

**FUNDAÇÃO OSWALDO ARANHA  
CENTRO UNIVERSITÁRIO DE VOLTA REDONDA  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA  
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**JÉSSICA PIRES DA SILVA**

**SAMUEL DEAMBROSIS BARCELLOS**

**TIAGO ORTIZ ARANTES DA SILVA**

**RECUPERAÇÃO DO EIXO DE MANDRIL POR EMENDA INTERFERENTE E  
SOLDAGEM**

**VOLTA REDONDA  
2018**

**FUNDAÇÃO OSWALDO ARANHA**  
**CENTRO UNIVERSITÁRIO DE VOLTA REDONDA**  
**CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**  
**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**RECUPERAÇÃO DO EIXO DE MANDRIL POR EMENDA INTERFERENTE E  
SOLDAGEM**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Mecânica do UniFOA como requisito à obtenção do título de bacharel em Engenharia Mecânica.

Alunos:

Jéssica Pires da Silva

Samuel Deambrosis Barcellos

Tiago Ortiz Arantes da Silva

Orientador:

Prof.:Dr. Alexandre Alvarenga Palmeira

**VOLTA REDONDA**  
**2018**

## **TERMO DE APROVAÇÃO**

Jéssica Pires da Silva  
Samuel Deambrosis Barcellos  
Tiago Ortiz Arantes da Silva

### **RECUPERAÇÃO DO EIXO DE MANDRIL POR EMENDA INTERFERENTE E SOLDAGEM**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à banca examinadora como requisito parcial para obtenção do Bacharelado em Engenharia Mecânica no Centro Universitário de Volta Redonda – UniFOA, defendido e aprovado em \_\_\_ de \_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ pela banca examinadora constituída por:

---

Prof. Dr. Alexandre Alvarenga Palmeira.  
Orientador

---

Prof. Dr. Alexandre Fernandes Habibe  
Membro

---

Prof. Esp. Antônio de Pádua Sobreira Leal

## **DEDICATÓRIA**

Este trabalho é dedicado primeiramente a DEUS por mais este sonho realizado.

Dedicamos ainda a todos aqueles que de certa forma nos ajudaram ao longo de toda a nossa caminhada.

Aos nossos pais, familiares, amigos, professores e todos aqueles que torceram por nós.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradecemos a Deus por nos dar saúde e nos permitir alcançar mais esse objetivo em nossas vidas.

Agradecemos também aos nossos familiares, pela compreensão, paciência, apoio e confiança passada nos momentos difíceis.

A todos os quais de forma direta, ou indireta fizeram parte de nossa caminhada.

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 01 – Fluxograma da Linha de Produção .....	21
FIGURA 02 – Processo da Linha .....	22
FIGURA 03 – Eixo do Mandril.....	23
FIGURA 04 –Curvas S-N .....	25
FIGURA 05 – Etapas 1 e 2 da Trinca por Fadiga .....	26
FIGURA 06 – Etapas da Vida em Fadiga .....	27
FIGURA 07 – Modelo Linear de Miner .....	28
FIGURA 08 – Fluxograma do Roteiro de Trabalho adotado para o Projeto.....	30
FIGURA 09 – Etapas para Análise do Problema .....	31
FIGURA 10 – Desenho de Projeto do Eixo de Mandril.....	32
FIGURA 11 – Projeto para Eixo/Ponta Postiça.....	33
FIGURA 12 – Montagem dos Elementos .....	33
FIGURA 13 – União dos Componentes por Soldagem.....	34
FIGURA 14 – Corpo de prova maciço .....	35
FIGURA 15 – Corpo de prova emendado .....	36
FIGURA 16 – Inserção de valores do corpo de prova maciço ao programa Autodesk Inventor.....	37
FIGURA 17 – Representação gráfica do corpo de prova maciço Autodesk Inventor – submetido ao recurso das malhas (mesh) .....	38
FIGURA 18 – Seleção dos pontos de engaste e solicitação mecânica no corpo de prova maciço – via Autodesk Inventor.....	38
FIGURA 19 – Resultados obtidos das tensões máximas e mínimas (Von Misses) do corpo de prova maciço – via Autodesk Inventor.....	39
FIGURA 20 – Deslocamento, em unidade de milímetros, do corpo de prova maciço sob torção – via Autodesk Inventor .....	40

FIGURA 21 – Resultados obtidos, quanto aos valores de fator de segurança do corpo de prova maciço – via Autodesk Inventor.....	40
FIGURA 22 – Constatação do resultado do torque resultante do corpo de prova maciço – via Autodesk Inventor .....	41
FIGURA 23 – Representação gráfica do corpo de prova emendado – via Autodesk Inventor - submetido ao recurso das malhas (mesh) .....	42
FIGURA 24 – Seleção dos pontos de engaste e solicitação mecânica no corpo de prova com emenda interferente e soldada – via Autodesk Inventor.....	42
FIGURA 25 – Resultados obtidos das tensões máximas e mínimas (Von Misses) do corpo de prova com emenda soldada – via Autodesk Inventor.....	43
FIGURA 26 – Deslocamento, em unidade de milímetros, do corpo de prova maciço sob torção – via Autodesk Inventor .....	44
FIGURA 27 – Resultados obtidos, quanto aos valores de fator de segurança do corpo de prova com emenda interferente e soldada – via Autodesk Inventor.....	44
FIGURA 28 – Constatação do resultado do torque resultante do corpo de prova emendado – via Autodesk Inventor .....	45
FIGURA 29 – Fotografia dos dois modelos do corpo de prova utilizados no teste. Corpos maciços e corpos a serem emendados por soldagem.....	46
FIGURA 30 – Modelo do torquímeter utilizado no teste prático (com escala nas unidades de torque: branca – kgf.m / preta – Lbf.pé) .....	46
FIGURA 31 – Diagrama de representação de tratamento térmico de alívio de tensões do corpo de prova soldado, após operação de soldagem.....	47
FIGURA 32 – Deonstração da preparação dos corpos de prova.....	48
FIGURA 33 – Ilustração básica da maneira como foram realizados os testes para obtenção de valores de torque máximo, até o momento de cisalhamento dos corpos de prova.....	49
FIGURA 34 – Demonstração de resultados após torque estático máximo e cisalhamento dos corpos de prova .....	50
FIGURA 35 – Relação entre os critérios de falhas de Tresca e von Misses.....	51
FIGURA 36 – Representação das parcelas de torque da solda e da pinagem .....	53
FIGURA 37 – Representação das condições das cargas no corpo do eixo de maldril.....	59

FIGURA 38 – Teste gráfico realizado no programa Ftool Two Dimensional Frame Analysis.	60
FIGURA 39 – Gráfico de Soderberg, resultante dos cálculos do eixo de mandril.....	63
FIGURA 40 – Gráfico de correção da tensão normal pela influência do diâmetro .....	65
FIGURA 41 – Gráfico de correção da tensão normal pela influência da superfície .....	66
FIGURA 42 – Gráfico de tensão alternada .....	67
FIGURA 43 – Modo de aplicação das soldas na emenda de eixo de mandril .....	68
FIGURA 44 –Diagrama de representação de tratamento térmico de alívio de tensões do ponto soldado do eixo de mandril, após soldagem .....	68
FIGURA 45 – Caixa redutora da desbobinadora montada, ainda com o eixo quebrado .....	69
FIGURA 46 – Detalhe da fatura do eixo de mandril.....	70
FIGURA 47 – Eixo de mandril .....	71
FIGURA 48 –Desenho base para o demonstrativo da metodologia do reparo .....	72
FIGURA 49 – Usinagem da ponta portiça do eixo de mandril .....	73
FIGURA 50 – Montagem das partes à serem soldadas .....	73
FIGURA 51 – Processo de soldagem .....	74
FIGURA 52 – Usinagem do eixo apos soldagem .....	74
FIGURA 53 – Montagem do conjunto .....	75
FIGURA 54 – Linha do tempo dos resultados econômicos .....	78

## LISTA DE TABELAS

TABELA 01 – Valores referentes a usinagem do eixo .....	76
TABELA 02 – Valores referentes à usinagem da ponta postiça .....	76
TABELA 03 – Valores referentes ao reparo do eixo .....	77

## LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 01 – Demonstrativo de relação entre custos.....	79
---	----

## NOMENCLATURA

$\tau_c$  = Tensão de cisalhamento

$\tau_r$  = Tensão de ruptura

$\tau_e$  = Tensão de escoamento

$\tau_{m\acute{a}x}$  = Tensão máxima

$\tau_{m\acute{i}n}$  = Tensão mínima

$\tau_m$  = Tensão média cisalhante

$\tau_e$  = Tensão de escoamento cisalhante

$\tau_v$  = Tensão de alternante de von Mises

$\tau_n$  = Tensão de limite de resistência à fadiga

$\tau_{n'}$  = Tensão de limite de resistência à fadiga (corrigida)

$\sigma_m$  = Tensão média

$\sigma_e$  = Tensão de escoamento

$\sigma_v$  = Tensão variável, ou Amplitude

Z = Módulo de resistência da seção transversal

$K_f$  = Fator de concentração de tensões

$T_{m\acute{a}x}$  = Torque máximo

$T_{m\acute{i}n}$  = Torque mínimo

J = Momento de Inércia Polar

dc = Diâmetro de contato

de = Diâmetro externo

di = Diâmetro interno

$E_i, E_e$  = módulo de elasticidade dos materiais [daN/mm<sup>2</sup>]

ve = Coeficiente de Poisson

GPa = Giga Pascal (transformação para DecaNewton = \* 10<sup>2</sup> daN/mm<sup>2</sup>)

$I$  = Módulo de inteferência mínima entre as partes

$FS$  = Fator de segurança

$\mu$  = Coeficiente de ajuste para aço prensado

$L$  = Comprimento

$\sigma_{atr}$  = Parcela de tensão de atrito

$T$  = Momento torçor

$n$  = Rotação em [R.P.M.]

$P$  = Potência em cavalo-vapor (cv)

$\Delta$  = Relação de volume pela força aplicada em  $\left[ \frac{mm^3}{daN} \right]$

$M$  = Momento

$F_a$  = Força aplicada à montagem

## RESUMO

Este trabalho foi elaborado com base em uma metodologia para a aplicação do processo de recuperação de eixos mandris, quando submetidos à fadiga ou falha de equipamento levando-o a quebra. A metodologia utilizada é composta pelas etapas do roteiro de trabalho, em número de doze, sendo elas: projeto; matéria-prima; procedimento de soldagem; planejamento das atividades; tratamento térmico; soldagem das partes; montagem da ponta postiça no eixo; usinagem da ponta do eixo e da ponta postiça; usinagem; acabamento; inspeção final e análise dos resultados, as quais permitem organizar as etapas de reparo necessárias para recuperação do eixo. A linha de laminação a frio está diretamente ligada ao lucro de uma empresa, sendo necessário o pleno funcionamento dos componentes. Para recuperação dos eixos mandris dessa linha, foi estudado nesse trabalho o método de emenda soldada, sendo aplicado para reparo em casos de quebra de eixos emergenciais, uma vez que na falta de sobressalente, a linha de produção é afetada diretamente, sendo necessário um recurso imediato, que seja viável economicamente. A metodologia foi aplicada inicialmente em 01 caso, sendo esse caso 01, o reparo executado em um eixo mandril da desbobinadora nº 1 da linha de galvanização e funcionando com o método de emenda soldada até o presente momento. Para analisar o comportamento do material emendado com o material maciço, foram elaborados dois corpos de provas e realizado testes nos mesmo, comparando assim o comportamento de cada um, quando submetidos a tensões de cisalhamentos. O teste experimental número 1 é o ensaio dos corpos de provas, tanto o maciço, quanto o emendado, utilizando-se de um software para analisar o comportamento do material quando submetido a diferentes esforços. O teste experimental número 2 é baseado em dois corpos de provas experimentais, sendo um o maciço e outro o emendado, os quais são cisalhados com torquímetro, fornecendo dados para compará-lo com os valores do *software* do teste experimental número 1, analisando o comportamento dos materiais e a tensão máxima suportada por eles. O objetivo desse trabalho é conseguir soluções eficazes para recuperação do eixo, sendo possível restabelecer o eixo mandril e assim permitir o retorno das linhas de produção no menor prazo possível e confiabilidade. Aplicando a metodologia do fluxograma das etapas de execução serão abordados casos de sucesso de aplicação da técnica do método de emenda soldada que reduziram as perdas por lucro cessante e garantiram excelente desempenho operacional.

**Palavras-chave:** Eixo Mandril; Emenda Soldada; Diagrama de Soderberg.

## ABSTRACT

This paper was elaborated based on a methodology for the application of the process of recovery of mandrels, when submitted to the failure due to fatigue or equipment failure leading to the breakage. The methodology used is composed by twelve stages of a work script: project; feedstock; welding procedure; activity planning; heat treatment; welding of parts; mounting of the tip on the shaft; machining of the tip of the shaft and of the tip; machining; finishing; final inspection and analysis of results, which seeks to analyze the conditions of applicability of the repaired shaft. The cold rolling line is directly linked to the company's profit, in which this study was carried out; being necessary the full functioning of the components. For recovery of one of the main shaft of the rolling line chucks, this work gives a study of a welded seam method, being applied for repair due to the breakage occurred; in an emergency, since in the absence of spare parts, the production line is directly affected, requiring an immediate resource, and that is economically viable. The methodology of welded seam was applied in one case, where the repair performed occurred in a mandrel shaft of an unwinder nº1 of the galvanizing line of the large company, being performed due to the emergency in the period. In order to analyze the behavior of a spliced material, in comparison to a solid material, drawings of two test bodies with respective dimensional characteristics and the same specifications with respect to the chemical composition were made and they were submitted to static torsional moment test with the aid of Autodesk software Inventor - test nº1 - where the momentum magnitudes were analyzed. In addition to the test of the respective test specimens in the graphic software, the torsional moment magnitudes of these test specimens were analyzed in the static static test nº 2, which was executed, with the aid of parts manufactured according to the drawings, a bench vise and a torquemeter to verify behaviors. The objective of this work was to carry out a case study of a solution for the repair of the structure of a mandrel shaft of a galvanizing line, by the welded splice method, seeking to analyze the mechanical stresses compared to an intact shaft, according to the design.

**Keywords:** Mandrel shaft; welded seam; Soderberg diagram.

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>17</b>
<b>1.1 Problema Abordado .....</b>	<b>19</b>
<b>1.2 Objetivo .....</b>	<b>20</b>
<b>1.2.1 Objetivo geral.....</b>	<b>20</b>
<b>1.2.2 Objetivos específicos.....</b>	<b>20</b>
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>21</b>
<b>2.1 Linha de Laminação a Frio .....</b>	<b>21</b>
<b>2.1.1 Eixos dos mandris .....</b>	<b>22</b>
<b>2.2 Fadiga em Metais.....</b>	<b>24</b>
<b>2.3 Mecanismos de Dano por Fadiga .....</b>	<b>26</b>
<b>2.4 Concentrações de Danos por Fadiga.....</b>	<b>28</b>
<b>3 METODOLOGIA.....</b>	<b>30</b>
<b>3.1 Desenvolvimento .....</b>	<b>32</b>
<b>4 ESTUDO DE CASO E DESENVOLVIMENTO.....</b>	<b>35</b>
<b>4.1 Teste Experimental Utilizando <i>Software</i> .....</b>	<b>35</b>
<b>4.2 Dados do Teste Experimental 02.....</b>	<b>46</b>
<b>4.2.1 Experimento com corpo de prova maciço e emendado .....</b>	<b>46</b>
<b>4.2.2 Procedimento de soldagem para o corpo de prova.....</b>	<b>47</b>
<b>4.3 Memória de Cálculo .....</b>	<b>51</b>
<b>4.3.1 Critérios considerados para os cálculos de resistência mecânica do eixo de mandril... ..</b>	<b>51</b>
<b>4.3.2 Cálculos e análise das solicitações mecânicas .....</b>	<b>52</b>
<b>4.3.3 Cálculo do torque transmitido pela caixa redutora, intermediária entre: motor de 350 cv e eixo mandril.....</b>	<b>53</b>
<b>4.3.4 Cálculo inicial da parcela de torque estático transmitido pelo ponto de maior dimensão do eixo de mandril intacto. Esse valor foi calculado para que se tenha uma referência de magnitude de torque estático; pois, trata-se do ponto onde foi emendado. ....</b>	<b>55</b>
<b>4.3.5 Cálculo da parcela de torque transmitida pela solda.....</b>	<b>55</b>

4.3.6 Cálculo da parcela de torque transmitida pela pinagem.....	55
4.3.7 Somatório das parcelas de torques estáticos, fornecidos pela solda e pela pinagem .....	57
4.3.8 Cálculo para análise do torque estático no menor ponto do eixo .....	57
4.3.9 Levantamento dos valores calculados .....	58
4.4 Verificação dos Fatores de Segurança Pela Análise do Critério de Falha de Soderberg .....	58
4.4.1 Cálculo de constatação da utilização dos critérios de Soderberg no projeto do eixo de mandril .....	60
4.4.2 Verificação do fator de segurança real para dimensionamento do projeto.....	62
4.4.3 Cálculo do fator de segurança estimado no ponto onde foi aplicada a emenda soldada, levando-se em consideração apenas a seção reta anelar da solda para análise.....	63
4.4.4 Procedimento de soldagem utilizado .....	67
4.5 Dados do Caso 01.....	69
4.6 Resultados Econômicos .....	75
4.6.1 Resultados tangíveis .....	79
4.6.2 Resultados operacionais: .....	80
5 CONCLUSÃO.....	82
6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	Erro! Indicador não definido.
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	83

## 1 INTRODUÇÃO

A situação de permanente dependência brasileira de fabricações estrangeiras começou a se transformar em meados de 1946, devido a implantação de uma grande empresa siderúrgica de planos no país. Em 1950, quando essa empresa siderúrgica trabalhava com todas suas linhas de operações, deu-se início ao desenvolvimento da siderurgia brasileira. A fabricação nacional de aço bruto atingia 788 mil toneladas/ano gerando o ponto de partida para a fabricação do aço no Brasil. No início dos anos 70 eram cedidos ao comércio 5,5 milhões de toneladas/ano, provocando o crescimento da economia, que passou a estabelecer requisitos atuais e crescentes às usinas. Esse acontecimento possibilitou que em 1971, surgisse o Plano Siderúrgico Nacional, responsável por iniciar uma nova fase de crescimento da produção.

Em meados da década de 80, o comércio interno do Brasil estava em retração e a possibilidade era direcionar-se ao comércio exterior. A década de 90 foi marcada pelo procedimento de privatização das siderúrgicas, sendo esse procedimento executado pelo Programa Nacional de Desestatização (PND). Nos anos de 1994 até 2004, as siderúrgicas investiram US\$ 13 bilhões (treze bilhões de dólares) em melhorias tecnológicas. No ano de 1999, a fabricação de aço bruto por ano no Brasil, atingia 25 milhões de toneladas e no ano de 2007 alcançou 33,9 milhões de toneladas, demonstrando o progresso da produção do aço com a implantação de modernas tecnologias nas usinas siderúrgicas. O parque produtor de aço atual é composto de 25 usinas, sendo 11 integradas e 14 semi-integradas, com capacidade instalada de 41 milhões de toneladas/ano de aço bruto, (Fonte IBS – 2008).

O aumento da demanda de produção das usinas siderúrgicas, notado nos últimos anos, tem exigido manutenção mais eficaz. Assim sendo, a manutenção progrediu tecnicamente, utilizando novos métodos, garantindo a disponibilidade de funcionamento dos equipamentos necessários. Na situação atual, a expectativa da manutenção é de aplicar novas técnicas, para reparar os equipamentos, prevenindo sua parada prolongada, visando atender a demanda de produção com confiabilidade, preservando o meio ambiente, garantindo a qualidade do produto, proporcionando maior vida útil do equipamento, e principalmente, com custo adequado.

Nesse caso, enquadram-se as indústrias siderúrgicas integradas, as quais são compostas por plantas de áreas de redução, aciaria, laminações a quente e a frio. Cada área

integrada das siderúrgicas é responsável por um processo. A área de redução é encarregada da redução do minério de ferro e da produção do ferro gusa. A área da aciaria é encarregada do refino do ferro gusa e adição de ligas para fabricar o aço em placas. A área da laminação a quente é encarregada de conformar as placas grossas para espessuras mais finas, sendo então enroladas como bobinas. A área de laminação a frio centraliza várias linhas de produção, sendo elas: laminadores, linhas de recozimento e decapagem, linhas de preparação, linhas de corte longitudinal e transversal e linhas de acabamento final. Estas linhas são compostas por vários equipamentos, tais como, redutores e motores elétricos de grande porte, mesas de rolos, fornos, tanques de decapagem, desempenadeiras, bobinadoras, dentre outros.

No final do século XIX, surgiram as bobinadoras, promovendo a laminação de chapas de menores espessuras, comportadas em bobinas, garantindo o desenvolvimento da fabricação de chaparias em geral. As bobinadoras são colocadas na entrada e saída das linhas dos processos de laminação a frio, sendo responsáveis por enrolar, ou desenrolar bobinas com auxílio de um equipamento flexível, denominado: mandril expansivo, na tração e torção apropriadas. O acionamento das bobinadoras é exercido por meio de transmissão de rotação de motor acoplado a um redutor, o qual transmite rotação e torque ao eixo do mandril, normalmente montado, que quando em funcionamento, com auxílio de braço de sustentação, o torna em condição biapoado, sustentando a carga e a condição de tensão tratativa tangencial.

Quanto ao eixo do mandril, devido a seu processo de fabricação, que inclui etapas de forjamento e usinagem conforme projeto, esse necessita de um prazo de fornecimento em torno de 45 dias, impulsionando então ao estudo de uma técnica estratégica, caso ocorra falha deste componente, provocando desfalques na perda de produção e, conseqüentemente, danos financeiros.

