



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ**  
**INSTITUTO DE TECNOLOGIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA INDUSTRIAL**

**THOMPSON REIS DA SILVA**

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE UM EIXO EM AÇO  
CARBONO, UTILIZADO EM EMBARCAÇÕES TIPO RABETA POR  
RIBEIRINHOS NA AMAZÔNIA**

**Belém**

**2019**

**THOMPSON REIS DA SILVA**

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE UM EIXO EM AÇO  
CARBONO, UTILIZADO EM EMBARCAÇÕES TIPO RABETA POR  
RIBEIRINHOS NA AMAZÔNIA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Industrial do Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Industrial. Área de concentração: Materiais e Metalurgia.

Orientadora: Prof<sup>ª</sup>. Dra. Elza Monteiro Leão Filha.

**Belém**

**2019**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD  
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará  
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

R375a Reis da Silva, Thompson  
Análise do Comportamento Mecânico de um Eixo em Aço  
Carbono, Utilizado em Embarcações Tipo Rabeta por Ribeirinhos  
na Amazônia. / Thompson Reis da Silva. — 2019.  
xv, 74 f. : il. color.

Orientador(a): Prof<sup>a</sup>. Dra. Elza Monteiro Leão Filha  
Coorientador(a): Prof. Dr. Alessandro de Castro Corrêa  
Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Industrial, Instituto de Tecnologia, Universidade  
Federal do Pará, Belém, 2019.

1. Eixo de Rabeta. 2. Comportamento Mecânico. 3. Tração.  
4. Fadiga. I. Título.

CDD 620.1

---

THOMPSON REIS DA SILVA


ANÁLISE DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE UM EIXO EM AÇO  
CARBONO, UTILIZADO EM EMBARCAÇÕES TIPO RABETA POR  
RIBEIRINHOS NA AMAZÔNIA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Industrial do Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Industrial. Área de concentração: Materiais e Metalurgia.


Data de aprovação: 27 de Setembro de 2019.

Banca examinadora:

 - Orientadora  
Prof. Dra. Elza Monteiro Leão Filha, PPGEI-UFPA

 - Co-orientador  
Prof. Dr. Alessandro de Castro Corrêa, PPGEI-UFPA

 - Membro Interno  
Prof. Dr. Jean da Silva Rodrigues, PPGEI-UFPA

 - Membro Externo  
Prof. Ph.D Thiago Antônio Paixão de Sousa Costa, PPGEMAT - UFPA

 - Membro Externo  
Prof. Dr. Ricardo Augusto Scawright de Campos, UFPA

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus pois eu nada posso sem sua permissão.

A minha família, em especial a meus pais Jeremias e Rosangela que me apoiam desde sempre nos meus estudos, também as minhas irmãs Sarah e Priscila pelo apoio e carinho.

A minha namorada Jessika pelo grande apoio e paciência.

A minha orientadora prof. Dra. Elza Monteiro Leão Filha que além de uma excelente colega de trabalho, é uma grande amiga.

Aos prezados colegas e amigos da coordenação do curso técnico de mecânica no IFPA pelo grande apoio e incentivo.

Ao técnico de laboratório Yago Guedes pela grande ajuda nos tratamentos térmicos.

A minha amada Igreja Cristã Evangélica Vida que está sempre orando por mim.

## RESUMO

Uma das embarcações mais utilizadas pelos ribeirinhos da Amazônia é a embarcação conhecida como “rabeta”, que pode ser curta ou longa. A rabeta consiste em um motor de popa que sustenta um eixo de transmissão com uma hélice instalada na extremidade muito utilizada quando a profundidade do rio é relativamente baixa. O eixo, normalmente de aço, que transmite o movimento do motor para a hélice merece uma atenção especial, pois, apesar de o motor apresentar uma potência normalmente baixa, o eixo sofre esforços mecânicos como flexão, torção, compressão e tração que necessitam de um estudo mais aprofundado. Falhas causadas por fadiga, corrosão pelo contato direto do eixo com água são alguns exemplos. Através de tratamentos térmicos podem-se alterar as propriedades dos aços através de operações de aquecimento e resfriamento com o controle da temperatura. O processo escolhido para este trabalho é o processo de tratamento térmico de normalização, têmpera e revenido e o tratamento termoquímico superficial de cementação em caixa por proporcionar melhorias de natureza mecânica a baixo custo, fator este importante para o público alvo que é usuário do equipamento onde o eixo tratado é componente. A partir dos eixos adquiridos foram fabricados os corpos de prova para os ensaios de tração e fadiga flexo-rotativa pelo processo de usinagem em um torno mecânico semi-automático e o forno utilizado para os tratamentos térmicos apresenta uma temperatura máxima de trabalho de 1200°C. O eixo de rabeta é vendido no mercado como sendo de um aço SAE 1045 que após os tratamentos térmicos foram obtidas as propriedades mecânicas através dos ensaios de tração, fadiga flexo-rotativa e dureza, além das análises químicas pelo método de EDS (Espectroscopia de Energia Dispersiva) e FRX (Espectrometria de Fluorescência de Raios-X). Após as análises dos resultados, principalmente das propriedades mecânicas obtidas através dos ensaios de tração e dureza, detectou-se que o aço vendido não está de acordo com as especificações vendidas e que as amostras que passaram pelos tratamentos de normalização e cementação apresentaram os melhores resultados, em média 22.763,6 ciclos, quando submetidos ao ensaio de fadiga flexo-rotativa.

**Palavras chave:** Eixo de Rabeta, Tratamento Térmico, Cementação, Resistência Mecânica.

## ABSTRACT

One of the most used boats by the riverside of the Amazon is the boat known as “rabeta”, which can be short or long. The sterndrive consists of an outboard that supports a drive shaft with a propeller installed at the widely used end when the depth of the river is relatively low. The shaft, usually steel, which transmits the movement of the engine to the propeller deserves special attention, because, although the engine has a normally low power, the shaft suffers mechanical efforts such as bending, twisting, compression and traction that require a further study. Failures caused by fatigue, corrosion by direct shaft contact with water are some examples. Through heat treatments the properties of steels can be changed through heating and cooling operations with temperature control. The process chosen for this work is the normalization, quenching and tempering heat treatment process and the surface thermochemical treatment of box carburizing for providing mechanical improvements at low cost, an important factor for the target audience that is user of the equipment where The treated shaft is a component. From the acquired axes, the specimens were manufactured for tensile-flexural and tensile tests by machining in a semi-automatic lathe and the furnace used for heat treatments has a maximum working temperature of 1200°C. The spindle shaft is sold on the market as a SAE 1045 steel which after the heat treatments mechanical properties were obtained through tensile, flexo-rotational fatigue and hardness tests, in addition to chemical analysis by the EDS (Dispersive Energy Spectroscopy) method and FRX (X-ray Fluorescence Spectrometry). After the analysis of the results, mainly the mechanical properties obtained through the tensile and hardness tests, it was found that the sold steel does not meet the sold specifications and that the samples that passed the normalization and cementation treatments presented the best results.on average 22,763.6 cycles, when submitted to the flexo-rotating fatigue test.

**Keywords:** Rabet axis, Heat Treatment, Cementation, Mechanical Resistance.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 –	Gráfico com a curva de Wöhler.....	4
Figura 2.2 –	Fratura por fadiga mostrando as marcas de praia.....	5
Figura 2.3 –	Representação esquemática da fratura por fadiga em função do tipo de carregamento.....	6
Figura 2.4 –	Exemplos de ensaio de flexão rotativa (a) pura e (b) simples.....	8
Figura 2.5 –	Gráfico do efeito do diâmetro no fator de tamanho para diferentes carregamentos.....	10
Figura 2.6 –	Representação gráfica de diferentes processos de fabricação no fator de acabamento superficial.....	12
Figura 2.7 –	Deformação causada por deslizamento dos planos cristalinos.....	14
Figura 2.8 –	Diagrama TTT de um aço-carbono eutetóide.....	15
Figura 2.9 –	Diagrama de equilíbrio Fe-C.....	16
Figura 2.10 –	Tratamento termoquímico superficial por cementação.....	17
Figura 2.11 –	Curvas para o processo de cementação.....	18
Figura 2.12 –	Perfil de rugosidade na superfície do material.....	19
Figura 2.13 –	Composição da superfície do material.....	20
Figura 2.14 –	Parâmetro de rugosidade Ra.....	20
Figura 2.15 –	Comparação entre várias escalas de dureza.....	23
Figura 3.1 –	Fluxograma de atividades.....	25
Figura 3.2 –	Torno semi-automático ROMI TORMAX 20.....	26
Figura 3.3 –	Eixos de rabeta para a fabricação dos corpos de prova.....	26
Figura 3.4 –	Dimensões do corpo de prova para ensaio de fadiga flexo-rotativa....	27
Figura 3.5 –	Dimensões do corpo de prova para o ensaio de tração.....	27
Figura 3.6 –	Forno mufla para tratamentos térmicos JUNG.....	28
Figura 3.7 –	Caixa metálica com granulado de carbono.....	29
Figura 3.8 –	Corpos de prova para o tratamento de têmpera.....	30
Figura 3.9 –	Reservatório de óleo bem abaixo do forno.....	30
Figura 3.10 –	Máquina universal para ensaios AROTEC WDW-100E.....	31
Figura 3.11 –	Rugosímetro, base de polímero e corpo de prova.....	32
Figura 3.12 –	Equipamento para ensaio de fadiga GUNT HAMBURG WP140.....	32
Figura 3.13 –	Comportamento do corpo de prova submetido ao ensaio de fadiga....	33
Figura 3.14 –	Durômetro TIME TH300.....	34



Figura 3.15 –	Esteroscópio ZEISS STEMI 508.....	34
Figura 3.16 –	Microscópio Eletrônico de Varredura.....	35
Figura 4.1 –	Curva para o corpo de prova ST01, ST 02, ST 03.....	36
Figura 4.2 –	Corpos de prova ST após o ensaio de tração.....	37
Figura 4.3(a) –	Fractografia do corpo de prova ST03.....	37
Figura 4.3(b) –	Fractografia do corpo de prova ST03 destacando o perfil de fratura ductil na amostra superior.....	38
Figura 4.3(c) –	Fractografia do corpo de prova ST03 destacando o perfil de fratura ductil na amostra inferior.....	38
Figura 4.4 –	Curva para os corpos de prova NC01 e NC02.....	39
Figura 4.5 –	Corpos de prova NC após o ensaio de tração.....	40
Figura 4.6(a) –	Perfil de fratura frágil no corpo de prova NC01.....	41
Figura 4.6(b) –	Perfil de fratura frágil no corpo de prova NC01.....	41
Figura 4.6(c) –	Fratura no corpo de prova NC01 destacando a seção transversal da amostra.....	41
Figura 4.7 –	Fratura dúctil a 45°.....	42
Figura 4.8 –	Curva para o corpo de prova NCTR01.....	43
Figura 4.9 –	Corpo de prova NCTR após o ensaio de tração.....	44
Figura 4.10(a) –	Perfil de fratura dúctil no corpo de prova NCTR01 na amostra superior.....	44
Figura 4.10(b) –	Fratura no corpo de prova NCTR01 destacando o centro da amostra.	45
Figura 4.11 –	Comparação entre as curvas de tração.....	45
Figura 4.12 –	Esquema de comparação entre corpos de prova NCTR e NC.....	46
Figura 4.13 –	Diagrama de fases com as temperaturas utilizadas.....	47
Figura 4.14(a) –	Corpos de prova ST após o ensaio de fadiga.....	49
Figura 4.14(b) –	Corpos de prova NC após o ensaio de fadiga flexo-rotativa.....	49
Figura 4.14(c) –	Corpos de prova NCTR após o ensaio de fadiga flexo-rotativa.....	50
Figura 4.15(a) –	Fractografia da seção transversal de um corpo de prova ST após o ensaio de fadiga flexo-rotativa.....	51
Figura 4.15(b) –	Fractografia da seção transversal de um corpo de prova NC após o ensaio de fadiga flexo-rotativa.....	52
Figura 4.15(c) –	Fractografia da seção transversal de um corpo de prova NCTR após o ensaio de fadiga flexo-rotativa.....	52

Figura 4.16(a) –	Fractografia de material ST no MEV.....	53
Figura 4.16(b) –	Fractografia de material NC no MEV.....	53
Figura 4.16(c) –	Fractografia de material NCTR no MEV.....	54
Figura 4.17 –	Análise por EDS para um corpo de prova ST.....	55
Figura 4.18 –	Análise por EDS para um corpo de prova NC.....	55
Figura 4.19 –	Análise por EDS para um corpo de prova NCTR.....	56
Figura 4.20(a) –	Curva de DAF x Conf. para os corpos de prova ST.....	58
Figura 4.20(b) –	Curva de DAF x Confiabilidade para os corpos de prova NC.....	59
Figura 4.20(c) –	Curva de DAF x Confiabilidade para os corpos de prova NCTR.....	59
Figura 4.21(a) –	Corpo de prova ST submetido ao ensaio de dureza Rockwell B.....	60
Figura 4.21(b) –	Corpo de prova NC submetido ao ensaio de dureza Rockwell B.....	60
Figura 4.21(c) –	Corpo de prova NCTR submetido ao ensaio de dureza Rockwell B...	60
Figura 4.22(a) –	Comparação dos valores de dureza Brinell na seção transversal dos corpos de prova.....	63
Figura 4.22(b) –	Comparação dos valores de dureza Brinell na superfície dos corpos de prova.....	63
Figura 4.23 –	Estimativa do aço utilizado na fabricação do eixo de rabeta.....	64

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 –	Valores de classes e rugosidade Ra.....	21
Tabela 2.2 –	Valores típicos de rugosidade média para superfícies de engenharia fabricadas por diferentes processos.....	21
Tabela 2.3 –	Escalas de dureza Rockwell.....	22
Tabela 4.1 –	Valores para os corpos de prova ST.....	36
Tabela 4.2 –	Valores para os corpos de prova NC.....	39
Tabela 4.3 –	Valores para o corpo de prova NCTR01.....	43
Tabela 4.4(a) –	Valores de rugosidade Ra para os corpos de prova ST.....	48
Tabela 4.4(b) –	Valores de rugosidade Ra para os corpos de prova NC.....	48
Tabela 4.4(c) –	Valores de rugosidade Ra para os corpos de prova NCTR.....	48
Tabela 4.5 –	Valores obtidos no ensaio de fadiga flexo-rotativa.....	50
Tabela 4.6 –	Análise química pelo método de EDS.....	57
Tabela 4.7 –	Análise química FRX para amostras sem tratamento térmico.....	57
Tabela 4.8(a) –	Valores de dureza Rockwell B e dureza Brinell para os corpos de prova ST.....	61
Tabela 4.8(b) –	Valores de dureza Rockwell B e dureza Brinell para os corpos de prova NC.....	61
Tabela 4.8(c) –	Valores de dureza Rockwell B e dureza Brinell para os corpos de prova NCTR.....	62

**LISTA DE SIGLAS**

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

AISI - American Iron and Steel Institute

ASME - American Society of Mechanical Engineers

EDS - Espectroscopia de Energia Dispersiva

FRX - Espectrometria de Fluorescência de Raios-x

HB - Dureza Brinell

HRB - Dureza Rockwell B

HRC - Dureza Rockwell C

IFPA - Instituto Federal de Educação Básica, Técnica e Tecnológica do Pará

ISO - International Organization for Standardization

MEV - Microscópio Eletrônico de Varredura

MPa - Mega Pascal

NBR - Norma Brasileira

NC - Normalizados/Cementados

NCTR - Normalizados/Cementados/Temperados/Revenidos

Ra - Roughness Average

SAE - Society of Automotive Engineers

ST - Sem Tratamento Térmico

**LISTA DE SÍMBOLOS**

$\sigma_f$  - Resistência a Fadiga

$\sigma_r$  - Tensão de ruptura

k1 - Fator de Carga

k2 - Fator de Tamanho

k3 - Fator de Acabamento Superficial

k4 - Fator de Confiabilidade

Z - Confiabilidade Aplicada ao Componente Mecânico

$l_m$  - Comprimento de Avaliação

$y_i$  - Parâmetros de Superfície do Material

$\mu\text{m}$  - Micrômetros

in - Polegadas

Fe  $\gamma$  - Fase Austenita

$^{\circ}\text{C}$  - Graus Celcius

kgf - Quilograma Força

mm/min - Milímetros por minuto

Fe - Ferro

C - Carbono

Si - Silício

O - Oxigênio

Co - Cobalto

Mn - Manganês

Al - Alumínio

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
1.1 OBJETIVOS.....	2
1.1.1 Geral.....	2
1.1.2 Específicos.....	2
<b>2 REFERENCIAL TEÓRICO.....</b>	<b>3</b>
2.1 FADIGA.....	3
2.1.1 Fadiga de alto ciclo (Método S-N).....	6
2.1.2 Fadiga de baixo ciclo.....	8
2.1.3 Fadiga por flexão rotativa.....	8
2.1.4 Fatores que influenciam no ensaio de fadiga.....	9
2.1.4.1 Fator de carga (k1).....	10
2.1.4.2 Fator de tamanho (k2).....	10
2.1.4.3 Fator de Acabamento Superficial (k3).....	11
2.1.4.4 Fator de Confiabilidade (k4).....	13
2.1.4.5 Demais Fatores (ki).....	13
2.2 TRATAMENTOS TÉRMICOS.....	13
2.2.1 Tratamentos termoquímicos.....	16
2.2.1.1 Tratamento termoquímico superficial por cementação.....	17
2.3 RUGOSIDADE.....	19
2.3.1 Superfície dos materiais.....	19
2.4 DUREZA.....	22
2.4.1 Dureza Rockwell.....	22
2.4.2 Dureza Brinell.....	23
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>25</b>
3.1 CORPOS DE PROVA.....	25
3.2 TRATAMENTOS TÉRMICOS.....	27
3.2.1 Normalização.....	27
3.2.2 Cementação.....	28
3.2.3 Têmpera.....	29
3.2.4 Revenimento.....	31
3.3 ENSAIO DE TRAÇÃO.....	31
3.4 RUGOSIDADE.....	32

3.5 ENSAIO DE FADIGA .....	32
3.6 DUREZA .....	33
3.7 ANÁLISE FRACTOGRÁFICA.....	34
3.7.1 Esteroscópio .....	34
3.7.2 Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV).....	35
<b>4 RESULTADOS E DISCURSÕES.....</b>	<b>36</b>
4.1 ENSAIO DE TRAÇÃO.....	36
4.1.1 Corpos de prova sem tratamento térmico(ST).....	36
4.1.2 Corpos de prova normalizados/cementados (NC).....	39
4.1.3 Corpos de prova normalizados/cementados/temperados/revenidos (NCTR).....	42
4.2 RUGOSIDADE .....	47
4.3 FADIGA .....	49
4.3.1 Fractografia.....	51
4.3.2 Análise Química .....	54
4.3.3 Análise de Falhas e Confiabilidade .....	58
4.4 DUREZA .....	59
<b>5 CONCLUSÕES.....</b>	<b>65</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	
<b>APÊNDICE</b>	
<b>ANEXO</b>	

## 1. INTRODUÇÃO

A região amazônica apresenta uma malha fluvial muito extensa, e as embarcações são um meio de transporte muito utilizadas, principalmente pelas populações ribeirinhas para as mais diversas atividades como o transporte de pessoas e produtos, a atividade pesqueira, o esporte e lazer (DE OLIVEIRA, 2014).

Uma das embarcações mais utilizadas pelos ribeirinhos é a embarcação conhecida como “rabetá”, que pode ser curta ou longa. A rabeta consiste em um motor de popa que sustenta um eixo de transmissão com uma hélice instalada na extremidade muito utilizada quando a profundidade do rio é relativamente baixa.

Os meios de transporte utilizados pelos povos amazônicos são bem diversificados, com preponderância de meios de transporte aquáticos, geralmente artesanais, produzidos em pequenas oficinas nas próprias comunidades, sendo as rabetas o principal modo de transporte de pequeno porte utilizado, podendo ser comercializadas por valores que variam entre R\$ 800,00 a R\$ 3.500,00, dependendo se forem feitas de madeira ou chapas de alumínio (CORREA, 2016).

Sendo as rabetas meio de transporte dominante em comunidades ribeirinhas, utilizadas desde as atividades de pesca, até transporte escolar nas ilhas amazônicas e em casos extremos ambulâncias aquáticas que permitem o deslocamento de pessoas doentes até os hospitais mais próximos (CAETANO e SILVA, 2016; FERNANDES e FERNANDES, 2016), sendo este, segundo Lima e Peralta (2016) o item mais adquiridos por famílias ribeirinhas contempladas por programas de transferência de renda em comunidades da região do médio Solimões, Amazonas.

O eixo, normalmente de aço, que transmite o movimento do motor para a hélice merece uma atenção especial, pois, apesar de o motor apresentar uma potência normalmente baixa, sofre esforços mecânicos que necessitam de um estudo mais aprofundado. Falhas causadas por fadiga, corrosão pelo contato direto do eixo com água são alguns exemplos.

Através de tratamentos térmicos podem-se alterar as propriedades dos aços através de operações de aquecimento e resfriamento com o controle da temperatura. Dentre as melhorias de propriedades para os eixos de rabeta pode-se citar o aumento da resistência mecânica, resistência à corrosão e resistência ao desgaste.

Neste cenário, este trabalho tem por objetivo avaliar o comportamento de eixos para rabeta, adquiridos no comércio local da região portuária de Belém, no estado do Pará, através de ensaios mecânicos de tração, fadiga flexo-rotativa e dureza, avaliando também as



condições desses eixos após os tratamentos térmicos e tratamento termoquímico de cementação.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Geral

Pesquisar a eficiência do tratamento térmico e tratamento termoquímico superficial em eixos para embarcação tipo rabeta.

### 1.1.2 Específicos

- Avaliar o comportamento do eixo não tratado termicamente através de ensaios mecânicos de tração, fadiga flexo-rotativa e dureza.

- Avaliar o comportamento do eixo tratado termicamente e termoquimicamente através de ensaios mecânicos de tração, fadiga flexo-rotativa e dureza.

- Avaliar as fractografias dos eixos após os ensaios mecânicos de tração e fadiga flexo-rotativa através de estereoscópio e microscópio eletrônico de varredura (MEV).

- Avaliar os resultados das análises químicas do eixo não-tratado termicamente e dos eixos tratados termicamente através de EDS e FRX.

- Analisar os resultados através de comparação para a obtenção, ou não, de melhorias no comportamento mecânico do eixo.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 FADIGA

Considerada, no meio científico, a maior responsável pelas falhas mecânicas em materiais metálicos, a fadiga merece uma atenção toda especial em seu estudo. Atualmente, as formas de estudo relacionadas à fadiga estão na coleta e análise de dados obtidos através de ensaios mecânicos que reproduzem, em laboratório, de maneira aproximada, as condições de trabalho a que os componentes mecânicos estarão submetidos na prática. Cabe ressaltar que o tempo de ensaio é, normalmente, menor que o tempo de utilização normal do componente, e serve apenas para acelerar o tempo de fadiga do material sem causar prejuízos na coleta e interpretação dos dados obtidos.

