



UNIVERSIDADE DOS RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
ENGENHARIA DE MATERIAIS  
ENG 02298 – TRABALHO DE DIPLOMAÇÃO



ANÁLISE DA VIDA EM FADIGA DE VIRABREQUINS 17Cr-Ni6,6 POR ENSAIO DE  
FLEXÃO ROTATIVA

Vanessa dos Reis  
00262575

Professor Orientador: Marcelo Favaro Borges

Porto Alegre  
Novembro, 2019.

VANESSA DOS REIS

**ANÁLISE DA VIDA EM FADIGA DE VIRABREQUINS POR ENSAIO DE FLEXÃO  
ROTATIVA**

Relatório final, apresentado a Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte das exigências para a obtenção do título de Engenharia de Materiais.

Porto Alegre, 29 de Novembro de 2019.

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Marcelo Favaro Borges  
LAMEF - UFRGS

---

Prof<sup>ª</sup>. Dra. Jane Zoppas Ferreira  
LACOR – UFRGS

---

Prof<sup>ª</sup>. Dra. Andréa Moura Bernades  
LACOR - UFRGS

---

Dr. Guilherme V. B. Lemos  
LAMEF - UFRGS



UNIVERSIDADE DOS RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
ENGENHARIA DE MATERIAIS



“Para de esperar que tudo faça sentido; viver é um caos”  
Aureliano Medeiros

## AGRADECIMENTOS

Os agradecimentos estão direcionados tanto às pessoas que estiveram comigo na parte acadêmica, como a todos aqueles que dividiram momentos nas salas e nos corredores e nos laboratórios (LACOR, LAPOL E ELETROCORR).

Agradeço ao professor Marcelo Favaro, que me apresentou ao mundo da fadiga e da análise de falha, além de me receber como sua orientanda abriu as portas do laboratório e colocou toda sua disposição ao meu dispor.

Agradeço aos meus colegas de trabalho do Laboratório de Materiais pela paciência, disposição e bom humor em todos os momentos. Em especial, a Roberto Cruz que me auxiliou com as análises metalúrgicas e compartilhou comigo todo seu conhecimento e experiência sobre virabrequins.

Agradeço também aos colegas da equipe do tratamento térmico, da usinagem e da engenharia de produto, em especial ao Rogis Souza Muller, que disponibilizaram do seu tempo para tornar o estudo possível.

Aos meus pais, Hélio A. dos Reis e Maria Adelaide F. dos Reis, e meu irmão, Mateus Augusto dos Reis que me incentivaram e instigaram meu aprendizado desde criança, possibilitando que me tornasse a pessoa/profissional que sou hoje. Se cheguei hoje aqui, devo tudo a eles.

Ao meu namorado, Jeferson Ferreira Guimarães, pelo apoio, incentivo e carinho, que tornou a jornada mais amena e feliz.

Por fim, registro meu agradecimento à Universidade Federal do Rio Grande do Sul por abrir as portas para que eu pudesse tornar realidade mais uma etapa do meu sonho.

## SUMÁRIO

<b>1.</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>12</b>
<b>2.</b>	<b>OBJETIVO</b> .....	<b>14</b>
2.1	Objetivo Geral .....	14
2.2	Objetivos Específicos .....	14
<b>3.</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>15</b>
3.1.	Motores a combustão .....	15
3.2.	Virabrequim .....	15
3.3.	Aços .....	16
3.3.1	Microestrutura dos aços .....	17
3.3.2	Tratamento Térmico .....	18
3.3.2.1	Normalização .....	19
3.3.2.2	Têmpera .....	19
3.3.2.3	Revenimento .....	20
3.4.	Fadiga .....	21
3.4.1	Ensaio de Fadiga .....	24
3.4.2	Concentradores de Tensão .....	25
<b>4.</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>26</b>
4.1.	Corpos de Prova .....	26
4.1.1.	Materiais .....	26
4.1.2.	Tratamento Térmico dos Virabrequins .....	27
4.1.3.	Preparação das Amostras .....	28
4.1.3.1	Corte .....	29
4.1.3.2	Embutimento .....	30
4.1.3.3	Lixamento e Polimento .....	30
4.1.3.4	Ataque Químico .....	30
4.2.	Microscopia Óptica .....	31
4.3.	Composição Química .....	31
4.4.	Dureza Superficial .....	31
4.5.	Profundidade de Camada Cementada .....	31
4.6.	Ensaio de Flexão Rotativa .....	32
4.7.	Análise por Elementos Finitos .....	34
4.8.	Análise de falhas .....	36
<b>5.</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>37</b>
5.1.	Resultados da análise de histórico .....	37

