



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO – UFOP

ESCOLA DE MINAS

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO



BEATRIZ MENDANHA REIS

**APLICAÇÃO DA METODOLOGIA SEIS SIGMA EM UMA USINA
SIDERÚRGICA: O PROBLEMA DO ABASTECIMENTO DE SUCATA
NO SISTEMA *CONSTEEL*.**

**OURO PRETO - MG
2021**

BEATRIZ MENDANHA REIS

beatriz.reis@aluno.ufop.edu.br

**APLICAÇÃO DA METODOLOGIA SEIS SIGMA EM UMA USINA
SIDERÚRGICA: O PROBLEMA DO ABASTECIMENTO DE SUCATA
NO SISTEMA *CONSTEEL*.**

Monografia apresentada ao Curso de Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito para a obtenção do título de Engenheira de Produção.

Professor orientadora: DSc. Bárbara Cristina Mendanha Reis

**OURO PRETO – MG
2021**

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

R375a Reis, Beatriz Mendanha.

Aplicação da metodologia Seis Sigma em uma usina siderúrgica [manuscrito]: o problema do abastecimento de sucata no Sistema Consteel. / Beatriz Mendanha Reis. - 2021.

48 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientadora: Profa. Dra. Bárbara Cristina Mendanha Reis.
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia de Produção .

1. Controle de processo - Métodos estatísticos. 2. Siderurgia - Forno Elétrico a Arco. 3. Metodologia DMAIC. I. Reis, Bárbara Cristina Mendanha. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 658.562

Bibliotecário(a) Responsável: Sione Galvão Rodrigues - CRB6 / 2526



FOLHA DE APROVAÇÃO

BEATRIZ MENDANHA REIS

APLICAÇÃO DA METODOLOGIA SEIS SIGMA EM UMA USINA SIDERÚRGICA: O PROBLEMA DO ABASTECIMENTO DE SUCATA NO SISTEMA CONSTEEL.

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Produção da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheira de Produção.

Aprovada em 20 de (agosto) de 2021

Membros da banca

Doutora - Professora Bárbara Cristina Mendanha Reis - Orientadora (Universidade Federal de Ouro Preto)
Doutor - Professor Helton Cristiano Gomes - Membro da banca (Universidade Federal de Ouro Preto)
Mestre - Natália Fernanda Santos Pereira - Membro da banca (Universidade Federal de Minas Gerais)
Engenheiro Metalurgista- Anderson José dos Santos- Membro da banca (Vallourec Soluções Tubulares do Brasil S.A.)

Bárbara Cristina Mendanha Reis, orientadora do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 23/08/2021.



Documento assinado eletronicamente por **Bárbara Cristina Mendanha Reis, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 23/08/2021, às 09:07, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0209976** e o código CRC **1F166C04**.

A todos que contribuíram para a
realização desse projeto.

AGRADECIMENTOS

A Deus pela vida e Nossa Senhora por todas as intercessões.

Aos meus pais, minhas irmãs, meu namorado e familiares por todo apoio e amor.

A minha orientadora Bárbara pelos ensinamentos, paciência e dedicação.

Ao Anderson José por compartilhar experiências técnicas, aprendizados e contribuir para a minha formação profissional.

A siderurgia, objeto de estudo desse trabalho, pela oportunidade.

“A educação muda pessoas. Pessoas mudam o mundo”.

RESUMO

Na siderúrgica estudada, a produção dos aços se dá por meio de um forno elétrico à arco (FEA) cujas matérias-primas são: sucatas, fundentes e ferros-liga. A carga metálica é transportada para o FEA pelo sistema *Consteel*. O *mix* de sucata deve atender simultaneamente requisitos de altura e peso para garantir o abastecimento contínuo do FEA, porém os distintos tipos (e, conseqüentemente, diferentes densidades e composições químicas) e disponibilidade de sucata no mercado dificultam o atendimento desses quesitos e resultam na baixa densidade de sucata transportada pelo *Consteel*. Nesse sentido, vale destacar que no ano de 2020, 21,6% do tempo de parada do FEA (POWER OFF) deveu-se a essa causa. Sendo assim, esse trabalho teve por objetivo descrever um projeto da metodologia Seis Sigma desenvolvido para investigar e solucionar as causas do baixo peso de sucata carregado por viagem do sistema *Consteel* que impactam o carregamento contínuo no FEA. Para o desenvolvimento do projeto Seis Sigma foi utilizada a metodologia DMAIC (acrônimo de Definir, Medir, Analisar, Implementar e Controlar) e ferramentas tais como: SIPOC na fase definir; carta de controle na fase medir e controlar; testes estatísticos na fase avaliar e implementar. O limite inferior de especificação (LIE) estabelecido na fase definir a fim de garantir o abastecimento contínuo da esteira do *Consteel* foi de 3062 kg por viagem. Inicialmente o processo de abastecimento do *Consteel* estava sob controle e sua capacidade era de 261.921 defeitos por milhão de oportunidades (DPMO). O sistema de medição era aceitável. O tipo de sucata carregada influencia, ao nível de 95% de confiança, o peso de sucata carregado por viagem. Houve aumento da mediana do peso de sucata carregado por viagem por pontes rolantes para o abastecimento do *Consteel* após o uso de três tipos de misturas de sucatas (ao nível de significância de 5%) e redução da variabilidade do peso de sucata carregado por viagem. Após as modificações, foi constatado que a capacidade do processo via DPMO era de 90.952. Conclui-se que o projeto foi eficaz visto que antes de sua em 2020 (ano de referência), 21,6% do POWER OFF associado à matéria-prima era devido à baixa densidade de sucata carregada por viagem para o abastecimento do *Consteel*. Após o projeto, somente 4,1% do POWER OFF associado à matéria-prima foi atribuído a essa mesma causa.

Palavras-chave: FEA. POWER OFF. DMAIC. Capacidade. DPMO.

ABSTRACT

In the studied steelworks, the production of steel takes place through an electric arc furnace (FEA) whose raw materials are: scrap, fluxes and ferroalloys. Scrap is transported to the FEA by the Consteel system. The scrap mix must meet height and weight requirements to ensure the continuous supply of the FEA, but the different types (and, consequently, different densities and chemical compositions) and availability of scrap on the market make it difficult to meet these requirements and result in low density of scrap transported by Consteel. In this sense, it is worth noting that in 2020, 21.6% of the FEA POWER OFF was due to this cause. Therefore, this work aimed to describe a Six Sigma methodology project developed to investigate and solve the causes of the low weight of scrap loaded per trip in the Consteel system that impact the continuous loading in the FEA. For the development of the Six Sigma project, the DMAIC methodology (acronym for Define, Measure, Analyze, Implement and Control) and tools such as: SIPOC in the define phase were used; control chart in the measure and control phase; statistical tests in the evaluate and implement phase. The lower specification limit (LIE) established in the define phase in order to guarantee the continuous supply of the Consteel conveyor belt was 3062 kg per trip. Initially, Consteel's supply process was under control and its capability was 261,921 defects per million opportunities (DPMO). The measurement system was acceptable. The type of scrap loaded influences, at the 95% confidence level, the weight of scrap loaded per trip. There was an increase in the median weight of scrap loaded per trip by overhead cranes for supplying the Consteel after using three types of scrap mixtures (at a significance level of 5%) and a reduction in the variability of the weight of scrap loaded per trip. After the modifications, it was found that the process capability via DPMO was 90,952. It is concluded that the project was effective as prior to its 2020 (reference year), 21.6% of the POWER OFF associated with the raw material was due to the low density of scrap loaded per trip to supply the Consteel. After the project, only 4.1% of the POWER OFF associated with the raw material was attributed to this same cause.

Keywords: FEA. POWER OFF. DMAIC. Capability. DPMO.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- O processo DMAIC	14
Figura 2- Repetibilidade e Reprodutibilidade do sistema de medição	16
Figura 3- Representação gráfica de processos sob controle e fora de controle.....	19
Figura 4- Pilhas de sucata separadas conforme tipo: (a) pacote de estamparia; (b) estamparia solta; (c) pacote chaparia; (d) tesourada; (e) pantográfica e (f) tubos.	22
Figura 5- Sistema <i>Consteel</i>	23
Figura 6- Fluxograma do processo pátio de sucata.	24
Figura 7- Gráfico de Pareto Power OFF FEA/2020 – Matérias-Primas	25
Figura 8- Barras identificadas para avaliação do sistema de medição: (a) 2m e 4m e (b) 6m.	27
Figura 9- Estudo da repetibilidade e reprodutibilidade para o caso do peso de sucata carregado por viagem.	27
Figura 10- Fluxograma de condução dos testes estatísticos para o caso do peso carregado por viagem.	28
Figura 11- SIPOC do processo de produção do aço líquido.....	30
Figura 12- <i>Boxplot</i> do peso de sucata carregado por viagem entre os meses de agosto a dezembro de 2020.....	31
Figura 13- Carta de Controle para valores individuais do peso de sucata carregado por viagem entre os meses de agosto a dezembro de 2020.	32
Figura 14- Diagrama de pontos do peso carregado por viagem para diferentes tipos de sucata.	35
Figura 15- Resultado do teste de igualdade de variância para os diferentes níveis do fator turno.....	38
Figura 16- <i>Boxplots</i> dos pesos de sucata carregado por viagem por pontes rolantes para o abastecimento do <i>Consteel</i>	40
Figura 17- Carta de controle de valores individuais do peso de sucata carregado por viagem entre os meses de janeiro a junho de 2021.	40
Figura 18- Gráfico comparativo DPMO x Nível Sigma.....	41

Figura 19- Gráfico Pareto Power OFF FEA/2021 – Matérias-Primas42

LISTA DE QUADROS

Quadro 1- Atividades e Ferramentas do DMAIC..... 18

LISTA DE TABELAS

Tabela 1-Relação nível sigma e DPMO	13
Tabela 2- Porcentagem de contribuição das barras usando o método ANOVA.	33
Tabela 3- Porcentagem de contribuição das barras usando o método ANOVA.	33
Tabela 4- Identificação dos fatores de influência (X's) no peso de sucata carregado por viagem.	34
Tabela 5- Identificação dos tipos de sucata.	34
Tabela 6- Resultado do Teste de Normalidade dos pesos de sucata carregados por viagem de cada tipo de sucata.	35
Tabela 7- Estatísticas descritivas do teste estatístico K-W para os diferentes tipos de sucata.	36
Tabela 8- Resultado do Teste de Normalidade para os cinco níveis do fator turno.	37
Tabela 9- Resultado da ANOVA para o fator turno.	38
Tabela 10- Misturas de Sucatas.	39

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	9
1.1	Justificativa.....	9
1.2	Objetivos.....	10
1.2.1	Geral	10
1.2.2	Específicos.....	11
1.3	Estrutura do Trabalho	11
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	12
2.1	Metodologia Seis Sigma.....	12
2.2	O método DMAIC	13
2.3	Controle Estatístico do Processo: gráfico de controle e análise de capacidade.....	18
2.4	Abastecimento de sucata do Forno Elétrico a Arco (FEA)	21
3	METODOLOGIA.....	26
4	RESULTADOS	30
4.1	Etapa definir	30
4.2	Etapa medir.....	31
4.3	Etapa analisar.....	34
4.3.1	Verificação do X1: o tipo de sucata carregada influencia no peso de sucata carregado por viagem?	34
4.3.2	Verificação do X2: os turnos influenciam no peso de sucata carregado por viagem?37	
4.4	Fase implementar.....	38
4.4.1	Fase controlar	40
5	CONCLUSÃO.....	43
	REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA	45
	APÊNDICE	48
5.1	Cálculo dos limites de controle da carta de controle de variáveis na fase definir	48
5.2	Cálculo dos limites de controle da carta de controle de variáveis na fase controlar	48

1 INTRODUÇÃO

A necessidade das organizações em reduzir custos de produção tem ocasionado a busca constante pela melhoria contínua por meio de práticas de aperfeiçoamento de produtos, serviços e processos. Um dos programas melhoria contínua é o Seis Sigma, o qual tem por objetivo a redução de desperdícios da não qualidade e, conseqüentemente, a redução de custos e a melhoria no atendimento de requisitos de clientes, como qualidade do produto e confiabilidade da entrega (CARPINETTI, 2016).

Rath e Strong (2001) destacaram que a finalidade da metodologia Seis Sigma reside na redução de variabilidade e conseqüente melhoria da capacidade dos processos. Os mesmos autores explicaram que a variabilidade pode ser entendida como uma falha intrínseca ao processo, e desta forma, por meio de projetos de melhoria contínua e sustentável, se objetiva reduzi-la a níveis baixíssimos, visto que não existe processo sem variação.

Ao longo do desenvolvimento de projetos Seis Sigma técnicas estatísticas são utilizadas para auxiliar nos processos de análise e tomada de decisão do método DMAIC: acrônimo de definir (do inglês *define*), medir (do inglês *measure*), analisar (do inglês *analyze*), Melhorar (do inglês *improve*) e controlar (do inglês *control*) (SCATOLIN, 2005). O DMAIC é um método para direcionar os projetos de melhoria sendo composto de cinco etapas que ao serem seguidas resultam na melhoria do processo (WERKEMA, 2016).