A fadiga ocorre em estruturas ou componentes mecânicos submetidos a esforços ou tensões dinâmicas e oscilantes. Um exemplo bem prático desta situação é o que acontece com uma mola de suspensão de um caminhão.

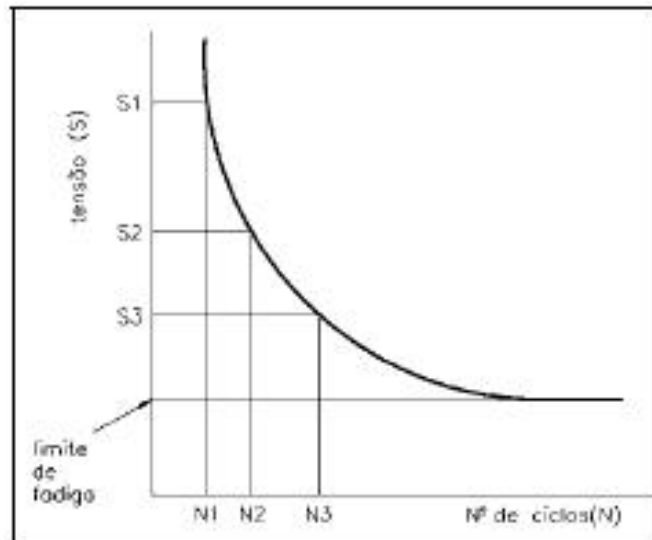
As falhas ocasionadas por fadiga, normalmente, ocorrem com níveis de tensões abaixo do limite de resistência à tração, ou abaixo do limite de escoamento em casos de cargas estáticas. O termo “fadiga” é utilizado porque a falha ocorre pela exposição de um componente mecânico a longos períodos de tensões ou ciclos de deformação repetitivos.

Segundo a *American Society of Mechanical Engineers* (ASME), fadiga é um processo progressivo e localizado de alteração permanente que ocorre em um material submetidos a condições de carregamento que produzem tensões ou deformações flutuantes em algum ou alguns pontos e que podem culminar com trincas ou com a completa fratura do material depois de um número suficiente de flutuações.

A fadiga é a responsável por noventa por cento das falhas em serviço relativas à causas mecânicas (DIETER, 1981) e (CALLISTER, 2008).

Os primeiros estudos em relação ao comportamento de materiais metálicos a esforços cíclicos foram feitos por Wöhler em 1860 trabalhando com eixos de trens que estavam sujeitos a flexão rotativa. Os diagramas de Wöhler (curvas S-N), representam os resultados obtidos nos ensaios de fadiga, baseando no registro da tensão aplicada (S) em função do número de ciclos (N) para a ruptura (MITCHELL, 2001). A curva de Wöhler é mostrada na figura 2.1 abaixo:

Figura 2.1 – Gráfico com a curva de Wöhler.



Fonte: COZACIUC et al, 2000.

Quando um material íntegro em serviço está sujeito a tensões cíclicas, sofre um processo de modificações microestruturais e perda de integridade até o momento da falha ou fratura. Esse processo de modificações pode ser dividido em três etapas.

Na primeira etapa o material sujeito aos esforços ou tensões repetitivas tende a desenvolver núcleos formadores de trincas que tem origem na heterogeneidade na distribuição de fases, compostos intermetálicos próximos à superfície, vazios, desníveis originados por rugosidade superficial e/ou por produtos que causam corrosão. Essas condições geram uma distribuição irregular das tensões no interior do material originando desconformidades nos planos cisalhantes causando o que se chama de intrusões e extrusões, porém neste estágio os efeitos da fadiga ainda podem ser contornados por tratamentos térmicos e acabamento superficial, podendo o componente retornar a sua função sem prejuízo a suas propriedades iniciais (MARTINS, 2010).

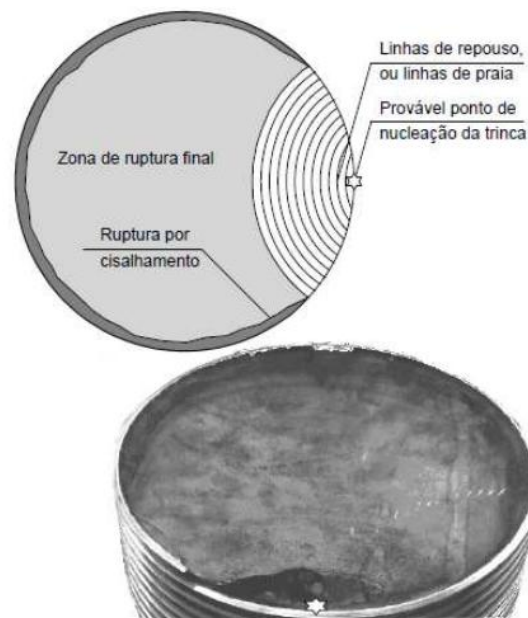
A partir desta distribuição das tensões nos planos próximos a superfície, em carregamentos cíclicos, vacâncias na estrutura do material tendem a se deslocar para pontos concentradores de tensão, ocasionando o encruamento localizado no ponto de maior tensão trativa no material, na superfície (MOEINI *et al*, 2017), perdendo sua ductilidade e dando início ao próximo estágio.

Na segunda etapa do processo de fadiga a trinca já estabelecida tende a se propagar dentro do material, e neste ponto diversos autores propõe variados mecanismos de propagação em função da tensão aplicada, textura do material, presença de intermetálicos e outros. A partir do seu núcleo, a trinca tende a se propagar perpendicularmente ao sentido da tensão

aplicada os planos menos densos do grão, até encontrar uma situação favorável ao seu crescimento, obtendo assim energia suficiente para se propagar entre os grãos, dependendo do nível de tensão aplicada e da microestrutura do material de forma intergranular ou pelo contorno dos grãos (SILVA, 2001).

Ainda durante esta segunda etapa do processo de fadiga, é formada uma superfície de aspecto liso, com sulcos concêntricos ao ponto de início da trinca, chamadas comumente de marcas de praia, conforme a figura 2.2, as quais se propagam até um ponto de instabilidade máxima do material, quando a seção íntegra do material diminui gradativamente para a tensão se tornar suficiente para ocorrer seu rompimento, sendo esta etapa do processo independente de defeitos superficiais e somente sendo governada pelas propriedades intrínsecas do material (LIMBERGER, 2000; ABRAHÃO *et al*, 2008, CAMELO, 2015). Vale ressaltar que além das características metalúrgicas, descontinuidades das propriedades no interior do material também podem modificar este processo, diminuindo ou aumentando o tempo de propagação estável de trinca.

Figura 2.2 – Fratura por fadiga mostrando as marcas de praia.



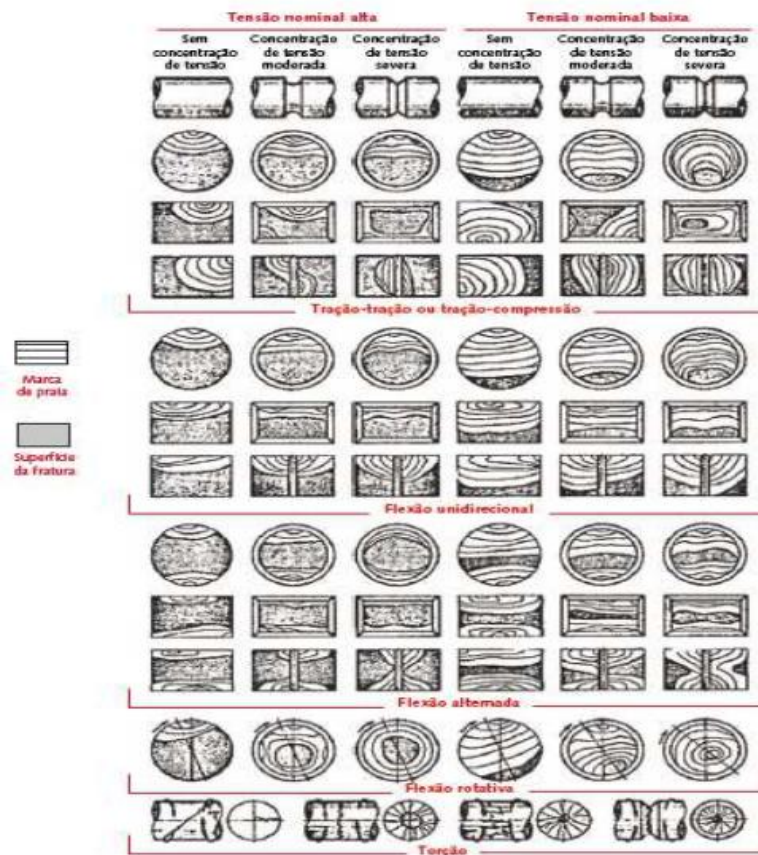
Fonte: DA ROSA, 2002.

A terceira etapa, onde ocorre este rompimento catastrófico é geralmente caracterizada pela formação de uma estrutura de clivagem e quase-clivagem, porém, além de aspectos de fratura frágil, a superfície também pode apresentar *dimples*, que são alvéolos em regiões com

deformação plástica, característico de ruptura por carga de tração estática em materiais dúcteis (BONORA, 2015).

Tais morfologias de fratura sob fadiga podem variar em função do tipo de carregamento, periodicidade e amplitude das tensões aplicadas, assim como fatores próprios do material, tais como inclusões e vazios de acordo com a figura 2.3.

Figura 2.3 – Representação esquemática da fratura por fadiga em função do tipo de carregamento.



Fonte: DA ROSA, 2002.

Dependendo do nível de carregamento o material pode apresentar ou não deformação generalizada na sessão fraturada, ocorrendo geralmente para as menores tensões no material dando a ele um aspecto na região de fratura abrupta de rompimento por carregamento estático (ROSA, 2002).

### 2.1.1 Fadiga de alto ciclo (Método S-N)

O estudo de fadiga pelo método S-N dá-se através de um diagrama que é plotado a partir da variação da tensão *versus* o número de ciclos. Tem a denominação de alto ciclo

devido a grande quantidade de ciclos necessários para que ocorra a falha por fadiga. A determinação do diagrama S-N é feita através de ensaios em corpos de prova ou no próprio componente da estrutura, sempre de acordo com a norma específica para este fim.

Alguns materiais sob condições constantes de carregamento exibem, em seus diagramas S-N, amplitude de tensão abaixo da qual o mesmo não está sujeito a falha por fadiga, independente do número de ciclos. É denominado limite de fadiga, e varia entre 30% e 50% do limite de ruptura do material. Alguns metais, como o alumínio e suas ligas, não apresentam esse limite definido, sendo estimado para romper o metal  $10^6$  a  $10^7$  ciclos (SURESH, 1998).

O trabalho desenvolvido por Wöhler, em meados do século XIX, mostrou que um metal ao sofrer tensões alternadas falha em níveis de tensões bem abaixo do esperado. O método da tensão nominal (curva S-N) foi o primeiro método desenvolvido para entender esse fenômeno e é ainda hoje largamente aplicado (LEMOS, 2005).

Os diagramas S-N podem ser construídos de três maneiras variando as escalas dos eixos cartesianos. Essas maneiras são as seguintes: S-N, S-logN e logS-logN. As escalas na forma logarítmica facilitam a comparação de dados pois apresentam curvas com a mesma forma para diferentes tipos de materiais, além de diminuir a escala de N.

Para Nonovic *et al.* 2004, a integridade superficial tem influência na resistência a fadiga, principalmente a altos ciclos, onde o limite de resistência a fadiga depende do processo de fabricação e da severidade do mesmo. Esta resistência é duramente influenciada pela tensão residual, pela condição metalúrgica do material e pela presença de irregularidades superficiais que funcionam como entalhes. Os fatores mais danosos ao componente são a tensão residual e alterações da micro estrutura superficial. Mesmo sabendo que trincas do processo de falhas por fadiga geralmente iniciam-se na superfície, tem-se que a rugosidade superficial somente será decisiva na resistência a fadiga quando se tratar de componentes submetidos a alívio de tensão, pois caso contrário, a influência da tensão residual será maior que a influência da rugosidade.

É importante ressaltar que o limite de resistência a fadiga depende do tipo de ensaio. Geralmente as tensões aplicadas nos ensaios mais encontrados na prática são do tipo flexo-rotativa, torção ou tração-compressão (SOUZA, 1995).

### 2.1.2 Fadiga de baixo ciclo

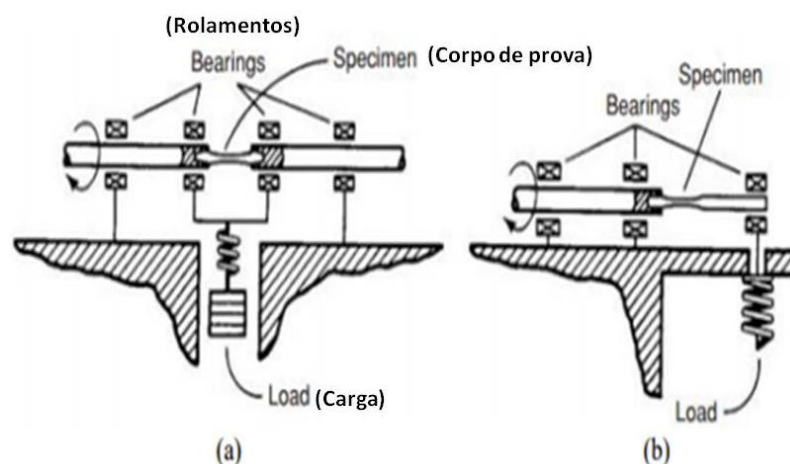
Também conhecido como método da fadiga controlada pela deformação é utilizado para avaliação quando acontecem deformações plásticas no material. Isso ocorre quando as tensões são altas, características da fadiga de baixo ciclo.

### 2.1.3 Fadiga por flexão rotativa

Wöhler desenvolveu um mecanismo para a realização de ensaios de fadiga que consistia na aplicação de esforços de flexão nos corpos de prova oriundos do material sujeito a análise. No decorrer do tempo foram desenvolvidos outros tipos de ensaios com diferentes tipos de carregamentos. Um componente mecânico estará sujeito a vários tipos de esforços ou carregamentos dependendo das especificações de projeto, sendo necessária a simulação das condições de uso do material para a obtenção de dados confiáveis para a análise da resistência a fadiga.

O ensaio de flexão rotativa é subdividido em carregamento de flexão simples e carregamento de flexão pura, de acordo com o tipo de flexão a que o material está sujeito, como mostrado na figura 2.4. Nos ensaios com flexão pura o corpo de prova é apoiado nas duas extremidades em pesos que garantem a carga de flexão em toda a sua extensão, já nos ensaios de flexão simples o material a ser analisado é engastado de um lado no motor que vai garantir a sua rotação, e no outro em um suporte que vai aplicar a carga apenas em uma extremidade (ROSA, 2002; ICKERT, 2014; RAMOS, 2016).

Figura 2.4 – Exemplos de ensaio de flexão rotativa (a) pura e (b) simples.



Fonte: RAMOS, 2016

Entretanto, em ambos os casos o corpo de prova está sujeito a uma tensão senoidal que varia com o tempo, devido a rotação. Nesta configuração a tensão média é zero, a razão entre as tensões é -1 e a razão das amplitudes tende ao infinito, valendo apenas essa configuração de ensaio para carregamentos uniformes e constantes.

#### 2.1.4 Fatores que influenciam no ensaio de fadiga

Acabamentos, algumas vezes até espelhados, e diâmetro médio de 6 mm, onde se obtém a resistência a fadiga ( $\sigma_f$ ), podem apresentar excelentes resultados para um ensaio de fadiga (PONTALTI, 2005), porém durante as condições reais de uso o material muitas vezes estará em condições diferentes das utilizadas nos ensaios e para tanto, várias considerações são propostas para corrigir os dados, tais considerações levam a uma equação geral de correção onde os fatores (k) corrigem em função das variações entre uma peça polida e o material nas condições usuais de uso e o fator  $k_i$  diz respeito ao  $i$ -ésimo fator de correção utilizado (ROSA, 2002):  $\sigma_f' = \sigma_f \times k_1 \times k_2 \times k_3 \times k_4 \dots k_i$

Field (1973) relacionou a falha por fadiga com a iniciação de trincas na superfície ou próximo delas, tornando assim a análise da integridade superficial extremamente necessária para o estudo de falhas em componentes mecânicos.

Starkey e Irving (1982), utilizando corpos de prova fabricados em ferro nodular ferrítico, comparou suas resistências a fadiga submetidos a usinagem e quando em estado bruto de fundição. Para os dois casos existem condições diferentes de qualidade superficial: para o primeiro caso existe a presença de micro-poros decorrentes de precipitado de grafite e poros devido a recalque. Todas essas imperfeições são descobertas mediante o processo de usinagem. Já nos componentes com superfície fundida, existe a presença de impurezas decorrentes do processo de fundição. Ambos, micro-poros e impurezas funcionam como nucleadores de trincas. As propriedades de superfícies em estado bruto são muito diferentes de superfícies usinadas. Estas últimas possuem vida em fadiga pouco menor que corpos de prova com superfícies polidas. Já as superfícies fundidas tem sua vida reduzida em cerca de 10 (dez) vezes.

Sharman *et. al.* (2001) determinaram a fadiga de corpos de prova usinados sob diferentes processos. Sabe-se que diferentes processos de usinagem apresentam diferentes influências no comportamento de fadiga, uma vez que a resistência a fadiga é a propriedade mecânica mais afetada por esses processos. Os resultados mostraram que corpos de prova torneados possuem maior resistência a fadiga que os demais. Isto pode ser explicada pela



presença de tensão residual compressiva na superfície do corpo de prova gerada pela operação de torneamento.

#### 2.1.4.1 Fator de carga ( $k_1$ )

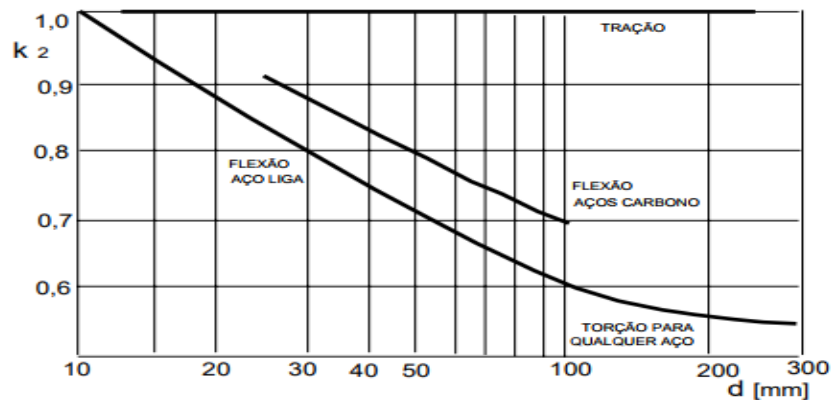
Na maioria dos ensaios realizados os corpos de prova estão sujeitos a apenas um único tipo de esforço, entretanto para diferentes estados de carregamento os materiais apresentam diferentes comportamentos (ROSA, 2002; RAMOS, 2016).

#### 2.1.4.2 Fator de tamanho ( $k_2$ )

Ao se ensaiar um mesmo material com diferentes diâmetros obtém-se diferentes resultados de resistência a fadiga. Esta dependência do diâmetro tem um comportamento assintótico, onde acredita-se que em uma seção suficientemente grande tende a se estabilizar (ROSA, 2002), porém em resultados com diferentes tamanhos de seção se apresentam sempre um contínuo decaimento da resistência a fadiga, sendo considerado por Ramos (2016) diretamente ligado ao aumento do gradiente de tensão dentro das peças sujeitas a flexão e torção (caso dos ensaios de flexão rotativa).

Para solucionar de forma satisfatória essas divergências quanto a influência do tamanho, foi estabelecido um gráfico bastante conservativo da influência da variação de diâmetro na resistência a fadiga, que é apresentado a seguir na figura 2.5, no qual pode-se notar que para aço-carbono a influência se dá em diâmetros superiores a 25 mm, sendo considerado o fator igual a 1 para diâmetros menores (ROSA, 2002; RAMOS, 2016).

Figura 2.5 – Gráfico do efeito do diâmetro no fator de tamanho para diferentes carregamentos.



Fonte: ROSA, 2002

Isso significa que, para uma mesma tensão máxima de carregamento, a medida que o diâmetro do corpo de prova aumenta, um volume maior de matéria estará sujeita a essa tensão máxima, o que resulta em um dano maior e por consequência, uma vida sob fadiga bem menor do que um material com dimensões menores.

#### 2.1.4.3 Fator de Acabamento Superficial ( $k_3$ )

Para muitas situações comuns de aplicação de carga, a tensão máxima em um componente ou estrutura ocorre em sua superfície. Consequentemente, a maioria das trincas que levam a uma falha por fadiga tem sua origem em posições superficiais, especificamente em sitios de amplificação de tensão. Portanto, foi observado que a vida em fadiga é especialmente sensível às condições e configurações da superfície do componente (CALLISTER, 2016).

A fase de nucleação de trincas se inicia pela superfície das peças, a partir de micro defeitos resultantes do processamento do material, tais como usinagem, trefilação, laminação e outros, assim como do processo corrosivo. Esses desníveis podem ser visualizados através dos perfis de rugosidade. Dependendo do perfil destas irregularidades elas podem ser concentradoras de tensões residuais, as quais podem ser de tração ou de compressão (LOPES, 2006; RAMOS, 2016).

Segundo Norton (2004), as fraturas por fadiga geralmente iniciam na superfície dos corpos de prova, pois a tensão máxima sempre estará situada em algum ponto da superfície, visto que os metais não são homogêneos e isotrópicos. Conforme as tensões do entalhe oscilam, pode ocorrer escoamento local devido a concentração de tensão, mesmo que a tensão nominal na seção esteja bem abaixo do valor da tensão de escoamento do material.

Mas a fratura por fadiga com trinca iniciando na superfície não pode ser considerada como regra geral. Em certos casos, a trinca pode iniciar no interior do corpo de prova sendo causadas por tensão residual, descontinuidades ou defeitos internos.