Devido à alta demanda de produção, a interrupção contínua das linhas de produção para inspeção, se torna, muitas vezes, inviável quando comparamos com o ganho de aços produzidos, sendo necessário um novo método de controle de manutenções em relações aos eixos mandris, os quais necessitam de sistema de lubrificação adequado dos componentes para evitar desgastes por fadiga.

Na empresa de grande porte, na qual aplicou-se o estudo de caso, iniciou-se uma técnica de recuperação de um eixo de mandril de sua área de laminação a frio, através de uma metodologia para constatação da falha do equipamento. A metodologia proposta baseou-se na

recuperação estrutural desse um eixo por método de emenda soldada, levando em consideração as características físicas e geométricas do eixo, evitando sua fabricação total, visto que sua geometria é complexa, o que oneraria os custos de usinagem na fabricação desse componente.

O cálculo adotado ao longo do trabalho baseia-se no critério de tensão de *von Mises* máxima que é baseada na teoria de *von Mises* e *Hencry*, definido por: teoria da energia do cisalhamento provocado, ou teoria da energia da distorção máxima elevada. Teoria essa, a qual defende que um material dúctil inicia seu ponto de escoamento num local onde a tensão de *von Mises* tem a mesma magnitude do limite de tensão, ou no maior número de casos, o limite de escoamento é aplicado como limite de tensão. Contudo, quando utilizamos o software Autodesk Inventor, pode-se aplicar a torção máxima, baseada nos cálculos teóricos, estabelecendo um limite de tensão a ser analisado.

Utilizou-se, também, a regra de Miner, empregada para calcular aproximadamente qual a vida útil de componentes quando submetidos a carregamentos com amplitudes variáveis, cíclicas.

A ausência de bibliografias, ou materiais voltados à prática de manutenções em estruturas de eixos de mandril é devida ao fato de o projeto dos eixos dos mandris serem executados visando sua vida infinita, sendo que os componentes submetidos ao desgaste constante, como: luvas e telhas de arraste são acessórios intercambiáveis e comportarem-se como peças fusíveis.

Nesse trabalho é abordado, num estudo de caso apurado, um método de reconstrução estrutural, aplicado em eixo de mandril, por emenda soldada. Esse método visa suprir a manutenção corretiva emergencial aumentando a condição de vida útil desse componente e, conseqüentemente, aponta lucros concernentes a tal prática.

## **1.1 Problema Abordado**

Devido à grande demanda de produção, é preciso evitar ocorrências de fraturas por fadigas ou por problemas ocasionados por componentes do conjunto, nos eixos mandris em operação. Esse trabalho descreve a possibilidade de prolongar a vida útil do eixo mandril, aplicando a técnica da emenda soldada. As paradas de emergência das linhas de produção

necessitam de soluções rápidas e eficazes, por isso utilizamos a metodologia do roteiro de trabalho para controle e melhoria da execução da técnica aplicada.

## **1.2 Objetivo**

### **1.2.1 Objetivo geral**

A empresa ora em estudo, diante da possibilidade de reaproveitar componente os quais seriam descartados, poderá obter ganhos financeiros, tendo em vista que a peça uma vez restaurada volta a ser utilizada. Nessa perspectiva, o presente estudo tem como objetivo geral apresentar uma solução inovadora quanto à restauração de eixo do mandril por meio de processo interferente e soldagem.

### **1.2.2 Objetivos específicos**

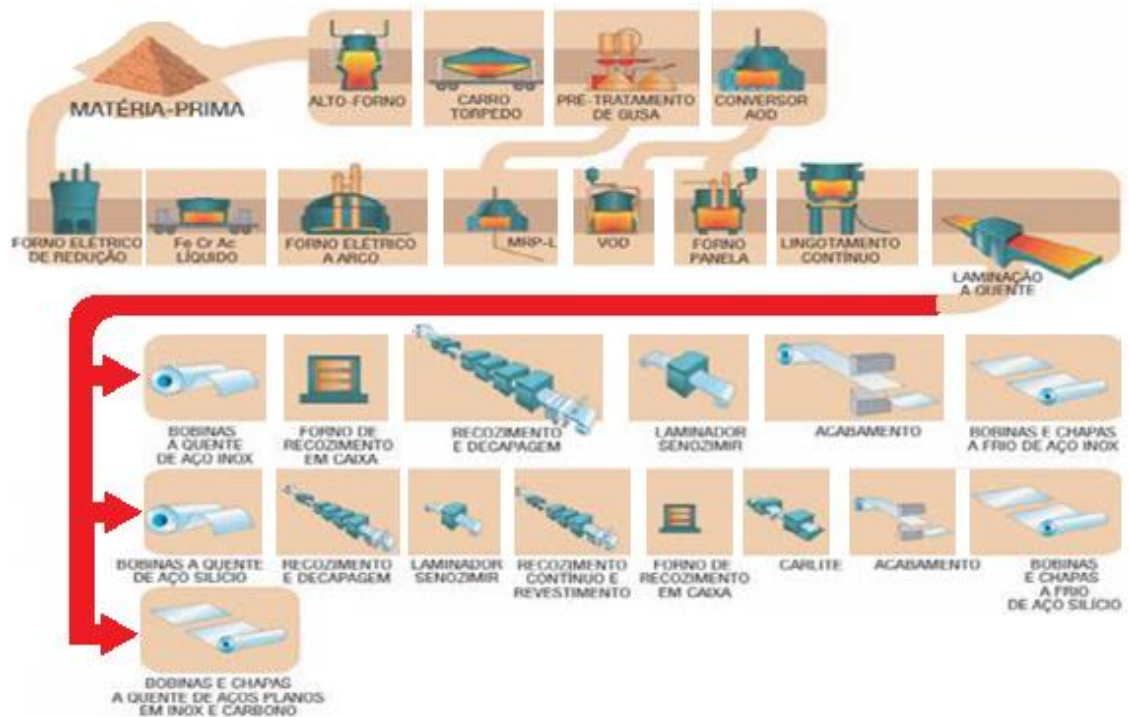
Para alcançar o objetivo deste trabalho, é necessário realizar os seguintes objetivos específicos:

- Identificar os pontos críticos onde mais ocorre a degradação do eixo mandril;
- Propor aos responsáveis que realizem manutenção detectiva para manter o equipamento em pleno funcionamento evitando perda de produção;
- utilizar modelo matemático para demonstrar os esforços suportados após recuperação do eixo de mandril mediante emenda por processo interferente e soldagem;
- Utilizará ferramenta de gestão empresarial do fabricante para comparar o percentual de ganhos por parte da empresa, identificando a viabilidade econômica do processo.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

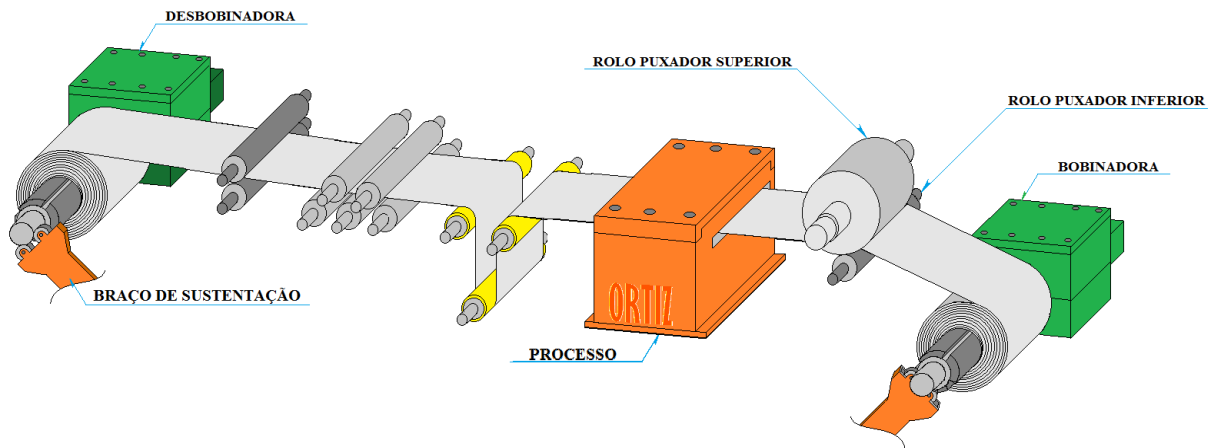
### 2.1 Linha de Laminação a Frio

Dentro de uma usina integrada, a fabricação de chapas de menores espessuras acontece a partir de placas produzidas na aciaria, que são transportadas para a laminação a quente conforme figura 01. As placas são conformadas nos laminadores a quente, logo depois, são enroladas ou desenroladas em aspecto de bobinas. O próximo passo é a laminação a frio, representada pela passagem das chapas entre os cilindros, ocasionando a deformação plástica do material e a redução de sua espessura. A laminação a frio está interligada a diversas linhas de produções.



**Figura 01: Fluxograma da Linha de Produção**  
 Fonte: elaborado pelo grupo ArcelorMittal.

O deslocamento das bobinas na área de laminação a frio é executado por pontes rolantes ou carros transportadores. As bobinas oriundas do processo de laminação a frio são enroladas, conforme figura 02.



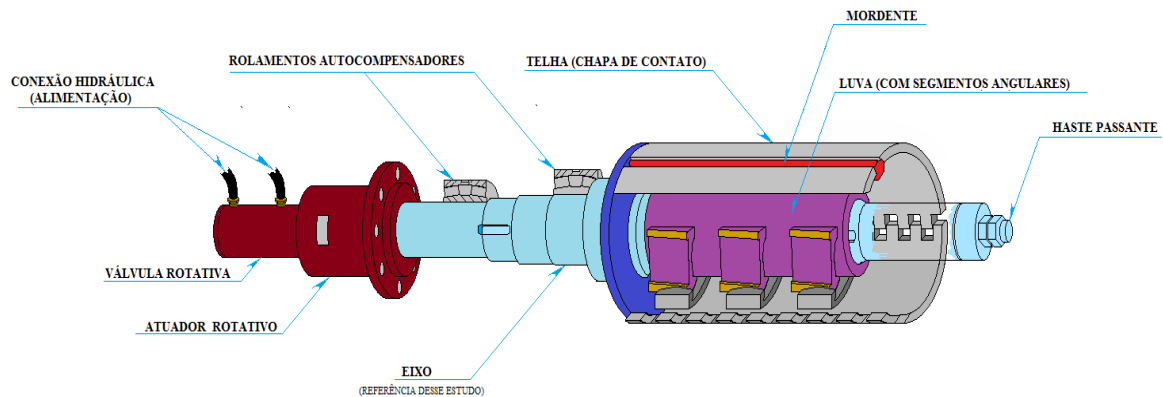
**Figura 02: Processo da Linha**  
**Fonte: elaborado pelos autores.**

### 2.1.1 Eixos dos mandris

Em torno de 1893, na Alemanha surgiram os primeiros mandris de bobinas, projetados por *August Schmitz Company*. Os mandris eram equipamentos criados com atuação de expansão e contração, sendo esse movimento por meio de correias conectadas aos motores da cadeira do laminador. O mandril primordial de alta tração foi exposto no ano de 1905 por *W. F. Conklin de Pittsburgh* (ROBERTS, 1978).

Os mandris são compostos por processos de expansão e contração ajustando seu diâmetro ao diâmetro nominal necessário das bobinas. Na contração do mandril acontece a entrada e saída das bobinas, em contrapartida na expansão acontece a fixação das bobinas no mandril.

O procedimento de expandir e contrair do mandril ocorre por acionamento hidráulico, no qual uma haste alongada permite a movimentação da luva com planos inclinados, conforme figura 03. Esses planos inclinados estão unidos aos segmentos, que estão próximos ao diâmetro interno das bobinas. As réguas localizadas entre as telhas do mandril são responsáveis por prender a ponta da chapa a ser enrolada.



**Figura 03: Eixo do Mandril**  
**Fonte: elaborado pelos autores.**

O eixo do mandril está sujeito a diferentes esforços, sendo eles torção e flexão. Esses esforços de torção são decorrentes do torque derivados do motor de acionamento. Em contrapartida, os esforços de flexão são causados pelo carregamento das bobinas e também pelo seu próprio peso. As características do eixo do mandril o descrevem como equipamento de grande porte com diâmetros superiores a 300mm e comprimentos de 3.000 mm, cujos materiais de fabricação são aços ligas, forjados e adequados para que o limite de ruptura seja em torno de 900MPa.

Os eixos dos mandris são constituídos de diâmetros variáveis, os quais são responsáveis por acomodar elementos fixos, sendo eles: os rolamentos e engrenagens. Com variáveis diâmetros e montagens de engrenagens, temos as mudanças de seções e os locais de montagem de chavetas nos eixos dos mandris, sendo nesses locais setores de maiores concentrações de tensões. Outras condições que podem agravar essas concentrações podem ser apontadas: a rugosidade superficial da região, a montagem por interferência e raios não polidos.

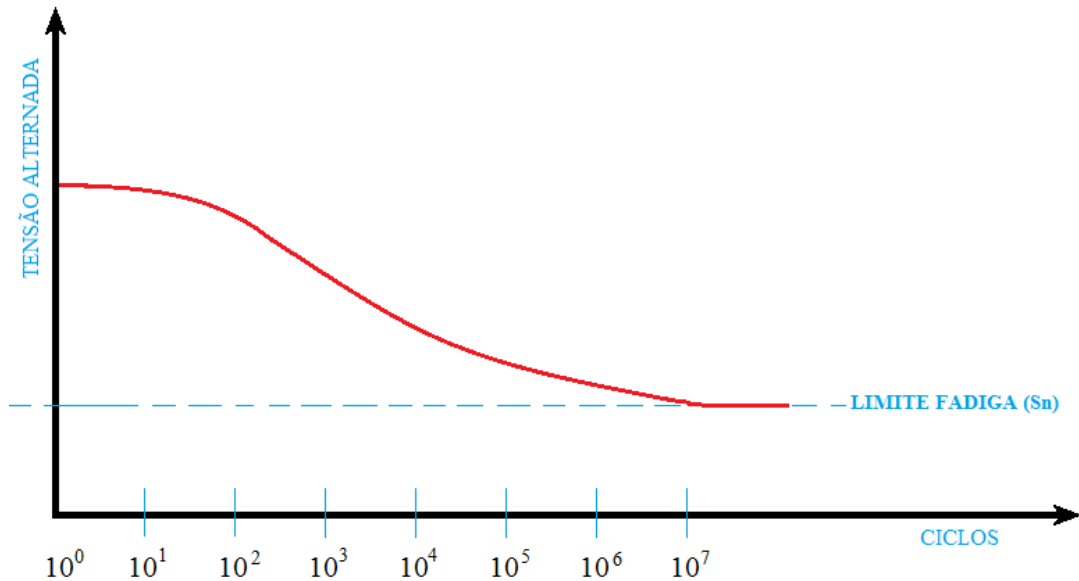
É desafiadora a manutenção dos eixos dos mandris, devido aos setores de concentrações de tensões possuírem seções posicionadas no interior da caixa redutora e a ocorrência da falta de lubrificação adequada, pode ocasionar quebra prematura do eixo do mandril.

## 2.2 Fadiga em Metais

Os elementos de máquinas, veículos e estruturas estão constantemente submetidos a cargas repetidas, conhecidas também como cargas cíclicas, e as tensões cíclicas geradas podem levar a prejuízos físicos microscópicos dos materiais envolvidos. Mesmo quando submetidos a tensões que apresentam valores abaixo do limite de ruptura do material, o prejuízo microscópico pode se aglomerar de forma contínua, dando início a uma trinca ou ocasionando a falha do equipamento, sendo esses prejuízos resultantes das cargas cíclicas, denominados fadiga (OWLING, 1999).

Os defeitos mecânicos provocados por fadiga têm sido motivo de pesquisas e estudos para engenharia desde começo do século XIX. Os testes iniciais de fadigas que geraram resultados conhecidos foram publicados por Albert, no ano de 1837, que se baseava em uma máquina para avaliar as correntes que exibiram defeitos nos serviços das minas de Clausthal na Alemanha. No ano de 1842, Rankine divulgou sua opinião em relação ao comportamento dos materiais quando submetidos às tensões flutuantes, indicando que o material se torna frágil devido a essas tensões.

Um novo acontecimento surgiu com a aplicação dos equipamentos movidos a vapor, definido como: cargas dinâmicas. A investigação primária sobre a condição de danos por fadigas foi iniciada por um engenheiro alemão, conhecido por August Wöhler, através de ensaios em laboratórios com eixos subordinados a cargas alternadas. Em 1870, os ensaios geraram resultados, o que possibilitou August publicar suas conclusões que apontavam que a quantidade de ciclos de tensões alternadas muda com o tempo, ocasionando enfraquecimento do material e a descoberta de que o aço apresenta um limite de resistência a fadiga. A curva de Wöhler, conforme figura 04, demonstra o desempenho dos materiais quando submetidos as tensões alternadas, sendo conhecida como curva S-N.



**Figura 04: Curva S-N**  
**Fonte: elaborado pelos autores.**

Observando-se a curva S-N, notamos que quando aumenta a amplitude de tensão alternada diminui o número de ciclos suportados pelo material antes da ocorrência de sua fratura. O comportamento do aço na curva S-N baseia-se em um valor de número de ciclos, tornando a curva horizontal. Isto determina que o dano por fadiga não ocorre, se o material ficar abaixo do nível de tensão limite de resistência à fadiga, sendo o valor máximo atingido pelo material que não ocasionará sua falha, mesmo em condições de números de ciclos infinito.

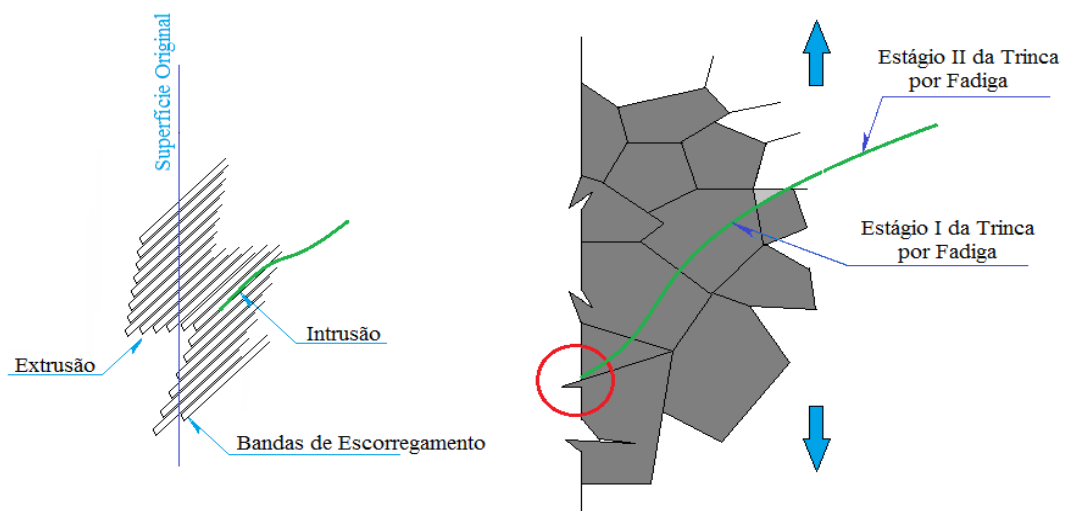
Em meados dos anos 50, cientistas notaram a presença de micro trincas nas primeiras etapas do material que sofria fadiga. Sendo assim, foi comprovado que as etapas da fadiga podem ser divididas em duas, sendo a primeira etapa o início da trinca, seguido pela segunda etapa que é a propagação da trinca.

Os danos causados a equipamentos por fadiga geram um custo alto para a economia, fundamentado em estatísticas do governo americano, em meado do ano 1982, os gastos anuais com materiais, sofridos por fadiga, giravam em torno de US\$ 100 bilhões (cem bilhões de dólares).

## 2.3 Mecanismos de Dano por Fadiga

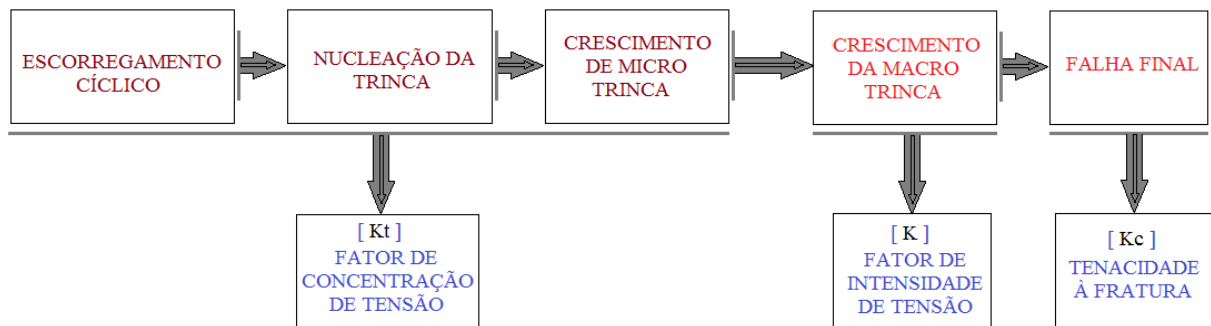
O dano causado por fadiga é decorrente de carregamentos cíclicos, o qual resulta no início de uma trinca, a qual se propaga ao longo do equipamento até a sua fratura. A deformação plástica está presente no equipamento quando submetidos aos carregamentos cíclicos, gerando uma trinca. Conforme o equipamento é submetido a variadas cargas, a propagação da trinca aumenta, e conseqüentemente essa trinca levará o equipamento a quebra ou falha.

