. Por outro lado, uma atmosfera com alto teor de nitrogênio (N_2) tem menor potencial de redução, portanto, é menos eficaz na remoção de carbono e oxigênio (GERMAN, 1997).

Diversas atmosferas de sinterização são usadas no MIM, incluindo ar, nitrogênio, hidrogênio, misturas de hidrogênio-nitrogênio, misturas de hidrogênio-argônio e vácuo. Em todas essas atmosferas, o principal cuidado em concentrações de espécies reativas, diversas combinações de hidrogênio e nitrogênio são usadas

para sinterizar ligas ferrosas. Em termos de caráter redutor, o hidrogênio puro é mais favorável. No entanto, a umidade diminui a capacidade de reduzir óxidos e torna a atmosfera descarbonetante (HEANEY, 2012).

Para German (1997) a complexidade associada às atmosferas de sinterização resulta das diversas reações possíveis. O controle adequado da atmosfera fornecem uma oportunidade para alterar a sinterização e até mesmo a química do material durante o ciclo de sinterização. Outrossim, a atmosfera não é constante durante a sinterização, devido os componentes transportarem contaminantes (óxidos, carbono, aglutinante e gases aprisionados) para o forno. A evolução desses contaminantes à medida que o componente é aquecido pode alterar o balanceamento da atmosfera.

De acordo com Thümmeler (1993) a principal dificuldade, durante a sinterização do aço, é a variação do potencial de carbono ao longo do comprimento do forno. Mudanças em grandes escalas ao longo das zonas de aquecimento, sinterização e resfriamento, de acordo com o nível de reação ocorrendo no processo.

3 METODOLOGIA

Metodologia é o estudo do método. Sendo método, o conjunto de etapas a serem superadas para alcançar um determinado objetivo. Já a ciência, neste contexto, passa a ser o conjunto de conhecimentos ordenados de forma estruturada referentes a determinado domínio do saber. Portanto, a metodologia científica trata de normas técnicas a serem seguidas para a realização de pesquisas científicas, neste contexto está as investigações em relação a uma determinada área ou fenômeno (RAMPAZZO, 2011).

3.1 MÉTODO DE PESQUISA

Pesquisa é uma técnica crítica para questionar e buscar responder inquietações sobre o mundo, sendo aplicado para ordenar as diversas teorias e explicações existentes, como também apontar quais as teorias e explicações mais coerentes. A pesquisa tem como objetivo principal e último a formulação de questões e encontrar respostas para as mesmas (DANE, 1990).

A aplicação da pesquisa está relacionada à elaboração de estudo, com a intenção de resolver um problema específico (GIL, 2010). Essa pesquisa tem escopo de aplicar as ferramentas da metodologia Seis Sigma, direcionada na solução de problemas com índices de carbono no processo de sinterização em forno contínuo.

Relacionado aos objetivos, a pesquisa é classificada em caráter exploratória. A pesquisa exploratória tem o propósito de proporcionar familiaridade com o problema, tornando-o mais evidente (GIL, 2010). Isso decorre da investigação do problema considerando os diversos aspectos que o integra, envolvendo coleta de dados através da bibliografia existente e de observações dos processos de fabricação da organização.

De acordo com Dresch (2018), a definição de etapas em uma pesquisa científica não somente trás uma linha de raciocínio lógico de fácil entendimento, como define critérios a serem aplicados durante a pesquisa. A definição de forma estruturada do modo em que se conduzir o estudo pode facilitar a percepção mais assertiva do problema proposto.

A pesquisa classifica-se quanto à natureza de seus dados como quantitativa. Na pesquisa quantitativa é realizado um estudo de determinados número de casos

individuais, quantificando fatores segundo um estudo típico, servindo-se frequentemente de dados estatísticos, e generalizando o que foi identificado nos casos particulares. (RAMPAZZO, 2011). Deste modo, para identificar a demanda de intervenção na empresa, foram observados e coletados dados de casos específicos.

O procedimento técnico da pesquisa é o estudo de caso. De acordo com Marconi e Lakatos (2010), a técnica é um conjunto de processos utilizados pela ciência, sendo necessária habilidade na condução da pesquisa. O estudo de caso, segundo Gil (2010), estabelece o conhecimento profundo de poucos objetos, permitindo o conhecimento aprofundado dos mesmos. Severino (2007) ressalta que o estudo de caso se concentra em um caso particular considerado representativo do agrupamento de casos similares.

3.2 MÉTODO DE TRABALHO

Na presente etapa do trabalho, é apresentado o seqüenciamento lógico das atividades que serão realizadas, com objetivo de redução da variabilidade do processo relacionado aos índices de carbono em componentes sinterizados, gerando redução dos custos operacionais de sucata.

A primeira etapa consistiu na realização de uma pesquisa bibliográfica do tema Seis Sigma para se conhecer mais profundamente a metodologia DMAIC e suas técnicas de solução e análise de problema, juntamente com o aprofundamento teórico a partir de pesquisas bibliográficas em temas relacionados ao processo MIM.

As etapas programadas para desenvolvimento do trabalho constituíram-se da estrutura DMAIC, estando apresentadas no Quadro 2.

Quadro 2 – Plano de Atividades do Trabalho

Etapa	Atividades	Ferramentas Utilizadas
Define “D”	<ul style="list-style-type: none"> • Descrever o problema do projeto. • Definição do impacto financeiro. • Definir participantes. • Definir o escopo. • Definição meta. • Definir as restrições • Elaborar um cronograma macro. 	<ul style="list-style-type: none"> • Gráfico de Pareto. • SIPOC. • Diagrama de Gantt. • Braistorming.
Medição “M”	<ul style="list-style-type: none"> • Mapear o processo atual. • Identificar as possíveis causas do problema. • Estudo do sistema de medição. • Coleta de dados. • Estudo de capacidade do processo. 	<ul style="list-style-type: none"> • Avaliação de sistema de medição (MSA). <ul style="list-style-type: none"> • MSA tipo 1; • MSA tipo 2; • MSA <i>Nested Gage</i> • Técnica Nominal de Grupo (NGT). • Diagrama de Pareto. • Fluxograma. • Diagrama de Causa e Efeito. • Histograma. • Diagrama de afinidades.
Analisar “A”	<ul style="list-style-type: none"> • Analisar o processo gerador de problema. • Analisar os dados coletados. • Identificar as possíveis causas do problema. • Validar as causas do problema. 	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Brainstorming</i>. • Diagrama de probabilidade. • Identificação padrão de distribuição. • Teste de <i>Outlier</i>. • Teste de Hipótese. • Planejamento de experimentos (DOE). • Gráfico de efeitos padronizados. • Gráfico de Pareto. • Análise de correlação/ regressão.
Improve “I”	<ul style="list-style-type: none"> • Gerar ideias de solução de problema potenciais. • Priorizar as soluções de problema potenciais. • Testar as soluções selecionadas. • Elaborar e executar plano de ação para implementar as soluções de problema. 	<ul style="list-style-type: none"> • Brainstorming. • Histograma. • Plano de ação. • 5W1H.
Controle “C”	<ul style="list-style-type: none"> • Avaliar se foi alcançada a meta proposta. • Padronizar as alterações realizadas no processo e dar treinamentos. • Comunicar novos padrões de processo • Definir e implementar um plano de ação para monitorar a performance do processo. • Recomendar trabalhos futuros 	<ul style="list-style-type: none"> • Diagrama de Pareto. • Histograma. • Teste de hipótese. • Gráfico de linhas.

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

4 ESTUDO DE CASO

Este trabalho foi realizado em uma metalúrgica multinacional, líder mundial no mercado de armas leves. Será abordada a aplicação da metodologia Seis Sigma para estabelecer um melhor controle das variáveis de processo, diminuindo a variabilidade dos índices de percentual de carbono em componentes sinterizados em forno contínuo, estruturado dentro das fases da metodologia DMAIC.

4.1 APRESENTAÇÃO DA EMPRESA

A empresa foi fundada em 1939, no mesmo ano que se instaurou a Segunda Guerra Mundial. No período de fundação da empresa foi impulsionado pelo apoio político do então Presidente da República Getúlio Vargas, dado a estratégia de governo de industrialização do país. Com o apoio político, um grupo de empresários do Rio Grande do Sul estabeleceu uma fábrica sediada na cidade de Porto Alegre. Inicialmente estabelecida como uma fábrica de ferramentas, pouco tempo depois começou a desenvolver os próprios projetos de armas.

Em 1942, os primeiros revólveres desenvolvidos pela empresa e comercializados pela empresa. No ano de 1950, foi construída uma nova fábrica para atender à crescente demanda, dado o cenário de dificuldade de importação de máquinas e ferramentas, a empresa passou a desenvolver o seu próprio maquinário e ferramental para atendimento das especificações do produto.

Nas décadas 60 e 70 a expansão da produção e a diversificação de produtos continuaram em crescimento, exigindo a construção de uma terceira fábrica para atendimento do mercado, esta fábrica estando localizado na cidade de São Leopoldo. Essa expansão significou para a empresa uma grande captação de recursos, convertendo no investimento em infraestrutura, dando a empresa condições de abrir sedes de fabricação fora do Brasil.

Em 1981, foi inaugurado uma unidade em Miami, no sul da Flórida Estados Unidos. Este foi um marco importante para empresa, pois esta foi o início da expansão comercial nos Estados Unidos. Neste período a empresa receberia reconhecimento internacional, se tornando um dos principais fabricantes de armas do mundo.

Atualmente, a empresa avança dentro do cenário internacional. A sede nos Estados Unidos migrou de localidade, no final de 2019, para um novo centro de fabricação com mais de 18 mil metros quadrados no sul do estado da Geórgia. Esta mudança estratégica foi fundamental para a expansão das capacidades de engenharia e manufatura, para atender à crescente demanda por produtos da empresa, com atendimento das expectativas dos clientes.

Recentemente no ano de 2021 foi lançado uma *joint venture* com uma importante empresa indiana, atendendo o programa do atual governo indiano, que tem como objetivo de atrair fabricantes de alta tecnologia a instalar fábricas no país, como forma de impulsionar a industrialização de alta performance em todas as áreas, inclusive no mercado de armas.

4.2 APRESENTAÇÃO DOS SETOR

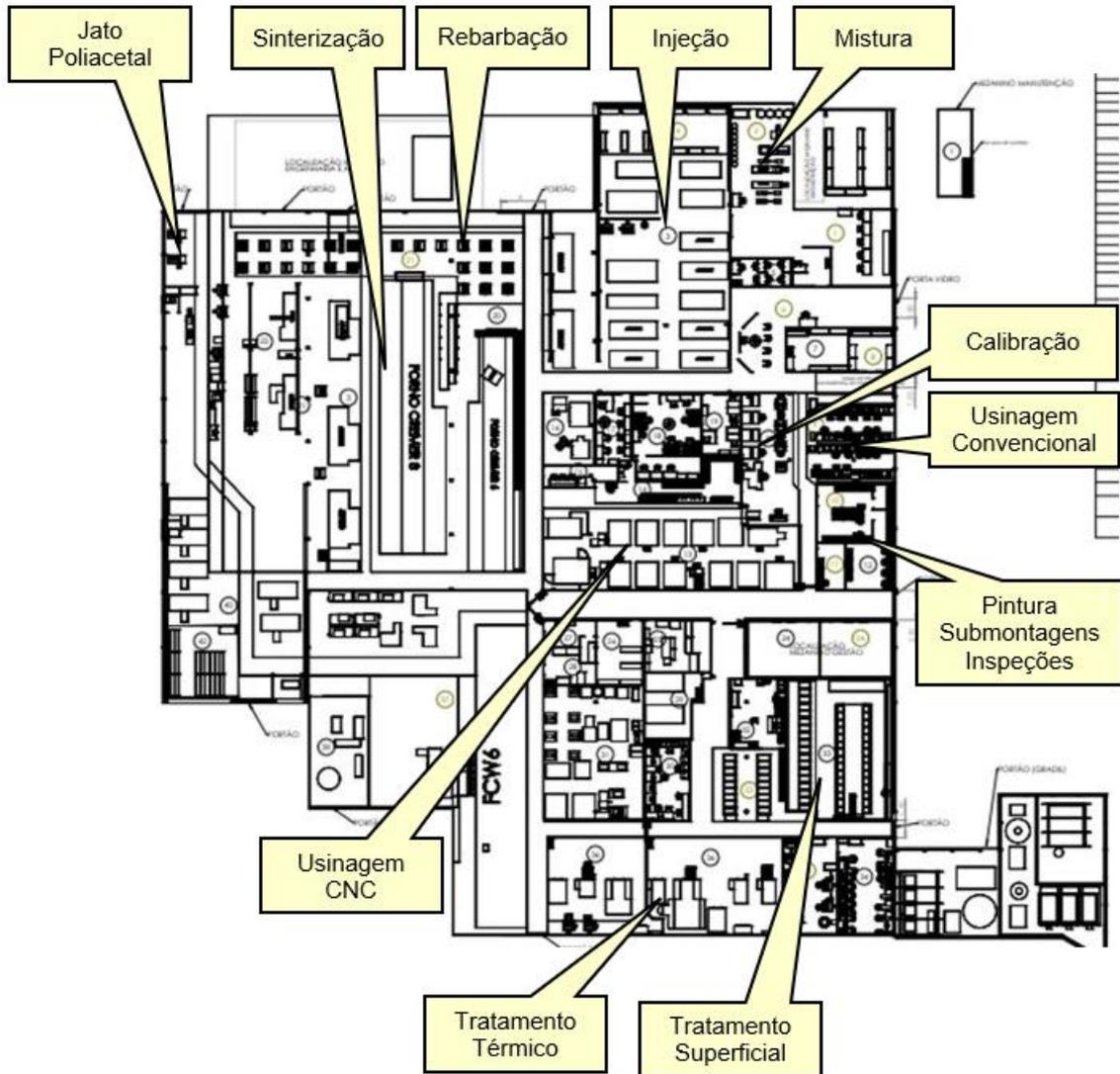
O trabalho foi realizado no setor MIM, que produz componentes sinterizados para o segmento de armas.

4.2.1 Produção de Componentes

O processo de fabricação é estruturado em células de mistura, injeção, rebarbação manual de componentes e jato de poliacetal, sinterização, tratamento térmico, usinagem convencional, calibração, usinagem CNC, tratamento superficial, pintura, submontagem e inspeções.

A figura 21 apresenta o *layout* do setor MIM.

Figura 21 - *Layout do Setor*



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Para descrever de forma simplificada a cadeia produtiva do setor, a Figura 22 apresenta o fluxograma da produção MIM. O item destacado em laranja refere-se ao setor de sinterização abordado neste trabalho.

Figura 22 – Fluxograma Produção MIM



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

No setor são produzidos 937 modelos de componentes, estes separados em 11 famílias de produtos e 3 segmentos de mercado, sendo Armas Táticas, Revolver e Pistola.

Na Figura 23 apresenta de forma resumida a diversidade de produtos, dimensões e complexidade geométrica fabricados no setor.

Figura 23 - Produtos



Fonte: Arquivo da empresa.

4.2.2 Forno Contínuo

O processo de sinterização ocorre em um forno de sinterização contínua, onde o material injetado, ou peça verde como é denominado, é submetido ao forno para obtenção do produto sinterizado.

A Fotografia 1 apresenta um exemplo de forno de sinterização contínua.

Fotografia 1 – Exemplo de Forno de Sinterização Contínua



Fonte: Registrado pelo autor (2022).

As peças verdes são organizadas em barcas de sinterização, estas barcas são dispositivos para acondicionamento de peças, por meio destas serão transportadas por sistemas de esteiras para as fases de despolimerização catalítica, as peças são aquecidas e transportadas para uma câmara onde são submetidas a uma atmosfera com vapor de ácido nítrico, ocorrendo a catálise.

A Fotografia 2 apresenta um exemplo de barca para transporte de material para o processo de sinterização.

Fotografia 2 – Barca de Transporte

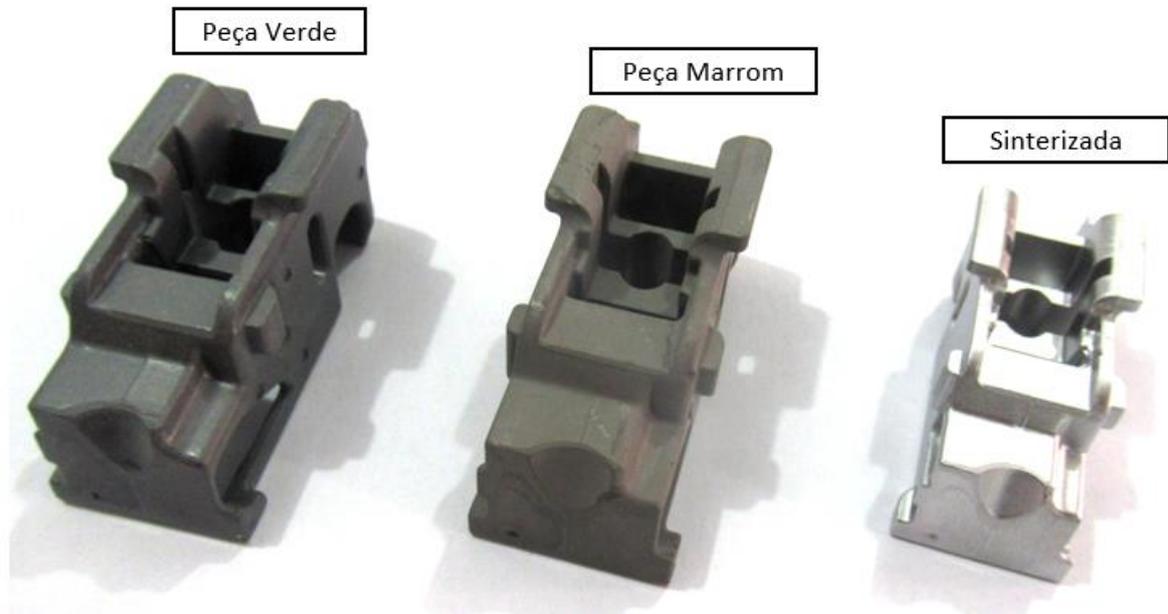


Fonte: Registrado pelo autor (2022).

Após conclusão da etapa de extração catalítica ou *debinding* comumente mencionado no ambiente corporativo, a barca é redirecionada de forma automática para esteira de entrada da *Pré Sinter*, nesta etapa o material recebe a denominação de peça marrom, devido o aspecto da pigmentação pós extração catalítica devido ao ataque químico ácido nítrico nas partículas do aço.

Na Fotografia 3, ao centro, apresenta um exemplo de um componente pós extração catalítica.

Fotografia 3 – Peça Marrom



Fonte: Registrado pelo autor (2022).

O material é transportado automaticamente por esteiras para a zona de aquecimento, a primeira zona é a de pré sinterização, que consiste em o material gradativamente adquirir temperatura, ocorrendo nesta fase a remoção térmica e evaporação de ligantes remanescentes da fase despolimerização catalítica, sendo uma das etapas críticas na influência dos índices de carbono, a não remoção completa dos polímeros ou a poluição da atmosfera com estes ligantes tem relação direta com o modo de falha, ao término desta etapa, o material é transportado até uma zona de sinterização, a atmosfera desta zona do forno é ajustada com temperaturas associadas ao processo de sinterização, no caso da empresa temperaturas superiores à 1200°C, por último os componentes são transportados até a zona de resfriamento, sinalizada como outra etapa crítica na influência dos índices de carbono, onde ocorre a troca térmica da atmosfera de resfriamento por meio de colunas d'água e fluxo de gases inertes e ventilação forçada.

4.3 FASE DEFINIR (D)

Durante a fase de definição no DMAIC são analisados indicadores da empresa relacionado ao projeto proposto, definido as métricas, delimitações do escopo de projeto e a formação da equipe.

4.3.1 Business Case

No início do projeto foi elaborado um *business case*, apresentado a motivação do desenvolvimento do projeto e o potencial de ganho para companhia.

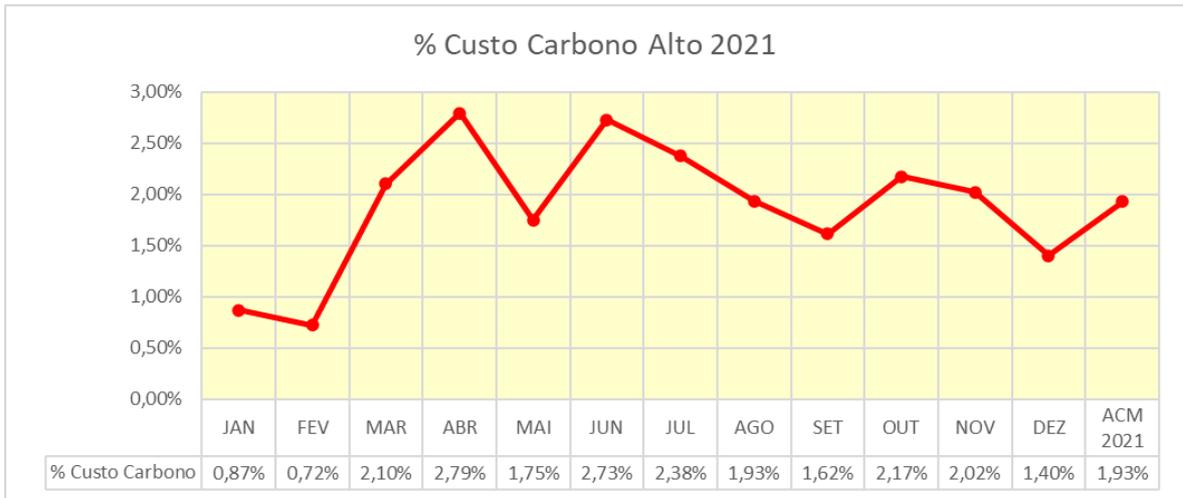
O processo a ser estudado é um equipamento de sinterização contínua com capacidade de 40 mil peças dia. Os custos relacionados a sucata por carbono alto ultrapassaram R\$ 2,2 milhões no ano de 2021, representando 45% da sucata total do setor de fabricação de componentes. Esse modo de falha figura desde 2019 como principal motivo de sucata, o limite estipulado pela Diretora é de 4,1% de sucata geral, ou seja, considerando todos os modos de falhas somados. Considerando o desempenho de 2021 representaria uma redução de 56% nos índices de sucata, o atingimento do indicador representará um ganho de aproximadamente R\$1.200.00,00 tendo em consideração somente o modo de falha carbono alto.

4.3.2 Métricas Principais do Projeto

A métrica principal do projeto é o indicador de sucata do setor de componentes, medido em percentual do custo, que representa o somatório de custo por sucata em relação ao somatório de faturamento dos componentes fabricados.

O Gráfico 8 apresenta o indicador de sucata por carbono alto do setor do setor de componentes. No ano de 2021 a empresa teve o resultado acumulado de 1,93% custo de sucata somente pelo modo de falha carbono alto.

