

**UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL  
ÁREA DO CONHECIMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E ENGENHARIA**

**ALEXANDRE GIRELLI SCODRO**

**ANÁLISE ESTRUTURAL, OPERACIONAL E GEOMÉTRICA PARA O  
REPROJETO DO EIXO DA CALIBRAÇÃO DE UMA FORMADORA DE TUBOS**

**CAXIAS DO SUL**

**2019**

**ALEXANDRE GIRELLI SCODRO**

**ANÁLISE ESTRUTURAL, OPERACIONAL E GEOMÉTRICA PARA O  
REPROJETO DO EIXO DA CALIBRAÇÃO DE UMA FORMADORA DE TUBOS**

Trabalho de conclusão de curso  
apresentado à Universidade de Caxias do Sul  
como requisito parcial para a obtenção do grau  
de Engenharia Mecânica. Área de  
concentração: Mecânica dos Sólidos

Orientador: Prof. Me. Vagner Grison

**CAXIAS DO SUL**

**2019**

**ALEXANDRE GIRELLI SCODRO**

**ANÁLISE ESTRUTURAL, OPERACIONAL E GEOMÉTRICA PARA O  
REPROJETO DO EIXO DA CALIBRAÇÃO DE UMA FORMADORA DE TUBOS**

Trabalho de conclusão de curso  
apresentado à Universidade de Caxias do Sul  
como requisito parcial para a obtenção do grau  
de Engenharia Mecânica. Área de  
concentração: Mecânica dos Sólidos

**Aprovado em** \_\_\_/\_\_\_/\_\_\_

Banca examinadora

---

Prof. Me. Vagner Grison  
Universidade de Caxias do sul – UCS

---

Prof. Dr. Eng. Marcos Alexandre Luciano  
Universidade de Caxias do sul – UCS

---

Prof. Me Paulo Roberto Linzmaier  
Universidade de Caxias do sul – UCS

## RESUMO

Este trabalho realizado na Panatlântica Tubos SA aborda o aumento do número de quebras do eixo tracionador da conformação de uma formadora de tubos e implanta soluções para o aumento da vida útil do mesmo. Foram calculadas as cargas atuantes de flexão e torque sobre o eixo onde concluiu-se que ele não devia quebrar dentro de um período de dois meses, analisada e modificada a geometria visando o aumento de sua vida útil e recalculada as tensões para analisar o ganho em sua resistência mecânica. Paralelo a isso foram analisados e corrigidos erros de operação na máquina e *setup* que comprometiam o bom funcionamento do eixo. Foi feita análise de dureza onde se detectou uma falha grave no tratamento térmico. Por fim concluiu-se que foram várias as causas que contribuíram para a queda do tempo de vida útil do eixo, com problemas operacionais na soldagem das tiras e excesso de tiras no acumulador, *setup* feito de forma incorreta com peças faltando na montagem e rolamentos fora de posição e tratamento térmico deixando uma dureza menor na região de quebra. Como resultados foi obtido um aumento em 28,57% no fator de segurança, corrigida falhas operacionais, de *setup* e de tratamento térmico e o eixo no passe de formação mais crítico não teve quebra em 5 meses de monitoramento.

**Palavras-chaves:** Eixo-árvore. Análise de tensões. Fadiga.

## ABSTRACT

This work carried out at Panatlântica Tubos SA addresses the increase in the number of traction shaft breaks in the forming of a pipe maker and implements solutions to increase its service life. The flexural and torque acting loads on the axle were calculated where it was concluded that it should not break within a period of two months, the geometry was analyzed and modified in order to increase its useful life and the recalculated stresses to analyze the gain in its mechanical resistance. Parallel to this were analyzed and corrected operating errors in the machine and setup that compromised the proper operation of the shaft. Hardness analysis was performed where a serious heat treatment failure was detected. Finally, it was concluded that there were several causes that contributed to the drop in shaft life, with operational problems in welding the strips and excess strips in the accumulator, setup done incorrectly with missing parts in the assembly and bearings outside position and heat treatment leaving a lower hardness in the break region. As a result a 28.57% increase in safety factor was obtained, corrected operational, setup and heat treatment failures and the axis in the most critical formation pass had no break in 5 months of monitoring.

Keywords: **Spindle shaft. Stress analysis. Fatigue.**

## LISTA DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 1 - Eixo e região de quebra .....  | 14 |
| Figura 2 - Etapas da formação de um tubo (flor do tubo) .....                               | 15 |
| Figura 3 - Gráfico de quebra de eixos .....   | 15 |
| Figura 4 - Técnicas para reduzir a concentração de tensão .....                             | 18 |
| Figura 5 - Torque sobre em eixo .....   | 19 |
| Figura 6 - Estado de tensão devido à torção pura.....                                       | 21 |
| Figura 7 - Exemplos de falhas por fadiga.....   | 23 |
| Figura 8 - Influência da temperatura de revenido na tenacidade em aços de baixa liga .....  | 28 |
| Figura 9 - Perfilagem.....  | 28 |
| Figura 10 - Estados de tensão característicos da perfilagem .....                           | 29 |
| Figura 11 - Marcas de praia e radiais na fratura de fadiga por torção de um eixo SAE 4340.. | 31 |
| Figura 12 - Funções do eixo na formadora de tubos .....                                     | 32 |
| Figura 13 - Região da quebra do eixo.....   | 32 |
| Figura 14 - Castelo de formação.....  | 33 |
| Figura 15 - Etapas da formação do tubo.....   | 33 |
| Figura 16 - Gráfico de quebra de eixos por localização .....                                | 34 |
| Figura 17 - Forças atuantes no eixo.....  | 34 |
| Figura 18 - Fluxograma do plano de ação .....   | 35 |
| Figura 19 - Eixo original (a) e modificado (b) com raio e arruela de encosto .....          | 36 |
| Figura 20 - Montagem original do eixo.....  | 37 |
| Figura 21 - Montagem modificada do eixo .....   | 37 |
| Figura 22 - Quebra dos eixos com problemas no tratamento térmico.....                       | 38 |
| Figura 23 - Tira com solda MIG.....   | 39 |
| Figura 24 - Cordão de solda passando pelos rolos de formação e tubo com a emenda de tira    | 39 |
| Figura 25 - Regulagem de altura dos castelos de conformação .....                           | 40 |
| Figura 26 - Pontos de medição de dureza.....  | 41 |
| Figura 27 - Metalografia do eixo (a) e pino com têmpera superficial (b).....                | 41 |
| Figura 28 - Metalografia do aço SAE 8640 normalizado (400x) e do eixo (500x).....           | 42 |
| Figura 29 - Processo de fabricação do eixo antigo e atual .....                             | 43 |
| Figura 30 - Especificação do fabricante quanto ao material do eixo.....                     | 44 |
| Figura 31 - Deflexão de viga duplamente apoiada com carga central.....                      | 47 |
| Figura 32 - Defeito no corte da tira .....  | 47 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 33 - Vista explodida da montagem do eixo.....                        | 48 |
| Figura 34 - Têmpera de indução do eixo.....                                 | 49 |
| Figura 35 - Eixo sem têmpera na região de diâmetro maior .....              | 50 |
| Figura 36 - Gráfico de quebra de eixos .....                                | 51 |
| Figura 37 - Eixo com a vida útil monitorada.....                            | 51 |
| Figura 38- Vista superior da formadora de tubos .....                       | 58 |
| Figura 39 - Desbobinador com e sem tira.....                                | 59 |
| Figura 40 - Tracionador do corte e emenda.....                              | 59 |
| Figura 41 - Corte e emenda .....  | 60 |
| Figura 42 - Máquina de solda MIG do corte e emenda .....                    | 60 |
| Figura 43 - Acumulador .....  | 61 |
| Figura 44 - Acumulador vertical .....                                       | 61 |
| Figura 45 - Formação .....  | 62 |
| Figura 46 - Solda de alta frequência e raspagem do cordão de solda.....     | 62 |
| Figura 47 - Tanque de resfriamento .....                                    | 63 |
| Figura 48 - Calibração e cabeça turca .....                                 | 63 |
| Figura 49 - Serra voadora .....   | 64 |
| Figura 50 - <i>Encoder</i> da serra .....                                   | 64 |
| Figura 51 - Diagrama de corpo livre da formadora de tubos.....              | 70 |
| Figura 52 - Diagrama de corpo livre no passe 3 da formação.....             | 71 |
| Figura 53 - Alívio de retífica (detalhe A) na região de quebra do eixo..... | 72 |
| Figura 54 - Transmissão de torque da formação .....                         | 72 |
| Figura 55 - Tensão, corrente elétrica e rotação do motor da formação.....   | 73 |
| Figura 56- Transmissão do motor para a caixa de redução .....               | 74 |
| Figura 57 - Curva S-N de fadiga .....                                       | 77 |

## LISTA DE TABELAS

|  |    |
|--|----|
| Tabela 1 - Ensaio de dureza.....   | 41 |
| Tabela 2 - Interpolação para concentrador de tensão de flexão .....            | 45 |
| Tabela 3 - Interpolação para concentrador de tensão de torção .....            | 45 |
| Tabela 4 - Comparativo entre o eixo original e o eixo modificado.....          | 46 |
| Tabela 5 - Características da formadora de tubos.....                          | 58 |
| Tabela 6 - Coeficientes para fator de correção de acabamento superficial ..... | 66 |
| Tabela 7 - Fatores de confiabilidade .....                                     | 67 |
| Tabela 8 - Fatores z para Equação 18.....                                      | 68 |
| Tabela 9 - Rendimentos por tipo de transmissão.....                            | 74 |
| Tabela 10 - Critérios de escolha para limite de fadiga .....                   | 75 |
| Tabela 11 - Número de ciclos conforme tensões.....                             | 76 |

## LISTA DE SÍMBOLOS

|                      |   |
|----------------------|---|
| $A$                  | Coefficiente de correção                      |
| $b$                  | Expoente de correção                          |
| $b$                  | Largura de contato entre dois eixos           |
| $C_{\text{carreg}}$  | Fator de carregamento                         |
| $C_{\text{conf}}$    | Fator de confiança                            |
| $C_{\text{superf}}$  | Fator de superfície                           |
| $C_{\text{tamanho}}$ | Fator de tamanho;                             |
| $C_{\text{temp}}$    | Fator de temperatura                          |
| $d$                  | Diâmetro do eixo                              |
| $E$                  | Módulo de elasticidade do material            |
| $F$                  | Força   |
| $F_{\text{at}}$      | Força de atrito                               |
| $F_{\text{res}}$     | Força resultante                              |
| $F_{\text{t}}$       | Força de tração                               |
| $h$                  | Espessura da tira                             |
| $H$                  | Potência                                      |
| $I$                  | Segundo momento de área de uma seção circular |
| $J$                  | Segundo momento polar de área                 |
| $k_{\text{t}}$       | Concentrador de tensão para flexão            |
| $k_{\text{ts}}$      | Concentrador de tensão para torção            |
| $l$                  | Comprimento do eixo                           |
| $M$                  | Momento fletor                                |
| $N$                  | Número de ciclos                              |
| $P_{\text{max}}$     | Pressão máxima                                |
| $r$                  | Raio da superfície externa                    |
| $S_{\text{e}}$       | Limite de fadiga corrigido                    |
| $S'_{\text{e}}$      | Limite de fadiga estimado                     |
| $S_{\text{m}}$       | Resistência do material a $10^6$ ciclos       |
| $S(N)$               | Resistência a fadiga correspondente           |

|                |   |
|----------------|---|
| $S_{ut}$       | Resistência à tração                              |
| $S_y$          | Tensão normal de escoamento                       |
| $T$            | Torque  |
| $z$            | Fator z   |
| $\alpha$       | Ângulo de conformação                             |
| $\sigma$       | Tensão de flexão                                  |
| $\sigma_0$     | Tensão nominal                                    |
| $\sigma_1$     | Tensão principal                                  |
| $\sigma_a$     | Tensão alternante                                 |
| $\sigma_e$     | Tensão equivalente de von Mises                   |
| $\sigma_f$     | Tensão de fadiga                                  |
| $\sigma_{max}$ | Tensão nominal máxima                             |
| $\sigma$       | Tensão média                                      |
| $\sigma'$      | Tensão média corrigida pelo critério de von Mises |
| $\nu$          | Coefficiente de Poisson                           |
| $\tau$         | Tensão de cisalhamento                            |
| $\tau_0$       | Tensão de cisalhamento nominal                    |
| $\tau_{max}$   | Tensão de cisalhamento máxima                     |
| $\omega$       | Velocidade angular                                |

## SUMÁRIO

|   |           |
|---|-----------|
| <b>1 INTRODUÇÃO .....</b>   | <b>14</b> |
| 1.1 JUSTIFICATIVA .....   | 15        |
| 1.2 OBJETIVOS .....   | 16        |
| <b>1.2.1 Objetivo geral.....</b>  | <b>16</b> |
| <b>1.2.2 Objetivos específicos.....</b>                                     | <b>16</b> |
| <br>  |           |
| <b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>   | <b>17</b> |
| 2.1 TENSÃO.....   | 17        |
| <b>2.1.1 Concentrações de tensões em eixos .....</b>                        | <b>17</b> |
| 2.2 TORÇÃO .....  | 19        |
| 2.3 SOLICITAÇÕES DE FLEXÃO E TORÇÃO .....                                   | 20        |
| 2.4 CRITÉRIOS DE FALHA .....  | 21        |
| <b>2.4.1 Critério de escoamento da máxima energia de distorção .....</b>    | <b>21</b> |
| <b>2.4.2 Critério de falha de Goodman.....</b>                              | <b>22</b> |
| 2.5 FADIGA .....  | 23        |
| 2.6 EIXOS.....  | 24        |
| 2.7 TRATAMENTOS TÉRMICOS.....   | 24        |
| <b>2.7.1 Normalização .....</b>   | <b>25</b> |
| <b>2.7.2 Têmpera.....</b>   | <b>25</b> |
| <b>2.7.3 Têmpera superficial.....</b>                                       | <b>26</b> |
| <b>2.7.4 Cementação .....</b>   | <b>27</b> |
| <b>2.7.5 Revenimento.....</b>   | <b>27</b> |
| 2.8 PROCESSO DE PERFILAGEM .....  | 28        |
| 2.9 FRACTOGRAFIA.....   | 29        |
| <b>2.9.1 Objetivos da fractografia .....</b>                                | <b>30</b> |
| <b>2.9.2 Características fractográficas macroscopicamente visíveis.....</b> | <b>30</b> |
| <br>  |           |
| <b>3. MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>   | <b>32</b> |
| 3.1 OBJETO DE ESTUDO .....  | 32        |
| 3.2 PLANO DE AÇÃO .....   | 35        |
| 3.3 MATERIAL E TRATAMENTO TÉRMICO .....                                     | 35        |
| 3.4 GEOMETRIA.....  | 36        |

|              |  |           |
|--------------|--|-----------|
| <b>3.4.1</b> | <b>Adição de raio e arruela de encosto .....</b>   | <b>36</b> |
| <b>3.4.2</b> | <b>Aumento do diâmetro do eixo na região de quebra. ....</b>   | <b>36</b> |
| <b>3.4.3</b> | <b>Retirada do furo de fixação da chaveta .....</b>  | <b>37</b> |
| <b>3.5</b>   | <b>OPERACIONAL .....</b>   | <b>38</b> |
| <b>3.6</b>   | <b>SETUP .....</b>   | <b>39</b> |
| <b>3.7</b>   | <b>ENSAIOS .....</b>   | <b>40</b> |
| <b>3.7.1</b> | <b>Ensaio de dureza .....</b>  | <b>40</b> |
| <b>3.7.2</b> | <b>Análise metalográfica .....</b>   | <b>41</b> |
| <b>4.</b>    | <b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>   | <b>43</b> |
| <b>4.1</b>   | <b>FORÇAS ATUANTES .....</b>   | <b>43</b> |
| <b>4.2</b>   | <b>ALTERAÇÕES DE MATERIAL E TRATAMENTO TÉRMICO .....</b>   | <b>43</b> |
| <b>4.3</b>   | <b>ALTERAÇÕES DE GEOMETRIA .....</b>   | <b>44</b> |
| <b>4.4</b>   | <b>CORREÇÕES OPERACIONAIS .....</b>  | <b>46</b> |
| <b>4.5</b>   | <b>CORREÇÕES DE SETUP .....</b>  | <b>48</b> |
| <b>4.6</b>   | <b>RESULTADOS DO ENSAIO DE DUREZA .....</b>  | <b>48</b> |
| <b>4.7</b>   | <b>RESULTADOS DO ENSAIO DE METALOGRAFIA .....</b>  | <b>50</b> |
| <b>4.8</b>   | <b>AUMENTO DA DURABILIDADE .....</b>   | <b>50</b> |
| <b>5.</b>    | <b>CONCLUSÃO .....</b>   | <b>52</b> |
|              | <b>REFERÊNCIAS .....</b>   | <b>54</b> |
|              | <b>APÊNDICE A – FORMADORA DE TUBOS .....</b>   | <b>58</b> |
|              | <b>APÊNDICE B – CRITÉRIOS E METODOLOGIA DE CÁLCULO DE FADIGA .....</b>                                   | <b>65</b> |
|              | <b>APÊNDICE C – MEMORIAL DE CÁLCULO – FORÇAS ATUANTES NO EIXO .....</b>                                  | <b>70</b> |
|              | <b>APÊNDICE D – PRODUÇÃO DE DOIS MESES DA FORMADORA DE TUBOS .....</b>                                   | <b>78</b> |
|              | <b>APÊNDICE E – FOTOS DAS REGIÕES DE QUEBRA DOS EIXOS .....</b>  | <b>87</b> |
|              | <b>APÊNDICE F – CARACTERÍSTICAS E PROPRIEDADES DOS AÇOS PARA EIXOS .....</b>                             | <b>88</b> |
|              | <b>ANEXO A – FATOR DE CONCENTRAÇÃO DE TENSÃO DE FLEXÃO (A) E TORÇÃO (B) PARA UM EIXO COM SULCO .....</b> | <b>89</b> |

|  |           |
|--|-----------|
| <b>ANEXO B - CARTAS DE CONCENTRAÇÃO DE TENSÃO DE FLEXÃO (A) E TORÇÃO (B) PARA UM EIXO COM RAIOS DE CANTO .....</b> | <b>90</b> |
| <b>ANEXO C – SUPERFÍCIES DE FRATURA COM DIVERSAS CONDIÇÕES DE CARREGAMENTOS E NÍVEIS DE TENSÕES .....</b>          | <b>91</b> |
| <b>ANEXO D – COEFICIENTES DE ATRITO PARA AÇO SOBRE DIVERSOS MATERIAIS .....</b>                                    | <b>92</b> |
| <b>ANEXO E – RESISTÊNCIA AO ESCOAMENTO E À TRAÇÃO DO AÇO CARBONO .....</b>   | <b>93</b> |
| <b>ANEXO F – RESULTADO DO ENSAIO DE TRAÇÃO .....</b>   | <b>94</b> |

## 1 INTRODUÇÃO

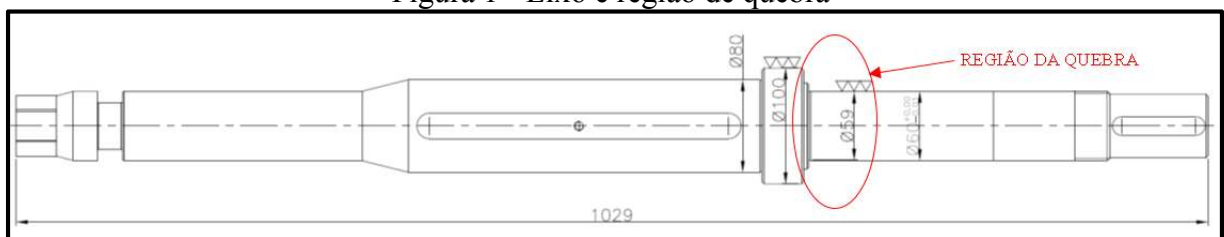
Devido a diversos fatores como a concorrência, qualidade, produtividade e redução dos custos de produção em um mercado cada vez mais competitivo, é importante que as máquinas tenham uma alta confiabilidade, maior produtividade e menos paradas por *setup* ou manutenção.

A maioria das falhas de componentes mecânicos em serviço ocorre devido à fadiga do material. Fadiga mecânica é a degradação das propriedades mecânicas que levam à falha de um componente que recebe um carregamento cíclico, ou seja, fadiga é um problema que afeta qualquer componente estrutural ou parte móvel de uma máquina. Normalmente, a fadiga ocorre em regime elástico. (SANTOS, 2011).

Os eixos são elementos mecânicos, normalmente cilíndricos, utilizados para transmitir rotação e torque de um ponto a outro, sendo muito utilizados em motores e máquinas. Em geral o carregamento de eixos que transmitem rotação é a torção devido ao torque e a flexão devido às cargas transversais, que podem atuar isoladamente ou de maneira combinada. Esses carregamentos poderão ser estáticos ou dinâmicos (CORDEIRO, 2012).

Os eixos utilizados na formação em máquinas formadoras de tubo têm duas funções: tracionar a tira do acumulador para a máquina, sofrendo um esforço de torção; e conformar o tubo de forma arredondada através dos rolos formadores, sofrendo flexão. A Figura 1 mostra o eixo da formação e a região de quebra.

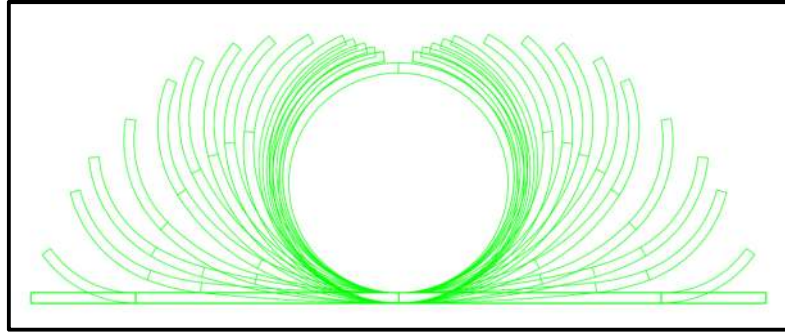
Figura 1 - Eixo e região de quebra



Fonte: Adaptado de arquivos da Panatlântica Tubos SA (2009)

A Figura 2 mostra as etapas de formação de um tubo durante a passagem da tira na formação da máquina. Cada etapa de formação corresponde ao passe por um rolo superior e inferior de formação, sendo esses rolos fixados pelo eixo de formação. Essas etapas de formação também são chamadas “flor do tubo”, e o perfil de cada rolo é desenvolvido a partir dela.

Figura 2 - Etapas da formação de um tubo (flor do tubo)



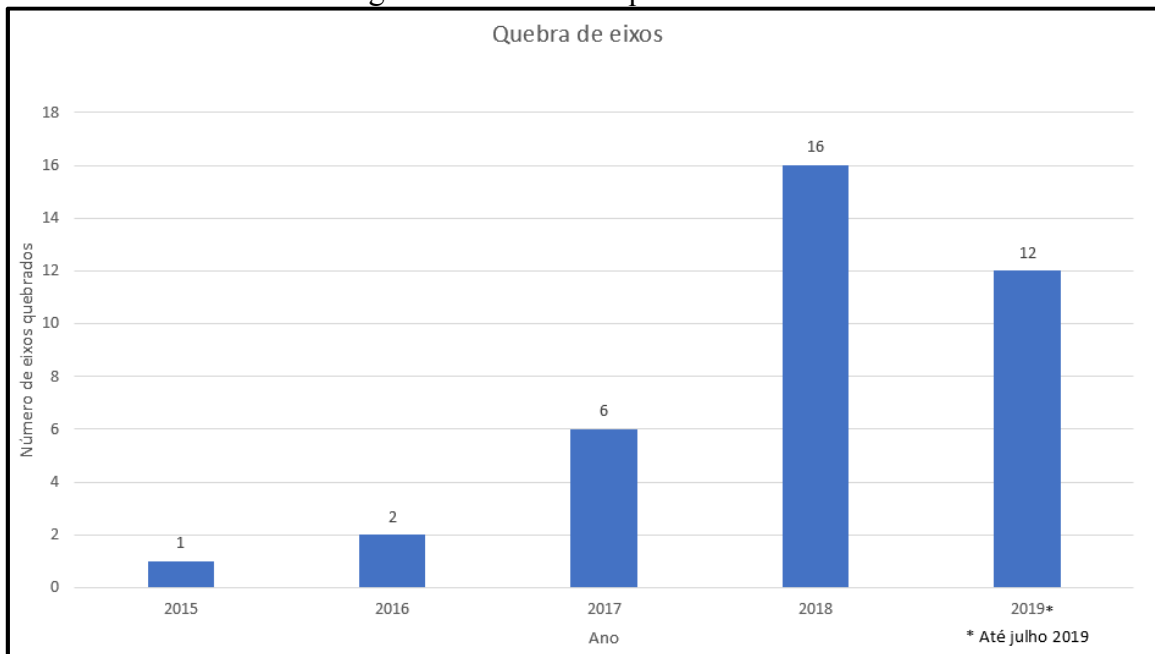
Fonte: Arquivos da Panatlântica Tubos SA (2016)

### 1.1 JUSTIFICATIVA

Este trabalho justifica-se por um significativo aumento no número de quebras desse eixo localizado nas etapas iniciais da formação de tubos. Essa quebra gera maiores gastos em manutenção, visto que os eixos quebrados devem ser repostos para o funcionamento da máquina. Além disso, há perda de produtividade devido às paradas de máquina para substituição do eixo quebrado e perdas devido a solda aberta nos tubos.

O gráfico da Figura 3 mostra o aumento do número de eixos quebrados no decorrer do tempo. Nota-se um grande aumento de quebras a partir de 2018 e essa tendência manteve-se em 2019, onde até julho tivemos 12 eixos quebrados.

Figura 3 - Gráfico de quebra de eixos



Fonte: Arquivos da Panatlântica Tubos SA (2015)

É importante que sejam descobertas as causas-raiz do problema, fazendo estudos e análises do eixo, para que o problema seja solucionado e se ocorrer essa mesma falha em outra máquina formadora de tubos.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo geral

Análise estrutural, operacional e geométrica para o reprojeto do eixo da calibração de uma formadora de tubos, visando o aumento da sua vida útil.

### 1.2.2 Objetivos específicos

- a) levantar os esforços aos quais o eixo é submetido para posterior decisão da escolha do material e tratamento térmico do eixo;
- b) estudar o perfil da região de quebra do eixo, buscando soluções para o aumento da resistência do mesmo.
- c) revisar o processo operacional, identificando e corrigindo possíveis falhas;
- d) revisar o processo de *setup*, identificando falhas na montagem e orientando o responsável a maneira correta de montar o eixo no castelo de formação.
- e) analisar os materiais para a construção do eixo, bem como seus respectivos tratamentos térmicos e escolher o mais adequado para a aplicação;

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesse capítulo serão abordados temas relacionados com os esforços aos quais o eixo é submetido, bem como as alternativas de tratamento térmico para a fabricação do mesmo.

### 2.1 TENSÃO

Tensão é uma propriedade de estado em um ponto específico de um corpo, que é uma função da carga, da geometria, da temperatura e do processo de fabricação (SHIGLEY; MISCHKE; BUDYNAS, 2005). A tensão de flexão é relativa aos efeitos de tração e compressão em uma mesma seção transversal, aplicando uma força que faça, por exemplo, o corpo fletir para baixo ou para cima (GUILHERME, 2017).

#### 2.1.1 Concentrações de tensões em eixos

O processo de análise de tensão é dependente dos concentradores de tensão, como ressalto e rasgos de chavetas. Esses elementos costumam ser de proporções padronizadas conforme diâmetro do eixo no caso de chavetas ou raios máximos em ressalto no caso de acoplamento de rolamentos. É possível estimar os fatores de concentração de tensão no projeto inicial do eixo com base em diagramas tais como os ilustrados no Anexo A (SHIGLEY; MISCHKE; BUDYNAS, 2005).

Catálogos de mancais mostram que um mancal típico requer que a razão D/d esteja entre 1,2 e 1,5. Para uma primeira aproximação, o pior caso de 1,5 pode ser assumido. O raio do filete no ressalto deve ser dimensionado para evitar interferência com o raio do filete do componente acoplado como, por exemplo, o raio nos cantos dos rolamentos. Há uma variação significativa em mancais típicos na razão de raio de filete versus diâmetro de furo, com r/d tipicamente variando de 0,02 a 0,06. O Anexo A mostra que as concentrações de tensão para flexão ( $k_t$ ) e torção ( $k_{ts}$ ), calculadas pelas Equações 1, aumentam significativamente nesse intervalo (SHIGLEY; MISCHKE; BUDYNAS, 2005).

$$k_t = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_0} \quad k_{ts} = \frac{\tau_{max}}{\tau_0} \quad (1)$$

Onde:  $k_t$  é a concentração de tensão para flexão [-];

$k_{ts}$  é a concentração de tensão para torção [-];

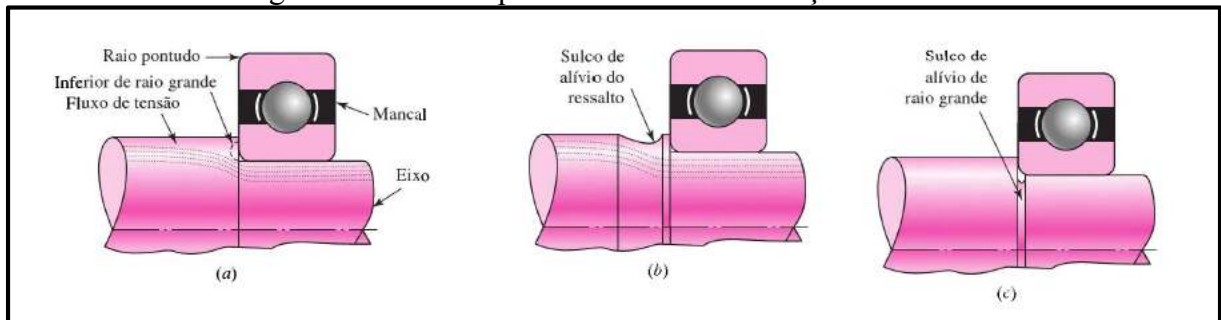
$\sigma_0$  é a tensão nominal de torção [MPa];

$\tau_0$  é a tensão nominal de flexão [MPa].

Em casos em que o ressalto do material é crítico, o projetista deve planejar a seleção de um mancal com o raio de filete generoso, ou considerar um raio de filete maior no eixo, reduzindo-o em direção base do ressalto, como mostra a Figura 4 (a), criando uma zona morta na área do ressalto que não conduz tensões de flexão, mostrado pelas linhas de fluxo de tensão. Um sulco de alívio de ressalto indicado na Figura 4 (b) pode alcançar um propósito similar (SHIGLEY; MISCHKE; BUDYNAS, 2005).

