

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA - CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA  
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

ANÁLISE DE PERFORMANCE NA PRODUÇÃO DO VERGALHÃO CA60 4,20 MM  
PARA CONCRETO ARMADO

por

Caroline Gomes Melo de Souza

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, Agosto de 2023

## CIP - Catalogação na Publicação

Gomes Melo de Souza, Caroline  
ANÁLISE DE PERFORMANCE NA PRODUÇÃO DO VERGALHÃO  
CA60 4,20 MM PARA CONCRETO ARMADO / Caroline Gomes  
Melo de Souza. -- 2023.  
13 f.  
Orientador: José Antônio Esmerio Mazzaferro.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de  
Engenharia, Curso de Engenharia Mecânica, Porto  
Alegre, BR-RS, 2023.

1. Siderurgia. 2. MASP. 3. Vergalhão. 4.  
Performance. I. Esmerio Mazzaferro, José Antônio,  
orient. II. Título.

Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da UFRGS com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Caroline Gomes Melo de Souza

ANÁLISE DE PERFORMANCE NA PRODUÇÃO DO VERGALHÃO CA60 4,20 MM  
PARA CONCRETO ARMADO

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS  
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE  
**ENGENHEIRO MECÂNICO**  
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO  
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Ignácio Iturrioz  
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Processos de Fabricação

Orientador: Prof. José Antônio E. Mazzaferro

Comissão de Avaliação:

Prof. José Antônio E. Mazzaferro (Presidente)

Prof<sup>a</sup>. Simone Ramires

Prof<sup>a</sup>. Cintia C. Petry Mazzaferro

Porto Alegre, Agosto de 2023

## AGRADECIMENTOS

Obrigada a todos os amigos que cultivei em meu caminho, o suporte de vocês foi imprescindível para a construção da minha trajetória. Agradeço todos os ombros amigos, as risadas e as trocas que tivemos. Sem vocês a minha história não seria a mesma.

Obrigada aos colegas de trabalho, vocês me ajudaram a crescer e desenvolver habilidades em mim que nem eu mesma sabia que era possível.

Agradeço ao apartamento 43 por ser minha família longe de casa. Compartilhamos tantos momentos e tantas histórias, que sempre será um marco na minha vida. Obrigada por serem casa sempre.

Agradeço à minha família: meu pai, minha mãe e minha irmã. Sem vocês eu não conseguiria sonhar com o futuro e nem imaginar ser a pessoa que sou hoje. Obrigada pelo apoio e amor incondicional sempre, vocês são exemplos de vida e meu alicerce todos os dias. Essa conquista é tanto minha como de vocês.

Obrigada a mim mesma, por persistir até aqui.

Gomes Melo de Souza, Caroline. **ANÁLISE DE PERFORMANCE NA PRODUÇÃO DO VERGALHÃO CA60 4,20 MM PARA CONCRETO ARMADO**. 2023. 13. Monografia de Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2023.

## RESUMO

Alta performance e baixo custo, são assuntos recorrentes em qualquer empreendimento nos dias de hoje. O cenário é o mesmo para a siderurgia. Com o intuito de atacar ambos os direcionamentos do negócio, foi desenvolvido um estudo utilizando o Método de Análise e Solução de Problemas (MASP) para análise de performance de um dos itens de produção da indústria siderúrgica. Essa análise consiste na avaliação do perfil de perdas, paradas principais no processo e estudo de viabilidade da instalação de melhorias na produção. O item em questão é o vergalhão CA60 4,20 mm para concreto armado. Baseando-se nas análises realizadas e na coleta de dados sobre a produção desse item, foram propostas soluções e avaliada a viabilidade financeira de implementação delas. Chegou-se a conclusão de que a instalação do projeto não seria adequada para o momento que está sendo vivenciado no mercado siderúrgico atualmente.

**PALAVRAS-CHAVE:** Siderurgia, Performance, Vergalhão, Custo e Indústria.

Gomes Melo de Souza, Caroline. **PERFORMANCE ANALYSIS IN THE PRODUCTION OF REBAR CA60 4.20 MM FOR REINFORCED CONCRETE**. 2023. 13. Mechanical Engineering End of Course Monography – Mechanical Engineering degree, The Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2023.

## ABSTRACT

High performance and low cost are recurring issues in any enterprise nowadays. The scenario is the same for the steel industry. In order to attack both business directions, a study was developed using the Problem Analysis and Solution Method (MASP) to analyze the performance of one of the production items in the steel industry. This analysis consists of evaluating the loss profile, main stops in the process and a feasibility study for installing production improvements. The item in question is CA60 4.20 mm rebar for reinforced concrete. Based on the analyzes carried out and the collection of data on the production of this item, solutions were proposed and the financial viability of their implementation was assessed. It was concluded that the installation of the project would not be suitable for the current situation in the steel market.

**KEYWORDS:** Steel, Performance, Rebar, Cost and Industry.

## NOMENCLATURA

### Símbolos

$\varphi_a$	Deformação real da área transversal do fio de aço	Adimensional
$\ln$	Logarítmo natural	Adimensional
$A$	Área transversal final do fio de aço	[ $m^2$ ]
$A_0$	Área transversal inicial do fio de aço	[ $m^2$ ]
$F_{máx}$	Força máxima de trefilação	[N]
$A_{stv}$	Área de secção trasnversal do vergalhão	[ $m^2$ ]
$k_{fv}$	Tensão de escoamento do material do vergalhão após a laminação à frio	[MPa]
$L_e$	Limite de escoamento	[MPa]
$L_r$	Limite de ruptura	[MPa]

### Abreviaturas e acrônimos

CA60	Arame para concreto armado com 600 MPa de tensão de escoamento
FEA	Forno Elétrico à Arco
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
TIR	Taxa de Retorno Sob Investimento
MASP	Método de Análise e Solução de Problemas
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	1
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....	1
2.1 Processo de produção de um vergalhão CA60 .....	1
2.1.1 <i>Shereder</i> e Aciaria .....	2
2.1.2 Laminação à Quente .....	2
2.1.3 Laminação à frio .....	3
2.2 Fenômenos do processo de laminação à frio .....	5
2.2.1 Encruamento .....	5
2.2.2 Força de trefilação .....	5
3. METODOLOGIA .....	6
3.1 Observação .....	6
3.2 Análise .....	7
3.3 Plano de ação .....	11
4. RESULTADOS .....	11
4.1 Resultados do primeiro plano de ação .....	11
4.2 Resultados do segundo plano de ação .....	13
5. CONCLUSÃO .....	15
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	16

## 1. INTRODUÇÃO

Toda estrutura de negócios procura desenvolver processos produtivos com bom custo-benefício e principalmente, alto desempenho. O mesmo se aplica para o processo siderúrgico analisado neste estudo.