Gráfico 8 – Indicador de Sucata Carbono Alto



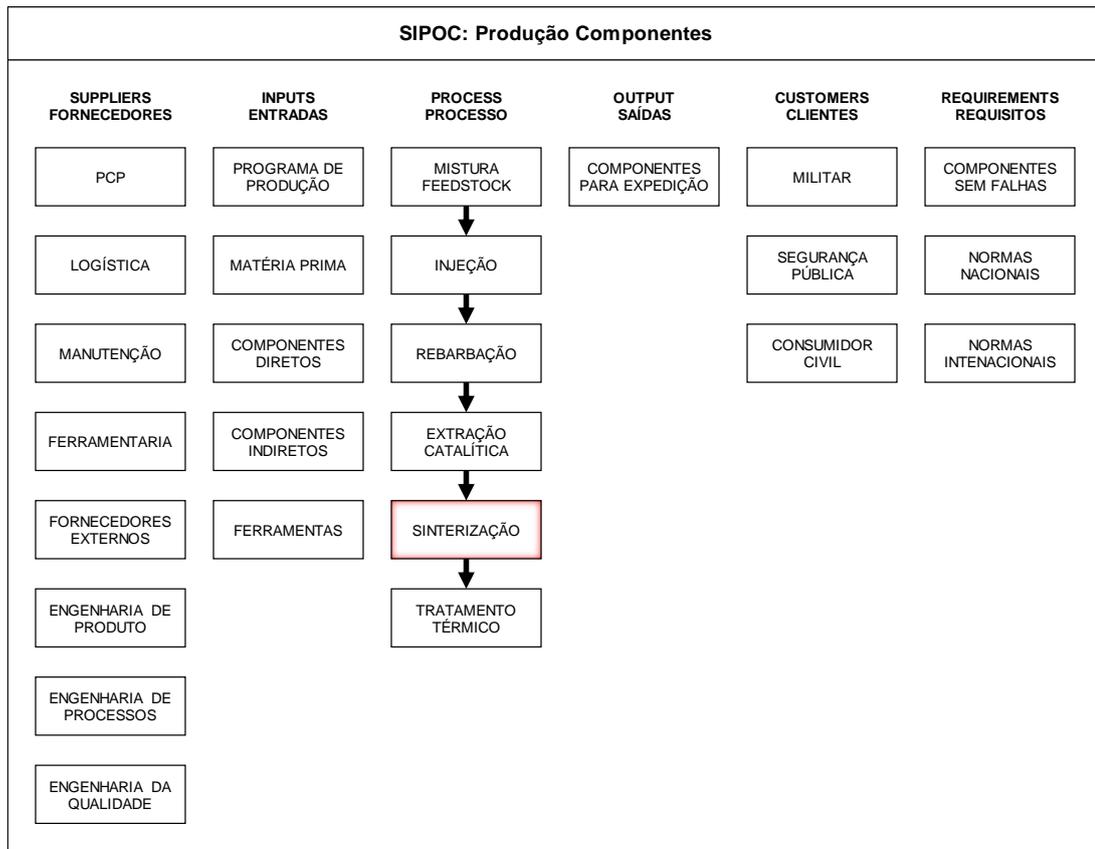
Fonte: Dados ERP da empresa

4.3.3 Mapeamento de Alto Nível

Para representar as informações operacionais e administrativas do setor de componente, foi desenvolvido de forma macro um quadro ilustrando as principais atividades produtivas do setor através do SIPOC, estando separado por processos que atuam de forma direta e indireta no produto. A empresa deve atender os requisitos de engenharia necessários para colocar no mercado itens seguros e que atendam a necessidade dos consumidores finais.

O Quadro 3 apresenta o mapeamento do processo através do SIPOC.

Quadro 3 – Mapeamento do Processo - SIPOC



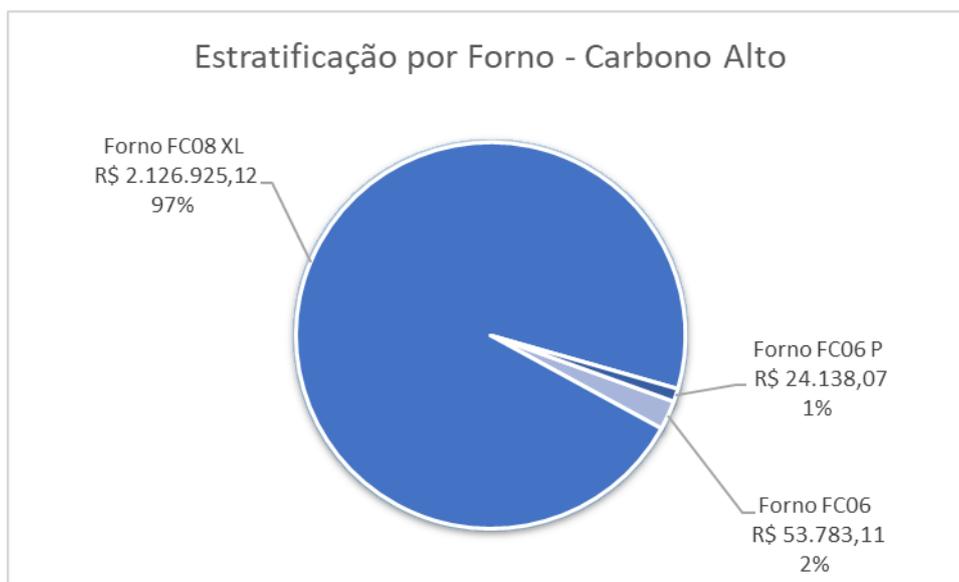
Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

4.3.4 Definição do escopo do Projeto

O projeto será executado no processo de sinterização contínua em um forno específico FC08 XL. A empresa dispõe de três fornos de sinterização contínua, entretanto projeto se delimitará neste equipamento devido à alta representatividade do modo de falha estar associado a este equipamento.

No Gráfico 9, apresenta a estratificação por forno do modo de falha carbono alto.

Gráfico 9 – Estratificação Forno % Carbono Alto



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

4.3.5 Definição de Meta

A meta do projeto é reduzir o índice de sucata por carbono alto em 50%, mantendo a qualidade do produto e sem a geração de outros modos de falha por intervenções e ou por modificações de parâmetros de processos associados a testes de engenharia, gerando uma redução de custo de R\$1.200.000,00.

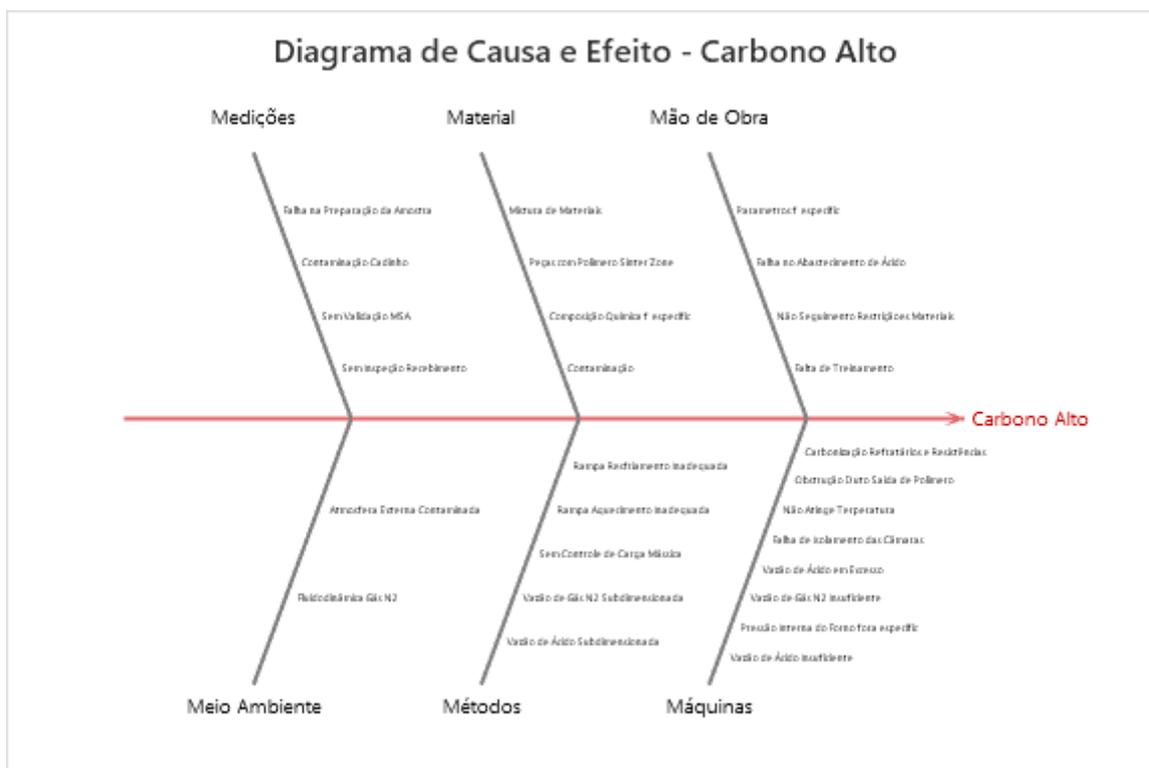
4.3.6 Restrições e Suposições

Como restrição do projeto, não será permitido modificar as especificações dimensionais, geométricas e metalúrgicas do produto; também não será permitido a realização da fabricação dos componentes por outro método de sinterização.

4.3.7 Equipe de Trabalho

A equipe de trabalho foi estruturada por um grupo multifuncional visando o conhecimento do produto e processo. A equipe foi composta por um *green belt* (líder da equipe), dois analistas de processo, um líder de produção, um analista da qualidade, um analista de manutenção e um supervisor de produção.

Figura 24 – Diagrama de Causa e Efeito: Carbono Alto



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

No campo “Material”, a equipe levantou quatro potenciais causas, sendo elas: mistura de materiais, peças com polímero nas *Sinter Zone* (zonas de sinterização), composição química da matéria prima fora das especificações e contaminação. A equipe sinalizou que a presença de peças com polímero na *Sinter Zone* causadas por falha de extração polimérica pode contaminar a atmosfera de sinterização.

No campo “Meio Ambiente” a equipe sinalizou somente duas possíveis causas, sendo a fluidodinâmica do gás inerte Nitrogênio N_2 e a atmosfera externa do forno contaminada, podendo causar contaminações na atmosfera interna devido a falhas de vedação entre as câmaras.

Na categoria “Mão de Obra” a equipe identificou quatro potenciais, sendo elas: não seguir os parâmetros conforme estabelecidos em documento, falha ao abastecer ácido, não seguir as restrições de materiais para o forno FC08 (liga de aço 42CrMo4) e por fim falta de treinamento para operação do equipamento, este sendo apontado pela equipe como uma causa primária em relação a outras sinalizadas nesta categoria, por vezes em processos de auditorias internas foi evidenciado operadores sem treinamento deslocados para realizar operação do

forno em horários de refeição dos operadores oficiais ou por motivos de absenteísmo.

Para “Medição” a equipe sinalizou quatro potenciais causas, sendo, falha na preparação da amostra para o teste de carbono, problemas de contaminação no cadinho de queima, falta de estudo MSA do equipamento utilizado para realização da medição e por fim a falta de inspeção de recebimento para matéria prima, sendo este apontado pela equipe um ponto de vulnerabilidade.

Na categoria “Método” a equipe apontou cinco potenciais causas, sendo, parâmetros de vazão de ácido subdimensionada, parâmetros de gás inerte Nitrogênio N₂ subdimensionado, ausência de controle de carga mássica, rampa de aquecimento inadequada e rampa de resfriamento inadequada. Nas ponderações realizadas pelo grupo de análise, sinalizando a importância da realização de um estudo das variáveis de processo devido a maioria dos parâmetros foi estabelecido pelo fabricante do equipamento, também a sinalização da importância do controle de carga mássica, onde atualmente não há restrição ou controle quanto a essa variável.

Por fim na categoria “Máquina” foi sinalizado o maior número de possíveis causas sendo um total de oito potenciais de falha, sendo, falha na extração catalítica por vazão de ácido abaixo do necessário, pressão interna do forno fora das especificações de processo, baixa vazão de gás inerte N₂, vazão de ácido em excesso, falhas no isolamento das câmaras, não atingimento de temperaturas, obstrução no duto de saída do polímero e a possibilidade de contaminação da atmosfera interna do forno por carbonização dos refratários e resistências. Todas as causas levantadas têm relação uma à outra, sendo difícil a sinalização de causa é a primária.

No entendimento da equipe existe a necessidade da realização da interrupção da produção neste forno FC08, e ser avaliado de forma criteriosa todos os pontos sinalizados.

4.4.2 Mapeado do Processo

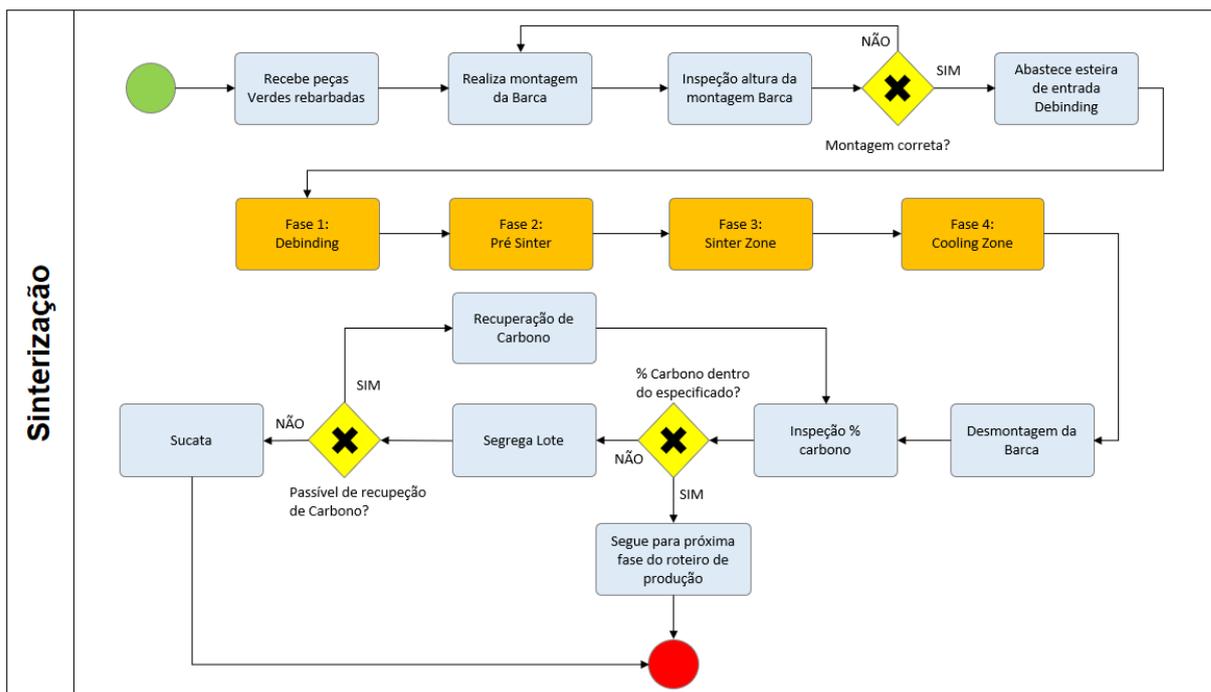
Com o objetivo de compreender melhor o processo de Sinterização, foi elaborado um mapeamento das principais atividades realizadas durante o processo de manufatura, pretendendo dessa forma realizar a identificação das possíveis etapas geradoras do modo de falha carbono alto.

A Figura 25 apresenta o fluxo de processo de sinterização contínua, onde o operador recebe as peças verdes com o processo de rebarbação concluído, de acordo com o plano de produção as barcas de peças são montadas de acordo com a capacidade de altura do forno de sinterização e sequenciadas para abastecimento da esteira de entrada do *Debinding*.

De forma automática e síncrona, aproximadamente a cada 7,5 minutos uma barca entra no processo de sinterização, o *Lead Time* (tempo de atravessamento) do processo é de aproximadamente 17 horas. Após atravessamento da barca no processo de sinterização, o operador retira a barca da esteira de saída e realiza de desmontagem da barca e carga, separando os lotes de acordo com suas respectivas ordens de produção.

O inspetor do setor tem uma rotina de coletar uma amostra a cada 1 hora, para verificação do % de Carbono, a amostra coletada passa por um ensaio destrutivo de medição, em caso de não conformidade dos índices de carbono detectado no ensaio a última hora de produção é totalmente segregada, onde posteriormente é realizado uma avaliação do potencial de retrabalho, caso não sendo passível de retrabalho o lote de produtos segregado é encaminhado para sucata.

Figura 25 – Fluxograma Sinterização



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

O fluxograma do processo foi elaborado com objetivo de identificar o fluxo realizado por os componentes no processo de sinterização por forno contínuo. As etapas do processo destacados na cor laranja foi apontado com alto potencial de origem do modo de falha carbono alto.

Durante o mapeamento do processos, despertou o interesse de muitos operadores contribuir para análise do problema, com isso, foi incluso pela equipe uma etapa para coleta de informações do operadores, com o objetivo de complementar os problemas levantados pelo time técnico.

A estratégia de coleta de informações, foram reuniões de final de turno com duração de 15 minutos, realizada nos três turnos de trabalho durante cinco dias, os operadores tinham liberdade total para suas contribuições onde todas as ideias foram anotadas sem pré-julgamento.

Ao termino dos encontros, a equipe do projeto se reuniu para avaliar as contribuições dos operadores. As contribuições apontadas foram:

- Vazão baixa de gás;
- Material contaminado;
- Peças misturadas na rebarbação;
- Turno 3 sem treinamento para troca do tanque de ácido;
- Queimador não gerando fumaça somente chama;
- Alarme tanque ácido desligado;
- Alteração das temperaturas forno (sem senha);
- Material com carbono maior;
- Manômetros com vazamento N₂;
- Manômetros com vazamento H₂;
- Resistência do forno queimada (alteração dos parâmetros);
- Temperatura do queimador baixa;
- Falta de barra (abastecendo mais peças que o permitido);
- Acumulo de lotes para medição.

4.4.3 Priorização das Causas Potenciais

Com o propósito de organizar o levantamento das possíveis causas potenciais pela equipe de projeto e pelos membros da manufatura, todas as ideias

foram consolidadas em uma planilha com a listagem dos potenciais causas. O Quadro 4 demonstra a listagem dos potenciais causas do modo de falha carbono alto.

Quadro 4 – Potenciais Causas

Potencial Causa	Equipe Projeto	Manufatura
Atmosfera contaminada (externa)	x	
Atmosfera contaminada (interno)	x	
Ausência de controle de massa	x	
Cadinho contaminado	x	
Composição Química f. especificado	x	x
Contaminação	x	
Excesso de ácido	x	
Falha ao abastecer ácido	x	x
Falha de isolamento câmaras	x	
Falha na Extração Catalítica	x	
Falha na preparação da amostra	x	
Falha no alarme de ácido		x
Falta de Treinamento	x	x
Fluidodinâmica do gás inerte N2	x	
Manômetros com vazamento		x
Mistura de Materiais	x	x
Não atinge temperatura	x	
Não seguir parâmetros	x	
Não seguir restrições de materiais	x	x
Obstrução saída de gás	x	
Parâmetros de ácido subdimensionado	x	
Parâmetros de gás N2 subdimensionado	x	
Parâmetros fora especificado		x
Peça com Polímero na Sínter Zone	x	
Pressão interna fora especificado.	X	
Queimador sem fumaça (<i>Burn Stage</i>)		x
Rampa de Aquecimento inadequada	x	
Rampa de Resfriamento inadequada	x	
Resistência do forno queimada		x
Sem controle de matéria prima (recebimento)	x	
Sem MSA para o equipamento	x	
Vazão de gás inerte N2 baixa	x	x

Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

Para melhor entendimento das informações, todas as ideias foram consolidadas em blocos adesivos as respectivas causas potenciais e dispostas em uma parede para análise. Após observação as causas potenciais foram agrupadas

de acordo com afinidade, sendo estruturado cada coluna as causas que se correlacionavam e descartando as ideias repetidas ou que não estavam alinhadas com o problema. Após a organização de todas as ideias, o grupo estratificou em subtítulos de afinidade:

1. Manutenção e Equipamento;
2. Estratégia e Métodos de Fabricação;
3. Treinamento e Pessoas;
4. Matéria Prima;
5. Controle de Qualidade.

Ao término do agrupamento dos potenciais no Diagrama de Afinidades, foi aplicado a Técnica Nominal de Grupo (NGT). A técnica é utilizada para gerar um consenso em grupo, de acordo com Gomes et al. (2009), a técnica NGT utiliza a priorização em grupo de acordo com o potencial mais relevante apontado por cada membro do grupo, através da classificação por significância.

Cada membro da equipe de projeto recebeu o direito de votar em cinco causas potenciais, atribuindo um valor de significância de 1 à 5 para cada causa escolhida sem a possibilidade de atribuir valores repetidos, sendo 1 para menor nível de significância para o processo e 5 para maior nível de significância para o processo.

A Figura 26 apresenta o diagrama de afinidade de causas potenciais de acordo com a votação de cada membro.