Uma terceira opção é cortar um sulco de alívio de raio grande em direção ao diâmetro pequeno do eixo, como mostra a Figura 4 (c), porém isso reduz a área de seção transversal, mas é frequentemente usado em casos em que é útil prover um sulco de alívio antes do ressalto para que a operação de retífica de eixo não tenha o risco da lateral do rebolo tocar a lateral do eixo. Esse entalhe usualmente é chamado alívio de retífica, que além de diminuir a concentração de tensão do eixo auxilia no processo de usinagem (SHIGLEY; MISCHKE; BUDYNAS, 2005).

Figura 4 - Técnicas para reduzir a concentração de tensão



Fonte: (SHIGLEY; MISCHKE; BUDYNAS, 2005)

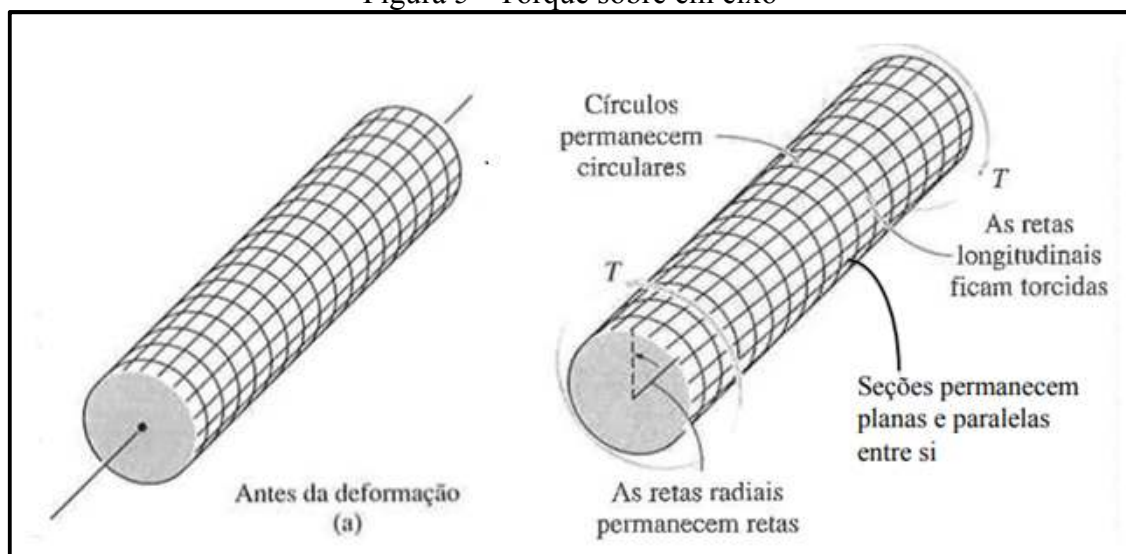
Para o filete padrão de ressalto, ao estimar valores de  $k_t$  para a primeira interação, uma razão  $r/d$  deve ser selecionada de modo que os valores de  $k_t$  possam ser obtidos. Para a extremidade pior do espectro, com  $r/d = 0,02$  e  $D/d = 1,5$ , os valores de  $k_t$  das cartas de concentração de tensão para ressalto indicam 2,7 para flexão e 2,2 para torção (SHIGLEY; MISCHKE; BUDYNAS, 2005). Os fatores  $K_t$  e  $K_{ts}$  consideram apenas o efeito da geometria,

e não consideram como o material se comporta diante da concentração de tensões (NORTON, 2013).

## 2.2 TORÇÃO

Torque é um momento que tende a torcer um corpo em torno de seu próprio eixo. O efeito do torque é uma preocupação primária em projetos de eixos de acionamento utilizados em aplicações diversas. Quando o torque é aplicado a um eixo ele tende a distorcer conforme a Figura 5. Observa-se que os círculos continuam circulares ao longo do eixo, as seções transversais continuam planas e as linhas radiais continuam retas após a deformação. A partir dessas observações pode-se considerar que se o ângulo de rotação for pequeno o comprimento e o raio do eixo permanecem inalterados (HIBBELER, 2010). Diz-se que uma barra submetida a um momento dessa classe está sob torção (SHIGLEY; MISCHKE; BUDYNAS, 2005).

Figura 5 - Torque sobre em eixo



Fonte: HIBBELER (2010)

Para uma barra redonda sólida a tensão de cisalhamento é zero no centro e máxima na superfície. Muitas vezes o eixo deverá ser feito com diâmetro maior que o calculado através de resistência simples a fim de se evitar torção excessiva, especialmente quando se trata de um eixo muito comprido. Uma das regras práticas consiste em limitar o ângulo de torção em  $1^\circ$  em um comprimento correspondente a 20 vezes o diâmetro do eixo (TIMOSHENKO, 1973). A Equação 2 para a tensão de cisalhamento máxima para eixo:

$$\tau_{m\acute{a}x} = \frac{Tr}{J}, \quad \text{sendo } J = \frac{\pi d^4}{32} \quad (2)$$

Onde:  $\tau_{m\acute{a}x}$  é a tensão de cisalhamento máxima [MPa];

$T$  é o torque [Nm];

$r$  é o raio da superfície externa [mm];

$J$  é o segundo momento polar de área em seções circulares [mm<sup>4</sup>];

$d$  é o diâmetro do eixo [mm].

Para o cálculo de torque utiliza-se a Equação 3:

$$H = T\omega \quad (3)$$

Onde:  $H$  é a potência [W];

$T$  é o torque [Nm];

$\omega$  é a velocidade angular [rad/s].

### 2.3 SOLICITAÇÕES DE FLEXÃO E TORÇÃO

Em alguns casos o eixo deve resistir tão bem a flexão quanto a torção. Quando uma peça é submetida a um momento de torção e um momento fletor, a peça é solicitada respectivamente por uma seção tangencial e outra normal, o que constitui um estado duplo de tensões, e a tensão é definida de acordo com a Equação 4 (CUNHA, 2005).

$$\sigma = \frac{Mr}{I}, \quad \text{sendo } I = \frac{\pi d^4}{64} \quad (4)$$

Onde:  $\sigma$  é a tensão de flexão [MPa];

$M$  o momento fletor [Nm];

$r$  é o raio da superfície externa [mm];

$I$  é o segundo momento de área de uma seção circular [mm<sup>4</sup>];

$d$  é o diâmetro do eixo [mm].

## 2.4 CRITÉRIOS DE FALHA

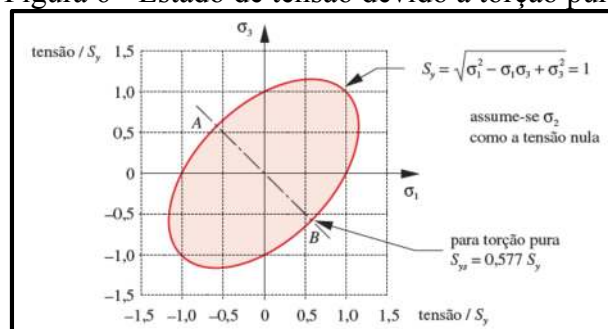
Os componentes de máquinas são projetados de forma que o material que os compõem resista às tensões aos quais serão submetidos. Na escolha de um material para projeto, deve-se levar em consideração o limite superior para o estado de tensão que defina a falha do material. Se o material for dúctil, geralmente a falha será especificada pelo início do escoamento; se o material for frágil, ela será especificada pela fratura (BUFFONI, 2017).

### 2.4.1 Critério de escoamento da máxima energia de distorção

Esta teoria também é conhecida por critério de von Mises. Foi postulado por von-Mises que o escoamento não era um simples fenômeno de tração ou compressão, mas era relacionado de algum modo à distorção angular do elemento tensionado. Assim pensou-se em subtrair da energia total de deformação a energia usada para provocar uma variação de volume, resultando na energia da distorção (HIBBELER, 2010).

Resultados experimentais em corpos de prova submetidos à torção pura indicam que o critério de von Mises é mais preciso na previsão de falha. Para o caso de torção pura considera-se o carregamento de cisalhamento puro mostrado na Figura 6 (NORTON, 2013).

Figura 6 - Estado de tensão devido à torção pura



Fonte: NORTON (2013).

Para o caso de cisalhamento puro encontrado em carregamentos de torção pura calcula-se pela Equação 5:

$$\sigma_1 = \frac{S_y}{\sqrt{3}} = 0,577 S_y = \tau_{\max} \quad (5)$$

Onde:  $\sigma_1$  é a tensão principal [MPa];

$S_y$  é a tensão normal de escoamento [MPa];

$\tau_{max}$  é tensão de cisalhamento máxima [MPa].

No caso da torção ser combinada com outras tensões como flexão, o carregamento combinado deve ser usada a tensão efetiva de von Mises conforme a Equação 6 (SHIGLEY; MISCHKE; BUDYNAS, 2005).

$$\sigma_e = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2} \quad (6)$$

Onde:  $\sigma_e$  é a tensão equivalente de von Mises [MPa];

$\sigma$  é a tensão de flexão [MPa];

$\tau$  é a tensão de cisalhamento [MPa].

#### 2.4.2 Critério de falha de Goodman

Em 1899 Goodman propôs a utilização da teoria dinâmica para determinar qual deveria ser a carga máxima admissível em sua estrutura. Esta teoria supõe que as cargas variantes são equivalentes às aplicadas repetidamente, e conseqüentemente o material irá romper com cargas repetidas se a tensão dinâmica equivalente exceder a resistência estática do material (SOUZA, 2011).

O comportamento de materiais frágeis é bem produzido pela relação de Goodman. Já o comportamento dos materiais dúcteis é descrito de forma conservadora caso a tensão média seja positiva, ou de forma não conservadora caso a tensão média seja negativa (PEREIRA, 2006).

A equação modificada de Goodman para cálculo do fator de segurança (SHIGLEY; MISCHKE; BUDYNAS, 2005).

$$n = \frac{1}{\frac{\sigma_a}{S_e} + \frac{\sigma'_m}{S_{ut}}} \quad (7)$$

Onde:  $n$  é o fator de segurança [-];

$\sigma_a$  é a tensão alternante [MPa];

$S_e$  é o limite de fadiga corrigido [MPa];

$\sigma'_m$  é a tensão média corrigida pelo critério de von Mises [MPa];

$S_{ut}$  é a resistência à tração [MPa].

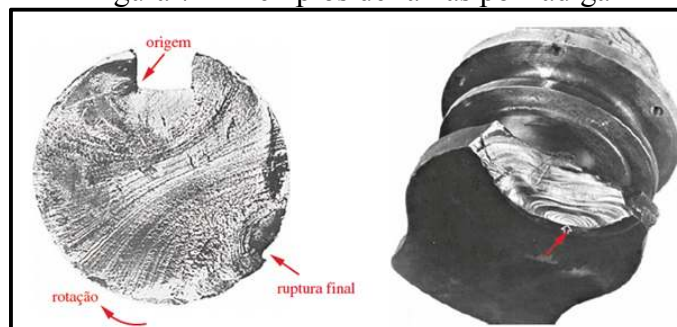
## 2.5 FADIGA

Fadiga é uma forma de falha que ocorre em estruturas sujeitas a tensões dinâmicas e oscilantes. Nessas circunstâncias é possível que uma falha ocorra em uma tensão menor que o limite de tração ou escoamento para uma carga estática. A fadiga é a maior causa de falhas nos metais, representando 90% de todas as falhas (CALLISTER, 2008). Frequentemente descobre-se que componentes de máquinas falharam devido a tensões repetidas que estavam bem abaixo da resistência do material, muitas vezes abaixo da resistência de escoamento (SHIGLEY; MISCHKE; BUDYNAS, 2005).

As falhas por fadiga sempre têm início em uma pequena trinca, que pode desenvolver-se ao longo do tempo devido aos esforços exigidos ou existir no material desde a sua manufatura. As trincas de fadiga geralmente têm início em um entalhe ou outro elemento de concentração de tensões. Existem três estágios para a propagação da trinca: início da trinca, propagação da trinca e ruptura (NORTON, 2013).

No estágio de fratura a trinca tornou-se grande o suficiente para aumentar o fator de intensidade de tensão até as tensões nominais atingirem o valor das concentrações de tensão conforme mostrado na Equação 1. O resultado é uma falha catastrófica repentina. A Figura 7 mostra as chamadas “marcas de praia” ou “conchas de ostra”, que é uma região de aparência polida em torno da trinca (NORTON, 2013). Durante o carregamento cíclico essas superfícies fissuradas abrem e fecham, roçando umas nas outras, formando essas marcas (SHIGLEY; MISCHKE; BUDYNAS, 2005). O Anexo C mostra as diferentes superfícies de fratura com diversas condições de carregamentos e níveis de tensões.

Figura 7 - Exemplos de falhas por fadiga



Fonte: NORTON (2013)

Qualquer carga que varie com o tempo pode provocar uma falha devido à fadiga. A melhor informação sobre a resistência à fadiga de determinado material provém de ensaios com montagens reais ou a partir da fabricação de protótipos dos dispositivos de um projeto real. Caso essa alternativa não seja possível, a próxima melhor alternativa provém de ensaios em corpos de prova retirados do mesmo material com o qual a peça será fabricada (NORTON, 2013).

Não sendo possível realizar a última alternativa citada, dados de resistência à fadiga podem estar disponíveis na literatura ou com os fabricantes/fornecedores de material. Na ausência até mesmo desses valores é necessário fazer algumas estimativas do limite de fadiga ou resistência à fadiga do material com base nos dados disponíveis de ensaios estáticos (NORTON, 2013). O Apêndice B apresenta os critérios de avaliação e a metodologia de cálculo de fadiga.

## 2.6 EIXOS

O eixo é um elemento rotativo, usualmente de seção transversal cilíndrica, usado para transmitir potência ou movimento. Ele é o responsável pela rotação de elementos tais como engrenagens, polias, manivelas, rodas dentadas e outros. Ao decidir sobre um procedimento para dimensionar eixo, é necessário compreender que uma análise de tensão em um ponto específico de um eixo pode ser feita utilizando apenas a geometria do eixo ao redor daquele ponto. No projeto é geralmente possível localizar as áreas críticas, dimensioná-las para atender aos requerimentos de resistência e depois dimensionar o restante do eixo para atender aos demais requisitos (SHIGLEY; MISCHKE; BUDYNAS, 2005).

Eixos que exijam maiores esforços mecânicos são fabricados de aços-liga, que são usualmente fornecidos para atender faixas de composição química (SILVA, 2006). Os materiais mais comumente usados para fabricação de eixos são aços de baixa liga para cementação e aços acima de 0,30% de carbono para têmpera.

## 2.7 TRATAMENTOS TÉRMICOS

Tratamento térmico é todo o aquecimento e subsequente de resfriamento controlado em um material com a finalidade de alterar sua microestrutura e propriedades. Os procedimentos convencionais de tratamento térmico envolvem aquecimento seguido de um resfriamento rápido (CALLISTER, 2008).

A importância do tratamento térmico é maior quanto mais crítica as condições de serviço e mais complexas as ligas utilizadas (CHIAVERINI,2008). Para a produção de uma estrutura martensítica em toda extensão do material depende principalmente de três fatores: composição da liga, do tipo e meio de resfriamento e do tamanho e forma da peça (CALLISTER, 2008).

Os tratamentos térmicos comumente usados em eixos são a cementação para eixos produzidos com materiais de baixo carbono (0,20% são próprios para esse processo) e a têmpera para eixos de médio teor de carbono (de 0,40% a 0,60%) seguidos de revenimento, bem como a normalização do material a ser usinado (TEMPERAVILLE, 2007).

A vantagem do tratamento térmico superficial é a produção de peças com alta dureza superficial, porém mantendo o núcleo dúctil, com a mesma dureza do recozimento. Assim obtém-se peças com boa ductibilidade no núcleo e alta resistência superficial ao desgaste (CALLISTER, 2008).

A têmpera por indução tem vantagens como uma maior flexibilidade em obter diferentes durezas em uma mesma peça, precisão e um baixo custo de usinagem posterior com endireitamento e distorções (JUNIOR, 2016).

Quanto a profundidade da camada endurecida pelo processo de têmpera por indução obtém-se profundidades de 1,5mm a 12,7mm (FERREIRA, 2004), enquanto no processo de cementação a profundidade varia de 0,25mm a 2,5mm (PEREIRA, 2013).

### **2.7.1 Normalização**

A normalização consiste na austenização completa do aço, seguida de resfriamento ao ar parado ou agitado. Tem por objetivo homogeneizar e refinar a estrutura do aço, dando-lhe melhores propriedades que o recozimento. A normalização melhora as características de usinagem e dá ao aço melhores condições para uma posterior têmpera devido a homogeneização da estrutura, melhora a usinabilidade e refina as estruturas brutas de peças fundidas (SILVA, 2006).

Durante o aquecimento da normalização deve-se usar atmosferas protetoras ou banho de sal. O resfriamento é ao ar (CHIAVERINI, 2008).

### **2.7.2 Têmpera**

Têmpera é considerada o tratamento térmico mais importante, porque é por meio dela e do revenimento são obtidas as propriedades que permitem o emprego do aço em peças de aplicações mais críticas. A velocidade de resfriamento depende do tipo de aço e da forma e dimensões da peça (CHIAVERINI, 2008). O esfriamento da têmpera efetua-se a uma velocidade de 150°C a 200°C por segundo. A velocidade de esfriamento do aço carbono estabelece-se segundo a porcentagem de carbono do aço: quanto mais carbono tiver no aço, menor deve ser a velocidade de resfriamento (YOSHIDA, 1977).

Na têmpera obtém-se a estrutura martensítica, com a finalidade de melhorar as propriedades mecânicas dos metais. Assim pode-se aumentar a dureza de modo que proporcione uma maior resistência ao desgaste, à abrasão e dessa forma aumentando sua durabilidade e confiabilidade na conclusão de projetos (CELESTINO, 2007).

Aumentando o teor de carbono do aço diminui-se a temperatura de início e fim da formação da martensita, bem como a dureza martensítica aumenta. Em vista disto os aços carbonos para têmpera apresentam um teor de carbono maior que 0,3%, pois abaixo disso o efeito endurecedor da têmpera seria muito pequeno (SILVA, 2006).

Como ocorre um aumento considerável da dureza em peças que são submetidas à têmpera, tem-se um aumento de tensão residual, que torna a peça frágil ou quebradiça. Nesse caso deve-se submetê-la a um posterior revenimento (FIGUEIREDO, 2014).

Ao temperar a peça, a velocidade de resfriamento em seu interior é inferior ao se seu exterior, produzindo diferentes estruturas em diferentes zonas, mudando as propriedades. Para evitar isso um dos métodos é escolher o aço segundo sua temperabilidade, que é o diâmetro equivalente máximo que a peça pode ter para que seu núcleo tenha um mínimo de 50% de martensita e ausência de perlita (PARETO, 2003).

### **2.7.3 Têmpera superficial**

Têmpera superficial é um processo de têmpera convencional, só que aplicado apenas na região superficial da peça. Utilizado quando se quer uma alta resistência ao desgaste na superfície e um núcleo dúctil para acomodar impactos recebidos (SILVA, 2006).

As vantagens da têmpera superficial são de endurecimento apenas em seções críticas da peça, como dentes de engrenagens, menor risco de empenamento e fissuração durante o resfriamento, utilização de aços de menor custo e menor investimento em equipamentos que na têmpera convencional e confere a peça boa resistência à fadiga por dobramento e boa capacidade de resistir cargas de contato (CHIAVERINI, 2008).

### 2.7.4 Cementação

Cementação consiste na introdução de carbono na superfície do aço, de modo que este, após a têmpera, apresente uma superfície dura. Para se produzir um aço com uma combinação de uma superfície dura com núcleo tenaz o aço deve apresentar baixo carbono, abaixo de 0,30% (SILVA, 2006).

A cementação visa o endurecimento superficial da peça, mas diferente da têmpera superficial não ocorre apenas a transformação da austenita em martensita. Os aços a serem cementados devem possuir carbono baixo, de modo que quando forem aquecidos até a temperatura de austenização em um meio carbonetante o ferro e o carbono reajam de forma que a superfície do aço fique enriquecida de carbono, permitindo uma têmpera posterior (CHIAVERINI, 2008). São cementadas peças que contêm de 0,1% a 0,2% de carbono e que são submetidas simultaneamente ao desgaste e a cargas dinâmicas (YOSHIDA, 1977).

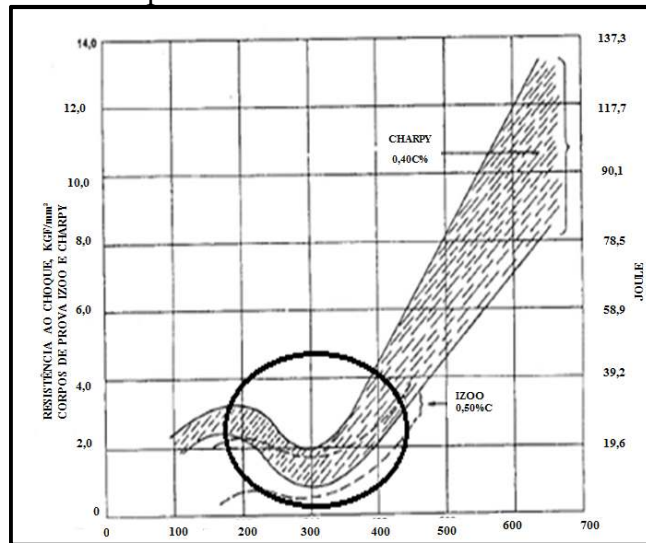
### 2.7.5 Revenimento

Martensita temperada é extremamente dura e frágil. Peças deixadas nessas condições correm grande risco de trincar. Para atingir valores adequados de resistência mecânica e tenacidade deve-se, após a têmpera, fazer o revenimento (SILVA, 2006).

Revenimento consiste em reaquecer as peças temperadas a temperaturas abaixo da austenização. Existem duas faixas de temperatura para melhorar a tenacidade do aço temperado: 150°C a 200°C, onde obtém-se apenas um ligeiro acréscimo da tenacidade e acima de 425°C, onde obtém-se uma melhora considerável na tenacidade, porém com diminuição da resistência mecânica e da dureza. O revenido acima de 425°C é empregado em peças de alta tenacidade e onde a dureza é secundária. (CHIAVERINI, 2008). Possui como principal objetivo controlar a relação dureza e tenacidade obtida após o processo de têmpera, reduzindo as tensões produzidas durante esse processo. Por isso, sem esse complemento, os materiais temperados apresentam-se quase sempre frágeis (PINEDO, 2019).

A Figura 8 mostra que em uma faixa de temperatura de 260°C a 370°C ocorre uma queda da tenacidade. Esse fenômeno é chamado “fragilidade da martensita revenida” ou “fragilidade a 350°C”. Outra fragilização ocorre entre 375°C e 575°C, quando o aço resfria nessa faixa. Esse fenômeno é chamado “fragilidade do revenido” (CHIAVERINI, 2008).

Figura 8 - Influência da temperatura de revenido na tenacidade em aços de baixa liga

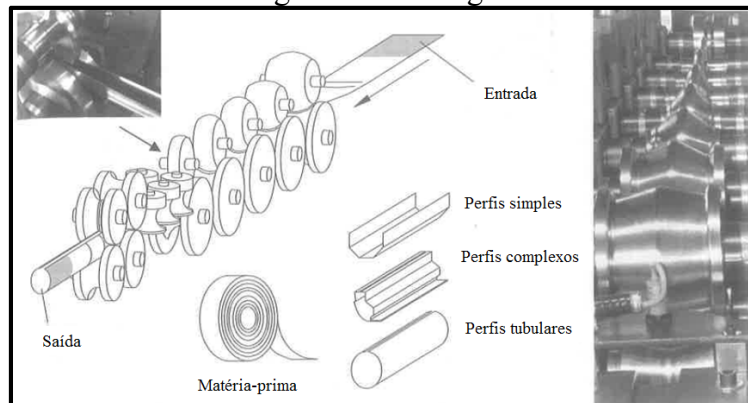


Fonte: Adaptado de CHIAVERINI (2008)

## 2.8 PROCESSO DE PERFILAGEM

Perfilagem é um processo de deformação plástica no qual uma tira metálica vai sendo progressivamente dobrada no sentido transversal, à medida que é tracionada pelos rolos de formação. É um processo de fabricação muito apropriado à produção em série, de 75.000 a 100.000 unidades, de tubos com costura e perfis industriais (RODRIGUES, 2010). A Figura 9 mostra uma representação esquemática do processo, onde a tira passa pelos rolos de conformação, sendo progressivamente conformada até obter-se o perfil desejado.

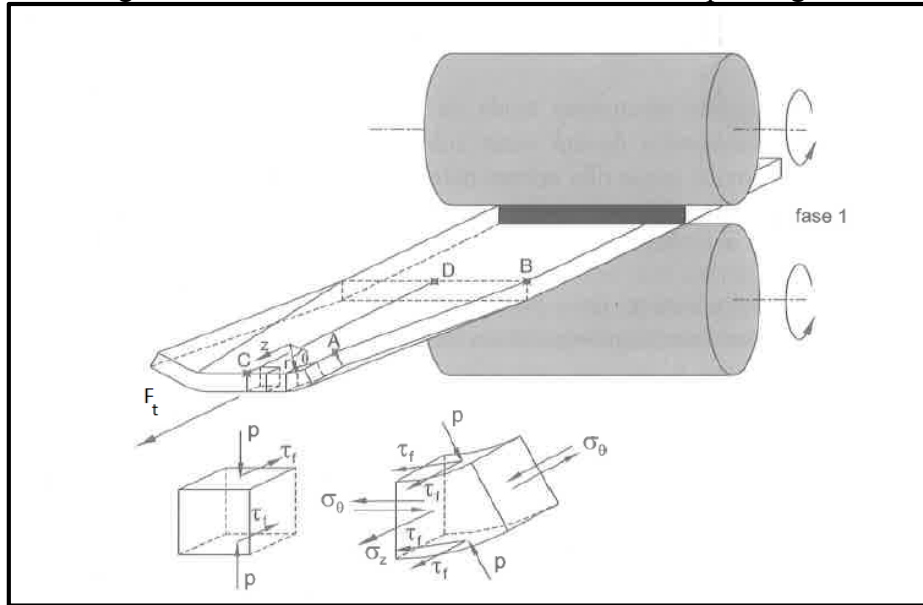
Figura 9 - Perfilagem



Fonte: Adaptado de RODRIGUES (2010)

Uma das principais características da perfilagem é a presença de quantidades significativas de tensões compressivas pela dobra da aba e força de tração na chapa conforme mostrado pela Figura 10 (RODRIGUES, 2010).

Figura 10 - Estados de tensão característicos da perfilagem



Fonte: RODRIGUES (2010)

A Equação 8 permite calcular a força de tração  $F_t$  que deve ser aplicada pelo trem de laminagem (RODRIGUES, 2010).

$$F_t = \alpha S_y h^2 \quad (8)$$

Onde:  $F_t$  é a força de tração [N];

$\alpha$  é o ângulo de conformação [rad];

$S_y$  é a tensão normal de escoamento [MPa];

$h$  é a espessura da tira [mm].

## 2.9 FRACTOGRAFIA

A fractografia é originada do latim *Fractus* que significa “fratura” e do grego *Graphy*, que significa “escrever”, e o termo significa descrição da fratura (MOURA 2013 apud KERLINS, 1992).

É um termo cunhado em 1944 para descrever a ciência de examinar superfícies de fratura, e tem realmente sido usado durante séculos como parte do campo da metalurgia. O procedimento geral para conduzir uma análise de falha é semelhante para materiais metálicos e não metálicos. As etapas incluem (PARRINGTON, 2002):

a) reunião de informações;

- b) exame visual preliminar;
- c) teste não destrutivo;
- d) caracterização do material através de testes mecânicos, químicos e térmicos;
- e) seleção, preservação e limpeza de fraturas das superfícies;
- f) exame microscópico;
- g) identificação dos mecanismos de falha;
- h) testar para simular falhas;
- i) formulação de relatório e conclusões.

### 2.9.1 Objetivos da fractografia

O objetivo principal da uma análise de falha de materiais é determinar a causa raiz da falha. Com materiais metálicos ou não metálicos a causa raiz pode ser atribuído a uma das quatro categorias: projeto, fabricação, serviço ou material. Frequentemente, várias condições adversas contribuem à falha da peça (PARRINGTON, 2002).

Outro objetivo importante da análise fractográfica é identificar a falha do mecanismo. Esses modos incluem ductilidade, sobrecarga, fratura frágil, impacto, fadiga, desgaste e erosão. Quando a falha material envolve ruptura real, a fractografia pode ser empregada para identificar a origem da fratura, direção de propagação de trinca, mecanismo de falha, defeitos de material, interação ambiental, e a natureza das tensões (PARRINGTON, 2002).

### 2.9.2 Características fractográficas macroscopicamente visíveis

Em escala macroscópica, todas as fraturas (metais e plásticos) se enquadram em duas categorias: dúctil e frágil. Fraturas dúcteis são caracterizadas por material exibindo deformação plástica. Fraturas frágeis exibem pouca ou nenhuma deformação plástica macroscopicamente visível e requer menos energia para formar (PARRINGTON, 2002).

Marcas fractográficas macroscopicamente visíveis servem para identificar origem da fratura e direção da propagação de fissuras. Marcas fractográficas comum a metais e plásticos são marcas radiais e padrões *chevron*. Marcas radiais são linhas de uma superfície de fratura que irradiam para fora a partir da origem e são formados pela interseção de fraturas frágeis propagando em diferentes níveis. *Chevron* ou padrões de espinha de peixe são radiais marcas que se assemelham a letra aninhada V e apontando para a origem. Falhas de fadiga em metais

como marcas de praia servem para identificar a origem e o modo de falha. A Figura 11 mostra um eixo com essas marcas (PARRINGTON, 2002).

Figura 11 - Marcas de praia e radiais na fratura de fadiga por torção de um eixo SAE 4340



Fonte: Adaptado de PARRINGTON (2002)

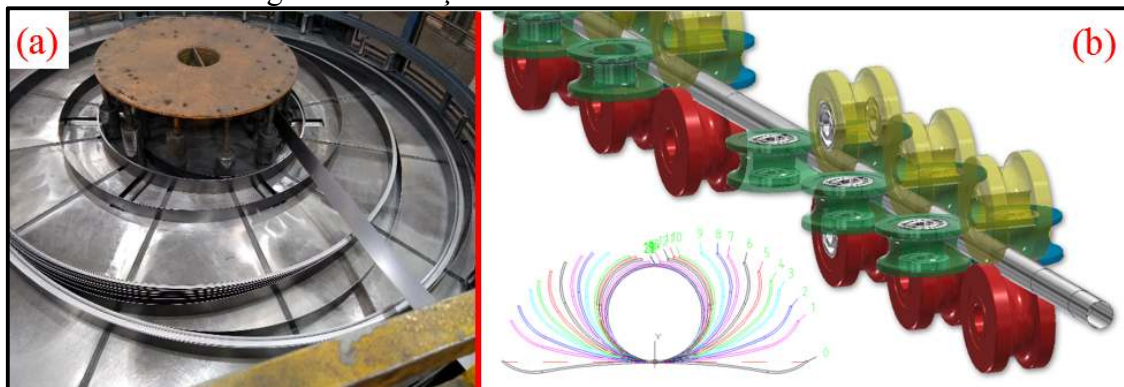
### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

A proposta desse capítulo é apresentar o eixo e suas funções, os esforços sobre o mesmo, levantamento das causas de quebra e as soluções implantadas. Para melhor compreensão recomenda-se a leitura do Apêndice A sobre o funcionamento de uma formadora de tubos e do Apêndice B e C com o memorial de cálculo das forças atuantes.