A operação observada, mais especificamente a operação de laminação a frio, possui algumas preocupações com relação ao desempenho durante a produção de um dos materiais finais da planta siderúrgica. Esse material é o arame para concreto armado CA60 4,20 mm reto e em rolo.

O produto em questão, possui um volume de produção expressivo para a empresa, porém é um relato do time operacional que seu desempenho é inferior com relação a outros itens da linha de materiais CA60 retos e em rolo. Dessa forma, foi proposto um grupo de estudos para análise de performance com o intuito de comprovar o desempenho inferior do material e elaborar de um plano de ação com a finalidade de aumentar a produtividade do material, consequentemente gerando ganhos econômicos para instituição.

Assim, o estudo foi conduzido com a metodologia tradicional do Método de análise de solução de problemas (MASP) dando enfoque na análise do cenário existente. Isso com a finalidade da criação de um plano de ação robusto que trouxesse a solução da causa raiz dos problemas abordados.

Também foram analisadas questões de retorno financeiro para instituição. Avaliando se seria aplicável e rentável economicamente executar as melhorias de processo propostas ao decorrer do projeto.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 Processo de produção de um vergalhão CA60

O vergalhão CA60 4,20mm é um produto final do processo siderúrgico de aços longos, que tem início no conjunto de processos que são chamados de *upstream*, ou seja, início da cadeia do aço. Essa matéria prima de suma importância para a indústria nacional e internacional tem início no pátio de sucatas e aciaria, processos em que a sucata é processada por máquinas e aquecida até se tornar aço líquido. Após estas etapas, o aço passa por um processo de lingotamento contínuo, onde é transformado em tarugos. Dessa forma, os tarugos seguem para a laminação que realiza a maior redução do material dentre todos os processos da cadeia produtiva, formando o fio máquina.

Este material intermediário é encaminhado para a laminação a frio, onde o vergalhão tem seu formato final e propriedades atribuídas pelo processo de laminação a frio. Pode-se observar um esquema da cadeia produtiva de aço, simplificado, na Figura 1.

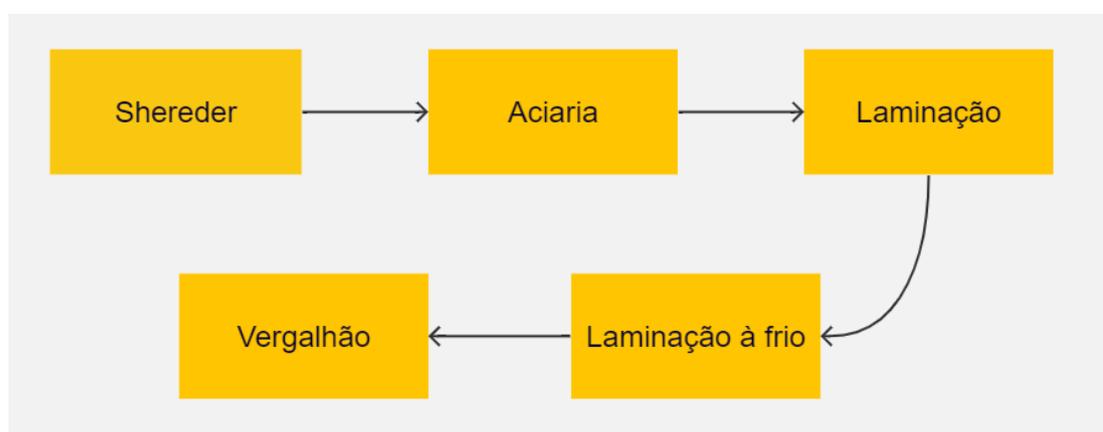


Figura 1 – Esquema de fabricação de um vergalhão laminado a frio CA60. [AUTORAL]

### 2.1.1 *Shereder* e Aciaria

Existem dois tipos de usina siderúrgica, as usinas integradas ou semi-integradas, também conhecidas como *mini mills*. Usinas semi-integradas são as responsáveis por produzir aço a partir de ferro secundário, ou seja, sucata metálica. Elas são as usinas mais utilizadas no ramo siderúrgico, pela sua praticidade na produção, custos mais baixos e menores impactos ao meio ambiente comparadas com usinas integradas.

Em uma usina semi-integrada, o processo de transformação do ferro secundário em ferro carbono utilizado para fins comerciais começa no *shereder*. Esse maquinário processa a sucata metálica para transformá-la em pequenos pedaços e assim facilitar a fusão dela nos fornos, durante essa etapa ocorre a separação de metais que não são utilizados na composição do aço, como alumínio e outros metais pesados.

Para a fusão do ferro secundário, são utilizados fornos com a tecnologia de Forno Elétrico à Arco (FEA). Durante esse processo ocorre o refinamento primário do material, momento que acontece a limpeza do arco, adição de outros componentes químicos e criação de escória, que auxilia na limpeza dos refratários dos fornos.

O processo de aquecimento da sucata para transformação em aço utilizando fornos elétricos a arco possui inúmeros benefícios. Dentre eles a maior capacidade de utilização de sucata, emissões de  $CO_2$  quatro vezes menores e uma produção mais econômica comparada aos demais processos.

Após a passagem pelo alto forno, o aço se encaminha para panela. Nesta etapa do processo ocorre o refinamento secundário, que consiste na diminuição de inclusões do material por meio dos processos de desoxidação (remoção de oxigênio), dessulfuração (remoção de enxofre) e desgaseificação (remoção de hidrogênio e nitrogênio). Essas inclusões podem afetar as propriedades mecânicas do aço como diminuição de tenacidade, plasticidade e até mesmo aumentar a possibilidade de formação de trincas. Com os ajustes já realizados, o material é testado e quando todos os itens de controle estão de acordo com os especificados, o lingotamento contínuo pode ter início.

O processo de lingotamento contínuo tem como finalidade a formação de tarugos que são conformados para terem seus usos finais. O aço líquido presente na panela é despejado em canais que possuem refrigeração em suas paredes e refrigeração externa, auxiliando na moldagem e solidificação da matéria prima, que normalmente termina o processo em formato de paralelepípedo.

Dessa forma, esses tarugos são utilizados no processo de laminação para dar continuidade na formação dos produtos finais de aço.

### 2.1.2 Laminação à Quente

O processo de laminação a quente faz parte de uma etapa essencial na fabricação do aço. Assim como a aciaria, o processo de laminação tem uma das posições iniciais na cadeia do aço, dessa forma tudo o que pode vir a acontecer nesse processo pode afetar todo o caminho restante da matéria prima.