As falhas causadas por fadiga ocorrem em quatro etapas sendo elas: primeiro ocorre a nucleação da trinca, segundo ocorre o aumento da microtrinca, terceiro o aumento da macro trinca e quarto a fratura final do material, conforme figura 05, em um local de bandas de escorregamentos resistente. A fase seguinte do dano causado por fadiga é o aumento da trinca, sendo essas trincas divididas em duas etapas 1 e 2. Na etapa 1 ocorre a propagação da microtrinca no plano de tensão máxima de cisalhamento, no decorrer do comprimento finito na estrutura de moderados grãos. Nesta etapa 1, as características do escorregamento, as dimensões dos grãos e a direção e posição da tensão são os fatores que influenciam a plasticidade da extremidade da trinca, sendo que essas características devem ser compatíveis com a microestrutura do material analisado. A etapa 2 consiste na propagação da macrotrinca no plano responsável pela tensão principal e no sentido de tensão de cisalhamento local máxima.



**Figura 05: Etapas 1 e 2 da Trinca por Fadiga**  
Fonte: elaborado pelos autores.

De acordo com *Schijve* (2001), o aumento de uma trinca pode ocorrer de maneira lenta e irregular, conforme figura 06, mesmo após uma microtrinca ter dado início ao processo de nucleação, isso é resultante da microestrutura do material e dos limites de grãos.



**Figura 06: Etapas da Vida em Fadiga**  
**Fonte: elaborado pelos autores.**

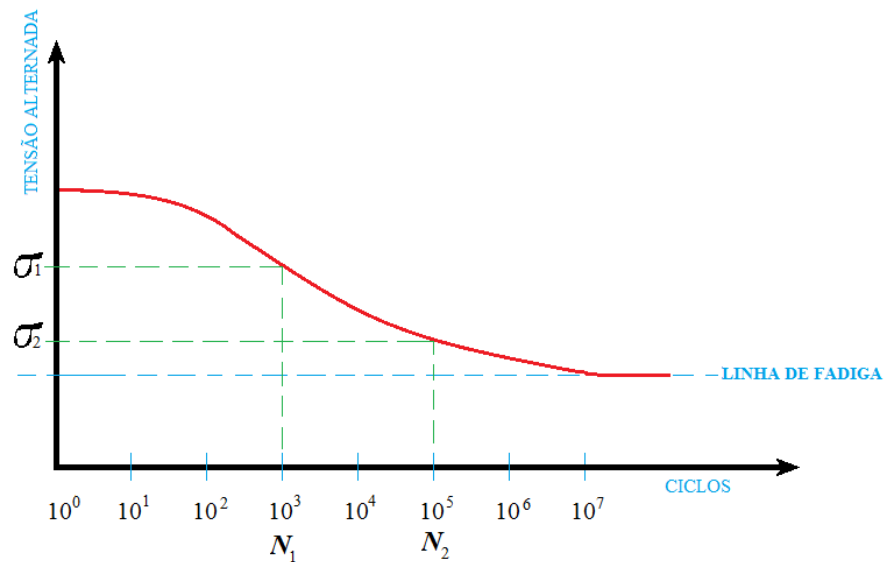
Vários fatores influenciam no surgimento da trinca e na propagação dela, mas é preciso analisar as diferenças entre o surgimento da trinca e a propagação dela. Sendo que as condições superficiais, como a rugosidade, afetam o surgimento das trincas, em contrapartida têm pouca influência na fase de propagação dela. Para avaliar a probabilidade de surgimento de uma trinca adota-se o fator de  $K_t$  (concentração de tensão), enquanto que para avaliar a probabilidade de propagação de uma trinca adota-se o fator  $K$  (intensidade de tensão).

Para analisar o tempo de vida restante em materiais que sofrem fadiga de baixos ciclos ou dificuldades de vida finita, baseia-se na teoria da fratura mecânica, para analisar a propagação da trinca ao longo do material. Em contrapartida para analisar os danos causados por fadiga de altos ciclos utiliza-se o diagrama (S-N), que fornece às tensões e os números de ciclos, determinando à resistência a fadiga suportada pelo material trabalhado, fazendo com que as tensões cíclicas não atinjam o número de ciclos que ocasionam a fratura do material. A fase de mudança do início da trinca para a ocorrência de sua propagação ao longo do material ainda é alvo de pesquisas e estudos da engenharia, não podendo chegar a uma conclusão precisa até o presente momento. Em relação aos aços, a estruturação da origem da trinca obedece à faixa de 0,1 a 1,0 mm.

## 2.4 Concentrações de Danos por Fadiga

A expressão “concentrações de danos” diz respeito aos carregamentos de ciclos de amplitude variável relacionados à fadiga do material. Desta forma, o uso de paradigmas de concentração de falhas por fadiga, é o de observar o comportamento do material quando submetidos a cargas variáveis, tendo o conhecimento do comportamento do material quando é também submetido a amplitudes constantes, baseado no diagrama (S-N).

Em meados do ano de 1945, *Miner* realizou ensaios para analisar a regra linear, que determinava o dano que ocorreu no material quando submetido a uma amplitude de tensão cíclica, sendo esse resultado diretamente proporcional a quantidade de ciclos que atuam, conforme figura 07, onde atuou a amplitude de tensão, gerando resultados que se tornaram ponto de partida para outros modelos serem criados, mediante a limitações que apresentam a regra linear.



**Figura 07: Modelo Linear de Miner**  
**Fonte: elaborado pelos autores.**

Mesmo com o desenvolvimento de vários modelos para completar a regra linear, o mais aceito até o presente é modelo linear de *Miner*, pois ele demonstrou por meio de resultados experimentais o seu conceito. *Miner* focou seus ensaios no surgimento da trinca atribuindo implicitamente que o dano da vida por fadiga até a falha poderia ser estudado igual

a este período. *Miner* defendeu a tese de que o dano causado por fadiga é resultado do trabalho absorvido pelo material, mostrando ser proporcional ao número de ciclos, por isso recebe o nome de regra linear de concentrações de danos.

Conforme descrito, é possível observar que a etapa da formação da microtrinca é uma análise complexa que apresenta resultados confiáveis quando ensaiados em laboratórios. Quando voltado para indústria, a maneira mais comum de se detectar os danos por fadiga em equipamentos é realizada através de ensaio não destrutivos, sendo estes o ensaio por líquido penetrante para micro trincas ou trincas superficiais e o ensaio com o ultrassom em caso de descontinuidades profundas dos materiais.

### 3 METODOLOGIA

Buscando gerir as etapas do processo de execução das atividades em questão, utilizou-se do fluxograma (figura 08), o qual aponta de forma delineada os pontos importantes desse processo, desde o projeto elaborado até à inspeção do produto final desse processo.



**Figura 08: Fluxograma do roteiro de trabalho adotado para o projeto**  
**Fonte: elaborado pelos autores.**

Alguns critérios são essenciais para que se desenvolva a análise do problema para executar o reparo, conforme demonstrado na Figura 09:



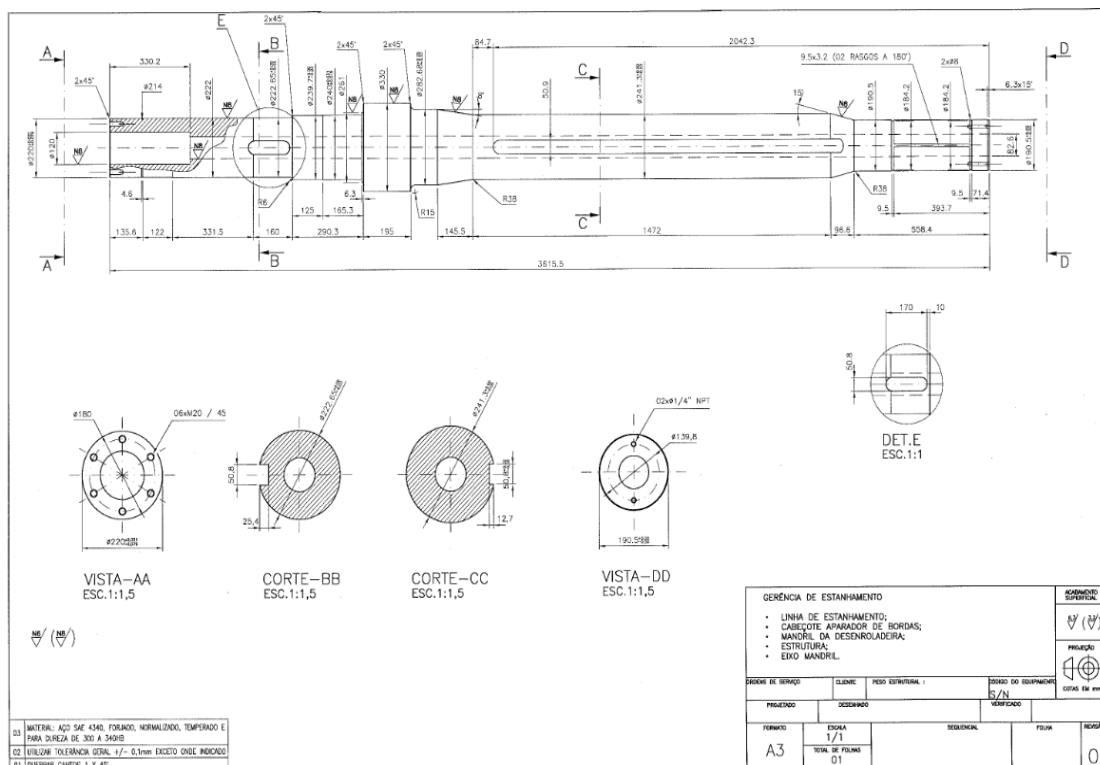
**Figura 09: Etapas para Análise do Problema**  
Fonte: elaborado pelos autores.

Sendo assim, pode-se afirmar que é possível realizar reparo em eixos de mandris, visando buscar agilidade, baixo custo, priorizando a qualidade e repará-los, reduzindo o tempo de parada em emergência, atuando de forma rápida, eficaz e com máxima confiabilidade.

Deste modo, chegou-se a um consenso da viabilidade do reparo. O procedimento utilizado foi emendar uma ponta postíça pinada de forma interferente e soldada.

### 3.1 Desenvolvimento

**1ª fase:** os desenhos foram elaborados, exemplificados na figura 10, utilizando-se ferramentas gráficas, como AutoCAD e Inventor pelos profissionais responsáveis técnicos:

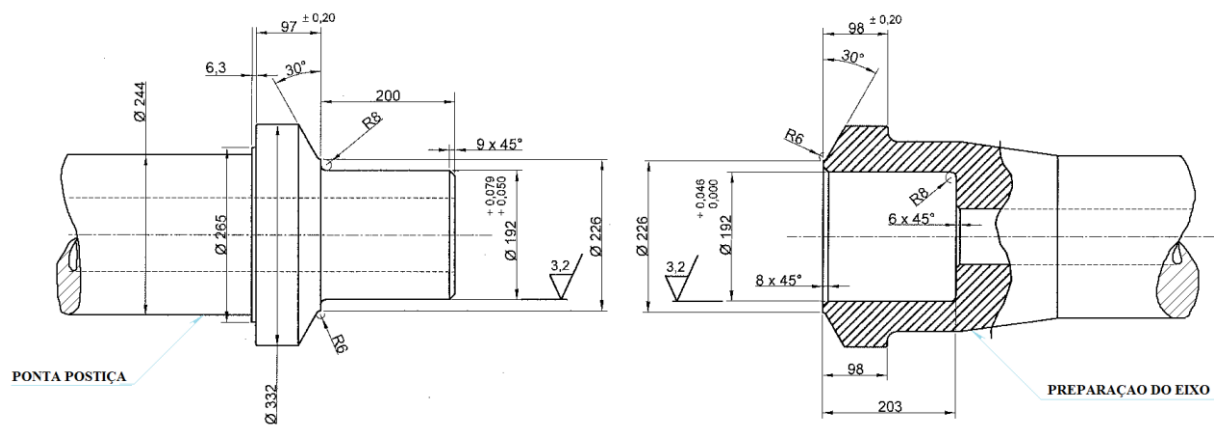


**Figura 10: Desenho de Projeto do Eixo de Mandril**

Fonte: elaborado pelos autores.

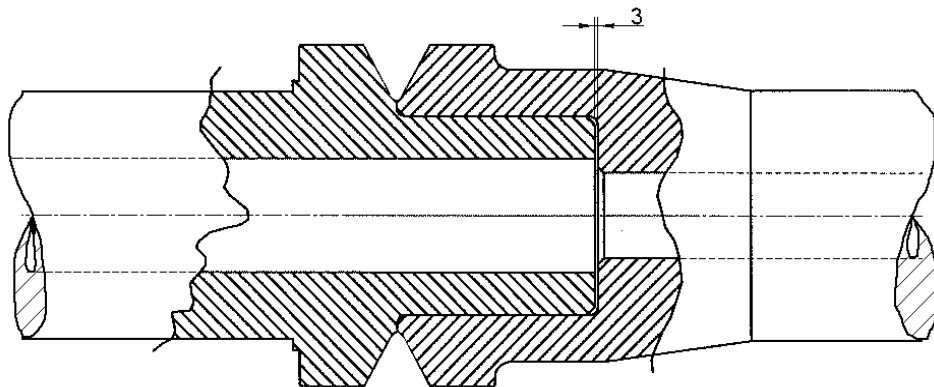
a) **2ª fase:** posteriormente foi providenciada a matéria prima com propriedades e especificações requeridas para a aplicação, verificando sobras em oficina ou estoque. Foi elaborado procedimentos de soldagem seguindo as normas técnicas de acordo com o material utilizado. As atividades executadas, foram planejadas e detalhadas em sequência lógica, definindo tempo e centro de trabalho utilizando um sistema de

controle de gestão de manutenção. Em seguida executou-se a usinagem das pontas do eixo e ponta postiça, torneando as peças que foram unidas, seguindo os padrões de usinagem, tolerâncias e interferências (H6/p6) “prensado a quente”, ou esfriamento da ponta postiça com auxílio de nitrogênio líquido, definidas no projeto, como exemplificado na Figura 11.



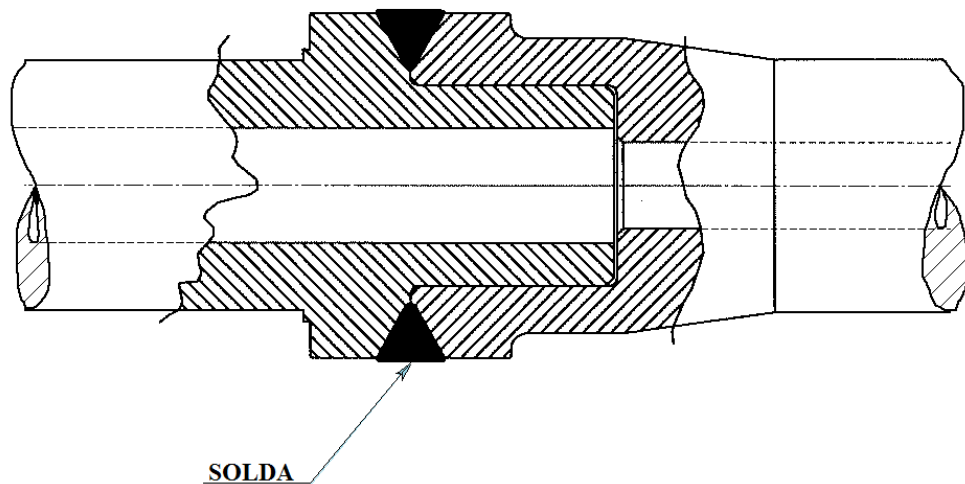
**Figura 11: Projeto para eixo/ponta postiça**  
**Fonte: elaborado pelos autores.**

- b) **3ª fase:** foi montada a ponta postiça em eixo já preparado (Figura 12), usando técnica de “montagem a quente” do eixo ou “a frio” da ponta postiça;



**Figura 12: Montagem dos elementos**  
**Fonte: elaborado pelos autores.**

- c) **4ª fase:** as partes foram soldadas (figura 13), seguindo recomendações do procedimento de soldagem pelo método de Arco Submerso (Consumível: Arame EM12K de 1,6mm e Fluxo ESAB 1061 B), o material de adição (solda) com características semelhantes às dos materiais que foram unidos, uma vez que a finalidade foi obter uma solda mais compatível entre si, para que a união resultante, não representasse um ponto crítico do conjunto montado;



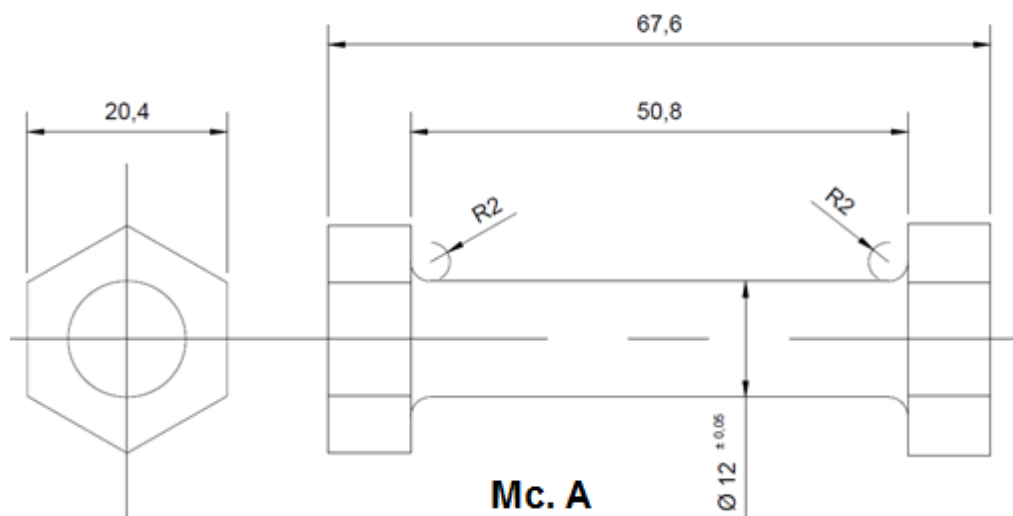
**Figura 13: União dos componentes por soldagem**  
Fonte: elaborado pelos autores.

- d) **5ª fase:** Foi feito tratamento térmico de alívio de tensões, devido à dilatação da microestrutura devido aos gradientes de temperatura;
- e) **6ª fase:** quanto à usinagem: foi torneado e furado de acordo com projeto original, efetuando acabamento preciso, retirando as rebarbas. Por fim foi realizada a inspeção quando se verificou o dimensionamento utilizando instrumentos de medição, constatando-se que esteve em conformidade com o projeto.

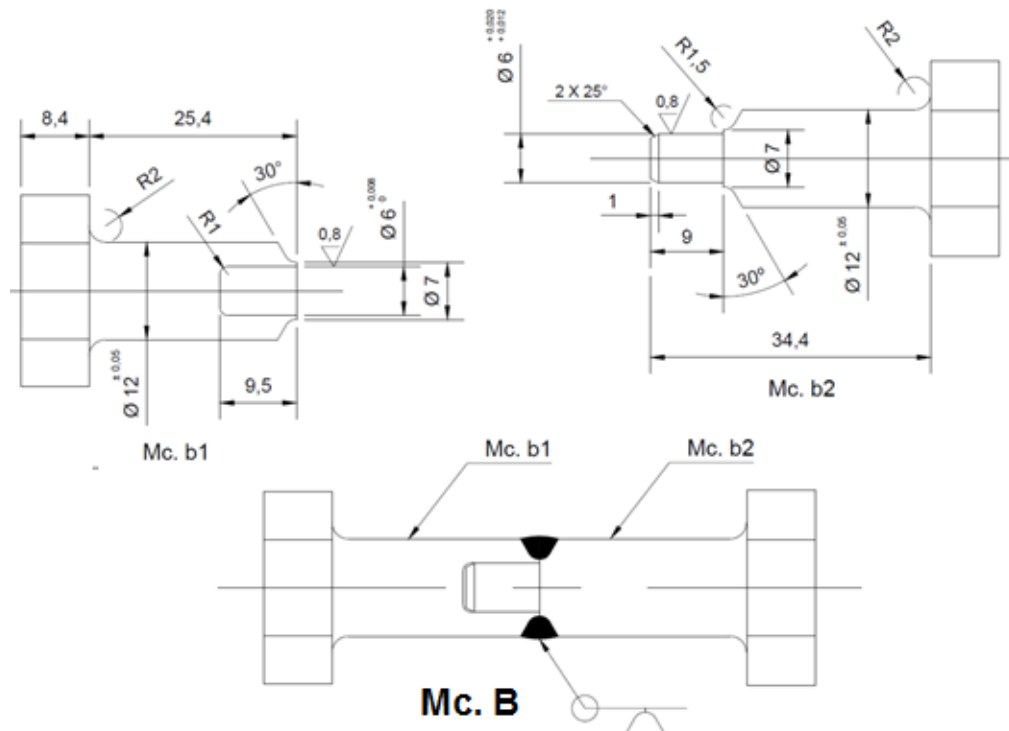
## 4 ESTUDO DE CASO E DESENVOLVIMENTO

### 4.1 Teste Experimental Utilizando Software

Foi desenvolvido um teste gráfico, utilizando a ferramenta CAD (COMPUTER AIDED DESIGN) Autodesk Inventor, buscando verificar, por meio de comparação: resistências mecânicas, devidas à solicitação de torque com o uso de um corpo de prova padrão, projetado gráfica e inicialmente no programa Autodesk AutoCad, donde as medidas foram plotadas para o Autodesk Inventor. Como foi necessário estabelecer uma parametrização entre um corpo de prova, maciço e outro com a emenda soldada, dois croquis foram elaborados: sendo um maciço (figura 14) e outro com aplicação do processo de emenda (figura 15).