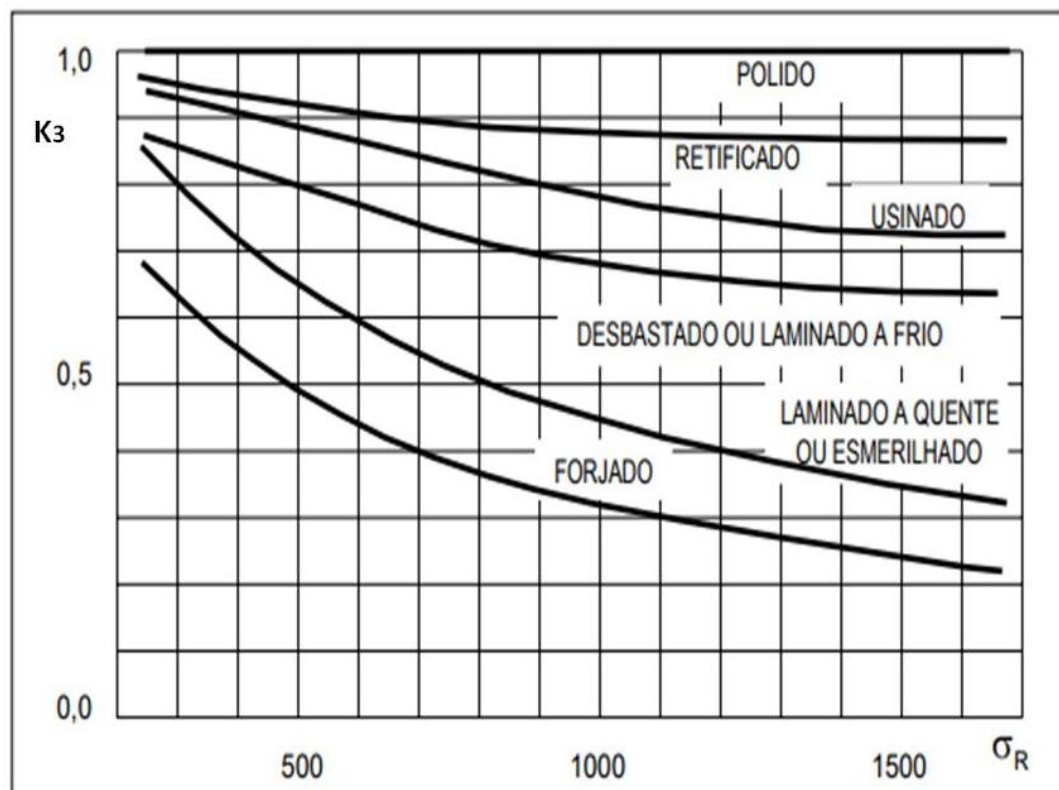
Para Itoga (2003), quando a falha por fadiga é decorrente de vidas curtas, onde a nucleação de trincas ocorre na superfície, a rugosidade superficial tem papel crucial funcionando como entalhes na superfície. Porém, em vidas longas, onde a nucleação de trincas ocorre no interior do componente, a maior influência do processo será determinada pela inclusão e/ou imperfeição do material.

Sasahara (2005), mostrou que condições de usinagem como a forma da ferramenta e o passo de acabamento irão influir diretamente em características como tensão residual, dureza e rugosidade superficial. Tais características, evidentemente, podem ser controladas por uma

cuidadosa e adequada definição das condições de usinagem. Condições como baixo avanço, pequeno raio de ponta de ferramenta e ferramenta de corte com ponta chanfrada podem imprimir em componentes usinados altas vidas de fadiga quando estes são comparados com componentes virgem. Isto é conseguido porque estas condições imprimem uma tensão residual compressiva e alta dureza na camada superficial durante o processo de usinagem.

Por ser uma análise dispendiosa e necessitar de um controle preciso de muitas variáveis para sua determinação precisa, é usualmente adotada na engenharia a utilização do gráfico contido na figura 2.6, que correlaciona de forma conservativa diferentes processos de fabricação com sua influência no  $k_3$ , sendo este obtido pela razão da resistência a fadiga de corpos reais pela resistência em corpos polidos (ROSA, 2002).

Figura 2.6 – Representação gráfica de diferentes processos de fabricação no fator de acabamento superficial.



Fonte: ROSA, 2002

Como pode ser observado acima, processos de retificação e usinagem tem seu impacto no  $k_3$  estabilizado em tensões de ruptura ( $\sigma_r$ ) acima de 1400 MPa, já os outros processos continuam diminuindo  $k_3$  independentemente do valor de  $\sigma_r$ , porém com menor impacto para

metais de baixo  $\sigma_r$ . No caso das ligas de aço com médio teor usinadas, por exemplo,  $\sigma_r$  fica próximo de 900 MPa e o  $k_3$  fica em torno de 0,8.

Este gráfico se torna uma ferramenta de fácil utilização para engenheiros na determinação do  $k_3$ , porém em estudos de Lopes (2006) correlacionando acabamento superficial e fadiga de componentes mecânicos, foram encontrados resultados diferentes dos apresentados no gráfico acima.

#### 2.1.4.4 Fator de Confiabilidade ( $k_4$ )

Nos projetos de elementos mecânicos é levada em consideração um determinado nível de segurança da tensão aplicada aos componentes, e no processo de cálculo de componentes sujeitos a fadiga a confiabilidade geralmente permanece em 0,5, ou seja, uma probabilidade de 50% de falha em cima da dispersão dos dados obtidos em ensaios padronizados, sendo necessário aplicar o percentual da confiabilidade (ROSA, 2002).

$$K_4 = 1 - (0,08 \times Z)$$

Onde  $Z$  diz respeito a confiabilidade aplicada ao componente mecânico, sendo geralmente mantido em  $Z = 0,5$ .

#### 2.1.4.5 Demais Fatores ( $k_i$ )

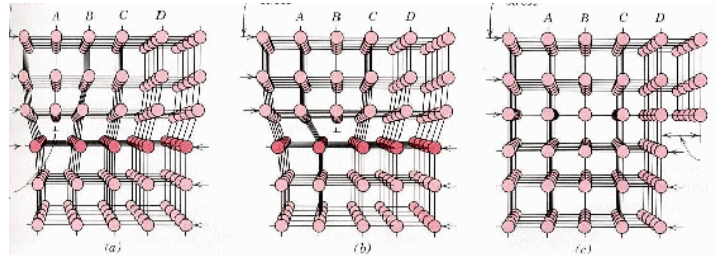
A equação de correção da tensão de fadiga pode ser ajustada a partir de diversos outros fatores tais como ambiente, temperatura, tratamentos térmicos, entalhes e outros. Os quais devem ser analisados cuidadosamente, de acordo com sua necessidade para a real compreensão do comportamento do material em serviço (ROSA, 2002; RAMOS, 2016). Um exemplo é o caso do aço SAE 1050, que segundo Santos (2008) tem sua tensão de resistência a fadiga diminuída em 58% quando exposto a água contendo 6,8% de sais. Sendo assim caso o material analisado esteja em contato com água salina, a redução devido a corrosão deve ser considerada.

## 2.2 TRATAMENTOS TÉRMICOS

As deformações plásticas nos materiais metálicos correspondem às deformações permanentes oriundas de um processo de fabricação ou deformação do metal, ou seja, após um processo de conformação, o material apresenta uma deformação permanente, o que corresponde a uma deformação plástica do material. Essa deformação plástica está diretamente relacionada com os processos de conformação mecânica tais como: laminação, trefilação, estampagem, extrusão, forjamento, etc. Geralmente, a deformação plástica nos

metais ocorre pelo deslizamento dos planos cristalinos como podemos observar na figura 2.7. A causa desse deslizamento é a presença de discordâncias no material.

Figura 2.7 – Deformação causada por deslizamento dos planos cristalinos.



Fonte: CALLISTER, 2002.

Os processos de conformação causam um aumento na quantidade de defeitos cristalinos e por consequência disso um aumento da dureza do material conformado. Essa introdução de defeitos e discordâncias durante o processo de deformação a frio e o aumento da dureza do material deformado causa o que chamamos de encruamento.

O processo de eliminação ou redução desses defeitos dá-se através de tratamentos térmicos onde a difusão dos átomos é favorecida pelas altas temperaturas.

Dentre os tratamentos térmicos temos o recozimento, que consiste em colocar o material em uma temperatura acima da temperatura de recristalização por um período de tempo. Normalmente as temperaturas de recristalização estão na ordem de  $1/3$  a  $1/2$  da temperatura de fusão do material metálico.

É importante comentar que se a conformação mecânica do metal ou liga for realizada acima da temperatura de recristalização essa conformação é chamada de deformação a quente. Portanto, a temperatura de recristalização separa a deformação a quente da deformação a frio.

Outro tipo de tratamento térmico chama-se normalização cujo processo é semelhante ao processo de tratamento térmico de recozimento. O tratamento por normalização depende da composição do aço para a determinação da temperatura a que o material estará exposto.

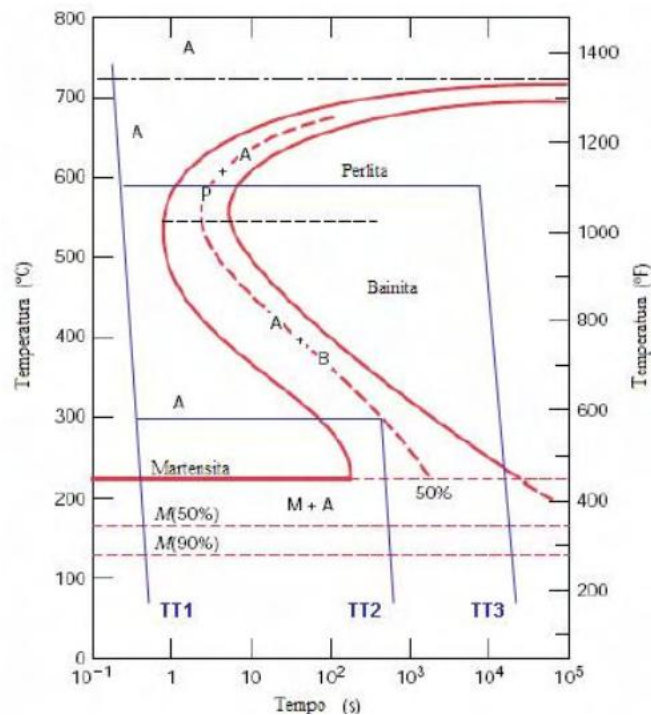
A têmpera, outro tratamento térmico, diferente do recozimento e da normalização, tem por objetivo aumentar a dureza do material aquecendo o material até a temperatura onde encontra-se a fase de austenita, e então é feito um resfriamento muito rápido obtendo-se uma estrutura chamada de martensita que é dura e frágil. O processo de têmpera depende da composição do aço, principalmente quanto ao teor de carbono.

As curvas TTT (Temperatura, Tempo e Transformação), fornecem importantes informações de natureza prática da formação dos constituintes em um aço, tais como, o tempo

necessário para o início e para o término da transformação, e são obtidas a partir de uma série de curvas de reações isométricas realizadas em diversas temperaturas (HASHIMOTO, 2010).

As curvas do diagrama ilustrado na figura 2.8, mostram que as reações ocorrem mais rapidamente na região intermediária para cima e mais lentamente na região inferior, sendo que, entre cerca de 550°C a 600°C, a austenita se transforma completamente em perlita. Abaixo dessas temperaturas, entre cerca de 550°C e 210°C, forma-se bainita superior ou inferior. Finalmente, entre 210°C até 140°C aproximadamente, o produto da reação é a martensita (CALLISTER, 2002).

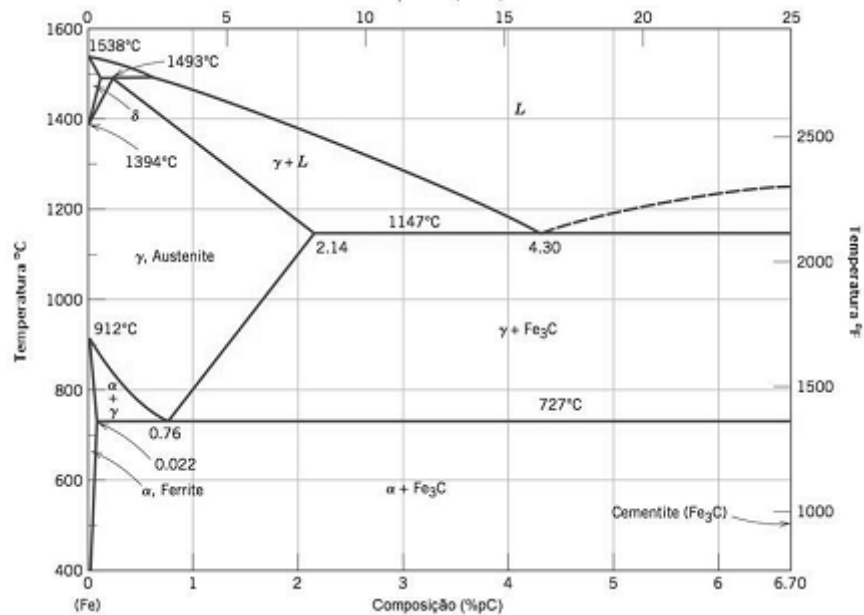
Figura 2.8 – Diagrama TTT de um aço-carbono eutetóide.



Fonte: CALLISTER, 2002.

O diagrama de equilíbrio ferro-carbono é uma ferramenta de grande importância que auxilia na realização dos tratamentos térmicos relacionados ao aço carbono como mostra a figura 2.9.

Figura 2.9 – Diagrama de equilíbrio Fe-C.



Fonte: CALLISTER, 2002.

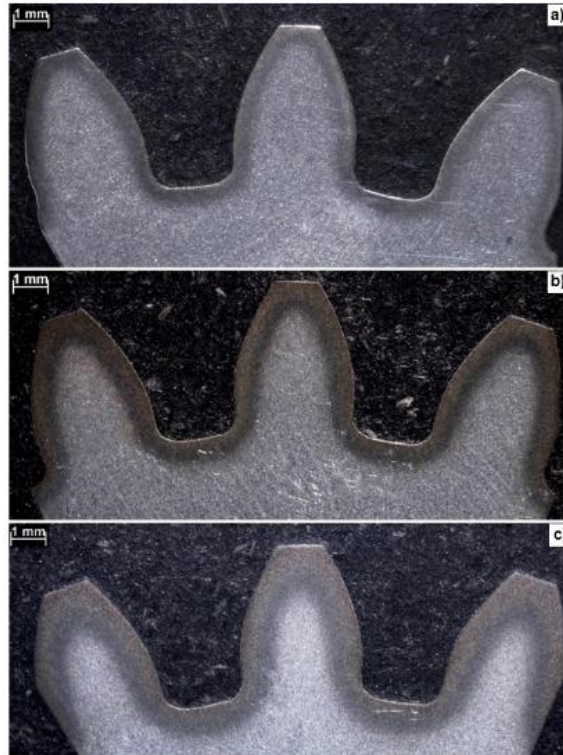
Existem ainda tratamentos térmicos para ligas não-ferrosas que, também, são usados em aços inoxidáveis como por exemplo: o recozimento que visa a diminuição do encruamento e causa a diminuição da dureza do material; a homogeneização tem por objetivo homogeneizar a composição química do material. É muito utilizado em peças fabricadas por processo de fundição. Uma característica desse tratamento é o longo tempo de duração que pode chegar a dias; a solubilização tem por objetivo a eliminação de precipitados no material e é muito utilizado em aços inoxidáveis, mesmo sendo uma liga ferrosa; o envelhecimento, também chamado de recozimento isotérmico, ao contrário da solubilização, visa a formação de precipitados com o objetivo de melhorar as propriedades mecânicas do material; o tratamento térmico por alívio de tensões é comum para materiais ferrosos e materiais não-ferrosos e visa eliminar as tensões residuais provenientes de processos de fabricação como os de soldagem e conformação.

### 2.2.1 Tratamentos termoquímicos

Os tratamentos térmicos superficiais tem grande importância pois envolvem mudanças na microestrutura do material, principalmente na superfície dos materiais influenciando nas propriedades mecânicas em apenas uma parte dos mesmos como se pode observar na figura 2.10. O tratamento térmico superficial é utilizado em diversos componentes mecânicos. Como exemplo tem-se as engrenagens com tratamento termoquímico apenas nos dentes, eixos,

ferramentas, etc. Esses processos aumentam a dureza na superfície do material, proporcionando resistência a fadiga e ao desgaste sem a perda da tenacidade da peça ou componente.

Figura 2.10 – Tratamento termoquímico superficial por cementação.



Fonte: GARCIA, 2018.

O tratamento térmico superficial, de maneira geral, consiste em aquecer a peça ou componente em uma atmosfera rica em determinado elemento químico como o carbono, o nitrogênio ou o boro.

#### 2.2.1.1 Tratamento termoquímico superficial por cementação

O tratamento termoquímico superficial por cementação ocorre através da difusão do elemento carbono na superfície do aço. Essa difusão ocorre, normalmente, quando é feito o aquecimento do aço entre 300°C e 1200°C. Por conta disso, esse tratamento é denominado de tratamento termoquímico de cementação.

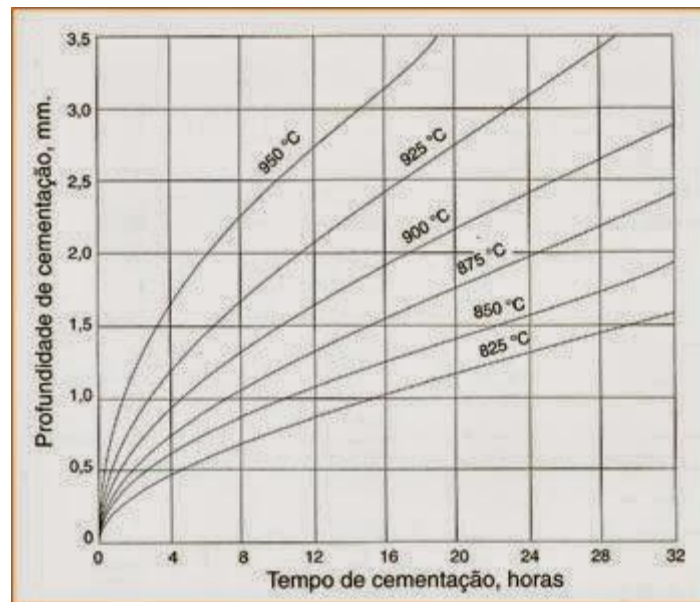
O objetivo desse tratamento é aumentar a resistência ao desgaste e a dureza superficial mantendo dúctil o núcleo do material. Esse tratamento visa também, melhorar a resistência contra a corrosão, a oxidação a altas temperaturas e a resistência a fadiga.



O processo de cementação, é um processo clássico de endurecimento de superfícies onde ocorre o enriquecimento de carbono na superfície de certos aços. A cementação ocorre em aços austeníticos, onde a solubilidade do carbono é mais elevada. O procedimento consiste em aquecer o aço juntamente com a substância rica em carbono a uma temperatura que deve ser superior a zona crítica, entre 850°C e 950°C. As variáveis para esse processo são a temperatura de aquecimento, o tempo em que o aço ficará em contato com a substância rica em carbono e a capacidade de absorção máxima de carbono do aço.

A figura 2.11 abaixo, mostra algumas curvas que representam o processo de tratamento termoquímico de cementação.

Figura 2.11 – Curvas para o processo de cementação.



Fonte: CHIAVERINI, 2002

A cementação é um fenômeno difusivo, ou seja, trata-se do movimento de carbono no interior do aço. Desta forma a velocidade de enriquecimento de carbono na superfície dos aços depende do seu coeficiente de difusão.

Para a cementação foram estabelecidos alguns fatores que tem influência direta sobre a velocidade de enriquecimento de carbono na superfície do aço como o teor inicial de carbono no aço, pois quanto menor o teor de carbono maior será a velocidade de carbonetação; outro fator é o coeficiente de difusão do carbono no aço que é o movimento de carbono no interior do aço e fundamental para a cementação; a temperatura é, talvez, o fator mais importante pois tem influência direta na difusão do carbono e na concentração de carbono na austenita e na

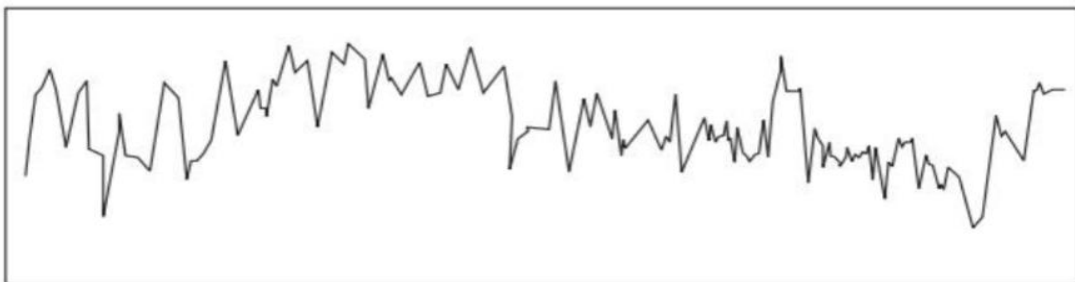
velocidade de carbonetação da superfície do aço; outro fator muito importante é a natureza do agente cementante, o agente que ira suprir o carbono para o processo de cementação.

Os tratamentos térmicos de cementação podem ser por cementação sólida, líquida, gasosa, vácuo e plasma. Esses processos são utilizados em aços carbono AISI/ABNT 1010 a 1035 e aços de baixa liga AISI/ABNT 2317, 2325, 3115, 4617, 8620, 9310, etc.

### 2.3 RUGOSIDADE

O conjunto de desvios macrogeométricos e microgeométricos que aparecem na superfície do material são chamados de rugosidade superficial. Esses desvios podem ser observados como vales e como picos. Os processos de fabricação deixam suas impressões na superfície da peça ou material. Essas impressões podem ser observadas da seguinte maneira através de perfis efetivos como mostra a figura 2.12.

Figura 2.12 – Perfil de rugosidade na superfície do material.



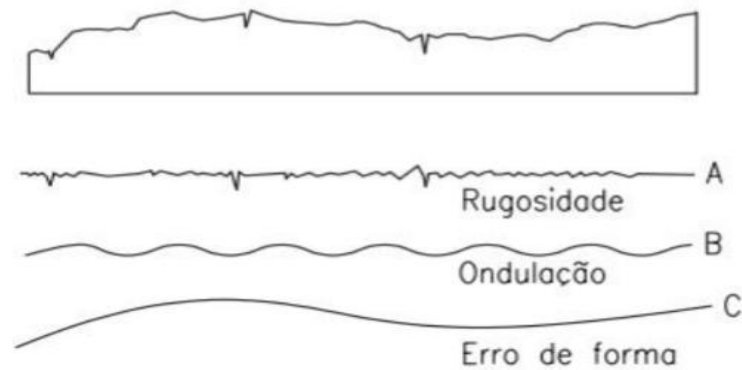
Fonte: SECCO, VIEIRA E GORDO, 1996

#### 2.3.1 Superfície dos materiais

Durante as operações de usinagem, pequenos riscos e sulcos são invariavelmente introduzidos na superfície da peça de trabalho pela ação da ferramenta de corte (CALLISTER, 2015). Neste caso, quando a ferramenta origina esses riscos, seja pela vibração no momento do contato com a peça ou pelo próprio desgaste da ferramenta, temos uma rugosidade de ordem microgeométrica. A rugosidade macrogeométrica pode ser causada por defeitos em guias, fixação errada da peça, etc. A rugosidade macrogeométrica pode ser detectada com auxílio de relógios comparadores, micrômetros, projetores de perfil e normalmente são ondulações, ovalizações, planicidade, etc.