Esse processo consiste na passagem do tarugo, que é fornecido pela aciaria, em diversos cilindros laminadores até a obtenção da forma desejada, tanto de material final como de matéria prima intermediária para o processo. Essa conformação do tarugo de aço inicia-se na área do forno, onde o material é reaquecido acima da temperatura de recristalização. Isso é feito com o intuito de reduzir a resistência à deformação plástica e permitir a recuperação dos grãos do metal, evitando o encruamento durante o processo de redução de área do material. O

aquecimento desse material é necessário pois no processo inicial de conformação do material as reduções que acontecem na seção transversal dele são muito expressivas.

Após a passagem no forno, o material é conformado em canais de laminação, onde ele comprime e assume outra forma cilíndrica que vem a possuir uma menor área transversal que a forma inicial. Dentre esses canais de laminação existem três classificações: o trio, os passes médios e os passes acabadores. O primeiro passe de todos é a gaiola trio, que é composta por três passes de laminação, onde o material faz um caminho de zigue zague entre eles. No trio acontecem os maiores percentuais de redução de todo o processo, isso porque é o momento que o material retém mais temperatura e acaba facilitando o processo de conformação.

Após a maior redução ter ocorrido, o material, que já está em formato de barra de aço, passa pelos trens médios que são gaiolas de laminação com canais um pouco menores do que o trio e que começam a arredondar a barra de ferro. No final da laminação a barra passa pelos trios acabadores, onde o processo de finalização do material laminado acontece. Nesta etapa os vincos dos rolos de laminação já estão menores e dão o acabamento final para o produto, podendo ser: acabamento liso na superfície do material (como de fio máquina), acabamento nervurado (como vergalhões para construção civil), em formato de perfis metálicos (como perfil I e U) ou barras chatas e cantoneiras.

### 2.1.3 Laminação à frio

O processo de laminação a frio tem início com um dos produtos oriundos da etapa de laminação à quente, o fio máquina. Esse tipo de conformação realizado no material é utilizado amplamente na fabricação de aços planos, que são aços que possuem sua largura como dimensão mais representativa. No caso do processo siderúrgico estudado, ele está sendo implementado para fabricação de aços longos, que são aços que possuem seu comprimento longitudinal como dimensão mais representativa. Por ser um processo de fabricação relativamente novo para confecção de vergalhões, ele herda alguns aspectos da trefilação tradicional, mas ganha em tempo de produção e desempenho da máquina.

Esse processo de laminação a frio estudado é composto por um conjunto de cassetes que realizam a conformação do material, diferentemente do processo de trefilação tradicional que utiliza feiras. Pode-se observar na Figura 2 a diferença entre esses dois mecanismos.



Figura 2 – Cassete laminador à esquerda e feira à direita. [BERALDI, 2012]

O mecanismo de feira é mais delicado e precisa de ajustes mais detalhados, ele é preparado por meio de um processo de usinagem e necessita manutenção com tempos menores do que os cassetes laminadores, em torno de uma semana de uso. Mesmo com um sistema mais robusto do que o de feiras, os cassetes laminadores conseguem produzir um material com alta qualidade superficial e de diâmetros baixos, dependendo do número de passes utilizados nas reduções de área.

Para produção do vergalhão CA60 4,20mm, a fabricação do material final se inicia na soldagem dos fios máquinas. Essa solda é realizada por arco elétrico e une o fio máquina em um único ponto. Isso torna possível utilizar o material oriundo da laminação a quente de forma contínua e ininterrupta. Ou seja, o início de um fardo de fio máquina é soldado no final de outro, fazendo o desbobinamento dos fardos acontecer sem necessidade de parar o processo. Após a etapa de solda, o material é conduzido por um sistema de decapagem física, onde o fio máquina passa por um conjunto de roletes sendo tracionado e comprimido. Essa etapa faz com que a carepa superficial da matéria prima se desprenda do fio máquina e não passe para as etapas seguintes. Seguindo para a lubrificação do fio máquina, que é de suma importância para o processo pois garante que o aço não tenha atrito com as peças que vão realizar sua redução e entre o próprio material quando for ser acumulado nas bobinas. Dessa forma, ele se encontra pronto para ser conformado à frio.

Os cassetes laminadores são essenciais para essa etapa do processo, eles possuem dois conjuntos de rolos, cada um com 3 discos que se encontram dispostos a 120° entre eles. Pode-se observar na Figura 3 um esquema de posicionamento dos conjuntos de rolos dentro dos cassetes.

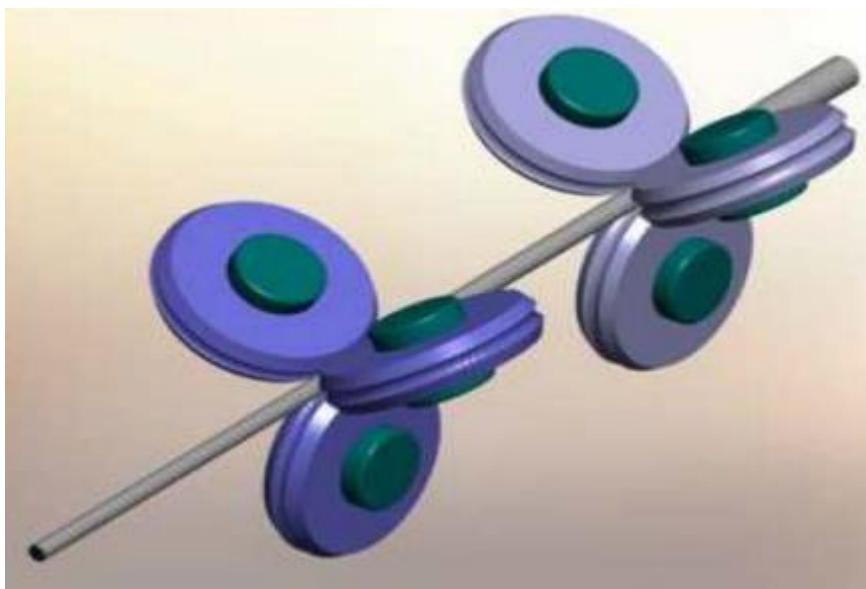


Figura 3 – Esquema de posicionamento dos conjuntos de rolos dentro de um cassete de laminação à frio. [ROCHA, 2012].

Cada conjunto de rolos realiza um percentual de redução absoluta na área de seção transversal do fio máquina, para chegar no percentual de redução absoluta de cada passe utiliza-se a Lei da Constância de volume, apresentada na Equação 1.

$$\varphi_A = -\ln \frac{A}{A_0}$$

Equação 1 – Lei de Constância de volume. [SCHAEFFER, 2004]

Sendo:

$A$  – Área transversal final do fio de aço;

$A_0$  – Área transversal inicial do fio de aço;

$\varphi_a$  – Deformação real da área transversal do fio de aço.

Para que o material possa ser conformado, um conjunto de bobinas realiza os esforços de tração no fio máquina para que ele seja movimentado pelo conjunto de cassetes.