**Figura 14: Corpo de prova maciço**  
**Fonte: elaborado pelos autores.**



**Figura 15: Corpo de prova emendado**  
**Fonte: elaborado pelos autores**

Elaborou-se o cálculo para obtenção do torque na seção analisada do corpo de prova maciço para constatar com observar a magnitude, obtida no teste gráfico elaborado no software Autodesk Inventor.

$$\tau_e = \sigma_e / \sqrt{3} \quad (\text{Regra de Von Misses})$$

$$\tau_e = 530,207 / \sqrt{3}$$

$$\tau_e = 306 \text{ MPa}$$

$$\tau_e = \frac{16T}{\pi d^3} \quad \rightarrow \quad T = \frac{\tau_e * \pi * d^3}{16}$$

$$T = \frac{306 * \pi * (0,012)^3 * 10^6}{16}$$

$$T = 103,86 \text{ Nm}$$

Onde

$\tau_e$  = Tensão de Cisalhamento

$T$  = Torque

$d$  = Diâmetro do corpo de prova = 12mm (0,012m)

$\sigma_e$  = Tensão de Escoamento do Aço SAE 1045 = 530,207 Mpa

Para simulação e constatação da capacidade de torque do corpo de prova maciço, dentro de um fator de segurança e inserção, observando o valor de torque encontrado no cálculo descrito acima [103,86Nm], utilizou-se o programa Autodesk Inventor para a criação do protótipo virtual tridimensional, utilizando da sua parte voltada para experimentos de engenharia, permitindo avaliar o seu comportamento mecânico, numa simulação estática de torque. Foram inseridos dados (figura 16), no programa relativos ao material de fabricação do corpo de prova (aço SAE1045), pesquisados no catálogo da fabricante ArcelorMittal, tais como: tensão de escoamento, limite de resistência do material, módulo de Young e configurado o dimensional da malha “*mesh*” (figura 17), buscando averiguar minuciosamente os pontos do corpo de prova, para obter um parâmetro do corpo de prova maciço, representando uma peça maciça (original).

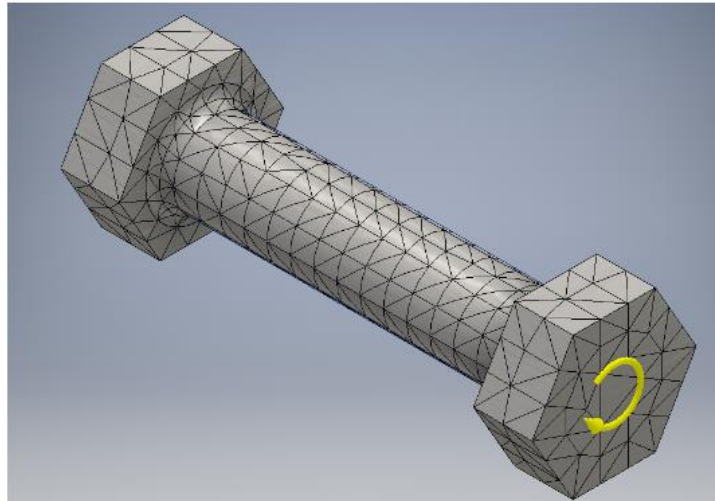
#### ☐ Configuração da Malha

Tamanho do elemento de malha (fração máxima do diâmetro do modelo)	0,05
Tamanho do elemento de malha (fração mínima do diâmetro do modelo)	0,1
Fator de classificação	1,5
Máximo Ângulo da malha	60 deg
Criar elemento de malha curvo	Sim

#### ☐ Material (s)

<b>Nome</b>	<b>SAE 1045</b>	
<b>Geral</b>	Densidade da Massa	7,86109 g/cm <sup>3</sup>
	Tensão de Escoamento	530,207 MPa
	Tensão de Ruptura	630,181 MPa
<b>Tensão</b>	Módulo de Young	204,981 GPa
	Relação de Poisson	0,3 ul
	Módulo de Cisalhamento	78,8389 GPa
<b>Nome do componente</b>	<b>Mc. A</b>	

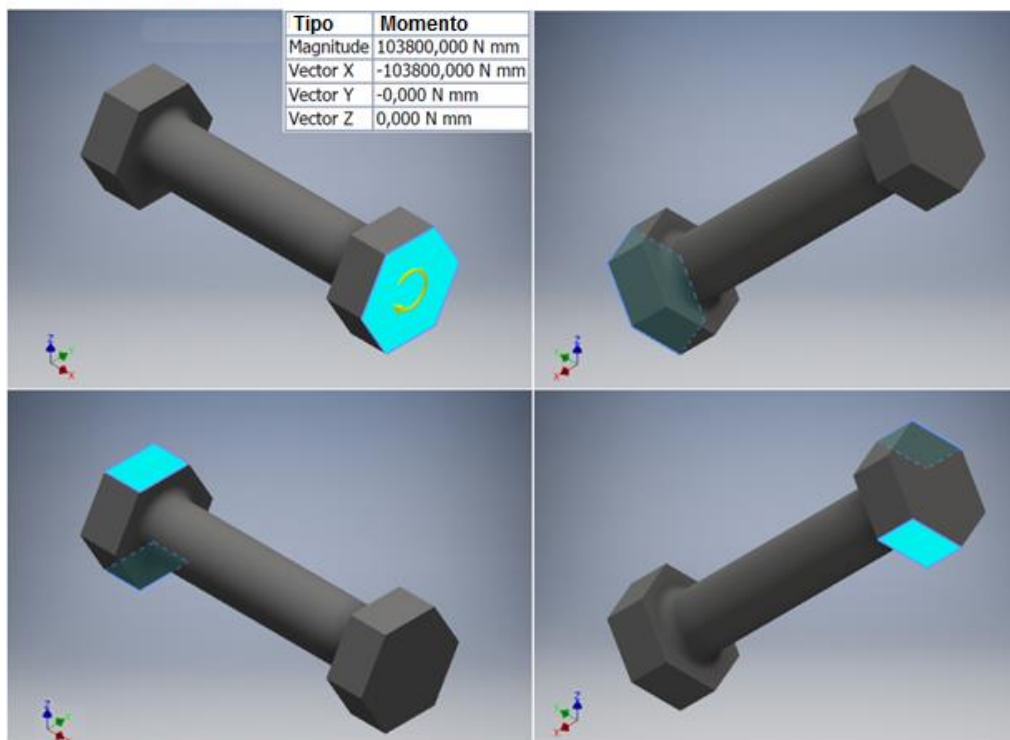
Figura 16: Inserção de valores do corpo de prova maciço ao programa Autodesk Inventor  
Fonte: elaborado pelos autores.



**Figura 17: Representação gráfica do corpo de prova maciço Autodesk Inventor – submetido ao recurso das malhas (mesh)  
Fonte: elaborado pelos autores**

Faz-se a seleção das faces (figura 18) e de engaste e o tipo de solicitação requerida no teste, no caso torção.

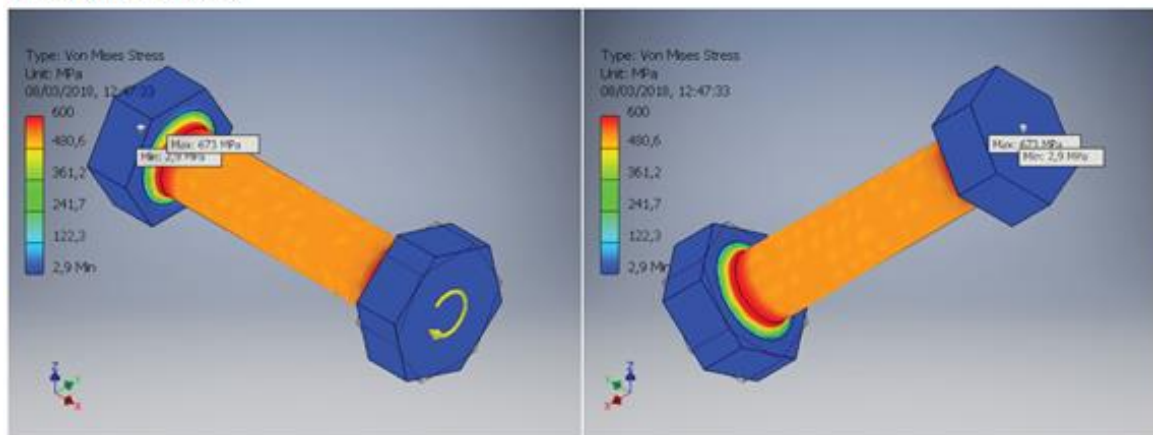
#### Face Seleccionada



**Figura 18: Seleção dos pontos de engaste e solicitação mecânica no corpo de prova maciço –via Autodesk Inventor  
Fonte: elaborado pelos autores.**

Observa-se graficamente o comportamento mecânico na estrutura do corpo de prova, com uma escala que quanto mais avermelhada indica pontos de maior tensão, visto que certamente, justo na mudança de seção entre o cilindro e a cabeça sextavada apresenta o ponto de maior vulnerabilidade, devido a diferença do dimensional. Podemos observar que a parte cilíndrica do corpo de prova manteve-se com uma coloração uniforme laranja, indicando distribuição uniforme da tensão (figura 19).

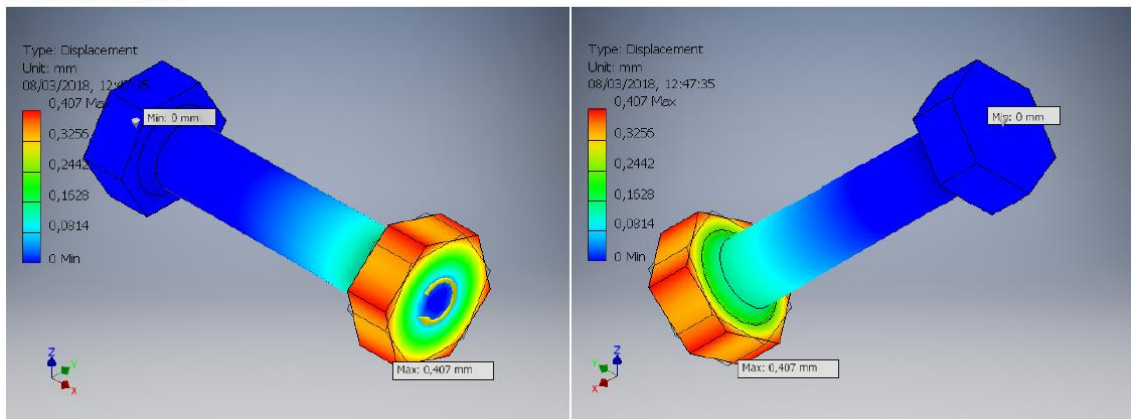
#### Tensão (Von Mises)



**Figura 19: Resultados obtidos das tensões máximas e mínimas (Von Mises) do corpo de prova maciço - via Autodesk Inventor**  
**Fonte: elaborado pelos autores.**

O deslocamento resultante (figura 20), em milímetros, também foi extraído no teste. Esse fator é importante para observar a deformação pontual do material perante o torque aplicado; pois revela visualmente o comportamento do material, simulando a região do engaste e a região onde está aplicada a solicitação de torque. Foi observado que no corpo apresenta aproximadamente uma deformação de 0,04mm na região central, foco da análise.

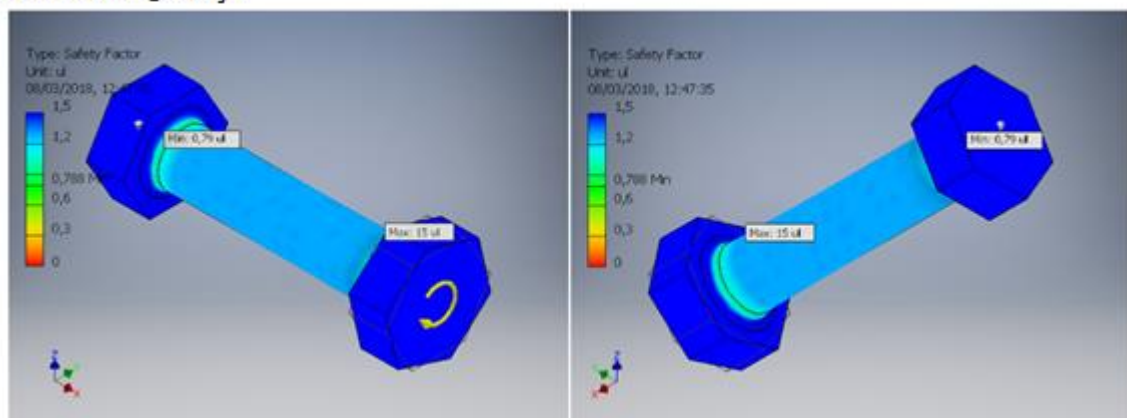
### Deslocamento



**Figura 20: Deslocamento, em unidade de milímetros, do corpo de prova maciço sob torção – via Autodesk Inventor**  
**Fonte: elaborado pelos autores.**

Observou-se o fator de segurança, em uma escala de 0 a 1,5 propositalmente inserida no programa e obtidos um valor mínimo de 0,79 e máximo de 15, como pode ser visto na figura 21, onde fator de segurança estimado, devido a cor azul claro, de aproximadamente 1,2.

### Fator de Segurança



**Figura 21: Resultados obtidos, quanto aos valores de fator de segurança do corpo de prova maciço - via Autodesk Inventor**  
**Fonte: elaborado pelos autores.**

O resultado de torque máximo constatado pelo experimento no software, obedecendo a faixa de fator de segurança preestabelecida foi [103,797 Nm] no programa está conforme com os cálculos iniciais do teste para constatação (figura 22).

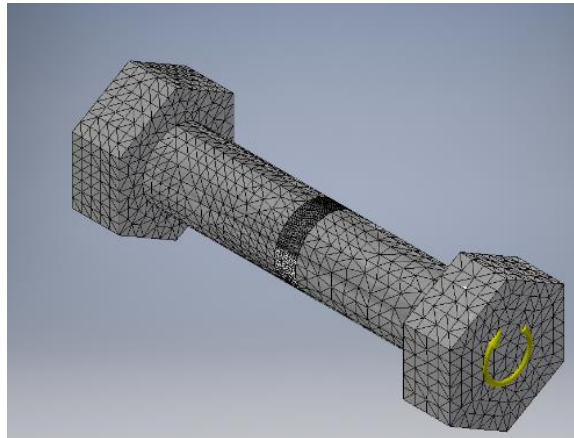
## ☐ Resultados

### ☐ Força de reação e momento em restrições

Nome da restrição	Força de reação		Reação de Momento	
	Magnitude	Componente (x,y,z)	Magnitude	Componente (x,y,z)
Restrição Fixa	0 N	0 N	103,797 N m	103,797 N m
		0 N		0 N m
		0 N		0 N m

**Figura 22: Constatação do resultado do torque resultante do corpo de prova maciço Via Autodesk Inventor**  
**Fonte: elaborado pelos autores.**

Uma vez parametrizado os valores, visto que o corpo de prova inicialmente maciço foi submetido ao teste; dessa, utilizando mesmo software, foi levado ao teste um corpo de prova, o qual foi propositalmente emendado, conforme procedimentos de soldagem e tratamento termico de acordo com especificacoes tecnicas e tendo seu dimensional de pinagem como proposto nesse trabalho, reduzido proporcionalmente para atender tal dimensional de eixo. Foram utilizados os mesmo valores do teste com o corpo de prova maciço para que pudesse ser avaliado se iria haver alteração na resistência mecânica, nessas condições. Foi avaliada a peça através das malhas (*mesh*) da mesma maneira com a qual foi feita (figura 23).



**Figura 23: Representação gráfica do corpo de prova emendado - via Autodesk Inventor – submetido ao recurso das malhas (mesh)**  
**Fonte: elaborado pelos autores.**

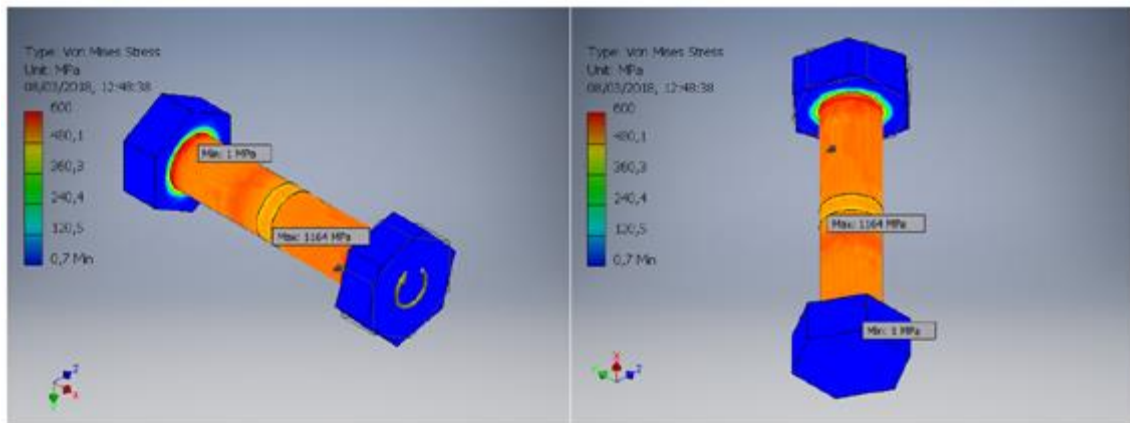
Faz-se a seleção das faces (figura 24) e de engaste e o tipo de solicitação requerida no teste, nesse caso torção, como no primeiro caso.



**Figura 24: Seleção dos pontos de engaste e solicitação mecânica no corpo de prova com emenda interferente e soldada - via Autodesk Inventor**  
**Fonte: elaborado pelos autores.**

Observa-se graficamente o comportamento mecânico na estrutura do corpo de prova emendado, com uma escala que quanto mais avermelhada indica pontos de maior tensão, visto que novamente, justo na mudança de seção entre o cilindro e a cabeça sextavada apresenta o ponto de maior vulnerabilidade, devido a diferença do dimensional. Podemos observar que a parte cilíndrica do corpo de prova manteve-se com uma coloração uniforme laranja, indicando distribuição uniforme da tensão (figura 25).

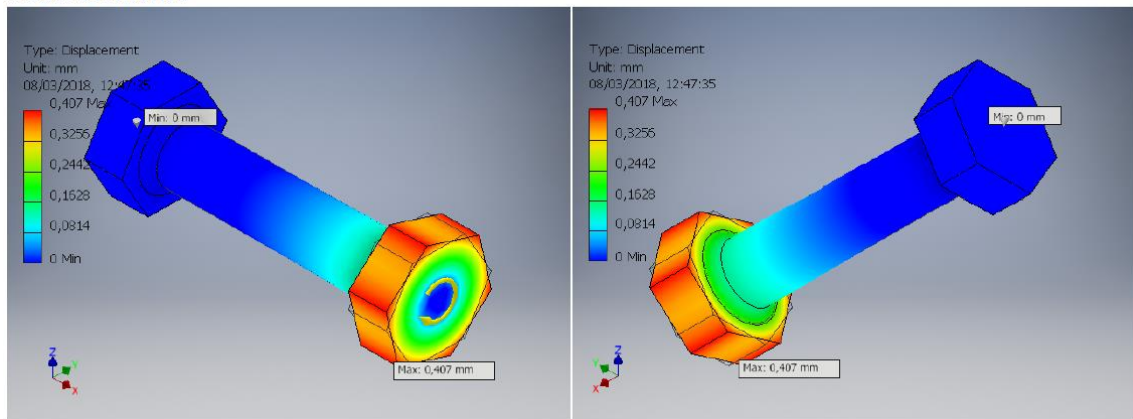
### Tensão (Von Mises)



**Figura 25: Resultados obtidos das tensões máximas e mínimas (Von Mises) do corpo de prova com emenda soldada – via Autodesk Inventor**  
**Fonte: elaborado pelos autores.**

O deslocamento resultante (figura 26), em milímetros, também foi extraído no teste. Esse fator é importante para observar a deformação pontual do material perante o torque aplicado; pois revela visualmente o comportamento do material, simulando a região do engaste e a região onde está aplicada a solicitação de torque. Foi observado que no corpo apresenta aproximadamente uma deformação de 0,04mm na região central, foco da análise.

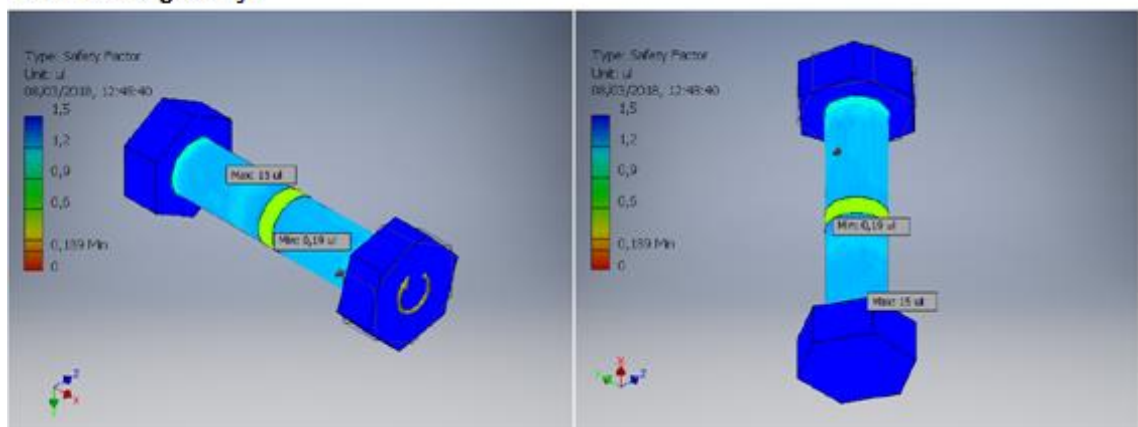
### Deslocamento



**Figura 26: Deslocamento, em unidade de milímetros, do corpo de prova maciço sob torção via Autodesk Inventor**  
**Fonte: elaborado pelos autores.**

Observou-se o fator de segurança, em uma escala de 0 a 1,5 propositalmente inserida no programa e obtidos um valor mínimo de 0,79 e máximo de 15, como pode ser visto na figura 27 a região soldada apresenta, devido à coloração verde clara, que o fator está na 0,6.