A figura 2.13 mostra a composição da superfície do material.

Figura 2.13 – Composição da superfície do material.



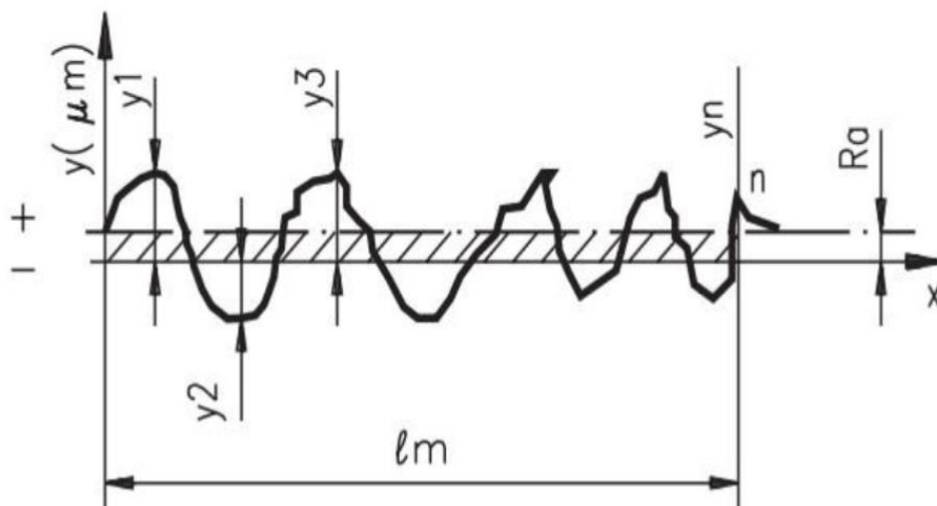
Fonte: SECCO, VIEIRA E GORDO, 1996.

### 2.3.2 Parâmetro de rugosidade média Ra (*roughness average*)

As superfícies de peças e materiais apresentam uma variada quantidade de perfis e muitos graus de acabamento. Neste caso existem formas específicas de avaliação da rugosidade superficial.

Uma dessas formas de avaliação está no parâmetro de rugosidade média Ra, que consiste no cálculo da média aritmética dos parâmetros  $y_i$  encontrados na superfície do material como mostra a figura 2.14, onde  $l_m$  representa o comprimento de avaliação.

Figura 2.14 – Parâmetro de rugosidade Ra.



Fonte: SECCO, VIEIRA E GORDO, 1996

O valor da rugosidade Ra é obtida através da equação 2.1:

$$Ra = (y1+y2+y3+...+yn)/n \quad (\text{eq. 2.1})$$

A tabela 2.1 relaciona os valores de Ra em micrômetros com os números de classe obedecendo a norma NBR 8404/1984.

Tabela 2.1 – Valores de classes e rugosidade Ra.

CLASSE DE RUGOSIDADE	RUGOSIDADE RA (valor em $\mu m$ )
N12	50
N11	25
N10	12,5
N9	6,3
N8	3,2
N7	1,6
N6	0,8
N5	0,4
N4	0,2
N3	0,1
N2	0,05
N1	0,025

Fonte: SECCO, VIEIRA E GORDO, 1996

A tabela 2.2 mostra os valores típicos de rugosidade superficial Ra para cada processo de fabricação.

Tabela 2.2 – Valores típicos de rugosidade média para superfícies de engenharia fabricadas por diferentes processos.

Processo	R <sub>a</sub> ( $\mu m$ )
aplainamento, perfilamento	1 – 25
fresamento	1 – 6
trefilação, extrusão	1 – 3
torneamento, furação	0,4 – 6
retífica	0,1 – 2
brunimento	0,1 – 1
polimento	0,1 – 0,4
polimento com disco	0,05 – 0,04

Fonte: HUTCHINGS, 1992.

## 2.4 DUREZA

Outra propriedade mecânica que pode ser importante considerar é a dureza, uma medida da resistência de um material a uma deformação plástica localizada. Os primeiros ensaios de dureza foram baseados em minerais naturais, com uma escala construída unicamente em função da habilidade de um material riscar outro material mais macio (CALLISTER, 2015).

O ensaio de dureza se evidencia por ser um dos mais utilizados dentre os ensaios conhecidos por diversos motivos, dentre eles se pode destacar que o ensaio de dureza não é, em alguns casos, um ensaio destrutivo, ou seja, o material não precisa sofrer fratura e não é excessivamente deformado a ponto de inutilizá-lo. Apenas uma pequena impressão fica como deformação. Outra vantagem do ensaio de dureza fica por conta do baixo custo dos equipamentos.

Dentre os métodos conhecidos para a aquisição do valor de dureza destacam-se a dureza Rockwell e a dureza Brinell.

### 2.4.1 Dureza Rockwell

Os ensaios Rockwell constituem o método mais comumente utilizado para medir a dureza, pois são muito simples de executar e não exigem quaisquer habilidades especiais. Várias escalas diferentes podem ser aplicadas a partir de combinações possíveis de vários penetradores e diferentes cargas, que permitem o ensaio de virtualmente todas as ligas metálicas e alguns polímeros (CALLISTER, 2015).

Os penetradores podem ser de esferas endurecidas com diâmetros de 1/16, 1/8, 1/4 e 1/2 de polegada e um penetrador de diamante com formato cônico, utilizado para os materiais mais duros.

A tabela 2.3 mostra as escalas de dureza Rockwell.

Tabela 2.3 – Escalas de dureza Rockwell.

<i>Símbolo da Escala</i>	<i>Penetrador</i>	<i>Carga Principal (kg)</i>
A	Diamante	60
B	Esfera com $\frac{1}{16}$ in	100
C	Diamante	150
D	Diamante	100
E	Esfera com $\frac{1}{8}$ in	100
F	Esfera com $\frac{1}{16}$ in	60
G	Esfera com $\frac{1}{16}$ in	150
H	Esfera com $\frac{1}{8}$ in	60
K	Esfera com $\frac{1}{8}$ in	150

Fonte: CALLISTER, 2015.

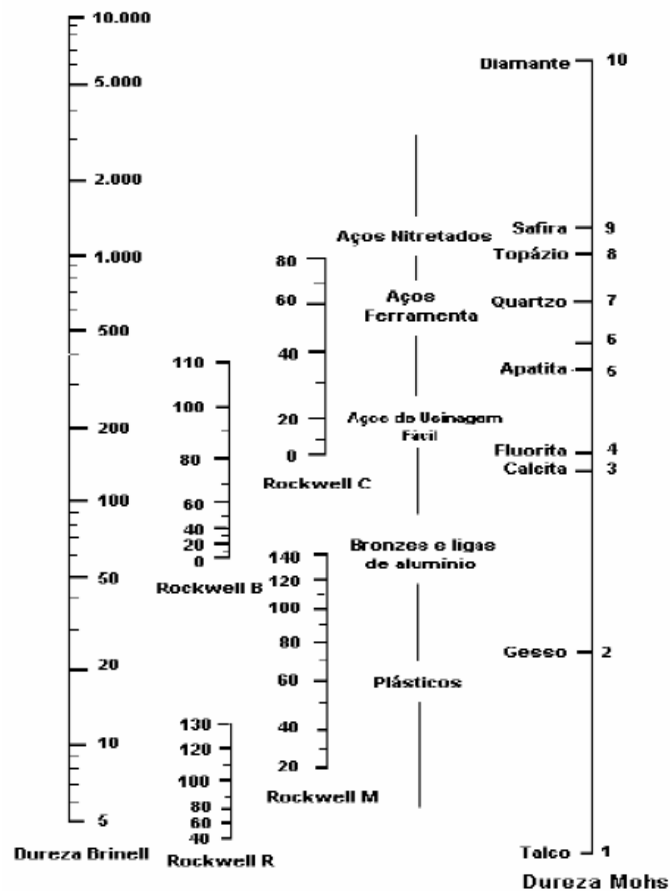
Pode haver imprecisões quando o corpo de provas é muito fino ou se uma impressão é feita muito próxima a borda ou se duas impressões são feitas muito próximas uma da outra (CALLISTER, 2015).

#### 2.4.2 Dureza Brinell

O ensaio de dureza Brinell é semelhante ao ensaio de dureza Rockwell. Um penetrador composto por uma esfera endurecida é forçado contra a superfície de uma peça ou material a ser testado.

É possível converter uma medida de dureza obtida em uma escala para um valor de dureza em outra escala porém esse sistema de conversão não é abrangente, pois as técnicas apresentam diferenças experimentais. A figura 2.15 apresenta uma comparação entre algumas escalas de dureza.

Figura 2.15 – Comparação entre várias escalas de dureza.



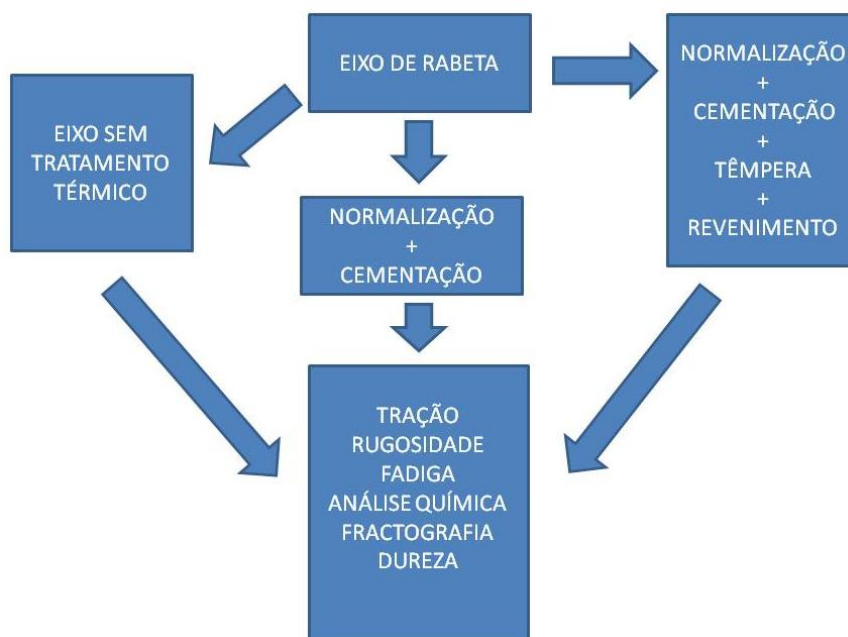
Fonte: CALLISTER, 2015.

As exigências de espessura máxima do corpo de provas, posição de impressão, espaçamento mínimo para impressão são as mesmas utilizadas nos ensaios Rockwell (CALLISTER, 2015).

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para a realização deste trabalho foram utilizados, como base de estudo, três eixos de rabeta produzidos em aço carbono adquiridos no comércio local da região portuária de Belém-Pará. A partir desses eixos foram fabricados os corpos de prova os quais foram submetidos aos tratamentos térmicos, ensaios mecânicos e análise de fratura com auxílio de microscopia. A figura 3.1 mostra o fluxograma de atividades deste trabalho.

Figura 3.1 – Fluxograma de atividades.



Fonte: Próprio Autor.

#### 3.1 CORPOS DE PROVA

Foram fabricados corpos de prova para ensaios de fadiga flexo-rotativa e corpos de prova para ensaios de tração. Ambos foram fabricados por processo de usinagem utilizando um torno mecânico semi-automático da marca ROMI TORMAX 20 como mostrado na figura 3.2.



Figura 3.2 – Torno semi-automático ROMI TORMAX 20.



Fonte: Próprio Autor.

A ferramenta utilizada na fabricação dos corpos de prova foi de metal duro para garantir uma melhor superfície de acabamento, influenciando, assim, na rugosidade da superfície do corpo de prova.

Os eixos adquiridos no comércio da região portuária da cidade de Belém no estado do Pará podem ser observados na figura 3.3:

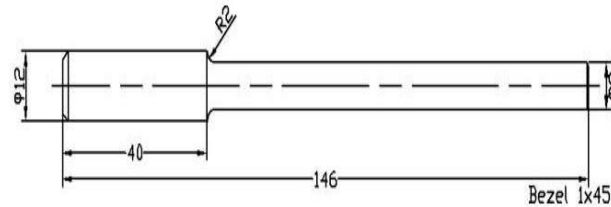
Figura 3.3 – Eixos de rabeta para a fabricação dos corpos de prova.



Fonte: Próprio Autor.

Para o ensaio de fadiga flexo-rotativa, o corpo de prova obedeceu as seguintes dimensões mostradas na figura 3.4, conforme a norma ASTM E606-04.

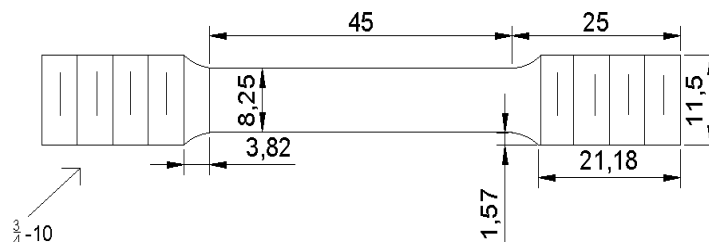
Figura 3.4 – Dimensões do corpo de prova para ensaio de fadiga flexo-rotativa.



Fonte: Manual Fatigue Testing Maschine (Gunt Hamburg).

Para o ensaio de tração as dimensões dos corpos de prova são apresentados na figura 3.5 abaixo.

Figura 3.5 – Dimensões do corpo de prova para o ensaio de tração.



Fonte: Teixeira, 2017.

Após a sua fabricação, segundo a norma NBR ABNT 6892-2002, os corpos de prova foram submetidos ao tratamento térmico de normalização, utilizado para um refinamento dos grãos proporcionando uma distribuição mais uniforme nos tamanhos dos grãos.

## 3.2 TRATAMENTOS TÉRMICOS

### 3.2.1 Normalização

O tratamento térmico de normalização tem como objetivo o refino dos grãos apresentando-os de forma mais homogênea facilitando a difusão do carbono no aço durante o tratamento térmico de cementação em caixa.

O equipamento utilizado para os tratamentos térmicos foi um forno mufla da marca JUNG modelo 9612, do curso técnico em mecânica do Instituto Federal do Pará (IFPA), conforme a figura 3.6.

Figura 3.6 – Forno mufla para tratamentos térmicos JUNG.



Fonte: Próprio Autor.

Para o tratamento térmico de normalização o forno foi aquecido até a temperatura de 900°C e após a sua estabilização foram colocados os corpos de prova para o ensaio de tração e os corpos de prova para o ensaio de fadiga. Os corpos de prova permaneceram no forno durante o período de 1 hora. Em seguida foram retirados para o resfriamento a temperatura ambiente.

### 3.2.2 Cementação

Após passarem pelo tratamento térmico de normalização, os corpos de prova usinados foram submetidos ao tratamento termoquímico de cementação.

Para este procedimento foi utilizado o método de cementação sólida ou cementação em caixa. Os corpos de prova foram colocados em uma caixa metálica juntamente com a substância rica em carbono como mostra a figura 3.7. Para o tratamento térmico de cementação em caixa o forno foi aquecido a 955°C e após a sua estabilização foi colocada a caixa metálica contendo a substância rica em carbono e os corpos de prova de tração e fadiga, onde permaneceram durante 5 horas.

Figura 3.7 – Caixa metálica com granulado de carbono.



Fonte: Próprio Autor.

O princípio fundamental para o processo de cementação em caixa se baseia em reações termoquímicas dos gás monóxido de carbono ( $\text{CO}$ ) com a microestrutura na fase austenítica do aço ( $\text{Fe } \gamma$ ) onde ocorre, em altas temperaturas, a difusão do carbono no aço a partir da superfície para o centro do material.

### 3.2.3 Têmpera

O tratamento térmico de têmpera consiste no aquecimento do aço até a temperatura onde aparece a fase austenita, em seguida é necessário um resfriamento rápido para a obtenção da estrutura martensita, responsável pela elevação da dureza do material.

Após o tratamento de cementação, onde o material foi enriquecido com carbono, foi feito o tratamento térmico de têmpera. Foram separados para esse tratamento oito corpos de prova para o ensaio de fadiga e um corpo de prova para o ensaio de tração conforme a figura 3.8.

Figura 3.8 – Corpos de prova para o tratamento de têmpera.



Fonte: Próprio Autor.

Para este tratamento térmico o forno foi aquecido a uma temperatura de 850°C e após a sua estabilização foram colocados os corpos de prova onde permaneceram durante 30 minutos. Passado esse tempo, os corpos de prova foram rapidamente retirados do forno e resfriados em óleo à temperatura ambiente (aproximadamente 27°C).

É necessário que o óleo utilizado para esse resfriamento esteja bem próximo a fonte de calor, para que haja sucesso na obtenção da dureza do material. A figura 3.9 mostra o reservatório de óleo bem abaixo do forno.

Figura 3.9 – Reservatório de óleo bem abaixo do forno.



Fonte: Próprio Autor.

Vale ressaltar que se deve tomar as precauções necessárias, como colocar os corpos de prova de maneira bem rápida no banho de óleo e atentar para que a quantidade de óleo no reservatório não seja insuficiente e aqueça muito rapidamente para que, no ato do resfriamento, o óleo não entre em combustão, podendo causar queimaduras graves ou incêndios.

### 3.2.4 Revenimento

O tratamento térmico de revenimento serve para aliviar as tensões no material, adquiridas no tratamento de têmpera.

Para o tratamento térmico de revenimento o forno foi aquecido a uma temperatura de 700°C e após a sua estabilização foram colocados os corpos de prova temperados, onde permaneceram durante o tempo de 1 hora. O resfriamento ocorreu a temperatura ambiente.

### 3.3 ENSAIO DE TRAÇÃO

O equipamento utilizado para este ensaio foi a máquina de ensaios universais da marca AROTEC WDW-100E presente no laboratório de ensaios dos materiais (IFPA) conforme a figura 3.10. Todos os ensaios de tração deste trabalho foram feitos com a velocidade de ensaio fornecido a máquina de 2,0 mm/min (milímetros por minuto). Posteriormente, os dados foram tratados utilizando o software ORIGIN 6.0.

Figura 3.10 – Máquina universal para ensaios AROTEC WDW-100E.



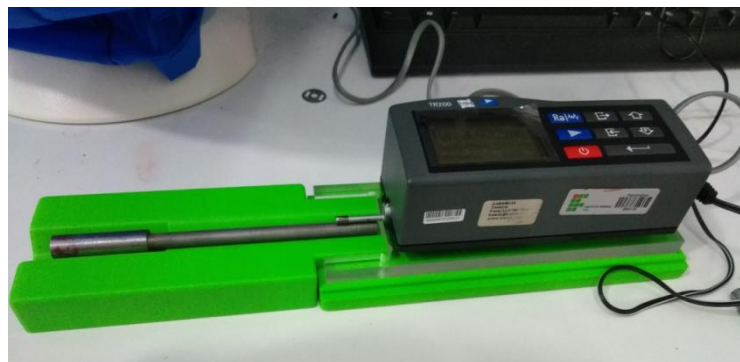
Fonte: Próprio Autor.

O objetivo deste ensaio é determinar a tensão de ruptura, a tensão de escoamento e a deformação total do corpo de prova.

### 3.4 RUGOSIDADE

Para a aquisição dos valores de rugosidade  $R_a$ , foi utilizado o rugosímetro digital TIME modelo TR200 do laboratório de inspeção do curso técnico em mecânica do IFPA-Campus Belém. Para essa aquisição de valores de rugosidade foi necessária a fabricação, em uma impressora 3D, de um dispositivo que serviu como base para os corpos de prova de para o ensaio de fadiga. A figura 3.11 mostra o rugosímetro digital, a base construída em polímero na impressora 3D e um corpo de prova para o ensaio de rugosidade.

Figura 3.11 – Rugosímetro, base de polímero e corpo de prova.



Fonte: Próprio Autor.

Na figura 3.11 ainda é possível observar o apalpador percorrendo a superfície do corpo de prova.

### 3.5 ENSAIO DE FADIGA

O ensaio de fadiga flexo-rotativa foi realizado em um equipamento da marca GUNT HAMBURG WP140 do laboratório de inspeção do curso de mecânica do Instituto Federal do Pará (IFPA). A figura 3.12 mostra o equipamento que foi utilizado no ensaio de fadiga.

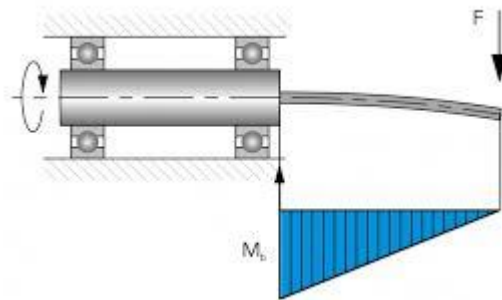
Figura 3.12 – Equipamento para ensaio de fadiga GUNT HAMBURG WP140.



Fonte: Próprio Autor

O princípio de funcionamento da máquina para este ensaio consiste na aplicação da carga na extremidade onde se encontra a célula de carga, oposta ao acionamento do motor elétrico do equipamento. A figura 3.13 mostra o comportamento do corpo de prova quando está submetido ao ensaio de fadiga no referido equipamento.

Figura 3.13 – Comportamento do corpo de prova submetido ao ensaio de fadiga.



Fonte: Manual Fatigue Testing Maschine (Gunt Hamburg).

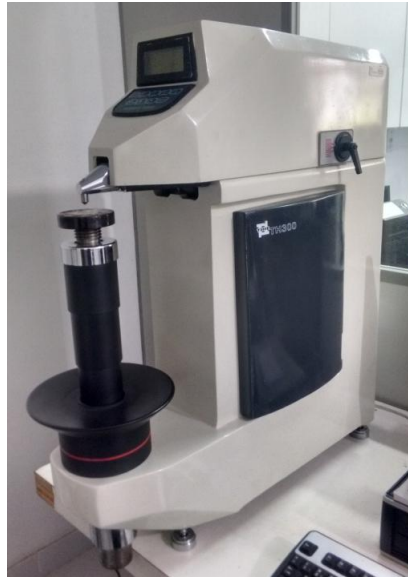
Após os ensaios de fadiga foi realizada a análise da superfície de fratura dos corpos de prova dos ensaios de fadiga, em estereoscópio da marca Carl Zeiss e analisadas no software Zeiss 2.0, a fim de se verificar elementos característicos de fratura por carga dinâmica, características dos ensaios de fadiga, sendo realizado em uma amostra para cada condição de aplicação de tensão.

### 3.6 DUREZA

Os ensaios de dureza Rockwell foram realizados no durômetro TIME modelo TH300 mostrado na figura 3.14, no laboratório de Inspeção do Curso Técnico em Mecânica do IFPA Campus Belém.



Figura 3.14 – Durômetro TIME TH300.



Fonte: Próprio Autor.

O durômetro para dureza Rockwell apresenta cargas de 60, 100 e 150kgf e indutores de esfera de aço temperado e indutor com ponta de diamante.