O primeiro cassete possui a função principal de realizar a maior parte de redução de área do fio máquina. Assim, o último cassete fica responsável pelo acabamento do material. Dessa forma, o trio final de rolos presentes nesse sistema realiza a finalização superficial do material, fazendo com que ele fique arredondado e com as marcações nervuradas de um vergalhão para concreto armado. Após o processo de laminação a frio, o arame nervurado passa pelo processo de endireitamento ou enrolamento do vergalhão. O processo de endireitamento consiste em um conjunto de roletes na vertical e horizontal, que por meio da pressão exercida no material, fazem o material final ficar reto e aliviar tensões superficiais. Para fabricação do material em rolo, o vergalhão passa por um bobinador que faz o material tomar forma espiralada e é colocado em um suporte para ser amarrado e transportado.

O produto final passa por uma série de testes que seguem os parâmetros da norma ABNT 7480, de arames nervurados para concreto armado. Alguns dos pontos indicados nessa norma é o limite de escoamento do material CA60 de 600 MPa e o limite de ruptura. A norma exige que o limite de escoamento do material seja superior ao limite de ruptura desse material em 5%. São retiradas amostras desses arames nervurados e elas são ensaiadas em uma máquina de tração para a obtenção de todos os dados necessários, seguindo os parâmetros normatizados para realização dos testes.

## **2.2 Elementos do processo de laminação à frio**

Dois fenômenos de suma importância para o processo de laminação a frio são o encruamento do material e a força de trefilação.

### **2.2.1 Encruamento**

O encruamento é um fenômeno físico que é caracterizado pelo aumento de dureza e resistência do material à medida que ele é deformado plasticamente. Essa mudança de propriedades físicas da matéria prima acontece quando o material sofre a deformação em temperatura ambiente. O processo é caracterizado pelo trabalho a frio porque a temperatura de trabalho é muito abaixo da temperatura absoluta de fusão do metal utilizado.

Durante o processo de encruamento do material, ele acaba tendo impacto em outras propriedades do aço, dentre elas a ductibilidade. Com o aumento da dureza, o material tende a ter mais dificuldade para deformar antes de vir a fraturar. Dessa forma, o ganho que se tem no aumento da tensão de escoamento do metal, também acaba refletindo na diminuição do potencial do material de alongar.

### **2.2.2 Força de trefilação**

A força de trefilação é a força necessária para que seja possível realizar o processo de trefilarão em algum material. Para o processo de laminação a frio, o conceito que deve ser utilizado é muito similar ao conceito de uma trefila de fieiras. Dessa forma, a força é caracterizada com base no esforço realizado pelos motores do laminador a frio para puxar o material, fazendo com que ele passe entre os rolos do cassete e aconteça a deformação plástica do aço. O ponto de atenção com esse parâmetro de processo é a força máxima de trefilação. Ela leva em consideração a tensão de escoamento do material e a área da seção transversal dele, podendo observar fórmula na Equação 2.

$$F_{m\acute{a}x} = A_{stv} * kf_v$$

Equação 2 – Força máxima de trefilação.[ADAPTADA MOURÃO, 2007]

Sendo:

$F_{m\acute{a}x}$  – Força máxima de tração;

$A_{stv}$  – Área da secção transversal do vergalhão;

$kf_v$  – Tensão de escoamento do material do vergalhão após a laminação à frio.

Pode-se analisar por meio da Equação 2 que a força de trefilação é diretamente proporcional à tensão de escoamento do material utilizado. Considerando a área transversal do vergalhão constante, chega-se na conclusão de que a maior força de trefilação possível é a força aplicada para chegar na tensão de escoamento do material. Dessa forma, caso a força de trefilação venha a igualar ao seu valor máximo permitido, o material vai escoar e consequentemente quebrar logo após, impedindo que o processo de laminação a frio tenha continuidade.

### 3. METODOLOGIA

#### 3.1 Observação

Seguindo a metodologia MASP, os primeiros passos do projeto consistiram na observação do fenômeno e conversa com o time operacional. A metodologia é baseada no método *Plan Do Check and Act* (PDCA), na Figura 4 pode-se observar o ciclo do MASP e como a metodologia é dividida em etapas.



Figura 4 – Etapas da metodologia utilizada no projeto. [MASP: CONHEÇA A METODOLOGIA E COMO USAR NA GESTÃO DE QUALIDADE, 2023]

A equipe trouxe relatos sobre a produção do vergalhão CA60 4,20 mm e quais eram os fatores que fazem a produtividade ideal desse item ser mais difícil de ser alcançada comparada com outros itens de vergalhão reto CA60 produzidos na célula. Alguns desses relatos envolviam a dificuldade de soldar o material no início do processo com precisão, a facilidade de o material enrolar em si mesmo (enleio) e do material quebrar quando alguma anormalidade de processo acontecia.

### 3.2 Análise

Com base nessas informações, deu-se início à etapa de análise do projeto. Dessa forma, foram retirados dados do sistema operacional (sistema que realiza o controle de produção das máquinas online) para montagem do perfil de perdas do material analisado. Utilizando os dados do perfil de perdas, pode-se montar um gráfico de Pareto para observar quais eram as perdas que significavam 80% das paradas que acontecem no processo. Esses dados foram coletados na área onde ocorre a conformação do material, pois esse é o local onde ocorrem os maiores impactos e maiores perdas de processo. A coleta das informações foi feita com base no código final dos matérias que tem como produto o vergalhão 4,20 mm, tanto reto quanto material em rolo e dobrado. Também, os dados referentes ao processo foram coletados de todas as 5 máquinas que produzem esse tipo de material. Observa-se na Figura 5 a disposição das paradas no gráfico de Pareto.