Figura 26 – Diagrama de Afinidade com Priorização

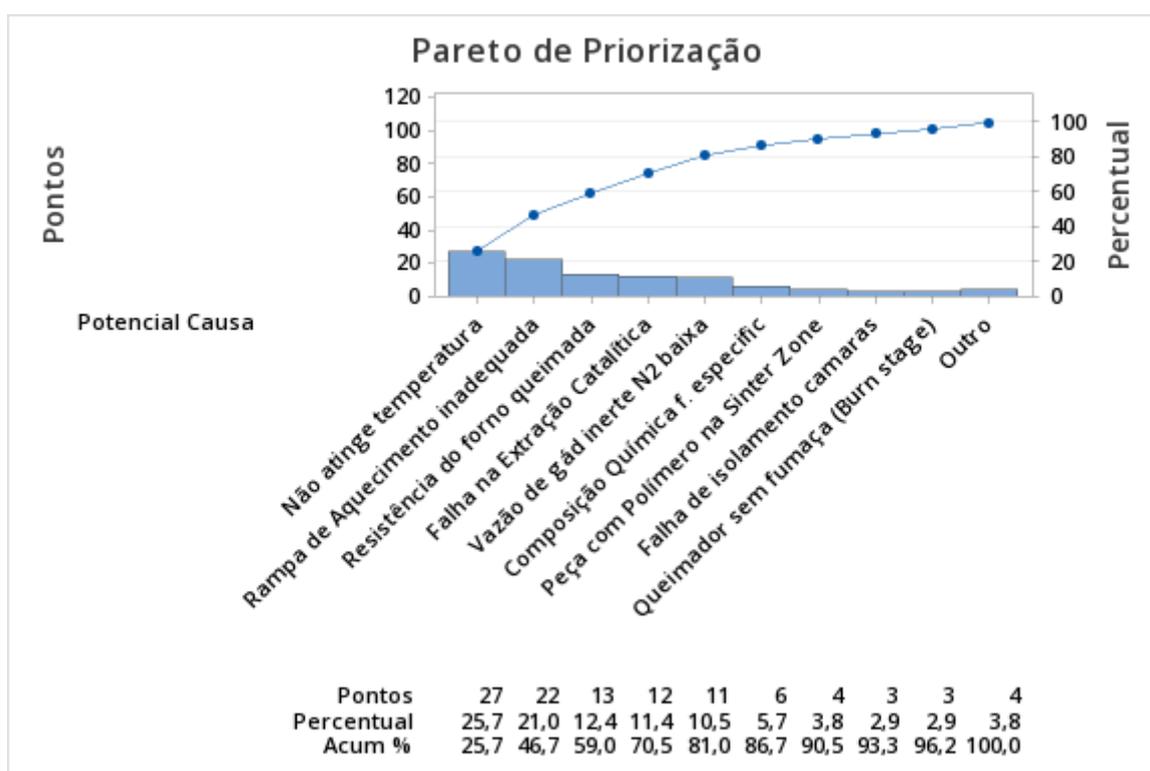
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Manutenção e Equipamentos</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>Atmosfera contaminada (externa)</td><td></td></tr> <tr><td>Atmosfera contaminada (interno)</td><td></td></tr> <tr><td>Falha de isolamento câmaras</td><td>3</td></tr> <tr><td>Falha na Extração Catalítica</td><td>12</td></tr> <tr><td>Falha no alarme de ácido</td><td></td></tr> <tr><td>Manômetros com vazamento</td><td></td></tr> <tr><td>Não atinge temperatura</td><td>27</td></tr> <tr><td>Obstrução saída de gás</td><td></td></tr> <tr><td>Pressão interna fora especificado</td><td>2</td></tr> <tr><td>Queimador sem fumaça (Burn stage)</td><td>3</td></tr> <tr><td>Resistência do forno queimada</td><td>13</td></tr> <tr><td>Vazão de gás inerte N2 baixa</td><td>11</td></tr> </tbody> </table>	Manutenção e Equipamentos		Atmosfera contaminada (externa)		Atmosfera contaminada (interno)		Falha de isolamento câmaras	3	Falha na Extração Catalítica	12	Falha no alarme de ácido		Manômetros com vazamento		Não atinge temperatura	27	Obstrução saída de gás		Pressão interna fora especificado	2	Queimador sem fumaça (Burn stage)	3	Resistência do forno queimada	13	Vazão de gás inerte N2 baixa	11	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Estratégia e Métodos de Fabricação</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>Ausência de controle de massa</td><td></td></tr> <tr><td>Excesso de ácido</td><td></td></tr> <tr><td>Fluidodinâmica do gás inerte N2</td><td>2</td></tr> <tr><td>Parâmetros de acido subdimensionado</td><td></td></tr> <tr><td>Parâmetros de gás N2 subdimensionado</td><td></td></tr> <tr><td>Rampa de Aquecimento inadequada</td><td>22</td></tr> <tr><td>Rampa de Resfriamento inadequada</td><td></td></tr> </tbody> </table>	Estratégia e Métodos de Fabricação		Ausência de controle de massa		Excesso de ácido		Fluidodinâmica do gás inerte N2	2	Parâmetros de acido subdimensionado		Parâmetros de gás N2 subdimensionado		Rampa de Aquecimento inadequada	22	Rampa de Resfriamento inadequada		<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Treinamento e Pessoas</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>Falha ao abastecer ácido</td><td></td></tr> <tr><td>Falta de Treinamento</td><td></td></tr> <tr><td>Não seguir parâmetros</td><td></td></tr> <tr><td>Não seguir restrições de materiais</td><td></td></tr> <tr><td>Parâmetros fora especificado</td><td></td></tr> </tbody> </table>	Treinamento e Pessoas		Falha ao abastecer ácido		Falta de Treinamento		Não seguir parâmetros		Não seguir restrições de materiais		Parâmetros fora especificado	
Manutenção e Equipamentos																																																								
Atmosfera contaminada (externa)																																																								
Atmosfera contaminada (interno)																																																								
Falha de isolamento câmaras	3																																																							
Falha na Extração Catalítica	12																																																							
Falha no alarme de ácido																																																								
Manômetros com vazamento																																																								
Não atinge temperatura	27																																																							
Obstrução saída de gás																																																								
Pressão interna fora especificado	2																																																							
Queimador sem fumaça (Burn stage)	3																																																							
Resistência do forno queimada	13																																																							
Vazão de gás inerte N2 baixa	11																																																							
Estratégia e Métodos de Fabricação																																																								
Ausência de controle de massa																																																								
Excesso de ácido																																																								
Fluidodinâmica do gás inerte N2	2																																																							
Parâmetros de acido subdimensionado																																																								
Parâmetros de gás N2 subdimensionado																																																								
Rampa de Aquecimento inadequada	22																																																							
Rampa de Resfriamento inadequada																																																								
Treinamento e Pessoas																																																								
Falha ao abastecer ácido																																																								
Falta de Treinamento																																																								
Não seguir parâmetros																																																								
Não seguir restrições de materiais																																																								
Parâmetros fora especificado																																																								
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Matéria Prima</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>Composição Química f. especificado</td><td>6</td></tr> <tr><td>Contaminação</td><td></td></tr> <tr><td>Peça com Polímero na Sinter Zone</td><td>4</td></tr> <tr><td>Mistura de Materiais</td><td></td></tr> </tbody> </table>	Matéria Prima		Composição Química f. especificado	6	Contaminação		Peça com Polímero na Sinter Zone	4	Mistura de Materiais		<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Controle de Qualidade</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>Cadinho contaminado</td><td></td></tr> <tr><td>Falha na preparação da amostra</td><td></td></tr> <tr><td>Sem controle de matéria prima (recebimento)</td><td></td></tr> <tr><td>Sem MSA para o equipamento</td><td></td></tr> </tbody> </table>	Controle de Qualidade		Cadinho contaminado		Falha na preparação da amostra		Sem controle de matéria prima (recebimento)		Sem MSA para o equipamento																																				
Matéria Prima																																																								
Composição Química f. especificado	6																																																							
Contaminação																																																								
Peça com Polímero na Sinter Zone	4																																																							
Mistura de Materiais																																																								
Controle de Qualidade																																																								
Cadinho contaminado																																																								
Falha na preparação da amostra																																																								
Sem controle de matéria prima (recebimento)																																																								
Sem MSA para o equipamento																																																								

Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

Após conclusão da votação no diagrama de afinidades e a realização do somatório dos pontos gerados a partir da metodologia NGT, identificou-se um grande número de causas pontuadas no grupo de Manutenção e Equipamentos.

Os dados das votações do diagrama de afinidades foram consolidados e organizados em forma de Pareto para melhor visualização da ordem prioritária. O Gráfico 11 apresenta a consolidação dos resultados da votação dos participantes.

Gráfico 11 – Pareto Priorização



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

De acordo com o Diagrama de Pareto, no Gráfico 11, é possível identificar as principais causas da origem do modo de falha, de acordo com os participantes do projeto. As causas avaliadas como mais significativas estão entre os itens um a cinco. Deste modo, é elaborado um plano de correção e melhorias para os mesmos, endereçando ações para 81% dos fatores que influenciam na melhoria dos resultados. Os itens priorizados são:

1. Não atingimento da temperatura;
2. Rampa de aquecimento inadequada;
3. Resistência do Forno queimada;
4. Falha na extração Catalítica;

5. Vazão de gás inerte N2 baixa.

4.4.4 Análise do Sistema de Medição (MSA)

Anterior aos estudos de capacidade de processo, foi realizado a validação do sistema de medição atual. Desde a instalação do equipamento, não se havia sido realizado um estudo de MSA para validação do sistema, ficando somente na confiabilidade da relação do fornecedor do equipamento com a empresa.

O equipamento utilizado para as medições do % de carbono é um analisador de carbono da fabricante LECO modelo C744, conforme ilustrado na Fotografia 4.

Fotografia 4 – Analisador de Carbono LECO C744



Fonte: Registrado pelo autor (2021).

O princípio de funcionamento do equipamento parte de uma amostra de aproximadamente $1g \pm 0,2g$ é queimada em um fluxo de oxigênio usando indução de rádio frequência para aquecer a amostra. O carbono e o enxofre presentes na amostra são oxidados em dióxido de carbono (CO_2) e dióxido de enxofre (SO_2), sendo varridos pelo transportador de oxigênio através de um reagente de secagem seguido de uma célula de infravermelho não dispersivo (NDIR), onde o enxofre é detectado como SO_2 . O fluxo de gás continua passando por um catalisador aquecido, onde o monóxido de carbono (CO) é convertido em CO_2 e onde o SO_2 é convertido em trióxido de enxofre (SO_3), que posteriormente é removido por um

filtro. O carbono é detectado como CO₂ por outra célula NDIR. Um controlador de pressão é usado para manter a pressão constante nas células NDIR, de modo a reduzir a interferência das variações naturais da pressão atmosférica. O componente final no fluxo de fluxo é um sensor de fluxo eletrônico, que é usado para fins de diagnóstico para monitorar o fluxo do transportador.

As células infravermelhas não dispersivas são baseadas no princípio de que CO₂ e SO₂ absorvem energia infravermelha (IR) em comprimentos de onda únicos dentro do espectro IR. A energia infravermelha incidente nesses comprimentos de onda é absorvida à medida que os gases passam pelas células de absorção infravermelha. A concentração de amostras desconhecidas é determinada em relação aos padrões de calibração.

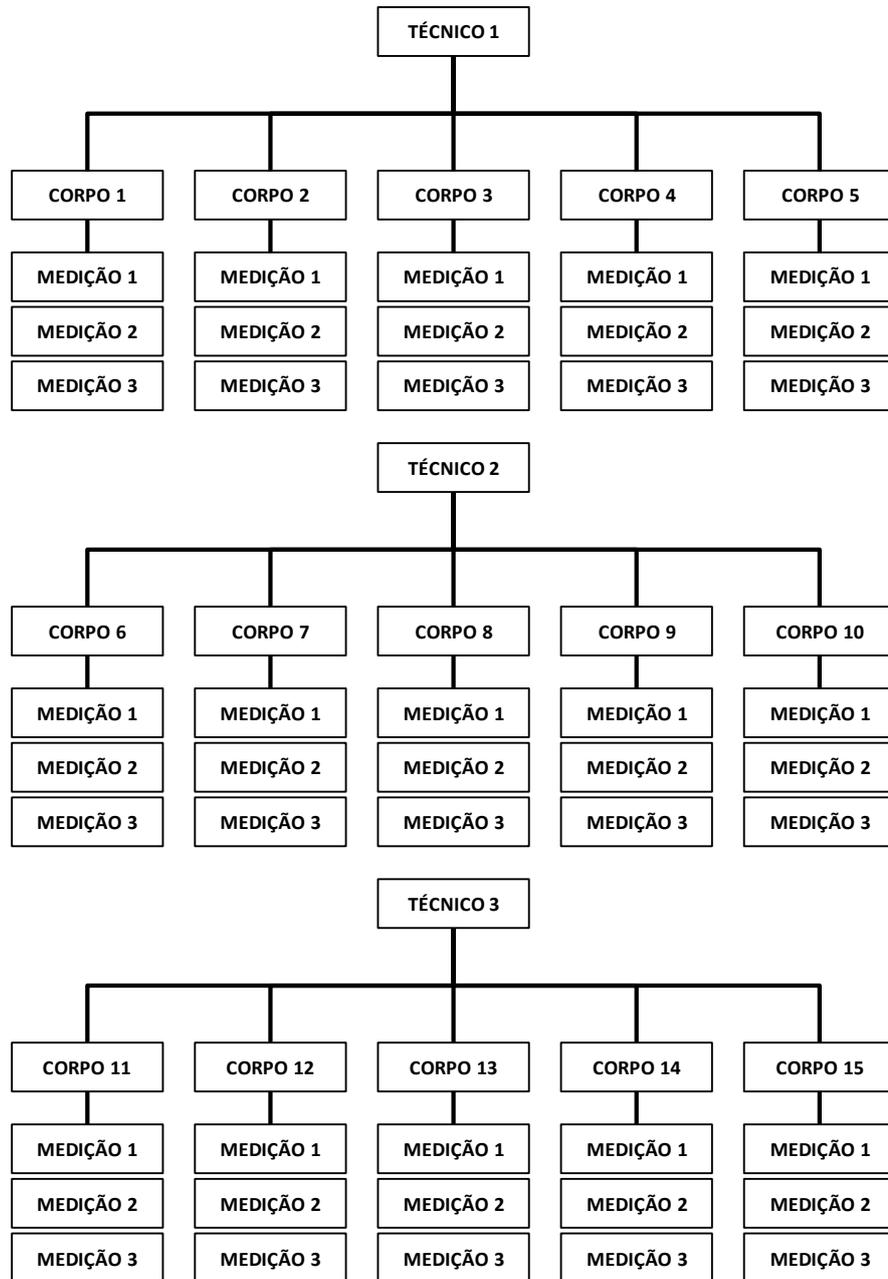
Para análise dos índices de carbono, é necessário um ensaio destrutivo, desta forma foi necessário seguir a metodologia *Nested Gage* (Medição Aninhada).

Para o estudo do sistema de medição, foi estruturado para validação de duas hipóteses, sendo a primeira em relação a confiabilidade do equipamento e a capacidade de fornecer um resultado seguro, e a segunda, em relação a diferença dos métodos de preparação das amostras. Desta forma o teste foi estruturado da seguinte forma:

- Sinterizar quinze corpos de prova;
- Gravar os corpos de prova de um a quinze;
- Selecionar três técnicos habilitados para medição;
- Preparar doze amostras por corpo de prova, sendo:
 - Três amostras com face externa;
 - Três amostras com face externa com faces lixadas;
 - Três amostras do núcleo;
 - Três amostras do núcleo com faces lixadas.
- Realizar as medições e coleta de dados;
- Analisar dados.

Para melhor ilustrar a estrutura do teste, foi elaborado um diagrama com a as divisões do teste, conforme ilustrado na Figura 27 Estrutura MSA Aninhado.

Figura 27 – Estrutura MSA Aninhado



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Ao término das preparações das amostras, os Técnicos realizaram as medições e os registros de acordo com cada corpo de prova, sequência de medição e metodologia de preparo da amostra, totalizando 180 medições. A Tabela 6 apresenta os resultados das medições dos três Técnicos para realização do estudo.

Tabela 6 – Medições Realizadas pelos Tecnicos

Amostra	Medição Núcleo	Medição Externo	Medição Núcleo + Lixa	Medição Externo + Lixa	Operador
1	0,51711	0,51706	0,51749	0,51648	Técnico 1
1	0,51443	0,51678	0,51752	0,51691	Técnico 1
1	0,51417	0,51791	0,51432	0,51781	Técnico 1
2	0,49207	0,49309	0,49153	0,49056	Técnico 1
2	0,49197	0,49081	0,49092	0,48981	Técnico 1
2	0,49019	0,49334	0,49085	0,49272	Técnico 1
3	0,51486	0,51524	0,51540	0,51485	Técnico 1
3	0,51486	0,51484	0,51521	0,51482	Técnico 1
3	0,51764	0,51428	0,51751	0,51781	Técnico 1
4	0,49083	0,49082	0,49147	0,49365	Técnico 1
4	0,49398	0,49080	0,49255	0,49466	Técnico 1
4	0,49237	0,49256	0,49418	0,49442	Técnico 1
5	0,48680	0,48665	0,48429	0,48538	Técnico 1
5	0,48503	0,48761	0,48773	0,48818	Técnico 1
5	0,48694	0,48758	0,48737	0,48509	Técnico 1
6	0,50965	0,50905	0,50802	0,50902	Técnico 2
6	0,51079	0,51026	0,50807	0,50851	Técnico 2
6	0,51121	0,51112	0,50818	0,51106	Técnico 2
7	0,51121	0,50965	0,51044	0,51063	Técnico 2
7	0,51031	0,51155	0,51076	0,50925	Técnico 2
7	0,51065	0,50914	0,50906	0,51194	Técnico 2
8	0,51002	0,50745	0,51029	0,50857	Técnico 2
8	0,50999	0,51057	0,50865	0,50854	Técnico 2
8	0,50825	0,50858	0,50941	0,51038	Técnico 2
9	0,48174	0,47916	0,48277	0,48187	Técnico 2
9	0,47929	0,48179	0,48304	0,48234	Técnico 2
9	0,48264	0,48095	0,47943	0,48047	Técnico 2
10	0,51102	0,51077	0,51167	0,50978	Técnico 2
10	0,51192	0,51026	0,51294	0,51140	Técnico 2
10	0,51223	0,50931	0,51171	0,51086	Técnico 2
11	0,51311	0,51356	0,51044	0,51260	Técnico 3
11	0,51411	0,51047	0,51283	0,51155	Técnico 3
11	0,51404	0,51279	0,51355	0,51068	Técnico 3
12	0,51940	0,52128	0,51945	0,52134	Técnico 3
12	0,52059	0,52027	0,51888	0,51864	Técnico 3
12	0,52067	0,51858	0,51864	0,51949	Técnico 3
13	0,50212	0,50145	0,50314	0,50150	Técnico 3
13	0,50172	0,49963	0,50080	0,50181	Técnico 3
13	0,50166	0,50235	0,49966	0,50056	Técnico 3
14	0,49105	0,48831	0,49011	0,48975	Técnico 3
14	0,48851	0,48902	0,49041	0,48888	Técnico 3
14	0,49044	0,49013	0,48937	0,48885	Técnico 3
15	0,51512	0,51172	0,51271	0,51346	Técnico 3
15	0,51212	0,51308	0,51210	0,51315	Técnico 3
15	0,51371	0,51264	0,51369	0,51455	Técnico 3

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

O sistema de medição foi aprovado com R&R de 6,77%, número de 16 categorias distintas (NDC). A variação de repetibilidade é igual a variação total do sistema, ou seja, para ensaios destrutivos não há a possibilidade de avaliação de

reprodução das medições entre os operadores. A Tabela 7 apresenta os resultados obtidos no *software* Minitab 20.

Tabela 7 – Resultado R&R Medição % Carbono

Estudo de R&R da Medição - ANOVA Aninhada

Relatório de R&R da Medição (Aninhada) para Medição Externo

Nome do sistema de medição: LECO C744

Data do estudo: 10/01/2022

Informado por: Fábio Bueno

Tolerância: 0,10%

Div: $10^{-5}\%$

R&R da Medição (Aninhada) para Medição Externo

Fonte	GL	SQ	QM	F	P
Operador	2	0,0003069	0,0001534	0,296	0,749
Amostra (Operador)	12	0,0062119	0,0005177	407,050	0,000
Repetibilidade	30	0,0000382	0,0000013		
Total	44	0,0065569			

Componentes de Variância

Fonte	CompVar	%Contribuição (de CompVar)
Total de R&R da Medição	0,0000013	0,73
Repetibilidade	0,0000013	0,73
Reprodutibilidade	0	0
Peça a Peça	0,0001721	99,27
Varição Total	0,0001734	100

Tolerância do processo = 0,1

Avaliação das Medições

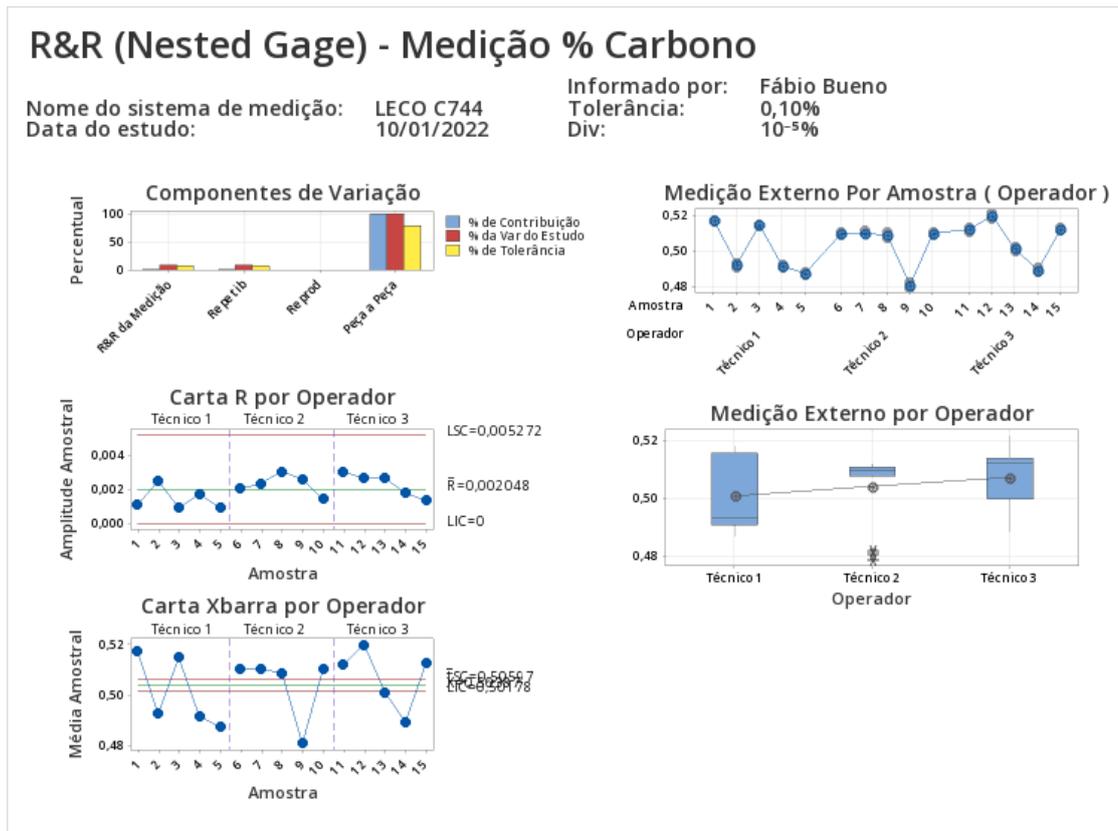
Fonte	DesvPad (DP)	Var do Estudo (6 x DP)	%Var do Estudo (%VE)	% de Tolerância (VE/Toler)
Total de R&R da Medição	0,0011277	0,0067663	8,56	6,77
Repetibilidade	0,0011277	0,0067663	8,56	6,77
Reprodutibilidade	0	0	0	0
Peça a Peça	0,0131198	0,0787186	99,63	78,72
Varição Total	0,0131681	0,0790088	100	79,01

Número de Categorias Distintas = 16

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

De forma adicional à análise e as avaliações do sistema de medição, foi gerado um gráfico para melhor entendimento dos resultados. O Gráfico 12 representa os resultados do estudo MSA da medição % Carbono.