Logo, este trabalho de conclusão de curso irá descrever a utilização da metodologia DMAIC por meio do desenvolvimento do projeto Seis Sigma em uma siderurgia a fim de melhorar a capacidade do processo estudado.

1.1 Justificativa

A produção dos aços pode ocorrer por meio do forno elétrico, o qual necessita, essencialmente, de sucatas, fundentes e ferros-liga (TAKANO, 2001). Na siderúrgica estudada, essa carga metálica é transportada para o forno pelo *Consteel*, um sistema de transporte que é responsável pela alimentação contínua desse forno (MEMOLI *et al.*, 2009).

No sistema *Consteel*, a sucata é transportada do local de armazenamento até a seção de carregamento do forno elétrico. O movimento oscilante de transporte da esteira faz com que o material se mova de forma homogênea em direção ao forno, garantindo que a camada de sucata no *Consteel* não exceda um valor específico. Com a carga nivelada, o transporte é realizado uniformemente por meio da seção fechada de pré-aquecimento do *Consteel*

(FANUTTI e POZZI, 2004). Ressalta-se que esse pré-aquecimento é realizado por meio dos gases de exaustão do próprio forno.

O sistema *Consteel* foi desenvolvido na intenção de reduzir o consumo de energia e os custos de produção (MEMOLI *et al.*, 2009). Neste contexto, as características principais que diferenciam o sistema *Consteel* de outras tecnologias é a combinação de pré-aquecimento e o carregamento contínuo. O pré-aquecimento é importante para economizar energia, mas o carregamento contínuo tem mostrado benefícios ainda maiores, como: baixos custos de produção, flexibilidade, redução do impacto ambiental e maior segurança (OLIVEIRA *et al.*, 2015).

Na empresa objeto de estudo deste trabalho de conclusão de curso, a fase de carregamento contínuo de sucatas no *Consteel* representa cerca de 76,2% do tempo total de uma corrida e, durante essa fase, falhas no abastecimento do *Consteel* podem ocasionar problemas no carregamento do forno, tais como: (i) engaiolamento de sucata, (ii) baixa densidade de sucata que geram paradas no forno – *Power OFF*, causando perdas de produtividade e (iii) elevação da temperatura do forno causando riscos no refratário e no canal de vazamento do aço.

No ano de 2020, a baixa densidade de sucata foi responsável por 21,6% do tempo de parada do forno elétrico devido a matéria-prima. O *mix* de sucata deve atender simultaneamente requisitos de altura e peso para garantir o abastecimento contínuo do forno, porém os distintos tipos (e, conseqüentemente, diferentes densidades e composições químicas) e disponibilidade de sucata no mercado dificultam o atendimento desses quesitos. Dessa maneira, esse trabalho justifica-se a partir da necessidade de investigar e solucionar as causas do baixo peso de sucata carregado por viagem do sistema *Consteel* que impactam o carregamento contínuo e geram paradas no forno por baixa densidade de sucata.

1.2 Objetivos

1.2.1 Geral

Esse trabalho tem por objetivo descrever um projeto da metodologia Seis Sigma desenvolvido em uma usina siderúrgica para melhorar o desempenho do processo de abastecimento do *Consteel*.

1.2.2 Específicos

A esse objetivo geral, são associados os seguintes objetivos específicos:

- ✓ estabelecer um breve quadro conceitual e teórico do trabalho;
- ✓ descrever o processo de produção do aço líquido a partir do pátio de sucata por meio da ferramenta SIPOC;
- ✓ descrever a utilização das ferramentas do método DMAIC no contexto desta pesquisa;
- ✓ identificar as variáveis que impactam no processo de abastecimento do *Consteel* por meio de testes de hipóteses;
- ✓ analisar a capacidade do processo;
- ✓ propor uma solução para melhorar a capacidade do peso de sucata carregado por viagem do sistema *Consteel*, e reduzir tempo de parada do forno devido à baixa densidade de sucata;

1.3 Estrutura do Trabalho

Para o alcance desse objetivo geral e garantia de que esses objetivos específicos sejam atingidos, o trabalho está estruturado conforme descrito a seguir.

➤ Capítulo 2. Revisão Bibliográfica: apresenta o levantamento bibliográfico sobre a Metodologia Seis Sigma, DMAIC, controle estatístico do processo (CEP) e abastecimento de sucata do forno elétrico.

➤ Capítulo 3. Metodologia: apresenta os métodos empregados na parte experimental deste trabalho.

➤ Capítulo 4. Resultados e Discussão: apresenta os resultados à luz da revisão bibliográfica.

➤ Capítulo 5. Conclusões: apresenta as principais conclusões do presente trabalho.

➤ Capítulo 6. Referências: apresenta as referências que contribuíram para a realização deste trabalho.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Metodologia Seis Sigma

Em meados da década de 80, a metodologia Seis Sigma foi difundida pela Motorola com o propósito do controle da qualidade total, com a abordagem em eliminação de erros, satisfação de clientes e falhas no processo produtivo (CABRAL,2019).

Nos anos da década de 90, a empresa General Electric (GE) buscava reduzir eventos que aconteciam inesperadamente e prejudicavam o nível de qualidade do processo, ou seja, as causas especiais de variação (MAUKIEWICZ E SUSKI, 2009). Nesse sentido, a empresa implementou o Seis Sigma reduzindo essas causas e alcançou resultados financeiros expressivos aumentando a popularização da metodologia.

Linderman *et al.* (2003) definiram Seis Sigma como um método organizado e sistemático para melhoria estratégica de processos e desenvolvimento de novos produtos e serviços que depende de métodos estatísticos e científicos para reduções nas taxas de defeitos definidos pelo cliente. Carpinetti (2016) complementou que a metodologia Seis Sigma é um programa de melhoria que tem por objetivo a redução de desperdícios da não qualidade e, conseqüentemente, a redução de custos e a melhoria no atendimento de requisitos de clientes. Cabral (2019) destacou que a partir da aplicação sistemática da metodologia é possível gerar um aumento significativo de rentabilidade via ganhos dos produtos, garantia de qualidade, satisfação do cliente e produtividade.

Santos e Martins (2008) apontaram que a metodologia Seis Sigma veio se consolidando como uma abordagem que está alinhada à implementação de estratégias que promovem a melhoria do desempenho do negócio, impulsionando as ações estratégicas que priorizam a melhoria contínua do nível de qualidade e reduzam custos e desperdícios. Rath e Strong (2001) destacaram que a finalidade dessa metodologia reside na redução de variabilidade e conseqüente melhoria da capacidade dos processos. Os mesmos autores explicaram que a variabilidade pode ser entendida como uma falha intrínseca ao processo, e desta forma, por meio de projetos de melhoria contínua e sustentável, se objetiva reduzi-la a níveis baixíssimos, visto que não existe processo sem variação. Scatolin (2005) especificou a redução variabilidade até um nível de 3,4 ppm – partes por milhão, cerca de 6 desvios padrão da média, até a especificação superior ou inferior.

Rotondaro *et al.* (2002) explicaram que o nível sigma mede a capacidade do processo em atuar sem falhas, de forma que quanto menor o nível sigma maior a quantidade de defeitos por milhões de oportunidades (DPMO). Essa relação foi detalhada na Tabela 1.

Tabela 1-Relação nível sigma e DPMO

Escala Sigma (σ)	Defeitos por milhões de Oportunidades (DPMO)	Nível de Qualidade (%)
1σ	691462	30,9
2σ	308537	69,1
3σ	66807	93,3
4σ	6210	99,38
5σ	233	99,977
6σ	3,4	99,99966

Fonte: adaptado de Werkema (2013)

Smith e Adams (2000) indicaram que uma das razões da metodologia Seis Sigma reduzir a variabilidade do processo está na utilização de métodos estatísticos: uma forte estratégia de negócios que aplica uma abordagem disciplinada para capturar variabilidade dos processos, usando a aplicação de ferramentas e técnicas estatísticas e não estatísticas de forma exigente (ROTONDARO *et al.*,2002). Montgomery e Runger (2018) complementam que os métodos estocásticos são usados para ajudar a entender a variabilidade e incorporá-la nos processos de tomada de decisão.

Por fim, Santos e Martins (2009) destacaram os benefícios da metodologia Seis Sigma, a saber: (i) o aumento da eficiência dos processos de produção com a redução dos custos associados com inspeção; (ii) a redução de retrabalho, insatisfação dos clientes e desperdício; (iii) foco em processos; (iv) melhoria contínua; (v) foco no cliente; (vi) mudança de cultura e comprometimento organizacional.

Por esta perspectiva, após apresentação da metodologia Seis Sigma, torna-se oportuno descrever o método DMAIC, uma das principais metodologias utilizadas para implementação do Seis Sigma.

2.2 O método DMAIC

DMAIC é um acrônimo de definir (do inglês *define*), medir (do inglês *measure*), analisar (do inglês *analyze*), melhorar (do inglês *improve*) e controlar (do inglês *control*) (SCATOLIN, 2005). Werkema (2013) explicou que esse é um método ordenado de solução de problemas onde as etapas são constituídas por variadas atividades e ferramentas, que

possibilitam resultados confiáveis e um controle da qualidade dos processos. McAdam e Lafferty (2004) definiram o DMAIC como um método genérico para solução de problemas com abordagem de melhoria.

Ao aplicar metodologia DMAIC é possível trazer soluções sustentáveis para problemas identificados nas organizações, utilizando uma série de ferramentas que minimizam ou eliminam o problema colocando a organização em uma posição competitiva (SHANKAR,2009). Logo, o DMAIC é um método para direcionar os projetos de melhoria sendo composto de cinco etapas que ao serem seguidas resultam na melhoria do processo (WERKEMA, 2016), conforme ilustrado na Figura 1.

Figura 1- O processo DMAIC



Fonte: adaptado de Shankar (2009)

Na primeira etapa, a fase definir, o objetivo é descrever o problema, ou seja, identificar um conjunto de dados que representa as expectativas e necessidades do cliente em relação aos produtos ou serviços da empresa (WERKEMA, 2016). Ainda segundo esse autor, a voz do cliente será traduzida nas características críticas para a qualidade que influencia no desempenho do processo ou produto. Koning e De Mast (2006) comentaram que o mapeamento de processo é uma ferramenta utilizada nessa primeira fase do método DMAIC porque permite a identificação clara do problema assim como a determinação e priorização dos requisitos dos clientes e identificação das partes interessadas.

Para mapear as etapas importantes do processo e delimitar o escopo do projeto, utiliza-se o diagrama SIPOC-acrônimo para fornecedores (do inglês *suppliers*), entrada (do inglês *inputs*), processos (do inglês *process*), saídas (do inglês *outputs*) e clientes (do inglês *clients*). De acordo com Rasmusson (2006), o diagrama SIPOC é um mapeamento de processo de alto nível capaz de detalhar as entradas dos processos, fornecedores, processos, saídas e clientes a fim de identificar a expectativa do cliente, também conhecida como voz do cliente. Com a utilização correta dessa ferramenta é possível identificar a justificativa da existência do processo, o que ele faz, quem utiliza o seu produto, quem são seus fornecedores, de onde vem

as suas informações ou os seus materiais, bem como o que acontece com cada entrada (REYS, 2016).

Para identificação e priorização de itens com potencial responsabilidade sobre o problema, ainda na fase definir, Werkema (2013) sugeriu a utilização do gráfico de Pareto com a finalidade de arranjar informações para que elas sejam visualizadas de forma mais clara, priorizando-as a fim de tratar problemas e/ou estabelecer projetos. Nesse sentido, Paranhos Filho (2007) conceituou essa ferramenta como um gráfico de barras verticais em um plano cartesiano, onde no eixo horizontal são apresentados problemas ou seus respectivos motivos, enquanto as ocorrências são quantificadas no eixo vertical com valores alocados de forma decrescente com o percentual acumulado.

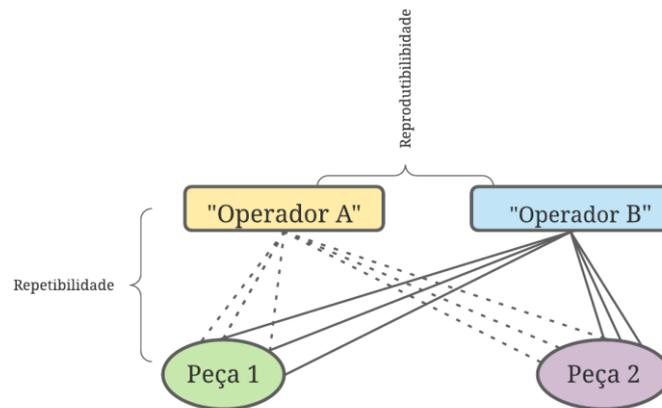
Na segunda fase do DMAIC, etapa medir, o objetivo é coletar dados que forneçam informações para a análise das causas do problema em estudo auxiliando na investigação das características específicas desse (CARPINETTI, 2016). Koning e De Mast (2006) acrescentaram que a fase medir é a tradução do problema em uma forma mensurável da corrente situação. Pyzdek e Keller (2011) descreveram que um dos objetivos dessa fase é avaliar o sistema de medição, a fim de validar a confiabilidade dos dados para o esboço de conclusões significativas e analisar a capacidade do processo atual.