5.2.	Microestrutura .....	42
5.3.	Tamanho de Grão .....	47
5.4.	Análise da Região da Rosca .....	47
5.5.	Profundidade de Camada Cementada (CHD) .....	49
5.6.	Dureza .....	50
5.7.	Composição Química .....	51
5.8.	Ensaio de Fadiga por Flexão Rotativa .....	52
5.9	Análise de Elementos Finitos (FEA) .....	53
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>55</b>
<b>7</b>	<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>56</b>
<b>8</b>	<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>57</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esforços atuantes no virabrequim e sua decomposição .....	16
Figura 2 – Diagrama binário da liga Fe-C .....	17
Figura 3 – Faixas de Temperatura recomendadas para os tratamentos térmicos .....	19
Figura 4 – Classificação dos tamanhos de grão segundo a ASTM E112 .....	21
Figura 5 – Curva S-N para materiais distintos. O aço 1045 apresenta um patamar (limite de fadiga), enquanto a Liga de Alumínio 2014-T6 não .....	22
Figura 6 – Aspecto macroscópico da falha por fadiga, indicando a região de provável nucleação (estágio I), as linhas de praia correspondentes ao período de propagação estável (estágio II) e zona de ruptura final (estágio III) .....	23
Figura 7 – Esquema de máquina usada no ensaio de flexão rotativa .....	24
Figura 8 – Fluxograma do Tratamento Térmico .....	28
Figura 9 – (a) Virabrequim forjado a frio e (b) Virabrequim ao final do processo de Tratamento Térmico já usinado .....	28
Figura 10 – A flecha em laranja indica o local de retirada da amostra para práticas metalográficas .....	29
Figura 11 – Máquina de Ensaio de Fadiga Rotativa .....	32
Figura 12 – Dispositivo de Acoplamento .....	33
Figura 13 – <i>Process Capability</i> para o valor médio de torque na montagem da máquina ....	33
Figura 14 – Condição inicial do virabrequim em comparação a condição após o desbaste em máquina para facilitar acoplamento em máquina de ensaio de fadiga .....	34
Figura 15 – Desenho em três dimensões do virabrequim .....	34
Figura 16 – Engaste na região do contrapeso .....	35
Figura 17 – Aplicação de carga na região da rosca .....	36
Figura 18 – Virabrequim com fratura na região da rosca no lado da embreagem do motor ..	37
Figura 19 – Superfície de Fratura do Virabrequim. Aumento: 25x .....	38
Figura 20 – Visão lateral da região de fratura no virabrequim .....	38
Figura 21 – Zonas de ruptura final do componente em relação ao diâmetro não ocorrem no mesmo local para diferentes falhas .....	39
Figura 22 Análise de Microscopia Eletrônica de Varredura da superfície de fratura. Em a) fratura frágil nos contornos de grão devido ao elevado potencial de carbono no local. Em b), na região de propagação a fratura ocorreu de forma dúctil como em c), na região de falha .	40
Figura 23 – Análise de Microestrutura da Superfície de Fratura. Em a) na zona de maior potencial de carbono tem-se a presença de martensita revenida e austenita retida. Em b) e c)	

tem-se martensita revenida e bainita devido ao menor potencial de carbono e taxa de resfriamento.....	41
Figura 24 – Imagens da superfície dos virabrequins com aumento de 200x. As amostras foram identificadas de acordo com a Tabela 2 .....	43
Figura 25 – Imagens da superfície dos virabrequins com aumento de 500x. As amostras foram identificadas de acordo com a Tabela 2 .....	44
Figura 26 – Imagens do centro dos virabrequins com aumento de 200x. As amostras foram identificadas de acordo com a Tabela 2 .....	45
Figura 27 – Imagens do centro dos virabrequins com aumento de 500x. As amostras foram identificadas de acordo com a Tabela 2 .....	46
Figura 28 – Tamanho de Grão das amostras após tratamento térmico. Ataque: Picral 5%. Ampliação: 100x .....	47
Figura 29 – Rosca do Virabrequim.O primeiro filete é mostrado pela seta. Aumento de 50x .....	48
Figura 30 – Heterogeneidade no tamanho de grão no fundo de rosca. Aumento de 200x. Ataque: Picral .....	48
Figura 31 - Heterogeneidade no tamanho de grão no fundo de rosca, com detalhe para as microtrincas. Aumento de 500x. Ataque: Picral .....	49
Figura 32 – Fratura do virabrequim após ensaio de flexão rotativa .....	53
Figura 33 – Curva de Tensão Principal por carga aplicada na região da rosca .....	53
Figura 34 – Virabrequim com carga de 200 kg aplicada na região da rosca .....	54