Gráfico 12 – Análise Gráfica MSA Medição % Carbono



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Integralizado ao estudo de MSA, foi explorado a hipótese de obtenção de resultados diferentes de acordo com o método de preparo da amostra, desta forma o conjunto de dados foi submetido a dois Testes de Hipóteses, sendo o primeiro para verificação de diferença significativas entre média das medições e o segundo, a avaliação se há diferença significativa entre os desvios padrões das medições.

A hipótese levantada pelo grupo técnico, estava relacionado a contaminação do cadinho durante a queima da amostra para análise de carbono, atualmente não há nenhuma especificação de remoção da parte externa da amostra, ou a necessidade de um preparo especial com uma operação de lixamento das superfícies, somente a limpeza com álcool isopropílico da amostra de $1 \pm 0,2g$. Para objeto de validação as amostras foram preparadas em quatro métodos distintos, sendo:

- Externo – corpo de prova com regiões externas da amostra;
- Externo + Lixa – corpo de prova com regiões externas da amostra com operação de lixamento nas faces;
- Núcleo – corpo de prova coletado de uma região interna da amostra;

- Núcleo + Lixa – corpo de prova coletado de uma região interna da amostra com operação de lixamento das faces.

Na Tabela 8, apresenta os dados de estatística descritiva do conjunto de dados analisados.

Tabela 8 – Estatística Descritiva Dados de Medição

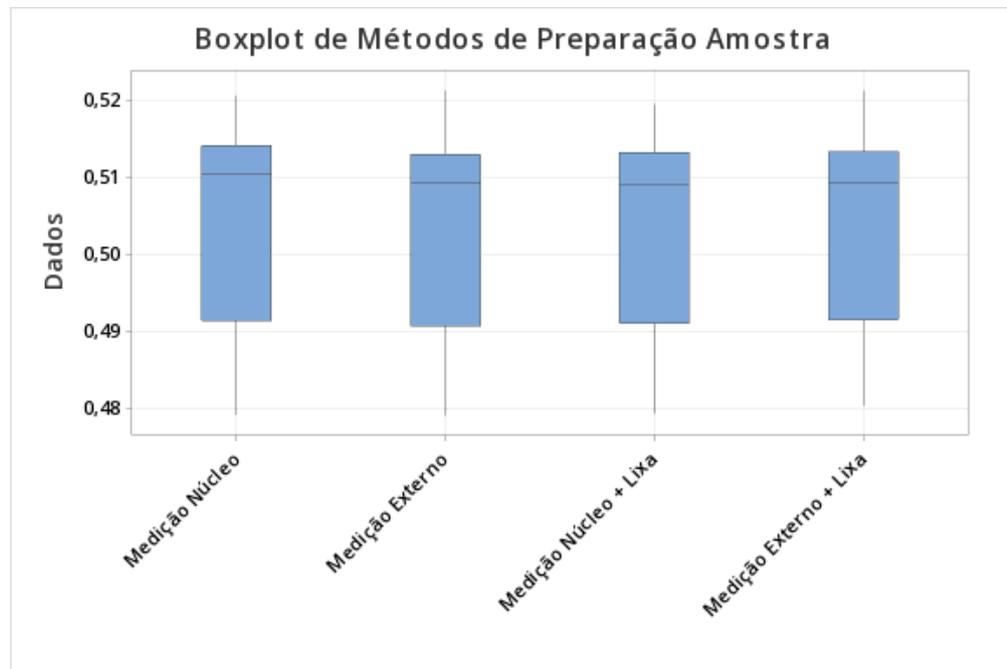
Estatísticas Descritivas

Amostra	N	Média	DesvPad	EP Média	IC de 95% para μ
Medição Núcleo	45	0,5043	0,0123	0,0179	(0,4692; 0,5393)
Medição Externo	45	0,5039	0,0122	0,0179	(0,4688; 0,5389)
Medição Núcleo + Lixa	45	0,504	0,0121	0,0179	(0,4689; 0,5390)
Medição Externo + Lixa	45	0,5041	0,0122	0,0179	(0,4690; 0,5392)

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Inicialmente foi realizado uma análise gráfica do Boxplot dos diferentes métodos de preparo da amostra, conforme ilustrado no Gráfico 13, não é possível identificar visualmente diferenças entre os métodos.

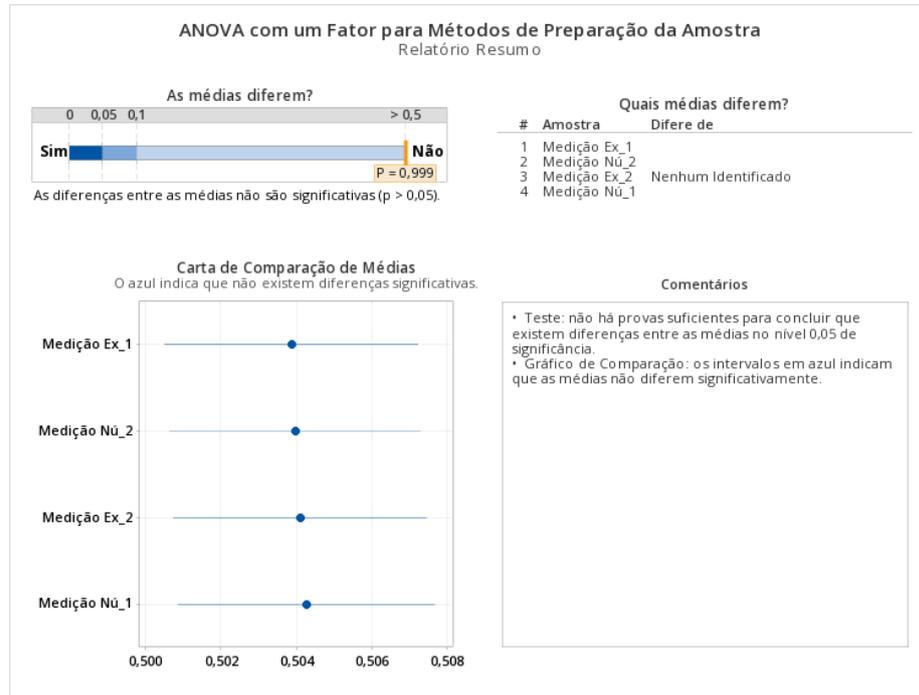
Gráfico 13 – Boxplot de Métodos de Preparação de Amostra



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

No Gráfico 14, apresenta o estudo estatístico realizado para validação de diferenças entre médias, confirmando que não há diferenças em um nível de significância de 0,050, apresentando um *p-value* de 0,999.

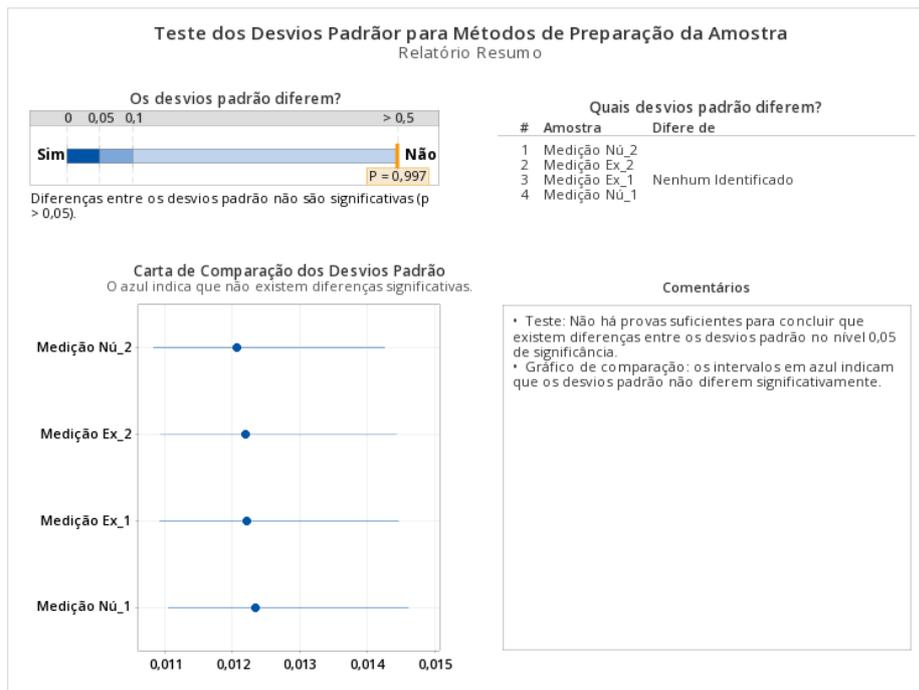
Gráfico 14 – Diferença entre Médias Método de Preparo



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

No Gráfico 15, apresenta o estudo estatístico realizado para validação de diferenças entre desvios, confirmando que não há diferenças em um nível de significância de 0,050, apresentando um *p-value* de 0,997.

Gráfico 15 – Diferença entre Desvios Método de Preparo



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

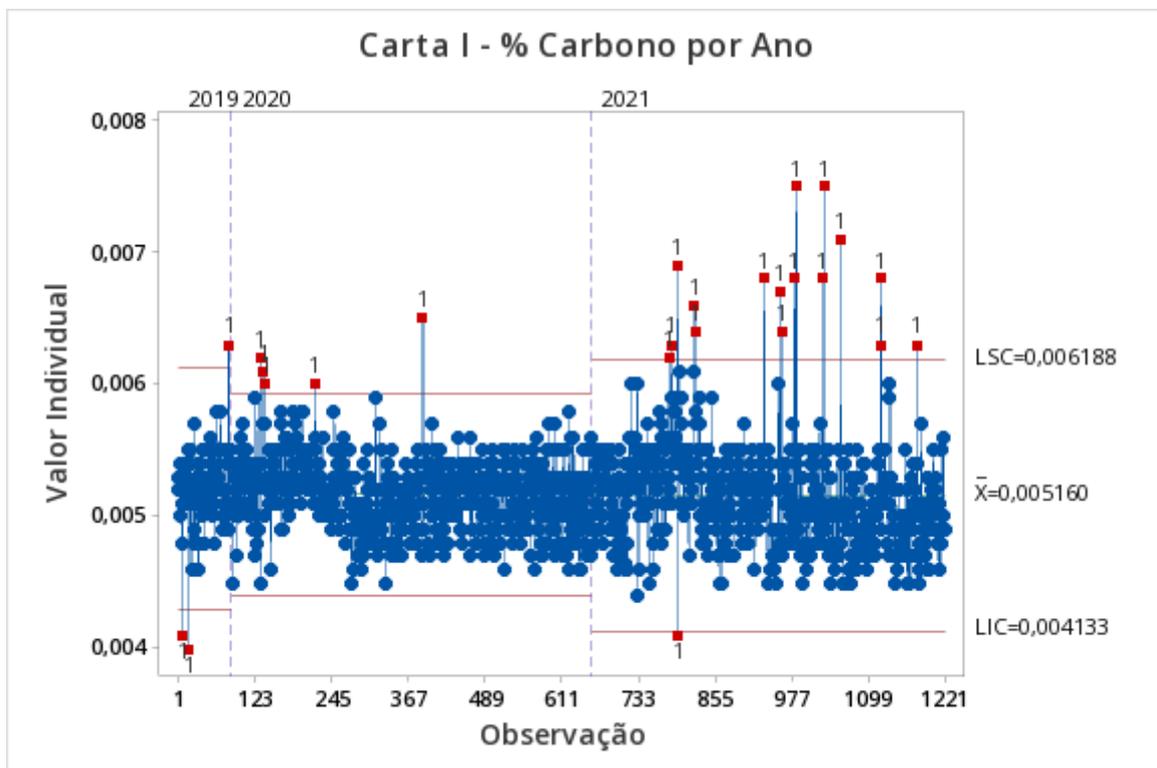
A partir das avaliações realizadas em relação ao sistema de medição é possível afirmar que o sistema de medição atende os requisitos necessários para fornecer resultados confiáveis, outro aspecto importante está relacionado ao método de preparo das amostras, não havendo diferenças significativas entre as estratégias de preparação das amostras.

4.4.5 Análise da Capacidade do Processo

Ao término das validações do sistema de medição, é possível afirmar que há confiabilidade nos dados de medições históricas, a partir dessas medições os dados foram plotados em uma Carta de Valor Individual (Carta I), com o objetivo de ilustrar os diferentes estágios de variabilidade com base no ano, ao todo foi analisado mais de 1200 dados de medições no período de 2019 a 2021.

No Gráfico 16, ilustra a diferença de variabilidade dos índices de Carbono entre os anos de 2019 e 2021.

Gráfico 16 – Carta I Variabilidade entre 2019 e 2021



Elaborado pelo autor (2021).

Analisando o período de 2021 identificado que há um aumento significativo da variabilidade do processo comparado ao período de 2020. Em ambos há sinalizações de causas especiais, entretanto são dados que necessitam compor o conjunto devido a não ter no campo de observações dos registros justificativas de causa conhecida, como eventos de queda de energia elétrica, falta de ácido ou eventos similares que caracterizariam uma causa especial.

Avançando para análise de capacidade de processo, um estudo em relação ao ano de 2021 foi realizado, inicialmente foi observado o ajuste de distribuição que o conjunto de dados se associava. Na Tabela 9, representa os parâmetros de distribuição e os possíveis ajustes gerados a partir do *software* Minitab 20.

Tabela 9 – Estatística Ajuste de Distribuição

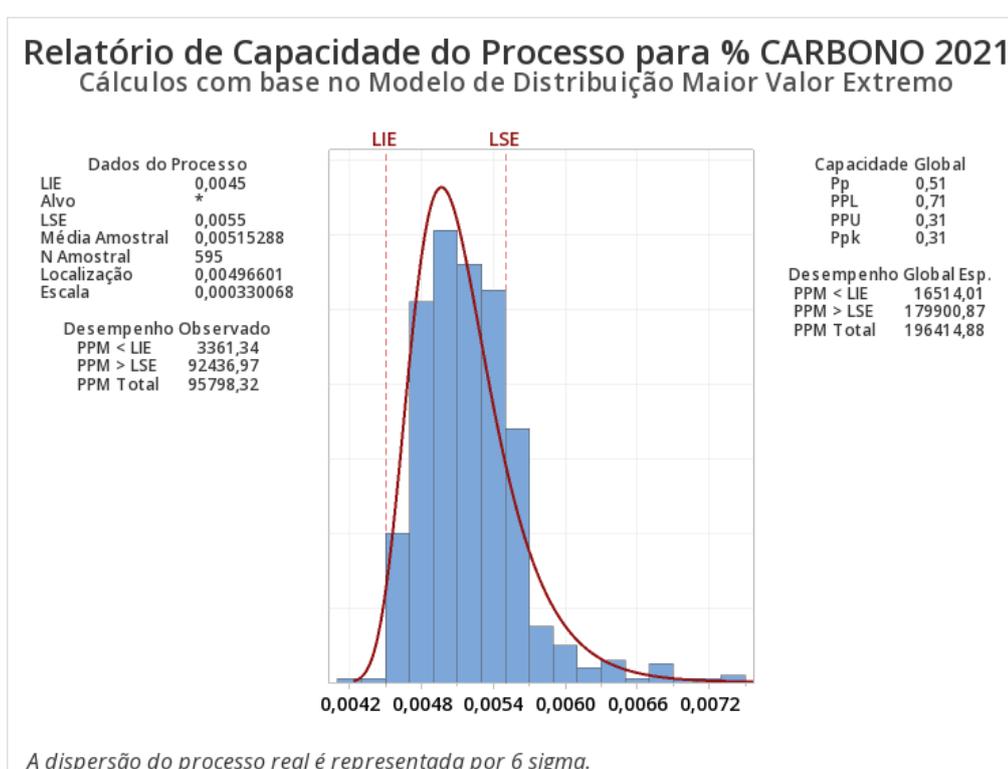
Estatísticas Descritivas								
N	N*	Média	DesvPad	Mediana	Mínimo	Máximo	Assimetria	Curtose
595	0	0,0052	0,0004	0,0051	0,0041	0,0075	1,5493	5,0477
Transformação de Box-Cox: $\lambda = -2$								
Teste de Qualidade de Ajuste								
Distribuição	AD	P	TRV	P				
Normal	9,736	<0,005						
Transformação de Box-Cox	3,406	<0,005						
Lognormal	6,342	<0,005						
Lognormal de 3 Parâmetros	7,660	*		1				
Exponencial	234,592	<0,003						
Exponencial de 2 Parâmetros	111,608	<0,010		0				
Weibull	36,140	<0,010						
Weibull de 3 Parâmetros	10,480	<0,005		0				
Menor Valor Extremo	49,414	<0,010						
Maior Valor Extremo	3,737	<0,010						
Gama	7,299	<0,005						
Gama de 3 Parâmetros	3,850	*		0				
Logística	4,918	<0,005						
Loglogística	4,119	<0,005						
Loglogística de 3 Parâmetros	4,753	*		1				
Estimativas de MV dos Parâmetros da Distribuição								
Distribuição	Localização	Forma	Escala	Limite				
Normal*	0,005		0,000					
Transformação de Box-Cox*	38352,919		5660,800					
Lognormal*	-5,271		0,079					
Lognormal de 3 Parâmetros	-4,933		0,057	-0,002				
Exponencial			0,005					
Exponencial de 2 Parâmetros			0,001	0,004				
Weibull		9,528	0,005					
Weibull de 3 Parâmetros		2,546	0,001	0,004				
Menor Valor Extremo	0,005		0,001					
Maior Valor Extremo	0,005		0,000					
Gama		156,551	0,000					
Gama de 3 Parâmetros		8,507	0,000	0,004				
Logística	0,005		0,000					
Loglogística	-5,276		0,042					
Loglogística de 3 Parâmetros	-3,785		0,010	-0,018				
* Escala: Estimativa de MV ajustado								

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Analisando os resultados, observa-se que apesar de o conjunto de dados ser significativamente grande com 595 dados, não foi possível a partir dos índices P identificar o melhor ajuste do padrão de distribuição, conforme Stephens (1986), o teste Anderson-Darling estatística AD recomenda-se a utilização para distribuições assintóticas, representando a melhor distribuição ajustada aos dados com menor valor AD. Seguindo a técnica, que melhor traduz o conjunto de dados é a distribuição Maior Valor Extremo.

O Gráfico 17, representa o estudo de capacidade de processo em 2021 gerado a partir do *software* Minitab 20.

Gráfico 17 – Relatório Capacidade % Carbono 2021



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Observando os resultados do estudo de capacidade de processo, obtemos o índice Pp 0,51 e PpK 0,31, não caracterizando como processo capaz. Segundo Ribeiro (2012) para ter um processo capaz, é necessário ter um CP \geq 1,67 e um CPK \geq 1,33.

No histograma é possível identificar uma assimetria no conjunto dados obtendo uma média amostral de 0,00515, caracterizando uma tendência de resultados mais próximos ao limite superior de especificação (LSE).

4.5 FASE ANÁLISE (A)

Nesta fase do projeto DMAIC, tem a finalidade de formular ações com a finalidade de solucionar problemas e realizar as melhorias de processo necessárias. Nesta etapa fundamentalmente é definido a causa raiz do problema validando as hipóteses levantadas nas etapas anteriores.

4.5.1 Potenciais Causas

Nesta etapa o grupo decidiu a interrupção programada da produção para realização de uma manutenção geral no forno FC08. A tomada de decisão estava fundamentada em não atuar em parâmetros de processo do equipamento para realização de um projeto de experimento (DOE), enquanto o processo de fabricação não estivesse estabilizado em uma condição livre de causas especiais atuando.

A proposta de manutenção assistida foi apresentada aos membros da Diretoria da empresa, após apresentação dos dados analisados e os levantamentos dos custos de sucata, foi aprovado uma parada programada de cinco semanas para realização de todas as manutenções necessárias para restabelecer o processo em uma melhor condição.

4.5.1.1 Estabilização e correção de Causas Especiais

A manutenção assistida do forno FC08 XL foi solicitada devido o problema dos índices de Carbono acima do especificado, evidenciado durante o ano de 2021. Elaborado um plano de programação da manutenção com data prevista para o início das atividades no dia 21/12/2021, estendendo-se por cinco semanas, sendo quatro semanas dedicadas à manutenção e uma semana dedicada para testes de Engenharia necessários para liberação de produção, condicionados a abertura da *Hot Zone* com o término previsto para o dia 10/01/2022, na condição de forno aquecido nas temperaturas estabelecidas em Procedimento Operacional.

Na semana de 10/01/2022 à 15/01/2022, o forno FC08 XL sendo entregue a disposição da Engenharia de Processos MIM para testes, contemplando o perfil de temperatura utilizado e atmosfera, e de que maneira essas variáveis afetam no percentual de Carbono, densidade e dimensional dos produtos sinterizados.

A manutenção foi acompanhada pelo técnico do fabricante do forno CREMER Thermoprozessanlagen GmbH, Engenharia de Processos MIM, Manutenção MIM e Engenharia da Qualidade MIM.

Em uma reunião preliminar com o técnico da fabricante CREMER, foi discutido a existência de uma fonte de Carbono dentro do forno que estivesse beneficiando os componentes com percentual de Carbono ocorrendo a contaminação e ou cementação dos componentes. Dado a atmosfera utilizada de hidrogênio H₂ e nitrogênio N₂, este problema não poderia estar atuando no processo. Desta forma reforçou a hipótese de alguma fonte externa, dentro do forno, servia como fonte de Carbono na atmosfera inerte do forno contínuo.

Após as discussões com o grupo multifuncional, foi elaborado um cronograma de atividades a ser realizado durante a manutenção do forno contínuo FC08, conforme ilustrado na Tabela 10.

Tabela 10 – Cronograma de Manutenção Forno FC08

Atividade	Semana 1	Semana 2	Semana 3	Semana 4	Semana 5
Abertura e inspeção visual	█				
Deteccção da potencial causa raiz	█				
Queima das mufas de pedra	█				
Limpeza geral do Crossconveyor e periféricos	█	█			
Substituição das resistências da Hot Zone		█			
Limpeza das tampas superiores da pré-sinter e sinter zone		█			
Pré-montagem das mufas na pré-sinter		█			
Cold run			█		
Fechamento do forno			█		
Teste de estanqueidade			█	█	
Aquecimento			█	█	
Primeiro teste da Engenharia					█
Retomada Da Produção					█

Fonte: Arquivo da empresa

Durante a fase de abertura de todas as zonas do forno contínuo e inspeção visual, permitiu a visualização de uma das fontes de carbono que estava afetando a atmosfera. Na zona de pré-sinter e no *Crossconveyor*, identificou-se a presença de polímero na parte inferior do forno e impregnado nos componentes mecânicos como engrenagens, correias transportadoras, rolamentos, entre outros, conforme Fotografia 4 ilustrando polímero impregnado na pré-sinter e na Fotografia 5 ilustrando presença de polímero no *Crossconveyor*.