### Fator de Segurança



**Figura 27: Resultados obtidos, quanto aos valores de fator de segurança do corpo de prova com emenda interferente e soldada**  
**Fonte: elaborado pelos autores.**

O resultado de torque máximo constatado pelo experimento no software, obedecendo a mesma faixa de fator de segurança preestabelecida, utilizada no experimento do corpo de

prova maciço, foi [103,333Nm]; apresentando pouca variação em relação ao valor constatado do torque do corpo de prova maciço (figura 28).

## ☐ Resultados

### ☐ Força de reação e momento em restrições

Nome da restrição	Força de reação		Reação de Momento	
	Magnitude	Componente (x,y,z)	Magnitude	Componente (x,y,z)
Restrição Fixa	0 N	0 N	103,333 N m	103,333 N m
		0 N		0 N m
		0 N		0 N m

**Figura 28: Constatação do resultado do torque resultante do corpo de prova emendado – via Autodesk Inventor**

**Fonte: elaborado pelos autores.**

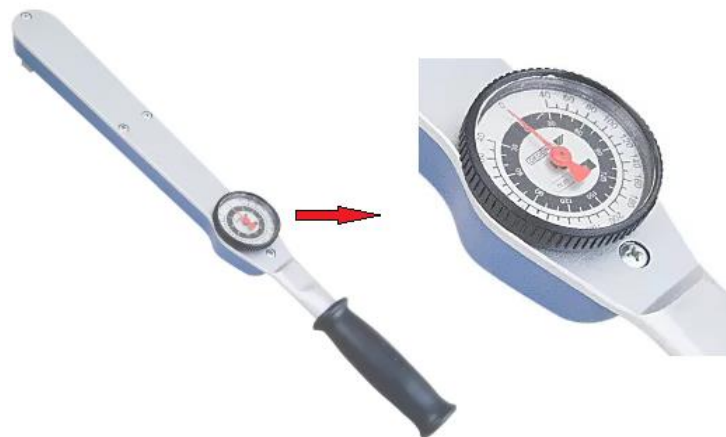
## 4.2 Dados do Teste Experimental 02

### 4.2.1 Experimento com corpo de prova maciço e emendado

Utilizando os desenhos do corpo de prova (figura 29 e figura 30) foram fabricados corpos de prova: maciço e por emenda soldada para a realização de testes práticos, onde foi observado o comportamento desses corpos de prova submetidos, respectivamente, a torque com o auxílio de um torquímetro.



**Figura 29: Fotografia dos dois modelos de corpo de prova utilizados no teste. Corpos maciços e corpos a serem emendados por soldagem**  
Fonte: elaborado pelos autores.



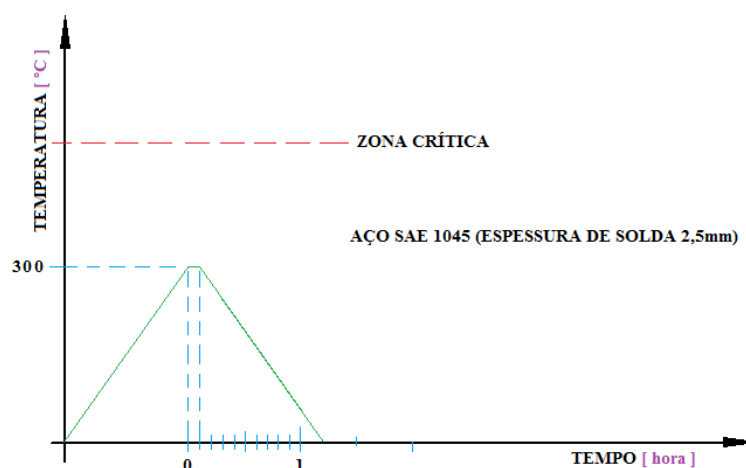
**Figura 30: Modelo do torquímetro utilizado no teste prático (com escala nas unidades de torque: branca - kgf.m / preta - Lbf.pé)**  
Fonte: <http://www.lojadomecanico.com.br>

#### 4.2.2 Procedimento de soldagem para o corpo de prova

Para a soldagem do corpo de prova emendado foi aplicado o eletrodo AWS E9018, ligado ao manganês e molibdênio, utilizados para aços com dureza mecânica considerável, aplicável em aços: SAE1030, Sae1045 e também em SAE1070. Uma de suas finalidades é a soldagem de eixos em geral.

Foi realizado um procedimento de soldagem e acompanhado fatores de controle de temperatura e material de adição, buscando eficácia e homogeneidade da solda com o material de base.

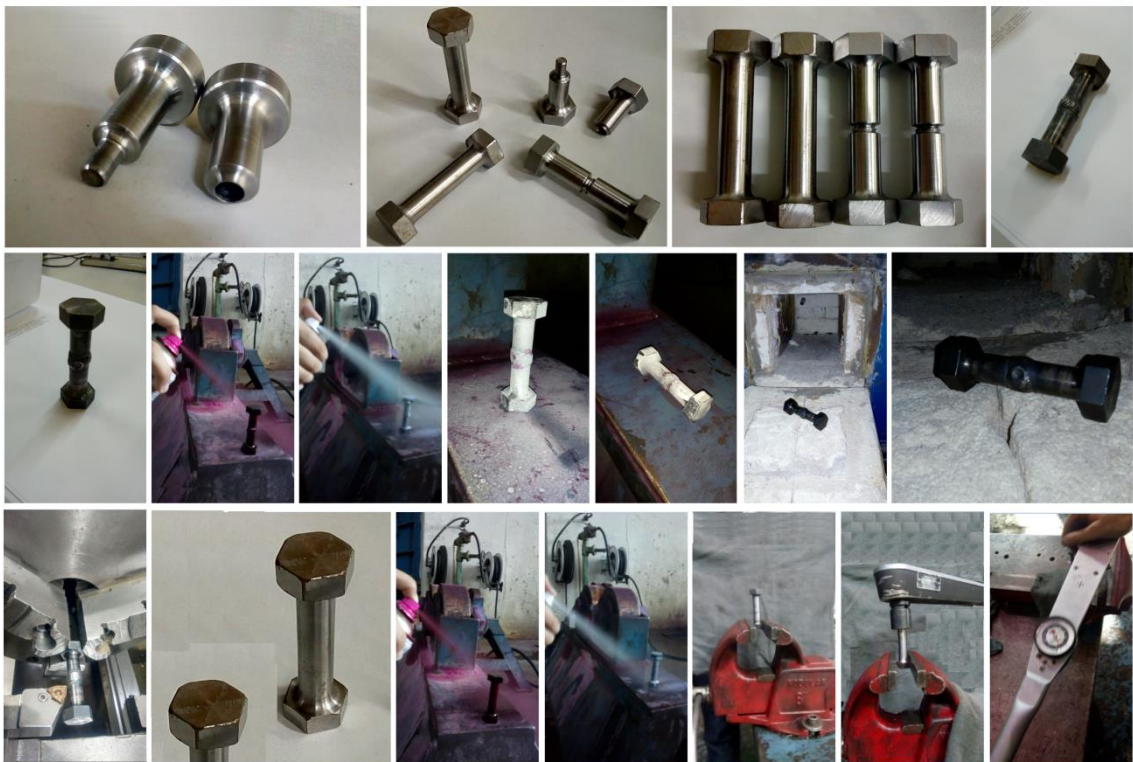
- Proteger regiões adjacentes e realizar um préaquecimento na temperatura entre 230 a 250 °C;
- Aplicar arame AWS E9018, evitando inclusões no material soldado;
- Observar se há trincas, ou poros na região soldada e corrigir qualquer anormalidade, sendo necessária;
- Levar o corpo de prova ao forno e submetê-lo a tratamento de alívio e tensões, obedecendo o ciclo de tratamento, conforme mostrado na figura 31.



**Figura 31: Diagrama de representação de tratamento térmico de alívio de tensões do corpo de prova soldado, após operação de soldagem**

**Fonte: elaborado pelos autores.**

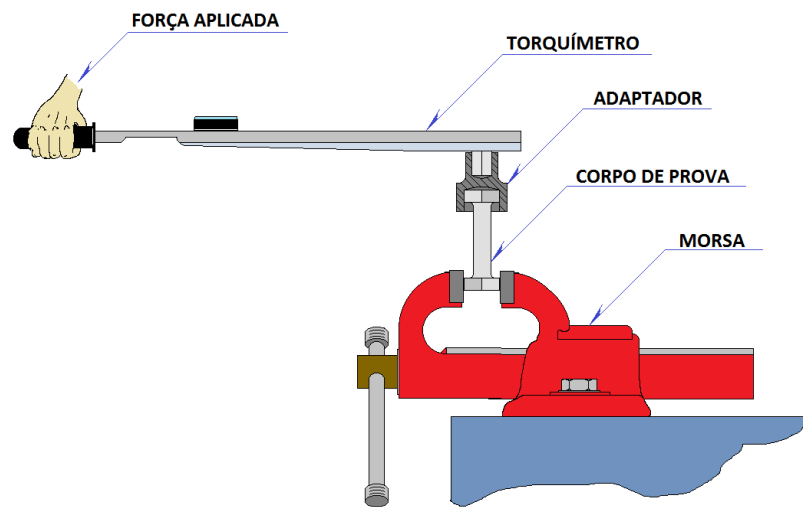
O corpo de prova, emendado por solda, em relação ao maciço foi sucessivamente submetido a: soldagem; ensaio não destrutivo com líquido penetrante para verificar se apresentava imperfeições nas soldas; torneado, buscando deixar o diâmetro uniforme com 12 mm e submetido a ensaio final com líquido penetrante e levado ao experimento (figura 32).



**Figura 32: Demonstração da preparação dos corpos de prova**

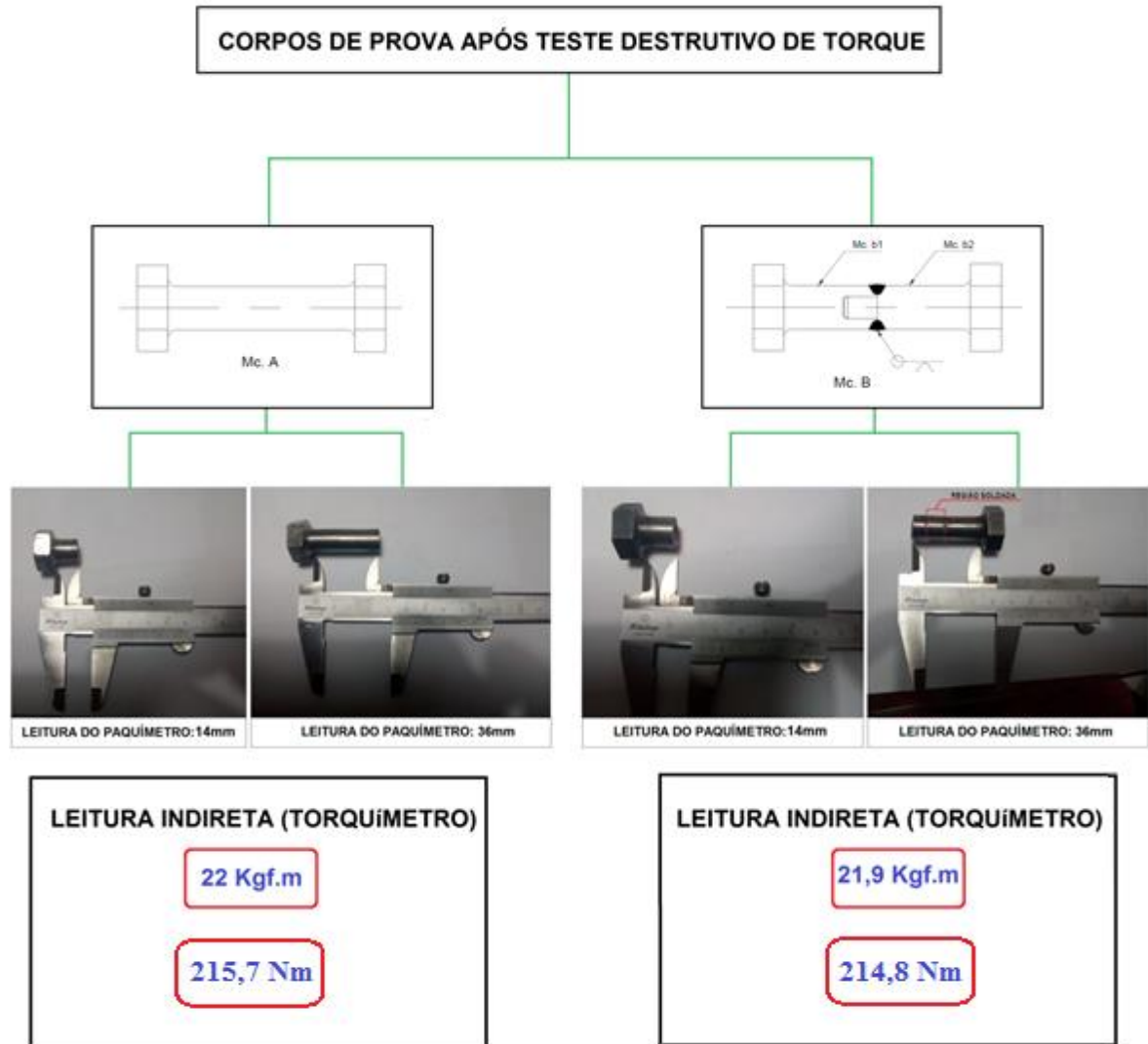
**Fonte: <http://www.lojadomecanico.com.br>.**

Após as preparações dos corpos de prova, o teste foi realizado, manualmente, fixando cada corpo de prova em uma morsa de bancada, utilizando um adaptador para ser feita a transmissão do torque, entre torquímetro de precisão e corpo de prova, como mostrado esquematicamente na figura 33.



**Figura 33: Ilustração básica da maneira como foram realizados os testes para obtenção dos valores de torque máximo, até o momento de cisalhamento dos corpos de prova.**  
Fonte: elaborado pelos autores

Esse teste comparativo teve por objetivo direto observar o torque máximo, o qual cada corpo de prova iria resistir até o momento de ruptura. Foi observado que os torques máximos aplicados, respectivamente, aos corpos de prova apresentaram magnitudes bem próximas, sendo que o corpo de prova maciço obteve [ 22kgf.m] e o corpo de prova emendado por solda alcançou [21,9kgf.m] e que o cisalhamento ocorreu em pontos equidistante com relação a ambos, sendo que o ponto onde encontrava-se a emenda soldada não apresentou falha, como pode ser observado na figura 34.



**Figura 34: Demonstração de resultados após torque estático máximo e cisalhamento dos corpos de prova**  
 Fonte: elaborado pelos autores

Foram observados alguns fatores quanto ao teste, como: o cisalhamento, em ambos os casos, ocorreu numa mesma cota do comprimento e os torques aplicados aos corpos de prova maciços e emendado, em relação ao torque calculado, obedecem respectivamente a fatores de segurança de: 2,08 e 2,07, apresentando pouca diferença. Os cisalhamentos em ambos os corpos de prova ocorreram em pontos semelhantes, próximos ao encaixe do adaptador do torquímetro, sendo que a região soldada com corpo de prova emendado apresentou torção homogênea com relação ao corpo.

## 4.3 Memórias de Cálculo

### 4.3.1 Critérios considerados para os cálculos de resistência mecânica do eixo de mandril

Os cálculos elaborados para observar, por comparação, a resistência mecânica do eixo de mandril intacto, em relação ao mesmo eixo, agora com aplicação do método estudado: emenda pinada com interferência e soldada, foram elaborados levando-se em consideração o critério de falha de *von Mises*, aplicada em cálculos que envolvem materiais dúcteis e leva a considerar os conceitos de energia de distorção do elemento analisado. O critério de *von Mises* considera que a tensão cisalhante tenha proporção igual a 0,577 vezes a tensão de escoamento do material. A figura 35, elaborada conforme gráfico pesquisado no livro (Beer, Johnston – Mecânica dos Materiais – 6ª ed.) aponta a relação entre os critérios de *Tresca* e *von Mises*. A escolha do critério de *von Mises* deu-se devido aos testes de amostras experimentais apontarem que o aço, que possui em sua composição química, os elementos: níquel (Ni), cromo (Cr) ou molibdênio (Mo), utilizem desse critério.

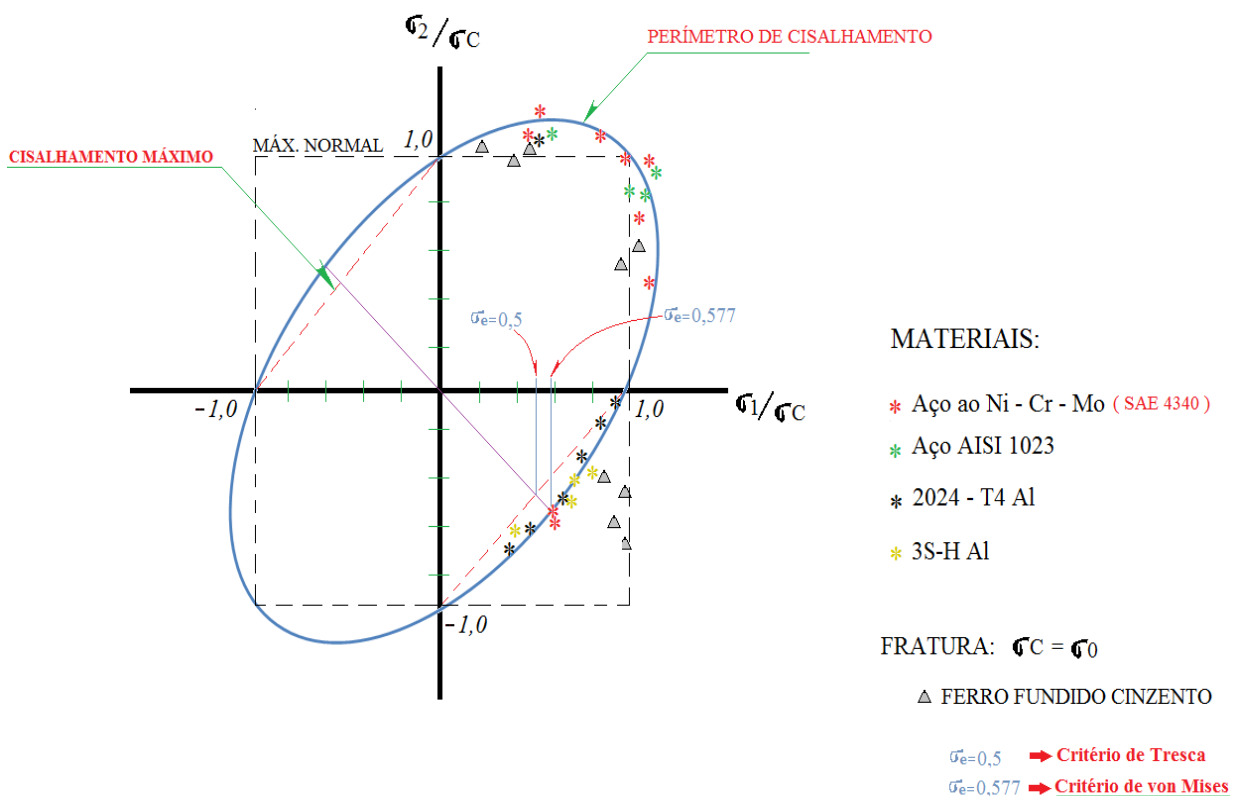


Figura 35: Relação entre os critérios de falha de Tresca e von Mises  
 Fonte: Beer, Johnston – Mecânica dos Materiais – 6ª ed.