Ribeiro e Santos (2019) explicaram que um sistema de medição é formado pelo conjunto de procedimentos, operações, instrumentos de medição, programas computacionais além de pessoas. Montgomery (2005) definiu que a análise do sistema de medição é um método experimental e estatístico que identifica as variações no sistema de medição. Para Singpai (2009) a análise do sistema de medição avalia se o sistema de medição que está em uso é capaz de fazer medições precisas e confiáveis para a tomada de decisões. Breyfogle (2003) elencou alguns tipos de análises do sistema de medição, a dizer: (i) estudo de linearidade, (ii) estabilidade, e (iii) repetibilidade e reprodutibilidade do sistema de medição. O mesmo autor definiu que esse último, o estudo de repetibilidade e reprodutibilidade (R&R), é aplicado para dados contínuos e usado para medir a quantidade de variação em um processo observado.

George *et al.* (2005) definiram que a repetibilidade é a variabilidade de medições consecutivas que são feitas a partir de um fator de avaliação fixo. Também é comumente conhecida como variação de equipamento. Ainda segundo os mesmos autores, a reprodutibilidade é a variabilidade devido a diferentes fatores de avaliação, conforme explicado na Figura 2. Montgomery e Runger (2016) explicou que a repetibilidade e

reprodutibilidade são medidas em função da dispersão dos valores medidos pelo sistema de medição e tem como propósito determinar se a variabilidade do sistema de medição é menor que a variabilidade do processo monitorado.

Figura 2- Repetibilidade e Reprodutibilidade do sistema de medição



Fonte: a autora (2021)

O Manual de Referência de Análise de Sistemas de Medição (1995) estabeleceu diretrizes para aceitação do estudo R&R, conforme listado a seguir:

- erros abaixo de 10% - o sistema de medição é aceitável;
- 10% a 30% de erros - o sistema de medição pode ser aceitável dependendo de importância da aplicação, custo de reparos ou custo de medidor;
- mais de 30% de erros - o sistema de medição é inaceitável e precisa de melhorias.

Na terceira etapa do método DMAIC, a fase analisar, o objetivo é avaliar o processo para determinar as causas potenciais do problema usando técnicas estatísticas para estudar os relacionamentos entre o problema e as suas causas (HOLANDA *et.al.*, 2003). Nessa fase ocorre a identificação de fatores que determinam o comportamento dos elementos críticos para qualidade do processo ou produto (KONING e DE MAST, 2006). Pyzdek e Keller (2011) complementaram que essa etapa inclui determinar as correlações entre requisitos do cliente e itens de influência no processo. Portanto, ferramentas como diagramas de relacionamento de causa e efeito, matriz de impacto e esforço, técnicas de planejamento e análise de experimentos (testes de hipótese, análise de variância e análise de regressão), por exemplo, são essenciais nessa fase (CARPINETTI, 2016).

Na quarta etapa do método DMAIC, a fase melhorar, o objetivo principal é a implantação do novo sistema com a implementação das melhorias. É sugerido a avaliação dos riscos e potenciais modos de falha (PYZDEK; KELLER, 2011). Koning e De Mast (2006) ressaltaram que nessa fase é importante o desenho da implementação de ajustes ao processo para melhorar o desempenho das características críticas para qualidade do processo.

E, por fim, a última fase, controlar, consiste na avaliação do alcance em larga escala da meta estabelecida. Com isso, os resultados obtidos após a implementação das ações devem ser monitorados para a confirmação do alcance da meta (WERKEMA, 2013). Os objetivos principais dessa etapa são: (i) validar estatisticamente se o novo processo atende aos objetivos e benefícios buscados ao longo do projeto; (ii) determinar a nova capacidade do processo, (iii) desenvolver e implantar um plano de controle para institucionalizar o novo processo e; (iv) documentar as lições aprendidas e as descobertas do projeto (PYZDEK; KELLER, 2011).

Portanto, DMAIC é um método ordenado de solução de problemas onde as etapas são constituídas por variadas atividades e ferramentas, que possibilitam resultados confiáveis e um controle da qualidade dos processos (WERKEMA, 2013). No Quadro 1 foram sumarizadas atividades e possíveis ferramentas a ser utilizadas em cada etapa dessa metodologia.

Quadro 1- Atividades e Ferramentas do DMAIC

Fase	Atividades	Possíveis Ferramentas
Definir	Definir com precisão o escopo do projeto	Mapa de raciocínio; Termo de Abertura; Gráfico Sequencial; Carta de Controle; Métricas do Seis Sigma; SIPOC.
Medir	Determinar a localização ou foco do problema	Avaliação sistema de medição; Estratificação; Carta de controle; Histograma; <i>Boxplot</i> ; Folha de Verificação; Índice de Capacidade.
Analisar	Determinar as causas fundamentais do problema prioritário associado a cada uma das metas definidas na etapa anterior	Fluxograma; Mapa de Processo; Mapa de Produto; Brainstorming; Diagrama de causa efeito; Teste de hipóteses; Matriz de Priorização.
Melhorar	Propor, avaliar e implementar soluções para cada problema prioritário	Brainstorming; Diagrama de Causa e Efeito; Matriz de Priorização; Plano de ação: 5W1H.
Controlar	Garantir que o alcance da meta seja mantido em longo prazo	Métricas Seis Sigma; Gráfico sequencial; Gráfico de Pareto; Carta de Controle; Análise de capacidade.

Fonte: adaptado de Werkema (2013)

2.3 Controle Estatístico do Processo: gráfico de controle e análise de capacidade

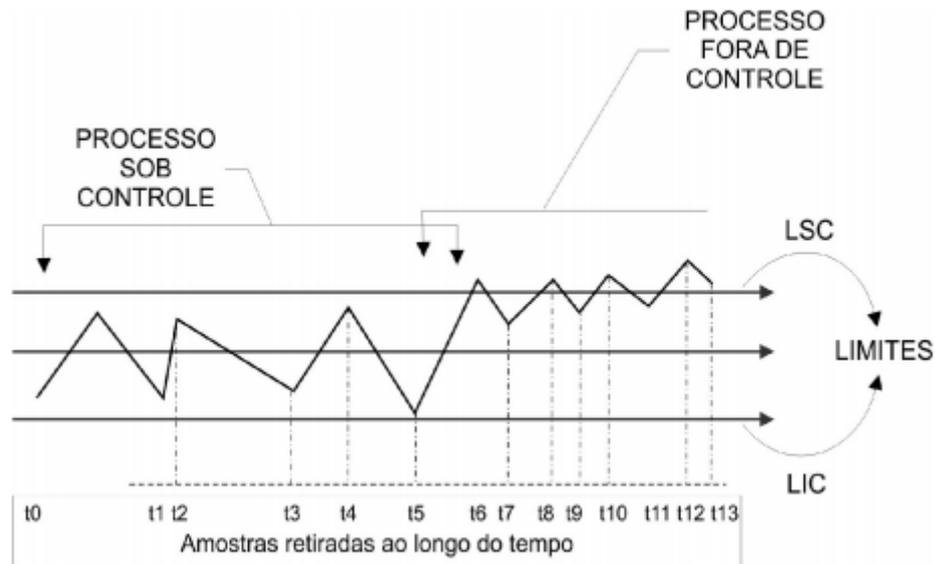
O controle estatístico de processos (CEP) refere-se ao monitoramento de processos repetitivos em progresso para assegurar a conformidade aos padrões usando métodos estatísticos a partir da utilização de gráficos de controle e análise de capacidade (DOANE e SEWARD, 2008). Além de auxiliar no estabelecimento dos níveis estimados de variação no processo, Shu *et al.* (2004) destacaram que o CEP, por meio das cartas de controle, permite encontrar as causas das fontes de variabilidade e monitorar o processo. Montgomery (2004)

conceituou carta de controle como uma ferramenta estatística usada para distinguir se a variação em um processo ou produto é resultante de causas comuns ou especiais, por meio do uso de testes estatísticos e limites de controle.

COSTA *et al.* (2004) identificou que os processos podem ser controlados através do monitoramento de variáveis ou atributos. O mesmo autor definiu que variáveis são características da qualidade que podem ser expressas em uma medida numérica, por exemplo, volume, peso e largura. Quando a característica da qualidade não pode ser expressa em uma medida numérica, usualmente classificam-se cada item inspecionado como “conforme” ou “não-conforme” em relação às especificações. Essas características da qualidade são denominadas de atributos (DOANE e SEWARD, 2008).

Carneiro Neto (2003) definiu que um processo está sob controle ou estatisticamente estável quando somente causas comuns estiverem presentes. Uma causa comum é definida como uma fonte de variação que afeta a todos os valores individuais de um processo sendo resultante de diversas origens sem que uma predomine a outra (DOANE e SEWARD, 2008). Já a causa especial é um fator que gera variações que afetam o comportamento do processo de maneira imprevisível não sendo possível obter-se um padrão. Nessa situação, são produzidos resultados totalmente discrepantes em relação aos demais (RAMOS, 1997). Na Figura 3, tem-se a representação gráfica da situação do processo sob controle, ou seja, a variação do processo encontra-se entre o limite inferior de controle (LIC) e limite superior de controle (LSC). Ainda nessa imagem, é possível observar que foi descrito a situação que o processo está fora de controle estatístico, em que causas especiais fazem com que o processo ultrapasse o LSC.

Figura 3- Representação gráfica de processos sob controle e fora de controle



Fonte: adaptado de Carneiro Neto (2009).

Ramos (1997) explicou que um processo estável e previsível permite a realização do estudo de capacidade para determinar se é possível atender às especificações dos clientes.

Ryan (2011) descreveu que o estudo da capacidade ou capacidade do processo é um método estatístico utilizado para analisar a consistência de um processo em produzir de acordo com determinada especificação técnica. Montgomery (2004) informou que a capacidade do processo está relacionada à variabilidade dos processos, que pode ser dividida em dois tipos: a primeira categoria refere-se à variabilidade intrínseca ao processo num determinado instante, e o segundo tipo refere-se à variabilidade que acontece com o decorrer do tempo.

A análise da capacidade visa definir se um processo, cujo comportamento seja conhecido, é capaz de produzir itens ou prestar serviços conforme as especificações estabelecidas pelos clientes (MORAES, 2006). Desse modo, Souto e Maia (2011) resumiram que um processo capaz permite o atendimento às especificações dos clientes.

Montgomery (2009) relacionou as vantagens da análise de capacidade em um processo, a dizer: (i) indicar até que ponto os limites de tolerância de um processo serão mantidos; (ii) auxiliar em alterações no processo; (iii) auxiliar na determinação da coleta de amostras do processo; (iv) projetar a sequência dos processos, quando eles interferem nas tolerâncias; e (v) diminuir a variabilidade.

Henriques (2015) explicou que o resultado da capacidade do processo pode ser apresentado sob a forma de uma razão entre a produção fora das especificações em termos de

unidades não conformes ou defeituosas, não conformidades ou defeitos e a produção total. Dessa maneira, Montgomery (2009) explicou que frequentemente recorre-se à medida defeitos por milhão de oportunidades (DPMO), conforme descrito na Equação 1.

$$DPMO = \frac{\text{Número total de defeitos}}{\text{Número de unidades} \times \text{número de oportunidades}} \times 10^6 \quad (\text{Equação 1})$$

Sendo assim, após um breve embasamento teórico dos conceitos utilizados ao longo do trabalho, torna-se oportuno descrever o processo produtivo a ser estudado.