Fotografia 5 – Presença de Polímero Pré-Sinter



Fonte: Arquivo da empresa.

Fotografia 6 – Presença de Polímero no Crossconveyor



Fonte: Arquivo da empresa.

O excesso de polímero dentro das regiões do forno contamina a atmosfera. Em temperaturas acima de 825°C, é favorecida a difusão do Carbono para materiais ferrosos. Logo, com o movimento do *walking beam* do forno, abertura e fechamento de *slide* da pré-sinter para a *sinter-zone*, diferença de pressão do *crossconveyor* e a pré-sinter, desloca a atmosfera contaminada com Carbono para a *sinter-zone*, sendo a primeira zona estava configurada em 625°C, conforme procedimento operacional.

A condição de carburização na *sinter-zone* 1 foi confirmada a partir da observação da *top cover* da região, bem como do aspecto visual das resistências. Selecionado uma amostra de um determinado segmento da resistência para

medição do índice do teor de Carbono, sendo encontrado um valor de 3,45% de Carbono na composição química do material, ressaltando que as resistências são ligas de Cobre sem presença de Carbono em sua composição. Na Fotografia 6 ilustra a carburização encontrada na *top cover*, na Fotografia 7, ilustra a carburização encontrada nas resistências da *sinter-zone*.

Fotografia 7 – Carburização Top Cover



Fonte: Arquivo da empresa.

Fotografia 8 – Carburização das Resistência de Sinterização



Fonte: Arquivo da empresa.

Dado às evidências, se fez necessário a ampliação do processo de investigação e de obter o entendimento da existência de polímero em excesso dentro do forno. Considerando que a extração do polímero ocorre durante o *debinding* e na pré-sinter, onde localiza-se a chaminé para saída do polímero, havia

a necessidade de se investigar se havia obstrução que poderia estar ocasionando o acúmulo do material dentro do forno.

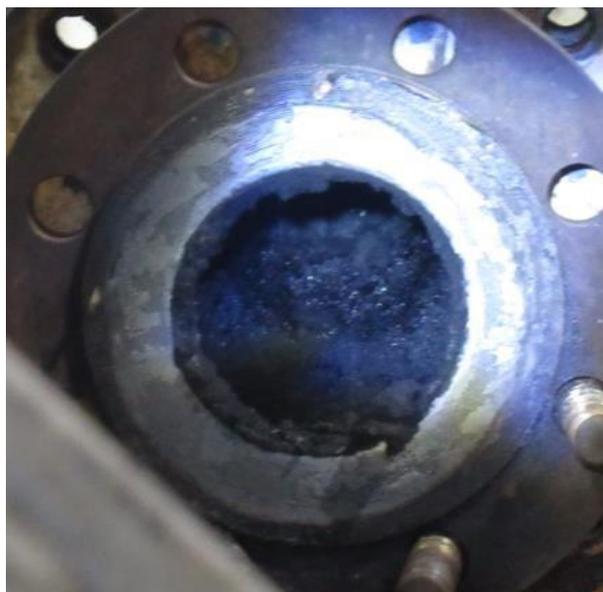
Primeiramente, foi desmontada a chaminé do duto que a conecta a pré-sinter, seguida da remoção da *throttle valve*. Nesta fase de manutenção, foi detectado excesso de material polimérico, além da obstrução do duto pela mufla refratária. A Fotografia 8 ilustra a obstrução encontrada na *throttle valve*, a Fotografia 9 ilustra a obstrução total encontrado no duto de exaustão do polímero.

Fotografia 9 – Obstrução parcial de Polímero Throttle Valve



Fonte: Arquivo da empresa.

Fotografia 10 – Obstrução total de Polímero no Duto de Exaustão

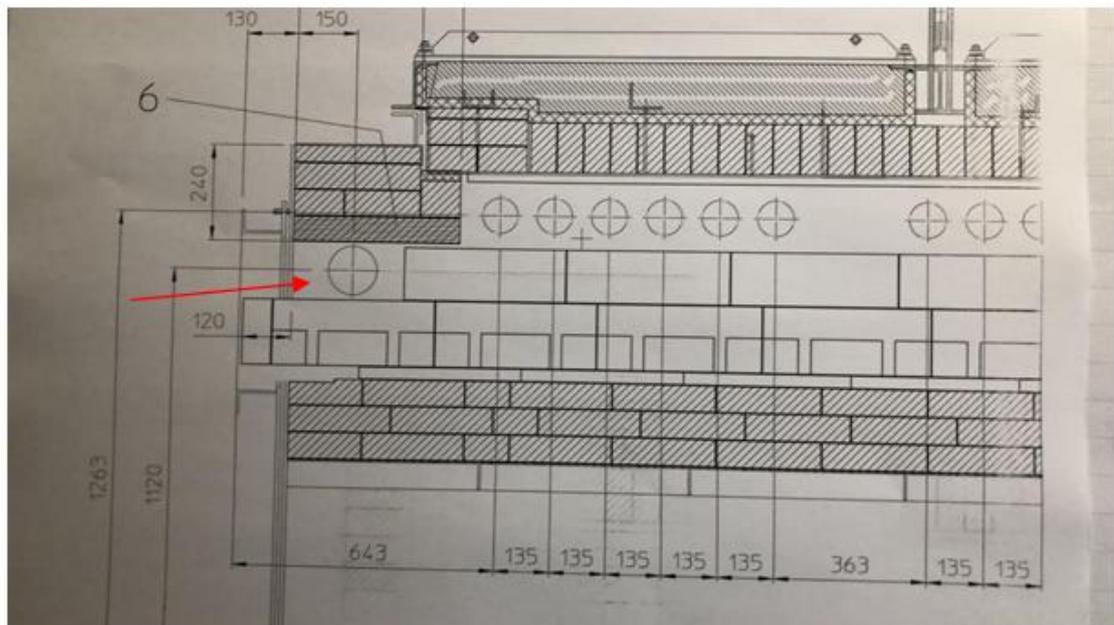


Fonte: Arquivo da empresa.

Com a identificação das obstruções na *throttle valve* e no duto de exaustão do polímero o processo de investigação avançou , as mufas da pré-sinter foram desmontadas e o técnico da CREMER solicitou junto ao grupo de Engenharia na Alemanha a vista lateral do projeto da pré-sinter, de maneira a entender se o projeto do forno comporta uma mufla na região de saída do polímero.

Observado que a vista lateral do projeto 2D do forno, não estava previsto a presença de uma mufla de refratária próximo da saída do duto, conforme evidenciada com a seta em vermelho na Fotografia 10.

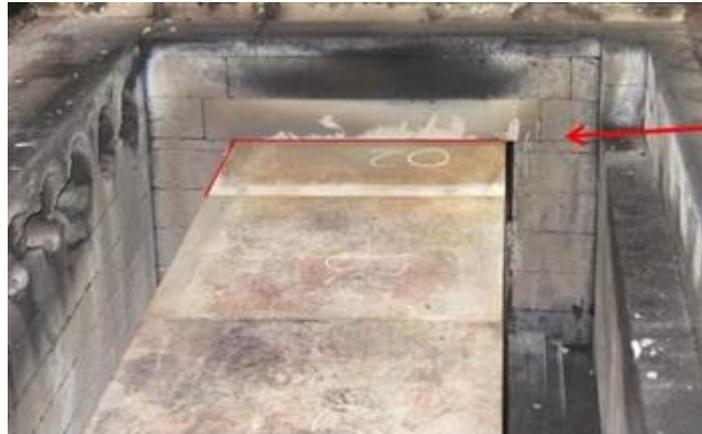
Fotografia 11 – Vista lateral Projeto 2D forno FC08



Fonte: Arquivo da empresa.

Após a limpeza das mufas, foi realizada uma pré-montagem de acordo com o projeto, para verificar se haveria a necessidade de cortar a última mufla para não obstruir a saída de polímero pela chaminé. Comparando a montagem anterior com a pré-montagem, identificado que houve um erro no posicionamento das mufas, causando a obstrução e acúmulo de polímero dentro do forno. Desta forma identificada a causa raiz do problema, na Fotografia 11 ilustra a forma incorreta de montagem do refratário, na Fotografia 12 ilustra a montagem de forma correta, atendendo os requisitos do projeto sem a obstrução do duto de exaustão de polímero.

Fotografia 12 – Posição Correta do Refratário



Fonte: Arquivo da empresa.

Fotografia 13 – Montagem Incorreta do Refratário



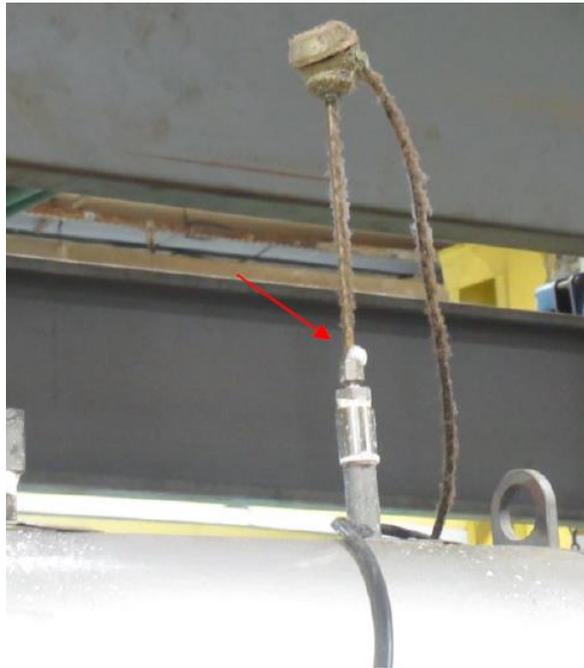
Fonte: Arquivo da empresa.

Após o fechamento do forno, iniciou-se a etapa de teste de estanqueidade para verificação de possíveis vazamentos com potencial interferência no desempenho do forno. Este teste é realizado a partir do monitoramento das juntas do forno com o auxílio espuma. O forno precisa manter a pressão interna por, no mínimo, 30 minutos conforme especificações do fabricante.

O teste de estanqueidade do forno 08 foi realizado por blocos, ou seja, cada módulo do forno foi testado individualmente. Diversas regiões apresentaram vazamentos pontuais, sendo no *debinding* o vazamento identificado com maior relevância, necessitando de uma maior intervenção. Nesta atividade, foi necessário substituir a gaxeta de teflon do último módulo do *debinding* para o *crossconveyor*.

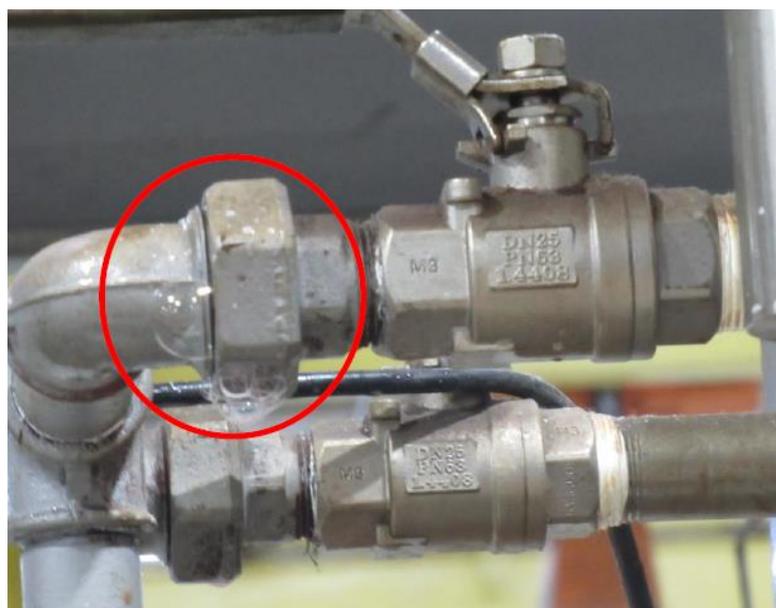
A Fotografia 13 ilustra o vazamento detectado em um Termopar do *debinding*, na Fotografia 14 ilustra o vazamento detectado em um registro de Nitrogênio aquecido na câmara de mistura e na Fotografia 15 ilustra a região de vazamento detectado na gaxeta do primeiro módulo.

Fotografia 14 – Vazamento no Termopar



Fonte: Arquivo da empresa

Fotografia 15 – Vazamento na válvula de N2 aquecido



Fonte: Arquivo da empresa

Fotografia 16 – Região de vazamento na gaxeta Módulo 1



Fonte: Arquivo da empresa.

Ao término da quarta semana de manutenção programada, concluiu-se a etapa de estanqueidade, após iniciou-se o processo de rampa de aquecimento até atingir as temperaturas de trabalho. Neste momento se deu o início aos testes de Engenharia para liberação do forno à produção.

4.5.1.2 Validação para Retorno de Produção

As propriedades mecânicas dos materiais foram avaliadas através do ensaio de tração, utilizando o equipamento Instron modelo GR012, com célula de carga de 100 kN. A velocidade de ensaio foi de 2 mm/min. Foram utilizados cinco corpos de prova para cada material, após processo de sinterização. A Fotografia 17 representa o corpo de prova disposto na máquina para ensaio de tração.

Fotografia 17 – Ensaio de Tração para Validação Retorno de Produção



Fonte: Arquivo da empresa (2022).

Para validação foi utilizado o critério de atendimento de $\pm 10\%$ dos índices indicados pelo fabricante do material. Na Tabela 11, representa o resumo das propriedades mecânicas das ligas sinterizadas.

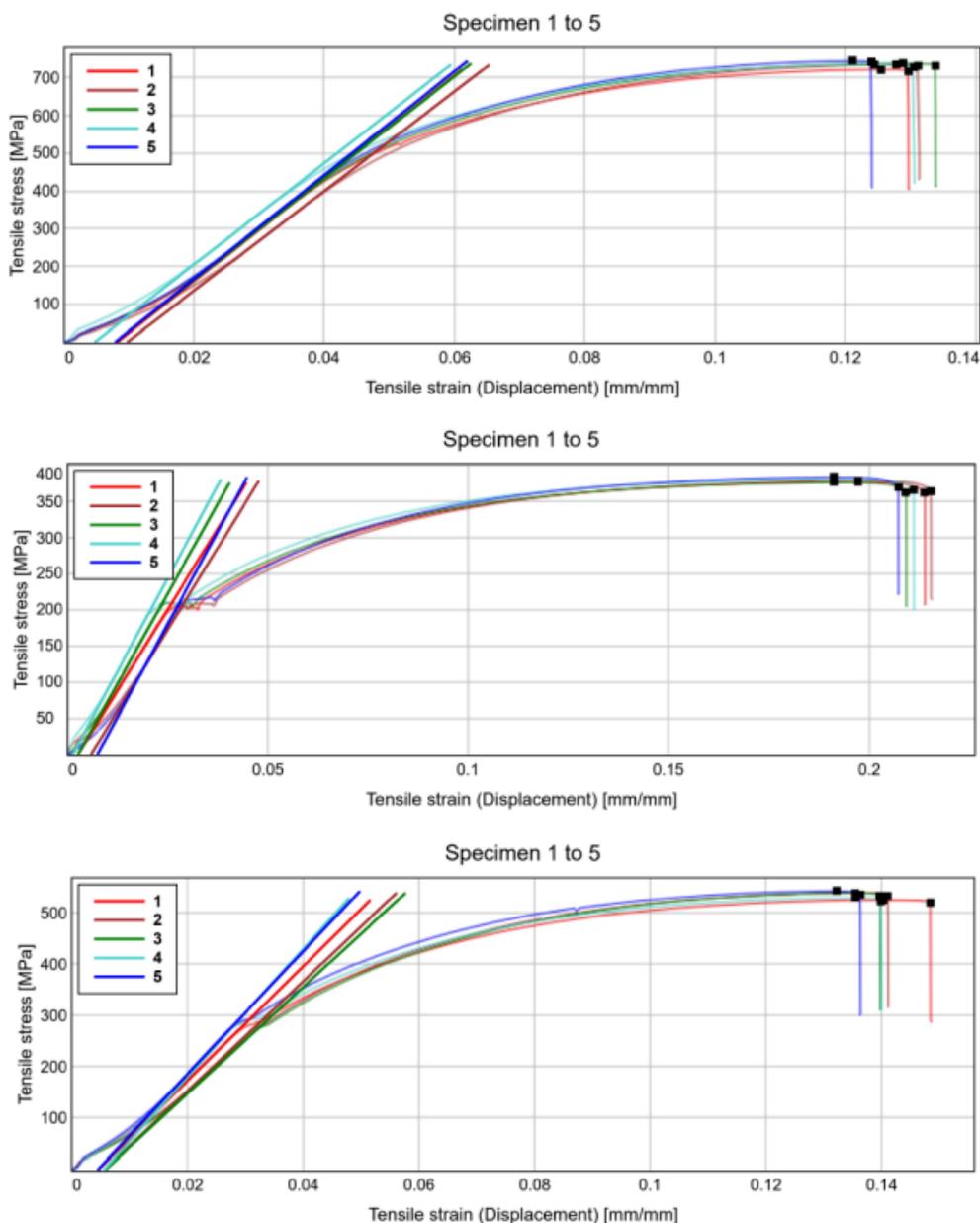
Tabela 11 – Propriedade Mecânicas

Material	Resistência à Tração [MPa]		Resistência de Escoamento [MPa]		Alongamento [%]	Estricção [%]
	Encontrado	Especificado	Encontrado	Especificado		
8740	735,31 \pm 8,42	800	\pm 550	500	3,16	9,18
8620	379,50 \pm 3,12	400	\pm 210	220	7,50	18,00
42CrMo4	634,99 \pm 7,55	650	\pm 330	350	4,02	8,68

Fonte: Arquivo da empresa (2022).

Os gráficos 18, representa as curvas de tensão deformação dos materiais 8740, 8620 e 42CrMo4 respectivamente.

Gráfico 18 – Curva Tensão x Deformação Aços 8740, 8620 e 42CrMo4



Fonte: Arquivo da empresa (2022).

4.5.2 Realização experimento DOE

Após as validações de Engenharia para liberação do Forno FC08, com a certeza de eliminação das causas especiais atuantes no processo, deu-se o início ao projeto de experimento (DOE).

Uma das premissas para realização do experimento estava em não interferir na produtividade e não gerar sucatas pela realização dos testes.

Outro aspecto importante é a velocidade de resposta, na alteração de um parâmetro de processo somente poderia ser coletado após 17 horas, dado o tempo de atravessamento da amostra. Dado o risco que todas as alterações de parâmetros afetavam no mínimo as mesmas 17 horas de produção. Por este contexto, o grupo optou pela realização de um experimento fracionado.

No projeto de experimento foi utilizado o *software* Minitab 20 para elaborações do experimento. Como as principais etapas do experimento destacam-se as seguintes:

- Identificar os fatores e níveis a serem testados;
- Formalização do experimento fracionado;
- Definição da realização de replicação;
- Definição da variável de saída;
- Elaboração da matriz experimental;
- Elabora da planilha de coleta de dados;
- Análise dos resultados.

Para realização do experimento, foi selecionado 19 variáveis de processo, os fatores foram elevados em dois níveis, sendo o máximo e mínimo de cada parâmetro.

A Tabela 12, apresenta a listagem completa das variáveis de processo experimentada e os respectivos valores mínimos e máximos.

Tabela 12 – Parâmetros de Processo

Temperatura			Gás de Processo		
Parâmetro	Mínimo	Máximo	Parâmetro	Mínimo	Máximo
Pre-sinter 1	345	445	Gás H2	0	30
Pre-sinter 2	425	525	Gás N2 (Sinter)	20	40
Pre-sinter 3	525	650	Gás N2 (Debinder)	23	40
Pre-sinter 4	575	725	Gás N2+H2 (Sinter)	20	40
Pre-sinter 5	675	810			
Sinter Zone 1	1040	1230			
Sinter Zone 2	1200	1390			
Sinter Zone 3	1200	1390			
Sinter Zone 4	1200	1390			
Sinter Zone 5	850	1230			
Debinder Zone 1	110	140			
Debinder Zone 2	110	140			
Debinder Zone 3	110	130			
Debinder Zone 4	110	130			
Debinder Zone 5	110	130			

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Dado a complexidade foi realizado um experimento fracionado, adotando um projeto fatorial de 2^k , com dezenove fatores, duas réplicas totalizando noventa e seis ensaios.

A variável resposta foi a medição de carbono encontrada nas amostras. Na Tabela 13, apresenta o resumo do experimento realizado.

Tabela 13 – Resumos dos Experimentos

Resumo do experimento			
Fatores:	19	Réplicas:	2
Ensaio base:	48	Total de ensaios:	96
Blocos Base:	1	Total de blocos:	1

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Os testes foram conduzidos juntamente ao ambiente de produção, a coleta de amostras seguiu o processo normal de amostragem estabelecida em plano de controle de qualidade. Os parâmetros de processos foram ajustados de acordo com a ordenação da matriz.

Com os dados obtidos do, identifica-se dois fatores com Valor P abaixo de 0,050, de acordo com Nascimento *et al.* (2015), valores nestas condições caracteriza-se significativos para o processo.

O índice encontrado do R^2 representa 30,07%, ou seja, esta é a capacidade de o modelo explicar a variabilidade dos dados.