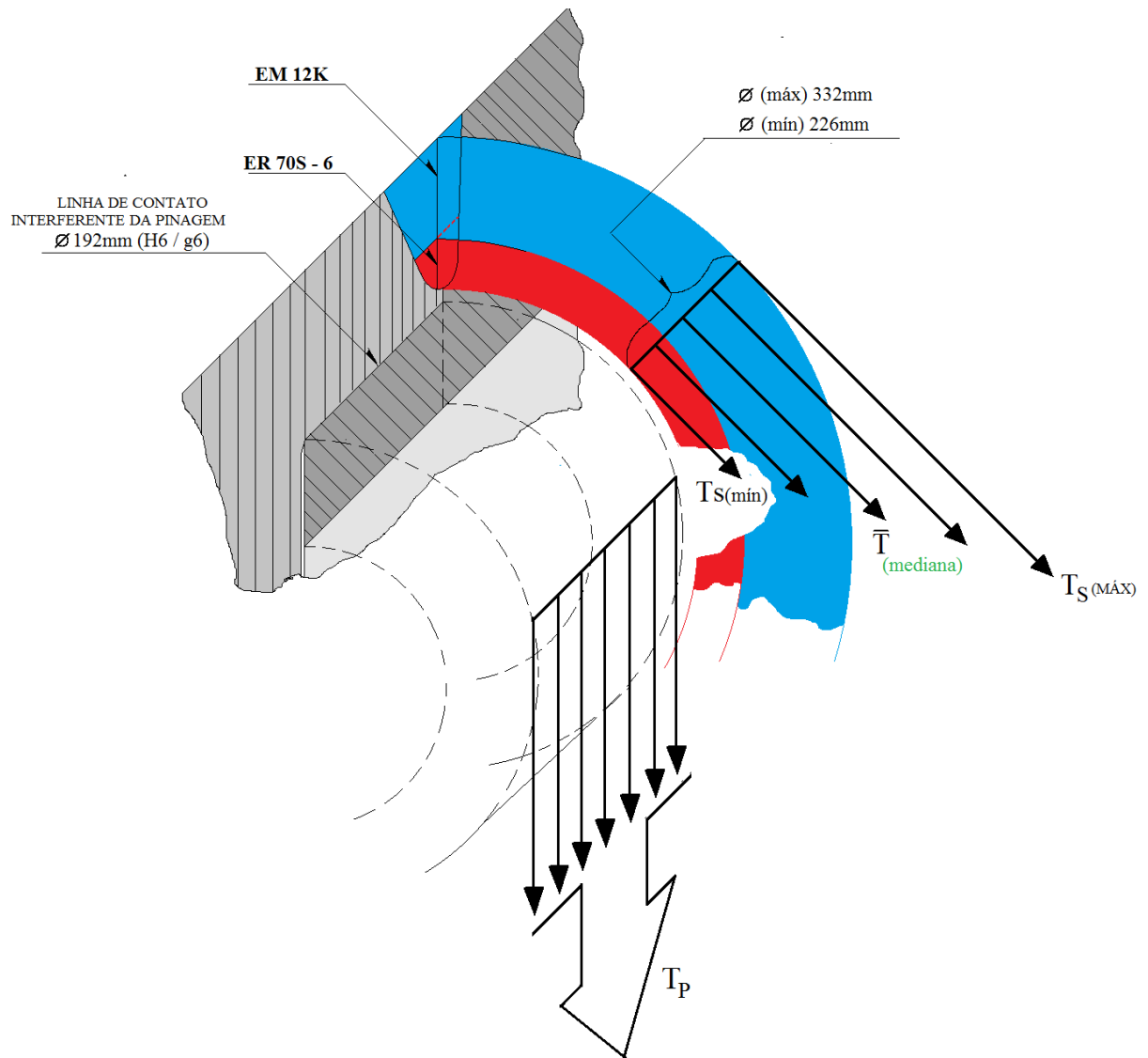
### 4.3.2 Cálculos e análise das solicitações mecânicas

Foram elaborados cálculos correspondentes à parcela de transmissão de torque na região soldada (Figura 36), observado que  $[T_s(\text{máx}) + T_s(\text{mín})/2 = T_s(\text{mediano})]$ , quanto a pinagem interferente [  $T_p$  ] e avaliado os fatores de segurança implicados a cada caso. Como foram aplicadas duas camadas de solda, com especificações distintas, sendo: uma camada raiz com arame ER70S-6, material mais ligado, com características de absorção de tensões pontuais e evita propagação de trincas devido à propriedade de ductilidade – sendo esse material aplicado como uma “almofada” e sobre ela, uma solda mais resistente, AWS EM 12K, arame que apresenta propriedades mecânicas mais consideráveis, em relação ao material do eixo de mandril que foi emendado por esse método.

Foi levado em consideração que as tensões de escoamento de ambas as soldas aplicadas, por praticamente serem similares [ $\sigma_e = 400\text{Mpa}$ ], foi adotado apenas um perfil de tensões cisalhantes para apurar o torque médio de transmissão resultante.

Foi calculada a parcela de torque transmitida pela pinagem, com base em cálculos voltados para montagens interferentes, levando-se em consideração o comprimento do pino, os afastamentos inferiores e superiores e outros fatores, mostrados em cálculos.

Foi feito somatório das parcelas dos torques: da região soldada e da pinagem e foi comparado ao torque, que um eixo intacto resistiria.



**Figura 36: Representação das parcelas de torque e da pinagem**  
 Fonte: elaborado pelos autores.

#### 4.3.3 Cálculo do torque transmitido pela caixa redutora, intermediária entre: motor de 350 cv e eixo mandril

$$P = \frac{T \times n}{71620} [CV]$$

$$T = \frac{71620 \times P}{n} = \frac{71620 \times 350}{1355 / 11,75} = 2,174 \times 10^5 [Kgf. mm]$$

$$T = 21,32 [KN. m]$$

$$J = \frac{\pi}{32} (D_0^4 - D_i^4)$$

$$J = 3,187 \times 10^8 [\text{mm}^4]$$

$$c = \frac{D_0}{2} = 119,85 [\text{mm}]$$

$$\tau = \frac{T \times c}{J} = 1 \left[ \text{Kgf} / \text{mm}^2 \right]$$

$$\sigma_e = \tau / 0,4 = 2,5 [\text{Kgf} / \text{mm}^2]$$

<b>Dados da Caixa Redutora da</b>	<b>Legenda</b>
<p><b>Desenroladora nº 2</b></p> <p>Potência do motor: 350 CV;</p> <p>Rotação do motor: 1355 rpm;</p> <p>Redução total: 1:11,75;</p> <p>Referência: Desenho</p>	<p>P = Potência</p> <p>T = Torque</p> <p>n = Rotação</p> <p>J = Momento de Inercia Polar</p> <p><math>D_i</math> = Diâmetro Interno/ <math>D_0</math> = Diâmetro Externo</p> <p>c = Distancia do centro ao diâmetro externo</p> <p><math>\tau</math> = Tensão de cisalhamento (torção)</p> <p><math>\sigma_e</math> = Tensão de escoamento</p>

**4.3.4 Cálculo inicial da parcela de torque estático transmitido pelo ponto de maior dimensão do eixo de mandril intacto. Esse valor foi calculado para que se tenha uma referência de magnitude de torque estático; pois, trata-se do ponto onde foi emendado.**

$$\tau = \frac{T * c}{J} \rightarrow \frac{T * \frac{d}{2}}{\pi \frac{d^4}{32}} \rightarrow \frac{16T}{d^3}$$

$$T = \frac{\tau_e * \pi * (d_e^3 - d_c^3)}{16}$$

$$T = \frac{470 * \pi * (0,330^3 - 0,0826^3)}{16} * 10^6$$

$$T = 1893,36 \text{ KNm}$$

**4.3.5 Cálculo da parcela de torque transmitida pela solda**

$$T = \frac{(0,58 * 400) * \pi * (0,330^3 - 0,226^3) * 10^6}{16}$$

$$T = 1111,21 \text{ KNm}$$

**4.3.6 Cálculo da parcela de torque transmitida pela pinagem**

$$\Delta = dc \left[ \frac{de^2 + dc^2}{Ee[de^2 - dc^2]} + \frac{dc^2 + di^2}{Ee[dc^2 - di^2]} + \frac{ve}{Ee} - \frac{vi}{Ei} \right]$$

$$1^o \left\{ \begin{array}{l} \Delta = 192 * \left[ \frac{330^2 + 192^2}{190 * 10^2(330^2 - 192^2)} + \frac{192^2 + 82,6^2}{190 * 10^2(192^2 - 82,6^2)} \right] \\ \Delta = 192 * [1,064993819 * 10^{-4} + 7,653822405 * 10^{-5}] \end{array} \right.$$

↓

$$\Delta = 0,03514322 \frac{\text{mm}^3}{\text{daN}}$$

$$2^{\circ} \begin{cases} \sigma_{\text{máx}} = \frac{I_{\text{máx}}}{\Delta} \\ \sigma_{\text{máx}} = \frac{(+0,079 - 0)}{0,03514322} \end{cases}$$

↓

$$\sigma_{\text{máx}} = 0,224794426 \text{ daN/mm}^2$$

$$I_{\text{min}} \geq \sigma_{\text{atr}} * \Delta$$

$$\sigma_{\text{atr}} \leq \frac{I_{\text{min}}}{\Delta}$$

$$\sigma_{\text{atr}} = \frac{0,021 \text{ mm}}{0,03514322 \text{ mm}^3/\text{daN}}$$

$$\sigma_{\text{atr}} = 0,597554805 \text{ daN/mm}^2$$

$$F_a = \pi * \mu * L * d_c * \sigma_{\text{atr}}$$

$$F_a = \pi * 0,12 * 200 * 192 * 0,597554805$$

$$F_a = 8650,477604 \text{ daN}$$

Onde:

$\mu = 0,12$  – Aço prensado

$L = 200\text{mm}$

$$d_c = 192mm$$

$$\sigma_{atr} = 0,597554805 \text{ daN/mm}^2$$

$$T = F_a * \frac{d_c}{2}$$

$$T = 8650,477604 * \frac{192}{2}$$

$$T = 830445,8499 \text{ daN.mm}$$

$$T = 8304458,499 \text{ Nmm} * 10^{-3}$$

$$T = 8304,46 \text{ Nm}$$

$$T = 8,3 \text{ KNm}$$

#### 4.3.7 Somatório das parcelas de torques estáticos, fornecidos pela solda e pela pinagem

$$T_T = T_{solda} + T_{pinagem}$$

$$T_r = 1111,21 + 8,3$$

$$T_r = 1119,51 \text{ KNm}$$

#### 4.3.8 Cálculo para análise do torque estático no menor ponto do eixo

$$\tau = \frac{16T}{\pi d^3}$$

$$T = \frac{(470 * 0,58) * \pi * (0,222^3 - 0,0826^3) * 10^6}{16}$$

$$T = 555,45 \text{ KNm}$$

#### 4.3.9 Levantamento dos valores calculados

- Torque fornecido pelo sistema – motor com caixa redutora: 21,53 KN.m;
- Capacidade de torque estático no ponto “x” do eixo intacto: 1893,36 KN. m;
- Cálculo da parcela de torque resistido pelo menor ponto do eixo: 555,45 KN.m;
- Capacidade de torque estático no ponto “x” do eixo emendado - solda: 1893,36 KN. m;
- Capacidade de torque estático no ponto do eixo emendado - pinagem: 8,3kN.m;
- Somatório das capacidades de torque – da solda e da pinagem: 1119,51 KN.m.

Como o eixo mandril operada com giro livre, não havendo força tangencial contrária, que geraria algum contra torque e analisado os valores dos cálculos, a parcela de torque resistida pelo ponto emendado pelo método não apresenta impacto relevante.

#### 4.4 Verificações dos Fatores de Segurança pela Análise do Critério de Falha de Soderberg

Para desenvolver os cálculos, foi necessário que obtivéssemos o valor de momento máximo no eixo, sendo esse disposto em uma condição hiperestática: dois apoios fixos e um móvel. Foi utilizado do software de engenharia Ftool, com o qual pode simular condições de carga em vigas, ou outros perfis de quaisquer geometrias e obter o momento máximo, momento nos pontos desejados e reações de apoio, graficamente. A figura 37 apresenta a condição do eixo na aplicação e foi elaborada para melhorar a visualização, apontando o eixo estudado em questão, com base em valores consolidados no software Ftool, como pode ser visto na figura 38, que apresenta as condições de carga inseridas no software.

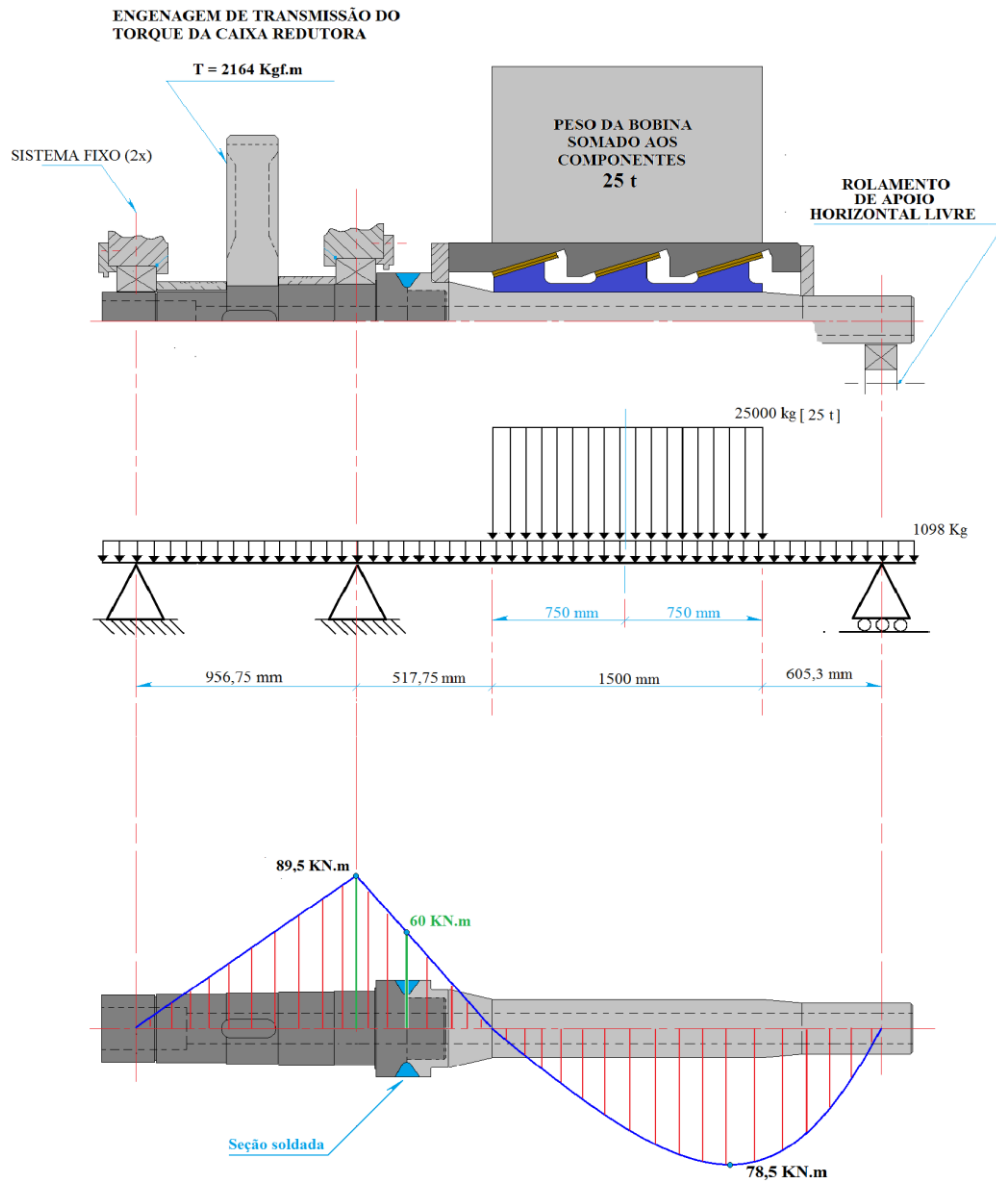
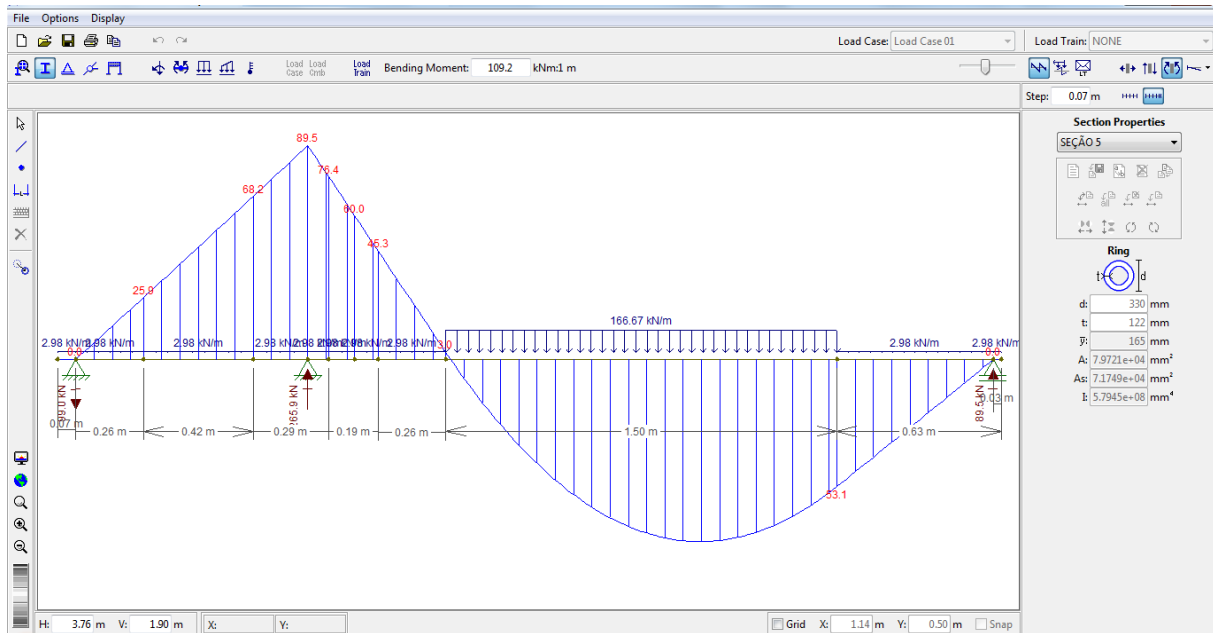


Figura 37: Representação das condições das cargas no corpo do eixo de mandril  
Fonte: elaborado pelos autores.



**Figura 38: Teste gráfico realizado no programa Ftool Two Dimensional Frame Analysis.**  
**Fonte: elaborado pelos autores.**

#### 4.4.1 Cálculo de constatação da utilização dos critérios de Soderberg no projeto do eixo de mandril

$$\sigma_e = 470 \text{ MPa}$$

$$\varnothing = 240 \text{ mm}$$

$$M_{m\acute{a}x} = 89,5 \text{ KNm}$$

$$FS = 1,5$$

$$\frac{1}{FS} = \frac{\sigma_m}{\sigma_e} + k_f * \frac{\sigma_v}{\sigma'_n}$$

$$\sigma_r = 745 \text{ MPa (Aço SAE 4340)}$$

$$\sigma_r = 745000 \text{ KN/m}^2$$

$$\sigma_n = 0,5 * \sigma_r$$

$$\sigma_n = 0,5 * 745000$$

$$\sigma_n = 372500 \text{ KN/m}^2$$

$$\tau_n = 0,6 * \sigma_n$$

$$\tau_n = 0,6 * 372500$$

$$\tau_n = 223500 \text{ KN/m}^2$$

$$\tau_n \rightarrow \tau'_n$$

$$\tau'_n = 223500 * 0,84 * 0,58$$

$$\tau'_n = 108889,2 \text{ KN/m}^2$$

$$\sigma_v = \frac{M_{\text{máx}}}{Z}$$

$$\sigma_v = \frac{89,5}{0,1d^3} * 0,6$$

$$\tau_v = \frac{53,7}{0,1d^3}$$

$$\frac{1}{1,5} = 1,5 * \frac{53,7}{\frac{0,1(D_{\text{maior}}^3 - 0,0826^3)}{108889,2}}$$

$$\frac{1}{1,5} = \frac{805,5}{\frac{(D_{\text{maior}}^3 - 0,0826^3)}{108889,2}}$$

$$D_{\text{maior}} = 0,227\text{m}$$

Como o diâmetro do ponto analisado tem 240mm [0,240m], e o diâmetro calculado foi um valor próximo [ 0,227m], conclui-se que o critério de *Soderberg* foi levado em consideração pela empresa que projetou o eixo.

#### 4.4.2 Verificação do fator de segurança real para dimensionamento do projeto.

$$\frac{1}{FS} = K_f * \frac{\tau_v}{\tau'_n}$$

$$\frac{1}{FS} = 1,5 * \frac{53,7}{\frac{0,1(0,240^3 - 0,0826^3)}{108889,2}}$$

$$\frac{1}{FS} = \frac{805,5}{\frac{(0,240^3 - 0,0826^3)}{108889,2}}$$

$$FS = 1,8$$

O critério de *Soderberg* considera fatores de segurança para eixos na ordem de 1,25 a 2,5. O fator de segurança calculado, na região onde apresentou o momento fletor máximo, apresentou magnitudes respeitando a escala.

Na figura 39 é apresentado o gráfico de *Soderberg*, contendo os valores calculados do projeto do eixo de mandril, onde: no ponto A é caracterizado pela falha da peça por fadiga; ponto B é caracterizado pela tensão de limite de escoamento do material; a linha AB caracteriza a falha da peça, sendo que na coordenada A essa ocorre por fadiga e na coordenada B, por deformação e no ponto C apresenta o efeito de uma carga variável qualquer. A linha de segurança, disposta em verde na imagem, apresenta os limites de segurança entre as tensões: variáveis e constantes.

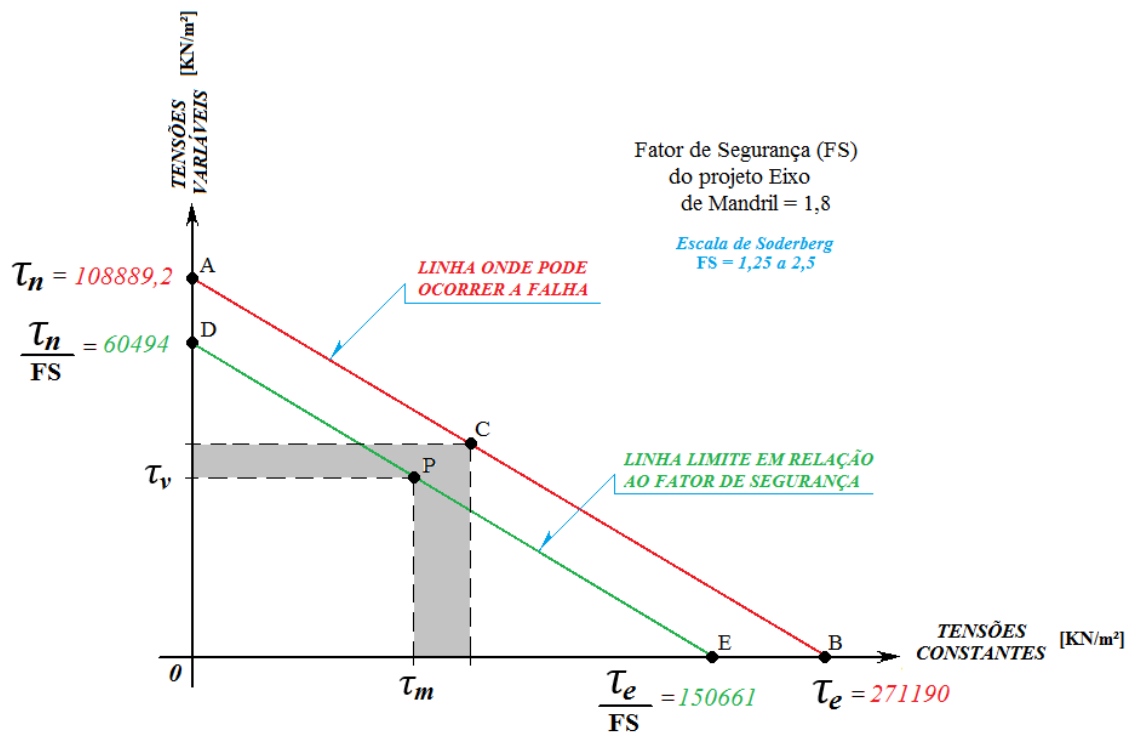


Figura 39: Gráfico de Soderberg  
Fonte: elaborado pelos autores.