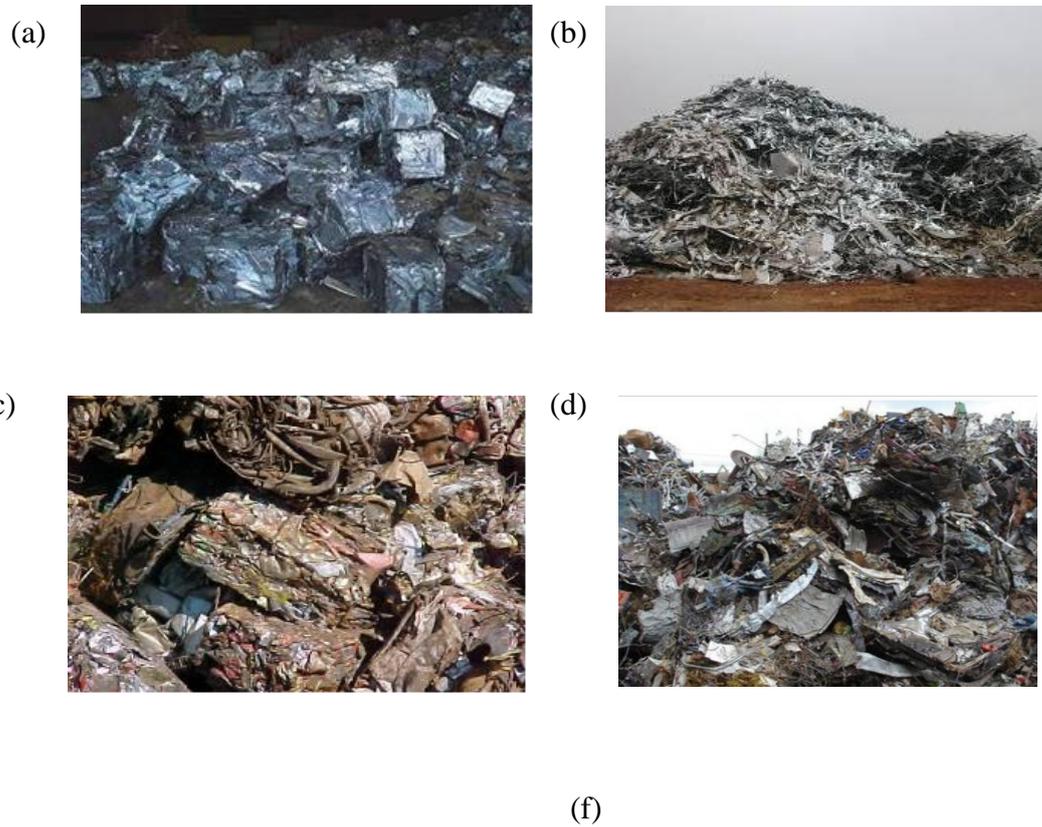
2.4 Abastecimento de sucata do Forno Elétrico a Arco (FEA)

A fabricação de aços por meio do forno elétrico a arco (FEA) se deu em maior escala a partir da Segunda Guerra Mundial devido às possibilidades de controlar com precisão a composição química e a temperatura requerida do metal, no qual as matérias-primas usadas neste processo são basicamente ferro gusa, fundentes e sucatas (TRINDADE JUNIOR, 2013).

Miranda (2019) explicou que a sucata de aço é a principal matéria-prima no processo das aciarias elétricas, pois sua utilização permite a flexibilidade em relação a composição química da carga metálica além da reciclagem que garante uma produção menos agressiva ao meio ambiente. Devido tais vantagens competitivas, a indústria siderúrgica foi a responsável por um crescimento de 12% no cenário mundial de sucata entre 2006 e 2016, segundo dados da *Bureau of International Recycling* (BIR).

No processo de fabricação das siderurgias elétricas, Trindade Junior (2013) elucidou que a qualidade da sucata é um passo crucial para produção do aço sendo extremamente importante separá-las e estocá-las em baias segundo suas composições químicas. Advindas de indústrias de reciclagem, as sucatas recebidas na usina siderúrgica desse caso, inicialmente são recebidas na triagem onde passam pelo portal de radioatividade que é um sistema que detecta presença de elementos radioativos, os quais não são aceitos no processo devido ao risco à saúde humana e ao processo. Em seguida, as sucatas são pesadas e classificadas em três grandes grupos a partir de critérios de inspeção visual a saber: (i) *sucata prime*, (ii) *low cost* e (iii) sucata interna. Os grupos devidamente identificados são encaminhados para o pátio de sucata para beneficiamento e estocagem em pilhas. Essas pilhas são organizadas segundo o tipo de sucata, conforme ilustrado na Figura 4.

Figura 4- Pilhas de sucata separadas conforme tipo: (a) pacote de estampaaria; (b) estampaaria solta; (c) pacote chaparia; (d) tesourada; (e) pantográfica e (f) tubos.

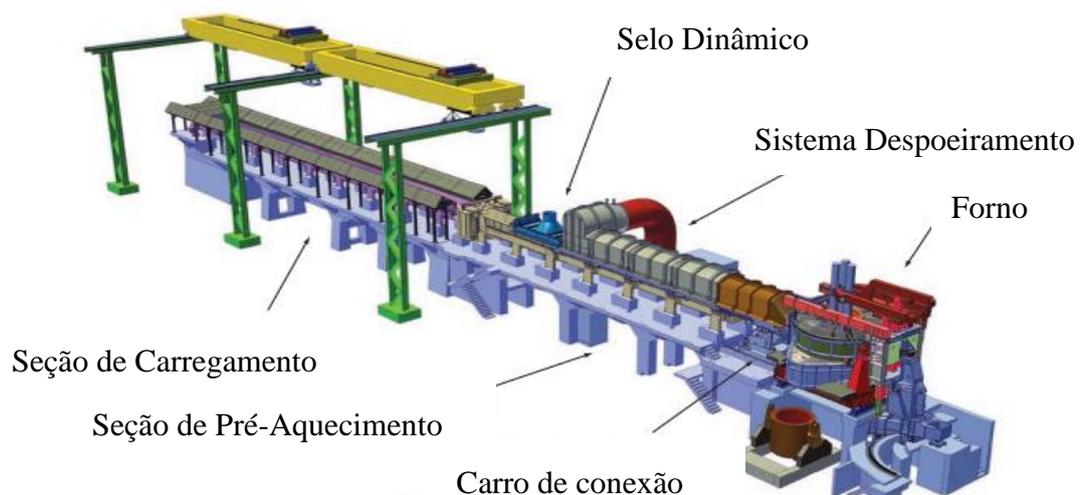




Fonte: a autora (2021)

Após a estocagem no pátio externo, as sucatas são transportadas para a baía, local de estoque intermediário para o abastecimento do sistema *Consteel*. O sistema *Consteel*, representado na Figura 5, é composto de duas seções: uma de carregamento e outra de pré-aquecimento, no qual a ponte de carregamento transfere a sucata das pilhas para a seção de carregamento do transportador permitindo que o material se mova em direção ao forno (MEMOLI *et al.*, 2009). Segundo os mesmos autores, a carga de sucata nivelada é transportada uniformemente por meio da seção de pré-aquecimento, onde é pré-aquecida pelos gases de exaustão do forno.

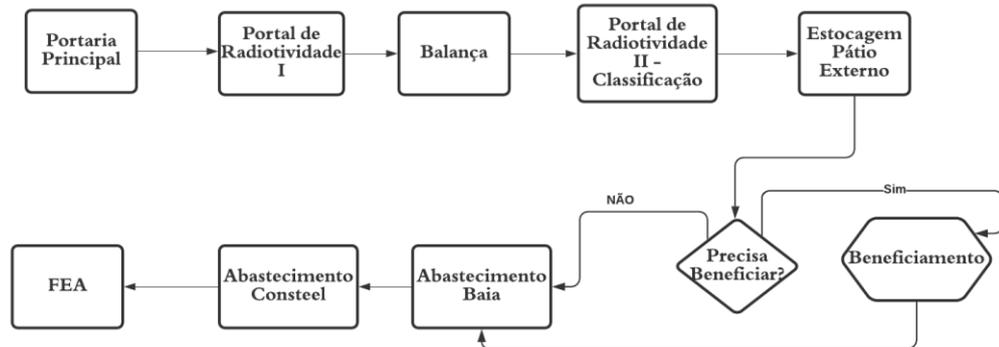
Figura 5- Sistema *Consteel*.



Fonte: adaptado de Memoli *et al.*, 2009

O mapeamento do fluxo do pátio de sucata, detalhado anteriormente, foi sumarizado no diagrama da Figura 6.

Figura 6- Fluxograma do processo pátio de sucata.

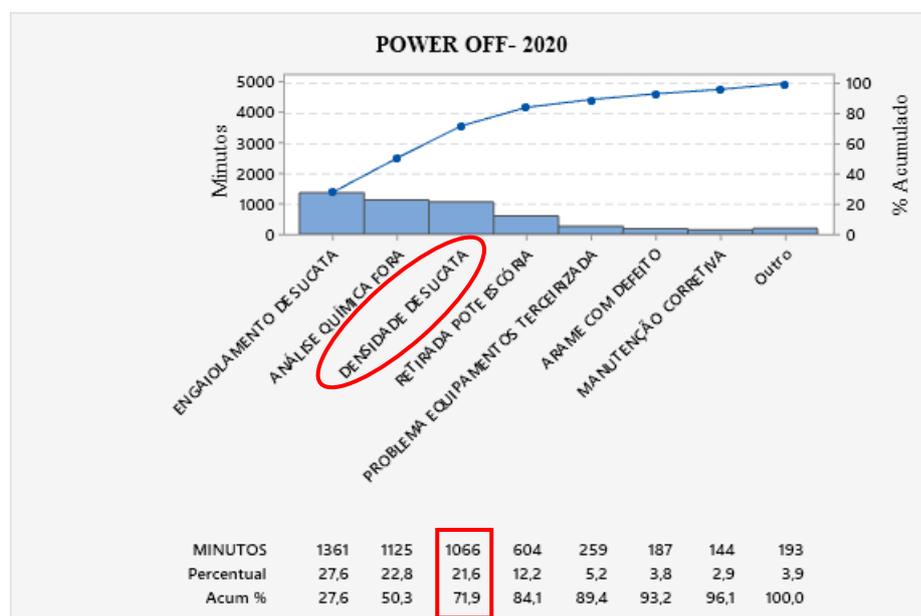


Fonte: a autora (2021)

Nesta siderurgia, o tempo total da produção de uma corrida – *Power ON*, ou seja, tempo compreendido do carregamento da sucata até o vazamento do aço, tem uma duração média de 42 minutos, sendo que o abastecimento do sistema *Consteel* responde por 32 minutos do *Power ON* (aproximadamente 76,20%).

Durante a produção das corridas podem ocasionar diversas falhas no abastecimento, tais como: engaiolamento de sucata, composição química do aço fora da especificação, baixa densidade da sucata, atraso na limpeza do pote de escória entre outros. Esses motivos geram paradas no forno – *Power OFF*, causando perdas de produtividade e alto custo na produção do aço. Os principais motivos de parada do FEA no ano de 2020 foram ilustrados na Figura 7.

Figura 7- Gráfico de Pareto Power OFF FEA/2020 – Matérias-Primas



Fonte: a autora (2021)

O principal motivo de *Power OFF* do forno causado pelo Pátio de Sucata no ano de 2020 foi o engaiolamento de sucata, que representou 27,6% das paradas. O segundo maior motivo foi a análise química não-conforme representando 22,8% dos motivos. Esses dois primeiros motivos responderam por 50,3% no percentual acumulado. Esses dois itens foram trabalhados em outros fóruns e não pertencem ao escopo deste estudo.

Em terceiro lugar, as paradas por densidade da sucata totalizaram 1066 minutos de parada no ano de 2020 e corresponderam à 21,6% do percentual total, conforme destacado na Figura 7. Esse problema representa o baixo peso de sucata carregado por viagem do sistema *Consteel*, ou seja, a alimentação da esteira não é suficiente para a velocidade do carregamento solicitada. Nesse sentido, Rossi (2014) explicou que nesse tipo de carregamento, conhecer as densidades das sucatas e assegurar a variação do peso carregado por viagem dentro dos limites de especificação causa um efeito positivo na compactação da carga (sucata leve nos interstícios da sucata pesada) aumentando a estabilidade do arco elétrico e diminuindo as perdas de produtividade no forno.

Logo, neste trabalho será discutido o aumento da capacidade do carregamento de sucatas no processo de abastecimento do forno pelo sistema *Consteel*, reduzindo as paradas por baixa densidade de sucata e, conseqüentemente, contribuindo com o aumento da produtividade do FEA.

3 METODOLOGIA

Este capítulo tem por objetivo descrever os materiais e métodos, as variáveis, os instrumentos de coletas de dados, o *software* e por fim os testes de hipóteses utilizados no desenvolvimento desse trabalho de conclusão de curso.

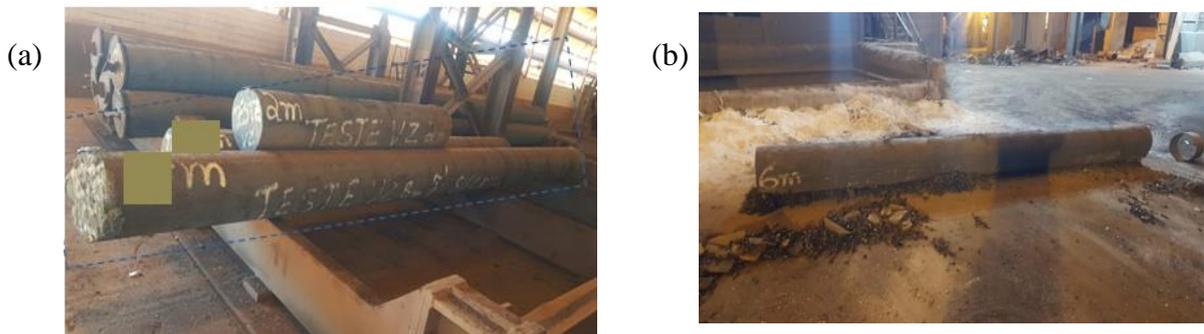
A justificativa da escolha da siderurgia deveu-se ao estágio acadêmico realizado pela autora deste trabalho de conclusão de curso. Os dados do carregamento de sucata foram retirados do sistema de banco de dados dessa empresa do período de agosto de 2020 a dezembro de 2021 para o cenário inicial e de janeiro a junho de 2021 para o cenário secundário.