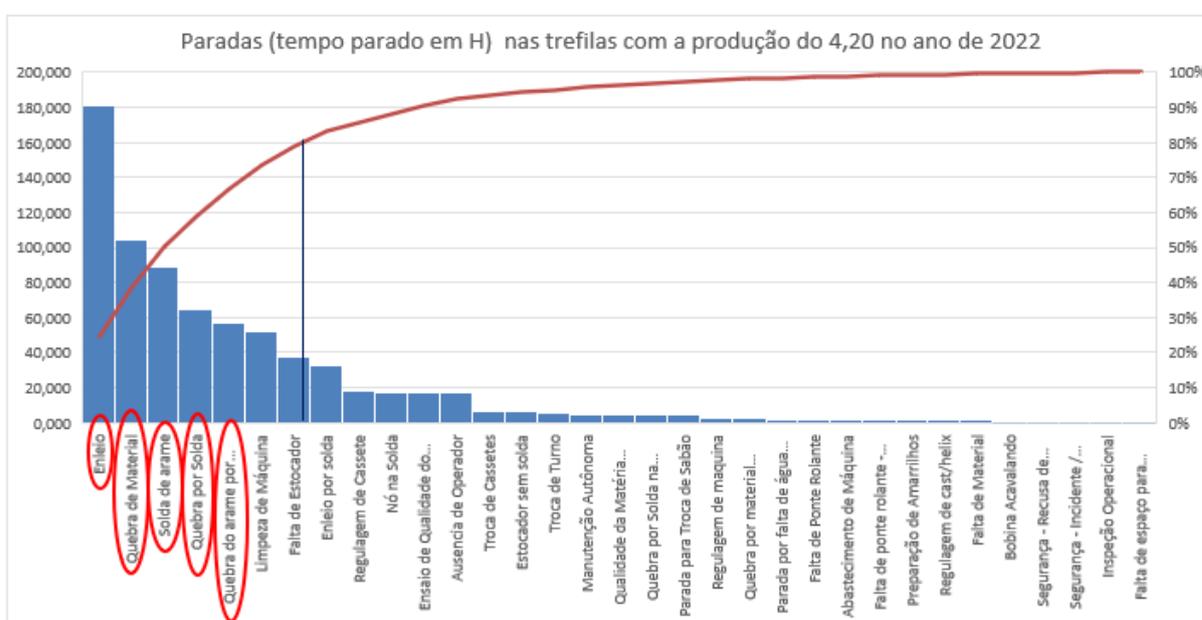


Figura 5 – Gráfico de Pareto para perdas no material 4,20 mm. [AUTORAL]

Pode-se observar no gráfico apresentado que os relatos trazidos pelo time operacional realmente aparecem como sendo parte dos 80% das paradas que mais tem impacto na produção desse material. Ou seja, o impacto de 7 motivos de interrupção é que eles representam 80% do tempo das paradas das máquinas que produzem o material 4,20 mm. Pode-se destacar os motivos de interrupção circulosados em vermelho, que são os mesmos que foram relatados pela equipe operacional durante a etapa de observação do projeto. Sendo eles: Enleio, quebra de material, quebra por solda (solda de arame) e quebra de arame por enleio.

Após realizar essa análise, foi necessário entender quais eram as causas raízes de cada uma dessas interrupções geradas pelo processo. Para essa etapa, uma reunião foi realizada com o time operacional e de apoio de processo com o intuito de mapear as possíveis causas que originavam as paradas. Essas paradas foram listadas e utilizou-se uma ferramenta de desdobramento de informações chamada *Ishikawa*, ou espinha de peixe. Essa ferramenta utiliza alguns direcionadores para que sejam elencadas possíveis causas do problema principal. Pode-se observar na Figura 6 abaixo um modelo do diagrama com os itens que foram listados como possíveis causas dos problemas retirados do gráfico de Pareto.



Figura 6 – Diagrama de *Ishikawa* aplicado ao estudo. [AUTORAL]

Após o desenvolvimento com a equipe da árvore de causas, foram escolhidos 3 itens que eram os mais expressivos para os problemas que foram mapeados. Utilizando a ferramenta dos 5 Porquês, pode-se chegar a causa raiz que é comum entre as paradas de máquina observadas no gráfico de Pareto. Na Tabela 1 abaixo, pode-se observar quais foram as respostas de cada etapa para obter a possível causa raiz do problema de performance do material 4,20 mm CA60. Nestes casos, só foram necessárias três perguntas para cada causa antes de chegar a causa raiz do problema.

Tabela 1 – 5 Porquês aplicados ao estudo. [AUTORAL]

Causa	Por quê?	Por quê?	Por quê?
Mais difícil de soldar o FM 6,35 mm	Porque a solda desse material quebra mais fácil	Porque é mais difícil de alinhar o arame na máquina de solda	Porque o diâmetro do material 6,35 mm é pequeno
Manuseio do material 6,35 mm é mais complicado	Porque é mais difícil de empurrar para a lança (não trancar) e arrumar enleios já existentes	Porque ele é mais maleável e tem mais espiras	Porque o diâmetro do material 6,35 mm é pequeno
Material 6,35 mm vem com mais enleios da laminação	Porque ele "enrosca" mais no processo de laminação	Porque é mais difícil do material cair alinhado no fomarador de espiras	Porque o diâmetro do material 6,35 mm é pequeno

Com a identificação da causa raiz sendo o diâmetro do fio máquina 6,35 mm ser menor do que dos outros utilizados no processo, deu-se início à outra coleta de dados. Assim, a captação dos dados foi focada em comprovar que a queda de desempenho do material CA60 4,20 mm com relação aos outros materiais produzidos na planta (5 mm e 6 mm) dá-se devido a diferença no fio máquina utilizado para o processo de laminação à frio.

Para que essa hipótese levantada pudesse ser comprovada, foram comparados alguns dados do material 5 mm, que utiliza o fio máquina 7 mm, com o material 4,20 mm que utiliza o fio máquina de 6,35 mm para sua fabricação. Foi decidido focar no principal problema que representa a cabeça de Pareto do perfil de perdas, nesse caso são as paradas devido ao enleio do material. Também foi utilizado o sistema industrial MES para coleta de dados, focando no tempo de máquina parada devido aos enleios para a produção do material 4,20 mm comparando com a produção do material 5 mm no ano de 2022. Escolheu-se o fio máquina 7 mm para comparação devido a maior proximidade de redução de área com relação ao material 6,35 mm. Utilizou-se o ano de 2022 como base para análise de dados devido à proximidade com o processo atual (menos modificações devido ao pouco tempo decorrido da análise) e pela normalidade da demanda de produção (o ano de 2021 possuiu uma demanda de mercado maior do que a normalidade, podendo distorcer os dados). Pode-se observar o resultado dessa análise na Figura 7.