4.4.3 Cálculo do fator de segurança estimado no ponto onde foi aplicada a emenda soldada, levando-se em consideração apenas a seção reta anelar da solda para análise.

$$\sigma_r = 500 \text{ MPa (Arame EM12K)}$$

$$\sigma_r = 500000 \text{ KN/m}^2$$

$$\sigma_n = 0,5 * \sigma_r$$

$$\sigma_n = 0,5 * 500000$$

$$\sigma_n = 250000 \text{ KN/m}^2$$

$$\tau_n = 0,6 * \sigma_n$$

$$\tau_n = 0,6 * 250000$$

$$\tau_n = 150000 \text{ KN/m}^2$$

$$\tau_n \rightarrow \tau'_n$$

$$\tau'_n = 150000 * 0,90 * 0,58$$

$$\tau'_n = 78300 \text{ KN/m}^2$$

$$\frac{1}{FS} = \frac{\tau_m}{\tau_e} + \frac{\tau_v}{\tau'_n}$$

$$\sigma_v = \frac{M}{Z}$$

$$\sigma_v = \frac{60}{0,1(0,330^3 - 0,226^3)}$$

$$\sigma_v = 24596,40 \text{ KN/m}^2$$

$$\tau_v = 0,6 * \sigma_n$$

$$\tau_v = 0,6 * 24596,40$$

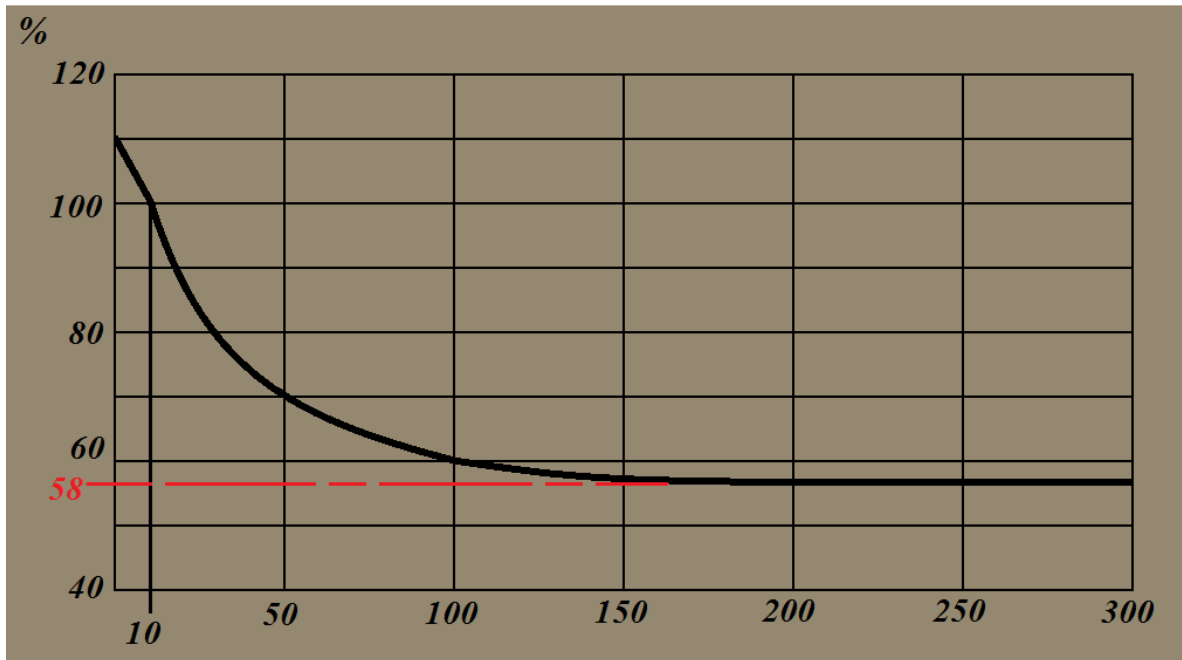
$$\tau_v = 14757,6 \text{ KN/m}^2$$

$$\frac{1}{FS} = K_f * \frac{\tau_v}{\tau'_n}$$

$$\frac{1}{FS} = 1,5 * \frac{14757,6}{78300}$$

$$FS = 3,54$$

O fator de segurança calculado no ponto onde foi realizada a emenda, considerando-se a seção anelar da solda, desprezando a pinagem, apresenta um valor acima da escala recomendada de Soderberg, cujos valores para fatores de segurança recomendados são de 1,25 até 2,5. Isto posto, a região soldada apresentou caráter de hiper dimensionamento, conforme as figuras 40, 41 e 42, utilizadas como fonte para desenvolver os cálculos.



**Figura 40: Gráfico de correção da tensão ( $\sigma_n$ ) pela influência do diâmetro**  
Fonte: Livro Órgão de Máquinas – Dimensionamento (J.R. de Carvalho – Paulo Moraes)

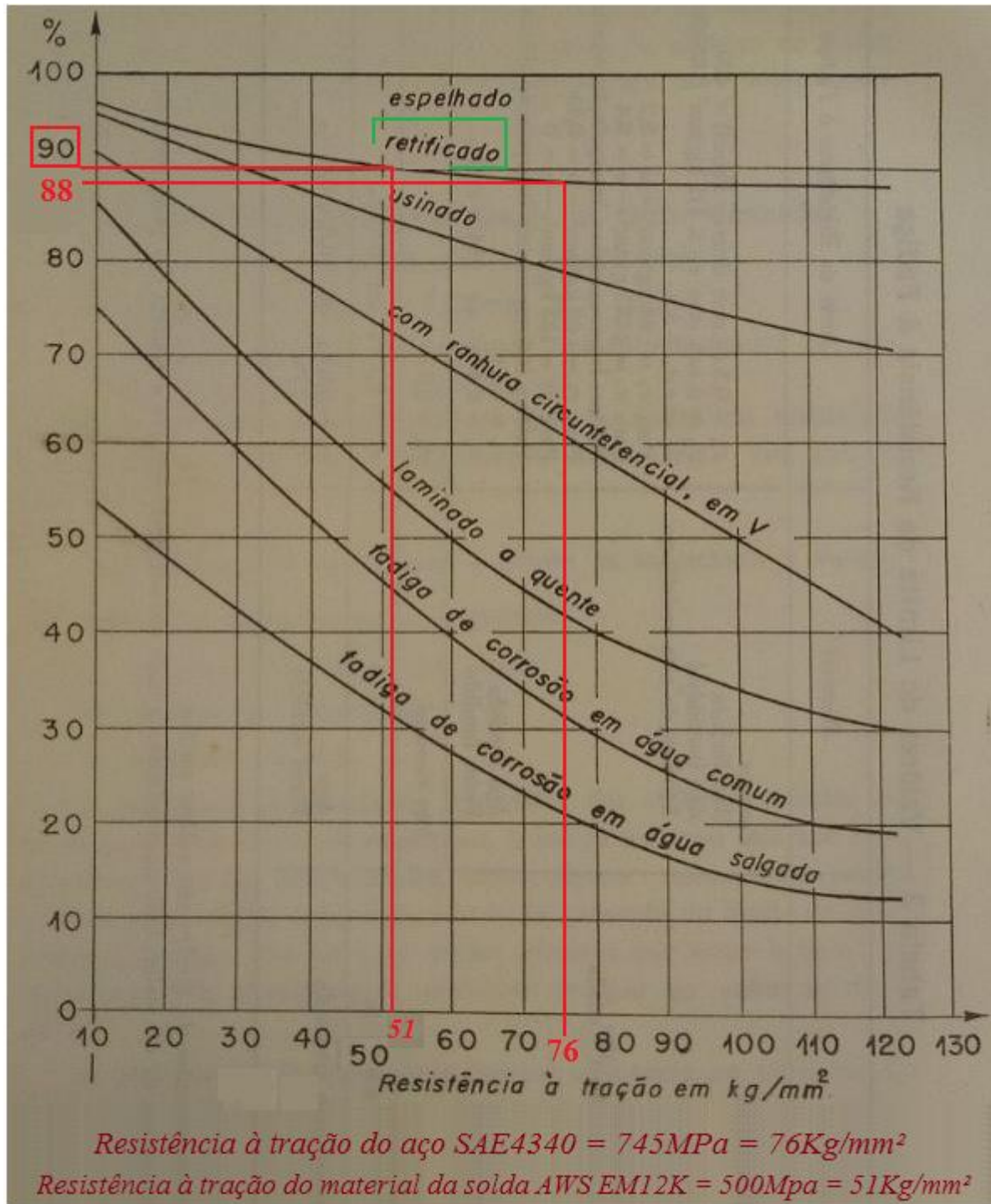


Figura 41: Gráfico de correção da tensão normal ( $\sigma_n$ ) pela influência da superfície  
 Fonte: Livro Órgão de Máquinas – Dimensionamento (J.R. de Carvalho – Paulo Moraes)

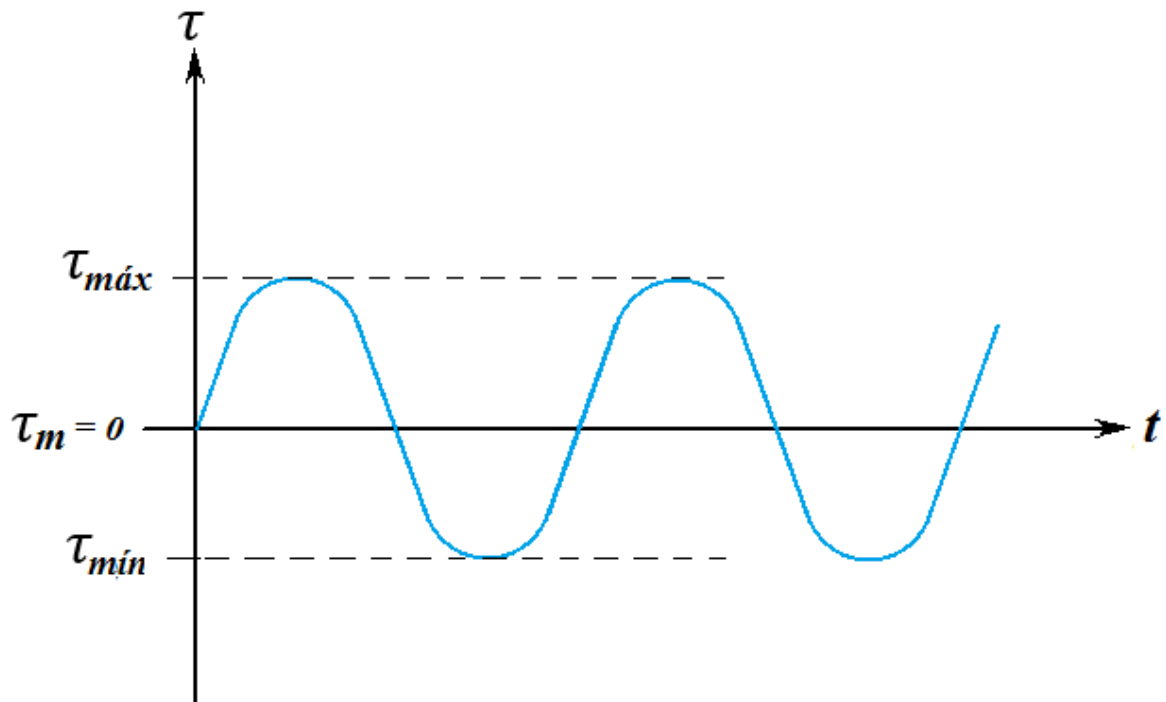
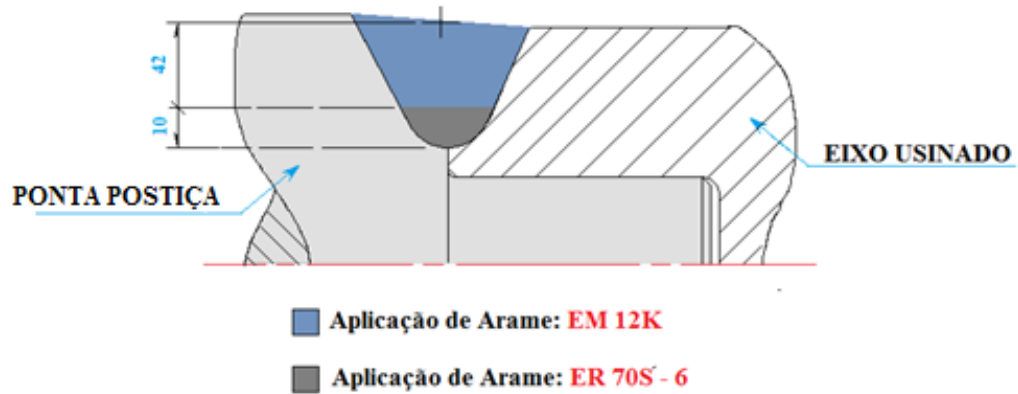


Figura 42: Gráfico de tensão alternada

Fonte: Livro Órgão de Máquinas – Dimensionamento (J.R. de Carvalho – Paulo Moraes)

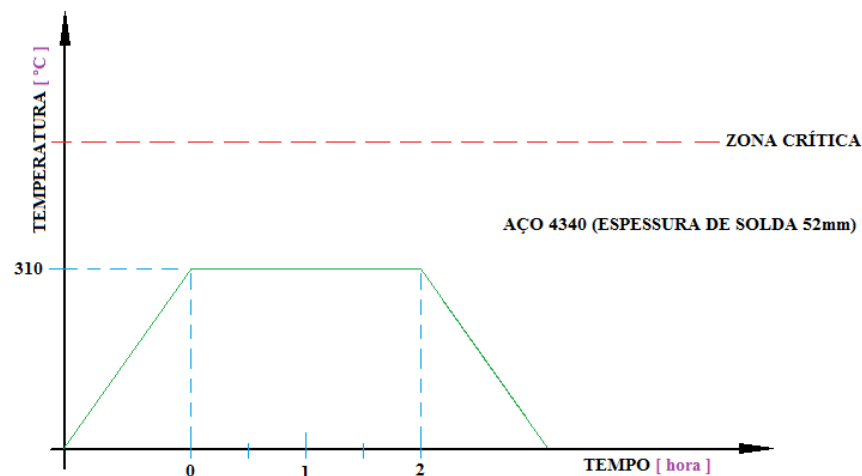
#### 4.4.4 Procedimento de soldagem utilizado

- 1) Após montagem, efetuar ponteamto para travamento das partes a serem unidas;
- 2) Aquecer uniforme e lentamente, o local da emenda, usando chuveirinho, até a temperatura se equalizar entre 180/200 °C;
- 3) Monitorar essas temperaturas, com pirômetro ótico;
- 4) Proteger com manta térmica as regiões adjacentes à emenda, para minimizar a dissipação térmica, e auxiliar na manutenção da temperatura de preaquecimento;
- 5) Efetuar soldagem de união (raiz, conforme figura 43), usando arame ER70S-6 de 1,2 mm;



**Figura 43: Modo de aplicação das soldas na emenda do eixo de mandril.**  
**Fonte: elaborado pelos autores.**

- 6) Efetuar soldagem de enchimento, usando arame EM12K, e fluxo neutro ESAB 1061-B, controlando a temperatura interpasse, para não exceder a temperatura de 250 a 270 °C;
- 7) Compor todo chanfro, depositando material suficiente (sobre metal / reforço de solda), de 2 mm, para posterior usinagem;
- 8) Após a conclusão da solda, efetuar pós aquecimento, mantendo a região soldada, com temperaturas entre 300 e 320°C, por 2 horas, conforme figura 44 de tratamento térmico de alívio de tensão;
- 9) Envolver a região da emenda do eixo, com manta térmica e deixá-la resfriar lentamente, até a temperatura ambiente;



**Figura 44: Diagrama de representação de tratamento térmico de alívio de tensões do ponto soldado do eixo de mandril, após operação de soldagem.**  
**Fonte: elaborado pelos autores.**

#### 4.5 Dados do Caso 01

O experimento do caso01 é referente ao eixo da desbobinadora n° 1 da linha de galvanização conforme figura 45, podendo ser definida como o processo responsável por revestir um metal por outro, com o objetivo de protegê-lo contra a corrosão ou melhorar sua aparência. Basicamente, essa linha trabalha com a zincagem por imersão a quente, podendo ser citado como um processo econômico e que proporciona um bom efeito quanto a proteção do aço. Essa proteção por meio do zinco é dividida em duas formas: a que tem como responsável a camada de revestimento, sendo ela chamada de proteção de barreira e temos a proteção sacrificial ou galvânica, usada quando o revestimento apresenta discontinuidades. Essa linha está diretamente ligada à demanda de produção do setor, sendo que a sua parada ocasiona perdas extremas.



**Figura 45. Caixa redutora da desbobinadora montada, ainda com o eixo quebrado**  
**Fonte: elaborado pelos autores.**

A figura 46 apresenta detalhe da fratura do eixo de mandril quebrado, no local de montagem do rolamento. Essa fratura, extraordinária, ocorreu após 15 anos e 3 meses em que esse eixo foi aplicado na linha.



**Figura 46. Detalhe da Fratura do Eixo de Mandril**  
Fonte: elaborado pelos autores.

A solicitação de reparo do eixo de mandril levou em considerações as características físicas e geométricas do eixo. A solicitação de reparo ocorreu no dia 01 de agosto de 2015, devido à desbobinadora n°1 ter uma parada de emergência em função da quebra do eixo do mandril, ocorrendo interrupção da linha em aproximadamente 12h, a partir deste horário a linha voltou a rodar, porém com redução da produção diária. Tal conjunto foi recebido pela oficina em situação mostrada na Figura 47, com a missão de criar alternativa de reparo, pois não existia sobressalente do eixo.



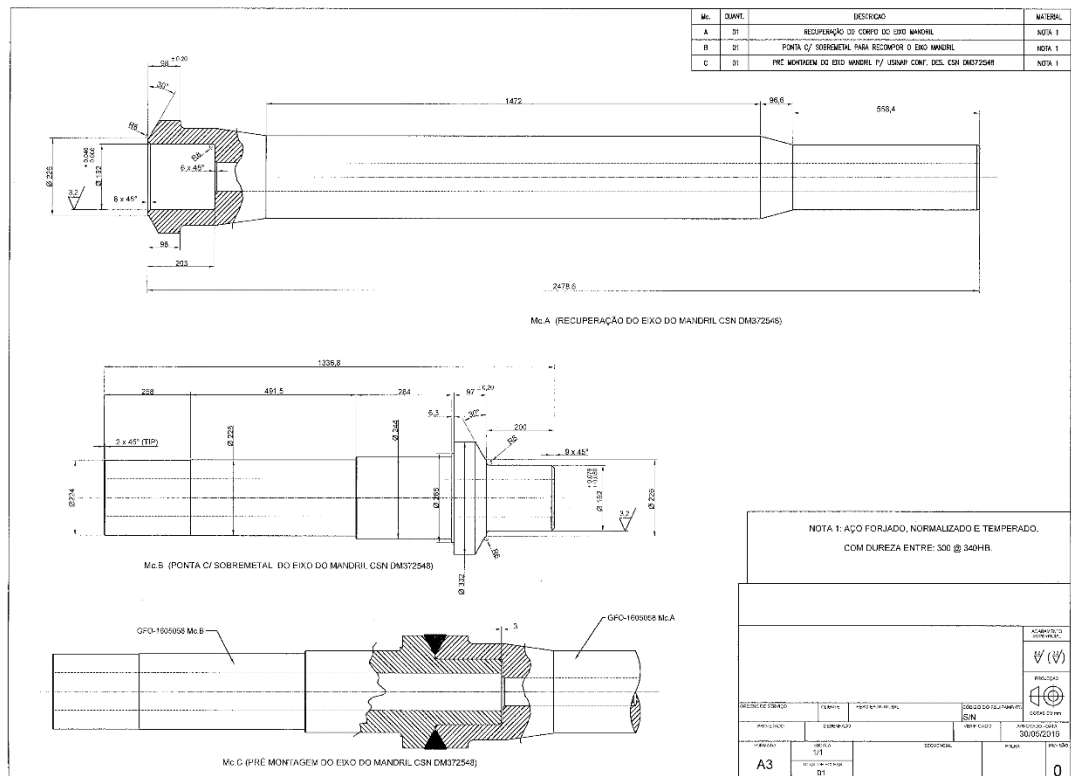
**Figura 47. Eixo Mandril.**  
**Fonte: elaborado pelos autores.**

Por se tratar de um eixo de geometria complexa, e a inexistência de recursos da oficina para a fabricação, foi adotado o método de emenda interferente e soldada. O reparo do eixo e a montagem do conjunto foram realizados em 8 dias (02/08/15 a 10/08/15). Após conjunto montado o mesmo foi enviado para sua área de aplicação onde até o presente momento está rodando sem nenhuma restrição, assim permitindo que a linha de galvanização retornasse a sua produção normal.