Na fase definir, para mapear o SIPOC, foi realizado um *brainstorming* com a equipe técnica do FEA e matéria-prima composta por engenheiros e supervisores. Para determinar o limite inferior de especificação do peso de sucata carregado por viagem, os dados dessa variável compreendidos entre o período de agosto de 2020 a dezembro de 2020 foram organizados em um *boxplot* e selecionado o primeiro quartil. Dessa maneira, definiu-se que o limite inferior do peso de sucata carregado por viagem deveria ser de 3062 kg por viagem. Somente 25% das observações apresentaram taxas de carregamento inferiores a esse limite. Justifica-se esse valor no fato dessa especificação garantir a taxa de alimentação do forno constante.

Na fase medir aplicou-se a carta de controle para variáveis individuais para avaliar se o processo estava sob controle. Posteriormente calculou-se a capacidade do processo por meio do método DPMO.

Em seguida, para a avaliação do sistema de medição das balanças das pontes PR201 e PR202 recorreu-se aos possíveis dias de parada da aciaria. No entanto, devido à dificuldade de realização nesses momentos, o sistema de medição foi avaliado a partir de 3 barras para cada ponte. No experimento foram selecionados três tamanhos de barras com tamanhos conhecidos: 2m, 4m e 6m, conforme ilustrado na Figura 8.

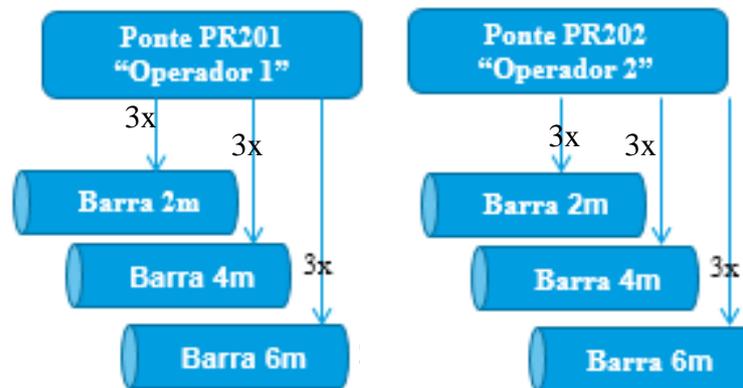
Figura 8- Barras identificadas para avaliação do sistema de medição: (a) 2m e 4m e (b) 6m.



Fonte: a autora (2021)

Para avaliar a variabilidade no sistema de medição causada pela balança de cada ponte, ou seja, a repetibilidade, foram realizadas três medições consecutivas dos pesos de cada barra para a ponte PR 201 e três medições consecutivas dos pesos de cada barra para a ponte PR 202. As balanças das pontes foram consideradas como os medidores fixos. Para avaliar a reprodutibilidade, ou seja, a variabilidade no sistema de medição causada pelas diferenças entre as balanças das pontes, cada ponte mediu três vezes as mesmas barras sob as mesmas condições. Estudo de R&R nesse trabalho foi ilustrado na Figura 9.

Figura 9- Estudo da repetibilidade e reprodutibilidade para o caso do peso de sucata carregado por viagem.



Fonte: a autora (2021)

Na fase analisar foram levantados, por meio de *brainstorming*, os fatores de influência (Xs) no processo de abastecimento do *Consteel* e validados estatisticamente.

A verificação da significância dos fatores de influência sobre o peso de sucata carregado por viagem recorreu-se às seguintes etapas: (i) visualização dos dados; (ii) verificação da aderência dos dados à distribuição de probabilidade normal; (iii) formulação dos testes de hipóteses; (iv) erro do tipo I assumido ($\alpha = 0,05$); (v) conclusão de acordo com o

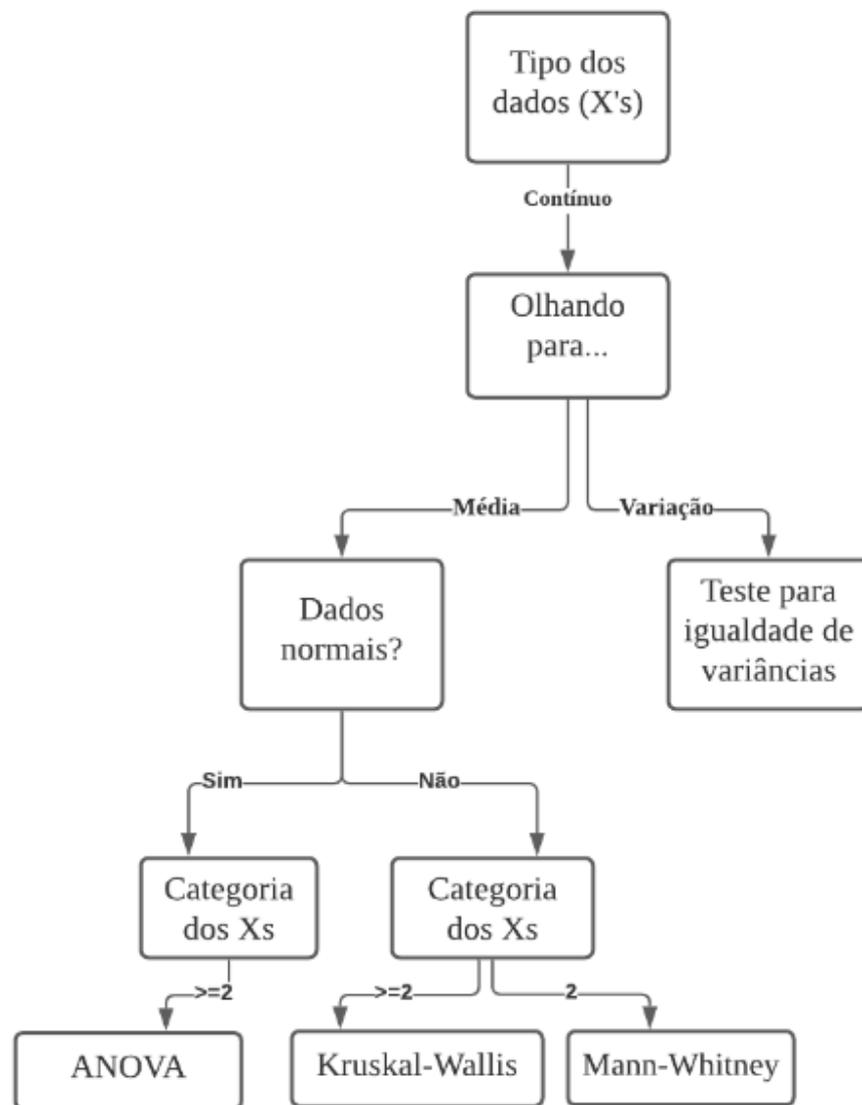
teste de hipótese. Segundo Barbetta *et al.* (2008), estabelecido o nível de significância $\alpha = 0,05$, tem-se a seguinte regra geral de decisão em um teste estatístico.

$$p\text{-value} \geq \alpha \quad \longrightarrow \quad \text{Aceita } H_0$$

$$p\text{-value} < \alpha \quad \longrightarrow \quad \text{Rejeita } H_0$$

Os testes estatísticos foram conduzidos de acordo com o esquema representado no fluxograma da Figura 10.

Figura 10- Fluxograma de condução dos testes estatísticos para o caso do peso carregado por viagem.



Fonte: a autora (2021)

Da Figura 10, depreende-se que antes das análises principais testou-se a normalidade dos dados utilizando o teste de aderência de Anderson-Darling. Para variáveis normais utilizou-se a ANOVA para a comparação entre as médias. De acordo com Doane e Seward (2008) a ANOVA busca identificar as fontes de variação na variável resposta. Segundo os mesmos autores, a utilização da ANOVA segue três premissas: (i) observações independentes; (ii) populações amostradas normais e (iii) populações amostradas com variâncias iguais. Por fim, recorreu-se a testes não paramétricos para as variáveis que não se ajustaram com a distribuição normal. Deste modo, utilizou-se o teste de Mann-Whitney para amostras independentes com duas categorias e o teste de Kruskal-Wallis (K-W), que segundo Doane e Seward (2008) é um teste para comparar se as medianas de várias amostras independentes são iguais ou diferentes para populações com formas similares. Para compilação das análises estatísticas foi utilizado o *software* Minitab® versão 19.

Na fase de implementação das ações foram propostas três *mix* de sucata para solucionar as causas do baixo peso de sucata carregado por viagem do sistema *Consteel*. Os testes dessas cargas metálicas foram conduzidos entre janeiro e fevereiro de 2021. Após a conclusão dos testes e validada a proposta das novas misturas de sucata, foi estabelecido um padrão operacional para o registro do conhecimento adquirido bem como a execução da atividade.

Na fase controlar utilizou-se a carta de controle para variáveis como ferramenta de avaliação do CEP. Em seguida, a partir dos pesos de sucata carregado por viagem do sistema *Consteel* após a implementação dos três *mix* de sucata (carregamentos entre janeiro e fevereiro de 2021) calculou-se o novo DPMO. Por fim, utilizou-se o gráfico de Pareto para classificar os motivos de parada do FEA devido a matéria-prima no ano de 2021 e, assim confirmar a efetividade do projeto Seis Sigma proposto.

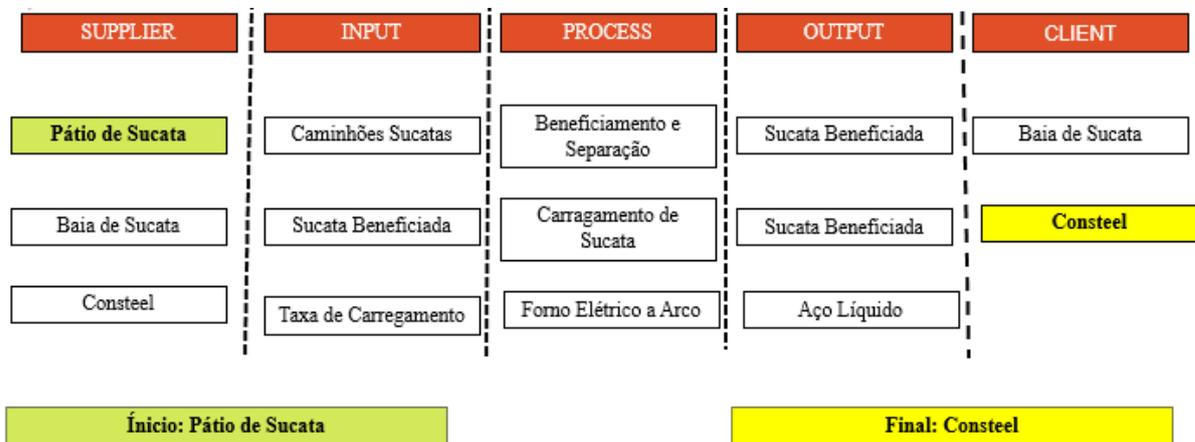
4 RESULTADOS

Neste capítulo, são apresentados os resultados obtidos neste trabalho de conclusão de curso e proposta uma discussão baseada nos resultados obtidos e em dados publicados por outros autores referentes ao assunto investigado. O objetivo principal deste capítulo é apresentar e discutir os resultados da implementação da mistura de sucata em uma siderurgia por meio do método DMAIC a fim de solucionar o problema peso de sucata carregado por viagem do sistema *Consteel*.

4.1 Etapa definir

O primeiro passo dessa etapa foi o mapeamento do processo utilizando a metodologia SIPOC para definir o principal processo envolvido no trabalho de forma macro, e consequentemente, facilitar a definição do escopo do projeto com o objetivo de torná-lo mais assertivo. O processo considerado como o escopo do estudo se inicia ao receber as sucatas no pátio de sucata e finaliza com o abastecimento das sucatas no *Consteel*, conforme descrito na Figura 11.

Figura 11- SIPOC do processo de produção do aço líquido.