#### 3.1 OBJETO DE ESTUDO

O eixo da calibração é responsável pelo tracionamento da tira do acumulador (a) e pela fixação dos rolos de formação (b). A Figura 12 mostra as funções do eixo.

Figura 12 - Funções do eixo na formadora de tubos



Fonte: O autor (2019)

O eixo quebra sempre neste mesmo ponto, com exceção de uma quebra ocorrida no furo roscado localizado no centro da chaveta. A figura 13 mostra as várias quebras de eixo na região “comum” de quebra e a exceção.

Figura 13 - Região da quebra do eixo



Fonte: O autor (2019)

O eixo é fixado no castelo de formação da máquina, onde são montados os rolos de formação dos tubos (Figura 14). O subconjunto da máquina que forma o tubo é formado por 8 castelos, onde o mesmo eixo é montado na parte superior e inferior da formação.

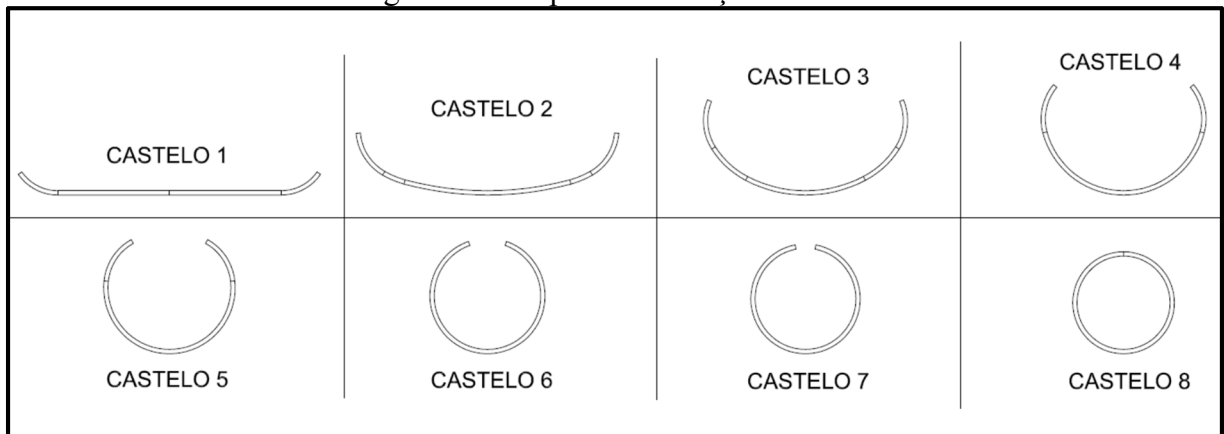
Figura 14 - Castelo de formação



Fonte: Adaptado de arquivos da Panatlântica Tubos SA (2019)

A figura 15 mostra as etapas da formação do tubo em cada castelo de formação, desde a entrada da tira até o fechamento do tubo que posteriormente será soldado por alta frequência.

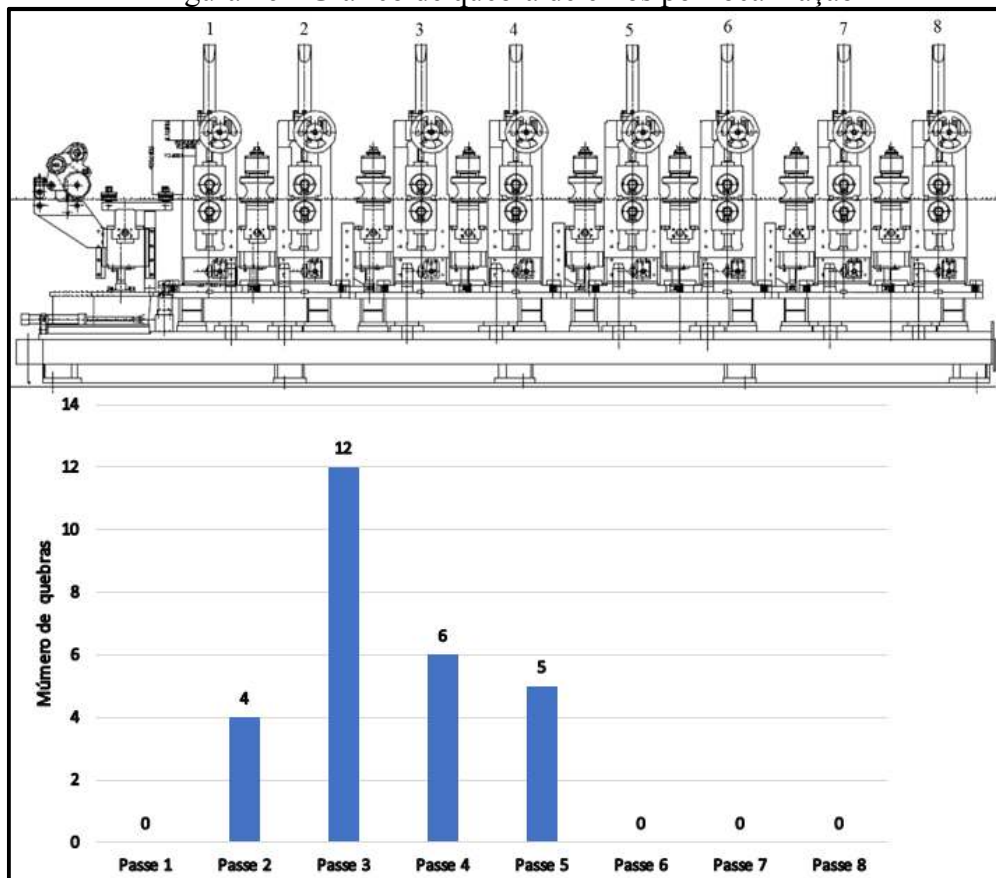
Figura 15 - Etapas da formação do tubo



Fonte: Adaptado de arquivos da Panatlântica Tubos SA (2019)

A Figura 16 mostra os castelos de formação e o número de quebras entre 2015 e julho de 2019. Observa-se que o maior número de quebras está no passe 3.

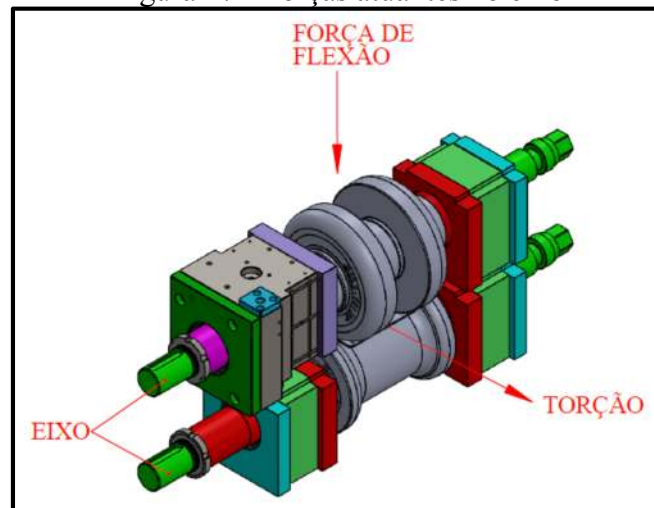
Figura 16 - Gráfico de quebra de eixos por localização



Fonte: O autor (2019)

As forças as quais o eixo é submetido são a força de flexão devido ao aperto dos rolos de formação contra a tira para a formação do tubo e a força de tração que gera o torque no eixo. A Figura 17 mostra as forças atuantes no eixo.

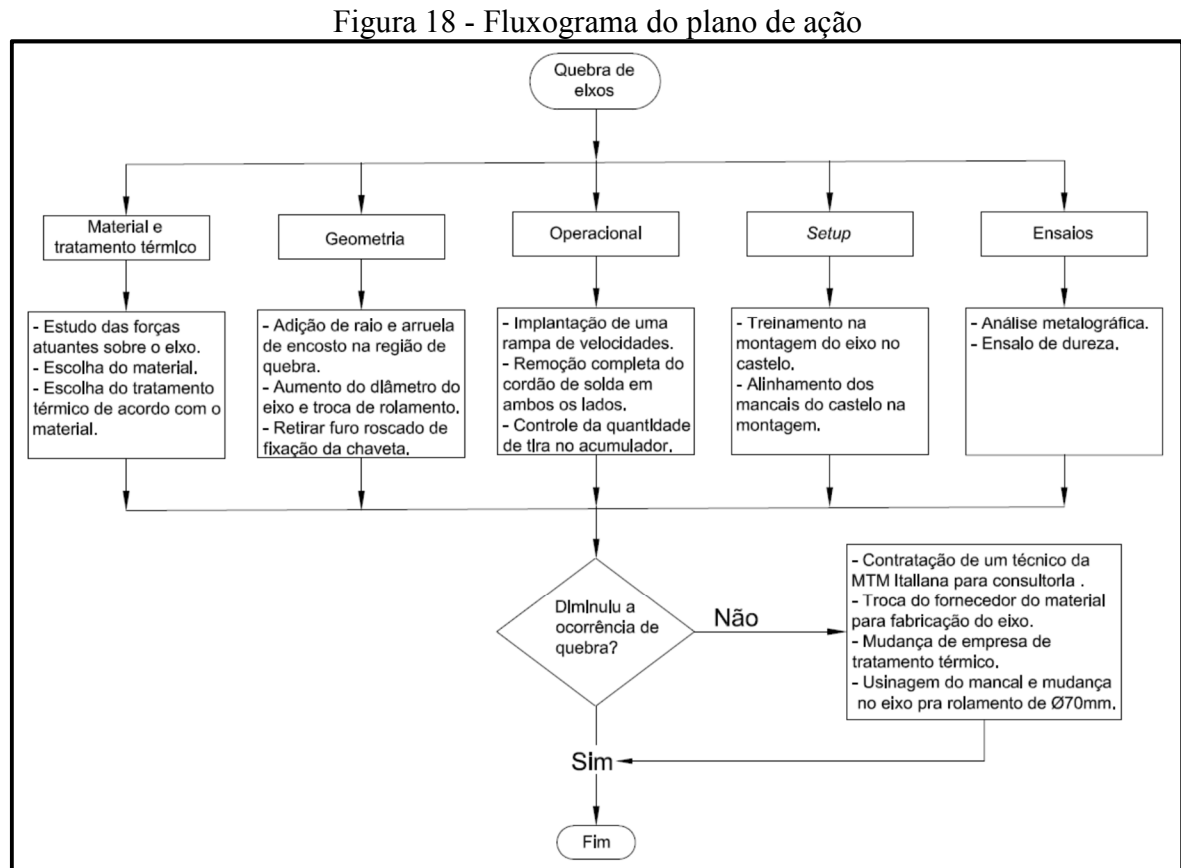
Figura 17 - Forças atuantes no eixo



Fonte: Adaptado de arquivos da Panatlântica Tubos SA (2019)

### 3.2 PLANO DE AÇÃO

Após análise de todo o processo de fabricação de tubos o plano de ação foi dividido em cinco áreas: geometria, material e tratamento térmico, operacional, *setup* e ensaios. A Figura 18 mostra o fluxograma com as ações a serem tomadas.



Fonte: O autor (2019)

### 3.3 MATERIAL E TRATAMENTO TÉRMICO

O objetivo dessa etapa é a escolha e avaliação do material de construção do eixo e seu respectivo tratamento térmico.

Para eixos submetidos a grandes esforços utilizam-se aços-ligas com tratamento térmico. Os materiais mais comumente usados para fabricação de eixos são os aços 4320, 4340, 8620 e 8640. O Apêndice F mostra a descrição, as características desses diferentes materiais, seu limite de escoamento e resistência à tração do material normalizado. Atualmente o eixo é fabricado com aço SAE 8640 e com tratamento térmico de têmpera superficial.

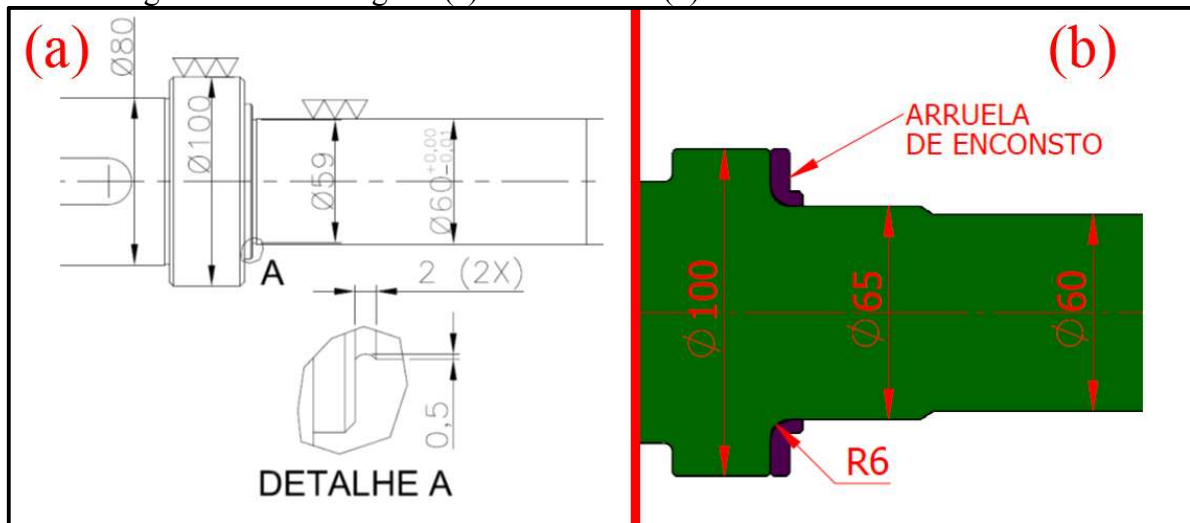
### 3.4 GEOMETRIA

O objetivo dessa etapa é alteração da geometria do eixo visando o aumento da sua vida útil. Essas alterações levaram em conta a observação das demais peças que são montadas em conjunto com o eixo, evitando ao máximo alterá-las devido aos altos custos com usinagem e fabricação de novas peças.

#### 3.4.1 Adição de raio e arruela de encosto

O desenho original do eixo prevê apenas um alívio de retífica na região de quebra. A Figura 19 mostra o eixo original (a) e a modificação do eixo com raio de 6 mm e a adição de arruela de encosto do rolamento (b).

Figura 19 - Eixo original (a) e modificado (b) com raio e arruela de encosto

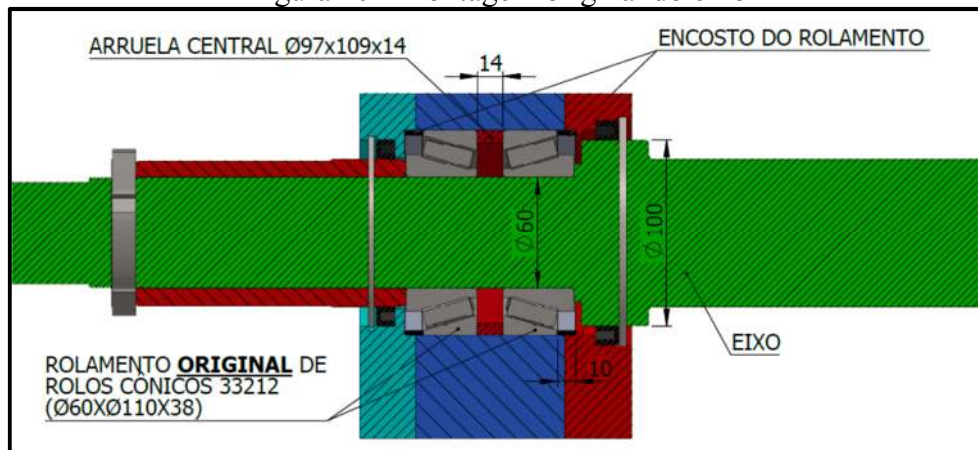


Fonte: O autor (2019)

#### 3.4.2 Aumento do diâmetro do eixo na região de quebra.

O diâmetro original do eixo é de 60 mm onde é montado um rolamento de rolos cônicos conforme mostrado na Figura 20. O objetivo aqui é aumentar o diâmetro nessa região e utilizar outro rolamento de mesmo diâmetro externo, de forma que não seja necessário usinar o mancal. Assim não haverá altos custos de usinagem de 8 mancais inferiores e 8 mancais superiores.

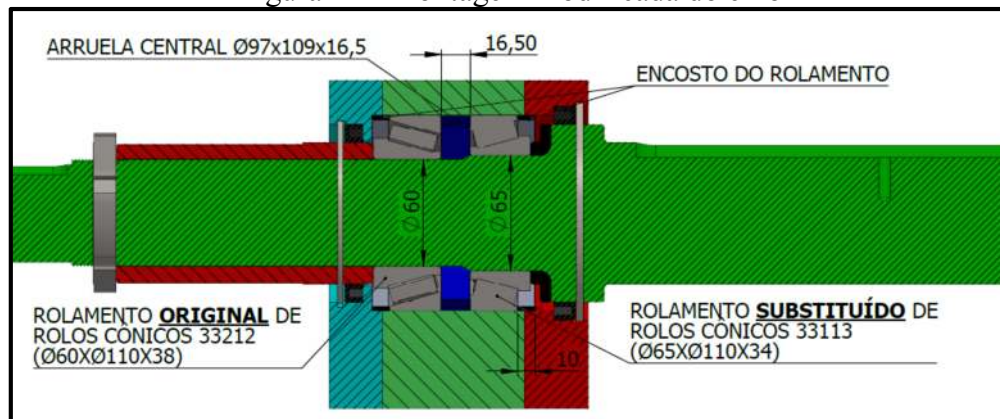
Figura 20 - Montagem original do eixo



Fonte: O autor (2019)

Após pesquisa em catálogos de rolamentos conclui-se que a melhor escolha é o rolamento 33113 de diâmetro interno de 65 mm e externo de 110 mm. Apesar de não haver necessidade de usinar o mancal é necessária a fabricação de dois novos encostos de rolamentos para a adequação do novo diâmetro e do novo comprimento do rolamento modificado, mas por tratar-se de peças simples e sem tratamento térmico o custo é insignificante.

Figura 21 - Montagem modificada do eixo



Fonte: O autor (2019)

### 3.4.3 Retirada do furo de fixação da chaveta

Após as alterações anteriores no eixo foi fabricado um novo lote, mas devido a problemas na têmpera um deles acabou lascando na chaveta e outro quebrando no furo da chaveta. Foi optado por retirar o furo, e após a retirada ele provou-se ser desnecessário, visto

que tanto o operador da máquina quanto o responsável pelo *setup* relataram que mesmo sem estar fixada pelo parafuso a chaveta não caiu durante a desmontagem dos rolos de conformação. A Figura 22 mostra a quebra nessa região.

Figura 22 - Quebra dos eixos com problemas no tratamento térmico



Fonte: O autor (2019)

### 3.5 OPERACIONAL

O objetivo dessa etapa é a avaliação da parte operacional da máquina, onde foram detectadas e corrigidas falhas na operação da máquina.

Uma falha encontrada é que em cada parada de máquina ela era religada em velocidade máxima de operação, quando o recomendado é um aumento progressivo de velocidade. A solução encontrada foi a instalação de uma rampa de velocidades automática, onde leva 20 segundos para atingir a velocidade máxima de forma independente do operador.

Outro problema encontrado era o acúmulo muito grande de tira dentro do acumulador (Figura 1), levando o eixo a um excessivo esforço de tração da tira. O operador foi orientado a não acumular tira em excesso, e está em estudo uma maneira de controlar esse acúmulo de tiras através de uma forma automática, através de sensor.

E por fim o problema no momento da soldagem das tiras. O corte e emenda da máquina possui vários problemas, como o uso de solda MIG na emenda das chapas, o que faz necessário o esmerilhamento do cordão de solda. O processo de remoção do excesso de solda na face superior da tira é simples. Porém, a face inferior é de difícil acesso, além de não contar com um apoio firme para executar o esmerilhamento. A Figura 23 mostra o cordão de solda antes do esmerilhamento.

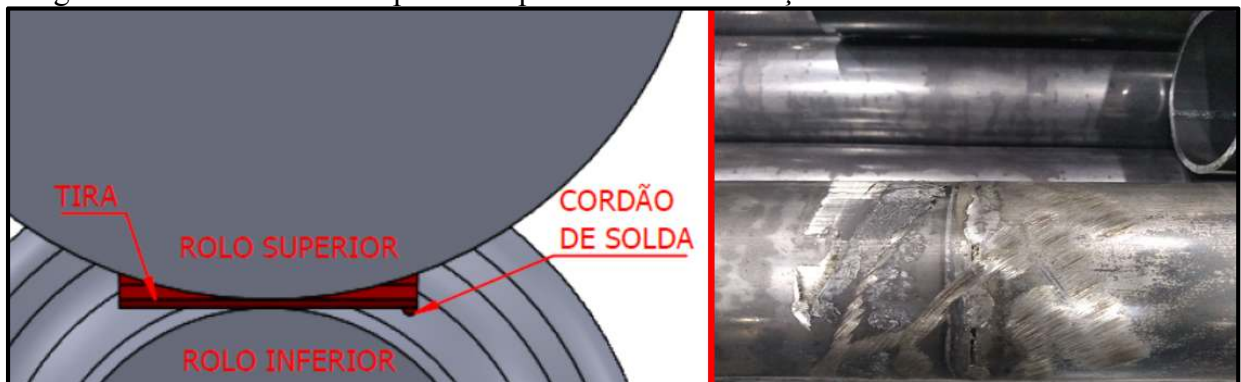
Figura 23 - Tira com solda MIG



Fonte: Arquivos da Panatlântica Tubos SA (2019)

A Figura 24 mostra os rolos de conformação com a emenda da tira cujo cordão de solda não foi bem esmerilhado na parte inferior. Assim a solda acaba forçando a abertura dos rolos, e conseqüentemente do eixo de formação.

Figura 24 - Cordão de solda passando pelos rolos de formação e tubo com a emenda de tira



Fonte: O autor (2019)

### 3.6 *SETUP*

O objetivo dessa etapa é a avaliação da parte de *setup* da máquina, onde foram detectadas e corrigidas falhas na montagem do eixo.

Na desmontagem dos eixos quebrados constataram-se diversos problemas de montagem como:

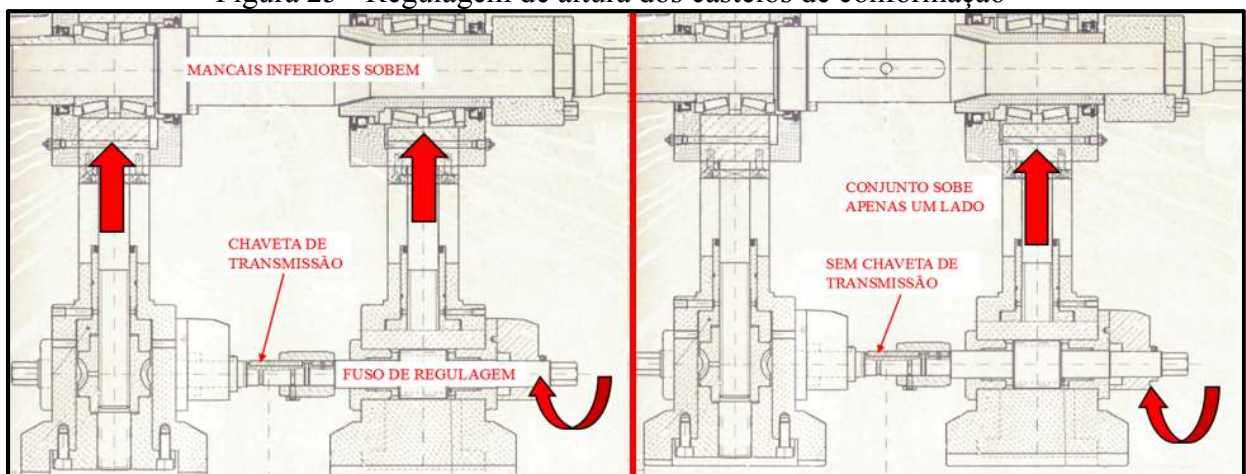
- a) rolamentos de rolos montados invertidos, não assegurando o alinhamento do eixo;
- b) falta de encosto dos rolamentos, deixando a capa do rolamento axialmente solta;

- c) falta do retentor, permitindo que o óleo solúvel da máquina entre no mancal e remova a graxa do rolamento. Houve um caso que o rolamento superaqueceu e acabou fundindo no mancal;
- d) falta do anel elástico interno, responsável pela fixação do retentor;
- e) falta da arruela de encosto do eixo, deixando novamente o rolamento solto.

Durante essa análise foi descoberto que o operador responsável pelo *setup* estava substituindo outro e que não havia recebido treinamento, e que a única orientação que ele tinha para a montagem eram anotações em um caderno, sendo que o mesmo não era capaz de reconhecer as peças apenas pelo nome.

Outro problema encontrado foi na regulagem de altura do mancal inferior dos castelos. Um fuso é girado manualmente transmitindo o movimento para um parafuso sem fim, que sobe ou desce os mancais, regulando assim a altura dos rolos inferiores de formação. Algumas vezes a chaveta de transmissão caía e apenas o mancal dianteiro subia, tensionando o eixo. A Figura 25 mostra o funcionamento da regulagem de altura.

Figura 25 - Regulagem de altura dos castelos de conformação



Fonte: Adaptado de arquivos da Panatlântica Tubos SA (2019)

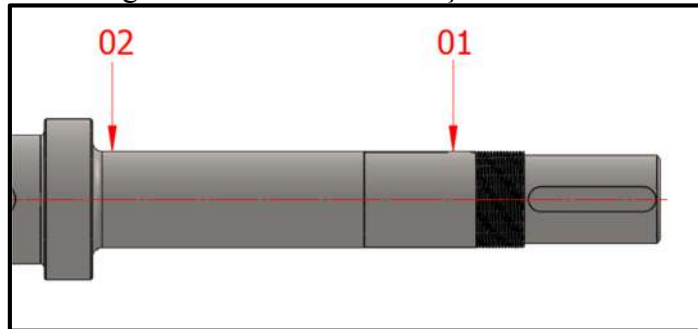
### 3.7 ENSAIOS

O objetivo dessa etapa é a avaliação do material usado na fabricação dos eixos, sua dureza e a avaliação da região da quebra.

#### 3.7.1 Ensaio de dureza

A Figura 26 mostra o tratamento térmico e a região de medição de dureza.

Figura 26 - Pontos de medição de dureza



Fonte: O autor (2019)

O ensaio de dureza indica que a região da quebra está com uma dureza menor que o resto do eixo conforme indicado na Tabela 1 e no Anexo F:

Tabela 1 - Ensaio de dureza

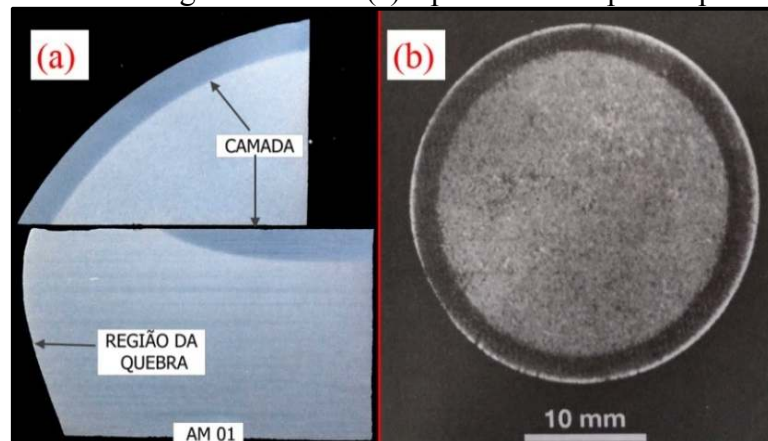
| Ponto de medição | Leituras obtidas [HRC] |    |    |    |    |
|------------------|------------------------|----|----|----|----|
|                  | 01                     | 02 | 03 | 04 | 05 |
| 01               | 45                     | 41 | 45 | 44 | 45 |
| 02               | 15                     | 16 | 12 | 12 | 15 |

Fonte: O autor (2019)

### 3.7.2 Análise metalográfica

A Figura 27 mostra a análise metalográfica do eixo e a seção transversal de um pino temperado por indução. A região mais escura é a camada endurecida (COLPAERT, 2008).

Figura 27 - Metalografia do eixo (a) e pino com têmpera superficial (b)

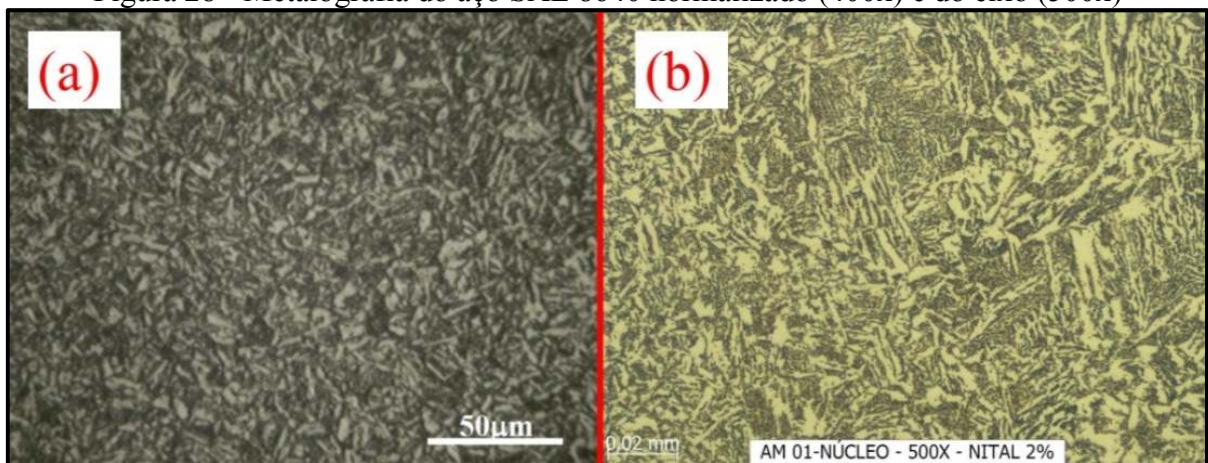


Fonte: UCS (2019) (a) e COPAERT (2008) (b)

Observa-se que na região de quebra o eixo não foi tratado termicamente pela ausência da região mais escura na região da quebra.