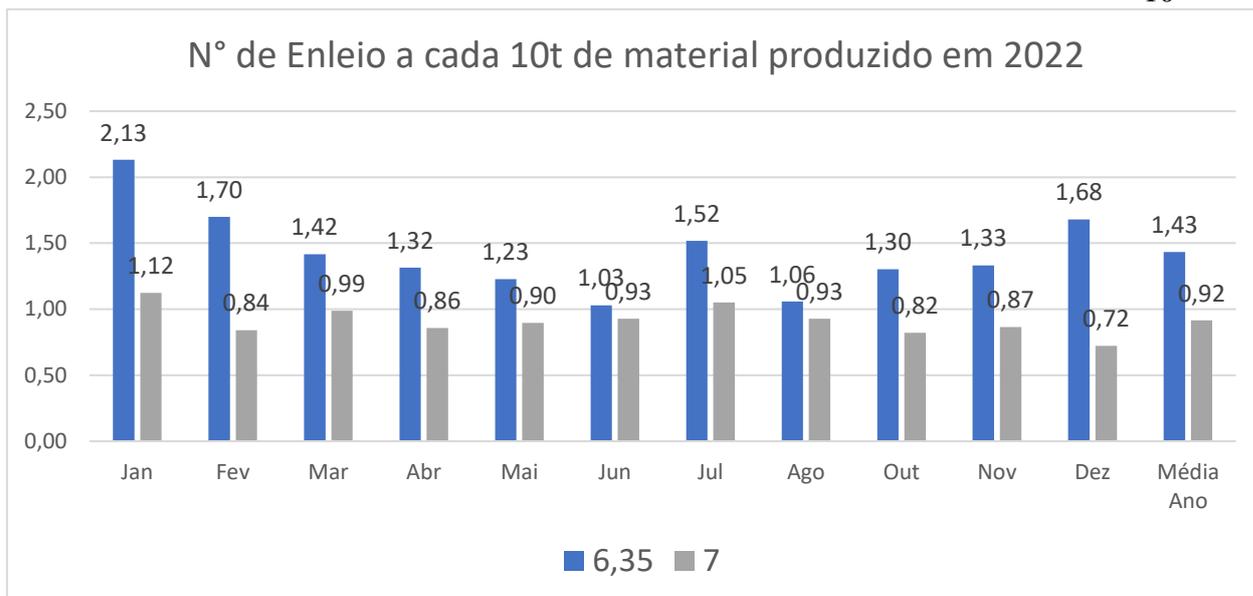


Figura 7 – Comparação de número de enleios. [AUTORAL]

Avaliou-se que o fio máquina 7 mm realmente possui um desempenho superior ao fio máquina 6,35 mm, com uma média de 0,51 enleios a menos a cada 10 t de material produzido. Pode-se observar que o enleio é expressivo em ambos os fios máquina, porém comparando os materiais é notável o desempenho melhor do fio máquina 7 mm, um material já utilizado na planta. Os dados de número de enleios foram normalizados em função da produção em toneladas, para que a quantidade de material produzida não impactasse no número total de enleios. Também foram analisados dados da laminação com relação à produção do fio máquina 6,35 mm com o fio máquina que possui o melhor desempenho no processo da laminação, o 7mm. Pode observar na Figura 8 uma relação de rendimento metálico (material que inicia a produção/ material no final da produção).

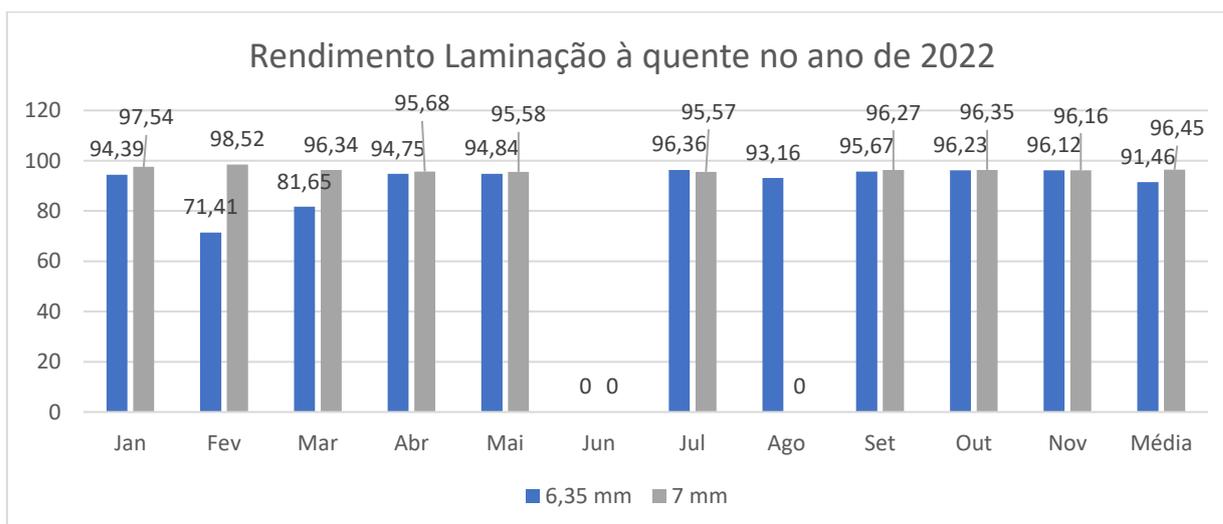


Figura 8 – Rendimento de laminação em 2022 para diâmetros de fio máquina 6,35 mm x 7 mm. [AUTORAL]

Para análise, foram retirados os dados do MES de junho de ambos os materiais devido à parada da laminação e do mês de agosto do fio máquina 7 mm (não foi produzido esse mês), foram considerados *outliers* da base de dados. Com base nas médias dos meses que foram considerados para o cálculo, o fio máquina 7 mm possui um rendimento 4,99% maior do que o rendimento do material 6,35 mm. Ademais, em conversas com o time da laminação, a bitola 7 mm demonstra mais estabilidade no processo, ocasionando menos paradas e intervenções no processo para a produção do material.

### 3.3 Plano de ação

Com a causa raiz identificada sendo o diâmetro do fio máquina, tem-se como possível solução a mudança do material 6,35 mm para uma bitola maior, o 7 mm. Escolheu-se o 7 mm devido a menor mudança com relação a redução do material e a maior estabilidade de produção. Isso tanto no processo de laminação à frio quanto no de laminação à quente. Obter o vergalhão CA60 4,20 mm com o fio máquina 8 mm exigiria uma redução total muito grande, fazendo com que o processo se torne inviável. Outra vantagem na possível solução de troca de matéria prima para o fio máquina 7 mm é o fato de o material já ser utilizado na planta. Assim, sabe-se que o processo de conformação com ele é eficaz e possui um desempenho satisfatório na produção.

Dessa forma, criou-se um plano de ação para produção do material vergalhão CA60 4,20 mm utilizando o fio máquina 7 mm ao invés do atualmente utilizado, 6,35 mm. Na Tabela 2 é possível o plano de ação que foi traçado no início do projeto.

Tabela 2 – Plano de ação inicial. [AUTORAL]

Ações
Conversa com especialistas de processos da empresa
Benchmarking com outras unidades e áreas da empresa
Cálculo de redução nos passes já existentes nas máquinas
Teste com material 7 mm

## 4. RESULTADOS

### 4.1 Resultados do primeiro plano de ação

Com a realização do processo de benchmarking com outras unidades de grupos de siderurgia, observou-se que nenhum maquinário com o mesmo layout realiza o processo de produção do material 4,20 mm com o fio máquina 7 mm. Os únicos processos que utilizam esse fluxo de produção são os de laminação à frio para produção de espulas (material disposto em formato de tronco de cone com uma abertura no centro) de vergalhão. Porém, eles utilizam um layout de máquinas diferentes do processo estudado, possuindo uma redução a mais, nesse caso um cassete a mais no processo.