Tabela 14 – Resultado DOE Análise de Variância

Análise de Variância					(continua)
Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Modelo	19	0,000002	0	1,72	0,051
Linear	19	0,000002	0	1,72	0,051
Pre-sinter1	1	0	0	0,65	0,422
Pre-sinter2	1	0	0	0,05	0,825
Pre-sinter3	1	0	0	1,96	0,166
Pre-sinter4	1	0	0	0,1	0,753
Pre-sinter5	1	0	0	0,01	0,922
Sinter zone1	1	0	0	3,15	0,080
Sinter zone2	1	0,000001	0,000001	11,38	0,001
Sinter zone3	1	0	0	0,21	0,648
Sinter zone4	1	0	0	1,62	0,207
Sinter zone5	1	0	0	6,15	0,015
Debinder z1	1	0	0	0,29	0,593

(conclusão)

Análise de Variância					
Debinder z2	1	0	0	2,28	0,136
Debinder z3	1	0	0	1,39	0,242
Debinder z4	1	0	0	0,43	0,513
Debinder z5	1	0	0	0,54	0,463
H2	1	0	0	0,14	0,706
N2 Sinter	1	0	0	0,04	0,852
N2 Debinder	1	0	0	1,09	0,3
N2+H2 Sinter	1	0	0	1,22	0,272
Erro	76	0,000004	0		
Falta de ajuste	28	0,000001	0	0,82	0,709
Erro Puro	48	0,000003	0		
Total	95	0,000006			

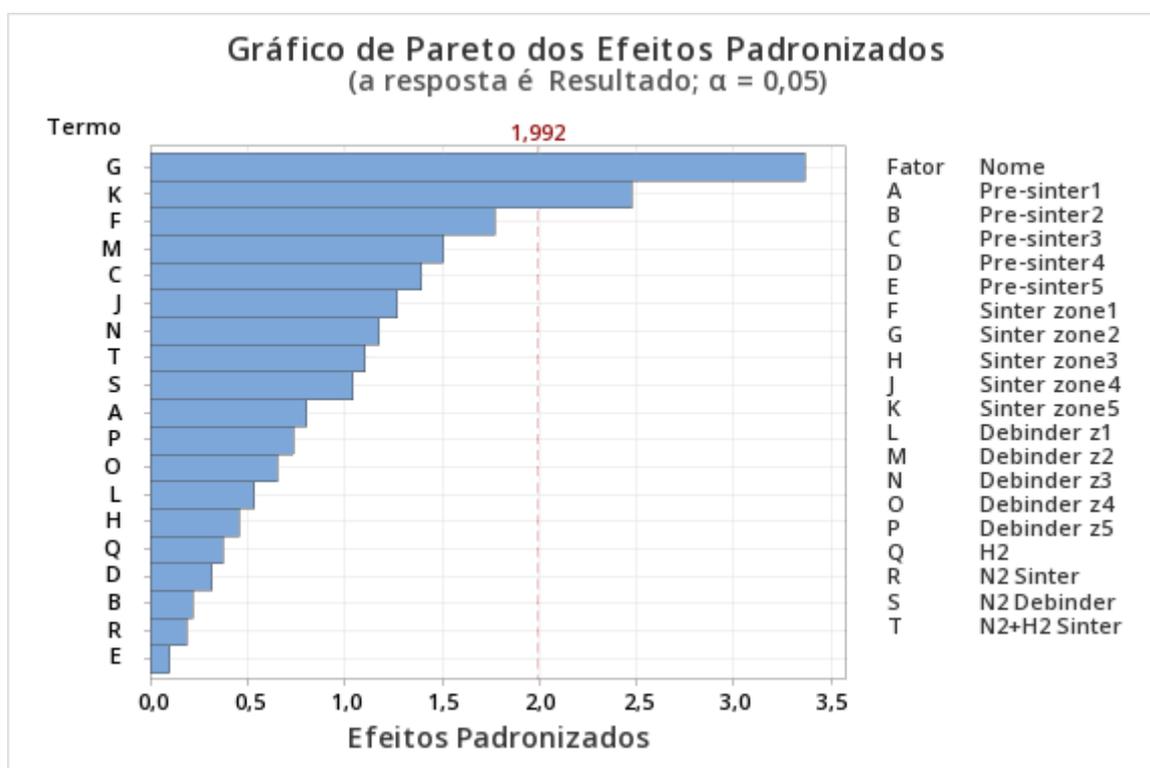
Sumário do Modelo

S	R2	R2(aj)	R2(pred)
0,0002411	30,07%	12,59%	0,00%

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

No Gráfico 19 apresenta os resultados dos efeitos padronizados para medição de Carbono.

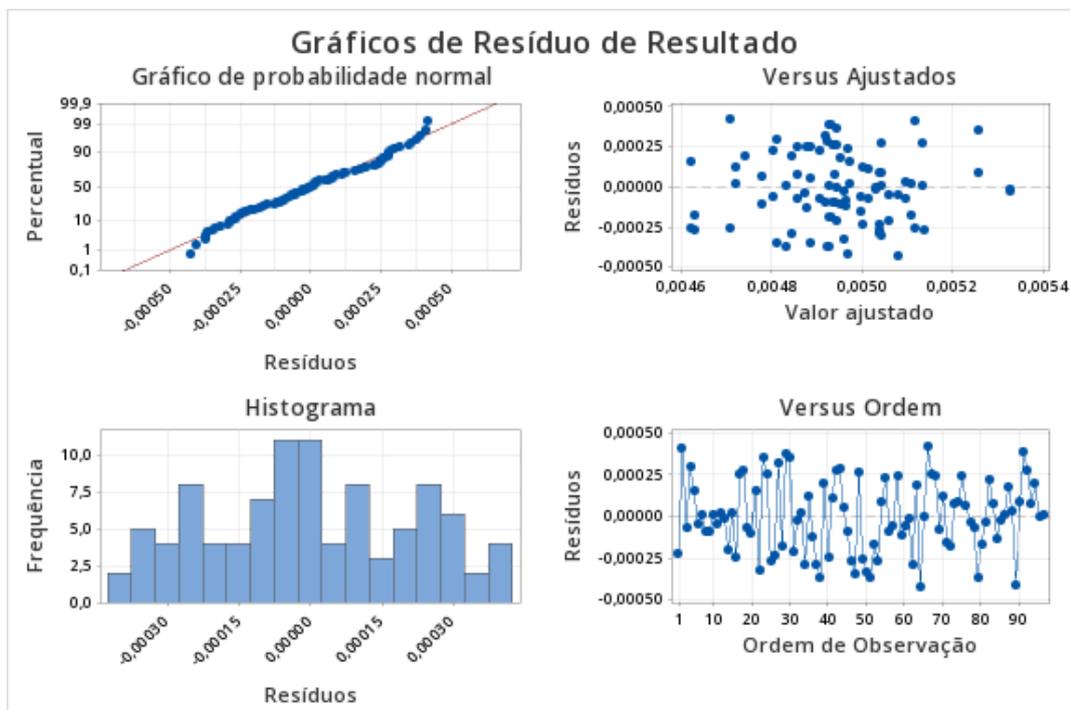
Gráfico 19 – Efeitos Padronizados Carbono



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

O Gráfico 20 apresenta o resíduo do resultado em relação a medida nominal de estabelecido no material.

Gráfico 20 – Gráfico de Resíduo Carbono



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

O Gráfico 21, apresenta a normalidade dos resultados das medições de carbono do experimento.

Gráfico 21 – Normalidade de Dados Medições Experimento

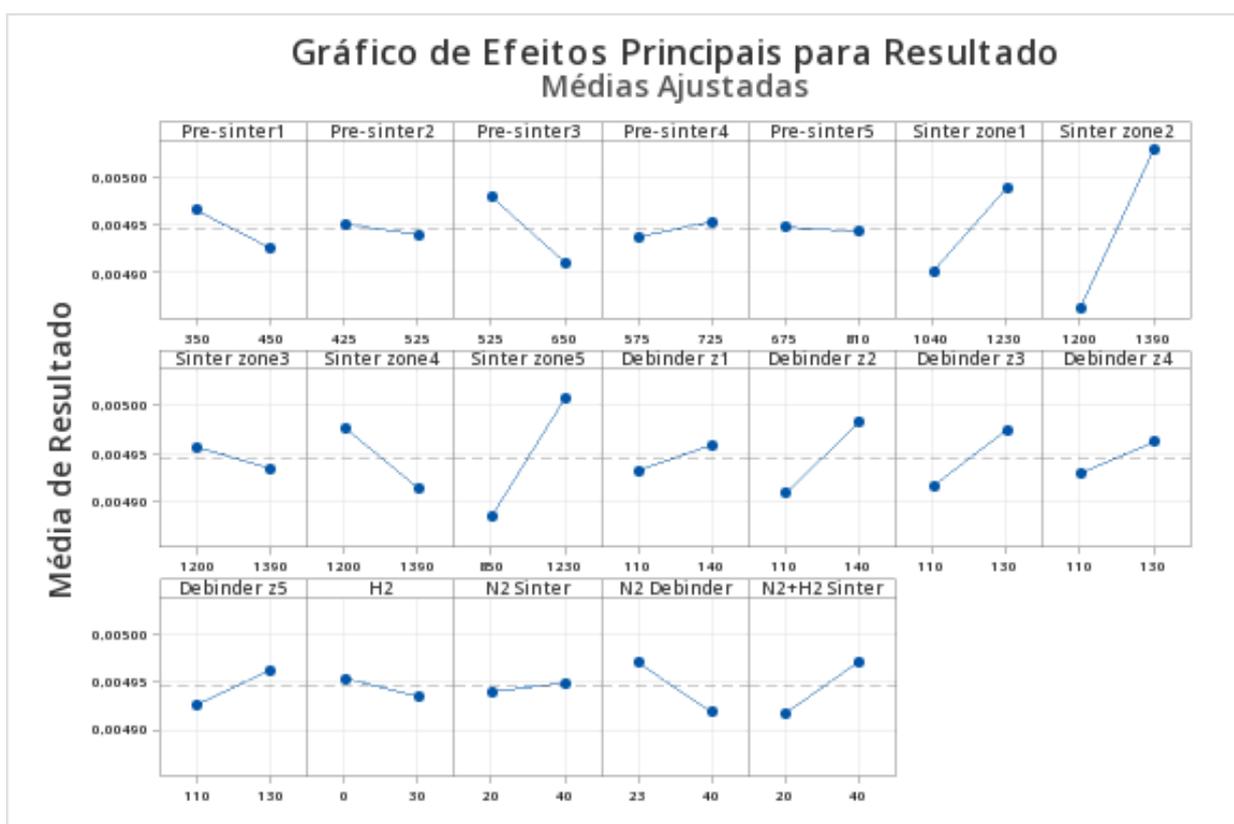


Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Analisando o conjunto de dados, identifica-se que o experimento reproduziu uma distribuição normal de dados. Os dados que ilustram os resíduos versus ajustados e resíduos versus ordem, o experimento demonstrou uma distribuição aleatória de dados.

O Gráfico 22, apresenta os efeitos principais considerando os valores mínimos e máximo de cada fator de interação para o resultado de Carbono.

Gráfico 22 – Efeitos Principais por Fator



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

A partir da análise gráfica e dos resultados obtidos no experimento, identifica-se dois fatores com influência significativa no resultado de carbono, sendo a *Sinter zone 2* e *Sinter zone 5*. Em contraponto, mesmo os dados apresentando um perfil de distribuição Normal, a modelagem de uma equação capaz de traduzir todos os efeitos do experimento ficou comprometida dado o R^2 de 30,07%.

4.5.3 Análise de Causas Potenciais

Os resultados do experimento realizado comprovaram algumas causas potenciais e descartaram outras relacionadas na fase de análise. O Quadro 5 apresenta de forma resumida as validações realizadas com o experimento.

Quadro 5 – Causas Analisadas

Causa	Causa Validada	Causa Descartada
Pre-sinter 1		x
Pre-sinter 2		x
Pre-sinter 3		x
Pre-sinter 4		x
Pre-sinter 5		x
Sinter Zone 1		x
Sinter Zone 2	x	
Sinter Zone 3		x
Sinter Zone 4		x
Sinter Zone 5	x	
Debinder Zone 1		x
Debinder Zone 2		x
Debinder Zone 3		x
Debinder Zone 4		x
Debinder Zone 5		x
Gás H2		x
Gás N2 (Sinter)		x
Gás N2 (Debinder)		x
Gás N2+H2 (Sinter)		x

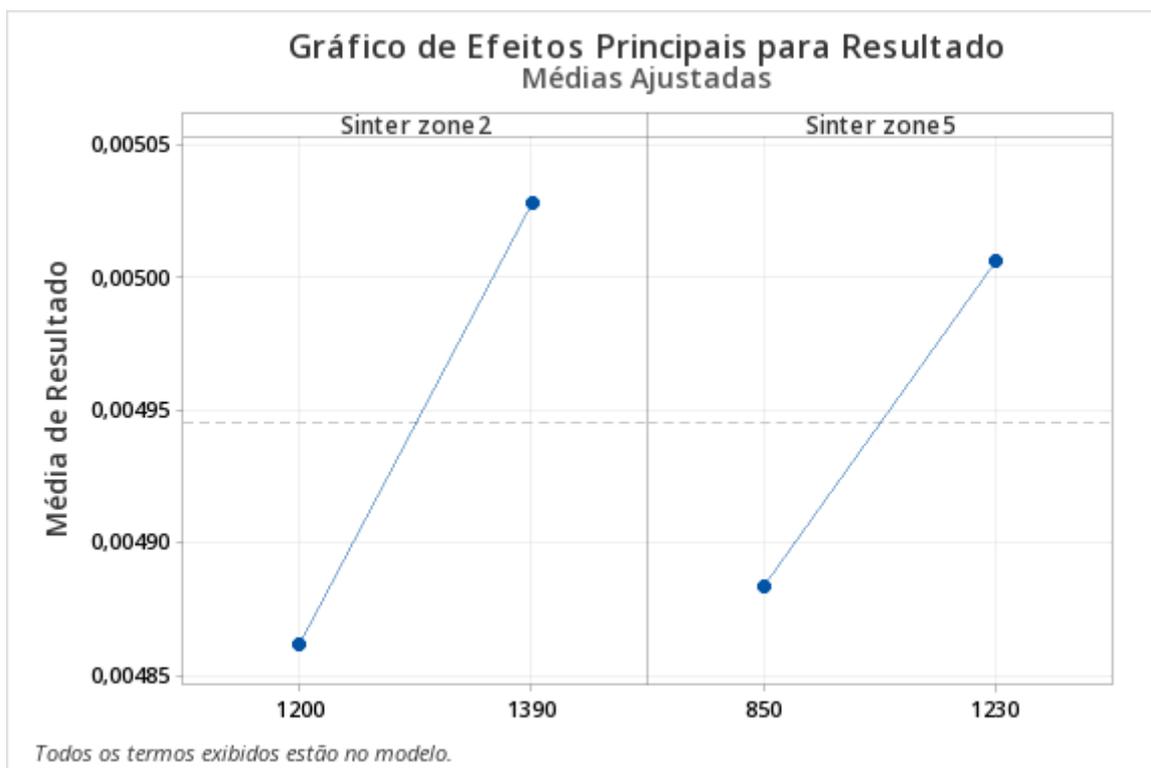
Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

4.6 FASE IMPLEMENTAÇÃO (I)

Com os resultados do projeto de experimento e a descoberta dos fatores de maior influência, a equipe de projeto decidiu analisar a resultante da interação entre os dois fatores principais. O objetivo da análise estava respaldado na definição de uma nova nominal de processo.

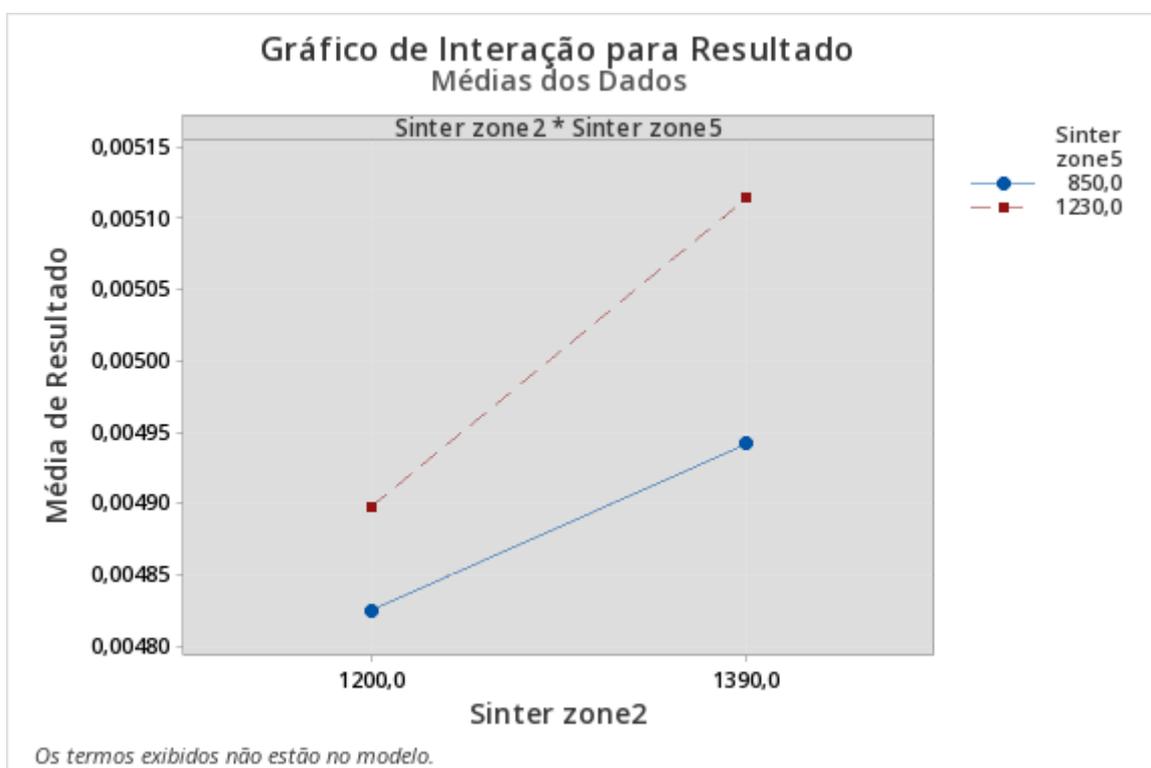
Os Gráficos 23 e 24, apresentam de forma individual dos dois principais fatores Sinter zone 2 e Sinter zone 5 e a interação para Carbono entre eles.

Gráfico 23 – Fatores Principais



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Gráfico 24 – Interação entre Fatores Principais



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

A partir da análise gráfica, a equipe definiu estabelecer uma nominal de processo com valores mais próximo do centro dos limites de mínimos e máximos de cada fator. O intervalo de temperaturas para as duas zonas de sinterização foi alterado para valores mais restritos, desta forma adotando novos intervalos, sendo:

- Sinter zone 2 – $1300^{\circ}\text{C}\pm 60^{\circ}\text{C}$;
- Sinter zone 5 – $1040^{\circ}\text{C}\pm 60^{\circ}\text{C}$.

4.6.1 Plano de Ação

A partir dos estudos realizados e a conclusão das análises, o grupo definiu ações para implementação das melhorias relacionadas a padronização dos parâmetros de processo.

Para padronizar as atividades a serem executadas, assim como responsáveis e prazo de execução. A equipe de projeto decidiu estruturar o plano de ação na metodologia 5W1H, conforme apresentado no Quadro 6, plano de ação.

Quadro 6 – Plano de Ação

Plano de Ação						
5W						1H
WHAT	WHY	WHERE	WHEN	WHO	HOW	
Nº Ação	O que será realizado	Por que será realizado?	Onde será realizado?	Quando será realizado?	Por quem será realizado?	Como será realizado?
1	Atualização da documentação com os novos parâmetros.	Documentar proposta de melhoria.	Forno FC08 XL	mar/22	Engenharia de Processos	Nova versão do Procedimento Operacional de Sinterização FC08 XL.
2	Treinamento dos operadores.	Para garantia de seguimento dos novos parâmetros.	Operadores Forno FC08 XL	mar/22	Engenharia de Processos + Líderes de turno	Sala de treinamentos e atualização da Matriz de Funcionalidade RH
3	Monitoramento dos resultados.	Verificação de eficácia.	Coleta de dados de medição % Carbono	Período entre mar/22 e mai/22	Engenharia da Qualidade + Engenharia de Processos	Análise estatística via <i>software</i> Minitab 20.

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

4.6.1.1 Atualização do Documentos e Treinamento

Realizado durante o mês de março de 2022 foi realizada atualização do documento Procedimento Operacional, com a atualização do documento as turmas de treinamento aos operadores foram agendadas e realizadas pelo time de Engenharia de Processos e os Líderes de turno. Na Fotografia 18, apresenta uma imagem da página que necessitou atualização dos parâmetros de temperatura do Forno FC08 XL.

Fotografia 18 – Procedimento Atualizado

PROCEDIMENTO OPERACIONAL			
PO-ENG-036 - SINTERIZAÇÃO FORNO CONTÍNUO 8 ARMAS			
Versão: 7	Data: 08/03/2022		
d) Alarmes do forno – parâmetros de processo			
<ul style="list-style-type: none"> • Maiores detalhamentos referente à configuração de alarmes poderão ser vistos do manual do equipamento (CREMER). Apenas o setor de Manutenção tem autorização para alterar os alarmes dos fornos, obedecendo às recomendações do Fabricante. • É necessário manter os alarmes setados conforme tabela a seguir. O não cumprimento desta determinação coloca em risco a integridade do forno e dos colaboradores. 			
Temperatura	Nominal	Max	Min
Pre-sinter 1	395	445	345
Pre-sinter 2	475	525	425
Pre-sinter 3	588	650	525
Pre-sinter 4	650	725	575
Pre-sinter 5	745	810	675
Sinter Zone 1	1135	1230	1040
Sinter Zone 2	1300	1360	1240
Sinter Zone 3	1295	1390	1200
Sinter Zone 4	1295	1390	1200
Sinter Zone 5	1040	1100	980
Debinder zone 1	125	140	110
Debinder zone 2	125	140	110
Debinder zone 3	120	130	110
Debinder zone 4	120	130	110
Debinder zone 5	120	130	110
Combustão	840	940	740
GÁS DE PROCESSO			
GÁS H2	25	30	0
GÁS N2 (SINTER)	32	40	20
GÁS N2 (DEBINDER)	32	40	23
GÁS N2+H2 (SINTER)	35	40	20
PRESSÃO			
Pressão sinter zone	10	18	5

Impresso por: Fabio dos Santos Bueno em 16/05/2022 as 16:14 Cópia não controlada Página 9/23
 Este documento é válido apenas contendo todas as páginas. VerDoc: (10.90.1.115.8000)bcnrcin@meducf
 Verifique que esta é a versão atual deste documento. O documento atualizado está em: CONFIDENCIAL – PFC/1863482

Fonte: Arquivo da empresa (2022).

4.6.1.2 Validação dos Ajustes

Após definição e realização dos ajustes dos parâmetros de processo, foi realizado o monitoramento do desempenho de processo. Utilizado como parâmetro de comparação pós restrição o período utilizado pela equipe de projeto para execução do projeto de experimento.

Para comparar períodos, foi utilizado um teste de hipóteses para uma variância, com hipótese nula sendo todas as variâncias iguais, conforme apresentado na Tabela 15.