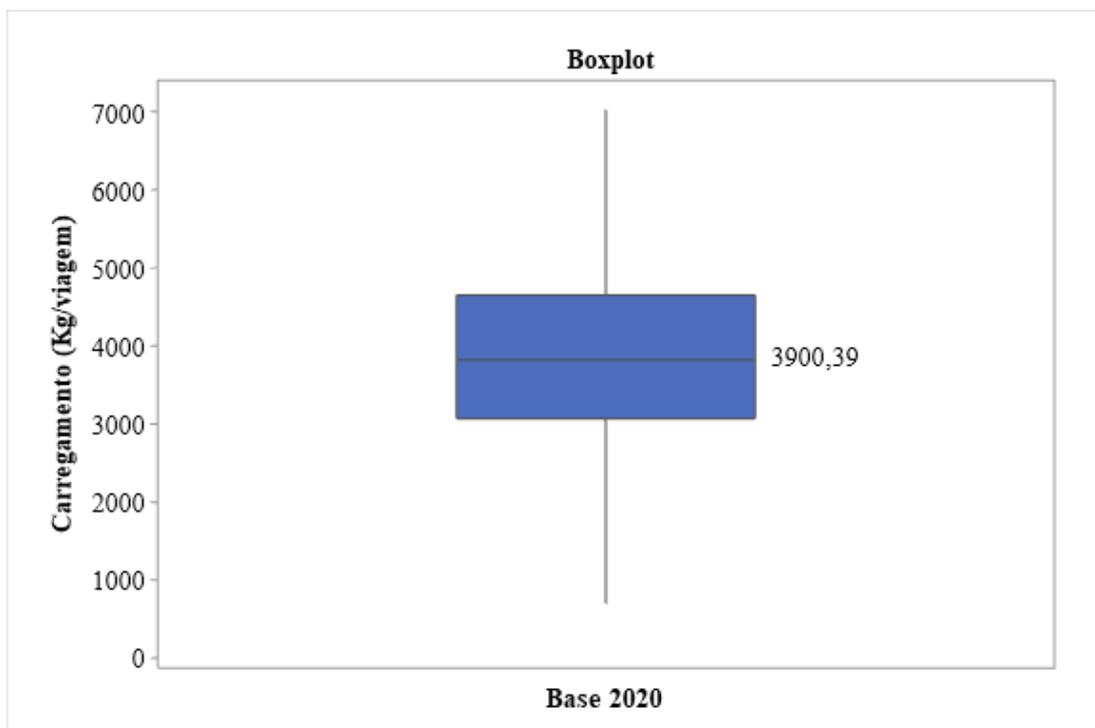
Fonte: a autora (2021)

De acordo com o SIPOC, o pátio de sucata tem como principal cliente a baia que abastece o *Consteel* por meio do carregamento de sucatas realizado por duas pontes rolantes. O carregamento de sucata é o processo crítico para a qualidade do abastecimento, pois é a etapa mais longa da produção do aço líquido e compromete a produtividade FEA.

Ao analisar o sumário das estatísticas descritivas do peso de sucata carregado por viagem entre os meses de agosto a dezembro de 2020 que definiu o comportamento do

carregamento, verificou-se que a mediana dos carregamentos foi cerca de 3900 kg por viagem (Figura 12) com desvio padrão de 1263 kg por viagem. Vinte e cinco por cento das viagens apresentaram peso de sucata carregado por viagem inferior a 3062 kg. Em seguida, determinou-se que o objetivo da fase definir era aumentar a capacidade do peso de sucata carregado por viagem para no mínimo 3062 kg por viagem, valor referente ao primeiro quartil. Tal valor corrobora com o estudo de simulação do sistema *Consteel* realizado na organização, no qual concluiu-se que para garantir taxa de alimentação constante do FEA era necessário ter carregamentos de sucata com no mínimo 3060 kg por viagem. Dessa maneira, o valor do primeiro quartil tornou-se o limite inferior de especificação (LIE).

Figura 12- *Boxplot* do peso de sucata carregado por viagem entre os meses de agosto a dezembro de 2020.

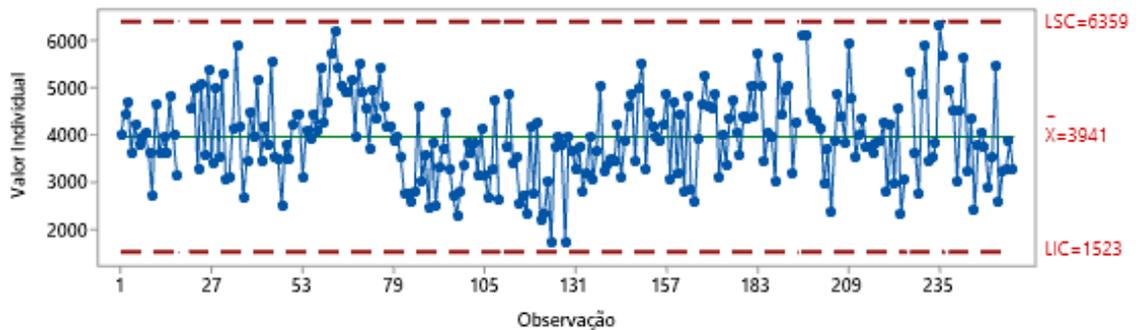


Fonte: a autora (2021)

4.2 Etapa medir

Inicialmente, a carta de controle, mostrada na Figura 13, permite concluir que o processo está dentro dos limites de controle, ou seja, sob controle estático sem a presença de variações especiais. Tal resultado corrobora Carneiro Neto (2003) que informou que um processo é estatisticamente estável quando somente as variações das causas comuns estiverem presentes.

Figura 13- Carta de Controle para valores individuais do peso de sucata carregado por viagem entre os meses de agosto a dezembro de 2020.



Fonte: a autora (2021)

Logo após a definição da estabilidade do processo, iniciou-se o estudo da capacidade do processo para determinar se é possível atender ao LIE estabelecido. Para isso, foi calculado o DPMO do processo conforme a descrito na Equação 1. Entre agosto de 2020 a dezembro do mesmo ano foram registrados 33.136 carregamentos do sistema *Consteel* dos quais 8.679 apresentaram peso carregado por viagem abaixo de 3062 kg (LIE). Esse cálculo foi detalhado na Equação 2. Dessa forma, estimou-se que em média ocorriam 261.921 viagens abaixo do LIE a cada um milhão de carregamentos do sistema *Consteel*.

$$DPMO = \frac{8679}{33136 \times 1} \times 10^6 \quad \text{Equação 2}$$

O resultado da capacidade do processo via DPMO permitiu concluir que o processo de carregamento de sucata não era capaz de atender a especificação estabelecida pelo FEA. Relacionando o nível sigma (Tabela 1) com o DPMO (Equação 2), o processo era considerado como 2σ , fato que remetia a um nível de qualidade de cerca de 69,10%.

Após a análise de capacidade do processo, avaliou-se o sistema de medição. Na Tabela 2 foram relacionadas as porcentagens de contribuição das barras na avaliação das balanças das pontes por meio dos cálculos de análise de variância (ANOVA). Se a porcentagem de contribuição de *Part to Part* for maior do que o total Gage R&R, a maioria das variações se deve a diferenças entre as peças (MINITAB User's Guide, 2000). Por outro lado, se a porcentagem de contribuição *Part to Part* é menor do que o Gage R&R total, a maior parte das variações surgem do sistema de medição (MINITAB User's Guide, 2000).

Nesse teste, a porcentagem de contribuição de *Part to Part* foi maior do que o total Gage R&R, então, a maioria das variações deveu-se a diferenças entre as barras.

Tabela 2- Porcentagem de contribuição das barras usando o método ANOVA.

Fonte	Componente da Variância	% Contribuição (componente da variância)
Total Gage R&R	1619	0,09
Repetibilidade	262	0,01
Reprodutibilidade	1357	0,07
Medidor	0	0,000
Medidor * Peça	1357	0,07
Part to Part	1849972	99,91
Varição total	1851591	100

Fonte: a autora (2021)

Na Tabela 3, a porcentagem da variação total *Gage R&R*, foi avaliada para determinar se o sistema de medição era aceitável. Para avaliar a variação do processo, deve-se comparar a contribuição do R&R Total na coluna *%StudyVar* com os valores de referência de acordo com o Manual de Referência de Análise de Sistemas de Medição (1995). Neste caso, a contribuição total *Gage R&R* foi de 2,96%, o que corresponde a uma variação aceitável.

Tabela 3- Porcentagem de contribuição das barras usando o método ANOVA.

Fonte	%StudyVar
Total Gage R&R	2,96
Repetibilidade	1,19
Reprodutibilidade	2,71
Medidor	0
Medidor * Peça	2,71
Part to Part	99,96
Varição total	100

Fonte: a autora (2021)

Em seguida, avaliou se o número de categorias distintas do sistema de medição era adequado. De acordo com Manual de Referência de Análise de Sistemas de Medição (1995), um sistema de medição adequado precisa de pelo menos cinco categorias distintas. No experimento, o número de categorias distintas, usando o método ANOVA foi igual a 47, portanto, era adequado.

4.3 Etapa analisar

Nesta fase ocorreu a identificação de fatores (X's) que poderiam auxiliar na determinação do comportamento do peso de sucata carregado por viagem no processo de abastecimento do *Consteel*. Tais fatores foram levantados após o *brainstorming* com a equipe do projeto e listados de acordo com a Tabela 4.

Tabela 4- Identificação dos fatores de influência (X's) no peso de sucata carregado por viagem.

Nº Fator de influência	Fator de Influência (X)
X1	Tipo de Sucata Carregada
X2	Diferença de expertise entre os turnos do pátio de sucata

Fonte: a autora (2021)

4.3.1 Verificação do X1: o tipo de sucata carregada influencia no peso de sucata carregado por viagem?

A carga metálica é composta por diferentes tipos de sucata de acordo com a especificação do aço. Cada sucata possui densidade e composição química própria. Inicialmente, recorreu-se a identificação dos carregamentos que formavam cada tipo de sucata no segundo semestre de 2020. A sucata *prime* utilizada era a estamparia e as sucatas *low cost* eram pacote de chaparia e tesourada. As sucatas internas eram: gusa *raw*, tubo preto, tubo vermelho e tubo roxo. Ao final das análises e identificação dos carregamentos, cada sucata recebeu uma numeração, conforme apresentado Tabela 5.

Tabela 5- Identificação dos tipos de sucata.

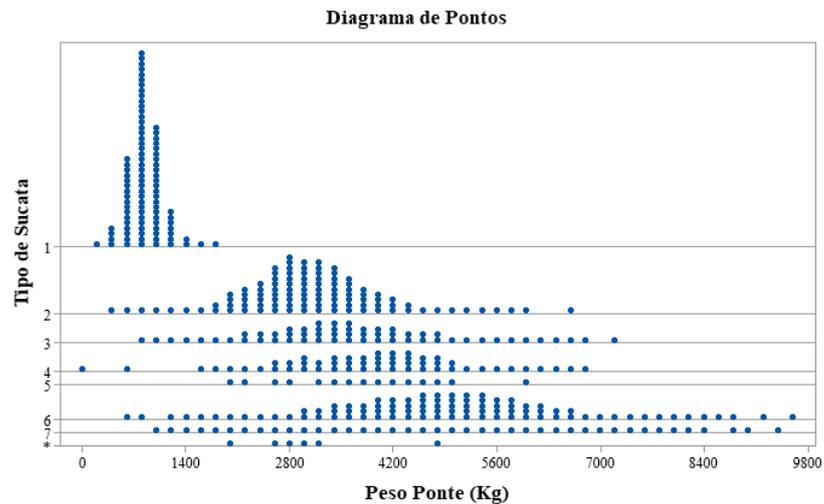
Interna ou Externa?	Tipo de sucata	Nº do tipo de sucata
Externa	Pacote de Chaparia	1
	Tesourada	2
	Estamparia	3
Interna	Tubo Preta	4
	Tubo Vermelho	5
	Tubo Roxo	6
	Gusa <i>Raw</i>	7

Fonte: a autora (2021)

A visualização dos carregamentos de acordo com o tipo de sucata se deu por meio do diagrama de pontos (Figura 14). Por meio de análise descritiva, verificou-se que a sucata tipo 1, pacote chaparia, foi aquela que possuía a menor média de peso carregado por viagem,

porém foi o tipo de sucata que apresentou a menor dispersão entre os pesos carregados por viagem das pontes rolantes. A sucata tipo 3, estamparia, foi aquela que apresentou a maior média do peso carregado por viagem entre as sucatas externas. Entre as sucatas internas, o tubo roxo foi a que apresentou a maior média e dispersão entre os dados.

Figura 14- Diagrama de pontos do peso carregado por viagem para diferentes tipos de sucata.



Cada símbolo representa até 27 observações.

Fonte: a autora (2021)

Para verificar se os pesos referentes a cada tipo de sucata ajustavam-se à distribuição normal, realizou-se o teste de aderência de Anderson-Darling para um nível de 5% de significância. As hipóteses testadas foram detalhadas a seguir:

$$\left\{ \begin{array}{l} H_0: \text{Os dados seguem distribuição normal.} \\ H_1: \text{Os dados não seguem uma distribuição normal.} \end{array} \right.$$

Os resultados do teste foram demonstrados por meio do *p-value* de acordo com a Tabela 6.

Tabela 6- Resultado do Teste de Normalidade dos pesos de sucata carregados por viagem de cada tipo de sucata.

Tipo de Sucata	<i>p-value</i>
Pacote de Chaparia	<0,005
Tesourada	<0,005
Estamparia	0,0274
Tubo Preto	<0,005
Tubo Vermelho	<0,005
Tubo Roxo	0,016
Gusa Raw	<0,005

Fonte: a autora (2021)

De acordo com a Tabela 6, o *p-value* para todos os tipos de sucata eram menores que o risco α assumindo (nível de significância), então, rejeitou-se a hipótese nula e concluiu-se que os dados não seguiam distribuição normal. Logo, para a estatística de teste, utilizou-se o teste não paramétrico de Kruskal-Wallis (K-W). Supondo que as populações tenham formas similares, as hipóteses testadas foram:

- $\left\{ \begin{array}{l} H_0: \text{todas as medianas dos pesos carregados por viagem dos diferentes tipos de sucatas são iguais.} \\ H_1: \text{no mínimo uma das medianas dos pesos carregados por viagem dos diferentes tipos de sucatas são diferentes.} \end{array} \right.$

Ao realizar o teste de hipótese, foi encontrado um o *p-value* =0,000, ou seja, com 95% de confiança pode-se concluir que há diferença em no mínimo uma das medianas dos pesos carregados por viagem. Logo, o tipo de sucata carregado é uma variável que influencia no comportamento do carregamento do FEA. O resultado do teste pode ser visualizado na tabela 7.