A Figura 28(a) apresenta a microestrutura de uma amostra de SAE 8640 obtida através da normalização consistindo das fases perlita e ferrita. A perlita está apresentada na parte mais escura, já a ferrita consiste na parte mais clara. Percebe-se também o refinamento e a uniformidade da microestrutura possibilitada pelo tratamento térmico de normalização (OLIVEIRA, 2014). A Figura 28(b) corresponde a microestrutura do eixo quebrado, sendo que vemos diferenças significantes na perlita.

Figura 28 - Metalografia do aço SAE 8640 normalizado (400x) e do eixo (500x)



Fonte: OLIVEIRA (2014) (a) e UCS (2019) (b)

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo tem por objetivo avaliar os resultados obtidos pelas modificações feitas no eixo.

### 4.1 FORÇAS ATUANTES

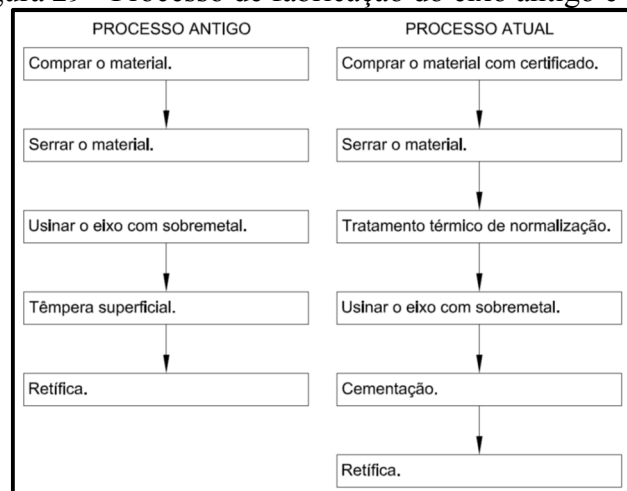
Depois de calculadas e avaliadas as forças atuantes no Apêndice C concluem-se que o eixo em condições normais de trabalho não deveria estar quebrando por fadiga.

O Apêndice C demonstra que, em dois meses de trabalho da formadora de tubos, o eixo esteve submetido a 589.099 ciclos de carga. Do total, 90,36% desses ciclos geraram tensões inferiores ao limite de fadiga de vida infinita ( $S_e$ ). Além disso, somente em 0,79% do total de ciclos, tensões 50% acima do  $S_e$  atuaram. Estas são as tensões máximas às quais o eixo poderá estar submetido e correspondem à produção do tubo de aço SAE 1020 com diâmetro 4" e espessura igual a 4,75 mm.

### 4.2 ALTERAÇÕES DE MATERIAL E TRATAMENTO TÉRMICO

A metodologia de aquisição do material foi modificada, bem como o processo de fabricação do eixo. Com essa espera-se que o material venha com sua composição garantida conforme certificado e a normalização garanta a homogeneização do aço. A Figura 29 mostra as modificações dos processos.

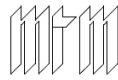
Figura 29 - Processo de fabricação do eixo antigo e atual



Fonte: O autor (2019)

Após consulta com o fabricante da máquina (MTM italiana), nos foi enviado o desenho original do eixo, no qual constava o material e o tratamento térmico. Como uma das opções era a contratação de um técnico da MTM para solucionar o problema, e o posterior questionamento do porquê não estarmos usando o material original, foi optado pela alteração do material. O material UNI 18NiCrMo5 é a norma italiana equivalente ao SAE 4317, sendo que o aço comercialmente mais próximo a ele encontrado foi o SAE 4320 (FUSHUN, 2019). A Figura 30 mostra as especificações do fabricante sobre o material do eixo. Como o material é de baixo carbono substitui-se a têmpera superficial pela cementação do eixo.

Figura 30 - Especificação do fabricante quanto ao material do eixo

| PDS.  | DENOMINAZIONE  | N.PEZZI   | MATERIALE         | PESO     | NOTE      |
|---|--|-----------|-------------------|----------|-----------|
|   | Tondo $\varnothing$ 105 lungh.=1035  | 1         | Acc UNI 18NiCrMo5 |          | Cementato |
|    | officine MTM s.r.l.<br>30038 SPINEA (Venezia) - ITALIA<br>Via Carpaccio, 36 - Tel. (041) 994.733<br>Telex 433086 MTM VE I - Telefax (041) 999611 | Modifiche |                   |          |           |
|   | LINEE DI PROFILATURA<br>AUTOMAZIONI INDUSTRIALI  | Scale     | Data              | 25-6-96  |           |
| TESTA DI LAVORO<br>BREAK DOWN<br>ALBERO PORTA RULLI   |  | 1:2,5     | Disegn.           | PARADISI |           |
|   |  |           | Lucid.            |          |           |
| <small>Questo disegno è di proprietà riservata e non può essere copiato, riprodotto, mostrato a terzi senza nostra autorizzazione scritta</small> |  | DIS. N.   | Sostituisce il    |          |           |
|   |  | I93C-1    | Sostituito dal    |          |           |

Fonte: MTM (1996)

### 4.3 ALTERAÇÕES DE GEOMETRIA

As modificações de geometria aplicadas na região de quebra do eixo foram o aumento do diâmetro de 60 mm para 65 mm e a criação de um raio de concordância de 6 mm para substituir o alívio de retífica. Estas modificações requerem um novo cálculo de tensões de flexão e de torção conforme apresentados na sequência:

$$\sigma = \frac{Mr}{\frac{\pi d^4}{64}} \rightarrow \sigma = \frac{2907,5 \cdot 195 \cdot 32,5}{\frac{\pi \cdot 65^4}{64}} \rightarrow \sigma = 21,03 \text{ MPa}$$

$$\tau_{m\acute{a}x} = \frac{Tr}{\frac{\pi d^4}{32}} \rightarrow \tau_{m\acute{a}x} = \frac{7159 \cdot 10^3 \cdot 32,5}{\frac{\pi \cdot 65^4}{32}} = 132,8 \text{ MPa}$$

Calculando o fator de concentração de tensão para flexão conforme Anexo B e Figura 44, sendo  $D/d = 1,54$  e  $r = 6$  mm. Interpolando valores para encontrar o valor de  $A$  e  $b$ :

Tabela 2 - Interpolação para concentrador de tensão de flexão

| <b>D/d</b> | <b>A</b> | <b>b</b> | <b>Interpolação A</b> | <b>Interpolação b</b> |
|------------|----------|----------|-----------------------|-----------------------|
| 2,00       | 0,90879  | -0,28598 | -                     | -                     |
| 1,54       | A        | b        | 0,93599               | -0,25786              |
| 1,50       | 0,93836  | -0,25759 | -                     | -                     |

Fonte: O autor (2019)

$$k_t = A \left( \frac{r}{d} \right)^b \rightarrow k_t = 0,93599 \left( \frac{6}{65} \right)^{-0,25786} \rightarrow k_t = 1,73$$

$$k_t = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_0} \rightarrow 1,73 = \frac{\sigma_{max}}{21,03} \rightarrow \sigma_{max} = 36,38 \text{ MPa}$$

Calculando o fator de concentração de tensão para torção conforme Anexo B e Figura 44, sendo D/d = 1,54 e r = 6 mm Interpolando valores para encontrar o valor de A e b:

Tabela 3 - Interpolação para concentrador de tensão de torção

| <b>D/d</b> | <b>A</b> | <b>b</b> | <b>Interpolação A</b> | <b>Interpolação b</b> |
|------------|----------|----------|-----------------------|-----------------------|
| 2,00       | 0,90879  | -0,28598 | -                     | -                     |
| 1,54       | A        | b        | 0,93599               | -0,25786              |
| 1,50       | 0,93836  | -0,25759 | -                     | -                     |

Fonte: O autor (2019)

$$k_{ts} = A \left( \frac{r}{d} \right)^b \rightarrow k_{ts} = 0,85347 \left( \frac{6}{65} \right)^{-0,23382} \rightarrow k_{ts} = 1,49$$

$$k_{ts} = \frac{\tau_{max}}{\tau_0} \rightarrow 1,49 = \frac{\tau_{max}}{132,8} \rightarrow \tau_{max} = 197,9 \text{ MPa}$$

Combinando as duas tensões por von Mises conforme Equação 8:

$$\sigma_e = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2} \rightarrow \sigma_e = \sqrt{36,38^2 + 3 \cdot 197,9^2} = 344,7 \text{ MPa}$$

Calculando o fator de segurança após todas essas modificações (aço SAE 4320 com  $S_{ut} = 827 \text{ MPa}$ ):

$$S_e = 1 \cdot 0,6 \cdot 0,891 \cdot 1 \cdot 0,814 \cdot 0,5 \cdot 827 \rightarrow S_e = 179,9 \text{ MPa}$$

$$\sigma'_\tau = \sqrt{3} \cdot \sigma_\tau \rightarrow \sigma'_\tau = \sqrt{3} \cdot 197,9 = 342,8 \text{ MPa}$$

$$n = \frac{1}{\frac{\sigma_a}{S_e} + \frac{\sigma'_m}{S_{ut}}} \rightarrow m_f = \frac{1}{\frac{36,38}{179,9} + \frac{342,8}{827}} = 1,62$$

A Tabela 4 compara os resultados dos fatores de concentração do eixo e das tensões do eixo original (mostrados no Apêndice C) e do eixo modificado.  $K_{ts}$ .

Tabela 4 - Comparativo entre o eixo original e o eixo modificado

| Variável              | Eixo Original | Eixo Modificado |
|-----------------------|---------------|-----------------|
| $K_t$ [-]             | 1,91          | 1,73            |
| $K_{ts}$ [-]          | 1,48          | 1,49            |
| $\sigma_{\max}$ [MPa] | 51,72         | 36,38           |
| $\tau_{\max}$ [MPa]   | 249,8         | 197,9           |
| $\sigma_e$ [MPa]      | 435,7         | 344,7           |
| $n$ [-]               | 1,26          | 1,62            |

Fonte: O autor (2019)

Obteve-se assim uma redução de 26,40% na tensão equivalente de von Mises com essas modificações no eixo. Observa-se que a substituição do alívio de retífica por um raio deixou praticamente igual a concentração de tensão para torção, sendo que esse é o maior esforço ao qual o eixo é submetido.

O fator de segurança obtido após modificações na geometria, material e tratamento térmico foi 27,56% maior que no eixo original.

#### 4.4 CORREÇÕES OPERACIONAIS

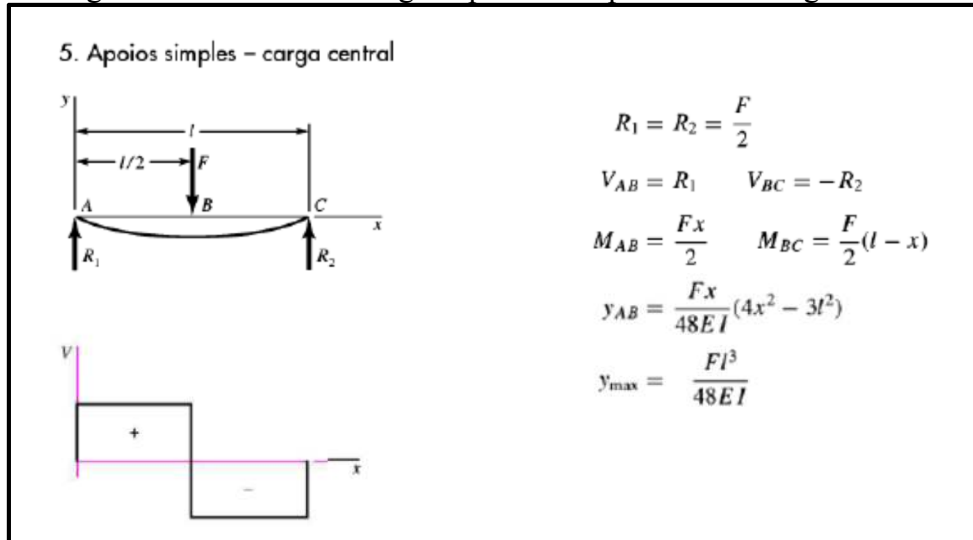
A rampa de velocidades ajudou a diminuir o esforço dos eixos em cada parada da máquina, bem como um controle maior da quantidade de tiras no acumulador.

Quanto ao esmerilhamento da solda optou-se por parar a máquina caso o operador não tenha tempo de remover todo o excesso de solda da superfície da tira.

A gravidade observada na passagem de uma saliência sob os rolos formadores do eixo, como um cordão de solda por exemplo, pode ser prevista utilizando-se a teoria da linha elástica que relaciona força transversal e deflexão. Um caso hipotético, conforme a Figura 31,

com deflexão de somente 0,1 mm do eixo, objeto de estudo deste trabalho, resulta numa força transversal de 14,54 kN. Esta força é 5 vezes maior que a definida como padrão para o processo.

Figura 31 - Deflexão de viga duplamente apoiada com carga central



Fonte: (SHIGLEY; MISCHKE; BUDYNAS, 2005)

$$y_{\max} = \frac{Fl^3}{48EI} \rightarrow 0,1 = \frac{F \cdot 390^3}{48 \cdot 205 \cdot 10^3 \cdot \frac{\pi \cdot 65^4}{64}} = 14,54 \text{ kN}$$

Foi proposta a aquisição de uma solda TIG para chapa até 4,75mm, mas antes serão feitos vários ajustes e substituições de peças desgastadas no corte e emenda. Um dos problemas é a guilhotina não estar cortando paralelamente as tiras, deixando uma fresta e tornando impossível a solda pelo processo TIG, como mostra a Figura 32.

Figura 32 - Defeito no corte da tira

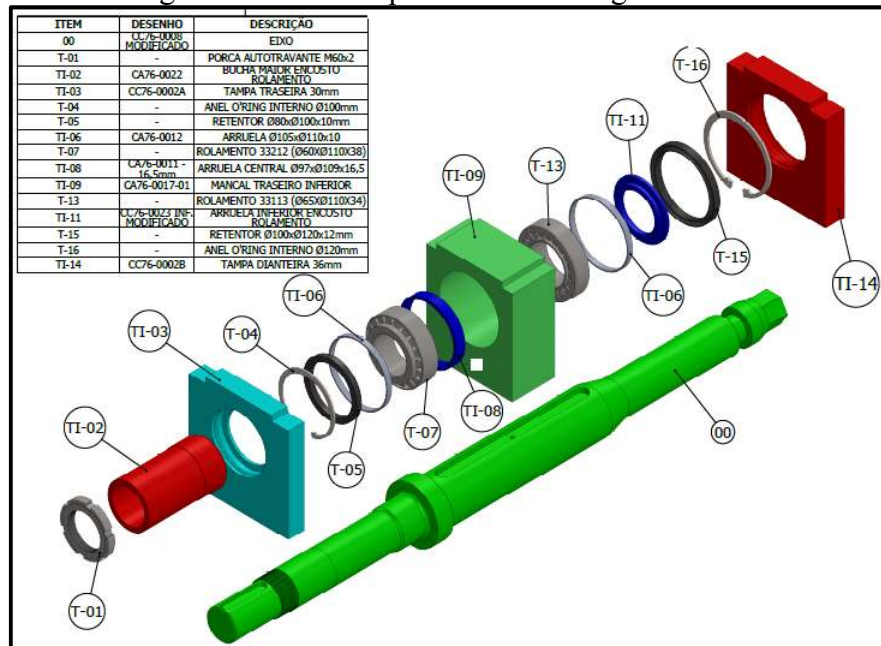


Fonte: Arquivos da Panatlântica Tubos SA (2019)

#### 4.5 CORREÇÕES DE *SETUP*

O responsável pelo *setup* foi treinado para que ele montasse corretamente o eixo nos mancais e foi desenhada uma vista explodida da montagem com a identificação das peças. A Figura 33 mostra o desenho de montagem, bem como os respectivos itens.

Figura 33 - Vista explodida da montagem do eixo



Fonte: Adaptado de arquivos da Panatlântica Tubos SA (2019)

Na parte da regulação da altura dos mancais inferiores do castelo de formação, as soluções encontradas foram a fixação da chaveta por um parafuso sobre a bucha e a aquisição e uso de calibrador de altura para a conferência da altura do mancal em ambos os lados do castelo de formação após *setup*.

#### 4.6 RESULTADOS DO ENSAIO DE DUREZA

A dureza encontrada no ponto 02 de medição está abaixo até da dureza de fornecimento do aço SAE 8640 sem tratamento térmico, que é de aproximadamente 19 HRC (LUZ, 2019). O coeficiente de segurança de fadiga para as cargas atuantes no eixo, considerando que suas propriedades são do aço SAE 8640 sem tratamento térmico, com limite de resistência à tração igual a 607,9 MPa (SILVEIRA, 2018), foi obtido com o seguinte procedimento de cálculos:

$$S_e = 1,06 \cdot 0,891 \cdot 1,0814 \cdot 0,5 \cdot 607,9 \rightarrow S_e = 132,3 \text{ MPa}$$

$$S_m = 0,95 S_{ut} \rightarrow S_m = 0,95 \cdot 607,9 = 577,1 \text{ MPa}$$

$$b = -\frac{1}{z} \log\left(\frac{S_m}{S_e}\right) \rightarrow b = \frac{1}{-3} \log\left(\frac{577,1}{132,3}\right) = -0,2132$$

$$\log(a) = \log(S_m) - 3b \rightarrow \log(a) = \log(577,1) - 3 \cdot -0,2132 = 2,517$$

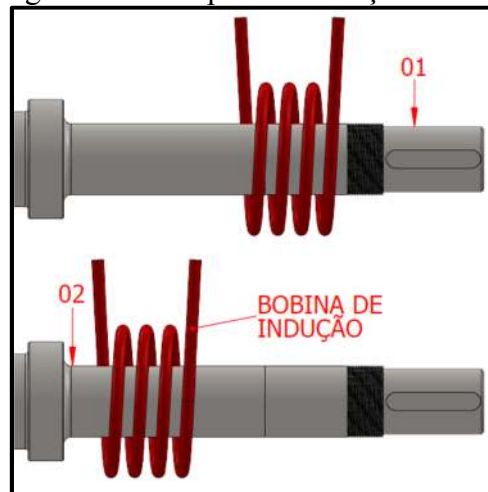
$$S(N) = aN^b \rightarrow S(N) = 2517 \cdot 1,0E6^{-0,2132} = 132,34 \text{ MPa}$$

$$\sigma'_\tau = \sqrt{3} \cdot \sigma_\tau \rightarrow \sigma'_\tau = \sqrt{3} \cdot 249,8 = 432,7 \text{ MPa}$$

$$n = \frac{1}{\frac{\sigma_a}{S_e} + \frac{\sigma'_m}{S_{ut}}} \rightarrow m_f = \frac{1}{\frac{51,07}{132,3} + \frac{432,7}{607,9}} = 0,91$$

Conclui-se que o eixo não resiste ao tubo de maior bitola nessas condições comprovadas pelo ensaio de dureza. O prestador de serviço de tratamento térmico informou que baixava a potência da bobina de indução próxima à região de diâmetro 100 mm (02), porque o material ficava muito próximo à bobina. Segundo ele seria necessário trocar a bobina por uma maior para a têmpera superficial nessa região, aumentando seu custo operacional. Conseqüentemente essa região, justamente a região de quebra do eixo, ficava sem tratamento térmico, conforme mostra a Figura 34.

Figura 34 - Têmpera de indução do eixo



Fonte: O autor (2019)

Além disso ocorria um revenimento forçado quando a têmpera era realizada do outro lado do eixo. A solução encontrada foi não temperar a região de diâmetro maior do eixo, desligando o indutor quando chegasse nessa região para garantir a dureza na região de quebra. A Figura 35 mostra o eixo sem têmpera nessa região.

Figura 35 - Eixo sem têmpera na região de diâmetro maior



Fonte O autor (2019)

Isso foi feito antes da mudança de material do eixo e de um problema com um lote de eixos tratados termicamente. De um lote de cinco eixos dois duraram menos de uma semana, lascando na chaveta e quebrando ao meio como mostra a Figura 19. Por fim optou-se pela troca de material e tratamento térmico conforme indicado no desenho original do eixo.

#### 4.7 RESULTADOS DO ENSAIO DE METALOGRAFIA

Conforme observado na Figura 34 a região de quebra do eixo não foi tratada termicamente, confirmando o que já foi demonstrado no ensaio de dureza.

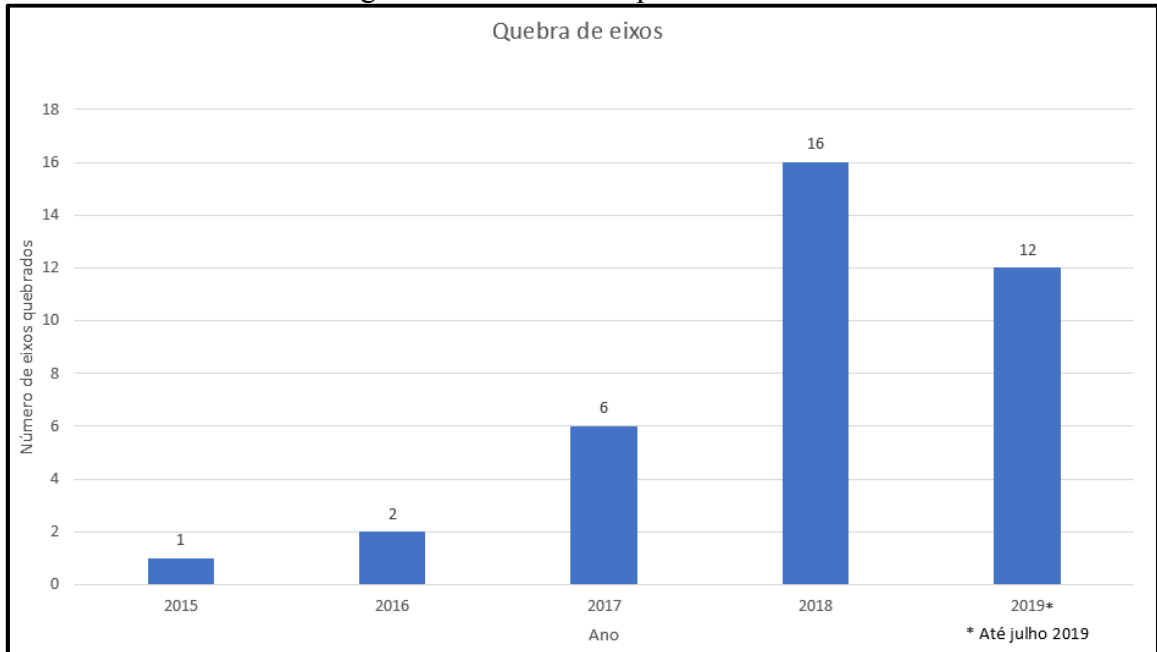
Na metalografia isso é confirmado na Figura 27, onde observa-se que a região de quebra não recebeu o tratamento de têmpera superficial. Na Figura 28 observa-se que o aço não aparenta ser SAE 8640 normalizado, deixando dúvidas de que o material adquirido foi realmente o material solicitado. Visto que o tipo de material foi trocado e passou a ser comprado com certificado acredita-se que isso não seja mais um problema.

#### 4.8 AUMENTO DA DURABILIDADE

A Figura 36 mostra as quebras de eixo ao longo dos anos, e após todas melhorias implementadas cessaram-se as quebras. O objetivo inicial era que o eixo ao menos tivesse uma vida útil média de 2 meses como em 2018. Tanto que todo o levantamento de cálculo

para o número de ciclos foi feito levando em consideração 2 meses de produção da formadora de tubos.

Figura 36 - Gráfico de quebra de eixos



Fonte: Arquivos da Panatlântica Tubos SA (2015)

Como ainda existem eixos do modelo antigo e dos novos trabalhando simultaneamente, foi escolhido um eixo de SAE 4320 e com geometria modificada para ser acompanhado até sua quebra. Ele foi posto em máquina dia 06.07.2019 e após 5 meses de trabalho ele continua funcionando perfeitamente. A Figura 37 mostra o eixo.

Figura 37 - Eixo com a vida útil monitorada



Fonte O autor (2019)

## 5. CONCLUSÃO

Inicialmente à ocorrência do aumento de quebra dos eixos a primeira providência a ser tomada foi a modificação do raio no eixo para tentar sanar o problema. Como não houve melhora no aumento da vida útil foi feito todo um acompanhamento e levantamento de problemas ao longo de semanas junto à formadora de tubos.

Foram encontrados diversos problemas de *setup*, operacionais tanto na alimentação como na formação e de tratamento térmico do eixo. Diferente do que se pensava não havia uma causa-raiz do problema, e sim várias combinadas.

Importante que a partir de agora quando um funcionário de *setup* ou um operador forem substituídos eles serão treinados e acompanhados por alguém com mais experiência para aprenderem a realizar suas funções corretamente. Tanto que o atual funcionário responsável pelo *setup* está sendo acompanhado por um mecânico da manutenção toda vez que tiver que substituir o eixo.

Foi adquirido um durômetro portátil digital para a verificação de dureza de toda peça com tratamento térmico assim que ela é recebida na empresa, para assim prevenir-se falhas como dureza fora do especificado.

Por fim a mudança da geometria do eixo aumentou sua resistência. Não foi necessário usinar os mancais, apenas o investimento em novos rolamentos.

Algumas providências ficaram de ser estudadas e realizadas, como sugestão para trabalhos futuros:

- a) sensoreamento do acumulador para evitar um esforço excessivo de arraste devido ao excesso de tira acumulada;
- b) conserto da guilhotina do corte e emenda que depende de peças importadas, que além de caras levam cerca de 90 dias pra serem entregues;
- c) estudo da remoção do raio de 6 mm, visto que os cálculos provam que na tensão de torque ele não desempenha nenhuma melhoria e a tensão de flexão é baixa pouco influencia na vida útil do eixo.

Outro ponto importante é que toda fundamentação teórica e desenvolvimento de cálculos sobre as tensões atuantes deu o suporte necessário para o entendimento de todo o ocorrido. Quando o problema iniciou a primeira tentativa de resolução foi a criação do raio de 6mm, que não apresentou nenhum aumento da vida útil. Através dos cálculos de concentração de tensão e análise de tensões sobre o eixo descobriu-se que o acréscimo do raio é útil para o

aumento da resistência à flexão, mas que não representava melhora alguma na tensão de torção, que é a predominante sobre o eixo.

O aumento em 5mm no diâmetro do eixo garantiu uma diminuição de 26,22% na tensão de torção, aumentando a resistência do eixo e bastando apenas a mudança do modelo do rolamento.

Essas modificações geométricas, aliadas às mudanças operacionais e correção de problemas no *setup* garantiram o fim das quebras constantes de eixos, que além do custo do eixo em si gera o problema da máquina parada para sua substituição, perdendo volume de produção e gerando atraso na entrega do tubo ao cliente. Considerando também que em cada parada de máquina ocorre uma perda de 4 a 5 tubos abertos na solda tem-se ainda o desperdício de material.

## REFERÊNCIAS

- BUFFONI, Salete. **Critérios de falha**. Universidade Federal Fluminense, 2017. Disponível em: <http://www.professores.uff.br/salete/wp-content/uploads/sites/111/2017/08/aula141.pdf>. Acesso em: 10 mar. 2019.
- CALLISTER, William D. **Ciência e engenharia dos materiais**. Rio de Janeiro, RJ: LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda., 2008.
- CELESTINO, Pedro Alexandre Pinto; FELIPE, Renata Carla Tavares Santos; MACHADO, Tércio Graciano. **Holos**. Análise comparativa entre o tratamento térmico (têmpera) e o tratamento termoquímico (cementação) realizado em aço 1040. Departamento de Tecnologia Industrial CEFET-RN, 2007. Disponível em: <http://www2.ifrn.edu.br/ojs/index.php/%EE%80%80HOLOS%EE%80%81/article/viewFile/147/128>. Acesso em: 6 abr. 2019.
- CHIAVERINI, Vicente. **Aços carbono e aços liga**. São Paulo, SP: Associação Brasileira de Metais, 1971.
- CHIAVERINI, Vicente. **Tratamento térmico das ligas metálicas**. São Paulo, SP: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2008.
- COLPAERT, Hubertus. **Metalografia dos Produtos Siderúrgicos Comuns**. 4. ed. São Paulo, SP: Blucher, 2008.
- CORDEIRO, Venancio Castro Nogueira. **Projeto de conjunto redutor de velocidade utilizando engrenagem sem-fim**. Guaratinguetá, SP. 2012. TCC (Graduação em Engenharia Mecânica), Universidade Estadual Paulista “Júlio De Mesquita Filho” Campus De Guaratinguetá.
- CUNHA, Lamartine Bezerra da. **Elementos de máquina**. 1. ed.: LTC, 2005.
- DIFERRO. **Catálogo técnico de produtos**. 2016.
- FAVORIT. **Catálogo técnico de aços**. 2015.
- FERREIRA, Carlos Roberto. **Tratamento térmico por indução eletromagnética de hastes de aço SAE 1045 para sondagem geológica**. 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia dos Materiais), Universidade Federal de Ouro Preto.
- FIGUEIREDO, Enio. **Tratamento térmico: têmpera**. 8 ago. 2012. Disponível em: [http://www.engenhariadomovimento.com.br/2014/08/tratamento-termico-tempera\\_8.html](http://www.engenhariadomovimento.com.br/2014/08/tratamento-termico-tempera_8.html). Acesso em: 6 abr. 2019.
- FUSHUN, Special Steel. **Steel UNI 18NiCrMo5**. 2019. Disponível em: <https://www.fushunspecialsteel.com/din1-6566-17nicrmo6-4-18nicrmo5-817m17-sae4317-case-hardening-steel>. Acesso em: 15 jul. 2019.

GALVÃO, Brenda. **Sistema de transmissão mecânica**. 2019. Disponível em: <https://slideplayer.com.br/slide/16379879>. Acesso em: 06 jul. 2019.

GDD. **Catálogo técnico aços e metais**. 2016. Disponível em: <https://www.ggdmetals.com.br/wp-content/uploads/2016/01/Construcao-Mecanica.pdf>. Acesso em: 17 mar. 2019.

GUILHERME, Jose. **Análise de Tensões**. 2017. Disponível em: <http://ensus.com.br/analise-de-tensoes/>. Acesso em: 9 mar. 2019.

HIBBELER, R. C. **Resistência dos materiais**. 7. ed. Rio de Janeiro, RJ: LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda., 2010.

JUNIOR, José Machado. Comparando cementação e têmpera de indução. **Industrial heating Brazil**. 25 ago. 2016. Disponível em: <http://foundrygate.com/upload/artigos/CoMParando%20cementa%C3%A7%C3%A3o%20e%20t%C3%AAmpera%20por%20indu%C3%A7%C3%A3o.pdf>. Acesso em: 13 abr. 2019.

LUZ, Gelson. **Aço SAE 8640: propriedades mecânicas**. Disponível em: <https://www.materiais.gelsonluz.com/2017/10/aco-sae-8640-propriedades-mecanicas.html>. Acesso em: 31 ago. 2019.