Tabela 15 – Teste de Hipóteses duas Variâncias

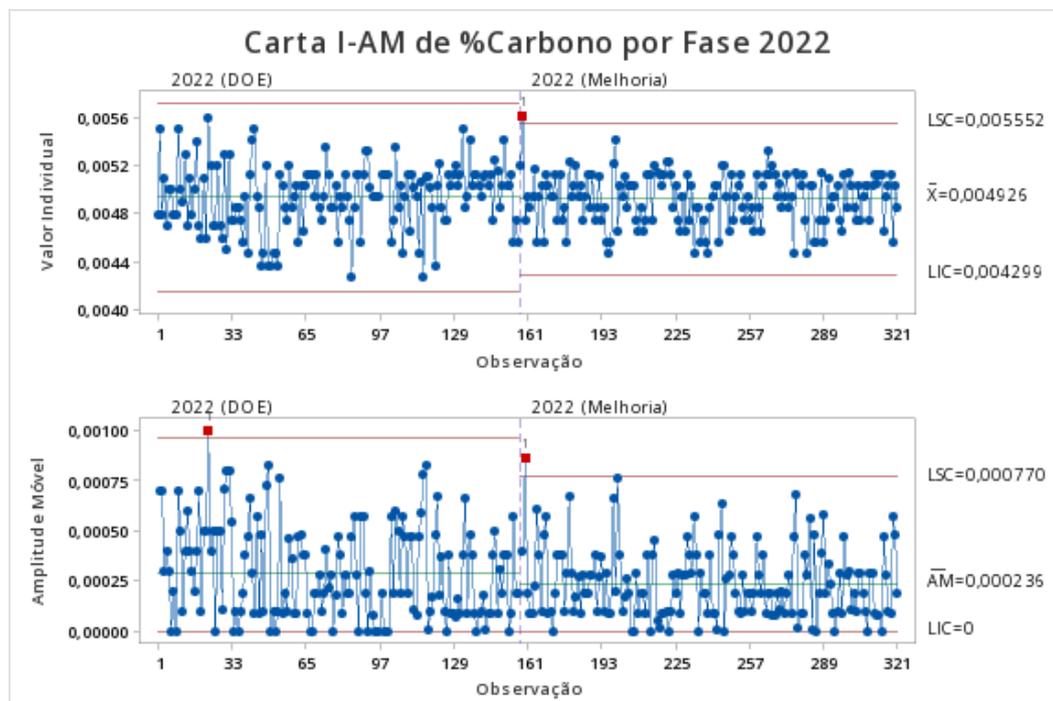
Método			
Hipótese nula	Todas as variâncias são iguais		
Hipótese alternativa	No mínimo uma variância é diferente		
Nível de significância	$\alpha = 0,05$		
Intervalos de 95% de Confiança Bonferroni para os Desvios Padrão			
Amostra	N	DesvPad	IC
2022 (DOE)	157	0,0002769	(0,0002470; 0,0003149)
2022 (Melhoria)	164	0,0002161	(0,0001938; 0,0002442)
Nível de confiança individual = 97,5%			
Testes			
	Estatística de teste		
Método		Valor-p	
Comparações múltiplas	—	0,001	
Levene	7,34	0,007	

Fonte: elaborado pelo autor (2022).

Conforme apresentado, houve uma redução significativa no desvio padrão comparando os períodos, na fase de testes o desvio padrão estava em $2,769 \times 10^{-4}$ pós ajustes de processo o desvio padrão teve uma redução de 21,9%.

Para uma melhor visualização do desempenho, os dados foram plotados em uma carta de controle individual, conforme apresentado no Gráfico 25.

Gráfico 25 – Carta I-AM Comparação de Períodos pós Testes



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

4.7 FASE CONTROLE (C)

Após ajustes de processo estabelecidas nos parâmetros *Sinter zone 2* e *Sinter zone 5*, a equipe de projeto optou pela realização do estudo de capacidade, dos diferentes cenários de performance de processo ao longo dos anos de 2021 e 2022. Para realização do estudo foi definido dois estágios macros de análise para realizar o comparativo ao ano de 2021, sendo:

- Ano 2022 durante o período de experimentos;
- Ano 2022 pós melhorias e restrições de processos.

Para execução da análise de capacidade, inicialmente foi observado o ajuste de distribuição que o conjunto de dados se associava. Na Tabela 16, apresenta os parâmetros de distribuição e os possíveis ajustes gerados a partir do *software* Minitab 20, referentes aos dados coletados durante o intervalo de tempo de execução dos experimentos.

Tabela 16 – Estatística Ajuste de Distribuição Período DOE

Estatísticas Descritivas

N	N*	Média	DesvPad	Mediana	Mínimo	Máximo	Assimetria	Curtose
157	2012	0,0049409	0,0002769	0,00494	0,00428	0,0056	-0,237469	-0,217

Transformação de Box-Cox: $\lambda = 2$ **Teste de Qualidade de Ajuste**

Distribuição	AD	P	TRV P
Normal	1,379	<0,005	
Transformação de Box-Cox	1,167	<0,005	
Lognormal	1,686	<0,005	
Lognormal de 3 Parâmetros	1,385	*	0,102
Exponencial	64,425	<0,003	
Exponencial de 2 Parâmetros	23,421	<0,010	0
Weibull	1,394	<0,010	
Weibull de 3 Parâmetros	1,703	<0,005	1
Menor Valor Extremo	1,743	<0,010	
Maior Valor Extremo	4,108	<0,010	
Gama	1,58	<0,005	
Gama de 3 Parâmetros	1,606	*	1
Logística	1,363	<0,005	
Loglogística	1,564	<0,005	
Loglogística de 3 Parâmetros	1,363	*	0,148

Estimativas de MV dos Parâmetros da Distribuição

Distribuição	Localização	Forma	Escala	Limite
Normal*	0,00494		0,00028	
Transformação de Box-Cox*	0,00002		0	
Lognormal*	-5,31179		0,05662	
Lognormal de 3 Parâmetros	6,23835		0	-512,01006
Exponencial			0,00494	
Exponencial de 2 Parâmetros			0,00067	0,00428
Weibull		19,73313	0,00507	
Weibull de 3 Parâmetros		123,68965	0,03179	-0,02672
Menor Valor Extremo	0,00508		0,00026	
Maior Valor Extremo	0,0048		0,00028	
Gama		316,40664	0,00002	
Gama de 3 Parâmetros		241,74025	0,00002	0,00059
Logística	0,00495		0,00016	
Loglogística	-5,30883		0,03219	
Loglogística de 3 Parâmetros	6,23833		0	-511,99614

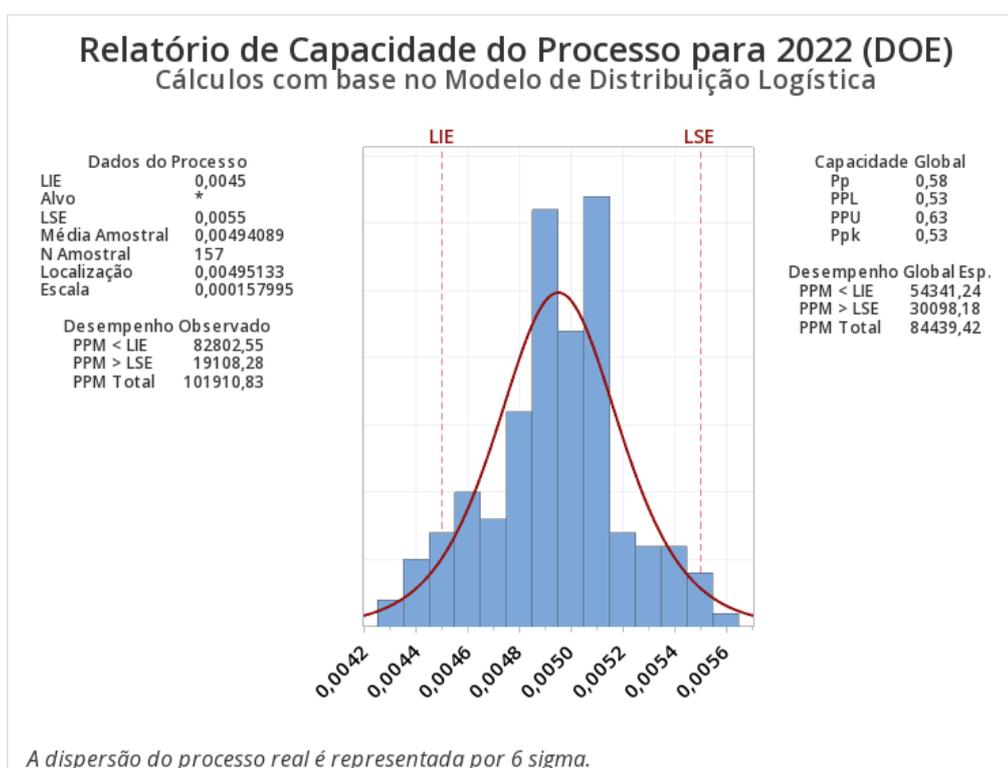
* Escala: Estimativa de MV ajustado

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Analisando os resultados, observa-se que um conjunto de 157 dados, não sendo possível identificar o melhor ajuste a partir da estatística P, desta forma a identificação foi dada a partir da estatística AD, sendo a distribuição Logística que melhor representa a distribuição do conjunto de dados analisados.

O Gráfico 26, apresenta o estudo de capacidade de processo durante o período de experimentos no ano de 2022.

Gráfico 26 – Relatório Capacidade % Carbono Período DOE 2022



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Observando os resultados do estudo de capacidade de processos referente ao período da realização do projeto de experimento, obtemos o índice Pp 0,58 e PpK 0,53.

No histograma é possível identificar uma distribuição próxima ao centro, com uma média amostral de 0,00494, caracterizando uma tendência de resultados mais próximos ao limite inferior de especificação (LIE).

Para o estudo de capacidade de processo pós-período de experimentos e com todas as melhorias implementadas juntamente com as restrições de processo nas *Sínter zone 2* e *Sínter zone 5*, foi adotado a mesma estratégia de análise. Primeiramente foi analisado os dados em qual modelos de distribuição melhor

traduzia o conjunto de dados, posteriormente a realização do teste de capacidade de processo observando os índices globais.

Na Tabela 17, apresenta os parâmetros de distribuição e os possíveis ajustes gerados a partir do *software* Minitab 20, referentes aos dados coletados durante o período pós melhorias de processo.

Tabela 17 - Estatística Ajuste de Distribuição Período Melhorias

Estatísticas Descritivas

N	N*	Média	DesvPad	Mediana	Mínimo	Máximo	Assimetria	Curtose
164	2326	0,0049259	0,0002161	0,00494	0,00447	0,00561	-0,187517	-0,312294

Transformação de Box-Cox: $\lambda = 4$

Teste de Qualidade de Ajuste

Distribuição	AD	P	TRV P
Normal	2,653	<0,005	
Transformação de Box-Cox	2,172	<0,005	
Lognormal	2,888	<0,005	
Lognormal de 3 Parâmetros	2,673	*	0,193
Exponencial	68,979	<0,003	
Exponencial de 2 Parâmetros	19,649	<0,010	0
Weibull	2,079	<0,010	
Weibull de 3 Parâmetros	2,282	<0,005	1
Menor Valor Extremo	2,319	<0,010	
Maior Valor Extremo	4,784	<0,010	
Gama	2,825	<0,005	
Gama de 3 Parâmetros	4,049	*	1
Logística	2,856	<0,005	
Loglogística	3,003	<0,005	
Loglogística de 3 Parâmetros	2,855	*	0,203

Estimativas de MV dos Parâmetros da Distribuição

Distribuição	Localização	Forma	Escala	Limite
Normal*	0,00493		0,00022	
Transformação de Box-Cox*	0		0	
Lognormal*	-5,31422		0,04414	
Lognormal de 3 Parâmetros	6,23835		0	-512,00602
Exponencial			0,00493	
Exponencial de 2 Parâmetros			0,00046	0,00447
Weibull		24,3137	0,00503	
Weibull de 3 Parâmetros		158,49502	0,03311	-0,02808
Menor Valor Extremo	0,00503		0,00021	
Maior Valor Extremo	0,00482		0,00021	
Gama		518,89983	0,00001	
Gama de 3 Parâmetros		10,73515	0,00007	0,00417
Logística	0,00493		0,00013	
Loglogística	-5,31195		0,02571	
Loglogística de 3 Parâmetros	6,23833		0	-511,99569

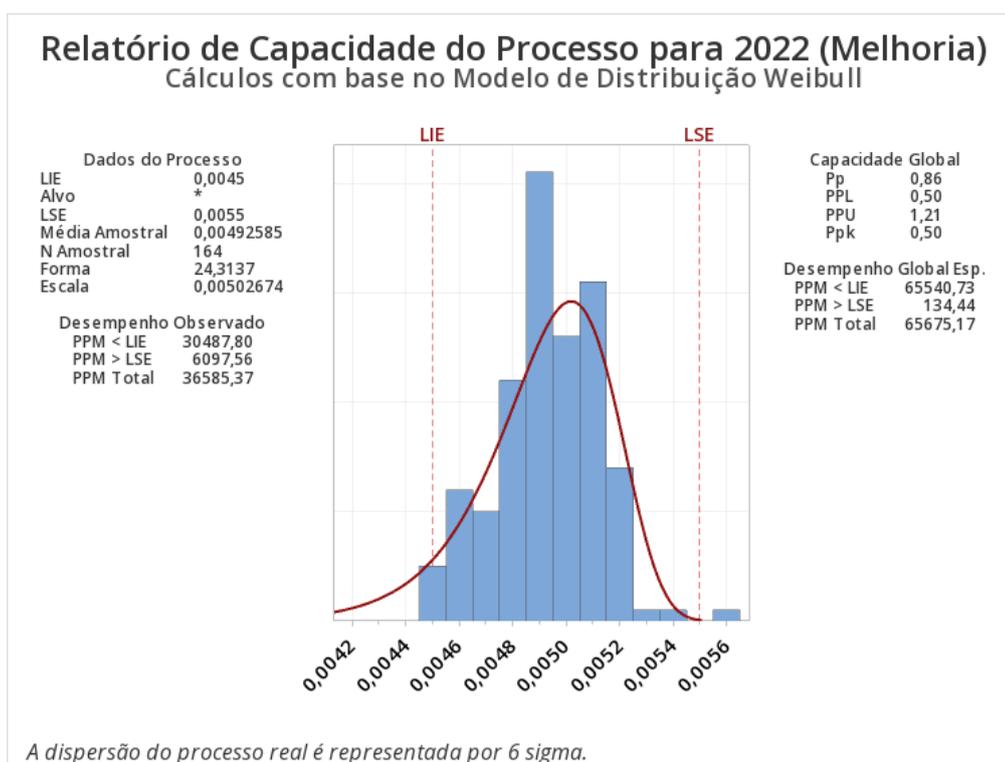
* Escala: Estimativa de MV ajustado

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Analisando os resultados, observa-se que um conjunto de 164 dados, não sendo possível identificar o melhor ajuste a partir da estatística P, desta forma a identificação foi dada a partir da estatística AD, sendo a distribuição Weibull que melhor representa a distribuição do conjunto de dados analisados.

O Gráfico 27, apresenta o estudo de capacidade de processo pós melhorias e restrições de processo no ano de 2022.

Gráfico 27 - Relatório Capacidade % Carbono Período Pós melhorias 2022



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Observando os resultados do estudo de capacidade de processos referente ao período pós melhorias e restrições de processo no ano de 2022, obtemos o índice Pp 0,86 e PpK 0,50.

No histograma é possível identificar uma distribuição próxima ao centro, com uma média amostral de 0,00502, dado a característica da distribuição é esperado uma tendência de resultados mais próximos ao limite inferior de especificação (LIE).

Com a conclusão das análises de capacidade, foi realizado um teste de hipóteses para validação das melhorias, para o fim, foi utilizado o índice de desvio padrão pós melhorias e restrições de processo como valor de referência para a hipótese nula.

A Tabela 18, apresenta os resultados do teste para uma variância, utilizada na comparação entre períodos.

Tabela 18 – Comparação entre Períodos

Método			
Hipótese nula	Todas as variâncias são iguais		
Hipótese alternativa	No mínimo uma variância é diferente		
Nível de significância	$\alpha = 0,05$		
Intervalos de 95% de Confiança Bonferroni para os Desvios Padrão			
Amostra	N	DesvPad	IC
2021	595	0,0004261	(0,0003736; 0,0004879)
2022 (DOE)	157	0,0002769	(0,0002451; 0,0003177)
2022 (Melhoria)	164	0,0002161	(0,0001924; 0,0002463)
Nível de confiança individual = 98,3333%			
Testes			
Método	Estatística		
	de teste	Valor-p	
Comparações múltiplas	—	0	
Levene	21,23	0	

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Conforme apresentado, o teste de hipóteses comprova a melhoria significativa da variabilidade do processo, comparando o ano de 2021 com o período pós melhorias e ajustes de processos, obtemos uma redução de 74% da variabilidade.

Para melhor ilustrar os ganhos obtidos com as melhorias de processos realizados, foi construído um resumo dos índices apresentados nos estudos realizados, conforme ilustrado na Tabela 19.

Tabela 19 – Resumo Índices de Processo pós Melhorias

Período	Pp	PpK	DesvPad	Variância	PPM Global Esperado		PPM Total
					PPM<LIE	PPM>LSE	
2021	0,51	0,31	0,000426	$1,81 \times 10^{-7}$	16514,01	179900,87	196414,88
2022 (DOE)	0,58	0,53	0,000277	$7,67 \times 10^{-8}$	53341,24	30098,18	83439,42
2022 (Melhorias)	0,86	0,50	0,000216	$4,66 \times 10^{-8}$	65540,73	134,44	65675,17

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Observa-se que há uma redução significativa no índice de PPM esperado para valores acima do limite de especificação, reduzindo de 179.900 PPM para 134 PPM, o que representa uma redução superior a 99% quando comparado o ano de 2022 pós melhorias com o ano de 2021. O PPM total, usando-se do mesmo critério de comparação, também apresenta uma redução significativa reduzindo de 196.414

PPM para 65.675 PPM, representando uma redução superior a 66%. Seguindo os mesmos critérios de comparação, ao observar os índices globais esperados para PPM de itens abaixo da especificação, temos um crescimento de próximo a 300%, entretanto, componentes com índices de carbono abaixo da especificação passam por um processo de recuperação de carbono durante o processo de tratamento térmico, a prática não altera o roteiro de produção dos componentes do mesmo modo que não gera custos adicionais a companhia.

Ampliando a análise, retornamos a métrica principal do projeto, referente a redução do % custo de sucata em relação ao faturamento da companhia pelo modo de falha carbono alto. No Gráfico 28, apresenta os resultados obtidos pós melhoria de processo.

Gráfico 28 – Indicador % Custo de Sucata Carbono 2021 versus 2022



Fonte: Dados ERP da Empresa.

Analisando os dados de desempenho de sucata, obtemos um índice acumulado de 0,19% referente ao período de janeiro a abril de 2022. Comprado com o índice acumulado do ano de 2021 de 1,93%, as melhorias desenvolvidas neste trabalho representam uma redução superior a 90% de sucata pelo modo de falha carbono alto.

5 CONCLUSÃO DO ESTUDO

Na realização deste trabalho foi possível concluir a aplicação da metodologia Seis Sigma em um processo de fabricação pouco difundido na América Latina. No desenvolvimento do projeto foi possível identificar a constante agregação de conhecimento e evolução das discussões relacionadas a análise e solução de problema. A boa estruturação do trabalho desenvolvido em 27 semanas, com entregas, prazos e responsáveis endereçadas de forma clara e objetiva, contribuíram em muito no sucesso do trabalho.

Apesar a complexidade do processo de fabricação, foi possível a aplicação de um projeto de experimentos para estudo das variáveis, fato que, na história da companhia não houve trabalhos similares, que resultou em resistências por parte de alguns colegas, em compensação grandes expectativas geradas por outros, este complexo ambiente de posicionamentos acabou por ser um dos desafios do desenvolvimento do projeto Seis Sigma.

Com a construção das etapas de acordo com o DMAIC, a estrutura de análise proposta pela ferramenta trouxe os entregáveis necessários para a realização do levantamento dos potenciais causas e das validações necessárias para as mesmas. Em determinados momentos do desenvolvimento do projeto, foi necessário a contribuição e a inclusão por tempo parcial de alguns membros das áreas de apoio Técnico e Manufatura.

Através das ferramentas utilizadas e métodos de análise, foi possível a comprovação de alguns fatores de maior influência no modo de falha estudado, além da decisão de interrupção programada da produção para correção de causas especiais atuantes no processo.

Uma dificuldade apresentada foi durante a execução do experimento, estas dificuldades podem ser divididas em dois blocos, sendo a primeira e principal dificuldade, o fato de não termos a oportunidade de interromper a produção além do compromisso de os testes não serem fatores que afetasse a qualidade dos componentes gerando outros modos de falha. O segundo bloco de dificuldade estava relacionado com a natureza do processo, cada alteração de parâmetro nos onerava em no mínimo 17 horas para obtenção do resultado.

O trabalho trouxe também um legado importante para companhia, relacionado ao sistema de medição do percentual de carbono. Não havia a prática de validação de determinados sistema de medições como o LECO, ficando somente na garantia do fabricante em determinar se o sistema era adequado ou não para aquela aplicação e necessidade. Explorando o MSA, foi possível apresentar uma metodologia de validação por ensaios destrutivos o *Nested Gage*, agregando um conhecimento à companhia na validação de sistemas de medições que necessitam destruir as amostras, como em casos de ensaios de tração realizados na empresa.

Por fim, o projeto melhorou de forma significativa os índices de capacidade, tornando os eventos de sucata pelo modo de falha estudado menos presente. Como resultado financeiro, o projeto é responsável pela redução aproximada de R\$ 2 Milhões do custo de sucata, superando o objetivo inicial de reduzir aproximadamente R\$1,2 Milhões.

6 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Com a conclusão deste trabalho, pelo conhecimento adquirido do processo aqui apresentado, uma sugestão plausível é um novo projeto com o foco na melhoria dos índices de capacidade, explorando outras variáveis de processo, como a inclusão do controle de carga mássica, índices de concentração de ácido nas fases de extração Catalítica além da inclusão de controle de atmosfera de carbono nas zonas de sinterização.

Outra possibilidade é um projeto para eliminação do processo de calibração, onde é uma fase do roteiro de produção para ajustar deformações provenientes dos processos de injeção e sinterização, reduzindo uma etapa que não agrega valor ao produto.

REFERÊNCIAS

<<https://advancedpowderproducts.com/metal-injection-molding>>. Acesso em: 28 outubro. 2021

<<https://carbosystem.com/wp-content/uploads/mimprocess>>. Acesso em: 28 outubro. 2021

<<https://www.gminsights.com/industry-analysis/mim-parts-market>>. Acesso em : 01 novembro. 2021

ANTONY, J.; BANUELAS, R. Key ingredients for the effective implementation of Six Sigma program. **Measuring Business Excellence**, v. 6, n. 4, p. 20-27, 2002.

BANERJEE, S.; JOENS, C. J.; HEANEY, D. F. 7 - Debinding and sintering of metal injection molding (MIM) components. In: (Ed.). **Woodhead Publishing Series in Metals and Surface Engineering**: Woodhead Publishing, 2012.p.133-180.

BARRIÈRE, T., Renault, D., Gelin, J., Dutilly, M.; **Moulage par injection de poudres métalliques**. Expérimentation, modélisation et simulation; Mec. Ind. 1, p. 201–212; (2000).

BILOVOL, V. V. KOWALSKI , L. DUSZCZYK, J. KATGERMAN, L. **The effect of constitutive description of PIM feedstock viscosity in numerical analysis of the powder injection moulding process**. Journal of Materials Processing Technology. 2006, Vol. 178, pp. 194–199.