### 3.7 ANÁLISE FRACTOGRÁFICA

#### 3.7.1 Esteroscópio

A fractografia foi realizada com auxílio do Esteroscópio ZEISS STEMI 508 no laboratório de Inspeção do Curso Técnico em Mecânica do IFPA Campus Belém.

Figura 3.15 – Esteroscópio ZEISS STEMI 508.



Fonte: Próprio Autor.

### 3.7.2 Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV)

Para a fractografia foi utilizado também o microscópio eletrônico de varredura (MEV), que produz imagens de alta resolução das superfícies de fratura dos corpos de prova.

O MEV, marca TESCAN modelo Vega 3, utilizado pertence ao curso de Engenharia de Materiais do IFPA Campus Belém e pode ser observado na figura 3.16.

Figura 3.16 – Microscópio Eletrônico de Varredura.



Fonte: Próprio Autor.

Este mesmo equipamento, MEV, foi responsável pela espectroscopia de energia dispersiva (EDS), que através de uma varredura na superfície do material fornece a composição química do mesmo.

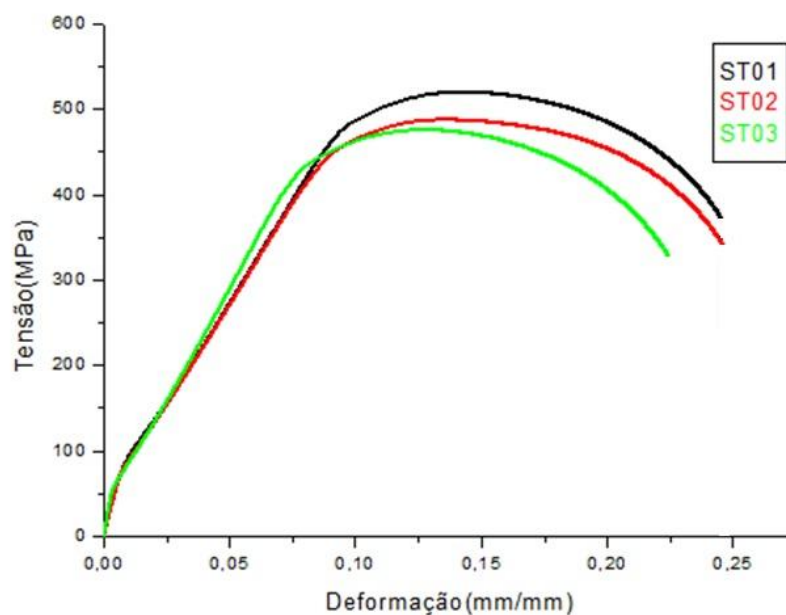
## 4 RESULTADOS E DISCURSÕES

### 4.1 ENSAIO DE TRAÇÃO

#### 4.1.1 Corpos de prova sem tratamento térmico(ST)

Foram submetidos ao ensaio de tração três corpos de prova sem tratamento térmico. As curvas obtidas, após o tratamento dos dados, podem ser vistas na figura 4.1.

Figura 4.1 – Curvas para os corpos de prova ST01, ST02 e ST03.



Fonte: Próprio Autor.

Na tabela 4.1 encontram-se os valores obtidos, através do tratamento de dados e análise das curvas obtidas, para os corpos de prova sem tratamento térmico.

Tabela 4.1 – Valores para os corpos de prova ST (Sem Tratamento).

VALORES DO ENSAIO DE TRAÇÃO PARA OS CORPOS DE PROVA SEM TRATAMENTO TÉRMICO						
CP	Descrição	Diâmetro (mm)	Área (mm <sup>2</sup> )	Limite Escoamento (Mpa)	Limite Resistência (Mpa)	Deformação (mm/mm)
1	ST	8,25	50,2655	446	519,04	0,24795
2	ST	8,25	50,5171	430	487,35	0,248774
3	ST	8,25	50,3912	428	475,47	0,226876

Fonte: Próprio Autor.

A figura 4.2 mostra os corpos de prova sem tratamento térmico após o ensaio de tração.

Figura 4.2 – Corpos de prova ST após o ensaio de tração.



Fonte: Próprio Autor.

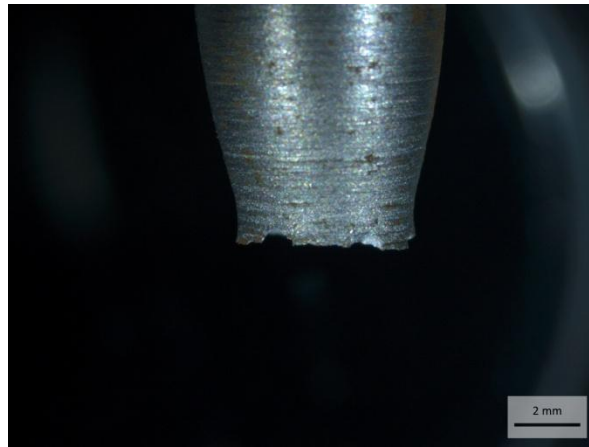
Considerando a semelhança no modelo das curvas e nos valores obtidos a partir das análises feitas, as figuras 4.3(a), figura 4.3(b) e figura 4.3(c) mostram a fractografia, obtida no estereoscópio, no corpo de prova ST número 3.

Figura 4.3(a) – Fractografia do corpo de prova ST03.



Fonte: Próprio Autor.

Figura 4.3(b) - Fractografia do corpo de prova ST03 destacando o perfil de fratura dúctil na amostra superior.



Fonte: Próprio Autor.

Figura 4.3(c) - Fractografia do corpo de prova ST03 destacando o perfil de fratura dúctil na amostra inferior.



Fonte: Próprio Autor.

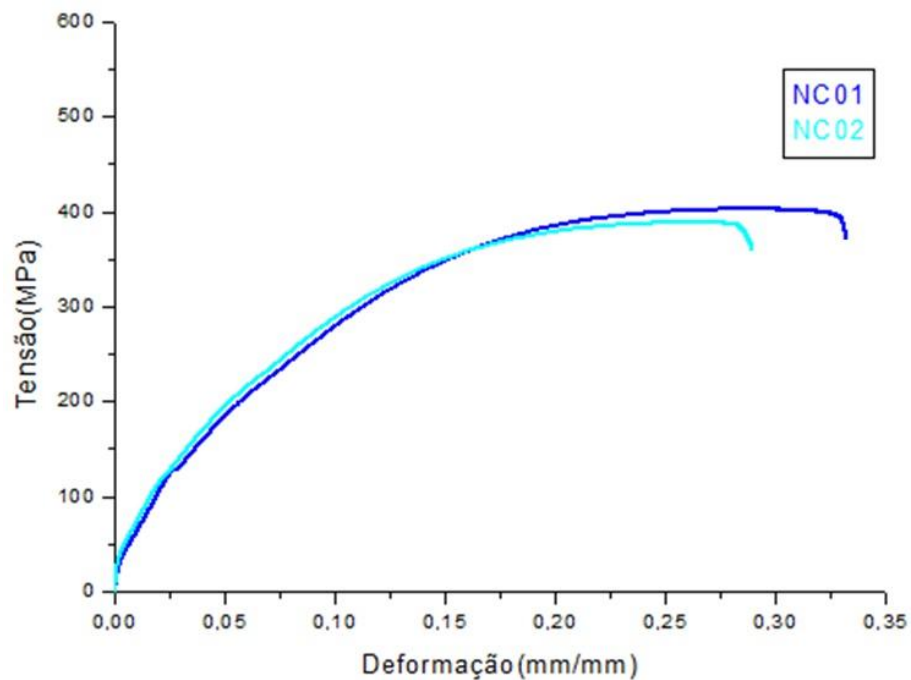
As curvas obtidas, para os corpos de prova sem tratamento térmico, através do ensaio de tração mostram um limite de resistência bem elevado. Certamente o material dos corpos de prova foi fabricado por um processo de conformação mecânica. Ainda assim, é possível observar, nos corpos de prova após o ensaio de tração, as características de fratura dúctil.

Neste caso, também, as curvas obtidas no ensaio de tração, para os corpos de prova sem tratamento térmico, não apresentam, de forma visível, o limite de escoamento sendo necessária a utilização do método da pré-deformação de 0,002, em conformidade com a norma NBR ISO 6892-2002 que trata do ensaio de tração para materiais metálicos à temperatura ambiente.

#### 4.1.2 Corpos de prova normalizados/cementados (NC)

Foram ensaiados na máquina de tração dois corpos de prova que sofreram tratamento de normalização e posteriormente o tratamento termoquímico de cementação. As curvas obtidas após o tratamento dos dados podem ser vistas na figura 4.4.

Figura 4.4 – Curvas para os corpos de prova NC01 e NC02.



Fonte: Próprio Autor.

Na tabela 4.2 encontram-se os valores obtidos, através do tratamento de dados e análise das curvas obtidas, para os corpos de prova normalizados/cementados.

Tabela 4.2 – Valores para os corpos de prova NC.

<b>VALORES DO ENSAIO DE TRAÇÃO PARA OS CORPOS DE PROVA NORMALIZADOS E CEMENTADOS</b>						
<b>CP</b>	<b>Descrição</b>	<b>Diâmetro (mm)</b>	<b>Área (mm<sup>2</sup>)</b>	<b>Limite Escoamento (Mpa)</b>	<b>Limite Resistência (Mpa)</b>	<b>Deformação (mm/mm)</b>
1	NC	8,25	50,2655	129	402,26	0,3375
2	NC	8,25	50,2655	127	388,33	0,2951

Fonte: Próprio Autor.

A figura 4.5 mostra os corpos de prova NC após o ensaio de tração.

Figura 4.5 – Corpos de prova NC após o ensaio de tração.

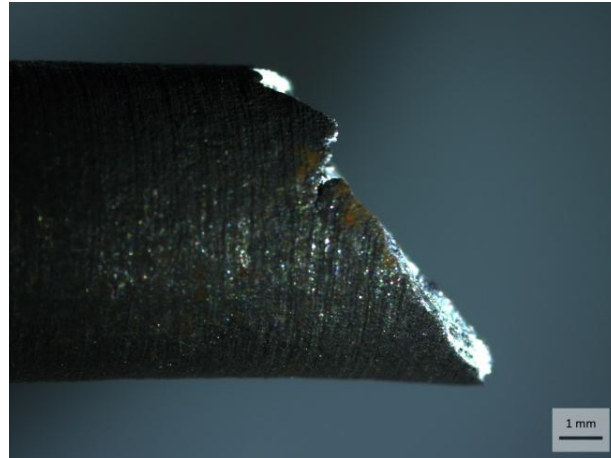


Fonte: Próprio Autor.

Quando se observa as curvas geradas, a partir do ensaio de tração, para os corpos de prova NC, é possível saber, na curva, o ponto exato onde se encontra o limite de escoamento do corpo de prova, excluindo-se nesse caso, a necessidade do uso do método da pré-deformação de 0,002. É possível, também, verificar uma diminuição no valor do limite de resistência a tração em comparação com os corpos de prova ST. É possível que essa diminuição no valor do limite de resistência tenha causa no tratamento térmico de normalização, anterior ao tratamento termoquímico de cementação. A normalização refinou os grãos do material e aliviou suas tensões causadas pelo processo de conformação mecânica.

Apesar de uma diminuição no valor de resistência, observando a fratura do corpo de prova NC, há a presença de uma fratura a 45°, característica de uma fratura dúctil. A fratura acontece, praticamente, sem redução de seção visível como pode ser observado na figura 4.6(a), figura 4.6(b) e figura 4.6(c).

Figura 4.6(a) – Perfil de fratura frágil no corpo de prova NC01.



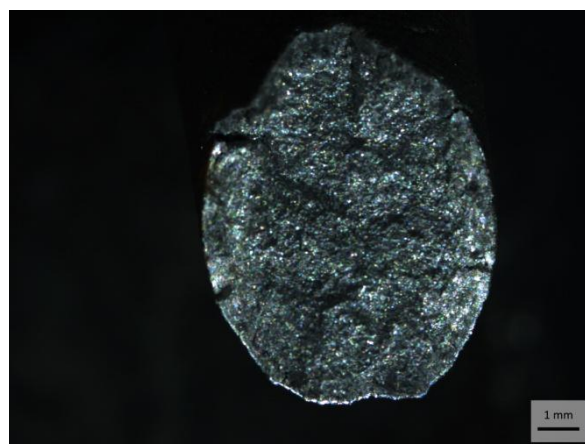
Fonte: Próprio Autor.

Figura 4.6(b) – Perfil de fratura frágil no corpo de prova NC01.



Fonte: Próprio Autor.

Figura 4.6(c) – Fratura no corpo de prova NC01 destacando a seção transversal da amostra.

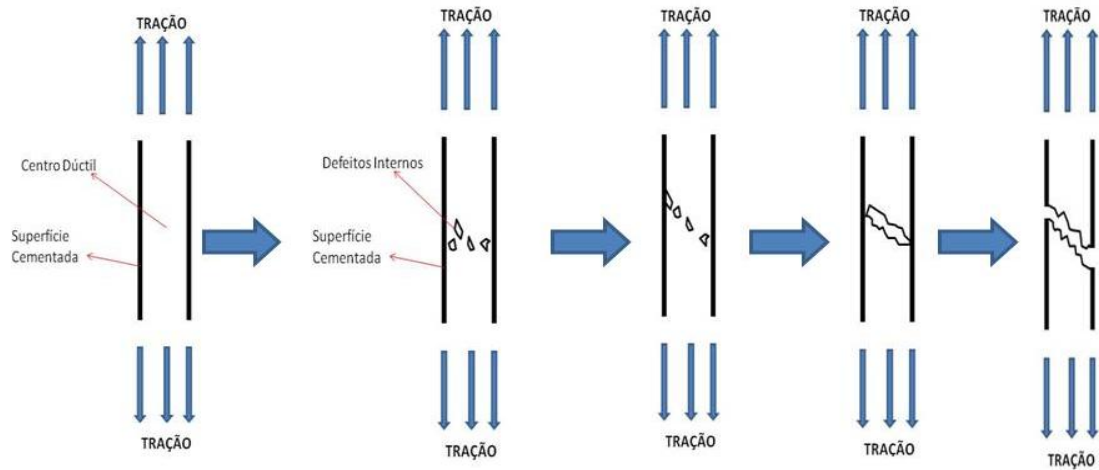


Fonte: Próprio Autor.



A figura 4.7 mostra um esquema da fratura ocorrida nos corpos de prova NC.

Figura 4.7 – Fratura dúctil a 45°.



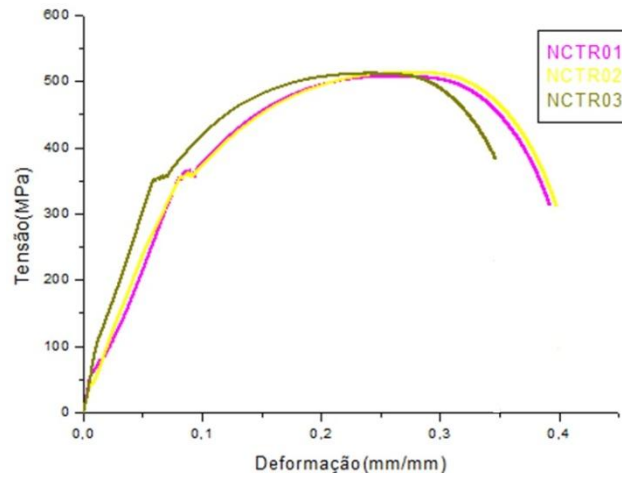
Fonte: Próprio Autor.

É possível observar no esquema que a superfície do corpo de prova teve sua resistência mecânica aumentada pelo processo de cementação mas o centro do material continua dúctil. Conforme é aplicada a tensão no ensaio de tração a superfície do material continua íntegra mas no centro começam a aparecer os primeiros defeitos internos até se ordenarem a 45°. Em seguida, o centro dúctil do material se rompe antes do rompimento da superfície. Deste modo não se observa a deformação típica da fratura dúctil por conta de a superfície do material apresentar maior resistência mecânica que o centro dúctil.

#### 4.1.3 Corpos de prova normalizados/cementados/temperados/revenidos (NCTR)

O ensaio de tração para este caso foi realizado em um corpo de prova e após o tratamento dos dados obtidos, foi gerada a curva para o corpo de prova NCTR. A curva é mostrada na figura 4.8.

Figura 4.8 – Curva para o corpo de prova NCTR01.



Fonte: Próprio Autor.

A tabela 4.3 mostra os valores obtidos após a análise da curva e do tratamento dos dados.

Tabela 4.3 – Valores para o corpo de prova NCTR01.

<b>VALORES DO ENSAIO DE TRAÇÃO PARA O CORPO DE PROVA NORMALIZADO, CEMENTADO, TEMPERADO E REVENIDO</b>						
<b>CP</b>	<b>Descrição</b>	<b>Diâmetro (mm)</b>	<b>Área (mm<sup>2</sup>)</b>	<b>Limite Escoamento (Mpa)</b>	<b>Limite Resistência (Mpa)</b>	<b>Deformação (mm/mm)</b>
1	NCTR	8,25	50,2655	353	526	0,3851
2	NCTR	8,25	50,2655	352	525	0,3973
3	NCTR	8,25	50,2655	351	524	0,3497

Fonte: Próprio Autor.

É possível observar na figura 4.8 as condições dos corpos de prova NCTR após o ensaio de tração.

Figura 4.9 – Corpos de prova NCTR após o ensaio de tração.

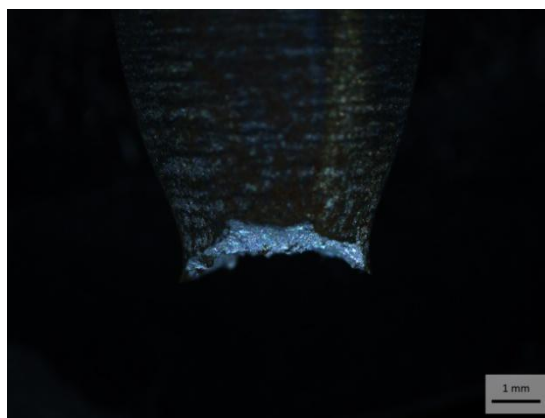


Fonte: Próprio Autor.

A análise da curva obtida no ensaio de tração para o corpo de prova NCTR mostra uma semelhança no que diz respeito ao valor do limite de resistência em comparação aos resultados obtidos nos corpos de prova NC. As diferenças estão nos valores de limite escoamento e alongamento total. Ao observar a curva referente ao corpo de prova NCTR é possível encontrar com muita facilidade o limite de escoamento pois a curva apresenta de forma bem definida.

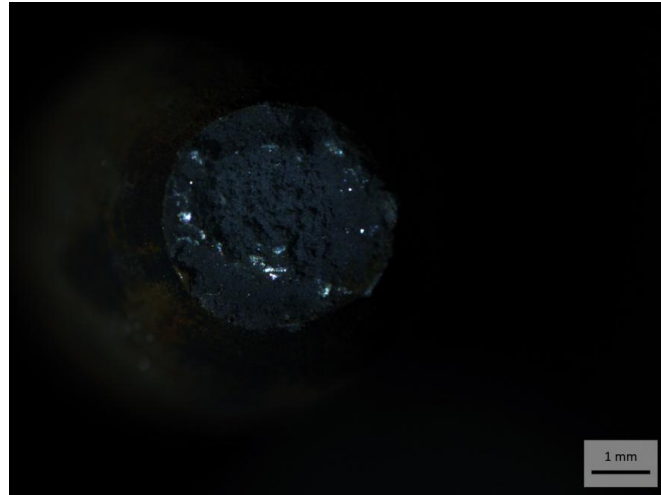
Fazendo uma análise do corpo de prova, na figura 4.10(a) e figura 4.10(b), após o ensaio de tração, com a fractografia feita no estereoscópio, é possível observar que o corpo de prova apresenta uma característica de fratura dúctil no local da ruptura.

Figura 4.10(a) – Perfil de fratura dúctil no corpo de prova NCTR01 na amostra superior.



Fonte: Próprio Autor.

Figura 4.10(b) – Fratura no corpo de prova NCTR01 destacando o centro da amostra.

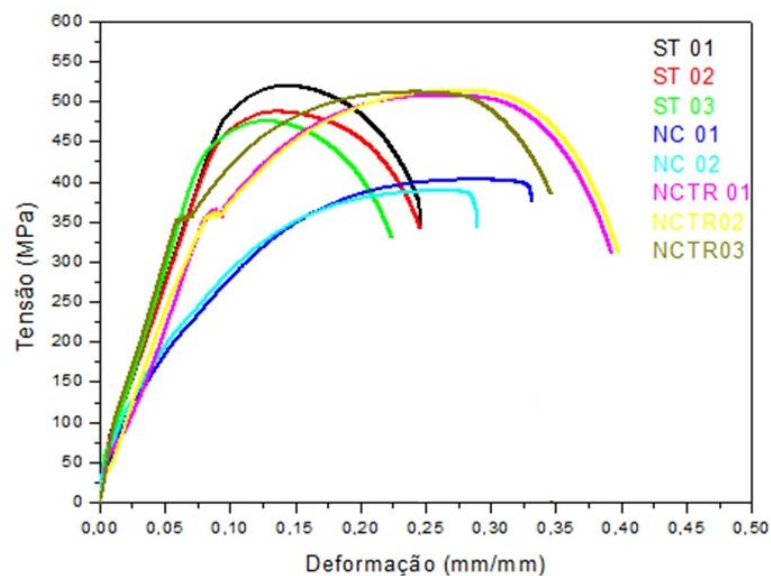


Fonte:Próprio Autor.

O objetivo da têmpera é endurecer o material, mas essas tensões causadas pelo tratamento de têmpera são aliviadas pelo tratamento térmico de revenimento. Isso explica o que está representado na curva de tração. Um aumento nos valores de limite de escoamento e na deformação total e o aspecto de fratura dúctil do corpo de prova no local da ruptura.

Na figura 4.11 é possível observar uma comparação nas curvas obtidas através do ensaio de tração para todos os corpos de prova.

Figura 4.11 – Comparação entre as curvas de tração.