Nas conversas realizadas com a equipe técnica e especialistas do processo de laminação a frio, listaram-se alguns pontos de extrema importância com relação a mudança de fio máquina para o processo de produção do material 4,20 mm com o layout original das máquinas. O principal ponto listado foi se o maquinário possuía potência suficiente para realizar a redução de área necessária no processo de conformação do material inicial 7 mm em 4,20 mm de diâmetro no final. Para isso, foi utilizada uma planilha desenvolvida internamente na empresa, que calcula a redução realizada em cada passe de cassete e compara com a potência disponível do motor utilizado no processo de laminação à frio. Essa planilha utiliza um conceito de percentual de deformação simplificado, utilizando a Equação 3.

$$\varphi_s = \frac{A - A_0}{A_0}$$

Equação 3 – Deformação simplificada. [AUTORAL]

Sendo:

A – Área final do fio de aço após passar por um dos passes;

A<sub>0</sub> – Área do fio de aço antes de passar por um dos passes;

φ<sub>s</sub> – Deformação simplificada da área se secção transversal do fio de aço.

Com base nos resultados encontrados, provou-se que para uma redução acumulada de 64%, a potência do motor do maquinário estudado conseguiria atender a força de trefilação necessária para realizar o processo.

Utilizando as informações avaliadas foram realizados diversos testes com a configuração original da máquina, utilizando somente dois cassetes para a realização do processo de laminação à frio. Foram feitas variações no tipo de aço empregado e nos cassetes que são utilizados na fabricação do material 4,20 mm e 5 mm, entre o primeiro e segundo passes. A decisão de realizar os testes com dois tipos de aço, vem do fato de que o aço com menor carbono tende a ter maior maleabilidade, ser menos duro e ter menor efeito de encruamento nele, logo a força de trefilação para que o material venha a fraturar também deve ser maior. Assim é possível exercer uma força de trefilação maior para maiores reduções sem medo do rompimento do fio máquina durante o processo.

Outro ponto de extrema importância é a adesão às normas brasileiras para fabricação de vergalhões para concreto armado. Dessa forma, devido a questões de segurança das construções, a relação apresentada na Equação 4 deve ser respeitada.

$$\frac{Le}{Lr} \geq 1,05$$

Equação 4 – Relação de segurança para arames de concreto armado CA60.[NBR 7480,2007]

Sendo:

Le – Tensão de limite de escoamento em MPa;

Lr – Tensão de limite de ruptura em MPa.

Pela norma NBR7480 que normatiza as condições de entrega de um vergalhão para construção civil, a relação presente na Equação 4 necessita atingir o valor mínimo de 1,05. Com aço que possui o teor de carbono mais baixo, o processo de encruamento do material não tem tanto impacto na relação pois, o aço tende a endurecer menos. Logo, é mais difícil modificarmos o limite de escoamento e de resistência, mantendo assim a relação que é descrita por norma dentro dos padrões desejados.

O resultado dos testes pode ser observado na Tabela 3.

Tabela 3 – Resultados dos testes. [AUTORAL]

Fio máquina	Aço	1° cassete	2° cassete	Resultado
7 mm	1013	4,20 mm	4,20 mm	Quebra no primeiro cassete
7 mm	1013	5 mm	4,20mm	Fora da massa linear
7 mm	1013	4,20 mm	5 mm	Quebra no primeiro cassete
7 mm	1015	5 mm	4,20mm	Quebra no primeiro cassete
7 mm	1015	4,20 mm	5 mm	Quebra no primeiro cassete

Os testes com a configuração original da máquina não foram bem-sucedidos, mesmo sendo realizados com variação do tipo de aço e de configurações de cassetes. Observou-se que todos os testes apresentaram quebra do fio máquina no primeiro cassete. Nos casos em que as quebras não ocorreram, o vergalhão saiu com o diâmetro maior do que o especificado pela norma, que é medido pela massa linear do material. Nestes casos o valor da massa linear ficou maior do que o valor máximo especificado pela norma NBR7480, que é +/- 6% do valor nominal do diâmetro do material avaliado.

Avaliando as reduções realizadas nos cassetes, o primeiro cassete realiza uma redução de 43%, já o segundo cassete de 37%. Pode-se observar que a redução de área mais brusca acontece no primeiro cassete do maquinário. Sinalizando que a redução de 43% em condições reais de operação realiza uma força de trefilação maior do que a força de ruptura dos materiais.

Com base nos estudos realizados, a causa mais provável da falha nos testes devido à quebra do fio máquina dá-se pela força de trefilação ser maior do que a força necessária para a ruptura do material. O efeito do encruamento também possui um impacto importante nos testes, devido aos maiores esforços nas reduções do material, o encruamento tem um impacto relevante de enriquecimento do material, fazendo com que ele quebra com maior facilidade no primeiro cassete. Dessa forma, foi realizada a elaboração de um novo plano de ação para contornar os problemas presentes na primeira hipótese de solução que foi elaborada.

#### 4.2 Resultados do segundo plano de ação

Utilizando os resultados encontrados com os testes e a conversa com outras unidades de siderúrgica, pode-se notar que os processos que utilizam o fio máquina 7 mm para fabricação do material 4,20 mm são os de laminação a frio para produção de espulas. Porém, o layout apresentado na produção do material CA60 4,20 mm em espulas é com 3 cassetes (6 passes de redução); com essa maior distribuição de reduções a força de trefilação se torna menor nos passes e o fio máquina não quebra nos cassetes.

Dessa forma, uma das possíveis soluções listada foi a adição de um passe de redução no processo de laminação à frio do material CA60 4,20 mm reto. Nesse caso, a adição de um “meio cassete”, que também é chamado de cabeça turca. Esse meio cassete teria a função de distribuir melhor as reduções ao longo dos passes, fazendo com que a força de trefilação seja diluída e não se iguale à força necessária para atingir o limite de escoamento do material. Adotando essa ação, um novo plano de ação foi elaborado, na Tabela 4 tem-se as ações.

Tabela 4 – Ações do segundo plano de ação. [AUTORAL]

Ações
Orçamento de um meio cassete
Cálculos de diluição de custo fixo do meio cassete
Cálculo da TIR (taxa de retorno sob investimento) do projeto
Avaliação econômica do projeto

Para que seja possível avaliar o retorno do projeto economicamente, existe a necessidade de orçar os custos de modificação do layout da máquina e ganhos existentes no processo. Dessa forma, foi feito o levantamento de orçamentos para a compra do meio cassete e de serviços para mudança do layout da máquina. Na Tabela 5 pode-se observar os valores estimados dos custos de implementação da solução do segundo plano de ação proposto.