CAMPOS, Vicente Falconi. **TQC – Controle Total de Qualidade (no Estilo Japonês)**. Belo Horizonte: Editora de Desenvolvimento Gerencial, 1999.

CARPINETTI, Luiz Ribeiro. **Gestão da qualidade: conceitos e técnicas**. 2. ed. São Paulo Atlas, 2012.

CHANG, Isaac; ZHAO, Yuyuan. **Advances in powder metallurgy: Properties, processing and applications**. 60. ed. Philadelphia: Woodhead Publishing, 2013. 604 p. ISBN 2052-5567.

CHEN T.; **Discussion on integration of Lean Production and Six Sigma Management**. Internation Business Research, Vol. 1 No.1 p. 38-42, January, 2008.

CHIAVERINI, VICENTE. **Metalurgia do pó**. 4. s.l. : Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2001

CLETO, M. G.; QUINTEIRO, L. Gestão de projetos através do DMAIC: um estudo de caso na indústria automotiva. **Revista Produção Online**, [S. l.], v. 11, n. 1, p. 210–239, 2010. DOI: 10.14488/1676-1901.v11i1.640. Disponível em: <https://producaoonline.org.br/rpo/article/view/640>. Acesso em: 11 out. 2021.

CONE, G. **6-Sigma, um programa em ascensão**. HSM Management, São Paulo. HSM do Brasil, n. 4, jan.- fev. 2001, p. 28-33.

- CORONADO, A. Modelo para estruturas seis sigma nas organizações. **Gestão & Produção**, São Carlos, v. 15, n. 1, p. 43-56, 2008.
- CROSBY, Philip B. **Qualidade é investimento**. 6. ed. Rio de Janeiro: Editora José Olympio, 1994.
- DANE, F. C. (1990). **Research Methods**. Belmont – CA: Brooks/Cole
- DRESCH, Aline; **Desenvolvimento Científico Em Design Science Para A Engenharia De Produção: Formulações Conceituais E Análise Empírica**. 2018. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) – Programa de Pós-Graduação, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2018.
- DRUMOND, F. B. **Itens de controle e avaliação de processos**. Belo Horizonte: Fundação Christiano Ottoni, 1994.
- E. Klar and P. K. Samal ,Powder **Metallurgy Stainless Steels**, 2007 ASM International, Materials Park, Ohio, pages 119 to 121.
- ECKES, G. **A Revolução Seis Sigma**. 4. ed. São Paulo: Campus, 2001.
- EVANGELISTA, Gabriela Moraes Simões. Impactos da operação de pré-ajustagem de ferramentas na eficiência do processo de usinagem. **Revista Gepros - Gestão da Produção, Operações e Sistemas**, Bauru, v. 4, n. 1, p. 283-299, 2019.
- FERNANDES, Laerte José et al. Planejamento e controle da produção de cilindros para laminação: um estudo de caso quantitativo. **Produção**, São Paulo, v. 23, n. 1, p. 120-134, 2013. Disponível em http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-65132013000100009. Acesso em: 17 out. 2021.
- GERMAN, R. M. **Powder Metallurgy Science** . [ed.] Metal Powder Industries Federation. 2nd. s.l. : Princeton, 1994.
- GERMAN, R.M; Bose, A. **Injection Moulding of Metals and Ceramics**. Princeton, New Jersey (USA) – 1997.
- GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4. ed. São Paulo: Atlas. 2010.
- GIRMANOVÁ, L. et al. Application of Six Sigma Using DMAIC Methodology in the Process of Product Quality Control in Metallurgical Operation. **Slovaca Universitas Agriculturae Nitriae**, v. 20, n. 4, p. 104-109, 2017. Disponível em: <https://content.sciendo.com/view/journals/ata/20/4/article-p104.xml>. Acesso em: 12 out. 2021.
- GISBERT SOLER, V.; RODRIGO OLTRA, M. de los Ángeles. O QUE SÃO SEIS SIGMA, BARREIRAS E CHAVES PARA A OPERAÇÃO NAS PME. **Tecnologia 3C. Glosses de inovação aplicados às PME** , [S. l.] , v. 5, n. 1 p. 13–24, 2016. DOI: 10.17993/3ctecno.2016.v5n1e17.13-24. Disponível em: <https://ojs.3ciencias.com/index.php/3c-tecnologia/article/view/338>. Acesso em: 12 out. 2021.

GOODSHIP, Vanessa. **Practical Guide to Injection Moulding**. 1. ed. Shawbury, Shrewsbury, Shropshire, SY4 4NR, UK: Rapra Technology Limited, 2004. 264 p.

HARRY, M. J.; SCHROEDER, R. Six sigma: the breakthrough management strategy revolutionizing the world's top corporations. New York: Doubleday, 2000.

HEANEY, Donald F. **Handbook of metal injection molding**. 1. ed. Philadelphia: Woodhead Publishing, 2012. 586 p.

HEANEY, D. **Handbook of Metal Injection Molding**. United States of America: Woodhead Publishing, 2012.

KARATAS, C; KOCER, A; ÜNAL, H. I; SARITAS, S. **Rheological properties of feedstocks prepared with steatite powder and polyethylene-based thermoplastic binders**. Journal of Materials Processing Technology. Vol. 152, p. 77–83, 2004.

MAHANTI, R.; ANTONY, J.. Six Sigma in the Indian software industry: some observations and results from a pilot survey. The TQM Journal, v. 21, n.6, p. 549-564, 2009

MANSON, J.A; RIGDHAL, M. HIGH PRESSURE INJECTION MOULDING - MACHINERY AND PROCESS. **Plastics and Rubber Processing and Applications**, [S.l], v. 3 (3), p. 229-235, 1983.

MARCONI, Marina de Andrade; LAKATOS, Eva Maria. **Fundamentos de metodologia científica**. MARCONI, M. de A.; LAKATOS, E. M.. Atlas, 2010.

MARSHALL JUNIOR, Isnard. CIERCO, Agliberto A. ROCHA, Alexandre V. MOTA, Edmarson B. LEUSIN. Sérgio. **Gestão da Qualidade**. 10. Ed. Rio de Janeiro: Editora FGV (Gestão Empresarial – Publicação FGV Management), 2010.

MAXIMIANO, Antonio Cesar Amaru. **Teoria geral da administração: da revolução urbana à revolução digital**. 7. ed. São Paulo: Atlas, 2012.

McCARTHY, B. M.; STAUFFER, R. Enhancing six sigma through simulation with igrafx process for six sigma. In: **Proceeding of the 2001 Winter Simulation Conference**, Phoenix, Arizona, 2001.

MEIRELES, Manuel. Ferramentas administrativas para identificar, observar e analisar problemas: organizações com foco no cliente. São Paulo: Arte e Ciência, 2001.

N.H. LOH, S.B. TOR, K.A. KHOR. **Production of metal matrix composite part by powder injection molding**. Journal of Materials Processing Technology. 108 , (2001), pp. 398 - 407.

NAVE, Dave. **How to compare Six Sigma, Lean and the Theory of Constraints: a framework for choosing what's best for your organization**. Quality Engineering. v.35, n. 3, p. 73-78, mar. 2002.

OLIVEIRA, D. P. R. **Sistemas. Organização & Métodos: O&M - uma abordagem gerencial**. 13. ed. São Paulo: Atlas, 2002.

OLIVEIRA, R.V.B et. al. Moldagem por Injeção de Pós Cerâmicos: Remoção da Parafina e do Polipropileno Utilizados como Veículo Orgânico. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, vol. 14, nº 3, p. 150-155, 2004.

OLIVEIRA, S.T. Ferramentas para o aprimoramento da Qualidade. São Paulo: Pioneira, 1996.

PACHECO, D. A. J. Teoria das Restrições, Lean Manufacturing e Seis Sigma: limites e possibilidades de integração Prod. vol.24 no.4 São Paulo Oct./Dec. 2014 Epub Mar 11, 2014

PANDE, P.; NEUMAN, R.; CAVANAGH, R., *The Six Sigma way team fieldbook: An implementation guide for process improvement teams*. McGraw Hill Professional, 2001.

PYZDEK, T.; KELLER, P. A. **Seis Sigma**: um guia completo para Green Belts, Black Belts e gerentes em todos os níveis. Rio de Janeiro: Alta Books, 2011.

RAMOS, Edson Marcos Leal Soares et al. **Controle Estatístico da Qualidade**. Porto Alegre: Bookman, 2013.

RAMPAZZO, L. Metodologia científica: para alunos dos cursos de graduação e pós-graduação. São Paulo: Loyola, 2010. 142. **Revista EDICIC**, v. 1, n. 3, p. 127-142, 2011.

RAMPAZZO, L. **Metodologia científica**: para alunos dos cursos de graduação e pós-graduação. São Paulo: Loyola, 2010.

Rath & Strong (Org.). **Six Sigma Pocket Guide**, 2. ed. Lexington, 2001, 192 p.

RIBEIRO, J. L. D., & Ten Caten, C. S. (2012). **Série monográfica qualidade: controle estatístico do processo**. Porto Alegre: FEENG/UFRGS. Disponível em: http://www.producao.ufrgs.br/arquivos/disciplinas/388_apostilacep_2012.pdf Acesso em: 08 mar. 2022.

ROLT, Miriam Inês Pauli. **O Uso de Indicadores Para a Melhoria da Qualidade em Pequenas Empresa**. 1998. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Produção, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1998.

ROTONDARO, R. G. et al. *Seis Sigma: Estratégia gerencial para a melhoria de processos, produtos e serviços*. Atlas, 2011.

SCATOLIN, André Celso. *Aplicação da Metodologia Seis Sigma na Redução das Perdas de um Processo de Manufatura*. São Paulo: Base-Unicamp, 2005.

SEVERINO, Antonio Joaquim. **Metodologia do trabalho científico**: 23ª Edição revista e atualizada 2ª reimpressão. 2007.

SILVA, D. C. **Metodologia de análise e solução de problemas**: curso de especialização em qualidade total e marketing. Florianópolis: Fundação CERTI, 1995.

SIQUEIRA, L. G. P. **Controle Estatístico do Processo**. São Paulo: Pioneira, 1997.

SOUZA, L. M.; RIBEIRO, J. I. J; REIS, G. M; IDE, M. S., **Eficiência dos gráficos de controle Xbarra, ewma e cusum**. Revista Eletrônica Produção e Engenharia, v. 1, n. 1, p.81-94, set/dez 2008. Disponível em: <https://periodicos.ufjf.br/index.php/producaoengineharia/article/view/28882/19753>. Acesso em: 12 out. 2021.

STEPHENS, M. A. **Goodness-Of-Fit-Techniques**. Technical Report, Department of Statistics, Stanford University, 1986.

THÜMMLER, F. AND OBERACKER, R. . **An Introduction to Powder Metallurgy**. s.l. : The Institute of Materi-als, 1993.

TSENG, WENJEA J. **Influence of surfactant on rheological behaviors of injection–molded alumina suspensions**. Materials Science and Engineering. 2000, Vol. A289, pp. 116–122.

WALPOLE, R. et al. **Probability & statistics for engineers & scientists**. 9. ed. Boston, USA: Pearson, 2011. (ISBN 978-0-321-62911-1).

WERKEMA, Cristina. **Criando a Cultura Lean Seis Sigma**. 3º Edição Rio de Janeiro: Werkema, 2012.

WERKEMA, Cristina. Ferramentas Estatísticas Básicas do Lean Seis Sigma Integradas ao PDCA e DMAIC. Belo Horizonte: Werkema, 2014.

WERKEMA, Cristina. **Lean Seis Sigma**. Introdução às Ferramentas do Lean Manufacturing. Belo Horizonte: Werkema, 2010.

WERKEMA, M. C. C. **Criando a cultura Seis Sigma**. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2002.

WERKEMA, Maria Cristina Catarino. **As ferramentas da qualidade no gerenciamento de processos**. Belo Horizonte: Fundação Christiano Ottoni, 1995.

YANG, K. **Projeto para Six Sigma: Um roteiro para o desenvolvimento do produto**; tradução J.G. Buchaim, Pedro R. Bueno Neto, Candido Faga. – São Paulo: Educador, 2008.

ZAUNER, R. **Micro powder injection moulding**. Materials Research, Austria, 2006.

APÊNDICE A – TABELA RESULTADOS EXPERIMENTO FRACIONADO

OrdemEns	Blocos	A	B	C	D	E	F	G	H	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	Resultado
1	1	+	+	-	-	-	-	+	-	-	-	-	+	+	-	+	-	+	-	-	0,00481
2	1	-	+	+	+	+	-	+	+	+	+	+	-	-	-	-	+	-	-	-	0,00553
3	1	-	-	-	+	+	-	+	+	-	-	+	-	-	+	+	+	-	+	-	0,00484
4	1	+	-	-	-	-	+	+	-	+	+	+	+	+	+	+	+	-	+	+	0,00511
5	1	-	+	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-	0,00478
6	1	+	-	-	+	+	+	+	-	+	+	+	+	+	-	-	-	-	+	-	0,00501
7	1	+	+	+	-	+	+	+	+	+	-	-	-	-	+	-	-	-	-	+	0,00506
8	1	-	-	-	-	+	-	-	-	-	+	+	-	+	-	+	-	-	-	+	0,00488
9	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,00483
10	1	-	+	+	-	-	+	-	-	+	+	+	-	+	-	+	-	-	+	+	0,00515
11	1	+	+	-	-	-	-	+	-	-	-	-	+	+	-	+	-	+	-	-	0,00503
12	1	-	-	-	-	+	+	-	+	-	+	-	-	-	+	+	-	+	+	-	0,00499
13	1	-	+	+	-	-	+	-	-	+	+	+	-	+	-	+	-	-	+	+	0,00531
14	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,00474
15	1	-	+	-	+	-	-	-	+	+	-	+	+	-	-	+	-	-	+	+	0,00513
16	1	+	-	+	+	+	+	+	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-	+	+	0,00487
17	1	+	+	+	+	-	+	+	+	+	+	-	-	-	-	+	-	-	-	-	0,00511
18	1	+	+	-	-	+	-	-	+	+	+	-	+	-	+	-	-	+	+	+	0,00541
19	1	-	+	+	-	+	+	-	-	+	-	-	+	+	+	-	+	-	+	-	0,00479
20	1	-	-	-	+	+	-	+	-	+	-	-	-	+	+	-	+	+	-	-	0,00468
21	1	-	-	-	-	+	+	-	+	-	+	-	-	-	+	+	-	+	+	-	0,00513
22	1	+	+	-	+	+	+	+	+	-	-	-	-	+	-	-	-	-	+	+	0,00464
23	1	-	+	+	-	+	-	+	-	-	-	+	+	-	+	+	-	-	+	-	0,00561
24	1	-	+	-	-	-	-	+	+	-	+	-	+	-	-	-	+	+	-	+	0,00520
25	1	+	+	+	-	+	-	+	-	-	+	+	+	+	-	+	+	+	+	+	0,00487
26	1	+	+	-	+	+	-	+	-	-	+	+	+	-	+	-	+	-	-	-	0,00477
27	1	-	-	+	+	-	+	+	-	-	+	-	-	+	+	+	-	+	-	+	0,00524
28	1	+	+	+	+	+	-	-	-	-	+	-	-	-	-	+	+	-	+	-	0,00475
29	1	+	+	+	+	+	-	-	-	-	+	-	-	-	-	+	+	-	+	-	0,00531
30	1	+	-	+	-	+	-	-	-	+	+	-	+	+	-	-	+	-	-	+	0,00530
31	1	+	-	-	-	-	+	+	-	+	-	+	-	-	-	+	+	-	+	+	0,00485
32	1	-	-	-	+	+	-	+	+	-	-	+	-	-	+	+	+	-	+	-	0,00530
33	1	-	-	+	+	+	+	-	+	+	+	+	+	-	-	-	-	+	-	-	0,00475
34	1	-	-	+	+	+	-	+	-	+	-	-	+	+	+	+	-	+	+	+	0,00475
35	1	+	-	+	-	-	-	+	+	-	+	+	-	-	+	-	-	+	+	+	0,00485
36	1	+	+	+	-	-	-	-	+	-	-	-	-	+	+	-	+	-	+	-	0,00485
37	1	-	-	+	-	-	+	+	+	-	+	-	+	-	-	+	+	+	+	-	0,00475
38	1	-	+	-	-	-	+	+	-	+	+	-	-	+	-	-	+	+	+	-	0,00456
39	1	-	+	+	-	+	+	-	-	+	-	-	+	+	+	-	+	-	+	-	0,00494
40	1	-	+	+	+	+	+	-	-	-	-	+	-	-	-	-	+	+	-	+	0,00447
41	1	+	+	-	+	+	+	+	+	-	-	-	-	+	-	-	-	-	+	+	0,00513
42	1	-	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-	+	+	-	0,00542
43	1	+	+	-	+	+	-	-	+	-	-	+	+	+	-	+	-	+	-	-	0,00521
44	1	+	+	+	+	-	-	-	-	+	-	-	-	-	+	+	-	+	-	+	0,00494
45	1	+	-	+	-	+	-	-	+	+	+	+	-	+	+	+	+	+	-	-	0,00485
46	1	+	-	-	+	+	+	+	-	+	+	+	+	+	-	-	-	-	+	-	0,00477
47	1	-	+	+	-	+	-	+	-	-	-	+	+	-	+	+	-	-	+	-	0,00447
48	1	-	-	+	-	-	-	-	+	+	-	+	-	+	-	-	-	+	+	-	0,00520
49	1	+	-	-	-	+	+	-	+	+	-	-	+	-	-	+	+	+	-	+	0,00437
50	1	+	-	+	-	-	+	+	+	+	-	+	+	+	+	+	-	-	-	-	0,00455
51	1	+	-	+	+	-	-	+	-	-	+	+	+	+	-	+	-	+	-	-	0,00447
52	1	-	+	+	+	-	+	-	+	-	-	+	+	+	+	-	+	+	+	+	0,00447
53	1	-	-	-	-	+	-	-	-	-	+	+	-	+	-	+	-	-	-	+	0,00437
54	1	+	-	-	+	-	-	+	+	+	-	+	-	+	-	-	+	+	+	+	0,00513
55	1	-	-	+	+	+	-	+	-	+	-	-	+	+	+	+	-	+	+	+	0,00503

OrdemEns	Blocos	A	B	C	D	E	F	G	H	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	Resultado
56	1	+	-	+	-	+	-	-	-	+	+	-	+	+	-	-	+	-	-	+	0,00485
57	1	+	-	-	+	+	+	-	+	-	+	-	-	+	+	+	+	-	+	+	0,00475
58	1	-	-	+	+	-	+	-	+	-	-	-	+	+	-	+	+	-	-	+	0,00521
59	1	-	+	-	+	-	-	-	+	+	-	+	+	-	-	+	-	-	+	+	0,00485
60	1	+	+	+	+	-	+	+	+	+	+	-	-	-	-	+	-	-	-	-	0,00494
61	1	+	-	-	+	+	+	-	+	-	+	-	-	+	+	+	+	-	+	+	0,00503
62	1	+	+	-	+	-	+	-	-	+	+	+	+	-	+	+	+	+	+	-	0,00456
63	1	-	+	-	-	+	+	+	+	-	+	+	+	+	+	-	-	-	-	+	0,00503
64	1	-	-	+	+	-	+	-	+	-	-	-	+	+	-	+	+	-	-	+	0,00465
65	1	-	-	+	-	-	-	-	+	+	-	+	-	+	-	-	-	-	+	+	0,00503
66	1	+	+	-	+	-	+	-	-	-	+	+	-	+	+	-	-	+	-	-	0,00513
67	1	-	-	-	+	-	-	-	-	+	+	-	+	-	+	-	-	-	-	+	0,00513
68	1	-	+	-	-	-	+	+	-	+	+	-	-	+	-	-	+	+	+	-	0,00513
69	1	+	-	+	-	+	-	-	+	+	+	+	-	+	+	+	+	+	-	-	0,00494
70	1	+	-	+	+	-	-	+	-	-	+	+	+	-	+	-	+	-	-	+	0,00513
71	1	-	+	-	+	-	-	+	+	+	+	-	+	+	+	+	+	-	-	-	0,00485
72	1	+	-	+	-	-	+	+	+	+	-	+	+	+	+	+	-	-	-	-	0,00475
73	1	+	+	+	-	-	-	-	+	-	-	-	-	+	+	-	+	-	+	-	0,00494
74	1	+	+	-	+	-	+	-	-	+	+	+	+	-	+	+	+	+	+	-	0,00535
75	1	-	-	-	+	+	-	+	-	+	-	-	-	+	+	-	+	+	-	-	0,00513
76	1	-	+	-	-	-	-	+	+	-	+	-	+	-	-	-	+	+	-	+	0,00485
77	1	-	-	-	+	-	-	-	-	+	+	-	+	-	+	-	-	-	-	+	0,00485
78	1	+	+	+	-	+	-	+	-	-	+	+	+	+	-	+	+	+	+	+	0,00503
79	1	+	-	+	-	-	-	+	+	-	+	+	-	-	+	-	-	-	+	+	0,00456
80	1	-	+	+	+	-	+	-	+	-	-	+	+	+	+	-	+	+	+	+	0,00494
81	1	-	+	-	-	+	+	+	+	-	+	+	+	+	+	-	-	-	-	+	0,00485
82	1	-	+	-	-	+	+	+	-	+	-	+	-	-	+	+	+	+	-	+	0,00513
83	1	+	+	+	-	+	+	+	+	+	-	-	-	-	+	-	-	-	-	+	0,00494
84	1	+	+	+	+	-	-	-	-	+	-	-	-	-	+	+	-	+	-	+	0,00475
85	1	-	+	-	-	+	+	+	-	+	-	+	-	-	+	+	+	+	-	+	0,00494
86	1	-	+	+	+	+	-	+	+	+	+	+	-	-	-	-	+	-	-	-	0,00485
87	1	+	-	-	-	-	+	-	-	-	-	+	+	-	+	-	+	-	-	-	0,00513
88	1	+	+	-	+	-	+	-	-	-	+	+	-	+	+	-	-	+	-	-	0,00513
89	1	+	+	-	-	+	-	-	+	+	+	-	+	-	+	-	-	+	+	+	0,00456
90	1	+	-	-	-	+	+	-	+	+	-	-	+	-	-	+	+	+	-	+	0,00513
91	1	-	-	+	-	-	+	+	+	-	+	-	+	-	-	+	+	+	+	-	0,00532
92	1	+	-	+	+	+	+	+	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-	+	+	0,00532
93	1	-	-	+	+	+	+	-	+	+	+	+	+	-	-	-	-	+	-	-	0,00502
94	1	+	-	-	-	-	+	-	-	-	-	+	+	-	+	-	+	-	-	-	0,00494
95	1	-	-	+	+	-	+	+	-	-	+	-	-	+	+	+	-	+	-	+	0,00494
96	1	+	-	-	+	-	-	+	+	+	-	+	-	+	-	-	+	+	+	+	0,00494