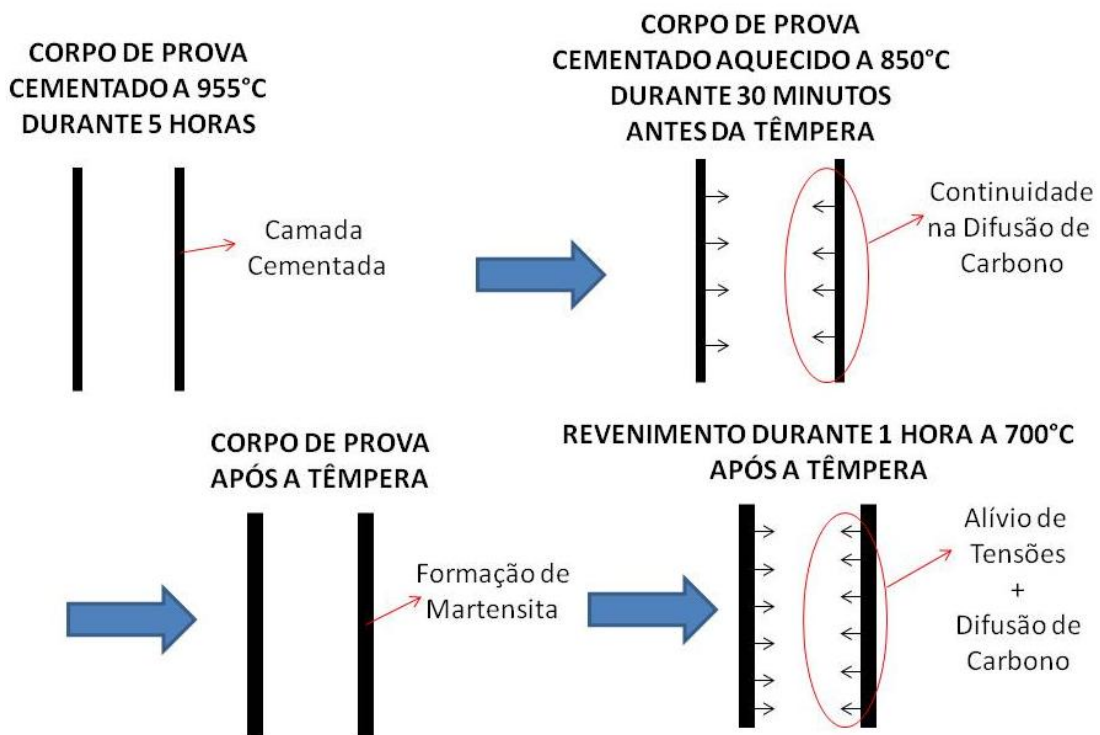
Fonte: Próprio Autor.

É possível observar uma grande diferença no desempenho das curvas levando em consideração os corpos de prova que não passaram pelo tratamento térmico de normalização,

os corpos de prova ST. Tal comportamento pode ser explicado pelo fato de o material ter sofrido um processo de conformação mecânica a frio onde sofre uma deformação plástica causando o encruamento, principalmente na trefilação, caracterizado pelo alongamento dos grãos no material.

No caso do corpo de prova NCTR tem-se um aumento no valor da tensão de escoamento mas apresenta, praticamente, o mesmo valor de limite de resistência a tração em relação ao corpo de prova ST. O esquema na figura 4.12 ilustra uma explicação para este fato.

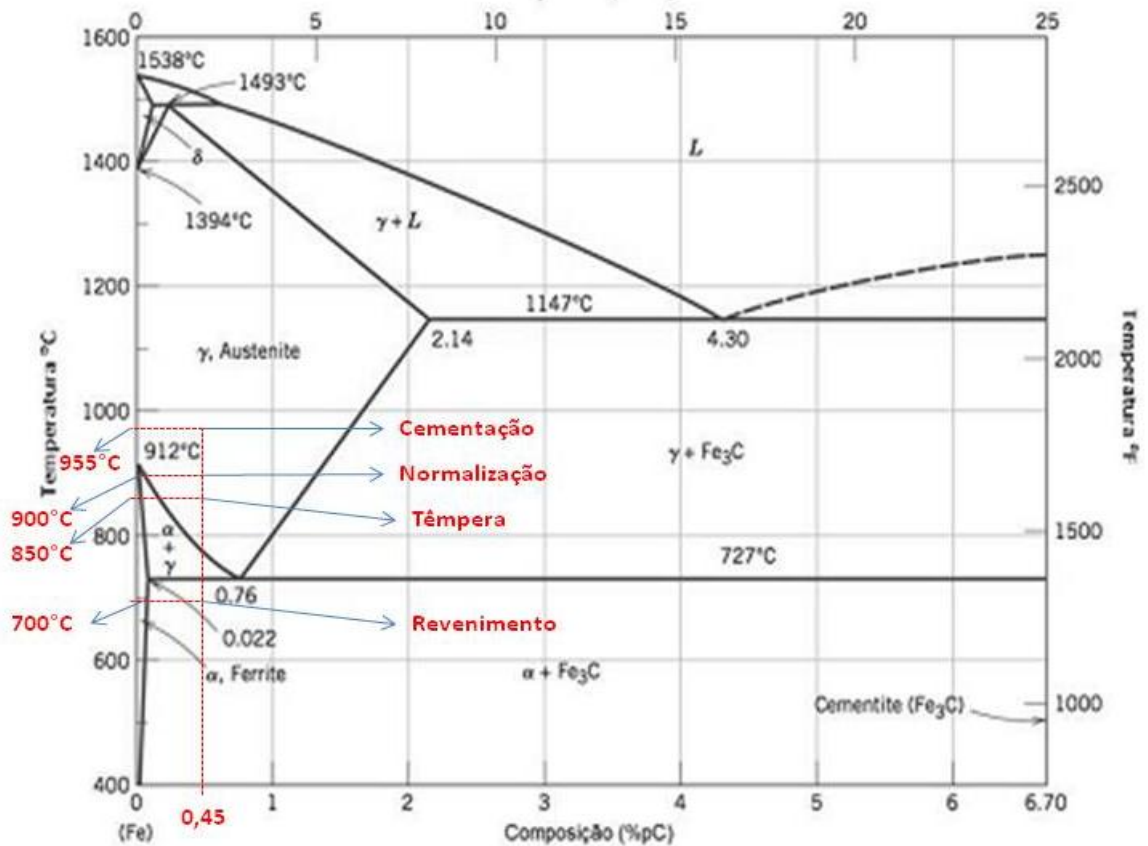
Figura 4.12 – Esquema de comparação entre corpos de prova NCTR e NC.



Fonte: Próprio Autor.

Os corpos de prova NCTR tiveram um tempo maior de exposição a altas temperaturas, cerca de 1 hora e 30 minutos a mais do que os corpos de prova NC. Nesse caso o carbono que foi acrescentado ao corpo de prova durante a cementação continuou se difundindo ou se homogeneizando no material durante o aquecimento para o tratamento térmico de têmpera e revenimento além da formação de martensita na superfície cementada. Esse fenômeno pode explicar também um aumento nos valores de dureza, principalmente, na superfície dos corpos de prova NCTR. Na figura 4.13 se pode observar um diagrama de fases com as temperaturas utilizadas para os tratamentos térmicos e termoquímico deste trabalho.

Figura 4.13 – Diagrama de fases com as temperaturas utilizadas.



Fonte: CALLISTER, 2002.(Adaptado)

Outro fato relevante é que a temperatura de revenimento fica abaixo da temperatura de austenitização, então provavelmente a martensita formada no tratamento térmico de têmpera não foi desfeita pelo revenimento.

## 4.2 RUGOSIDADE

Os valores de rugosidade  $R_a$ , foram obtidos para todos os corpos de prova utilizados no ensaio de fadiga flexo-rotativa.

Os corpos de prova ST, NC e NCTR passaram por um processo de lixamento com lixa de granulometria  $600\mu\text{m}$  antes da tomada dos valores de rugosidade superficial. Os valores de rugosidade superficial  $R_a$  obtidos em todos os corpos de prova, são mostrados nas tabelas 4.4(a), 4.4(b) e 4.4(c).

Tabela 4.4(a) – Valores de rugosidade Ra para os corpos de prova ST.

Unidade	ST 1	ST 2	ST 3	ST 4	ST 5	ST 6	ST 7	ST 8	ST 9	ST 10	ST 11	ST 12
Ra(μm)	3,192	2,491	2,299	1,266	1,676	3,367	4,202	1,918	3,642	1,278	2,949	1,594
Ra(μm)	2,529	2,270	2,402	1,489	1,538	3,517	3,734	1,657	4,242	1,479	3,162	1,941
Ra(μm)	2,995	2,030	2,559	1,117	1,941	3,685	3,910	1,614	3,923	1,684	3,073	1,738
Ra(μm)	2,373	2,352	2,259	1,365	1,952	3,932	3,780	2,062	4,157	1,351	2,452	1,692
Média	2,772	2,286	2,380	1,309	1,777	3,625	3,907	1,813	3,991	1,448	2,909	1,741
Desvio Padrão	385	193	134	157	204	242	211	214	269	178	317	146

Fonte: Próprio Autor.

Tabela 4.4(b) – Valores de rugosidade Ra para os corpos de prova NC.

Unidade	NC 1	NC 2	NC 3	NC 4	NC 5	NC 6	NC 7
Ra(μm)	1,506	2,405	1,928	2,376	2,365	1,376	1,657
Ra(μm)	1,707	3,570	2,037	1,504	2,146	1,561	1,956
Ra(μm)	2,333	2,173	1,804	2,171	2,857	2,560	2,536
Ra(μm)	2,057	3,288	1,987	1,984	3,511	1,862	1,680
Média	1,901	2,859	1,939	2,009	2,720	1,840	1,957
Desvio Padrão	367	675	100	373	606	520	409

Fonte: Próprio Autor.

Tabela 4.4(c) – Valores de rugosidade Ra para os corpos de prova NCTR.

Unidade	NCTR 1	NCTR 2	NCTR 3	NCTR 4	NCTR 5	NCTR 6	NCTR 7	NCTR 8
Ra(μm)	1,810	1,711	2,881	3,261	2,406	2,926	1,298	2,554
Ra(μm)	2,739	2,002	2,216	3,243	1,779	3,396	1,145	2,586
Ra(μm)	1,706	1,896	3,713	3,977	2,196	3,478	1,174	2,847
Ra(μm)	2,294	1,347	1,884	1,713	1,521	3,481	1,173	3,453
Média	2,137	1,739	2,674	3,049	1,976	3,320	1,198	2,860
Desvio Padrão	476	288	808	954	400	266	68	417

Fonte: Próprio Autor.

Os valores de rugosidade superficial Ra obtidos para todos os corpos de prova submetidos ao ensaio de fadiga, estão dentro dos parâmetros estabelecidos pela norma NBR 8404/1984 para a fabricação utilizando o processo de usinagem por torneamento.

### 4.3 FADIGA

Foram submetidos ao ensaio de fadiga flexo-rotativa cinco corpos de prova ST, cinco corpos de prova NC e cinco corpos de prova NCTR, conforme as figuras 4.14(a), 4.14(b) e 4.14(c), respectivamente.

Figura 4.14(a) – Corpos de prova ST após o ensaio de fadiga.



Fonte: Próprio Autor.

Figura 4.14(b) – Corpos de prova NC após o ensaio de fadiga flexo-rotativa.



Fonte: Próprio Autor.



Figura 4.14(c) – Corpos de prova NCTR após o ensaio de fadiga flexo-rotativa.



Fonte: Próprio Autor.

Os valores obtidos no ensaio de fadiga flexo-rotativa estão apresentados na tabela 4.5. O único valor fornecido à máquina de fadiga é o valor da tensão de escoamento obtida através do ensaio de tração. A máquina de fadiga fornece, como resultados, o número de ciclos o qual o corpo de prova sofre a fratura ou rompimento e o tempo que cada corpo de prova levou para romper em segundos (s).

Tabela 4.5 – Valores obtidos no ensaio de fadiga flexo-rotativa.

Natureza do Corpo de Prova	Tensão de Escoamento (MPa)	Corpos de Prova	Nº de Ciclos	Tempo de Ensaio (s)	Média de tempo(s)
ST	446	CP1	532	11	13,6
		CP2	619	12	
		CP3	651	12	
		CP4	684	13	
		CP5	1086	20	
NC	129	CP1	17129	295	391,6
		CP2	18418	316	
		CP3	20425	352	
		CP4	24518	422	
		CP5	33328	573	
NCTR	352	CP1	731	14	17
		CP2	735	14	
		CP3	763	14	
		CP4	827	15	
		CP5	1566	28	

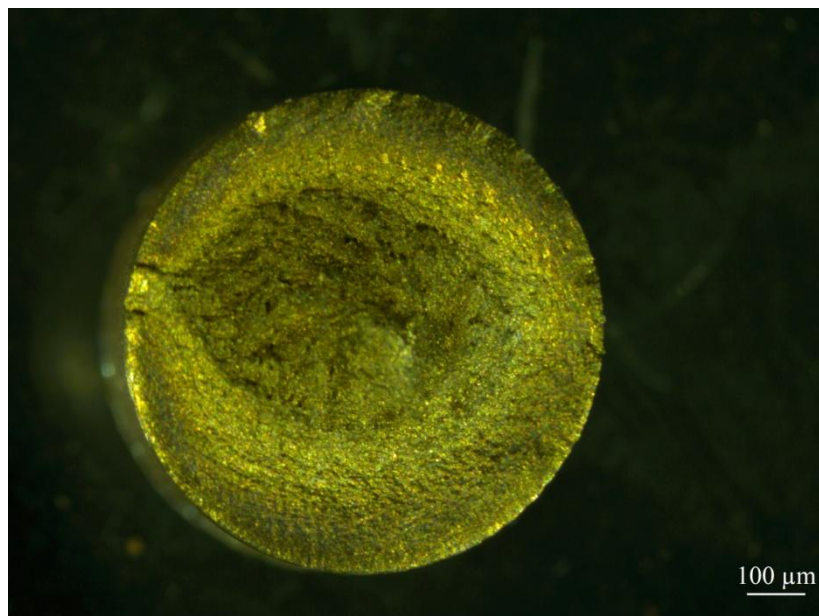
Fonte: Próprio Autor.

As tensões de escoamento utilizadas no ensaio de fadiga flexo-rotativa estão em MPa (Mega Pascal) e foram obtidas através do ensaio de tração para cada corpo de prova tratado termicamente e sem tratamento térmico. Os corpos de prova ST romperam numa média de 714,4 ciclos e numa média de tempo na ordem de 13,6 segundos. Os corpos de prova NC romperam numa média de ciclos bem maior na ordem de 22.763,6 ciclos e uma média de tempo na ordem de 391,6 segundos. E por último os corpos de prova NCTR romperam numa média de ciclos de 924,4 ciclos e numa média de tempo de 17 segundos.

#### 4.3.1 Fractografia

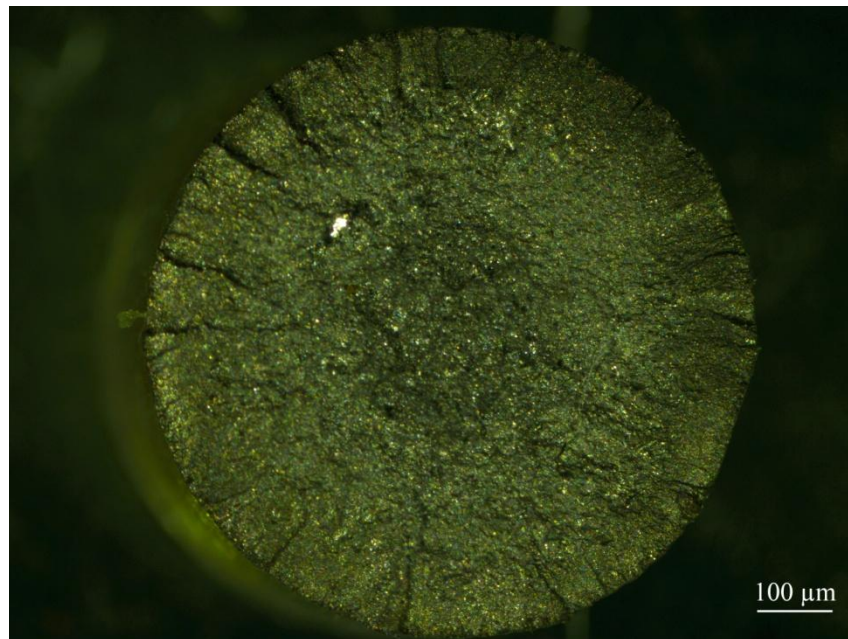
Após o ensaio de fadiga flexo-rotativa foram feitas as análises nas fraturas na seção transversal dos corpos de prova. Nelas, se pode observar, claramente, o início da fratura, na extremidade dos corpos de prova, até o momento onde há o rompimento brusco do material observado no centro da amostra. Os pontos marcados nas figuras 4.15(a), 4.15(b) e 4.15(c) mostram onde, exatamente, se iniciou a fratura, ocasionando a falha total dos corpos de prova ST, NC e NCTR, respectivamente.

Figura 4.15(a) – Fractografia da seção transversal de um corpo de prova ST após o ensaio de fadiga flexo-rotativa.



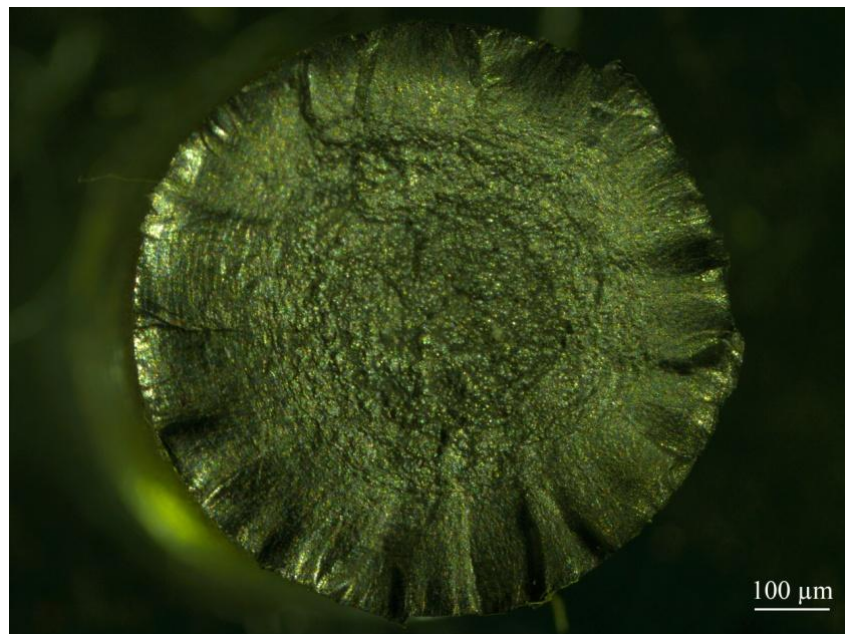
Fonte: Próprio Autor.

Figura 4.15(b) – Fractografia da seção transversal de um corpo de prova NC após o ensaio de fadiga flexo-rotativa.



Fonte: Próprio Autor.

Figura 4.15(c) – Fractografia da seção transversal de um corpo de prova NCTR após o ensaio de fadiga flexo-rotativa.

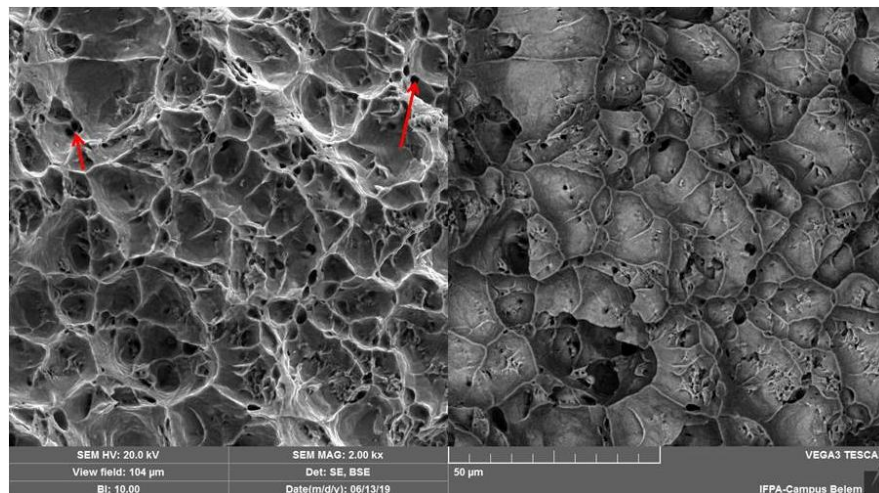


Fonte: Próprio Autor.

A coloração de tom amarelado, observada na figura 4.15(a), referente ao corpo de prova ST, traduz a elevada temperatura gerada pelo corpo de prova durante o ensaio de fadiga flexo-rotativa.

As amostras dos corpos de prova que passaram pelo ensaio de fadiga foram, também, analisadas utilizando o Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV). As análises das amostras ST, NC e NCTR apresentaram uma grande presença de porosidade, como podem ser vistas nas figuras 4.16(a), 4.16(b) e 4.16(c), onde as setas indentificam os poros no material, para os corpos de prova ST, NC e NCTR, respectivamente. Essa presença de porosidades se deve a qualidade dos materiais e dos métodos utilizados no processo de fabricação dos eixos.

Figura 4.16(a) – Fractografia de material ST no MEV.



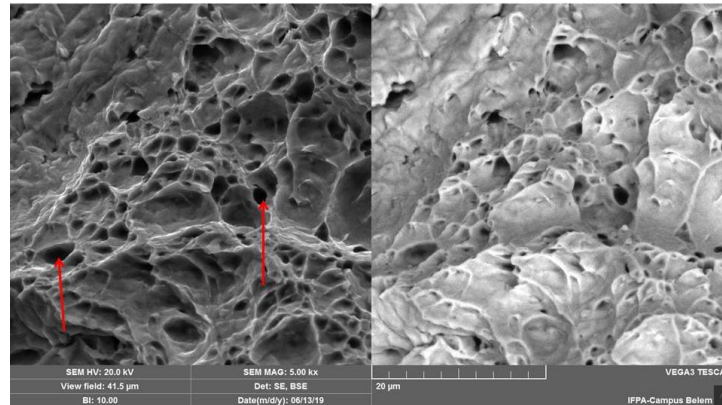
Fonte: Próprio Autor.

Figura 4.16(b) – Fractografia de material NC no MEV.



Fonte: Próprio Autor.

Figura 4.16(c) – Fractografia de material NCTR no MEV.



Fonte: Próprio Autor.

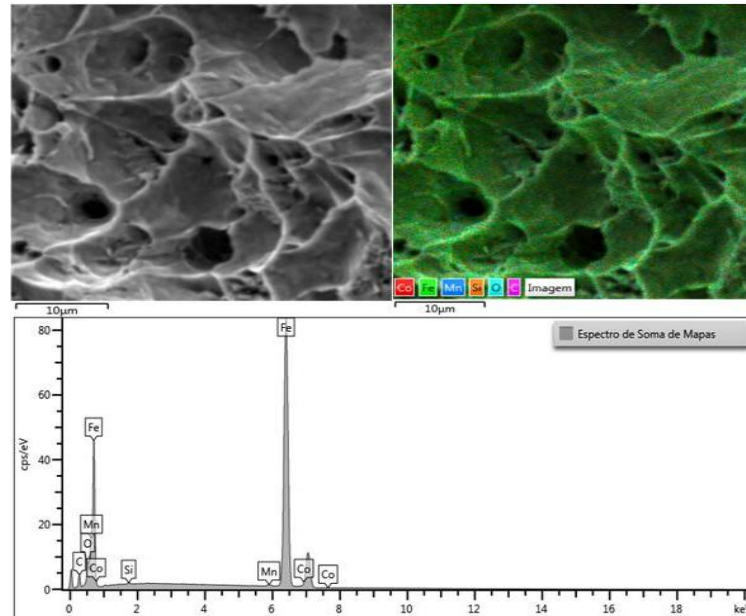
É possível observar nas imagens obtidas no MEV que todas tem características de fraturas dúcteis pela presença dos *dimples* ou alvéolos que podem ser causados por porosidades. É possível observar, também, que há uma diferença nas imagens da amostra do corpo de prova ST e da amostra do corpo de prova NC já que as duas imagens tem a mesma resolução de aumento que é de 2000 vezes. É possível que houve um crescimento de grãos nos corpos de prova que passaram pelo tratamento termoquímico de cementação.