Tabela 5 – Levantamento de investimento na implementação do projeto. [AUTORAL]

Investimento para implementação do projeto		
Item	Valor	Total
Meio cassete	R\$ 43.000,00	R\$ 53.000,00
Instalação	R\$ 10.000,00	

Após o levantamento de custos, se torna necessário a estimativa de ganhos do projeto. A análise foi realizada por meio de duas ferramentas que se complementam: diluição de custo fixo e Taxa de Retorno sob Investimento (TIR).

Utilizando a diluição de custo fixo como primeira análise, leva-se em conta alguns fatores. O primeiro deles é a produção média de material por mês, que nesse caso fica em torno de 300 toneladas de vergalhão CA60 4,20 mm. Outro ponto é o custo fixo base de material, ou seja, o valor não variável que é gasto para produção de cada tonelada desse material ao mês. Também deve-se considerar a produção do material por hora em toneladas e disponibilidade da máquina (capacidade produzida da capacidade total disponível da máquina). Por último, calcula-se o tempo ganho com as mudanças propostas. O tempo ganho com o projeto é mensurado na Tabela 6.

Tabela 6 – Ganho de tempo em horas a cada 10t de material produzido comparando o fio máquina 6,35 mm com o fio máquina 7 mm. [AUTORAL]

	Ganho de tempo em horas a cada 10 t de material produzido		
	6,35 mm	7 mm	Ganho de tempo
Jan	0,36	0,2	0,16
Fev	0,26	0,14	0,12
Mar	0,21	0,14	0,07
Abr	0,21	0,13	0,08
Mai	0,19	0,12	0,07
Jun	0,16	0,14	0,02
Jul	0,25	0,14	0,11
Ago	0,14	0,12	0,02
Out	0,23	0,13	0,1
Nov	0,2	0,13	0,07
Dez	0,25	0,07	0,18
Média Ano	0,22	0,13	0,09

Dessa forma, o resultado dos cálculos apresenta o valor de redução de R\$ 3,20 no custo fixo da área por mês a cada tonelada de material produzido. Avaliando os ganhos acumulados em um ano tem-se um valor de R\$ 16.060,41 que seriam acrescidos aos lucros da empresa na aplicação da melhoria proposta.

Realizando a análise pela TIR, avalia-se o tempo de retorno financeiro do investimento ao longo de 10 anos. Para este projeto foi utilizado um investimento inicial apresentado na Tabela 5 e o valor de retorno anual sendo R\$ 16.060,41. Assim, chegou-se a um valor de 23% de depreciação do investimento ao ano, ou seja, o investimento termina de ser pago com os lucros do próprio projeto em torno de 4 anos de utilização.

Não foi possível realizar os testes com a nova configuração de máquina proposta pelo projeto devido à situação atual do mercado siderúrgico de baixa demanda. Dessa forma, não puderam ser alocados investimento no processo de produção estudado.

## 5. CONCLUSÃO

Alto desempenho com baixo custo é o que todo negócio busca nos dias de hoje. Assim, o estudo realizado comprova que existe uma defasagem entre o desempenho na produção do vergalhão CA60 4,20mm reto e em rolo comparado ao desempenho de produção dos outros itens da linha CA60 no processo de laminação à frio.

Dessa forma, com a causa raiz do problema sendo identificada, o primeiro plano de ação listado atacou o problema sem investimento financeiro algum. Porém, em testes realizados, as modificações propostas no primeiro plano de ação não podem ser utilizadas, fazendo com que um segundo plano de ação fosse elaborado. Esse plano de ação demanda maior investimento financeiro por parte da empresa, com custo de implementação de R\$ 53.000,00 e retornos financeiros ao ano de R\$ 16.060,41. Avaliando o tempo de retorno de investimento do projeto, tem-se 23% de TIR, indicando que o projeto pagará o seu valor em quatro anos de uso das ferramentas implementadas.

Entende-se que esse projeto não possui um retorno financeiro tão alto para o negócio de maneira imediata e as demandas de vergalhão CA60 4,20 mm reto e rolo estão abaixo do que era esperado do mercado atualmente. Com a baixa de procura do mercado e o custo elevado de investimento, o projeto não é viável de implementação de maneira imediata. Porém, deve ser revisitado e ter sua viabilidade de implementação reavaliada em momentos de captura financeira para investimento em melhorias na planta e momentos de alta demanda de mercado.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 7480: Aço destinado a armaduras para estruturas de concreto armado, 2007.

BERALDI, S, R. MASIERO, P . ET. AL. **“A trefilação com o uso de cassetes laminadores e suas vantagens em relação ao processo tradicional utilizando”**. São Paulo: ABM, 2012.

CALLISTER JR., W. D. **“Ciência e Engenharia de Materiais: uma introdução”**. Editora LTC, 7ª edição, 2008.

DADOS DO SETOR. Instituto do aço Brasil, 2022. Disponível em: <<https://acobrasil.org.br/site/dados-do-setor/>>. Acesso em: 12, Junho de 2023.

FELÍCIO, A. E. **“Estudo da implementação de conceito da produção enxuta para redução de resíduos em uma manufatura do ramo siderúrgico”**. Trabalho de Diplomação de Engenharia de Produção UFJF, Juiz de Fora, 2012.

MARMENTINI, L. **“Estudo do efeito Bauschinger em um arame trefilado CA60 4,20 mm para utilização em concreto armado”**. Trabalho de Diplomação do departamento de Engenharia Mecânica UFRGS, Porto Alegre, 2016.

MASP: CONHEÇA A METODOLOGIA E COMO USAR NA GESTÃO DE QUALIDADE.Moki, 2021. Disponível em: <<https://www.site.moki.com.br/post/metodologia-masp>>. Acesso em: 30, Agosto de 2023.

MOURÃO, M. B. ET. AL. **“Introdução a siderurgia”**. São Paulo: ABM, 2007.

PINTO, F, D. **“Velocidade de Trefilação e se Efeito no Encruamento e no Acabamento Superficial de um Aço SAE 1008”**. Dissertação de Doutorado REDEMAT, Ouro Preto, 2016.

POPOV, E. P. **“Resistência dos Materiais”**. Ed. Prentice-Hall, Brasil, 2ª edição, 1984.

ROCHA, F. A. C. da **“Desenvolvimento de Um Sistema de Ventilação Forçada Para Secar o Fio Máquina na Laminação a Frio de Vergalhões”**. Dissertação de Mestrado PGETEMA, Porto Alegre, 2012.

SCHAEFFER, L. **“Conformação Mecânica”**. Ed. Imprensa Livre, Porto Alegre, 2ª edição, 2004.