LUZ, Gelson. **ASTM A36: propriedades mecânicas e composição química**. 2019. Disponível em: <https://www.materiais.gelsonluz.com/2017/10/astm-a36-propriedades-mecanicas-e-composicao-quimica.html>. Acesso em: 31 ago. 2019.

MATWEB. **AISI 4320 Steel: mock carburized 925°C (1700°F) for 8 h., reheated to 815°C (1500°F), oil quenched, 150°C (300°F) temper, 100 mm (4 in.) round**. 2019. Disponível em: <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=83d85140b8214986ac6ff5ad69b8ae6b>. Acesso em: 10 set. 2019.

MATWEB. **AISI 4340 Steel: oil quenched 800°C (1470°F), 595°C (1100°F) temper, 100 mm (4 in.) round**. 2019. Disponível em: <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=210ae2b9f247439fac61d1e9bcfb4f2>. Acesso em: 10 set. 2019.

MATWEB. **AISI 8620 Steel: mock carburized, reheated and oil quenched, 150°C (300°F) temper, 100 mm (4 in.) round**. 2019. Disponível em: <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=9540073de9db4e4383f31617ea323e7d>. Acesso em: 10 set. 2019.

MATWEB. **AISI 8640 Steel: oil quenched 845°C (1550°F), 650°C (1200°F) temper, 50 mm (2 in.) round**. 2019. Disponível em: <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=aa64e96f5a504d34ad98e43fa972999d>. Acesso em: 10 set. 2019.

MELCONIAN, Sarkis. **Elementos de máquina**. São Paulo, SP: Érica, 2009.

MOURA, Andrezza Lauria de. **Análise fractográfica e de resistência mecânica de duas marcas de placas de titânio em fraturas simuladas em corpo de hemimandíbulas de**

**alumínio**. 2013. Dissertação (Mestrado em Odontologia) - Faculdade de Odontologia de Piracicaba, Piracicaba, SP.

NORTON, Robert L. **Projeto de máquinas**: uma abordagem integrada. 4. ed. Porto Alegre, RS: Bookman Editora Ltda., 2013.

OBBERG, Erik; JONES, Franklin D.; HORTON, Holbrook L. **Manual universal da técnica mecânica**. São Paulo, SP: Hemus, 1979.

OLIVEIRA, Everton Gustavo de. **Efeito dos parâmetros de tratamento térmico na microestrutura e nas propriedades dos aços SAE 4340 e 8640 temperados e revenidos**. 2014. TCC (Graduação em Engenharia Mecânica) - Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG.

PARETO, Luis. **Resistência e ciência dos materiais**. [S. l.]: Hemus Livraria, Editora e Distribuidora, 2003.

PARRINGTON, Ronald J. Fractography of metals and plastics. **Practical failure analysis**. Outubro 2002. Disponível em: [https://link.springer.com/article/10.1007%2F978-1-4020-2715-4\\_63](https://link.springer.com/article/10.1007%2F978-1-4020-2715-4_63). Acesso em: 19 abr. 2019.

PEREIRA, Hélder Filipi Sousa Gomes. **Comportamento à fadiga de componentes estruturais sob a ação de solicitações de amplitude variável**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica e Gestão Industrial) - Departamento de Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal.

PEREIRA, Peterson. **Tratamentos termoquímicos**: cementação. 14 abr. 2019. Disponível em: <http://mecanica-blog.blogspot.com/search/label/Tratamento%20T%C3%A9rmico>. Acesso em: 14 abr. 2019.

PINEDO, Carlos Eduardo. **Tratamento térmico**: revenimento. 18 maio 2019. Disponível em: <https://www.solucoesindustriais.com.br/empresa/prestadores-de-servicos/heattech/produtos/isolamento-termico-e-acustico/tratamento-termico-revenimento>. Acesso em: 18 maio 2019.

RODRIGUES, Jorge ; MARTINS, Paulo. **Tecnologia da deformação mecânica**. Instituto Superior Técnico Lisboa, Portugal: [s. n.], 2010.

SANTOS, João Bosco dos. **Modelagem matemática do dano em fadiga do aço 4140 utilizando o método de elementos finitos**. 2011. Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia Mecânica) - Pontifícia Universidade Católica De Minas Gerais.

SILVA, André Luiz V. da Costa e; MEI, Paulo Roberto. **Aços e ligas especiais**. São Paulo, SP: Edgard Blücher Ltda, 2006.

SILVEIRA, F.; ZUCHETTO, A.; RUPPENTHAL, J. E.; MACHADO, F. M. Tratamento térmico de têmpera em aço ABNT 8640: análise das propriedades mecânicas. **Holos**, Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões, ano Ano 34, v. 02, 2018. Disponível em: <http://www2.ifrn.edu.br/ojs/index.php/HOLOS/article/download/5614/pdf>. Acesso em: 10 set. 2019.

SHIGLEY, Joseph E.; MISCHKE, Charles R.; BUDYNAS, Richard G. **Projeto de engenharia mecânica**. 7. ed. São Paulo, SP: Bookman, 2005.

SOUZA, Erich Douglas de. **Análise do efeito da tensão média sobre a resistência à fadiga do aço ASTM A743 CA6NM**. 2011. Projeto de graduação 2 (Graduação em Engenharia Mecânica) - Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília.

TEMPERAVILLE. **Própósito de cada tratamento térmico**. [S. l.], 2007. Disponível em: <http://www.temperaville.com.br/servicosPropositoTratamento.php>. Acesso em: 30 mar. 2019.

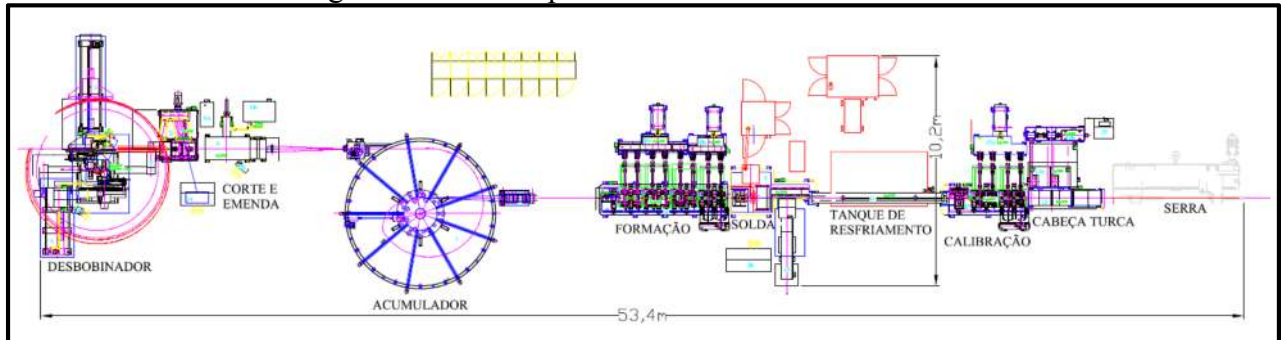
TIMOSHENKO, Stephen. **Resistência dos materiais**. Rio de Janeiro, RJ: Livro Técnico SA, 1973.

YOSHIDA, Américo. **Nova mecânica industrial: metais, ligas e tratamento térmico**. Rio de Janeiro, RJ: Editora Esparsa, 1977.

## APÊNDICE A – FORMADORA DE TUBOS

A Figura 38 mostra a máquina formadora de tubos na qual o eixo é componente. A formadora subdivide-se em várias partes, cada uma responsável por uma função específica para a fabricação de tubos a partir de tiras.

Figura 38- Vista superior da formadora de tubos



Fonte: Adaptado de arquivos da Panatlântica Tubos SA (2009)

A tabela 5 descreve as características da formadora de tubos abordada nesse capítulo, a qual o eixo faz parte.

Tabela 5 - Características da formadora de tubos

| <b>Formadora de tubos</b> |  |
|---------------------------|--|
| Capacidade de produção    | 3000 t/mês                             |
| Dimensões                 | 53,4m x 10,2m                          |
| Bitolas produzidas        | Ø26,70mm até Ø101,6mm                  |
| Espessura produzida       | 1,90mm até 4,75mm                      |
| Velocidade de produção    | Até 60 m/min                           |
| Tracionamento             | Superior e inferior em todos os passes |

Fonte: O autor (2019)

### Desbobinador

O desbobinador tem como função a fixação e o desenrolamento da tira. Tem capacidade de fixar duas tiras, e enquanto uma é desenrolada o responsável pela alimentação da máquina fixa outra tira no eixo por meio de um braço giratório. A Figura 39 mostra o desbobinador com e sem tira no eixo.

Figura 39 - Desbobinador com e sem tira



Fonte: Arquivos da Panatlântica Tubos SA (2009)

Um tracionador é responsável pelo início do desenrolamento da tira até o corte e emenda (Figura 40), e o desbobinador gira 180° cada vez que a tira é desenrolada por completo, mantendo a alimentação constante da máquina. Devido a política da empresa de sigilo dos processos fabris e da formadora de tubos estar enclausurada para adequação da NR-12, onde as proteções tornam difícil a visualização dos detalhes, optou-se por mostrar imagens da instalação da formadora na empresa.

Figura 40 - Tracionador do corte e emenda



Fonte: Arquivos da Panatlântica Tubos SA (2009)

## Corte e emenda

Como o próprio nome indica, essa parte da formadora de tubos é responsável pelo corte e emenda através de solda da tira, mantendo contínuo o processo de fabricação. Ela é formada de um prensa-chapa que fixa as duas pontas da tira, uma guilhotina que corta a ponta da tira para garantir a perpendicularidade na soldagem e por uma máquina de solda.

Figura 41 - Corte e emenda



Fonte: Arquivos da Panatlântica Tubos SA (2009)

A soldagem em todas as formadoras de tubos da empresa é feita através do processo TIG, porém nessa máquina o sistema de soldagem TIG nunca funcionou desde sua aquisição, e após diversas empresas não terem conseguido consertar optou-se por utilizar uma máquina de solda MIG. Isso leva a necessidade de esmerilhamento do cordão de solda em ambos os lados após a soldagem para não prejudicar os rolos de formação dos tubos.

Figura 42 - Máquina de solda MIG do corte e emenda



Fonte: Arquivos da Panatlântica Tubos SA (2009)

## Acumulador

Esse é o pulmão da máquina. Sua função é acumular tira para que o alimentador do desbobinador tenha tempo de soldar a tira sem parar a máquina. A entrada da tira é tracionada por um sistema de rolos e motor, porém a saída é feita pela formação da máquina.

Figura 43 - Acumulador



Fonte: Arquivos da Panatlântica Tubos SA (2009)

O modelo usado nessa máquina é o alimentador horizontal, também chamado de *floop*. Existe um modelo vertical de acumulador, que tem a vantagem de ser mais compacto. Porém sua operação e manutenção são mais difíceis.

Figura 44 - Acumulador vertical



Fonte: Zikeli (2019)

## Formação

Nessa etapa a tira é conformada até ficar em formato redondo. Nessa formadora de tubos a formação é composta de oito castelos de formação e guias laterais. Além da formação do tubo a conformação também é responsável pelo tracionamento da tira do acumulador através de um motor de corrente contínua, uma caixa redutora e de um sistema de cardans.

Figura 45 - Formação



Fonte: Arquivos da Panatlântica Tubos SA (2009)

## Solda

Nesse processo o tubo é soldado um processo de solda por alta frequência. Em seguida essa solda é raspada por meio de uma ferramenta com inserto de raspagem.

Figura 46 - Solda de alta frequência e raspagem do cordão de solda



Fonte: Arquivos da Panatlântica Tubos SA (2009)

## Tanque de resfriamento

Após a soldagem o tubo passa por um tanque de resfriamento, onde ele é resfriado por óleo solúvel antes de passar pela calibração. Se esse resfriamento não for adequado o tubo empena ao sair da calibração. Existem dois sistemas de resfriamento: por contra fluxo, onde o tubo fica submerso no óleo ou por chuveiro, onde diversas mangueiras corrugadas despejam o óleo ao longo da extensão do tanque. O sistema de chuveiro é mais eficiente no resfriamento, porém gera muito vapor de óleo e necessita de um bom sistema de exaustão.

Figura 47 - Tanque de resfriamento



Fonte: Arquivos da Panatlântica Tubos SA (2009)

## Calibração e cabeça turca

Na calibração o tubo é conformado até atingir a dimensão selecionada. No caso de tubos em outros formatos (quadrados, retangulares, elípticos, etc.) é na chamada cabeça turca que eles são formados a partir do tubo redondo.

Figura 48 - Calibração e cabeça turca



Fonte: Arquivos da Panatlântica Tubos SA (2009)

## Serra

A serra é responsável por cortar o tubo no comprimento desejado. Essa serra é chamada serra voadora, pois o carro da serra acompanha o movimento do tubo, cortando-o enquanto a formadora produz.

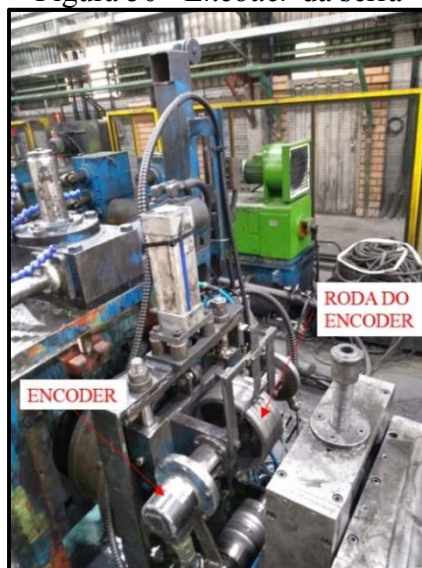
Figura 49 - Serra voadora



Fonte: Arquivos da Panatlântica Tubos SA (2009)

O dimensionamento do tubo é medido a partir de um *encoder*, onde ele é acoplado a uma roda que mede o tubo conforme ele passa pela máquina. Após essa etapa os tubos são enfardados e colocados no estoque.

Figura 50 - *Encoder* da serra



Fonte: Adaptado de arquivos da Panatlântica Tubos SA (2009)

## APÊNDICE B – CRITÉRIOS E METODOLOGIA DE CÁLCULO DE FADIGA

### Limite de fadiga $S_e'$ , não corrigido

Caso não se possua os dados disponíveis de  $S_e'$  do material, tipicamente obtidos de ensaios com carregamentos alternados de flexão, pode-se estimar esses valores a partir da resistência à tração do material ( $S_{ut}$ ) conforme critérios abaixo (NORTON, 2013).

- a)  $S_e' \cong 0,5S_{ut}$  para  $S_{ut} < 1400$  MPa (9)
- b)  $S_e' \cong 700$  MPa para  $S_{ut} \geq 1400$  MPa

### Efeitos da sollicitação

Como a maioria dos ensaios publicados refere-se a ensaios de flexão rotativa um fator de redução de resistência deve ser aplicado (NORTON, 2013).

- a) flexão  $C_{carreg} = 1$  (NORTON, 2013);
- b) axial  $C_{carreg} = 0,85$  (SHIGLEY, 2005);
- c) força normal  $C_{carreg} = 0,70$  (NORTON, 2013);
- d) torção  $C_{carreg} = 0,59$  (SHIGLEY, 2005).

### Efeitos do tamanho

Os corpos de prova sujeitos aos mais diversos ensaios possuem dimensões pequenas, em volta de 8 mm de diâmetro, o que faz com que seja necessário aplicar o fator de tamanho abaixo, válido para peças cilíndricas (NORTON, 2013).

- a) para  $d \leq 8$  mm  $C_{tamanho} = 1$
- b) para  $8 \text{ mm} < d \leq 25,4$  mm  $C_{tamanho} = 0,869d^{-0,097}$  (10)
- c) para  $d \geq 25,4$  mm  $C_{tamanho} = 0,6$

### Efeitos da superfície

Um corpo de prova padrão possui superfície polida para impedir que imperfeições superficiais atuem como intensificadores de tensão. Acabamentos superficiais grosseiros

diminuem a resistência à fadiga devido a introdução de concentradores de tensão ou alteração das propriedades físicas da camada superficial, sendo necessária a aplicação de um fator de correção da superfície (NORTON, 2013). A Tabela 6 mostra os coeficientes de acabamento superficial para serem usados na Equação 11.

Tabela 6 - Coeficientes para fator de correção de acabamento superficial

| Acabamento superficial     | A    | b      |
|----------------------------|------|--------|
| Retificado                 | 1,58 | -0,085 |
| Usinado ou laminado a frio | 4,51 | -0,265 |
| Laminado à quente          | 57,7 | -0,718 |
| Forjado                    | 272  | -0,995 |

Fonte: SHIGLEY (2005).

A Equação 11 para cálculo do efeito de superfície:

$$C_{superf} = A(S_{ut})^b \quad (11)$$

Onde:  $C_{superf}$  é o fator de superfície [MPa];

$S_{ut}$  é a resistência à tração do material [MPa];

$A$  é o coeficiente de correção [-];

$b$  é o expoente de correção [-].

### Efeitos de temperatura

Ensaio de fadiga são comumente realizados em temperatura ambiente. A tenacidade à fratura diminui em baixas temperaturas e aumenta em temperaturas por volta de 350°C. Temperaturas acima de 50% da temperatura de fusão do material passa a ter um valor significativo para o comportamento do material (NORTON, 2013). Os critérios de correção dos efeitos de temperatura em aços são:

a) para  $T \leq 450^\circ\text{C}$

$$C_{temp} = 1$$

b) para  $450^\circ\text{C} < T \leq 550^\circ\text{C}$

$$C_{temp} = 1 - 0,0058(T - 450) \quad (12)$$

### Efeitos de confiabilidade

A Tabela 7 exibe os valores de confiabilidade para um desvio padrão de 8% da média de ensaios de resistência à fadiga. Percebe-se uma diminuição do fator a cada escolha de uma confiabilidade maior (NORTON, 2013).

Tabela 7 - Fatores de confiabilidade

| Confiabilidade | $C_{conf}$ |
|----------------|------------|
| 50             | 1,000      |
| 90             | 0,897      |
| 99             | 0,814      |
| 99,9           | 0,753      |
| 99,99          | 0,702      |
| 99,999         | 0,659      |

Fonte: NORTON (2013)

A partir dessas informações calcula-se o limite de fadiga corrigido pela Equação 11:

$$S_e = C_{carreg} C_{tamanho} C_{superf} C_{temp} C_{conf} S'_e \quad (13)$$

Onde:  $S_e$  é limite de fadiga corrigido [MPa];

$C_{carreg}$  é o fator de carregamento [-];

$C_{tamanho}$  é o fator de tamanho [-];

$C_{superf}$  é o fator de superfície [-];

$C_{temp}$  é o fator de temperatura [-];

$C_{conf}$  é o fator de confiança [-];

$S'_e$  é o fator de fadiga não corrigido [MPa].

### Critérios para estimar a falha por fadiga

O interesse é que a resistência à fadiga seja de uma vida útil acima de  $10^6$  ciclos. Para a definição de  $S_m$  usa-se o critério abaixo (NORTON, 2013):

a) flexão  $S_m = 0,9S_{ut}$  (14)

b) força normal  $S_m = 0,75S_{ut}$  (15)

A partir do  $S_m$  calcula-se o coeficiente  $a$  pela Equação 16:

$$\log(a) = \log(S_m) - 3b \quad (16)$$

Onde:  $a$  é o coeficiente de correção  $a$  [-];

$S_m$  é a resistência do material a  $10^6$  ciclos [MPa];

$b$  é o expoente de correção  $b$  [-].

Define-se o número de ciclos desejados pela Tabela 8 e aplica-se o fator  $z$  pela Equação 17.

$$b = \frac{1}{z} \log\left(\frac{S_m}{S_e}\right) \quad (17)$$

Onde:  $b$  é o expoente de correção  $b$  [-];

$z$  é o fator  $z$  obtido da Tabela 5 conforme o número de ciclos  $N$  desejados [-];

$S_m$  é a resistência do material a  $10^6$  ciclos [MPa];

$S_e$  é limite de fadiga corrigido [MPa].

Tabela 8 - Fatores  $z$  para Equação 18

| N     | $z$    |
|-------|--------|
| 1,0E6 | -3,000 |
| 5,0E6 | -3,699 |
| 1,0E7 | -4,000 |
| 5,0E7 | -4,699 |
| 1,0E8 | -5,000 |
| 5,0E8 | -5,699 |
| 1,0E9 | -6,000 |
| 5,0E9 | -6,699 |

Fonte: NORTON (2013)

Por fim calcula-se a resistência a fadiga correspondente a um determinado número de ciclos pela Equação 18:

$$S(N) = aN^b \quad (18)$$

Onde:  $S(N)$  é a resistência a fadiga correspondente [MPa];

$a$  é o coeficiente de correção  $a$  [-];

$N$  é o número de ciclos [-];

$b$  é o expoente de correção  $b$  [-].

## APÊNDICE C – MEMORIAL DE CÁLCULO – FORÇAS ATUANTES NO EIXO

### Carregamento de flexão no eixo

O carregamento de flexão no eixo é proveniente da força transversal aplicada e depende de vários fatores quanto ao material da tira: espessura e tensão de escoamento do material, regulagem feita manualmente no fuso pelo operador da máquina, acabamento superficial do material (zincado, galvanizado e laminado à quente) que afeta o coeficiente de atrito, velocidade de formação, largura de tira etc.

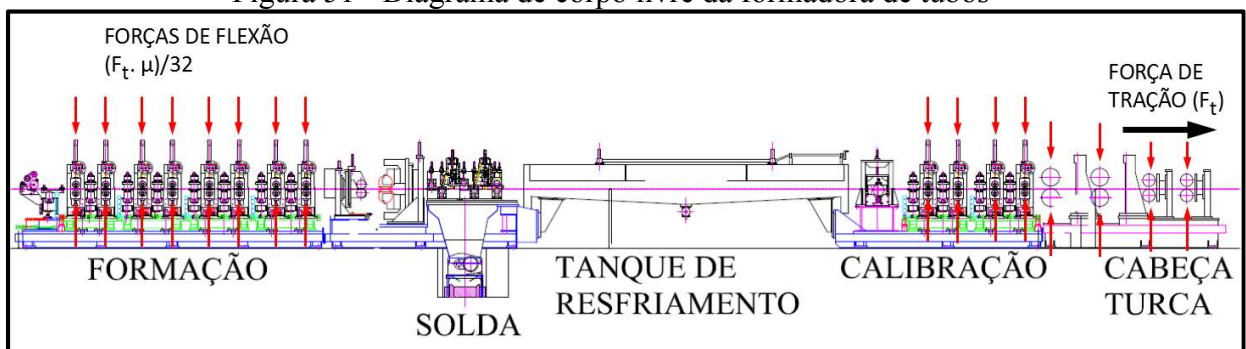
Calculando a força de tração para os dois limites da formadora de tubos, que são o material SAE 1020 laminado à quente de espessura 4,75 mm e o LNE 38 de espessura 2,70 mm pela Equação 8, conclui-se que a maior força de tração é para o material SAE 1020 espessura 4,75 mm. A resistência de escoamento de aços carbono encontra-se no Anexo E.

$$\text{a) SAE 1020} \quad F_t = 2 \cdot \pi \cdot 210 \cdot 4,75^2 = 29.771 \text{ N}$$

$$\text{b) LNE 38} \quad F_t = 2 \cdot \pi \cdot 380 \cdot 2,70^2 = 17.406 \text{ N}$$

Montando um diagrama de corpo livre e distribuído a força uniformemente entre os 32 rolos tracionados superiores e inferiores (16 na formação, 8 na calibração e 8 na cabeça turca) conforme Figura 51 e considerando o coeficiente de atrito de aço lubrificado conforme Anexo D (aço com aço lubrificado) deduz-se que:

Figura 51 - Diagrama de corpo livre da formadora de tubos

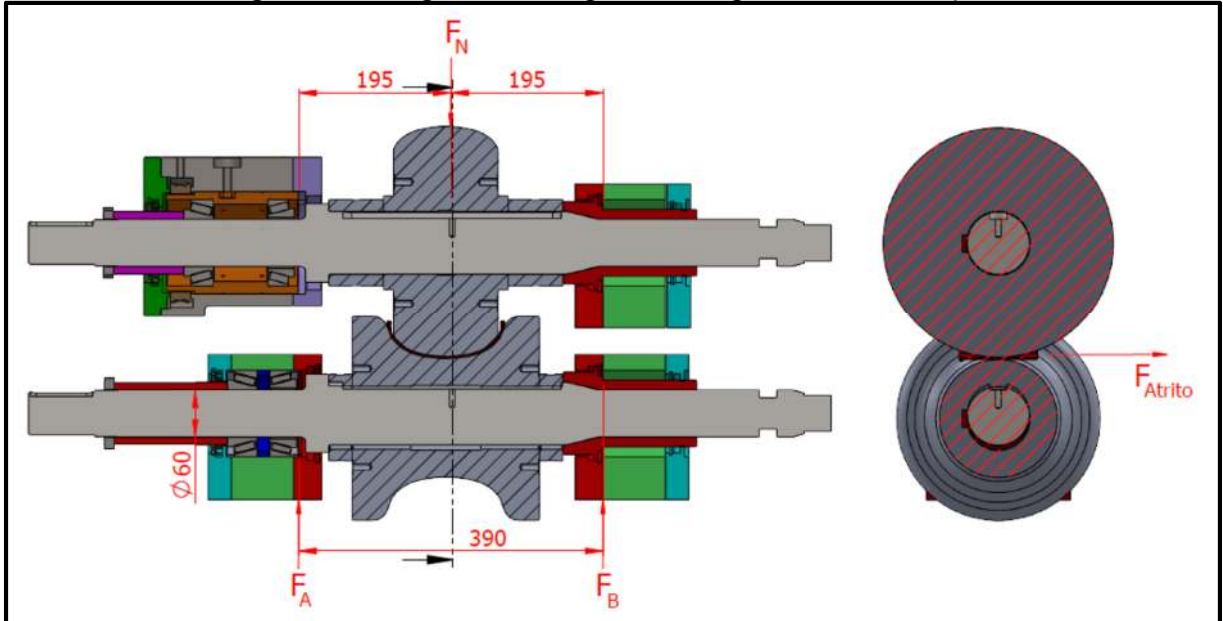


Fonte: Adaptado de arquivos da Panatlântica Tubos SA (2019)

$$F_t = 32F_N\mu \rightarrow \frac{29771}{32 \times 0,16} = F_N \rightarrow F_N = 5.815 \text{ N}$$

A avaliação da integridade estrutural foi desenvolvida no eixo responsável pelo terceiro passe de formação, onde ocorre o maior número de quebras conforme mostrado na Figura 16. A Figura 52 mostra as forças exercidas sobre o eixo e as respectivas reações.

Figura 52 - Diagrama de corpo livre no passe 3 da formação



Fonte: Adaptado de arquivos da Panatlântica Tubos SA (2019)

Observa-se que os dois pontos de apoio  $F_A$  e  $F_B$  encontram-se a mesma distância da força de tração  $F_N$ . Logo  $F_A = F_B$ . Calculando o somatório das forças, a força de atrito e a força resultante:

$$\sum F = 0 \rightarrow -F_N + 2F_A = 0 \rightarrow F_A = 2907,5 \text{ N}$$

$$F_{at} = F_N \cdot \mu \rightarrow F_{at} = 2907,5 \cdot 0,16 = F_{at} = 465,2 \text{ N}$$

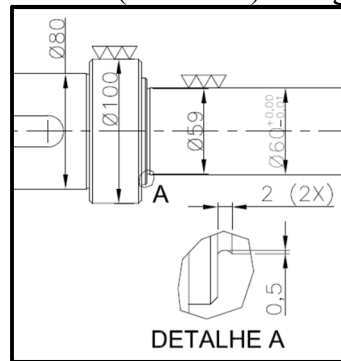
$$F_{res} = \sqrt{F_A^2 + F_{at}^2} \rightarrow F_{res} = \sqrt{2907,5^2 + 465,2^2} = F_{res} = 2944,5 \text{ N}$$

Calculando a tensão de flexão no eixo em  $F_A$  pelas Equações 4:

$$\sigma = \frac{Mr}{\frac{\pi d^4}{64}} \rightarrow \sigma = \frac{2944,5 \cdot 195 \cdot 30}{\frac{\pi \cdot 60^4}{64}} \rightarrow \sigma = 27,08 \text{ MPa}$$

A Figura 53 mostra o concentrador de tensão na região de quebra do eixo. Aplicando a equação do Anexo A onde  $D/d = 1,02$  e  $r = 2$ :

Figura 53 - Alívio de retífica (detalhe A) na região de quebra do eixo



Fonte: Adaptado de arquivos da Panatlântica Tubos SA (2009)

$$k_t = A \left( \frac{r}{d} \right)^b \rightarrow k_t = 0,97753 \left( \frac{2}{59} \right)^{-0,19793} \rightarrow k_t = 1,91$$

Aplicando o fator de concentração de tensão conforme Anexo A para flexão conforme Equação 1:

$$k_t = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_0} \rightarrow 1,91 = \frac{\sigma_{max}}{27,08} \rightarrow \sigma_{max} = 51,72 \text{ MPa}$$

### Torque no eixo e tensão de von Mises

O eixo sofre carregamento de torque devido ao esforço de tracionar a tira do acumulador. Essa tração é feita por um motor de corrente contínua, que por meio de uma caixa de redução transmite o movimento para os rolos de formação superiores e inferiores através de cardans. A Figura 54 mostra o sistema de transmissão da formadora de tubos.

Figura 54 - Transmissão de torque da formação



Fonte: Adaptado de arquivos da Panatlântica Tubos SA (2019)

Inicialmente calcula-se a potência elétrica do motor de corrente contínua para o caso onde o esforço requerido será maior: o tubo de diâmetro 101,6mm (4") com 4,75mm de espessura. A figura 55 mostra a tensão e a corrente elétrica no motor.

Figura 55 - Tensão, corrente elétrica e rotação do motor da formação



Fonte: O autor (2019)

A tensão foi obtida através de um alicate digital Mimipa ET-3880 no armário elétrico da máquina enquanto corrente elétrica e a rotação do motor foram obtidos no painel de comando.

A potência elétrica é calculada pela Equação 19:

$$P = Vi \quad (19)$$

Onde:  $P$  é a potência elétrica [W];

$V$  é a tensão [V];

$i$  é a corrente elétrica [A].