O problema ocorreu devido ao aquecimento e falha por fadiga do rolamento auto compensador de rolos, duas carreiras de rolo montado no eixo, com isso o rolamento aqueceu até que transferiu calor ao eixo, provocando a fragilidade da região, conseqüentemente propagou-se uma trinca, levando à quebra do eixo na seção. Assim, no eixo de mandril quando quebrado inicia-se o processo de recuperação por emenda interferente e soldada, a qual passa por várias etapas, descrita a seguir:

- a) **Constatação do modo de falha do eixo:** realiza-se um estudo, tendo como meta registrar o fato, que é o modo de falha do eixo. Em alguns casos realiza-se um teste prévio, não destrutivo, com líquido penetrante ou ultrassom. Quando um eixo se quebra, analisa-se as tensões nas áreas adjacentes à quebra, buscando verificar se houve propagação das trincas; caso não tenha propagado, inicia-se o reparo;

- b) **Elaboração dos desenhos auxiliares de reparo:** após constatação do modo de falha do eixo, elabora-se desenhos para auxiliar na operação de usinagem e reparo do eixo conforme figura 48;



**Figura 48: Desenho base para demonstrativo de metodologia do reparo**  
**Fonte: elaborado pelos autores.**

- c) **Usinagem:** nessa etapa é fabricada uma “ponta postiça”, com sobremetal no diâmetro externo a ser usinado posteriormente, tendo como referência o corpo do eixo. Essa ponta é dotada de um pino interferente e angulação proposital. Na extremidade do eixo quebrado, ou trincado faz-se uma usinagem que se trata de uma furação interna com angulação preestabelecida que em conjunto com a angulação deixada na “ponta postiça”, estabelece-se um sulco ou “gorne” para receber a aplicação das soldas, unindo as partes de acordo com a Figura 49;



**Figura 49: Usinagem da Ponta Postiça e do Eixo de Mandril**  
Fonte: elaborado pelos autores.

- d) **Montagem das partes a serem soldadas:** a montagem entre as partes é feita e levada à soldagem. Em seguida, realiza-se o aquecimento para dilatação da furação, que adota uma relação com o pino da ponta postiça de “prensado à quente”, assim, o eixo já com a ponta postiça montada é levado ao processo de soldagem por arco submerso: (Figura 50);



**Figura 50: Montagem das partes a serem soldadas**  
Fonte: elaborado pelos autores.

- e) **Processo de soldagem:** O eixo é levado à máquina de soldagem automática, por arco submerso. Após a soldagem, faz-se verificação de conformidade das soldas aplicadas, utilizando o líquido penetrante. Caso haja alguma imperfeição nas soldas, faz-se uma soldagem pontual no local: (Figura 51);



**Figura 51: Processo de Soldagem**  
Fonte: elaborado pelos autores.

- f) **Usinagem final do eixo:** baseando-se na concentricidade da ponta intacta, na usinagem faz-se referência no diâmetro externo do corpo eixo e com auxílio de relógio comparador então se faz a usinagem da ponta emendada, buscando a concentricidade do todo, conforme Figura 52.



**V Figura 52: Usinagem do eixo após soldagem**  
Fonte: elaborado pelos autores.

- g) **Montagem do conjunto:** após a usinagem e verificação da emenda soldada, através de testes, o eixo é levado à montagem no conjunto de mandril e o conjunto é aplicado na área de atuação, demonstrado na figura 53.



**Figura 53: Montagem do conjunto**  
**Fonte: elaborado pelos autores**

#### **4.6 Resultados Econômicos**

A análise econômica avalia o custo e retorno produzido pelo projeto. Com isso, a tabela apresenta todos os custos relativos a usinagem do eixo, que tem como objetivo a preparação para a inserção de uma ponta postiça. Os custos de fabricação da ponta postiça estão descritos na tabela 2, importante ressaltar que os valores foram obtidos através de consulta com fornecedores.

**Tabela 1: Valores Referentes a Usinagem do Eixo**

Atividades	Qnt mão de obra	Hora de execução	Taxa (HH)	Custo Parcial (HH)
planejamento das atividades (elaboração de croqui)	1,0	4	51,23	R\$ 204,92
coordenação das atividades	1,0	3	57,26	R\$ 171,78
abastecimento de materiais	1,0	2	57,26	R\$ 114,52
transporte	2,0	2	57,26	R\$ 229,04
serra	1,0	5	89,96	R\$ 449,80
torno de grande porte	1,0	6	104,52	R\$ 627,12
ensaios não destrutivos	1,0	3	51,23	R\$ 153,69
torno CNC	1,0	8	104,52	R\$ 836,16
inspeção final	1,0	2	51,23	R\$ 102,46
transporte	2,0	1	57,26	R\$ 114,52
<b>Valor</b>				<b>R\$ 2.889,49</b>
Materiais Utilizados	Quantidade	Status de Aquisição	Custo Unitário	Custo Parcial
Eixo conforme projeto	1	REPARAR	0	R\$ 0,00
Insertos SNMG-DM	2	COMPRA	32,47	R\$ 64,94
Kit material de Líquido Penetrante	1	COMPRA	62,36	R\$ 62,36
<b>Valor Total</b>				<b>R\$ 3.016,79</b>

**Fonte: Elaborado pelos autores**

**Tabela 2: Valores Referentes à Usinagem da Ponta Postiça**

Atividades	Qnt de mão de obra	Hora de execução	Taxa (HH)	Custo Parcial (HH)
Planejamento das atividades (elaboração de croqui)	1,0	5	R\$ 51,23	R\$ 256,15
Coordenação das atividades	1,0	3	R\$ 57,26	R\$ 171,78
Abastecimento de materiais	1,0	2	R\$ 57,26	R\$ 114,52
Transporte	1,0	2	R\$ 57,26	R\$ 114,52
Serra	1,0	5	R\$ 89,96	R\$ 449,80
Torno de grande porte	1,0	24	R\$ 104,52	R\$ 2.508,48
Ensaios não destrutivos (ultrassom)	1,0	2	R\$ 51,23	R\$ 102,46
Torno CNC	1,0	24	R\$ 104,52	R\$ 2.508,48
Ensaios não destrutivos (líquido penetrante)	1,0	3	R\$ 51,23	R\$ 153,69
Inpeção final (dimensional)	1,0	3	R\$ 51,23	R\$ 153,69
Transporte	1,0	1	R\$ 57,26	R\$ 57,26
<b>Valor</b>				<b>R\$ 6.590,83</b>
Materiais Utilizados	Quantidade	Status de Aquisição	Custo Unitário	Custo Parcial
Valor ponta postiça	1	FABRICAÇÃO	R\$ 6.590,83	R\$ 6.590,83
Matéria-prima	1	REUTILIZAÇÃO	R\$ 0,00	R\$ 0,00
<b>Valor Total</b>				<b>R\$ 6.590,83</b>

**Fonte: Elaborado pelos autores.**

A tabela 3 apresenta os custos totais para a preparação do eixo. Os valores foram obtidos através de consulta com fornecedores. O valor total de reparação ficou em R\$29.056,74(vinte e nove mil, cinquenta e seis reais e setenta e quatro centavos), no qual estão inclusos a usinagem do eixo, a fabricação da ponta postiça e os materiais envolvidos no processo. Importante ressaltar que não estão inclusos os custos de instalação, pois esses são de responsabilidade do cliente.

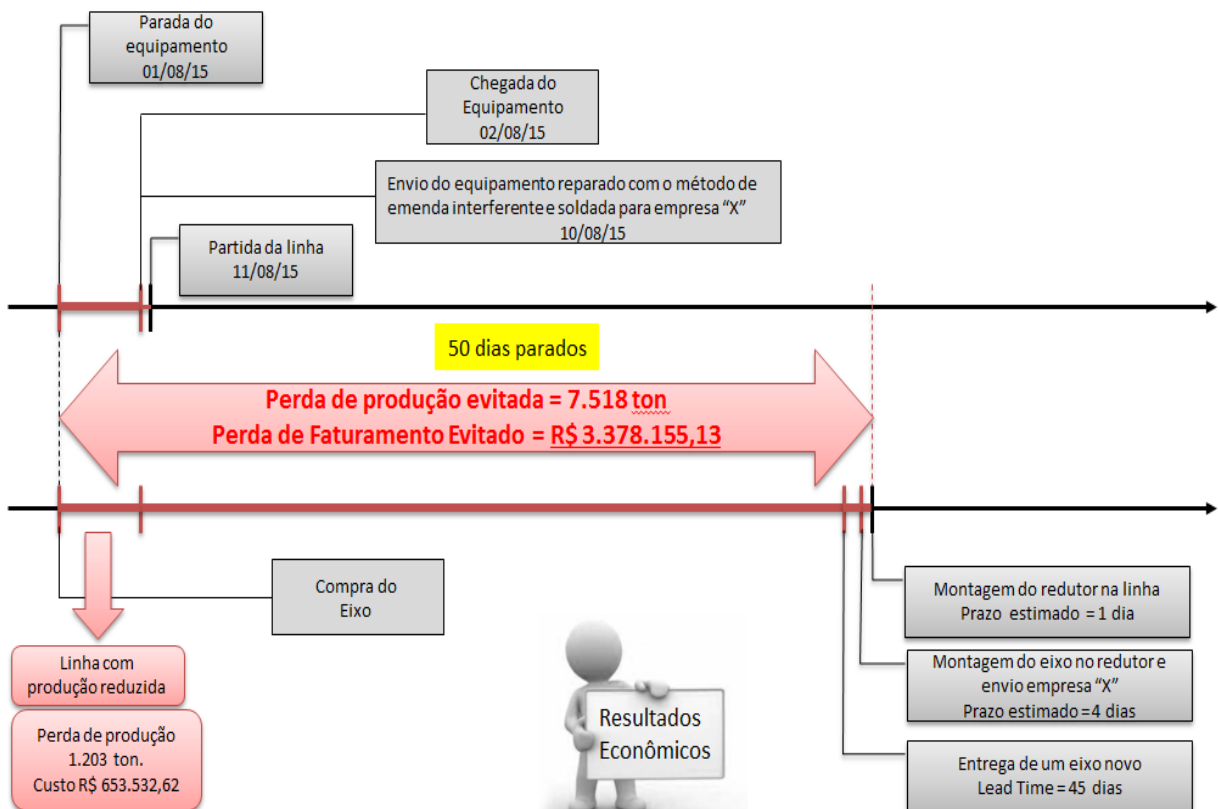
**Tabela 3: Valores Referentes ao Reparo do Eixo**

Atividades	Qnt Mão de Obra	Hora de execução	Taxa (HH)	Custo Parcial (HH)
Planejamento das atividades	1	5	R\$ 51,23	R\$ 256,15
Coordenação das atividades	1	3	R\$ 57,26	R\$ 171,78
Abastecimento de materiais	1	2	R\$ 57,26	R\$ 114,52
Transporte	1	2	R\$ 57,26	R\$ 114,52
Usinagem (torno de grande porte)	1	6	R\$ 104,52	R\$ 627,12
Inspeção intermediária 01	1	2	R\$ 51,23	R\$ 102,46
Montagem intermediária	2	4	R\$ 70,54	R\$ 282,16
Soldagem automática	1	16	R\$ 89,96	R\$ 1.439,36
Ensaio não destrutivo	1	3	R\$ 51,23	R\$ 153,69
Tratamento térmico	1	12	R\$ 89,96	R\$ 1.079,52
Usinagem (torno)	1	20	R\$ 104,52	R\$ 2.090,40
Usinagem (mandriladora)	1	24	R\$ 104,52	R\$ 2.508,48
Acabamento	1	6	R\$ 70,50	R\$ 423,00
Inspeção final	1	4	R\$ 51,23	R\$ 204,92
Transporte	1	1	R\$ 51,26	R\$ 51,26
<b>VALOR</b>				<b>R\$ 9.619,34</b>
Materiais Utilizados	Quantidade	Status de Aquisição	Custo Unitário	Custo Parcial
Fluxo ESAB OK-1093-C	12,32	COMPRA	R\$ 3,88	R\$ 47,80
Arame AWS EM12K 1,6 mm	10,47	COMPRA	R\$ 10,05	R\$ 105,22
Arame ER70-S	6	COMPRA	R\$ 9,57	R\$ 57,42
Eixo usinado valores conforme planilha	1	REPARO	R\$ 3.016,79	R\$ 3.016,79
Ponta postiça valores conforme planilha	1	FABRICAÇÃO	R\$ 6.590,83	R\$ 6.590,83
Valor da usinagem final do eixo co	1	REPARO	R\$ 9.619,34	R\$ 9.619,34
<b>VALOR TOTAL</b>				<b>R\$ 29.056,74</b>

**Fonte: Elaborado pelos autores.**

A quebra do eixo do mandril da desbobinadora n° 1 da linha de galvanização da Empresa “X” acarretou em uma redução de produção na linha, pois a linha continuou operando com apenas a desbobinadora n° 2. Como não existia uma unidade sobressalente disponível do eixo e com o tempo de espera para aquisição de um novo eixo foi aproximadamente 45 dias, a perda de produção estimada foi de 7.518 toneladas e o custo da parada da linha foi de R\$3.378.155,13 (três milhões, trezentos e setenta e oito mil, cento e

cinquenta e cinco reais e treze centavos), devido a isto, foi necessário executar um reparo de emergência, o qual ocorreu por meio do procedimento de emenda interferente e soldada, que resultou na economia de custo e tempo, pois o reparo foi executado em 08 dias e a perda de produção foi de aproximadamente 1.203 toneladas e o custo da parada da linha foi de R\$ 653.532,62 (seiscentos e cinquenta e três mil, quinhentos e trinta e dois reais e sessenta e dois centavos), conforme figura 54.



**Figura 54: Linha do tempo dos resultados econômicos**  
**Fonte: elaborado pelos autores.**

Conforme os valores apresentados na tabela 3, o custo de reparação do eixo foi de R\$29.056,74 (vinte e nove mil, cinquenta e seis reais e setenta e quatro centavos). Este custo ficou menor do que se o cliente tivesse optado em comprar um eixo novo, para o qual o custo de aquisição seria de R\$137.560,00 (cento e trinta e sete mil, quinhentos e sessenta reais), valor este, o qual foi obtido através de consulta com fornecedores.

A reparação do eixo mostrou ser mais viável por apresentar um custo menor e um tempo menor de parada da linha de produção. O projeto gerou uma economia de R\$108.503,26 (cento e oito mil, quinhentos e três reais e vinte e seis centavos) para o cliente, conforme apresentado no gráfico 1.

**Gráfico 01: Demonstrativo de relação entre custos**



Fonte: Elaborado pelos autores.

#### 4.6.1 Resultados tangíveis

O projeto atingiu o seu objetivo; pois, a solução adotada foi rápida e eficaz, conseguindo até mesmo aumentar a vida útil dos componentes e dos equipamentos.

Na oficina foi verificada a disponibilidade dos centros de trabalho para execução das atividades, a demonstração da motivação da equipe por ser um método novo e estratégico para atender a parada de emergência da área. Levando também em consideração o

reaproveitamento de material, foi utilizado componente sucateado para servir como matéria prima para a fabricação de um componente.

#### **4.6.2 Resultados operacionais:**

O Eixo Mandril da desbobinadora nº 1 da linha de Galvanização está instalado na linha e está operando até a presente data. Por falta de histórico de ocorrências com esse tipo de falha do equipamento não é possível estimar uma nova quebra e nem um novo reparo.

## 5 CONCLUSÃO

A permuta do eixo do mandril por um novo, tecnicamente não deve ser preterida; todavia, se na aplicação do método da emenda por pinagem interferente e soldagem no eixo, forem obedecidos alguns critérios de qualidade no projeto, como: adoção de precisas interferências dimensionais; acabamento adequado nas superfícies dos contatos da pinagem; cálculo para a definição do comprimento da pinagem, sem que esse comprometa alguma seção do eixo, o fragilizando; arame com propriedades compatíveis com o material de base e sendo possível em eixos com seções não uniformes, como é o caso do eixo de mandril, for aplicada nas seções de maiores diâmetros, pode-se alcançar resultados expressivos quanto à eficácia, em comparação a um eixo novo.

O processo de recuperação por esse método apresenta um alto retorno financeiro e agilidade de execução; pois, a economia em evitar a parada de produção, devida ao tempo de espera na compra de um eixo novo somado ao custo de compra em comparação ao tempo e custos de reparo, torna esse método viável.

Como a desbobinadora nº 1 é enclausurada e a operação é controlada por sistema computadorizado da empresa, não apresentando risco ao operador e observado que o fator de segurança resultante dos cálculos, apenas na seção reta de solda, sem levar em consideração a parcela de contribuição da pinagem, supre o critério de Soderberg quanto ao modo de falha por tensão no material, levando-se ainda em consideração os cuidados na execução de tratamento térmico de alívio de tensão para o rearranjo das discordâncias microestruturais, devidas às tensões residuais pelo fenômeno da dilatação térmica ocasionado após a soldagem, teoricamente não há risco de acidente na linha por suposta quebra.

O eixo foi aplicado à linha no ano de 2003. A quebra ocorreu no ano de 2015. Desde a data de aplicação do eixo emendado à linha de produção até o presente momento, observa-se que esse está operando em perfeitas condições, estendendo a vida útil do equipamento.

## 6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como o estudo de caso foi realizado em uma empresa de grande porte, onde buscou-se a reutilização de materiais de estoque de oficina, devido à emergência estabelecida. Para o projeto em questão, aplicou-se o arame de soldagem AWS EM12K, normalmente utilizado para aplicações a arco submerso, com média concentração de manganês, baixa de carbono e silício na composição química; oferecendo uma faixa de utilização para passes simples e múltiplos passes.

Esse arame oferece uma tensão de escoamento de 400Mpa, o que influenciou, de acordo com os cálculos, diretamente na magnitude do torque estático do ponto onde foi aplicado, em comparação aos cálculos feitos da mesma seção, original; pois, o material de base SAE4340 possui tensão de escoamento na ordem de 470Mpa. Há outros arames, os quais oferecem melhores propriedades, como tensão de escoamento similar ao do material de base, o que conseqüentemente aumentariam a resistência do ponto soldado.

Um ponto a ser ressaltado foi que os cálculos da seção circular vazada de menores dimensões do eixo, apresenta aproximadamente 50% da resistência, que só a seção soldada oferece, visto que é recomendado que a soldagem ocorra sempre no maior diâmetro do corpo do eixo. A parcela de torque transmitida pela pinagem, mesmo que baixa, pode ser onerada aumentando-se o comprimento da pinagem e alterando as tolerâncias dimensionais, de forma a diminuir a diferença entre os afastamentos: superiores e inferiores, analisando se as propriedades do material de base suportam deformações, e não precipitem trincas na estrutura.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AÇO SAE 1045. **Propriedades Mecânicas.** Disponível em: <<http://www.materiais.gelsonluz.com/2017/10/aco-sae-1045-propriedades-mecanicas.htm>>. Acesso em: 01 nov. 2017.

AÇO SAE 4340. **Propriedades Mecânicas.** Disponível em: <<http://www.materiais.gelsonluz.com/2017/10/aco-sae-4340-propriedades-mecanicas.html>>. Acesso em: 01 nov. 2017.

ARAME MAIS UTILIZADO PARA APLICAÇÕES A ARCO SUBMERSO NAS INDÚSTRIAS. Disponível em: <<http://www.lincolnelectric.com.br/consumiveis/arco-submerso>>. Acesso em: 08 out. 2017.

AWS, **Welding Handbook, Materials and Applications – Part 1.** American Welding Society, 8a Edição, Vol. 3, 1996.

BASE TCC - **Pesquisas sobre eixo mandril.** Disponível em: <[http://www.bibliotecadigital.ufmg.br/dspace/bitstream/handle/1843/MDAD-7W6NKQ/microsoft\\_word\\_\\_\\_dissertacao\\_sergio\\_rolla\\_guimar\\_es\\_mar\\_2009.pdf?sequence=1](http://www.bibliotecadigital.ufmg.br/dspace/bitstream/handle/1843/MDAD-7W6NKQ/microsoft_word___dissertacao_sergio_rolla_guimar_es_mar_2009.pdf?sequence=1)>. Acesso em: 15 nov. 2017.

BEER F. P.; JOHNSTON E. R. JR.; DeWOLF J. T.; MAZUREK D. F. **Mecânica dos Materiais.** : 7. ed. São Paulo: AMGH Editora Ltda., 2015. 828 p.

CARVALHO, J. R.; MORAES, P. **Órgãos de Máquinas – Dimensionamento.** :1. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda., 1970. 343 p.

CATÁLOGO ESAB – **Arames para solda aws em12k**. Disponível em:  
<<http://www.esab.com.br/br/pt/support/index.cfm>>. Acesso em: 09 out. 2017.

**CATÁLOGO PARA SOLDA ER 70S-6**. Disponível em:  
< <http://www.belgobekaert.com.br/produtos/documents/folder-solda.pdf>>. Acesso em: 09 out. 2017.

HIBBELER, R. C. **Resistência dos Materiais**. : 7. ed. São Paulo: Person Education do Brasil Ltda., 2010. 637 p.

OWLING, N. E. **Mechanical Behavior of Materials: Engineering Methods for Deformation, Fracture and Fatigue**.2.ed. New Jersey: Prentice Hall, 1999.

ROBERTS, W. L., **Cold Rolling of Steel**. Ed. Marcel Dekker, Inc. 1978.

SCHIJVE, J. **Fatigue of structures and materials**.Ed. Kluwer Academic Publishers, 2001.

SITE DA VILLARES.**Aço SAE1045**. Disponível em: <  
<http://www.villaresmetals.com.br/pt/villares/Downloads?type=23529>>. Acesso em: 01 nov. 2017.