Tabela 7- Estatísticas descritivas do teste estatístico K-W para os diferentes tipos de sucata.

Tipo de Sucata	N	Mediana	Posto médio	Valor-Z
1	2337	826,67	1189,6	-71,34
2	2337	3018,32	4299,0	-2,54
3	1009	3521,00	5201,4	10,43
4	994	3949,00	5859,3	18,98
5	32	3811,00	5660,1	2,77
6	1760	4883,00	7109,7	49,60
7	358	4810,50	6617,2	16,70
Global	8827		4414,0	

Fonte: a autora (2021)

4.3.2 Verificação do X2: os turnos influenciam no peso de sucata carregado por viagem?

Na empresa estudada, os turnos são divididos em quatro letras: J5, J6, J7 e J8. Os operadores trabalham no seguinte regime: dois dias no regime de escala de 12 horas e dois dias de folga. Para verificar se existia diferença entre os turnos, selecionou-se aleatoriamente doze valores de carregamentos da sucata tesourada dos turnos e separou os dados em quatro níveis de fatores (Tabela 8).

Para verificar se os pesos referentes a cada turno seguiam distribuição normal, realizou-se o teste de aderência de Anderson-Darling. Observando a Tabela 9, ao nível de significância de 5%, conclui-se que não existem evidências suficientes que permitem a rejeição da hipótese nula. Logo, conclui-se que os pesos de sucata carregados por viagem em cada turno ajustavam-se a distribuição normal, para o nível de significância especificado anteriormente.

Tabela 8- Resultado do Teste de Normalidade para os cinco níveis do fator turno.

Código do turno	Nível do Fator	<i>p-value</i>
J5	1	0,102
J6	2	0,342
J7	3	0,209
J8	4	0,604

Fonte: a autora (2021)

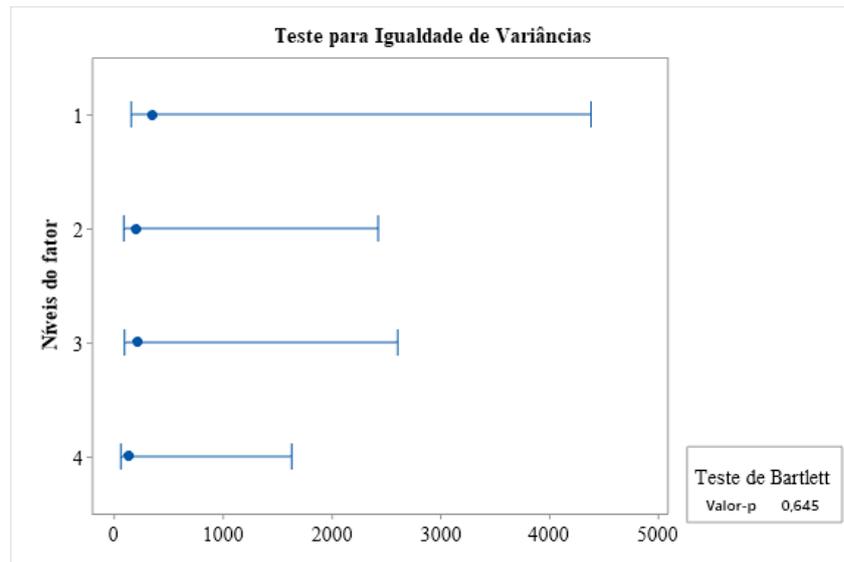
Como os dados seguiam a normalidade aplicou-se a ANOVA para um fator, a fim de comparar as médias dos pesos carregados por viagem por turno.

O teste de igualdade de variâncias das populações foi realizado por meio do método de Bartlett, ao nível de 5% de significância, cujas hipóteses testadas foram:

$$\left\{ \begin{array}{l} H_0: \text{todas as variâncias são iguais.} \\ H_1: \text{no mínimo uma variância é diferente.} \end{array} \right.$$

O teste de hipótese retornou o *p-value* igual a 0,645, fato que permitiu concluir que todas as variâncias eram equivalentes, conforme ilustrado na Figura 15.

Figura 15- Resultado do teste de igualdade de variância para os diferentes níveis do fator turno.



Fonte: a autora (2021)

Sendo assim, as premissas da ANOVA foram verificadas e validadas. Tal fato possibilitou a continuidade da aplicação da estatística de teste. As hipóteses testadas foram:

$$\left\{ \begin{array}{l} H_0: \text{todas as médias do carregamento entre os turnos são iguais.} \\ H_1: \text{pelo menos uma média do carregamento entre os turnos se difere.} \end{array} \right.$$

O resultado de *p-value*, Tabela 8, indica que não existiam evidências suficientes, para o nível de confiança de 95%, para rejeitar a hipótese nula. Dessa maneira, conclui-se não existem evidências, ao nível de 5% de significância, que permitem afirmar que as médias dos carregamentos entre os turnos são diferentes. Logo, conclui-se que o turno não influenciava no peso de sucata carregado por viagem. Esse resultado foi reafirmado por meio do valor encontrado para o R^2 ajustado, zero.

Tabela 9- Resultado da ANOVA para o fator turno.

Sumário do Modelo			
Fonte	<i>P-value</i>	R^2 ajustado	Contribuição
Turno	0,945	0,00	4,37%
Erro			95,63%

Fonte: a autora (2021)

4.4 Fase implementar

Da fase analisar, conclui-se que a solução para o problema do peso de sucata carregado por viagem por pontes rolantes para o abastecimento do *Consteel* tinha como causa

fundamental o tipo de sucata carregada, dado a validação estatística comprovada anteriormente.

Dessa maneira, a ação proposta para aumentar a capacidade do peso de sucata carregado por viagem por pontes rolantes para o abastecimento *Consteel* foi a mistura de sucatas no pátio a fim de padronizar a descarga de sucata e o modo de remontar as pilhas de sucatas e, conseqüentemente, reduzir eventos de paradas do FEA causadas pela baixa densidade das sucatas.

Os tipos de misturas de sucata foram testados de maneira empírica para que as homogeneizações das pilhas ocorressem conforme os três grandes grupos de sucata (*Prime, Low Cost, Interna – tubo preto*). As exceções foram as sucatas internas de tubos vermelho e roxo, que devido as restrições em relação à composição química não podem ser misturadas.

Foram propostos três tipos de misturas conforme sumarizado na Tabela 9. A proposição de mais de um tipo de mistura, deveu-se a necessidade de alternativas para casos de falta de algum dos tipos de sucata no mercado.

Tabela 10- Misturas de Sucatas.

Tipos de Misturas	1^a	2^a	3^a	4^a
Mistura 1	Tubo Preto	Tesourada	Sucata Pacote	Repetir sequência na ordem
Mistura 2	Tubo Preto	Tesourada	Sucata Pacote	Tesourada
Mistura 3	Tubo Preto	Tesourada	Tesourada	Repetir sequência na ordem

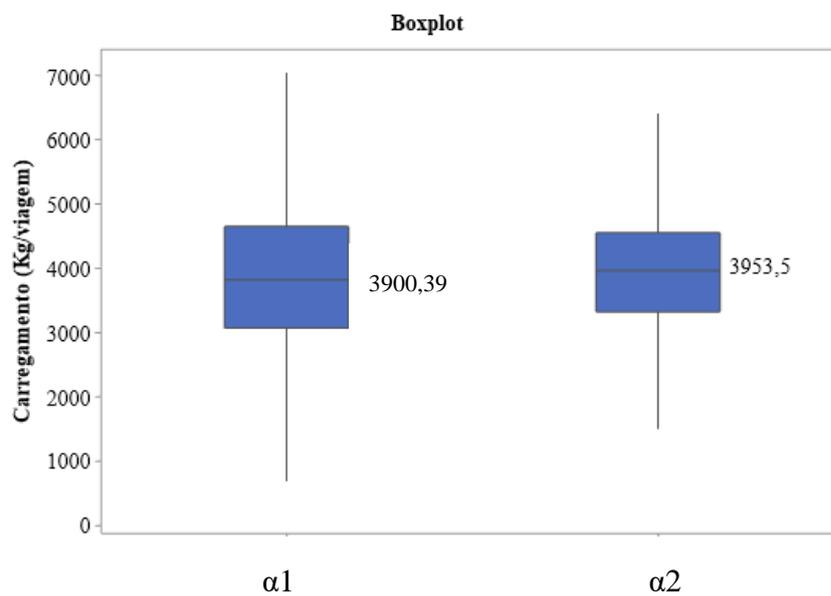
Fonte: a autora (2021)

Após a implementação da ação, foram realizados testes estatísticos para validar se houve modificação, ao nível de 5% de significância, no desempenho do peso de sucata carregado por viagem por pontes rolantes para o abastecimento do *Consteel*. Inicialmente, verificou se os dados seguiam distribuição normal. Para tal, aplicou o teste de aderência de Anderson-Darling e resultado de *p-value* encontrado foi menor do que 0,05. Logo, ao nível de 95% de confiança, os dados não seguiam a distribuição normal. Sendo assim, para testar se as medianas entre os dois cenários eram diferentes aplicou o teste não paramétrico Mann-Whitney com as seguintes hipóteses:

$$\begin{cases} H_0: \text{a mediana das condições iniciais } (\alpha_1) \text{ é igual a mediana após a mistura } (\alpha_2) \\ H_1: \text{a mediana das condições iniciais } (\alpha_1) \text{ é diferente da mediana após a mistura } (\alpha_2) \end{cases}$$

Como resultado do teste obteve-se um p -value igual a 0,000. Sendo assim, conclui-se que ao nível de 95% de confiança, existe diferença estatisticamente significativa entre os pesos medianos de sucata carregado por viagem antes e após a proposição de mistura de sucata. O resultado pode ser ilustrado por meio dos *boxplots* apresentados na Figura 16. Ademais, esses gráficos permitem concluir que houve redução da variabilidade e aumento da mediana do peso de sucata carregado por viagem por pontes rolantes para o abastecimento do *Consteel* após a implementação da ação.

Figura 16- *Boxplots* dos pesos de sucata carregado por viagem por pontes rolantes para o abastecimento do *Consteel*



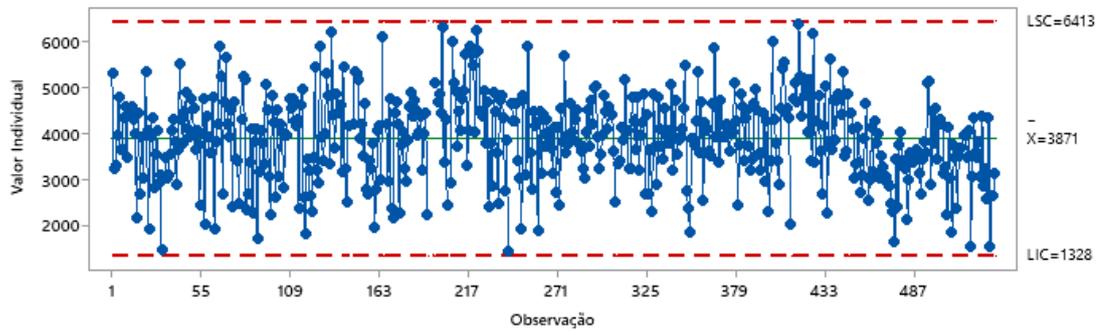
Fonte: a autora (2021)

4.4.1 Fase controlar

Na última etapa do método DMAIC, foi realizada a padronização da prática de mistura de sucata por meio da escrita do padrão operacional e treinamento dos colaboradores. O padrão operacional conta com a descrição dos tipos de misturas de acordo com a Tabela 9, além das boas práticas de segurança e riscos envolvidos na execução da atividade.

Para avaliar o aumento da capacidade do processo após a fase de implementação da ação, analisou-se se o processo estava sob controle estatístico por meio de carta de controle individual (Figura 17). Depreende-se que o processo continua sob controle estatístico permitindo prosseguir com o cálculo do DPMO.

Figura 17- Carta de controle de valores individuais do peso de sucata carregado por viagem entre os meses de janeiro a junho de 2021.