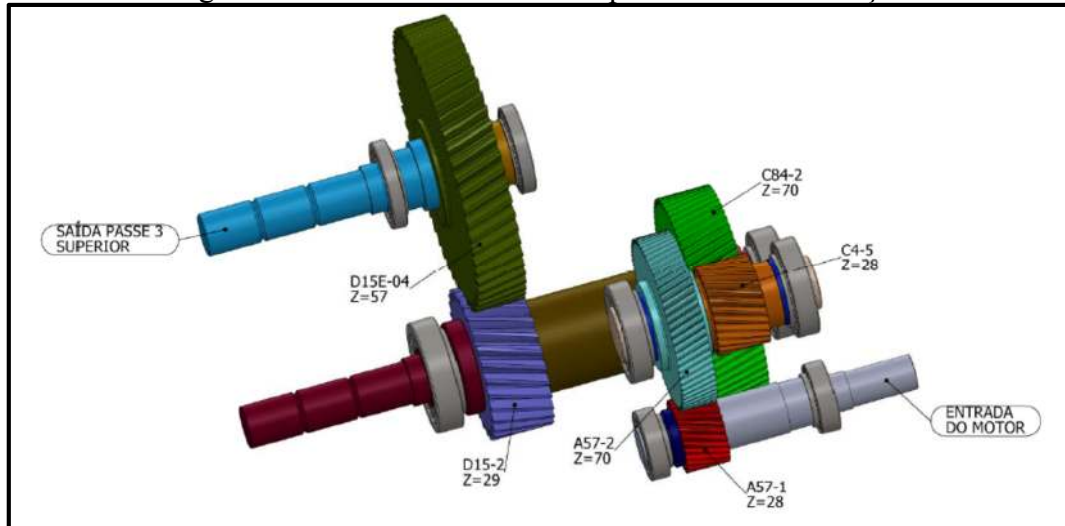
Calculando a potência elétrica pela Equação 19 e o torque no motor pela Equação 3, transformando a rotação do motor de RPM para rad/s:

$$P = Vi \rightarrow P = 413.70 = 28910 \text{ W}$$

$$H = T\omega \rightarrow T = \frac{28910}{403.2 \cdot \frac{\pi}{60}} = 685 \text{ Nm}$$

O motor transmite o movimento para a caixa de redução no eixo conforme mostra a Figura 56. A cada transmissão de engrenagens o torque vai aumentando até a saída para o terceiro passe superior da formação, que é unido a essa saída através de um cardan.

Figura 56- Transmissão do motor para a caixa de redução



Fonte: O autor (2019)

Calculando o ganho de torque para a primeira transmissão entre A57-1 e A57-2 e levando em consideração as perdas de rendimento conforme a Tabela 9 para engrenagens e mancais de rolamento:

Tabela 9 - Rendimentos por tipo de transmissão

| Tipo de Transmissão               | Rendimento ( $\eta$ ) |
|-----------------------------------|-----------------------|
| * Cardãs e transmissão por cadeia | 0,92 – 0,96           |
| Engrenagens usinadas              | 0,96 – 0,98           |
| Mancais de rolamento              | 0,98 – 0,99           |

Fonte: MELCONIAN (2009) e \* GALVÃO (2019)

$$T_{01} = T \cdot \frac{N_{A57-02}}{N_{A57-01}} \cdot \eta_{rolam.} \cdot \eta_{rolam.} \cdot \eta_{engr.} \rightarrow T_{01} = 685 \cdot \frac{70}{28} \cdot 0,99 \cdot 0,99 \cdot 0,98 = 1645 \text{ Nm}$$

Calculando o ganho de torque para a segunda transmissão entre C4-5 e C84-2:

$$T_{02} = T_{01} \cdot \frac{N_{C84-2}}{N_{C4-5}} \cdot \eta_{rolam.} \cdot \eta_{rolam.} \cdot \eta_{engr.} \rightarrow T_{02} = 1645 \cdot \frac{70}{28} \cdot 0,99 \cdot 0,99 \cdot 0,98 = 3950 \text{ Nm}$$

Calculando o ganho de torque para a última transmissão entre D15-2 e D15E-04:

$$T_{03} = T_{02} \cdot \frac{N_{D15E-04}}{N_{D15-2}} \cdot \eta_{rolam} \cdot \eta_{rolam} \cdot \eta_{engr} \cdot \eta_{cardan}$$

$$T_{03} = 3950 \cdot \frac{57}{29} \cdot 0,99 \cdot 0,99 \cdot 0,98 \cdot 0,96 = 7159 \text{ Nm}$$

Calculando a tensão de torção máxima para o diâmetro de 60 mm pela Equação 2:

$$\tau_{m\acute{a}x} = \frac{Tr}{\frac{\pi d^4}{32}} \rightarrow \tau_{m\acute{a}x} = \frac{7159 \cdot 10^3 \cdot 30}{\frac{\pi \cdot 60^4}{32}} = 168,80 \text{ MPa}$$

Aplicando a equação do Anexo A para concentrador de tensão em torção, onde D/d = 1,02 e r = 2:

$$k_{ts} = A \left( \frac{r}{d} \right)^b \rightarrow k_{ts} = 0,96877 \left( \frac{2}{59} \right)^{-0,12605} \rightarrow k_{ts} = 1,48$$

Aplicando o fator de concentração de tensão conforme Anexo A para flexão conforme Equação 1:

$$k_{ts} = \frac{\tau_{max}}{\tau_0} \rightarrow 1,48 = \frac{\tau_{max}}{168,8} \rightarrow \tau_{max} = 249,8 \text{ MPa}$$

Combinando as duas tensões por Von Mises conforme Equação 6:

$$\sigma_e = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2} \rightarrow \sigma_e = \sqrt{51,72^2 + 3 \cdot 249,8^2} = 435,7 \text{ MPa}$$

### Número de ciclos do eixo

Calculando  $S'_e$  conforme Equação 12 e Tabela 10 para o aço 8640 ( $S_{ut} = 848 \text{ MPa}$ ):

Tabela 10 - Critérios de escolha para limite de fadiga

| Efeitos       | Equação                                    | Critério de escolha         |
|---------------|--|-----------------------------|
| $C_{carreg}$  | $C_{carreg} = 1$                           | Carregamento combinado      |
| $C_{tamanho}$ | $C_{tamanho} = 0,6$                        | Eixo maior que 50,8 mm      |
| $C_{superf}$  | $C_{superf} = 1,58 (848)^{-0,085} = 0,891$ | Eixo retificado             |
| $C_{temp}$    | $C_{temp} = 1$                             | Temperatura abaixo de 450°C |
| $C_{conf}$    | $C_{conf} = 0,814$                         | Confiabilidade de 99%       |
| $S'_e$        | $S'_e = 0,5 \cdot 848 = 424 \text{ MPa}$   | $S_{ut} < 1400 \text{ MPa}$ |

Fonte: O autor (2019)

$$S_e = C_{carreg} C_{tamanho} C_{superf} C_{temp} C_{conf} S'_e \rightarrow S_e = 184,5 \text{ MPa}$$

Calculando S(N) a partir do Apêndice B (N = 1,0E6), onde foi levantado o número de ciclos de dois meses de produção da máquina para igualarmos o número de quebras de eixo de 2017 conforme Figura 3, e das Equações 14, 16, 17 e 18:

$$S_m = 0,95 S_{ut} \rightarrow S_m = 0,95 \cdot 848 = 805,6 \text{ MPa}$$

$$b = -\frac{1}{z} \log\left(\frac{S_m}{S_e}\right) \rightarrow b = \frac{1}{-3} \log\left(\frac{805,60}{108,86}\right) = -0,2134$$

$$\log(a) = \log(S_m) - 3b \rightarrow \log(a) = \log(805,6) - 3 \cdot -0,2134 = 3517$$

$$S(N) = aN^b \rightarrow S(N) = 3517 \cdot 1,0E6^{-0,2134} = 184,4 \text{ MPa}$$

Considerando S(N) a tensão de fadiga  $\sigma_f$ , a tensão de flexão  $\sigma$  como tensão alternante  $\sigma_a$  e a tensão de torção como a tensão média  $\sigma_m$  calcula-se o fator de segurança n pelo critério de Goodman pelas Equações 6 e 7:

$$\sigma'_m = \sqrt{3} \cdot \sigma_m \rightarrow \sigma'_m = \sqrt{3} \cdot 249,8 = 432,7 \text{ MPa}$$

$$n = \frac{1}{\frac{\sigma_a}{S_e} + \frac{\sigma'_m}{S_{ut}}} \rightarrow n = \frac{1}{\frac{51,72}{184,5} + \frac{432,7}{848}} = 1,26$$

A Tabela 11 mostra o número de ciclos do eixo conforme tensões pela equação S(N) encontrada para  $10^6$  ciclos.

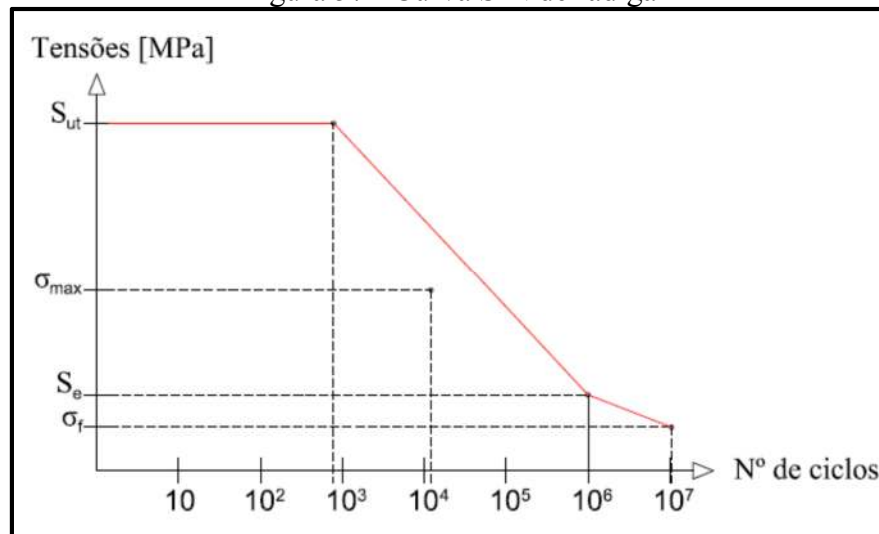
Tabela 11 - Número de ciclos conforme tensões

| Tensão               | Símbolo        | Valor [MPa] | Equação                                       | Nº de ciclos |
|----------------------|----------------|-------------|---|--------------|
| Limite de escoamento | $S_{ut}$       | 848         | $N = \left(\frac{S(N)}{3517}\right)^{-4,686}$ | 785          |
| Tensão máxima        | $\sigma_{max}$ | 435,7       |   | 17.788       |
| Limite de fadiga     | $S_e$          | 184,4       |   | 1.000.019    |
| Tensão de fadiga     | $\sigma_f$     | 104,3       |   | 14.443.866   |

Fonte: O autor (2019)

A Figura 57 mostra a curva S-N do eixo.

Figura 57 - Curva S-N de fadiga



Fonte: O autor (2019)

Calculando a tensão de fadiga equivalente  $\sigma_f$  com base no critério de Goodman (Equação 7) para um fator de segurança  $n = 1$ :

$$n = \frac{1}{\frac{\sigma_a + \sigma'_m}{\sigma_f + S_{ut}}} \rightarrow 1 = \frac{1}{\frac{51,72 + 432,7}{\sigma_f + 848}} = 105,6 \text{ MPa}$$

## APÊNDICE D – PRODUÇÃO DE DOIS MESES DA FORMADORA DE TUBOS

| Material | Tempo em Produção [min] | Velocidade do período [m/min] | Ø primitivo da ferramenta [m] | Nº de ciclos | Rotação motor [RPM] | Espessura [mm] | Limite de escoamento [MPa] | Tensão de flexão [MPa] | Torque do motor [Nm] | Torque no eixo [Nm] | Tensão de torção [MPa] | von Mises [MPa] | % tensão máxima (435,7 MPa) |
|----------|-------------------------|-------------------------------|-------------------------------|--------------|---------------------|----------------|----------------------------|------------------------|----------------------|---------------------|------------------------|-----------------|-----------------------------|
| ZAR 230  | 50,11                   | 51,21                         | 0,28814                       | <b>2835</b>  | 694,95              | 2,70           | 230                        | 18,16                  | 322,58               | 914,22              | 32,12                  | <b>58,52</b>    | 13,43%                      |
| ZAR 230  | 195,21                  | 42,54                         | 0,29117                       | <b>9078</b>  | 571,29              | 2,70           | 230                        | 18,16                  | 392,41               | 1112,12             | 39,07                  | <b>70,07</b>    | 16,08%                      |
| LNE 38   | 82,26                   | 39,90                         | 0,29117                       | <b>3588</b>  | 535,83              | 2,70           | 380                        | 30,01                  | 585,72               | 1659,98             | 58,32                  | <b>105,37</b>   | 24,19%                      |
| LNE 38   | 65,05                   | 45,43                         | 0,28814                       | <b>3264</b>  | 616,51              | 2,70           | 380                        | 30,01                  | 509,07               | 1442,75             | 50,69                  | <b>92,78</b>    | 21,29%                      |
| ZAR 230  | 122,34                  | 34,95                         | 0,29554                       | <b>4605</b>  | 462,42              | 2,30           | 230                        | 13,18                  | 412,97               | 1170,40             | 41,12                  | <b>72,43</b>    | 16,62%                      |
| ZAR 230  | 53,43                   | 47,83                         | 0,28410                       | <b>2863</b>  | 658,31              | 1,95           | 230                        | 9,47                   | 245,94               | 697,02              | 24,49                  | <b>43,46</b>    | 9,97%                       |
| ZAR 230  | 157,65                  | 61,20                         | 0,29117                       | <b>10547</b> | 821,88              | 2,70           | 230                        | 18,16                  | 272,76               | 773,03              | 27,16                  | <b>50,42</b>    | 11,57%                      |
| LNE 38   | 233,51                  | 59,36                         | 0,29117                       | <b>15153</b> | 797,17              | 2,70           | 380                        | 30,01                  | 393,70               | 1115,79             | 39,20                  | <b>74,23</b>    | 17,04%                      |
| ZAR 230  | 50,04                   | 42,12                         | 0,29554                       | <b>2270</b>  | 557,28              | 2,70           | 230                        | 18,16                  | 402,27               | 1140,07             | 40,05                  | <b>71,71</b>    | 16,46%                      |
| LNE 38   | 15,54                   | 34,89                         | 0,29554                       | <b>584</b>   | 461,62              | 2,70           | 380                        | 30,01                  | 679,88               | 1926,84             | 67,69                  | <b>121,03</b>   | 27,78%                      |
| ZAR 230  | 85,66                   | 12,22                         | 0,28410                       | <b>1173</b>  | 168,19              | 4,25           | 230                        | 45,01                  | 2098,04              | 5946,03             | 208,90                 | <b>364,61</b>   | 83,68%                      |
| LNE 38   | 42,26                   | 35,89                         | 0,29554                       | <b>1634</b>  | 474,85              | 1,95           | 380                        | 15,65                  | 477,34               | 1352,83             | 47,53                  | <b>83,80</b>    | 19,23%                      |
| SAE 1010 | 45,86                   | 25,06                         | 0,29117                       | <b>1256</b>  | 336,54              | 4,25           | 180                        | 35,22                  | 733,97               | 2080,13             | 73,08                  | <b>131,39</b>   | 30,16%                      |
| ZAR 230  | 61,85                   | 53,34                         | 0,29554                       | <b>3553</b>  | 705,73              | 1,95           | 230                        | 9,47                   | 229,42               | 650,18              | 22,84                  | <b>40,68</b>    | 9,34%                       |
| ZAR 230  | 44,79                   | 38,22                         | 0,28410                       | <b>1918</b>  | 526,04              | 2,30           | 230                        | 13,18                  | 363,02               | 1028,84             | 36,15                  | <b>63,98</b>    | 14,68%                      |
| ZAR 230  | 29,32                   | 41,14                         | 0,28814                       | <b>1332</b>  | 558,30              | 2,70           | 230                        | 18,16                  | 401,54               | 1138,00             | 39,98                  | <b>71,59</b>    | 16,43%                      |
| SAE 1006 | 20,94                   | 34,86                         | 0,28814                       | <b>806</b>   | 473,07              | 3,75           | 170                        | 25,90                  | 460,71               | 1305,70             | 45,87                  | <b>83,57</b>    | 19,18%                      |
| SAE 1020 | 10,90                   | 15,30                         | 0,28410                       | <b>187</b>   | 210,58              | 4,75           | 210                        | 51,33                  | 1310,98              | 3715,43             | 130,53                 | <b>231,84</b>   | 53,21%                      |
| SAE 1010 | 62,22                   | 22,12                         | 0,28410                       | <b>1542</b>  | 304,45              | 4,75           | 180                        | 44,00                  | 906,78               | 2569,90             | 90,29                  | <b>162,45</b>   | 37,28%                      |
| ZAR 230  | 24,24                   | 54,72                         | 0,28814                       | <b>1465</b>  | 742,58              | 1,95           | 230                        | 9,47                   | 218,03               | 617,92              | 21,71                  | <b>38,78</b>    | 8,90%                       |
| LNE 38   | 34,25                   | 51,17                         | 0,28814                       | <b>1936</b>  | 694,41              | 1,95           | 380                        | 15,65                  | 326,42               | 925,10              | 32,50                  | <b>58,43</b>    | 13,41%                      |
| SAE 1020 | 75,87                   | 51,10                         | 0,29554                       | <b>4176</b>  | 676,10              | 2,00           | 210                        | 9,10                   | 171,93               | 487,26              | 17,12                  | <b>31,02</b>    | 7,12%                       |
| SAE 1010 | 169,92                  | 61,62                         | 0,29554                       | <b>11277</b> | 815,28              | 2,00           | 180                        | 7,80                   | 142,58               | 404,07              | 14,20                  | <b>25,80</b>    | 5,92%                       |

| Material | Tempo em Produção [min] | Velocidade do período [m/min] | Ø primitivo da ferramenta [m] | Nº de ciclos | Rotação motor [RPM] | Espessura [mm] | Limite de escoamento [MPa] | Tensão de flexão [MPa] | Torque do motor [Nm] | Torque no eixo [Nm] | Tensão de torção [MPa] | von Mises [MPa] | % tensão máxima (435,7 MPa) |
|----------|-------------------------|-------------------------------|-------------------------------|--------------|---------------------|----------------|----------------------------|------------------------|----------------------|---------------------|------------------------|-----------------|-----------------------------|
| SAE 1006 | 100,66                  | 57,85                         | 0,29554                       | <b>6272</b>  | 765,40              | 2,25           | 170                        | 9,32                   | 170,85               | 484,21              | 17,01                  | <b>30,90</b>    | 7,09%                       |
| SAE 1015 | 45,97                   | 51,50                         | 0,28410                       | <b>2653</b>  | 708,83              | 2,00           | 190                        | 8,23                   | 163,99               | 464,76              | 16,33                  | <b>29,46</b>    | 6,76%                       |
| SAE 1020 | 14,88                   | 53,14                         | 0,28410                       | <b>886</b>   | 731,40              | 2,25           | 210                        | 11,52                  | 178,79               | 506,72              | 17,80                  | <b>32,91</b>    | 7,55%                       |
| SAE 1020 | 165,91                  | 49,38                         | 0,29554                       | <b>8824</b>  | 653,34              | 3,00           | 210                        | 20,48                  | 266,88               | 756,35              | 26,57                  | <b>50,37</b>    | 11,56%                      |
| SAE 1010 | 23,54                   | 56,31                         | 0,29554                       | <b>1427</b>  | 745,03              | 3,00           | 180                        | 17,55                  | 234,03               | 663,27              | 23,30                  | <b>44,01</b>    | 10,10%                      |
| SAE 1006 | 200,75                  | 51,35                         | 0,29554                       | <b>11103</b> | 679,40              | 3,00           | 170                        | 16,58                  | 256,64               | 727,33              | 25,55                  | <b>47,26</b>    | 10,85%                      |
| SAE 1006 | 47,74                   | 53,15                         | 0,28814                       | <b>2803</b>  | 721,28              | 2,00           | 170                        | 7,37                   | 161,16               | 456,74              | 16,05                  | <b>28,75</b>    | 6,60%                       |
| SAE 1015 | 92,78                   | 39,98                         | 0,28814                       | <b>4098</b>  | 542,55              | 2,00           | 190                        | 8,23                   | 214,25               | 607,19              | 21,33                  | <b>37,85</b>    | 8,69%                       |
| SAE 1020 | 61,37                   | 48,53                         | 0,28814                       | <b>3290</b>  | 658,58              | 2,00           | 210                        | 9,10                   | 176,50               | 500,22              | 17,57                  | <b>31,77</b>    | 7,29%                       |
| ASTM A36 | 37,31                   | 47,02                         | 0,28814                       | <b>1938</b>  | 638,09              | 2,00           | 250                        | 10,83                  | 218,60               | 619,54              | 21,77                  | <b>39,22</b>    | 9,00%                       |
| SAE 1020 | 19,78                   | 43,69                         | 0,28814                       | <b>955</b>   | 592,90              | 2,25           | 210                        | 11,52                  | 220,56               | 625,09              | 21,96                  | <b>39,74</b>    | 9,12%                       |
| SAE 1020 | 26,21                   | 34,60                         | 0,28814                       | <b>1002</b>  | 469,54              | 3,00           | 210                        | 20,48                  | 445,61               | 1262,89             | 44,37                  | <b>79,53</b>    | 18,25%                      |
| SAE 1006 | 67,67                   | 38,29                         | 0,28814                       | <b>2862</b>  | 519,62              | 3,00           | 170                        | 16,58                  | 402,66               | 1141,19             | 40,09                  | <b>71,39</b>    | 16,39%                      |
| SAE 1010 | 47,75                   | 33,95                         | 0,28814                       | <b>1791</b>  | 460,72              | 3,00           | 180                        | 17,55                  | 454,14               | 1287,07             | 45,22                  | <b>80,26</b>    | 18,42%                      |
| SAE 1015 | 82,78                   | 52,06                         | 0,28410                       | <b>4829</b>  | 716,53              | 2,00           | 190                        | 8,23                   | 194,67               | 551,71              | 19,38                  | <b>34,57</b>    | 7,93%                       |
| SAE 1020 | 51,34                   | 45,04                         | 0,28410                       | <b>2591</b>  | 619,91              | 2,00           | 210                        | 9,10                   | 225,01               | 637,71              | 22,40                  | <b>39,86</b>    | 9,15%                       |
| ASTM A36 | 90,68                   | 40,97                         | 0,28410                       | <b>4163</b>  | 563,89              | 2,00           | 250                        | 10,83                  | 247,37               | 701,06              | 24,63                  | <b>44,01</b>    | 10,10%                      |
| SAE 1020 | 89,03                   | 40,79                         | 0,29554                       | <b>3911</b>  | 539,69              | 2,65           | 210                        | 15,98                  | 285,38               | 808,81              | 28,41                  | <b>51,74</b>    | 11,88%                      |
| SAE 1006 | 81,99                   | 50,53                         | 0,28814                       | <b>4577</b>  | 685,72              | 2,00           | 170                        | 7,37                   | 169,51               | 480,42              | 16,88                  | <b>30,15</b>    | 6,92%                       |
| SAE 1010 | 20,39                   | 41,07                         | 0,28814                       | <b>925</b>   | 557,35              | 2,25           | 180                        | 9,87                   | 234,63               | 664,96              | 23,36                  | <b>41,65</b>    | 9,56%                       |
| SAE 1006 | 124,65                  | 41,58                         | 0,28814                       | <b>5726</b>  | 564,27              | 3,00           | 170                        | 16,58                  | 309,00               | 875,74              | 30,77                  | <b>55,81</b>    | 12,81%                      |
| SAE 1020 | 111,37                  | 57,24                         | 0,28814                       | <b>7043</b>  | 776,78              | 3,00           | 210                        | 20,48                  | 224,46               | 636,15              | 22,35                  | <b>43,79</b>    | 10,05%                      |
| SAE 1006 | 159,92                  | 36,67                         | 0,28814                       | <b>6478</b>  | 497,63              | 3,00           | 170                        | 16,58                  | 350,38               | 993,00              | 34,89                  | <b>62,66</b>    | 14,38%                      |
| SAE 1015 | 90,28                   | 45,02                         | 0,28410                       | <b>4554</b>  | 619,64              | 3,00           | 190                        | 18,53                  | 281,39               | 797,49              | 28,02                  | <b>51,94</b>    | 11,92%                      |
| SAE 1010 | 110,23                  | 63,22                         | 0,29554                       | <b>7506</b>  | 836,45              | 2,65           | 180                        | 13,69                  | 184,13               | 521,85              | 18,33                  | <b>34,58</b>    | 7,94%                       |
| SAE 1020 | 104,75                  | 51,02                         | 0,29554                       | <b>5756</b>  | 675,04              | 2,65           | 210                        | 15,98                  | 228,16               | 646,63              | 22,72                  | <b>42,47</b>    | 9,75%                       |

| Material | Tempo em Produção [min] | Velocidade do período [m/min] | Ø primitivo da ferramenta [m] | Nº de ciclos | Rotação motor [RPM] | Espessura [mm] | Limite de escoamento [MPa] | Tensão de flexão [MPa] | Torque do motor [Nm] | Torque no eixo [Nm] | Tensão de torção [MPa] | von Mises [MPa] | % tensão máxima (435,7 MPa) |
|----------|-------------------------|-------------------------------|-------------------------------|--------------|---------------------|----------------|----------------------------|------------------------|----------------------|---------------------|------------------------|-----------------|-----------------------------|
| ASTM A36 | 65,88                   | 28,16                         | 0,29554                       | <b>1998</b>  | 372,58              | 2,00           | 250                        | 10,83                  | 240,68               | 682,10              | 23,96                  | <b>42,90</b>    | 9,85%                       |
| SAE 1020 | 19,26                   | 33,90                         | 0,29554                       | <b>703</b>   | 448,52              | 2,00           | 210                        | 9,10                   | 259,16               | 734,48              | 25,80                  | <b>45,61</b>    | 10,47%                      |
| SAE 1006 | 57,05                   | 31,69                         | 0,28410                       | <b>2026</b>  | 436,17              | 3,00           | 170                        | 16,58                  | 399,75               | 1132,94             | 39,80                  | <b>70,90</b>    | 16,27%                      |
| SAE 1010 | 240,01                  | 52,94                         | 0,29554                       | <b>13685</b> | 700,44              | 3,00           | 180                        | 17,55                  | 248,93               | 705,49              | 24,79                  | <b>46,38</b>    | 10,64%                      |
| SAE 1020 | 217,75                  | 53,89                         | 0,29554                       | <b>12639</b> | 713,01              | 3,00           | 210                        | 20,48                  | 244,54               | 693,05              | 24,35                  | <b>46,88</b>    | 10,76%                      |
| SAE 1010 | 43,46                   | 33,67                         | 0,28814                       | <b>1617</b>  | 456,92              | 2,00           | 180                        | 7,80                   | 254,40               | 720,99              | 25,33                  | <b>44,56</b>    | 10,23%                      |
| SAE 1020 | 27,68                   | 23,27                         | 0,29554                       | <b>694</b>   | 307,88              | 2,00           | 210                        | 9,10                   | 377,55               | 1070,01             | 37,59                  | <b>65,74</b>    | 15,09%                      |
| SAE 1006 | 134,71                  | 51,27                         | 0,28814                       | <b>7630</b>  | 695,77              | 2,65           | 170                        | 12,93                  | 221,36               | 627,37              | 22,04                  | <b>40,31</b>    | 9,25%                       |
| SAE 1006 | 29,32                   | 60,53                         | 0,29954                       | <b>1886</b>  | 790,17              | 2,65           | 170                        | 12,93                  | 194,92               | 552,42              | 19,41                  | <b>36,02</b>    | 8,27%                       |
| SAE 1006 | 40,73                   | 49,59                         | 0,28814                       | <b>2231</b>  | 672,97              | 2,65           | 170                        | 12,93                  | 228,86               | 648,62              | 22,79                  | <b>41,53</b>    | 9,53%                       |
| SAE 1015 | 30,19                   | 37,64                         | 0,28814                       | <b>1255</b>  | 510,80              | 2,65           | 190                        | 14,45                  | 301,52               | 854,55              | 30,02                  | <b>53,97</b>    | 12,39%                      |
| SAE 1020 | 30,37                   | 43,37                         | 0,28814                       | <b>1455</b>  | 588,56              | 2,65           | 210                        | 15,98                  | 261,69               | 741,65              | 26,06                  | <b>47,87</b>    | 10,99%                      |
| SAE 1020 | 136,77                  | 16,82                         | 0,29040                       | <b>2522</b>  | 226,48              | 2,00           | 210                        | 9,10                   | 513,24               | 1454,58             | 51,10                  | <b>88,98</b>    | 20,42%                      |
| SAE 1010 | 64,01                   | 33,87                         | 0,27490                       | <b>2511</b>  | 481,77              | 2,00           | 180                        | 7,80                   | 241,27               | 683,79              | 24,02                  | <b>42,33</b>    | 9,72%                       |
| SAE 1020 | 36,47                   | 49,24                         | 0,29117                       | <b>1963</b>  | 661,26              | 2,00           | 210                        | 9,10                   | 175,78               | 498,19              | 17,50                  | <b>31,65</b>    | 7,26%                       |
| SAE 1020 | 70,07                   | 49,90                         | 0,28814                       | <b>3863</b>  | 677,17              | 2,00           | 210                        | 9,10                   | 171,65               | 486,48              | 17,09                  | <b>30,97</b>    | 7,11%                       |
| SAE 1010 | 188,36                  | 48,05                         | 0,29560                       | <b>9746</b>  | 635,61              | 2,65           | 180                        | 13,69                  | 242,31               | 686,74              | 24,13                  | <b>43,97</b>    | 10,09%                      |
| SAE 1006 | 44,33                   | 32,38                         | 0,28410                       | <b>1608</b>  | 445,67              | 2,65           | 170                        | 12,93                  | 345,59               | 979,44              | 34,41                  | <b>60,99</b>    | 14,00%                      |
| SAE 1010 | 42,07                   | 31,36                         | 0,29117                       | <b>1442</b>  | 421,15              | 2,65           | 180                        | 13,69                  | 365,71               | 1036,46             | 36,41                  | <b>64,54</b>    | 14,81%                      |
| SAE 1020 | 33,59                   | 33,34                         | 0,29192                       | <b>1221</b>  | 446,59              | 2,00           | 210                        | 9,10                   | 260,29               | 737,67              | 25,92                  | <b>45,80</b>    | 10,51%                      |
| ASTM A36 | 103,53                  | 22,53                         | 0,29192                       | <b>2543</b>  | 301,79              | 2,00           | 250                        | 10,83                  | 462,21               | 1309,94             | 46,02                  | <b>80,44</b>    | 18,46%                      |
| SAE 1020 | 65,52                   | 30,27                         | 0,29192                       | <b>2162</b>  | 405,46              | 2,65           | 210                        | 15,98                  | 379,86               | 1076,55             | 37,82                  | <b>67,43</b>    | 15,48%                      |
| SAE 1020 | 142,66                  | 19,62                         | 0,29954                       | <b>2974</b>  | 256,12              | 3,75           | 210                        | 31,99                  | 850,96               | 2411,70             | 84,73                  | <b>150,20</b>   | 34,47%                      |
| SAE 1020 | 48,22                   | 29,53                         | 0,29227                       | <b>1551</b>  | 395,08              | 3,00           | 210                        | 20,48                  | 441,33               | 1250,77             | 43,94                  | <b>78,82</b>    | 18,09%                      |
| SAE 1010 | 30,83                   | 23,95                         | 0,28410                       | <b>827</b>   | 329,64              | 3,00           | 180                        | 17,55                  | 528,94               | 1499,07             | 52,67                  | <b>92,89</b>    | 21,32%                      |
| SAE 1006 | 21,90                   | 32,17                         | 0,29040                       | <b>772</b>   | 433,17              | 3,00           | 170                        | 16,58                  | 402,52               | 1140,78             | 40,08                  | <b>71,37</b>    | 16,38%                      |