#### 4.3.2 Análise Química

Os corpos de prova também foram submetidos a análise química pelo método de Espectroscopia por Energia Dispersiva (EDS), que atua na assinatura de absorção e emissão que cada elemento químico possui.

A figura 4.17 apresenta a análise através de EDS para uma amostra de um corpo de prova ST onde se pode observar uma grande quantidade de ferro na área analisada e uma baixa concentração de carbono.

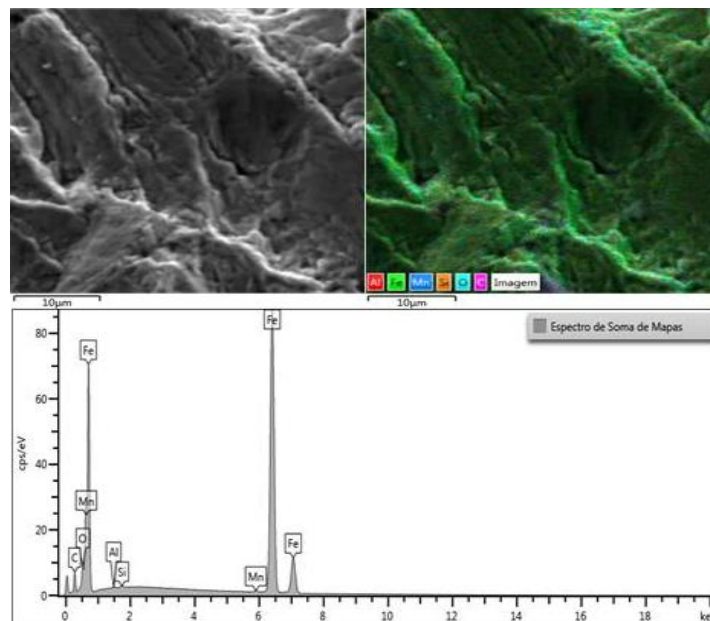
Figura 4.17 – Análise por EDS para um corpo de prova ST.



Fonte: Próprio Autor.

A análise por EDS para o corpo de prova NC pode ser observado na figura 4.18. Pelo resultado da análise se pode perceber um aumento na concentração de carbono na superfície analisada. Esse aumento da concentração de carbono se deve ao tratamento termoquímico de cementação.

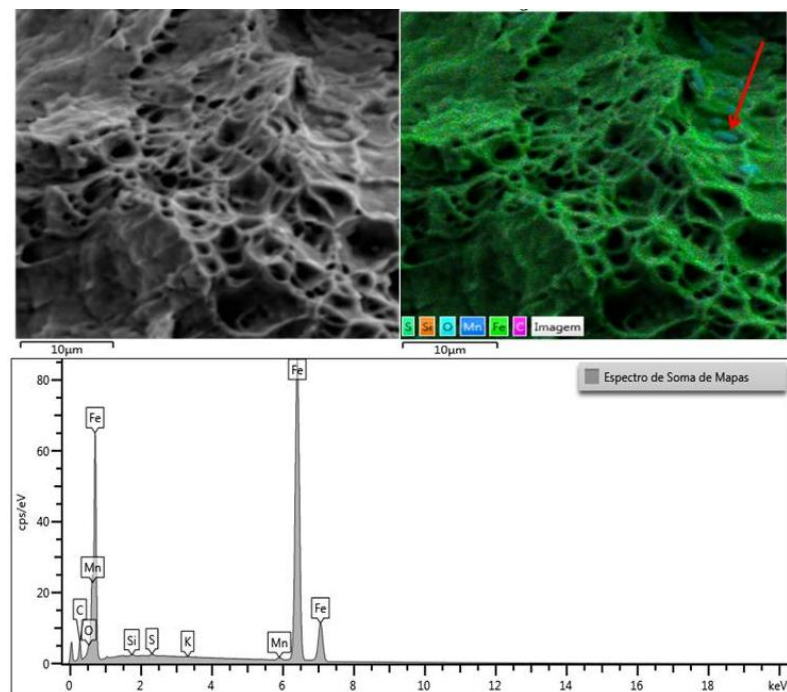
Figura 4.18 - Análise por EDS para um corpo de prova NC.



Fonte: Próprio Autor.

Na análise por EDS para o corpo de prova NCTR, mostrado na figura 4.19, observa-se que a concentração de carbono se manteve. Esse fato é facilmente explicado pelo fato de que os tratamentos térmicos de têmpera e revenimento não são tratamentos para a adição de carbono. A têmpera serve para a obtenção da martensita, que torna o material mais duro, e o revenimento serve para aliviar as tensões obtidas pelo tratamento de têmpera. A seta, na figura 4.19, indica pontos de concentração de silício e manganês. O manganês, nesse caso, é o responsável pelo aspecto dúctil da fratura.

Figura 4.19 - Análise por EDS para um corpo de prova NCTR.



Fonte: Próprio Autor.

A tabela 4.6 apresenta os valores de concentração de cada elemento químico encontrado pelo método de EDS nas zonas analisadas nas amostras de fratura dos corpos de prova ST, NC e NCTR, respectivamente. É possível perceber, nos valores da análise química para os corpos de prova NC e NCTR, que as concentrações de carbono e ferro continuam praticamente as mesmas nas áreas analisadas.

Tabela 4.6 – Análise química pelo método de EDS.

Corpo de Prova	Elemento	Concentração Aparente
ST	C	1,47
	O	3,33
	Si	0,06
	Mn	0,38
	Fe	84,1
	Co	0,28
NC	C	2,35
	O	3,57
	Al	0,06
	Si	0,1
	Mn	0,37
	Fe	86,98
NCTR	C	2,45
	O	1,56
	Si	0,07
	S	0,12
	K	0,05
	Mn	0,59
	Fe	85,59

Fonte: Próprio Autor.

Além da análise química por EDS, foi realizada, também, a análise química por espectrometria de fluorescência de raios-x (FRX) de três amostras de material sem tratamento térmico. Os resultados obtidos a partir dessa análise são apresentados na tabela 4.7. Nessa análise o carbono não é detectado pois os átomos de carbono são muito pequenos e podem ser apenas estimados.

Tabela 4.7 – Análise química FRX para amostras sem tratamento térmico.

<b>RESULTADOS (%)</b>			
Elemento	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3
Si	0,307	0,337	0,301
Ca	0,164	0,192	0,197
Cr	0,117	0,119	0,121
Mn	0,743	0,755	0,752
Fe	98,6	98,5	98,5

Fonte: Próprio Autor.

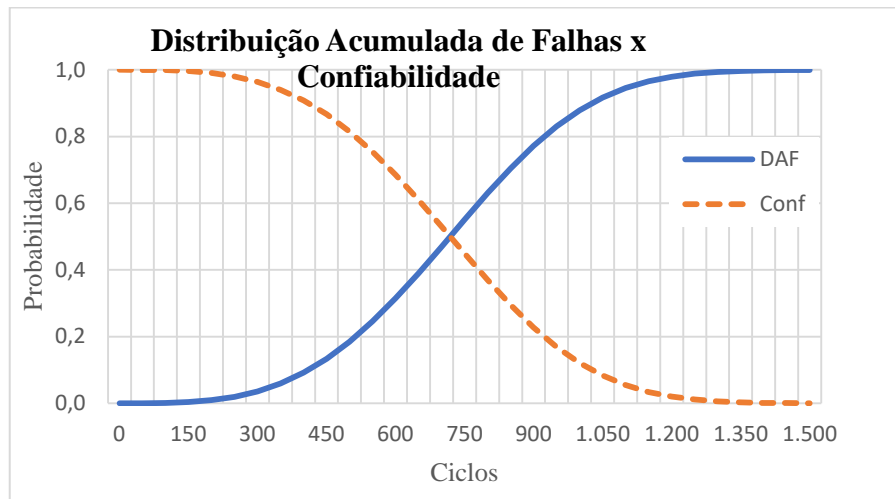


### 4.3.3 Análise de Falhas e Confiabilidade

Com base nos resultados obtidos a partir do ensaio de fadiga foi possível construir as curvas de Distribuição Acumulada de Falhas e Confiabilidade (APÊNDICE A). O eixo y representa a probabilidade de falha e o eixo x representa o número de ciclos. As curvas obtidas se interceptam no ponto 50% de probabilidade de falha para todos os corpos de prova submetidos ao ensaio de fadiga.

A figura 4.20(a) apresenta a curva de distribuição acumulada de falhas x confiabilidade para os corpos de prova ST onde se pode observar que o ponto onde as curvas se interceptam aproximadamente a 700 ciclos. Acima deste ponto a tendência de falha do material aumenta.

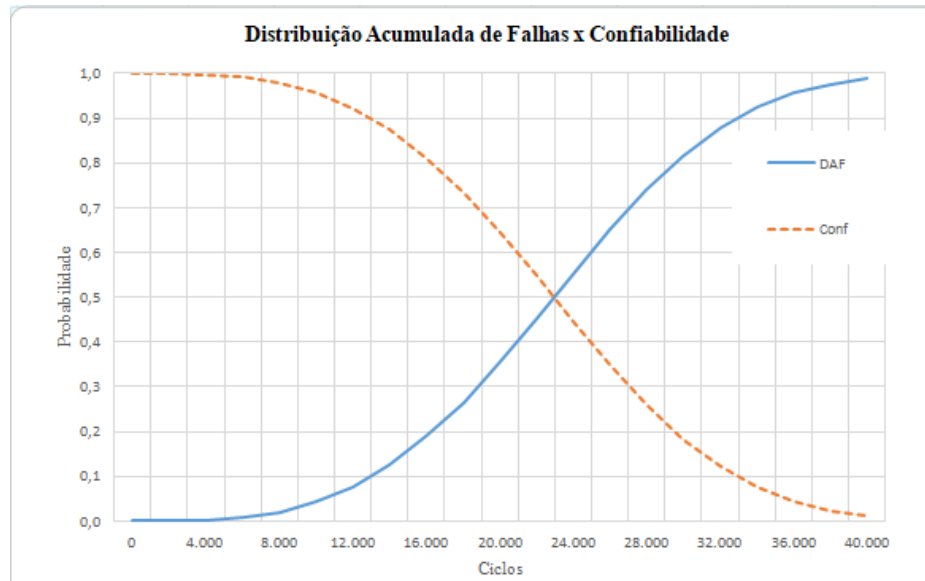
Figura 4.20(a) – Curva de DAF x Conf. para os corpos de prova ST.



Fonte: Próprio Autor.

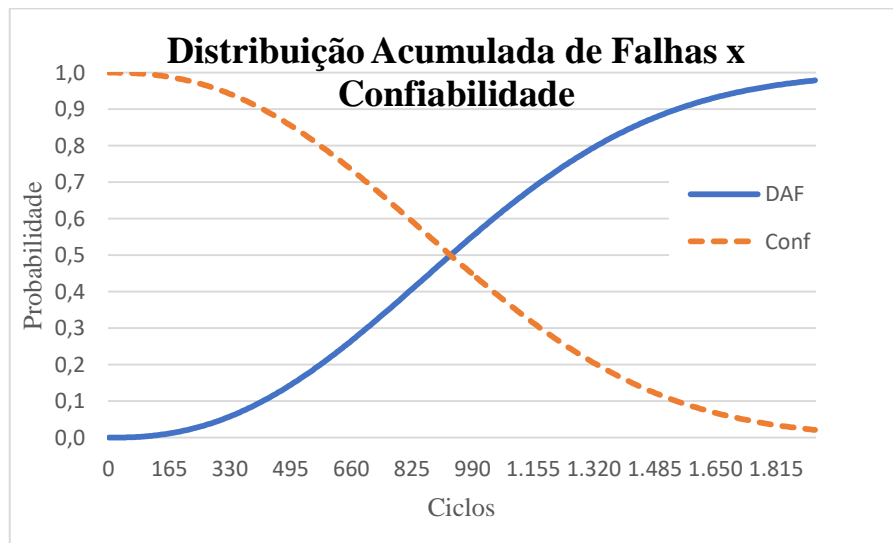
As figuras 4.20(b) e 4.20(C) apresentam as curvas de distribuição acumulada de falhas x confiabilidade para os corpos de prova NC e NCTR respectivamente. Neste caso, tem-se um aumento significativo na vida útil do material mais evidente nos corpos de prova NC onde se pode observar que as curvas se interceptam a, aproximadamente, 24000 ciclos enquanto para os corpos de prova NCTR as curvas se interceptam a, aproximadamente, 900 ciclos.

Figura 4.20(b) – Curva de DAF x Confiabilidade para os corpos de prova NC.



Fonte: Próprio Autor.

Figura 4.20(c) – Curva de DAF x Confiabilidade para os corpos de prova NCTR.



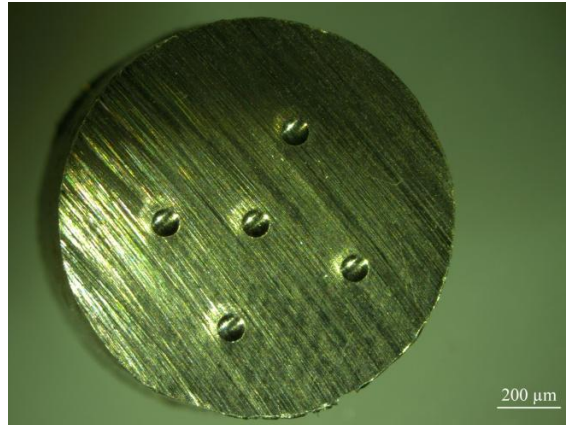
Fonte: Próprio Autor.

Através dos ensaios de fadiga nos corpos de prova ST, NC e NCTR foi possível detectar que todos os corpos de prova ficaram acima da zona de falha prematura do material.

#### 4.4 DUREZA

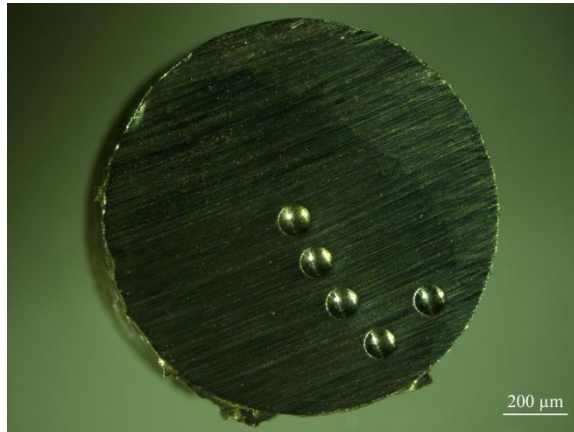
Para a realização do ensaio de dureza foram retiradas amostras dos corpos de prova submetidos ao ensaio de fadiga. Nas figuras 4.21(a), 4.21(b) e 4.21(c), observa-se as amostras dos corpos de prova ST, NC e NCTR submetidas ao ensaio de dureza, respectivamente.

Figura 4.21(a)– Corpo de prova ST submetido ao ensaio de dureza Rockwell B.



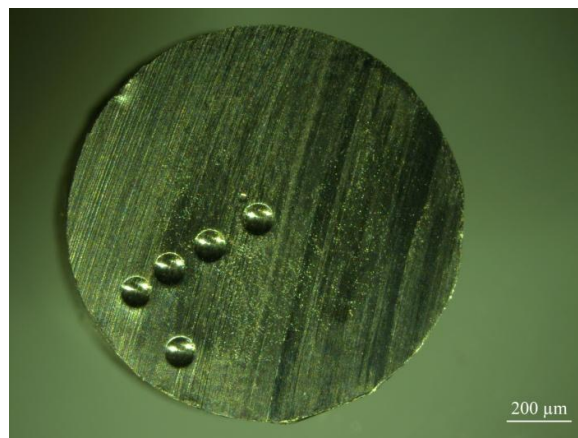
Fonte: Próprio Autor.

Figura 4.21(b) – Corpo de prova NC submetido ao ensaio de dureza Rockwell B.



Fonte: Próprio Autor.

Figura 4.21(c) – Corpo de prova NCTR submetido ao ensaio de dureza Rockwell B.



Fonte: Próprio Autor.

Os valores de dureza foram obtidos, primeiramente, na escala Rockwell B devido a baixa quantidade de carbono no aço das amostras dos corpos de prova. Os valores de dureza obtidos na escala Rockwell B (HRB) precisaram ser convertidos para os valores de dureza Brinell (HB) para, assim, serem comparados com os valores de dureza de aços comerciais. Foi utilizada uma tabela de conversão de durezas presente no Guia do Aço da Arcelor Mittal (2012) para a obtenção dos valores de dureza Brinell.

Os valores de dureza obtidos nos ensaios, para os corpos de prova ST, NC e NCTR, podem ser observados nas tabelas 4.8(a), 4.8(b) e 4.8(c) respectivamente.

Tabela 4.8(a) – Valores de dureza Rockwell B e dureza Brinell para os corpos de prova ST.

DUREZA ROCKWEL B PARA CORPOS DE PROVA ST NA SECÃO TRANSVERSAL								DUREZA BRINELL
	Carga(kgf)	HRB	HRB	HRB	HRB	HRB	MÉDIA	HB
CP1	100	84,7	85,2	87	82,2	85,8	84,98	152
CP2	100	81,8	78,9	83,8	81,9	81,6	81,6	143
CP3	100	78,4	78,7	83,9	84	85,8	82,16	152
CP4	100	79,7	83,9	83,7	84,3	84	83,12	152
CP5	100	83,4	84,6	85,1	85,5	86,4	85	162
DUREZA ROCKWEL B PARA CORPOS DE PROVA ST NA SUPERFÍCIE DO MATERIAL								DUREZA BRINELL
	Carga(kgf)	HRB	HRB	HRB	HRB	HRB	MÉDIA	HB
CP1	100	78,6	75,8	79,6	81,3	78,9	78,84	143
CP2	100	81	81,5	80,5	81,6	79,5	80,82	143
CP3	100	81,9	82	78,6	80,5	80,3	80,66	143
CP4	100	79,2	79,9	79,5	81,1	80,2	79,98	143
CP5	100	83,6	83,7	79,5	82,2	84	82,6	152

Fonte: Próprio Autor.

Tabela 4.8(b) – Valores de dureza Rockwell B e dureza Brinell para os corpos de prova NC.

DUREZA ROCKWEL B PARA CORPOS DE PROVA NC NA SECÃO TRANSVERSAL							MÉDIA	DUREZA BRINELL
	Carga(kgf)	HRB	HRB	HRB	HRB	HRB	HRB	HB
CP1	100	42,8	49,6	50,2	53,6	51,7	49,58	85,5
CP2	100	47,2	53,5	53,1	54,4	51,6	51,96	85,5
CP3	100	44,8	50,5	51,4	52	54,2	50,58	85,5
CP4	100	47,4	50,5	52	49,6	50,5	50	85,5
CP5	100	43,4	49,3	53,1	51,3	53,4	50,1	85,5
DUREZA ROCKWEL B PARA CORPOS DE PROVA NC NA SUPERFÍCIE DO MATERIAL							DUREZA BRINELL	
	Carga(kgf)	HRB	HRB	HRB	HRB	HRB	MÉDIA	HB
CP1	100	65,7	62,5	61,4	68,2	67,5	65,06	105
CP2	100	58,1	64,6	69,1	61,4	68,6	64,36	105
CP3	100	65,7	64,6	65,3	63,3	72,1	66,2	105
CP4	100	60,9	64,6	62,6	67	74,8	65,98	105
CP5	100	65,7	65,1	65	60,2	63,9	63,98	105

Fonte: Próprio Autor.

Tabela 4.8(c) – Valores de dureza Rockwell B e dureza Brinell para os corpos de prova NCTR.

DUREZA ROCKWEL B PARA CORPOS DE PROVA NCTR NA SECÃO TRANSVERSAL								DUREZA BRINELL
	Carga(kgf)	HRB	HRB	HRB	HRB	HRB	MÉDIA	HB
CP1	100	66,6	68,5	69,5	71,1	71,5	69,44	114
CP2	100	62,7	68,2	68,2	70	68,2	67,46	114
CP3	100	64,6	66,8	66,2	70,8	69,3	67,54	114
CP4	100	63,3	64,7	66,8	68,1	68,9	66,36	105
CP5	100	62,8	65,4	67	72,1	70,2	67,5	114
DUREZA ROCKWEL B PARA CORPOS DE PROVA NCTR NA SUPERFÍCIE DO MATERIAL								DUREZA BRINELL
	Carga(kgf)	HRB	HRB	HRB	HRB	HRB	MÉDIA	HB
CP1	100	81,1	81,7	79,3	83,6	91,4	83,42	152
CP2	100	84,9	81	83	82,8	83,7	83,08	152
CP3	100	79,7	81,6	82,1	82,5	80,8	81,34	143
CP4	100	79,5	78,7	75,8	77,2	82,2	78,68	133
CP5	100	77	73,8	75,6	77,4	77,8	76,32	133

Fonte: Próprio Autor.

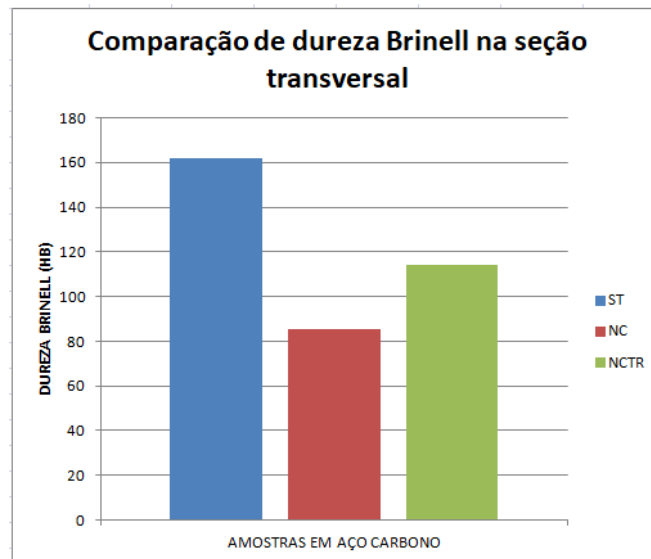
É possível observar, nas tabelas acima, que os valores de dureza correspondentes aos corpos de prova ST, na seção transversal, são maiores do que os valores de dureza obtidos nos corpos de prova NC e NCTR. Essa dureza elevada se dá pelo resultado do processo de conformação mecânica o qual o material foi submetido.