Fonte: a autora

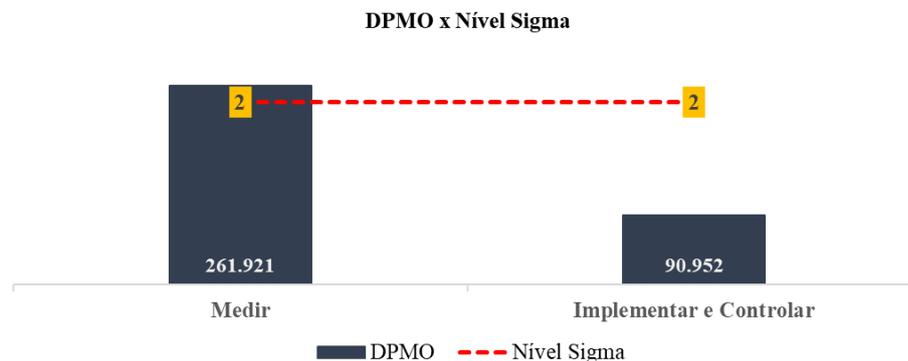
Entre janeiro de 2021 a junho de 2021 foram registrados 33.611 carregamentos do sistema *Consteel* dos quais 3.057 apresentaram peso carregado por viagem abaixo de 3062 kg (LIE). Esse cálculo foi detalhado na Equação 3. Dessa forma, estimou-se que em média ocorriam 90.952 viagens abaixo do LIE a cada um milhão de carregamentos do sistema *Consteel*.

$$DPMO = \frac{3057}{33611 \times 1} \times 10^6$$

Equação 3

Relacionando o nível sigma (Tabela 1) com o DPMO (Equação 3), o processo continua sendo considerado como 2σ , porém, comparado os resultados do DPMO (Figura 18) conclui-se que houve uma redução no DPMO confirmando o aumento da capacidade do processo.

Figura 18- Gráfico comparativo DPMO x Nível Sigma

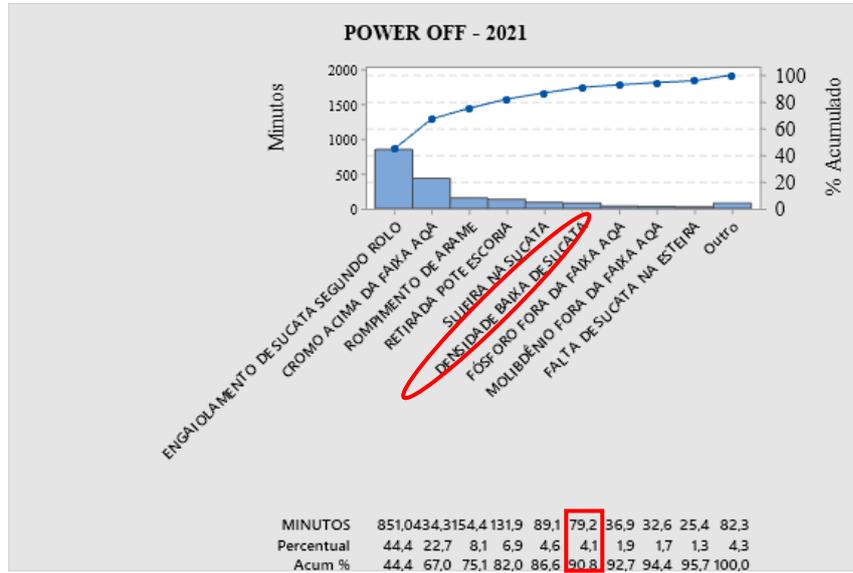


Fonte: a autora (2021)

Enfim, na Figura 19 tem-se que o maior motivo de parada do FEA devido a matéria-prima entre os meses de janeiro de 2021 a junho do mesmo ano é o engaiolamento de sucata no segundo rolo. Agora, as paradas por baixa densidade de sucata representam 4,1% do

POWER OFF do FEA da indústria siderúrgica objeto de estudo nesse trabalho de conclusão de curso, confirmando a efetividade do projeto Seis Sigma.

Figura 19- Gráfico Pareto Power OFF FEA/2021 – Matérias-Primas



Fonte: a autora (2021)

5 CONCLUSÃO

O presente estudo teve como objetivo, descrever um projeto da metodologia Seis Sigma desenvolvido em uma usina siderúrgica para melhorar o desempenho do processo de abastecimento do *Consteel* por meio da aplicação da metodologia DMAIC. As seguintes conclusões podem ser extraídas:

- ✓ O FEA tem como principal fornecedor o pátio de sucata que entrega as sucatas que abastecem o sistema *Consteel* para a produção do aço líquido.
- ✓ Na fase definir do método DMAIC foi definido o LIE de 3062 kg por viagem a fim de garantir o abastecimento contínuo da esteira do *Consteel*.
- ✓ Na fase medir do método DMAIC foi verificado se o processo de abastecimento do *Consteel* estava sob controle e constatado que a capacidade do processo via DPMO era de 261.921. Por meio do estudo R&R conclui-se que o sistema de medição era aceitável.
- ✓ Na fase analisar do método DMAIC foi verificado que dos fatores de influência analisados, somente o tipo de sucata carregada apresentava influência significativa, ao nível de 95% de confiança, sob o peso de sucata carregado por viagem.
- ✓ Na fase implementar do método DMAIC, três tipos de misturas das sucatas conforme restrições de composição química foram propostas e efetuadas. Mediante teste de Maan-Whitney e *boxplot* foi possível concluir que houve aumento da mediana do peso de sucata carregado por viagem por pontes rolantes para o abastecimento do *Consteel* após a implementação da ação (ao nível de significância de 5%) e redução da variabilidade dessa medida, respectivamente.
- ✓ Na fase controlar do método DMAIC foi verificado que o processo de abastecimento do *Consteel* estava sob controle após as modificações implementadas e constatado que a capacidade do processo via DPMO era de 90.952.
- ✓ O projeto Seis Sigma descrito nesse trabalho de conclusão de curso contribuiu para reduzir as paradas por baixa densidade de sucata do FEA da indústria siderúrgica. Antes do projeto 21,6% do POWER OFF associado à matéria-prima era devido a baixa densidade de sucata carregada por viagem para o abastecimento do *Consteel*. Após o projeto, somente 4,1% do POWER OFF associado à matéria-prima foi atribuído a essa mesma causa.

Como sugestão para trabalhos futuros, pode-se destacar a aplicação da ferramenta de análise preliminar de riscos - FMEA, com intuito de mapear potenciais modos de falhas, efeitos e probabilidades de ocorrências para mapear os riscos em relação a segurança e produtividade da mistura de sucata.

Também, sugere-se testes de mistura com as sucatas de tubo roxo e vermelho que possuem altos teores de elementos residuais tais como, molibdênio, cromo e níquel, para aços com especificações adequadas, a fim de melhorar o desempenho do carregamento de sucata para mais famílias de aços. Além disso, para trabalhos futuros no pátio de sucata recomenda-se focar na concepção da formação de pilhas com misturas em camadas e de acordo com a família de aços produzidos com objetivo de garantir a melhoria contínua da mistura e ganhos na assertividade da composição química do aço.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

CARPINETTI, Luiz Cesar Ribeiro .Gestão da qualidade : conceitos e técnicas / Luiz Cesar Ribeiro Carpinetti. – 3. ed. – São Paulo : Atlas, 2016. Bibliografia.

CARNEIRO NETO, W. Controle estatístico de processo CEP [CDROM]. **Recife: Upe-Poli**, 2003.

CABRAL, Priscila Jardim Mariano.Aplicação da metodologia seis sigma na análise da recuperação metalúrgica em uma mineradora de Itabira-MG. 2019.

COSTA, A. B., EPPRECHT, E. K., & CARPINETTI, L. R. Controle Estatístico da Qualidade (2 ed.). São Paulo: Atlas: 2004.

DE HOLANDA, Lucyanno Moreira Cardoso; DE DINIZ SOUZA, Italo; DE FRANCISCO, Antonio Carlos. Proposta de aplicação do método DMAIC para melhoria da qualidade dos produtos numa indústria de calçados em Alagoa Nova-PB. **Revista Gestão da Produção Operações e Sistemas**, v. 32, n. 4, p. 31, 2013.

FANUTTI, Giuliano; POZZI, Marcello. Environmental control and the Consteel process. **Millennium Steel**, p. 105-10, 2004.

Gonçalez, Patricia Ueda, and Liane Werner. "Comparação dos índices de capacidade do processo para distribuições não-normais." *Gestão & Produção* 16.1 (2009).

HENRIQUES, David Miguel Cavaco. **Alocação adaptativa de tolerâncias com vista a ajustar o nível sigma da produção de sistemas mecânicos**. 2015. Tese de Doutorado.

JUNIOR, José Carlos Nogueira Trindade; METALÚRGICA, Engenharia. Obtenção, mercado e reciclagem de sucatas ferrosas na indústria siderúrgica brasileira. **Rio de Janeiro**, 2013.

LINDERMAN, Kevin et al. Six Sigma: a goal-theoretic perspective. **Journal of Operations management**, v. 21, n. 2, p. 193-203, 2003.

MAUKIEWICZ, Dinei; SUSKI, Cássio Aurélio. Implantação da Metodologia Seis Sigma. **Revista de Ciência & Tecnologia**, v. 16, n. 32, p. 31-38, 2009.

MEMOLI, Francesco; FERRI, Mauro Bianchi; FREITAS, Jorge Villares de. Aumento das plantas Consteel® no mundo: flexibilidade para a carga contínua de gusa líquido e sucata no Forno Elétrico a Arco agora na siderurgia brasileira. **Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração**, v. 6, n. 1, p. 54-60, 2013.

MIRANDA, Augusta Martinelli. Monitoramento dos elementos residuais menos comuns no fornecimento de sucata para aciaria FEA. 2019.

- MONTGOMERY, Douglas C. **Statistical quality control**. Wiley Global Education, 2009.
- MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. Gauge capability analysis and designed experiments Part II: experimental design models and variance component estimation. *Quality Engineering*, Vol. 6, No. 2, pp. 289-305, 2016.
- MORAES, C. F. Estudo da utilização do gráfico de controle individual e do índice de capacidade sigma para dados não normais. **Universidade Federal de Itajubá**, 2006.
- OLIVEIRA, JB de et al. Análise da capacidade de um processo: Um estudo de caso baseado nos indicadores CP e CPK. **Anais: XXXI Encontro Nacional de Engenharia de Produção**, 2011
- OLIVEIRA, Tiago Luís et al. Study of biomass applied to a cogeneration system: A steelmaking industry case. **Applied Thermal Engineering**, v. 80, p. 269-278, 2015.
- PARANHOS FILHO, Moacyr. **Gestão da produção industrial**. Editora Ibplex, 2007.
- PEREIRA, Robson Bruno Dutra et al. Combining Scott-Knott and GR&R methods to identify.
- PYZDEK, THOMAS; KELLER, P. A. U. L. Seis Sigma: guia do profissional-um guia completo para green belts, black belts e gerentes de todos os níveis. 2011.0
- RAMOS, Alberto Wunderler. Controle estatístico de processo. **Gestão de Operações: A Engenharia de Produção a serviço da modernização da empresa**, v. 2, 1997.
- RASMUSSEN, David. **SIPOC picture book: A visual guide to SIPOC/DMAIC relationship**. Oriell Incorporated, 2006.
- RYAN, T. Estatística Moderna para Engenharia. Rio de Janeiro: Elsevier, 2011.
- REYS, Lucas Andery. Melhoria do desempenho de malhas de controle utilizando a metodologia Lean Seis Sigma. 2016.
- ROTONDARO, R. G. Seis Sigma: Estratégia Gerencial para a Melhoria de Processos, Produtos e Serviços. 1 ed. São Paulo: Atlas, 2002.
- SANTOS, Adriana Barbosa; MARTINS, Manoel Fernando. Contribuições do Seis Sigma: estudos de caso em multinacionais. **Production**, v. 20, p. 42-53, 2010.
- SANTOS, Adriana Barbosa; MARTINS, Manoel Fernando. Modelo de referência para estruturar o Seis Sigma nas organizações. **Gestão & Produção**, v. 15, n. 1, p. 43-56, 2008.

SCATOLIN, Andre Celso et al. Aplicação da metodologia Seis Sigma na redução das perdas de um processo de manufatura. 2005.

SHANKAR, Rama. **Process improvement using six sigma: a DMAIC guide**. Quality Press, 2009.

TAKANO, C., Processos de Preparação de Matérias primas siderúrgicas in: Siderurgia para Não Siderurgistas.1 ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2001.

WERKEMA, Cristina. **Criando a cultura lean seis sigma**. Elsevier Brasil, 2013.

WERKEMA, Cristina. **Ferramentas Estatísticas Básicas do Lean Seis Sigma Integradas: PDCA e DMAIC**. Elsevier, 2016.

APÊNDICE

5.1 Cálculo dos limites de controle da carta de controle de variáveis na fase definir

$$LSC = \bar{X} + K \frac{MR}{d2}$$

$$LSC = 3941 + (3 \times 806)$$

$$LSC = 6.359$$

$$LIC = \bar{X} - K \frac{MR}{d2}$$

$$LIC = 3941 - (3 \times 806)$$

$$LIC = 1.523$$

5.2 Cálculo dos limites de controle da carta de controle de variáveis na fase controlar

$$LSC = \bar{X} + K \frac{MR}{d2}$$

$$LSC = 3871 + (3 \times 847,33)$$

$$LSC = 6.413$$

$$LIC = \bar{X} - K \frac{MR}{d2}$$

$$LIC = 3871 - (3 \times 847,33)$$

$$LSC = 1.523$$