| Material | Tempo em Produção [min] | Velocidade do período [m/min] | Ø primitivo da ferramenta [m] | Nº de ciclos | Rotação motor [RPM] | Espessura [mm] | Limite de escoamento [MPa] | Tensão de flexão [MPa] | Torque do motor [Nm] | Torque no eixo [Nm] | Tensão de torção [MPa] | von Mises [MPa] | % tensão máxima (435,7 MPa) |
|----------|-------------------------|-------------------------------|-------------------------------|--------------|---------------------|----------------|----------------------------|------------------------|----------------------|---------------------|------------------------|-----------------|-----------------------------|
| SAE 1020 | 19,70                   | 20,84                         | 0,29040                       | <b>450</b>   | 280,61              | 3,00           | 210                        | 20,48                  | 621,36               | 1760,99             | 61,87                  | <b>109,10</b>   | 25,04%                      |
| SAE 1010 | 27,64                   | 29,91                         | 0,29192                       | <b>901</b>   | 400,64              | 2,65           | 180                        | 13,69                  | 384,43               | 1089,51             | 38,28                  | <b>67,70</b>    | 15,54%                      |
| SAE 1020 | 117,59                  | 21,70                         | 0,29954                       | <b>2712</b>  | 283,27              | 4,75           | 210                        | 51,33                  | 974,57               | 2762,01             | 97,03                  | <b>175,73</b>   | 40,33%                      |
| SAE 1020 | 23,88                   | 19,08                         | 0,29954                       | <b>484</b>   | 249,07              | 4,75           | 210                        | 51,33                  | 1108,39              | 3141,28             | 110,36                 | <b>197,92</b>   | 45,43%                      |
| SAE 1020 | 81,24                   | 33,91                         | 0,28814                       | <b>3043</b>  | 460,18              | 3,75           | 210                        | 31,99                  | 473,62               | 1342,28             | 47,16                  | <b>87,72</b>    | 20,13%                      |
| SAE 1010 | 45,78                   | 35,53                         | 0,28814                       | <b>1797</b>  | 482,16              | 3,75           | 180                        | 27,42                  | 452,02               | 1281,08             | 45,01                  | <b>82,64</b>    | 18,97%                      |
| SAE 1006 | 53,13                   | 20,71                         | 0,28814                       | <b>1215</b>  | 281,05              | 4,25           | 170                        | 33,27                  | 878,89               | 2490,86             | 87,51                  | <b>155,18</b>   | 35,62%                      |
| SAE 1010 | 19,38                   | 29,13                         | 0,28814                       | <b>624</b>   | 395,31              | 4,25           | 180                        | 35,22                  | 624,85               | 1770,88             | 62,21                  | <b>113,37</b>   | 26,02%                      |
| SAE 1020 | 21,28                   | 28,50                         | 0,28814                       | <b>670</b>   | 386,76              | 4,25           | 210                        | 41,09                  | 638,66               | 1810,02             | 63,59                  | <b>117,56</b>   | 26,98%                      |
| SAE 1020 | 120,88                  | 21,64                         | 0,28814                       | <b>2890</b>  | 293,67              | 4,75           | 210                        | 51,33                  | 940,08               | 2664,26             | 93,60                  | <b>170,05</b>   | 39,03%                      |
| SAE 1010 | 15,97                   | 22,07                         | 0,28814                       | <b>389</b>   | 299,50              | 4,75           | 180                        | 44,00                  | 921,76               | 2612,35             | 91,78                  | <b>164,94</b>   | 37,86%                      |
| SAE 1010 | 112,57                  | 26,31                         | 0,28815                       | <b>3272</b>  | 357,03              | 2,00           | 180                        | 7,80                   | 325,57               | 922,71              | 32,42                  | <b>56,69</b>    | 13,01%                      |
| SAE 1010 | 77,69                   | 31,33                         | 0,28815                       | <b>2689</b>  | 425,15              | 2,65           | 180                        | 13,69                  | 362,27               | 1026,69             | 36,07                  | <b>63,96</b>    | 14,68%                      |
| SAE 1020 | 95,19                   | 39,97                         | 0,28815                       | <b>4203</b>  | 542,40              | 3,00           | 210                        | 20,48                  | 321,46               | 911,05              | 32,01                  | <b>59,10</b>    | 13,56%                      |
| SAE 1010 | 69,36                   | 30,59                         | 0,29040                       | <b>2326</b>  | 411,89              | 2,65           | 180                        | 13,69                  | 373,93               | 1059,74             | 37,23                  | <b>65,92</b>    | 15,13%                      |
| SAE 1006 | 85,67                   | 46,42                         | 0,28410                       | <b>4455</b>  | 638,91              | 3,00           | 170                        | 16,58                  | 272,90               | 773,43              | 27,17                  | <b>49,90</b>    | 11,45%                      |
| SAE 1010 | 57,17                   | 40,99                         | 0,28410                       | <b>2626</b>  | 564,17              | 3,00           | 180                        | 17,55                  | 309,06               | 875,89              | 30,77                  | <b>56,11</b>    | 12,88%                      |
| SAE 1015 | 44,82                   | 20,93                         | 0,28410                       | <b>1051</b>  | 288,07              | 4,25           | 190                        | 37,18                  | 857,46               | 2430,12             | 85,37                  | <b>152,48</b>   | 35,00%                      |
| SAE 1020 | 22,47                   | 17,02                         | 0,28410                       | <b>429</b>   | 234,26              | 4,25           | 210                        | 41,09                  | 1054,44              | 2988,39             | 104,99                 | <b>186,43</b>   | 42,79%                      |
| SAE 1010 | 14,13                   | 22,23                         | 0,28410                       | <b>352</b>   | 305,96              | 4,75           | 180                        | 44,00                  | 902,29               | 2557,18             | 89,84                  | <b>161,71</b>   | 37,11%                      |
| SAE 1020 | 20,17                   | 12,39                         | 0,28410                       | <b>280</b>   | 170,53              | 4,75           | 210                        | 51,33                  | 1618,89              | 4588,07             | 161,19                 | <b>283,86</b>   | 65,15%                      |
| SAE 1010 | 35,67                   | 16,96                         | 0,28410                       | <b>678</b>   | 233,43              | 3,75           | 180                        | 27,42                  | 933,68               | 2646,14             | 92,96                  | <b>163,34</b>   | 37,49%                      |
| SAE 1020 | 44,05                   | 37,18                         | 0,28410                       | <b>1835</b>  | 511,73              | 3,75           | 210                        | 31,99                  | 425,91               | 1207,06             | 42,41                  | <b>80,12</b>    | 18,39%                      |
| SAE 1006 | 64,51                   | 30,87                         | 0,28410                       | <b>2231</b>  | 424,88              | 2,00           | 170                        | 7,37                   | 273,58               | 775,36              | 27,24                  | <b>47,75</b>    | 10,96%                      |
| SAE 1015 | 61,04                   | 30,53                         | 0,28410                       | <b>2088</b>  | 420,20              | 3,00           | 190                        | 18,53                  | 414,94               | 1175,99             | 41,31                  | <b>73,92</b>    | 16,97%                      |
| SAE 1020 | 17,65                   | 17,78                         | 0,28814                       | <b>347</b>   | 241,29              | 3,35           | 210                        | 25,53                  | 806,94               | 2286,93             | 80,34                  | <b>141,48</b>   | 32,47%                      |

| Material | Tempo em Produção [min] | Velocidade do período [m/min] | Ø primitivo da ferramenta [m] | Nº de ciclos | Rotação motor [RPM] | Espessura [mm] | Limite de escoamento [MPa] | Tensão de flexão [MPa] | Torque do motor [Nm] | Torque no eixo [Nm] | Tensão de torção [MPa] | von Mises [MPa] | % tensão máxima (435,7 MPa) |
|----------|-------------------------|-------------------------------|-------------------------------|--------------|---------------------|----------------|----------------------------|------------------------|----------------------|---------------------|------------------------|-----------------|-----------------------------|
| SAE 1006 | 221,25                  | 52,88                         | 0,27490                       | <b>13547</b> | 752,18              | 2,00           | 170                        | 7,37                   | 154,54               | 437,98              | 15,39                  | <b>27,65</b>    | 6,35%                       |
| SAE 1006 | 63,63                   | 20,00                         | 0,28410                       | <b>1426</b>  | 275,27              | 4,75           | 170                        | 41,55                  | 1002,90              | 2842,31             | 99,86                  | <b>177,88</b>   | 40,83%                      |
| SAE 1020 | 86,40                   | 24,76                         | 0,28410                       | <b>2397</b>  | 340,79              | 4,75           | 210                        | 51,33                  | 810,10               | 2295,89             | 80,66                  | <b>148,84</b>   | 34,16%                      |
| ASTM A36 | 23,49                   | 22,04                         | 0,29192                       | <b>565</b>   | 295,22              | 2,00           | 250                        | 10,83                  | 472,48               | 1339,06             | 47,04                  | <b>82,20</b>    | 18,87%                      |
| SAE 1010 | 73,06                   | 30,00                         | 0,29040                       | <b>2402</b>  | 403,95              | 3,00           | 180                        | 17,55                  | 431,64               | 1223,30             | 42,98                  | <b>76,48</b>    | 17,55%                      |
| SAE 1010 | 38,43                   | 18,25                         | 0,29192                       | <b>765</b>   | 244,46              | 4,75           | 180                        | 44,00                  | 1129,32              | 3200,60             | 112,44                 | <b>199,67</b>   | 45,83%                      |
| SAE 1020 | 41,49                   | 21,96                         | 0,29954                       | <b>968</b>   | 286,67              | 3,75           | 210                        | 31,99                  | 760,29               | 2154,72             | 75,70                  | <b>134,96</b>   | 30,98%                      |
| SAE 1020 | 15,34                   | 12,30                         | 0,29040                       | <b>207</b>   | 165,62              | 3,75           | 210                        | 31,99                  | 1315,97              | 3729,57             | 131,03                 | <b>229,19</b>   | 52,60%                      |
| SAE 1006 | 13,74                   | 27,83                         | 0,28410                       | <b>429</b>   | 383,04              | 4,25           | 170                        | 33,27                  | 644,87               | 1827,61             | 64,21                  | <b>116,08</b>   | 26,64%                      |
| SAE 1010 | 40,63                   | 29,26                         | 0,28410                       | <b>1332</b>  | 402,72              | 4,25           | 180                        | 35,22                  | 613,35               | 1738,29             | 61,07                  | <b>111,49</b>   | 25,59%                      |
| SAE 1020 | 70,54                   | 24,16                         | 0,28814                       | <b>1883</b>  | 327,87              | 4,75           | 210                        | 51,33                  | 842,02               | 2386,36             | 83,84                  | <b>154,02</b>   | 35,35%                      |
| SAE 1010 | 15,97                   | 12,42                         | 0,28814                       | <b>219</b>   | 168,55              | 4,75           | 180                        | 44,00                  | 1637,94              | 4642,07             | 163,09                 | <b>285,88</b>   | 65,61%                      |
| SAE 1020 | 40,47                   | 18,19                         | 0,28814                       | <b>813</b>   | 246,85              | 4,75           | 210                        | 51,33                  | 1118,37              | 3169,57             | 111,35                 | <b>199,58</b>   | 45,81%                      |
| SAE 1006 | 57,02                   | 27,67                         | 0,28814                       | <b>1743</b>  | 375,50              | 2,00           | 170                        | 7,37                   | 309,56               | 877,33              | 30,82                  | <b>53,89</b>    | 12,37%                      |
| ZAR 230  | 21,27                   | 45,86                         | 0,28410                       | <b>1093</b>  | 631,20              | 2,70           | 230                        | 18,16                  | 355,16               | 1006,56             | 35,36                  | <b>63,89</b>    | 14,66%                      |
| SAE 1020 | 49,88                   | 10,16                         | 0,29040                       | <b>556</b>   | 136,80              | 4,75           | 210                        | 51,33                  | 2017,99              | 5719,17             | 200,93                 | <b>351,78</b>   | 80,74%                      |
| SAE 1020 | 34,10                   | 24,12                         | 0,29954                       | <b>874</b>   | 314,87              | 4,25           | 210                        | 41,09                  | 784,49               | 2223,32             | 78,11                  | <b>141,39</b>   | 32,45%                      |
| SAE 1006 | 21,76                   | 27,57                         | 0,28814                       | <b>663</b>   | 374,14              | 4,25           | 170                        | 33,27                  | 660,20               | 1871,08             | 65,73                  | <b>118,62</b>   | 27,22%                      |
| SAE 1020 | 32,92                   | 22,25                         | 0,29954                       | <b>778</b>   | 290,45              | 4,75           | 210                        | 51,33                  | 950,48               | 2693,73             | 94,64                  | <b>171,76</b>   | 39,42%                      |
| LNE 38   | 43,34                   | 35,09                         | 0,28410                       | <b>1704</b>  | 482,96              | 2,30           | 380                        | 21,78                  | 553,56               | 1568,85             | 55,12                  | <b>97,92</b>    | 22,47%                      |
| SAE 1010 | 24,69                   | 23,22                         | 0,29192                       | <b>625</b>   | 311,03              | 3,00           | 180                        | 17,55                  | 560,59               | 1588,76             | 55,82                  | <b>98,26</b>    | 22,55%                      |
| LNE 38   | 46,33                   | 19,06                         | 0,29192                       | <b>963</b>   | 255,31              | 4,25           | 380                        | 74,36                  | 1935,01              | 5483,98             | 192,66                 | <b>341,89</b>   | 78,47%                      |
| SAE 1020 | 16,33                   | 18,86                         | 0,28410                       | <b>345</b>   | 259,58              | 4,25           | 210                        | 41,09                  | 951,57               | 2696,84             | 94,75                  | <b>169,17</b>   | 38,83%                      |
| SAE 1020 | 53,08                   | 19,43                         | 0,29192                       | <b>1125</b>  | 260,26              | 4,75           | 210                        | 51,33                  | 1060,74              | 3006,22             | 105,61                 | <b>189,99</b>   | 43,61%                      |
| LNE 38   | 54,49                   | 23,00                         | 0,29040                       | <b>1374</b>  | 309,70              | 1,95           | 380                        | 15,65                  | 731,91               | 2074,29             | 72,87                  | <b>127,19</b>   | 29,19%                      |
| LNE 38   | 35,55                   | 28,05                         | 0,29040                       | <b>1093</b>  | 377,69              | 2,70           | 380                        | 30,01                  | 830,96               | 2355,01             | 82,74                  | <b>146,41</b>   | 33,60%                      |

| Material | Tempo em Produção [min] | Velocidade do período [m/min] | Ø primitivo da ferramenta [m] | Nº de ciclos | Rotação motor [RPM] | Espessura [mm] | Limite de escoamento [MPa] | Tensão de flexão [MPa] | Torque do motor [Nm] | Torque no eixo [Nm] | Tensão de torção [MPa] | von Mises [MPa] | % tensão máxima (435,7 MPa) |
|----------|-------------------------|-------------------------------|-------------------------------|--------------|---------------------|----------------|----------------------------|------------------------|----------------------|---------------------|------------------------|-----------------|-----------------------------|
| ZAR 230  | 41,63                   | 45,00                         | 0,29040                       | <b>2053</b>  | 605,93              | 2,70           | 230                        | 18,16                  | 369,98               | 1048,54             | 36,84                  | <b>66,34</b>    | 15,23%                      |
| SAE 1015 | 41,48                   | 50,64                         | 0,28814                       | <b>2320</b>  | 687,22              | 3,00           | 190                        | 18,53                  | 253,72               | 719,06              | 25,26                  | <b>47,52</b>    | 10,91%                      |
| ZAR 230  | 20,75                   | 43,49                         | 0,28814                       | <b>997</b>   | 590,19              | 2,70           | 230                        | 18,16                  | 379,84               | 1076,50             | 37,82                  | <b>67,98</b>    | 15,60%                      |
| LNE 38   | 39,66                   | 54,44                         | 0,28814                       | <b>2385</b>  | 738,78              | 2,70           | 380                        | 30,01                  | 424,82               | 1203,97             | 42,30                  | <b>79,17</b>    | 18,17%                      |
| ZAR 230  | 23,17                   | 50,18                         | 0,28814                       | <b>1284</b>  | 680,97              | 1,95           | 230                        | 9,47                   | 237,76               | 673,82              | 23,67                  | <b>42,08</b>    | 9,66%                       |
| AS 1015  | 23,14                   | 21,97                         | 0,28814                       | <b>562</b>   | 298,15              | 3,00           | 190                        | 18,53                  | 584,81               | 1657,41             | 58,23                  | <b>102,54</b>   | 23,53%                      |
| ZAR 230  | 25,01                   | 41,85                         | 0,28814                       | <b>1156</b>  | 567,93              | 2,70           | 230                        | 18,16                  | 394,73               | 1118,69             | 39,30                  | <b>70,45</b>    | 16,17%                      |
| SAE 1020 | 14,86                   | 14,35                         | 0,29040                       | <b>234</b>   | 193,22              | 4,75           | 210                        | 51,33                  | 1428,77              | 4049,25             | 142,26                 | <b>251,69</b>   | 57,77%                      |
| ZAR 230  | 62,10                   | 25,88                         | 0,28410                       | <b>1801</b>  | 356,20              | 1,95           | 230                        | 9,47                   | 454,53               | 1288,19             | 45,26                  | <b>78,96</b>    | 18,12%                      |
| LNE 38   | 117,71                  | 21,12                         | 0,28410                       | <b>2785</b>  | 290,69              | 1,95           | 380                        | 15,65                  | 779,77               | 2209,93             | 77,64                  | <b>135,38</b>   | 31,07%                      |
| SAE 1020 | 34,51                   | 26,47                         | 0,28814                       | <b>1009</b>  | 359,21              | 4,75           | 210                        | 51,33                  | 768,54               | 2178,11             | 76,52                  | <b>142,13</b>   | 32,62%                      |
| SAE 1020 | 14,18                   | 24,48                         | 0,29954                       | <b>369</b>   | 319,57              | 3,00           | 210                        | 20,48                  | 545,62               | 1546,33             | 54,33                  | <b>96,30</b>    | 22,10%                      |
| ZAR 230  | 24,23                   | 37,63                         | 0,28815                       | <b>1007</b>  | 510,64              | 1,95           | 230                        | 9,47                   | 317,06               | 898,58              | 31,57                  | <b>55,49</b>    | 12,74%                      |
| SAE 1010 | 39,90                   | 33,12                         | 0,28814                       | <b>1460</b>  | 449,46              | 3,75           | 180                        | 27,42                  | 484,92               | 1374,30             | 48,28                  | <b>88,01</b>    | 20,20%                      |
| SAE 1010 | 217,82                  | 49,95                         | 0,29560                       | <b>11716</b> | 660,75              | 2,25           | 180                        | 9,87                   | 197,91               | 560,90              | 19,71                  | <b>35,53</b>    | 8,15%                       |
| LNE 38   | 44,27                   | 38,75                         | 0,28814                       | <b>1895</b>  | 525,86              | 1,95           | 380                        | 15,65                  | 431,04               | 1221,61             | 42,92                  | <b>75,97</b>    | 17,44%                      |
| ZAR 230  | 64,36                   | 49,39                         | 0,29954                       | <b>3378</b>  | 644,74              | 1,95           | 230                        | 9,47                   | 251,12               | 711,69              | 25,00                  | <b>44,33</b>    | 10,17%                      |
| SAE 1006 | 198,52                  | 35,65                         | 0,29586                       | <b>7614</b>  | 471,17              | 3,00           | 170                        | 16,58                  | 370,06               | 1048,78             | 36,85                  | <b>65,94</b>    | 15,13%                      |
| SAE 1020 | 56,16                   | 15,38                         | 0,29586                       | <b>929</b>   | 203,27              | 3,00           | 210                        | 20,48                  | 857,78               | 2431,01             | 85,41                  | <b>149,34</b>   | 34,28%                      |
| SAE 1010 | 23,86                   | 33,63                         | 0,28410                       | <b>899</b>   | 462,87              | 3,75           | 180                        | 27,42                  | 470,87               | 1334,48             | 46,88                  | <b>85,71</b>    | 19,67%                      |
| SAE 1020 | 15,11                   | 21,74                         | 0,28410                       | <b>368</b>   | 299,22              | 3,75           | 210                        | 31,99                  | 728,39               | 2064,33             | 72,52                  | <b>129,63</b>   | 29,75%                      |
| SAE 1020 | 13,16                   | 15,74                         | 0,29040                       | <b>227</b>   | 211,94              | 4,75           | 210                        | 51,33                  | 1302,59              | 3691,66             | 129,70                 | <b>230,43</b>   | 52,89%                      |
| SAE 1020 | 50,43                   | 29,18                         | 0,29040                       | <b>1613</b>  | 392,91              | 3,75           | 210                        | 31,99                  | 554,71               | 1572,09             | 55,23                  | <b>100,87</b>   | 23,15%                      |
| SAE 1020 | 47,72                   | 19,46                         | 0,29192                       | <b>1013</b>  | 260,66              | 4,25           | 210                        | 41,09                  | 947,62               | 2685,63             | 94,35                  | <b>168,51</b>   | 38,68%                      |
| SAE 1010 | 45,28                   | 31,26                         | 0,28410                       | <b>1586</b>  | 430,25              | 3,75           | 180                        | 27,42                  | 506,57               | 1435,65             | 50,44                  | <b>91,56</b>    | 21,02%                      |
| SAE 1020 | 18,70                   | 29,00                         | 0,28410                       | <b>607</b>   | 399,14              | 3,75           | 210                        | 31,99                  | 546,04               | 1547,54             | 54,37                  | <b>99,45</b>    | 22,83%                      |

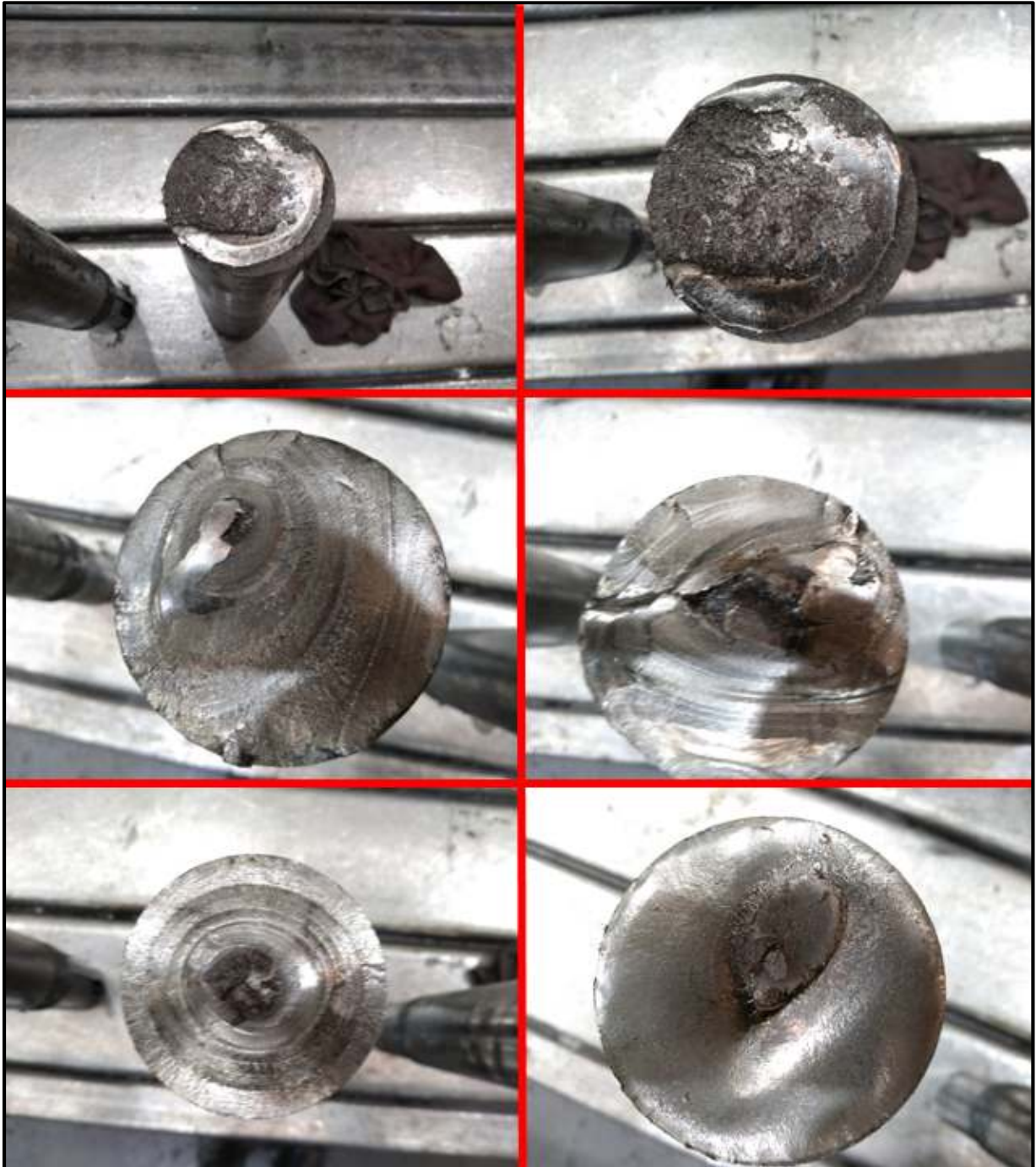
| Material | Tempo em Produção [min] | Velocidade do período [m/min] | Ø primitivo da ferramenta [m] | Nº de ciclos | Rotação motor [RPM] | Espessura [mm] | Limite de escoamento [MPa] | Tensão de flexão [MPa] | Torque do motor [Nm] | Torque no eixo [Nm] | Tensão de torção [MPa] | von Mises [MPa] | % tensão máxima (435,7 MPa) |
|----------|-------------------------|-------------------------------|-------------------------------|--------------|---------------------|----------------|----------------------------|------------------------|----------------------|---------------------|------------------------|-----------------|-----------------------------|
| ZAR 230  | 52,70                   | 23,53                         | 0,29040                       | <b>1359</b>  | 316,83              | 1,95           | 230                        | 9,47                   | 511,02               | 1448,26             | 50,88                  | <b>88,64</b>    | 20,34%                      |
| SAE 1020 | 20,50                   | 37,72                         | 0,28410                       | <b>866</b>   | 519,16              | 2,65           | 210                        | 15,98                  | 296,67               | 840,78              | 29,54                  | <b>53,60</b>    | 12,30%                      |
| SAE 1020 | 33,69                   | 23,77                         | 0,29117                       | <b>875</b>   | 319,22              | 2,25           | 210                        | 11,52                  | 409,66               | 1161,01             | 40,79                  | <b>71,58</b>    | 16,43%                      |
| ZAR 230  | 29,13                   | 47,91                         | 0,28814                       | <b>1542</b>  | 650,17              | 2,70           | 230                        | 18,16                  | 344,80               | 977,19              | 34,33                  | <b>62,17</b>    | 14,27%                      |
| LNE 38   | 19,21                   | 20,63                         | 0,28410                       | <b>444</b>   | 283,94              | 2,70           | 380                        | 30,01                  | 1105,32              | 3132,58             | 110,05                 | <b>192,97</b>   | 44,29%                      |
| ZAR 230  | 13,51                   | 46,52                         | 0,28814                       | <b>694</b>   | 631,31              | 1,95           | 230                        | 9,47                   | 256,46               | 726,84              | 25,54                  | <b>45,23</b>    | 10,38%                      |
| SAE 1020 | 39,16                   | 25,16                         | 0,28410                       | <b>1104</b>  | 346,29              | 3,00           | 210                        | 20,48                  | 503,51               | 1426,98             | 50,13                  | <b>89,21</b>    | 20,48%                      |
| SAE 1020 | 59,08                   | 30,48                         | 0,29117                       | <b>1969</b>  | 409,33              | 3,00           | 210                        | 20,48                  | 425,97               | 1207,23             | 42,41                  | <b>76,26</b>    | 17,50%                      |
| SAE 1020 | 46,87                   | 42,12                         | 0,28814                       | <b>2181</b>  | 571,59              | 3,00           | 210                        | 20,48                  | 305,04               | 864,52              | 30,37                  | <b>56,45</b>    | 12,96%                      |
| ZAR 230  | 116,25                  | 11,27                         | 0,29192                       | <b>1429</b>  | 150,96              | 1,95           | 230                        | 9,47                   | 1072,50              | 3039,57             | 106,79                 | <b>185,20</b>   | 42,51%                      |
| SAE 1010 | 90,89                   | 35,29                         | 0,29530                       | <b>3457</b>  | 467,30              | 3,00           | 180                        | 17,55                  | 373,13               | 1057,47             | 37,15                  | <b>66,70</b>    | 15,31%                      |
| SAE 1010 | 15,14                   | 17,28                         | 0,29040                       | <b>287</b>   | 232,68              | 3,00           | 180                        | 17,55                  | 749,37               | 2123,78             | 74,61                  | <b>130,42</b>   | 29,93%                      |
| SAE 1020 | 16,80                   | 13,60                         | 0,28814                       | <b>252</b>   | 184,56              | 4,75           | 210                        | 51,33                  | 1495,83              | 4239,30             | 148,94                 | <b>263,02</b>   | 60,37%                      |
| SAE 1020 | 18,37                   | 17,91                         | 0,28410                       | <b>369</b>   | 246,51              | 4,75           | 210                        | 51,33                  | 1119,93              | 3173,99             | 111,51                 | <b>199,84</b>   | 45,87%                      |
| SAE 1020 | 70,73                   | 23,07                         | 0,29040                       | <b>1789</b>  | 310,64              | 4,25           | 210                        | 41,09                  | 795,17               | 2253,59             | 79,17                  | <b>143,16</b>   | 32,86%                      |
| SAE 1006 | 17,65                   | 49,77                         | 0,29954                       | <b>933</b>   | 649,70              | 2,00           | 170                        | 7,37                   | 178,91               | 507,05              | 17,81                  | <b>31,72</b>    | 7,28%                       |
| SAE 1020 | 49,10                   | 25,90                         | 0,29117                       | <b>1390</b>  | 347,82              | 4,25           | 210                        | 41,09                  | 710,16               | 2012,67             | 70,71                  | <b>129,18</b>   | 29,65%                      |
| ZAR 230  | 39,36                   | 37,07                         | 0,28815                       | <b>1612</b>  | 503,05              | 2,70           | 230                        | 18,16                  | 445,64               | 1262,98             | 44,37                  | <b>78,97</b>    | 18,12%                      |
| ZAR 230  | 111,52                  | 51,40                         | 0,29040                       | <b>6283</b>  | 692,10              | 2,70           | 230                        | 18,16                  | 323,91               | 917,98              | 32,25                  | <b>58,74</b>    | 13,48%                      |
| ZAR 230  | 16,69                   | 46,45                         | 0,28410                       | <b>869</b>   | 639,32              | 2,30           | 230                        | 13,18                  | 298,70               | 846,55              | 29,74                  | <b>53,17</b>    | 12,20%                      |
| LNE 38   | 10,76                   | 31,05                         | 0,29117                       | <b>365</b>   | 416,98              | 2,70           | 380                        | 30,01                  | 752,66               | 2133,12             | 74,94                  | <b>133,23</b>   | 30,58%                      |
| ZAR 230  | 32,95                   | 52,59                         | 0,29954                       | <b>1841</b>  | 686,52              | 1,95           | 230                        | 9,47                   | 235,84               | 668,38              | 23,48                  | <b>41,76</b>    | 9,58%                       |
| LNE 38   | 65,12                   | 50,30                         | 0,29954                       | <b>3481</b>  | 656,62              | 1,95           | 380                        | 15,65                  | 345,20               | 978,34              | 34,37                  | <b>61,56</b>    | 14,13%                      |
| ZAR 230  | 52,25                   | 40,50                         | 0,29954                       | <b>2249</b>  | 528,69              | 2,70           | 230                        | 18,16                  | 424,02               | 1201,72             | 42,22                  | <b>75,35</b>    | 17,29%                      |
| ZAR 230  | 47,82                   | 54,65                         | 0,29040                       | <b>2865</b>  | 735,86              | 1,95           | 230                        | 9,47                   | 220,02               | 623,56              | 21,91                  | <b>39,11</b>    | 8,98%                       |
| LNE 38   | 62,77                   | 52,76                         | 0,29954                       | <b>3519</b>  | 688,74              | 2,70           | 380                        | 30,01                  | 455,69               | 1291,46             | 45,37                  | <b>84,12</b>    | 19,31%                      |