Dos corpos de prova que sofreram tratamentos térmicos, os corpos de prova NCTR apresentaram valores de dureza superiores aos valores de dureza obtidos nos corpos de prova NC, mesmo após o processo de revenimento.

A diminuição nos valores de dureza nos corpos de prova que sofreram tratamentos térmicos também é explicada pelo fato de, primeiramente, passarem pelo tratamento térmico de normalização, onde houve o refino dos grãos e alívio das tensões causadas pelo processo de conformação.

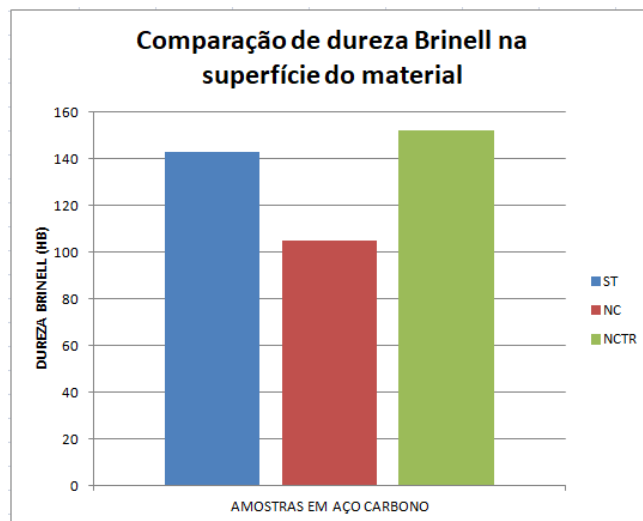
Nas figuras 4.22(a) e 4.22(b) é possível fazer uma comparação dos valores de dureza Brinell na seção transversal e na superfície dos corpos de prova.

Figura 4.22(a) – Comparação dos valores de dureza Brinell na seção transversal dos corpos de prova.



Fonte: Próprio Autor.

Figura 4.22(b) – Comparação dos valores de dureza Brinell na superfície dos corpos de prova.



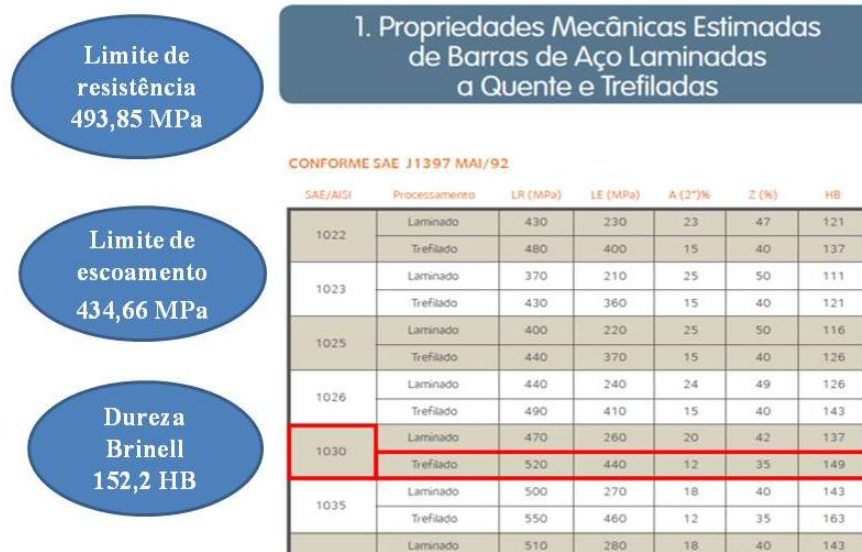
Fonte: Próprio Autor.

É possível observar, também, que há um aumento significativo nos valores de dureza na superfície dos corpos de prova NCTR devido aos tratamentos de cementação e têmpera.

A partir dos valores obtidos através dos ensaios mecânicos para a obtenção das propriedades mecânicas nos corpos de prova sem tratamento térmico, principalmente os ensaios mecânicos de tração e dureza, foi possível estimar, através das propriedades mecânicas, de qual aço carbono o eixo de rabeta comercializado é fabricado. Essa comparação foi possível com o auxílio do Guia do Aço da Arcelor Mittal (2012) que especifica aços

comerciais (ANEXO 1). Através dessa comparação foi possível estimar que o eixo de rabeta comercializado foi fabricado a partir de um aço SAE 1030 trefilado conforme a figura 4.23. Os balões indicam as médias dos valores obtidos através dos ensaios mecânicos de tração e dureza.

Figura 4.23 – Estimativa do aço utilizado na fabricação do eixo de rabeta.



Fonte: ARCELOR MITTAL, 2012. (Adaptado)

Nota-se que os valores obtidos nos ensaios e os valores apresentados na literatura são muito próximos, o que torna possível a estimativa do tipo de material utilizado no processo de fabricação do eixo adquirido.

## 5 CONCLUSÕES

Através deste trabalho, se pôde observar, com base nos ensaios mecânicos e nas análises químicas realizadas, principalmente, no material do eixo sem tratamento térmico, que é vendido no mercado local com as especificações de um aço carbono 1045, que há uma grande diferença nas especificações que são vendidas na teoria e as especificações que foram encontradas na prática. As dúvidas começaram a surgir desde o momento da fabricação dos corpos de prova onde se percebeu uma usinagem sem grandes dificuldades. O ensaio de tração no material sem tratamento térmico revelou valores menores para as especificações do aço carbono 1045. No limite de resistência a tração a diferença no valor encontrado no ensaio foi de aproximadamente 11,28% menor do que o valor de resistência a tração no aço carbono 1045. Outro fator de bastante relevância foi o ensaio de dureza realizado no material sem tratamento térmico do eixo de rabeta. Os valores de dureza encontrados são bem menores com relação ao valor de dureza do aço 1045. O ensaio de dureza foi realizado, primeiramente, na escala Rockwell C, mas não foi possível devido ao baixo teor de carbono no material do eixo. O ensaio de dureza só foi possível na escala Rockwell B, que é usada para dureza de aços com baixo teor de carbono. No caso da dureza, foi necessária a utilização de uma tabela de conversão onde os valores de dureza Rockwell B foram convertidos para valores de dureza Brinell, para a comparação de valores com aços comerciais. Através desse panorama se pôde concluir que o eixo de rabeta não é fabricado de aço 1045, como é comercializado. Mas através da comparação dos resultados com a literatura a respeito de aços comerciais é possível estimar que os eixos de rabeta são fabricados utilizando um aço SAE 1030 e conformados através do processo de trefilação.

Os corpos de prova que passaram por tratamentos térmicos apresentaram uma diferença nos valores após os ensaios mecânicos em relação aos corpos de prova não tratados termicamente, muito por conta do tratamento térmico de normalização, onde houve o refinamento dos grãos e alívio das tensões causadas pelo processo de conformação por trefilação dos eixos de rabeta. É possível observar no ensaio de tração dos corpos de prova que foram cementados, que apesar da adição de carbono, tiveram um limite de resistência a tração menor que os corpos de prova não tratados termicamente pelo fato de terem sido normalizados anteriormente. Essa diferença também é evidente no ensaio de dureza onde os valores obtidos foram bem menores, praticamente 50% menores que os corpos de prova não tratados termicamente. Os valores obtidos no ensaio de tração do corpo de prova normalizado/cementado/temperado/revenido também apresentou valores próximos aos valores apresentados pelo corpo de prova normalizado/cementado, principalmente o limite de



resistência a tração que foi praticamente o mesmo valor. Para o corpo de prova que passou pelo tratamento de cementação e têmpera esperava-se um aumento nos valores de resistência a tração, limite de escoamento e dureza, mas devido ao tratamento térmico de revenimento o material apresentou um aspecto dúctil na deformação e fratura por conta do alívio de tensões causadas pela têmpera. Houve um pequeno aumento nos valores de dureza em comparação com os corpos de prova normalizados e cementados mas continuou muito abaixo dos valores de dureza apresentados pelos corpos de prova sem tratamento térmico.

Quanto ao ensaio de fadiga flexo-rotativa, é possível dizer que houve uma melhoria em relação ao estado original do eixo. O material que passou pelo tratamento térmico de normalização e termoquímico de cementação foi o que apresentou a melhor performance no ensaio de fadiga por flexão rotativa, embora todos os outros corpos de prova sem tratamento e normalizados/cementados/temperados/revenidos ficassem acima da zona de falha prematura do material. O tempo de ensaio dos corpos de prova normalizados/cementados foi bem maior que o tempo dos demais e conseqüentemente o número de ciclos que suportaram antes da ruptura foi bem maior. Os corpos de prova normalizados/cementados/temperados/revenido ficaram em segundo lugar porém com resultados muito inferiores em comparação com os corpos de prova normalizados/cementados. Em terceiro lugar ficaram os corpos de prova sem tratamento térmico com um tempo muito baixo de ensaio refletindo em um baixo número de ciclos.

Como sugestão de continuidade desse trabalho poderiam ser feitos ensaios mecânicos em corpos de prova normalizados/cementados/temperados, sem o tratamento térmico de revenimento, pois poderia ser observado um aumento significativo no valor de dureza devido a cementação e têmpera sem o alívio de tensão.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRAHÃO, Rodrigo Rebello Ribeiro et al. Fadiga de materiais: Uma revisão bibliográfica. **Seminário de Iniciação Científica. UFU–Uberlândia**, 2008.

BONORA, Rafael Gustavo. Influência do tratamento superficial 3IP na vida em fadiga dos aços ABNT 4340 e 15-5PH para aplicação aeronáutica. 2015.

BRASIL, ARCELORMITTAL. Guia do aço–aços longos. **Belo Horizonte**, 2012.

CALLISTER, William. **Ciência E Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. Grupo Gen-LTC, 2000.

CALLISTER JÚNIOR, William D. *Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução*. 5. ed. São Paulo: LTC, 2002. 408 p.

CALLISTER, W. D. *Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução*. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

CALLISTER, William. D. J; RETHWISCH, David G; *Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução*. 8.ed. Rio de Janeiro: LTC –Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 2015.

CAMELO, Saul. Estimativa da vida em fadiga por diferentes métodos espectrais. 2015.

CHIAVERINI, Vicente. *Aços e Ferros Fundidos*. 7. ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2008a. 599 p.

CHIAVERINI, Vicente. *Aço e Ferros Fundidos*. **São Paulo: ABM–Associação Brasileira de Metais**, p. 321-358, 1982.

CHIAVERINI, V. *Aços e Ferros Fundidos*. 7. ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais (ABM), 2002.

COLPAERT, Hubertus. *Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns*. In: **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**. Edgard Blucher, 1994.

COZACIUC, Ivan; SILVA, Luís Rodrigues da; TOGNI, Marcos Antônio. Telecurso 2000 profissionalizante, mecânica, ensaio de materiais. **São Paulo: Globo**, p. 10-42, 2000.

CORREA, Edson de Jesus Antunes. **CONSTRUÇÃO NAVAL ARTESANAL E A METAMORFOSE DO TRABALHO CAPITAL NA AMAZÔNIA: um estudo sobre construtores de embarcações de madeira de Igarapé-Miri (PA)**. 2016. 166 f. TESE (Doutorado em Sociologia) Programa de Pós Graduação em Sociologia e Antropologia, Universidade Federal do Pará, Belém, 2016.

DA ROSA, Edson. *Análise de Resistência Mecânica (Mecânica da Fratura e Fadiga)* Grupo de Análise e Projeto Mecânico, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina 2002.

DIETER, George E. Fadiga dos metais. **Metalurgia Mecânica**. 2ª ed. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, p. 344, 1981.

FERNANDES, A. P. C. S.; FERNANDES, A. S. A (IN) ACESSIBILIDADE NOS TRANSPORTES E AS PESSOAS COM DEFICIÊNCIA DA COMUNIDADE RIBEIRINHA DA AMAZÔNIA PARAENSE. **REVISTA COCAR**. v. 10, p. 240-264, jan/jul. 2016.

FIELD, Michael. Surface integrity—a new requirement for improving reliability of aerospace hardware. In: **18th Annual National SAMPE Symposium**. 1973.

GARCIA, Amauri; SPIM, Jaime Alvares; DOS SANTOS, Carlos Alexandre. **Ensaaios dos materiais**. Livros Técnicos e científicos, 2000.

GARCIA, Natália Gonçalves; LOPES, Priscila Eduarda Kraft; PIMENTA, Jean Senise. ANÁLISE DA CEMENTAÇÃO SÓLIDA EM ENGRENAGENS CILÍNDRICAS DE DENTES RETOS DE AÇO SAE 4320-PARTE 1. **Revista Técnico-Científica**, n. 13, 2018.

GOMES, L. M. F.; MÜLLER, I. L. Corrosão–fadiga em aço de alta resistência aspergido termicamente.

GRAD ,P.; REUSCHER, B.; BRODYANSKI, A.; KOPNARSKI ,M.; KERSCHER, E. Mechanism of fatigue crack initiation and propagation in the very high cycle fatigue regime of high-strength steels. **SCRIPTA MATERIALIA**, v. 67, p. 838–841, Novembro, 2012.

HASHIMOTO, Maurício Maia Braga. Caracterização microestrutural de um aço baixo carbono e baixos teores de elementos de ligas com estrutura contendo ferrita acicular. 2010.

HUTCHINGS I. M. Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials – (Metallurgy & Materials Science Series) 1992.

ITOGA, H. et al. Effect of surface roughness on step-wise S–N characteristics in high strength steel. **International Journal of fatigue**, v. 25, n. 5, p. 379-385, 2003.

LACERDA, J.C.; MARTINS, G.D.; SIGNORETTI, V.T.; TEIXEIRA, R.L.P. Evolution of the surface roughness of a low carbon steel subjected to fatigue. **INTERNATIONAL JOURNAL OF FATIGUE**, v. 102, p. 143-148, Setembro. 2017.

LEI, Z.; HONG, Y.; XIE, J.; SUN, C.; ZHAO, A. Effects of inclusion size and location on very-high-cycle fatigue behavior for high strength steels. **MATERIALS SCIENCE & ENGINEERING A**, v. 558, p. 234–241, Dezembro. 2012.

LEITÃO, Claudio José; MEI, Paulo Roberto; LIBARDI, Rodolfo. Efeitos da cementação e da nitretação no custo e na qualidade de engrenagens produzidas com aços ABNT 4140 e 8620. **Tecnologia em Metalurgia e Materiais**, v. 9, n. 3, p. 257-63, 2012.

LEMOS, C. A. D. Análise de fadiga em risers flexíveis. Tese de doutorado. COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2005.

LI, L.L.; ZHANG, Z.J.; ZHANG, P.; YANG, J.B.; ZHANG, Z.F. Distinct fatigue cracking modes of grain boundaries with coplanar slip systems. *ACTA MATERIALIA*, v. 120, p. 120-129, Novembro. 2016.

LIMBERGER, Inácio da Fontoura. ESTUDO DA PROPAGAÇÃO DE TRINCASTRANSVERSAIS POR FADIGA EM TRILHOS FERROVIARIOS. 2000. 144 f. TESE (Doutorado em Engenharia). Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

LOPES, Karina Stefania Souza. INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE USINAGEM NA RESISTÊNCIA A FADIGA DO AÇO AISI 4140. 2006. 163 f. DISSERTAÇÃO (Mestrado em engenharia Mecânica). Programa de Pós Graduação em Engenharia mecânica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.

MACHADO, Izabel F. Tratamentos térmicos e de superfície. **Apostila da disciplina de Introdução à Manufatura Mecânica, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.**

MARTINS, M.S; et al. Complex Phase Steel: a new generation of flat steel for the automotive industry – SAE International Paper, 2010.

MITCHELL, M.R., 2001, “Fatigue Analysis for Design”, I Seminário Internacional de Fadiga – SAE Brasil, São Bernardo do Campo - SP, out., pág. 1-29.

MOEINI, G.; RAMAZANI, A.; SUNDARARAGHAVAN, V.; KOENKE, C. Micromechanical modeling of fatigue behavior of DP steels. *MATERIALS SCIENCE & ENGINEERING A*, v. 689, p. 89–95, Março. 2017.

NORTON, Robert L. Projeto de máquinas: uma abordagem integrada. Tradução João Batista de Aguiar, ... [et al.]. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2004. 931 p.

NORTON, Robert L. **Projeto de máquinas**. Bookman Editora, 2013.

NOVOVIC, D. et al. The effect of machined topography and integrity on fatigue life. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 44, n. 2-3, p. 125-134, 2004.

PENHA, Renata Neves et al. ANÁLISE DOS FATORES QUE INFLUENCIAM NO PROCESSO DE CRESCIMENTO DE TRINCAS NA CAMADA CEMENTADA DO AÇO 20MnCr5. 2011.

PIRATELLI FILHO, Antonio; MECÂNICA, Depto Engenharia. Rugosidade superficial. **Seminário de Metrologia**, v. 3,

PONTALTI, Anderson. ANÁLISE DE FADIGAE ESTIMATIVA DE VIDA DO GARFO DE ENGATE AUTOMÁTICO PARA VEICULOS TRATORES E REBOQUES. 2005. 95 f. DISSERTAÇÃO (Mestrado em engenharia Mecânica) Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

RAMOS, Gisela Filipina da Silva. EFEITO DA MAQUINAGEM POR ELETROEROSÃO NO COMPORTAMENTO À FADIGA DO AÇO AISI D2. 2016. 340 f. DISSERTAÇÃO

(Mestrado em Engenharia Mecânica) Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade do Porto, Porto, 2016.

ROSA, Edison. ANÁLISE DE RESISTÊNCIA MECÂNICA: MECÂNICA DA FRATURA E FADIGA. Florianópolis: GRANTE, 2002.

RUHOFF, Eduardo; MACHADO, Cátia Milena Lopes. GESTÃO DOS CUSTOS DE PRODUÇÃO: ANÁLISE DA RENTABILIDADE DO PROCESSO DE CEMENTAÇÃO EM UMA MICRO EMPRESA.

SANTOS, Luciano Valdomiro dos. Análise de falha por fadiga em eixo de motores para sistemas de arrefecimento. 2008. 105 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica de Projeto de Fabricação) – Universidade de São Paulo, Escola Politécnica, São Paulo, 2008.

SASAHARA, Hiroyuki. The effect on fatigue life of residual stress and surface hardness resulting from different cutting conditions of 0.45% C steel. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 45, n. 2, p. 131-136, 2005.

SECCO, A. R.; VIEIRA, E.; GORDO, N. Telecurso 2000 - Módulo Metrologia - Aula 18 - Rugosidade. Rio de Janeiro: Globo, v. I, 1996.

SHARMAN, A. R. C. et al. The effects of machined workpiece surface integrity on the fatigue life of  $\gamma$ -titanium aluminide. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 41, n. 11, p. 1681-1685, 2001.

SHIGLEY, Joseph Edward; MISCHKE, Charles R. **Projeto de engenharia mecânica**. Bookman, 2005.

SILVA, Jose Geraldo Araujo. AVALIAÇÃO COMPORTAMENTAL DE JUNTAS SOLDADAS DE UM AÇO ESTRUTURAL DO TIPO SAC 50 SOB FADIGA. 2001. 106 f. DISSERTAÇÃO (Mestrado em Engenharia Civil). Programa de Pós Graduação em Estrutura metálica, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2001.

SOUZA, S. A. Ensaio Mecânicos de Materiais Metálicos, pp. 172-200, 1995.

STARKEY, M. S.; IRVING, P. E. A comparison of the fatigue strength of machined and as-cast surfaces of SG iron. **International Journal of Fatigue**, v. 4, n. 3, p. 129-136, 1982.

SURESH, Subra. **Fatigue of materials**. Cambridge university press, 1998.

TIMOSHENKO, Stephen. **Resistência dos materiais**. Ao livro técnico, 1966.

VENDRAMIM, J. C. Seleção de Materiais Para Nitretação. **ISOFLAMA Industria e Comércio de Equipamentos LTDA**, 2008.

## **APÊNDICE**

**APÊNDICE A**

Ensaio de Fadiga											
Corpo de Prova	Tensão	Ciclo	Posição	Número total de amostras da série analisada	Ponto Mediano	1/(1-PM)	$\ln(\ln(1/(1-PM)))$ (Y)	$\ln(N)(X)$	Beta	c	Alfa
ST	446	532	1	5	0,129630	1,14893617	-1,974458694	6,276643	3,368862	-22,524235	801,117456
		619	2	5	0,314815	1,45945946	-0,972686141	6,428105			
		651	3	5	0,500000	2,00000000	-0,366512921	6,478510			
		684	4	5	0,685185	3,17647059	0,144767396	6,527958			
		1086	5	5	0,870370	7,71428571	0,714455486	6,990257			
NC	129	17129	1	5	0,129630	1,14893617	-1,974458694	9,748528	3,582891	-36,330864	25338,929075
		18418	2	5	0,314815	1,45945946	-0,972686141	9,821084			
		20425	3	5	0,500000	2,00000000	-0,366512921	9,924515			
		24518	4	5	0,685185	3,17647059	0,144767396	10,10716			
		33328	5	5	0,870370	7,71428571	0,714455486	10,41415			
NCTR	352	731	1	5	0,129630	1,14893617	-1,974458694	6,594413	2,361497	-16,504491	1084,632441
		735	2	5	0,314815	1,45945946	-0,972686141	6,599870			
		763	3	5	0,500000	2,00000000	-0,366512921	6,637258			
		827	4	5	0,685185	3,17647059	0,144767396	6,717805			
		1566	5	5	0,870370	7,71428571	0,714455486	7,35628			

## **ANEXO**



## ANEXO 1

# 1. Propriedades Mecânicas Estimadas de Barras de Aço Laminadas a Quente e Trefiladas

CONFORME SAE J1397 MAI/92

SAE/AISI	Processamento	LR (MPa)	LE (MPa)	A (2")%	Z (%)	HB
1022	Laminado	430	230	23	47	121
	Trefilado	480	400	15	40	137
1023	Laminado	370	210	25	50	111
	Trefilado	430	360	15	40	121
1025	Laminado	400	220	25	50	116
	Trefilado	440	370	15	40	126
1026	Laminado	440	240	24	49	126
	Trefilado	490	410	15	40	143
1030	Laminado	470	260	20	42	137
	Trefilado	520	440	12	35	149
1035	Laminado	500	270	18	40	143
	Trefilado	550	460	12	35	163
1037	Laminado	510	280	18	40	143
	Trefilado	570	480	12	35	167
1038	Laminado	520	280	18	40	149
	Trefilado	570	480	12	35	163
1039	Laminado	540	300	16	40	156
	Trefilado	610	510	12	35	179
1040	Laminado	520	290	18	40	149
	Trefilado	590	490	12	35	170
1042	Laminado	550	300	16	40	163
	Trefilado	610	520	12	35	179