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição Química do aço 17CrNi6-6 .....	27
Tabela 2 – Organização e Identificação das amostras .....	29
Tabela 3 – Medida de Dureza Superficial e Profundidade de Camada Cementada .....	42
Tabela 4 – Medida de Profundidade de Camada Cementada .....	49
Tabela 5 – Medidas da Dureza nas amostras não-normalizadas .....	50
Tabela 6 – Medidas da Dureza nas amostras normalizadas .....	51
Tabela 7 – Composição Química do virabrequim forjado .....	52
Tabela 8 – Número de ciclos suportados por cada componente .....	52

## RESUMO

O virabrequim é um componente essencial para o funcionamento de máquinas motorizadas; ele é o responsável por transformar a energia química da combustão no cilindro em energia de rotação o que faz todo o sistema de operação funcionar. Por esse motivo, é comum que o virabrequim esteja submetido a diversas tensões durante seu funcionamento oriundas do pistão, do sistema de freio. O grande número de diferentes cargas (flexão, torção) ao qual o componente é submetido pode levar ele a fratura, muitas vezes por fadiga, sendo está responsável por aproximadamente 90% das falhas em componentes mecânicos. Logo, o presente trabalho tem como objetivo estudar a vida em fadiga dos virabrequins por ensaio de flexão rotativa para aplicação em motores de máquina; além de, avaliar o comportamento do mesmo após diferentes tratamentos térmicos. Para isso, o virabrequim de aço 17Cr-Ni6,6 foi submetido a processos de tratamentos térmicos específicos que variaram quanto a presença da etapa de normalização; foi avaliada sua microestrutura, dureza e profundidade de camada cementada. Por fim, realizou-se o ensaio de flexão rotativa e os dados obtidos foram comparados com aqueles adquiridos na análise de elementos finitos. Os resultados mostraram que a modificação no tratamento térmico do componente ocasionou a formação de uma camada cementada abaixo do especificado naqueles que foram submetidos ao tratamento térmico sem normalização, porém ao serem avaliados quanto a vida em fadiga os componentes não apresentaram diferença de comportamento. A análise por elementos finitos mostrou que a tensão máxima principal ocorre na região do primeiro filete da rosca o que é coerente com as quebras observadas no ensaio de flexão rotativa para cargas acima da tensão de escoamento. Novos estudos serão realizados com a inclusão de mais variáveis de processo, bem como novos ensaios para avaliar o comportamento do componente quando submetido a outras solicitações.

Palavras Chave: Fadiga, Motores de Combustão Interna, Virabrequim.

## ABSTRACT

The crankshaft is an essential component for the operation of power machines; It is responsible for turning the chemical energy of combustion in the cylinder into rotational energy which makes the whole operating system work. For this reason, it is common for the crankshaft to be subjected to various stresses during operation from the piston and from the brake system for example. The large number of different loads (bending, twisting) to which the component is subjected can lead to fracture, often due to fatigue, being responsible for approximately 90% of mechanical component failures. Therefore, the present work aims to study the crankshaft fatigue life by rotary bending test for application in machine engines; besides, evaluate its behavior after different heat treatments. For this, the 17Cr-Ni6,6 crankshaft was subjected to specific heat treatment processes that varied as to the presence of the normalization step; Its microstructure, hardness and cemented hardness depth (CHD) were evaluated. Finally, the rotational flexion test was performed and the obtained data were compared with those obtained in the finite element analysis (FEA). The results showed that the change in the heat treatment of the component caused the formation of a CHD below the specified in without normalization step, but when evaluated for fatigue life the components showed no behavioral difference. Finite element analysis showed that the principal maximum stress occurs in the region of the first thread of the thread which is consistent with the breaks observed in the rotational flexural test for loads above the yield stress. Further studies will be performed with the inclusion of more process variables as well as new tests to evaluate component behavior when subjected to other requests.