| Material | Tempo em Produção [min] | Velocidade do período [m/min] | Ø primitivo da ferramenta [m] | Nº de ciclos | Rotação motor [RPM] | Espessura [mm] | Limite de escoamento [MPa] | Tensão de flexão [MPa] | Torque do motor [Nm] | Torque no eixo [Nm] | Tensão de torção [MPa] | von Mises [MPa] | % tensão máxima (435,7 MPa) |
|----------|-------------------------|-------------------------------|-------------------------------|--------------|---------------------|----------------|----------------------------|------------------------|----------------------|---------------------|------------------------|-----------------|-----------------------------|
| ZAR 230  | 92,12                   | 43,19                         | 0,28410                       | <b>4458</b>  | 594,45              | 1,95           | 230                        | 9,47                   | 272,36               | 771,90              | 27,12                  | <b>47,92</b>    | 11,00%                      |
| ZAR 230  | 36,57                   | 49,22                         | 0,29040                       | <b>1973</b>  | 662,75              | 2,30           | 230                        | 13,18                  | 288,14               | 816,62              | 28,69                  | <b>51,41</b>    | 11,80%                      |
| ZAR 230  | 71,67                   | 37,94                         | 0,29954                       | <b>2889</b>  | 495,27              | 1,95           | 230                        | 9,47                   | 326,90               | 926,47              | 32,55                  | <b>57,17</b>    | 13,12%                      |
| ZAR 230  | 71,02                   | 58,56                         | 0,29954                       | <b>4420</b>  | 764,45              | 1,95           | 230                        | 9,47                   | 211,79               | 600,24              | 21,09                  | <b>37,73</b>    | 8,66%                       |
| LNE 38   | 268,46                  | 49,33                         | 0,29954                       | <b>14073</b> | 643,96              | 1,95           | 380                        | 15,65                  | 351,99               | 997,57              | 35,05                  | <b>62,69</b>    | 14,39%                      |
| ZAR 230  | 78,07                   | 53,89                         | 0,29117                       | <b>4599</b>  | 723,71              | 1,95           | 230                        | 9,47                   | 223,72               | 634,03              | 22,27                  | <b>39,73</b>    | 9,12%                       |
| LNE 38   | 31,93                   | 25,03                         | 0,29040                       | <b>876</b>   | 337,03              | 1,95           | 380                        | 15,65                  | 672,55               | 1906,06             | 66,96                  | <b>117,04</b>   | 26,86%                      |
| ZAR 230  | 34,84                   | 54,91                         | 0,29040                       | <b>2097</b>  | 739,36              | 1,95           | 230                        | 9,47                   | 218,98               | 620,61              | 21,80                  | <b>38,93</b>    | 8,94%                       |
| ZAR 230  | 55,27                   | 40,91                         | 0,29954                       | <b>2403</b>  | 534,04              | 1,95           | 230                        | 9,47                   | 303,17               | 859,21              | 30,19                  | <b>53,13</b>    | 12,20%                      |
| ZAR 230  | 66,93                   | 44,15                         | 0,29117                       | <b>3230</b>  | 592,91              | 1,95           | 230                        | 9,47                   | 273,07               | 773,91              | 27,19                  | <b>48,04</b>    | 11,03%                      |
| ZAR 230  | 85,96                   | 50,46                         | 0,29954                       | <b>4609</b>  | 658,71              | 1,95           | 230                        | 9,47                   | 245,79               | 696,59              | 24,47                  | <b>43,43</b>    | 9,97%                       |
| LNE 38   | 135,17                  | 47,59                         | 0,29954                       | <b>6836</b>  | 621,25              | 1,95           | 380                        | 15,65                  | 364,86               | 1034,05             | 36,33                  | <b>64,84</b>    | 14,88%                      |
| ZAR 230  | 98,34                   | 57,40                         | 0,29117                       | <b>6171</b>  | 770,85              | 1,95           | 230                        | 9,47                   | 210,04               | 595,26              | 20,91                  | <b>37,44</b>    | 8,59%                       |
| LNE 38   | 309,13                  | 43,79                         | 0,29040                       | <b>14838</b> | 589,63              | 1,95           | 380                        | 15,65                  | 384,42               | 1089,49             | 38,28                  | <b>68,12</b>    | 15,63%                      |
| ZAR 230  | 17,63                   | 55,50                         | 0,29040                       | <b>1072</b>  | 747,31              | 2,70           | 230                        | 18,16                  | 299,98               | 850,17              | 29,87                  | <b>54,83</b>    | 12,58%                      |
| ZAR 230  | 63,50                   | 53,90                         | 0,29040                       | <b>3751</b>  | 725,76              | 2,70           | 230                        | 18,16                  | 308,88               | 875,41              | 30,75                  | <b>56,28</b>    | 12,92%                      |
| LNE 38   | 32,77                   | 49,26                         | 0,29040                       | <b>1769</b>  | 663,29              | 2,70           | 380                        | 30,01                  | 473,17               | 1341,01             | 47,11                  | <b>86,94</b>    | 19,96%                      |
| LNE 38   | 54,09                   | 43,71                         | 0,28410                       | <b>2649</b>  | 601,61              | 2,70           | 380                        | 30,01                  | 521,68               | 1478,50             | 51,94                  | <b>94,84</b>    | 21,77%                      |
| ZAR 230  | 22,88                   | 53,13                         | 0,29117                       | <b>1329</b>  | 713,50              | 2,30           | 230                        | 13,18                  | 267,65               | 758,53              | 26,65                  | <b>48,00</b>    | 11,02%                      |
| LNE 38   | 73,56                   | 52,92                         | 0,29040                       | <b>4267</b>  | 712,57              | 2,70           | 380                        | 30,01                  | 440,45               | 1248,26             | 43,85                  | <b>81,67</b>    | 18,74%                      |
| ZAR 230  | 107,03                  | 53,49                         | 0,29040                       | <b>6275</b>  | 720,24              | 2,70           | 230                        | 18,16                  | 311,25               | 882,12              | 30,99                  | <b>56,67</b>    | 13,01%                      |
| LNE 38   | 28,04                   | 31,40                         | 0,29040                       | <b>965</b>   | 422,80              | 2,70           | 380                        | 30,01                  | 742,31               | 2103,76             | 73,91                  | <b>131,49</b>   | 30,18%                      |
| ZAR 230  | 296,20                  | 52,05                         | 0,29040                       | <b>16899</b> | 700,85              | 2,70           | 230                        | 18,16                  | 319,86               | 906,52              | 31,85                  | <b>58,08</b>    | 13,33%                      |
| ZAR 230  | 39,45                   | 48,44                         | 0,28410                       | <b>2141</b>  | 666,71              | 2,70           | 230                        | 18,16                  | 336,24               | 952,95              | 33,48                  | <b>60,77</b>    | 13,95%                      |
| LNE 38   | 159,04                  | 43,78                         | 0,28410                       | <b>7801</b>  | 602,57              | 2,70           | 380                        | 30,01                  | 520,85               | 1476,13             | 51,86                  | <b>94,70</b>    | 21,74%                      |
| ZAR 230  | 79,28                   | 44,67                         | 0,29954                       | <b>3763</b>  | 583,13              | 2,30           | 230                        | 13,18                  | 327,48               | 928,12              | 32,61                  | <b>57,99</b>    | 13,31%                      |

| Material | Tempo em Produção [min] | Velocidade do período [m/min] | Ø primitivo da ferramenta [m] | Nº de ciclos  | Rotação motor [RPM] | Espessura [mm] | Limite de escoamento [MPa] | Tensão de flexão [MPa] | Torque do motor [Nm] | Torque no eixo [Nm] | Tensão de torção [MPa] | von Mises [MPa] | % tensão máxima (435,7 MPa) |
|----------|-------------------------|-------------------------------|-------------------------------|---------------|---------------------|----------------|----------------------------|------------------------|----------------------|---------------------|------------------------|-----------------|-----------------------------|
| ZAR 230  | 40,82                   | 42,05                         | 0,29954                       | <b>1824</b>   | 548,93              | 1,95           | 230                        | 9,47                   | 294,95               | 835,91              | 29,37                  | <b>51,74</b>    | 11,88%                      |
| ZAR 230  | 72,22                   | 42,67                         | 0,29040                       | <b>3378</b>   | 574,55              | 2,30           | 230                        | 13,18                  | 332,37               | 941,98              | 33,09                  | <b>58,82</b>    | 13,50%                      |
|          |                         |                               |                               | <b>589099</b> |                     |                |                            |                        |                      |                     |                        |                 |                             |

| Tensão de fadiga: 105,57 MPA |        |        |
|------------------------------|--------|--------|
| abaixo da tensão de fadiga   | 532287 | 90,36% |
| acima da tensão de fadiga    | 56813  | 9,64%  |

| Nº de ciclos | % total | % de tensão máxima (435,7 MPa) |
|--------------|---------|--------------------------------|
| 148576       | 25,22%  | Abaixo de 10%                  |
| 352615       | 59,86%  | Entre 10% e 20%                |
| 83242        | 14,13%  | Entre 20% e 50%                |
| 4666         | 0,79%   | Acima de 50%                   |

**APÊNDICE E – FOTOS DAS REGIÕES DE QUEBRA DOS EIXOS**

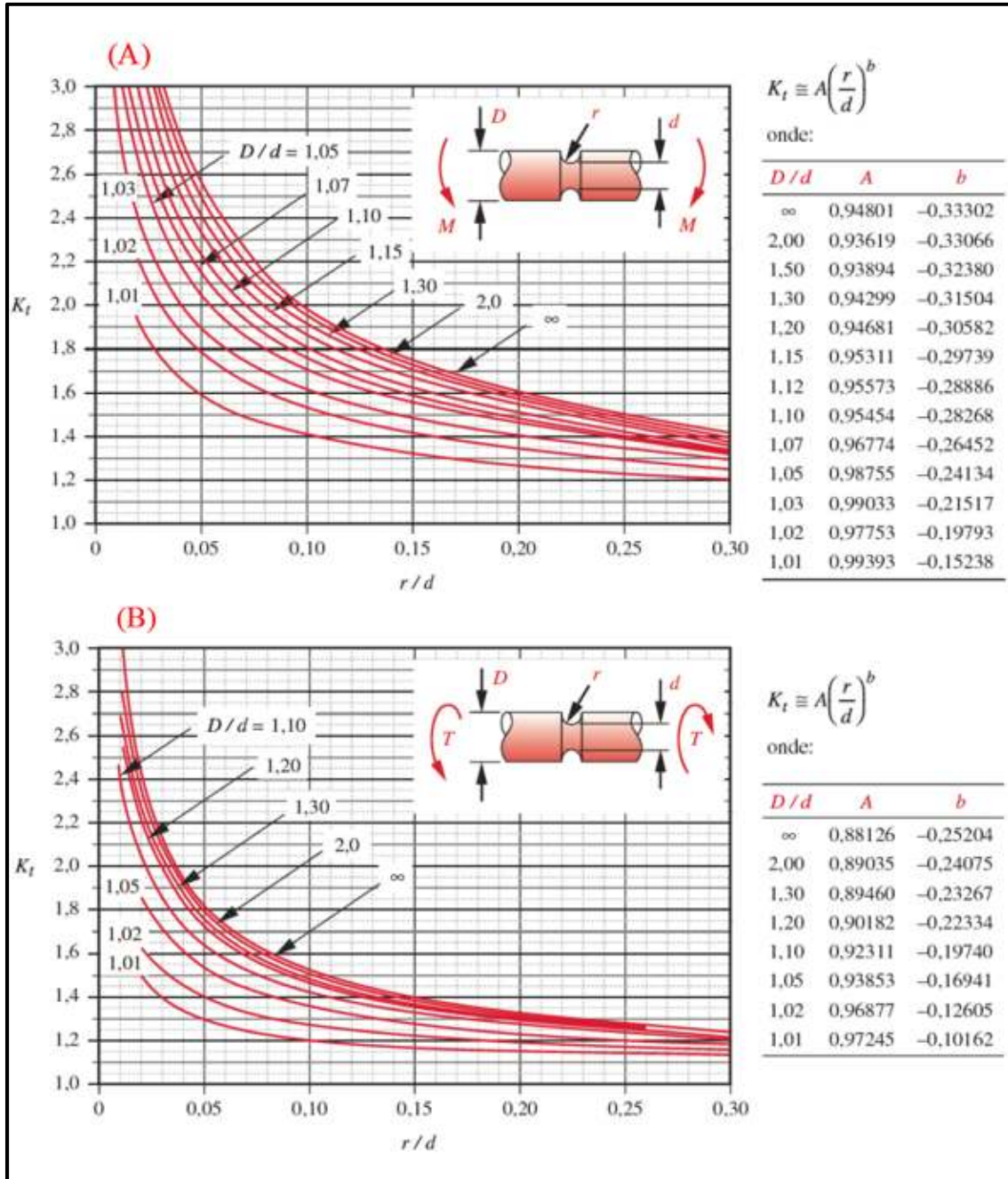
Fonte: O autor (2019)

## APÊNDICE F – CARACTERÍSTICAS E PROPRIEDADES DOS AÇOS PARA EIXOS

| <b>Aço</b> | <b>Descrição</b>   | <b>Características</b>   | <b>Limite de escoamento [MPa]</b> | <b>Resistência à tração [MPa]</b> |
|------------|--|--|-----------------------------------|-----------------------------------|
| 4320       | Aço para beneficiamento ligado ao cromo, níquel e molibdênio e com baixo teor de carbono.  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Temperabilidade média.</li> <li>• Resistência mecânica média.</li> <li>• Boa resistência à fratura.</li> </ul>  | 515                               | 827                               |
| 4340       | Aço para beneficiamento com elevada temperabilidade, ligado ao cromo-níquel-molibdênio, utilizado quando se deseja uma combinação de resistência mecânica média e resistência à fratura. | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Elevada resistência à fadiga.</li> <li>• Alta temperabilidade, tenacidade e resistência mecânica.</li> <li>• Baixa usinabilidade.</li> </ul>                    | 786                               | 924                               |
| 8620       | Aço para beneficiamento de elevada temperabilidade, ligado ao cromo-níquel-molibdênio, utilizado quando se deseja uma combinação de resistência mecânica média e resistência à fratura.  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Temperabilidade boa.</li> <li>• Boa usinagem.</li> <li>• Boa forjabilidade.</li> <li>• Excelente tenacidade de núcleo.</li> <li>• Boa soldabilidade.</li> </ul> | 400                               | 675                               |
| 8640       | Aço utilizado na fabricação de diferentes componentes mecânicos combinando elevada resistência mecânica.   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Pode ser nitretado para elevar a resistência ao desgaste.</li> <li>• Boa resistência à fratura.</li> </ul>  | 717                               | 848                               |

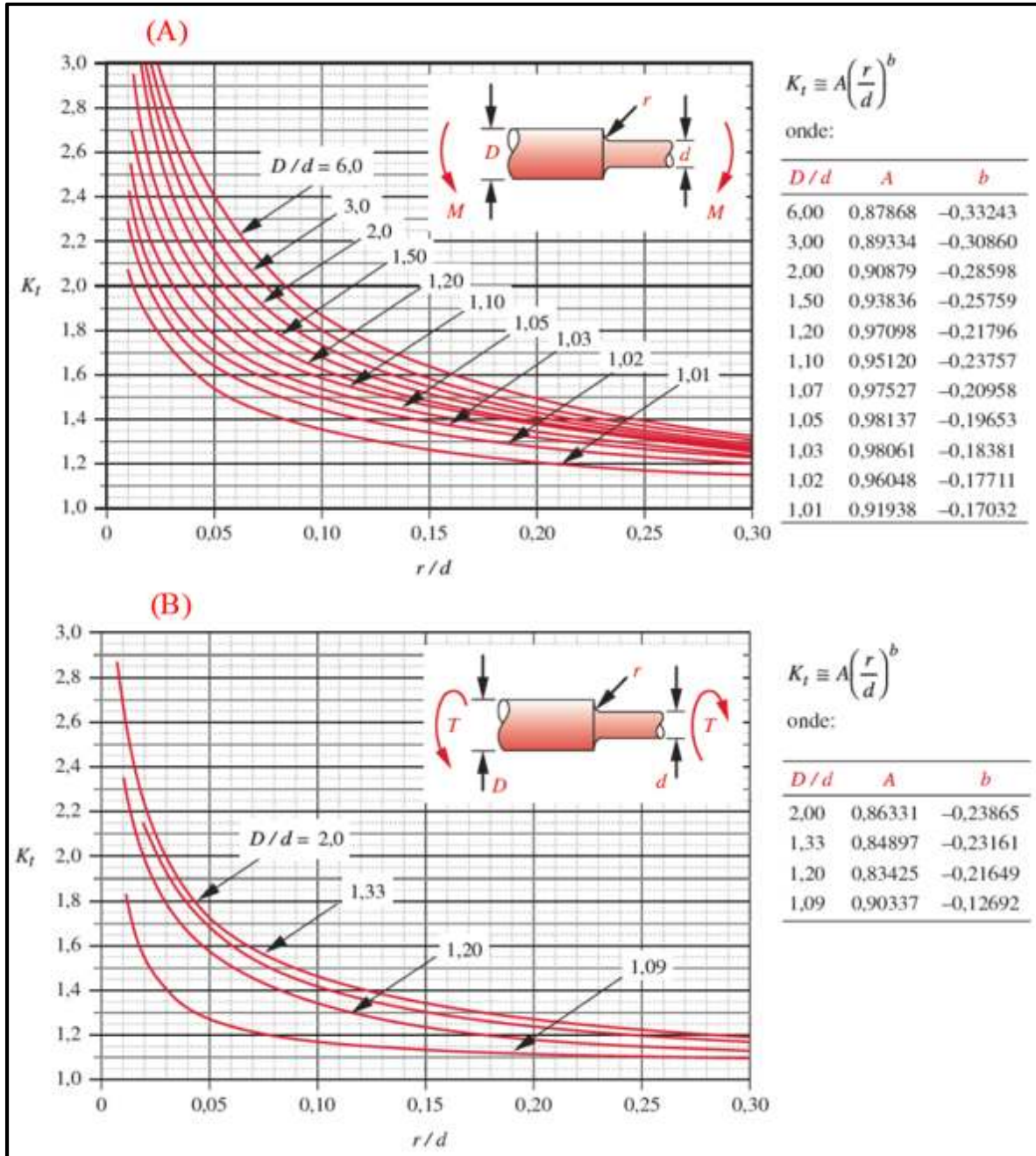
Fonte: DIFERRO (2016), FAVORIT (2015), GDD (2016) e MATWEB (2019)

**ANEXO A – FATOR DE CONCENTRAÇÃO DE TENSÃO DE FLEXÃO (A) E TORÇÃO (B) PARA UM EIXO COM SULCO**



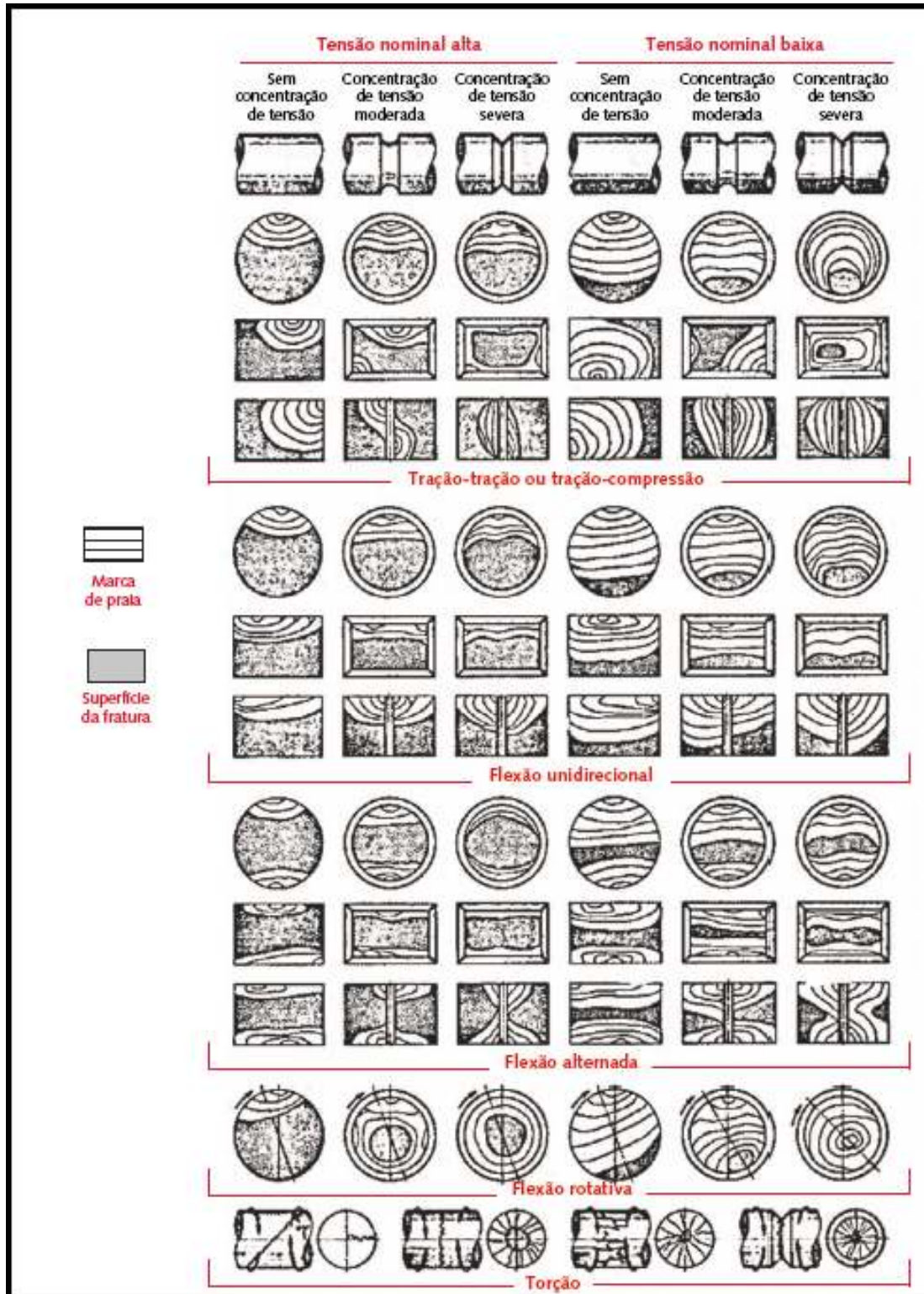
Fonte: NORTON (2013)

**ANEXO B - CARTAS DE CONCENTRAÇÃO DE TENSÃO DE FLEXÃO (A) E TORÇÃO (B) PARA UM EIXO COM RAIO DE CANTO**



Fonte: NORTON (2013)

## ANEXO C – SUPERFÍCIES DE FRATURA COM DIVERSAS CONDIÇÕES DE CARREGAMENTOS E NÍVEIS DE TENSÕES



Fonte: NORTON (2013)

**ANEXO D – COEFICIENTES DE ATRITO PARA AÇO SOBRE DIVERSOS MATERIAIS**

| Material              | Coeficiente de atrito $\mu$ |             |
|-----------------------|-----------------------------|-------------|
|                       | Limpo                       | Lubrificado |
| Aço                   | 0,8                         | 0,16        |
| Liga cobre-chumbo     | 0,22                        | -           |
| Fósforo-bronze        | 0,35                        | -           |
| Alumínio-bronze       | 0,45                        | -           |
| Latão                 | 0,35                        | 0,19        |
| Ferro fundido         | 0,4                         | 0,21        |
| Bronze                | -                           | 0,16        |
| Bronze sinterizado    | -                           | 0,13        |
| Carbono duro          | 0,14                        | 0,11-0,14   |
| Grafite               | 0,1                         | 0,1         |
| Carbeto de tungstênio | 0,4-0,6                     | 0,1-0,2     |
| Plexiglas             | 0,4-0,5                     | 0,4-0,5     |
| Poliestireno          | 0,3-0,35                    | 0,3-0,35    |
| Poliestileno          | 0,2                         | 0,2         |
| Teflon                | 0,04                        | 0,04        |

Fonte: OBERG (1979)

## ANEXO E – RESISTÊNCIA AO ESCOAMENTO E À TRAÇÃO DO AÇO CARBONO

| 1         | 2                   | 3             | 4                                     | 5  | 6                            | 7                        | 8                 |
|-----------|---------------------|---------------|---------------------------------------|--|------------------------------|--------------------------|-------------------|
| UNS<br>nº | Nº SAE<br>e/ou AISI | Processamento | Resistência<br>à tração<br>MPa (Kpsi) | Resistência ao<br>escoamento<br>MPa (Kpsi) | Alongamento<br>em<br>2 in, % | Redução<br>em área,<br>% | Dureza<br>Brinell |
| G10060    | 1006                | HR            | 300 (43)                              | 170 (24)                                   | 30                           | 55                       | 86                |
|           |                     | CD            | 330 (48)                              | 280 (41)                                   | 20                           | 45                       | 95                |
| G10100    | 1010                | HR            | 320 (47)                              | 180 (26)                                   | 28                           | 50                       | 95                |
|           |                     | CD            | 370 (53)                              | 300 (44)                                   | 20                           | 40                       | 105               |
| G10150    | 1015                | HR            | 340 (50)                              | 190 (27,5)                                 | 28                           | 50                       | 101               |
|           |                     | CD            | 390 (56)                              | 320 (47)                                   | 18                           | 40                       | 111               |
| G10180    | 1018                | HR            | 400 (58)                              | 220 (32)                                   | 25                           | 50                       | 116               |
|           |                     | CD            | 440 (64)                              | 370 (54)                                   | 15                           | 40                       | 126               |
| G10200    | 1020                | HR            | 380 (55)                              | 210 (30)                                   | 25                           | 50                       | 111               |
|           |                     | CD            | 470 (68)                              | 390 (57)                                   | 15                           | 40                       | 131               |
| G10300    | 1030                | HR            | 470 (68)                              | 260 (37,5)                                 | 20                           | 42                       | 137               |
|           |                     | CD            | 520 (76)                              | 440 (64)                                   | 12                           | 35                       | 149               |
| G10350    | 1035                | HR            | 500 (72)                              | 270 (39,5)                                 | 18                           | 40                       | 143               |
|           |                     | CD            | 550 (80)                              | 460 (67)                                   | 12                           | 35                       | 163               |
| G10400    | 1040                | HR            | 520 (76)                              | 290 (42)                                   | 18                           | 40                       | 149               |
|           |                     | CD            | 590 (85)                              | 490 (71)                                   | 12                           | 35                       | 170               |
| G10450    | 1045                | HR            | 570 (82)                              | 310 (45)                                   | 16                           | 40                       | 163               |
|           |                     | CD            | 630 (91)                              | 530 (77)                                   | 12                           | 35                       | 179               |
| G10500    | 1050                | HR            | 620 (90)                              | 340 (49,5)                                 | 15                           | 35                       | 179               |
|           |                     | CD            | 690 (100)                             | 580 (84)                                   | 10                           | 30                       | 197               |
| G10600    | 1060                | HR            | 680 (98)                              | 370 (54)                                   | 12                           | 30                       | 201               |
| G10800    | 1080                | HR            | 770 (112)                             | 420 (61,5)                                 | 10                           | 25                       | 229               |
| G10950    | 1095                | HR            | 830 (120)                             | 460 (66)                                   | 10                           | 25                       | 248               |

Fonte: SHIGLEY; MISCHKE; BUDYNAS (2005)

## ANEXO F – RESULTADO DO ENSAIO DE TRAÇÃO

| UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL<br>LABORATÓRIO DE ENSAIOS MECÂNICOS   |                           |         | Identificação:<br>LAMEC – FE 106 |            |    |
|---|---------------------------|---------|----------------------------------|------------|----|
| REGISTRO DE ENSAIO  |                           |         | Revisão: 02                      |            |    |
|   |                           |         | Agosto/2011                      |            |    |
| Cliente:  | Vagner Grison             | S.S. Nº | Data:                            | 22/08/2019 |    |
| Natureza do trabalho:   | ENSAIO DE DUREZA ROCKWELL |         | Temperatura:                     | 20,5 °C    |    |
|   | HRC                       |         | HRB, HRN ou HRC ?                |            |    |
| Identificação do cliente:<br>01 amostra de eixo. Identificado por: 01 (Lado da Chaveta) e 02 (Lado da fratura). |                           |         |                                  |            |    |
| Método de ensaio segundo norma NBR NM ISO 6508-1/09   |                           |         |                                  |            |    |
| Resultados:   |                           |         |                                  |            |    |
| Identif.<br>n°  | Leituras obtidas em: HRC  |         |                                  |            |    |
|   | 01                        | 02      | 03                               | 04         | 05 |
| 01  | 45                        | 41      | 45                               | 44         | 45 |
| 02  | 15                        | 16      | 12                               | 12         | 15 |
| Observações:  |                           |         |                                  |            |    |
| <i>M. Alves</i>   |                           |         |                                  |            |    |

Fonte: UCS (2019)