**Keywords:** Fatigue, Internal Combustion Engines, Crankshaft.

## 1. INTRODUÇÃO

Em motores de combustão interna, o virabrequim é um componente essencial uma vez que transforma a energia proveniente da combustão do cilindro (movimento longitudinal) em momento de rotação que é transmitido aos demais componentes acoplados no eixo (volante e embreagem) fazendo a máquina funcionar. O virabrequim é um componente que fica em movimento cíclico em altas temperaturas por períodos curtos ou prolongados. As cargas exercidas sobre um virabrequim resultam em tensões cíclicas e vibracionais que podem levar a fratura do componente por fadiga. A ruptura, normalmente, inicia a partir de uma trinca ou defeito superficial que se propaga e leva a fratura do componente quando o mesmo não suporta mais a carga oscilante.

A fadiga é uma das principais causas de falha de componentes mecânicos, e principalmente, metálicos. É uma forma de falha que ocorre em estruturas sujeitas a tensões dinâmicas e oscilantes, sendo responsável por cerca de 90% das falhas que ocorrem em componentes metálicos de máquinas, pontes e aeronaves (NASCIMENTO, 2015). Nessas circunstâncias de cargas que variam com o tempo, é possível que falha do componente venha a ocorrer em um nível de tensão menor do que o limite de resistência à tração ou o limite de escoamento do material para uma carga estática. Com isso, o termo de fadiga é usado pois a falha do componente ocorre após um determinado número de ciclos de deformação. (CALLISTER, 2018). O estudo da vida em fadiga de componente tornou-se progressivamente importante à medida que a tecnologia vem desenvolvendo um número maior de equipamentos.

O dimensionamento de um componente envolve uma sequência de procedimento que são: a determinação das solicitações devidas ao carregamento atuante, a análise de tensões nas seções mais crítica e a capacidade do componente de suportar carga (sem risco de falha). Para aceitar ou rejeitar a tensão calculada é necessário estudar o modo de falha do material para o tipo de carregamento que age, bem como qual a margem de segurança que deve ser usada (ROSA, 2002).

Uma das formas de estudar a resistência do material ao carregamento cíclico é através de ensaios de fadiga por flexão rotativa. Neste ensaio, apesar da carga ser constante ao longo do tempo, a tensão varia senoidalmente devido a rotação do corpo de prova. O ensaio é levado até a ruptura do corpo ou até um número de ciclos consideravelmente altos para os materiais que apresentam limite de fadiga ( $>10^7$  ciclos) (ROSA, 2002).

Neste trabalho é avaliado o comportamento de virabrequins em diferentes situações de produção, sendo usado como material um virabrequim de aço 17CrNi6-6 forjado a quente, usinado e tratado termicamente. Os ensaios realizados foram de caracterização metalúrgica

do componente e ensaio de fadiga rotativa para conhecimento da vida em fadiga do material quando submetido a diferentes situações de processamento. Os resultados foram cruzados entre si para conhecer a melhor situação de produção e montagem.

## 2. OBJETIVO

### 2.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem como principal objetivo estudar a vida em fadiga de virabrequins para aplicação em motores de máquina.

### 2.2 Objetivos Específicos

- Avaliar a vida em fadiga de virabrequins obtidos por diferentes tratamentos térmicos quanto a presença da etapa de normalização;
- Avaliar a influência da normalização no tamanho de grão, na dureza e na profundidade de camada cementada;
- Determinar a influência da profundidade de camada cementada na vida em fadiga do virabrequim;
- Comparar os resultados dos ensaios de flexão rotativa com aqueles obtidos na simulação de elementos finitos em diferentes carregamentos.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo é apresentada uma revisão bibliográfica sobre os principais assuntos relacionados ao tema do trabalho.

#### 3.1. Motores a combustão

Os motores de combustão interna são máquinas térmicas que transformam a energia proveniente de uma reação química em energia mecânica, os produtos de combustão constituem o fluido de trabalho, na sua combustão ocorre o aumento da pressão da câmara que impulsiona o pistão. A conversão é feita por ciclos termodinâmicos que envolvem a compressão e expansão de gases. Nesses motores, a energia da combustão movimenta todo o sistema de partes móveis do motor, tais como, pistão, biela, virabrequim, volante e comando de válvulas.

Os motores de combustão interna podem ser divididos em motores 2 tempos e 4 tempos, a diferença se dá pelo processo de queima de combustível. No motores de 2 tempos existem dois ciclos, no primeiro ciclo, o pistão abre a janela de admissão e ocorre a entrada da mistura ar e combustível limpo que empurram os gases da queima pelo escape; no segundo ciclo, o pistão sobe, fecham-se as janelas, ocorre a ignição da mistura, os gases expandem e forçam o pistão a descer produzindo trabalho. Nos motores de 2 tempos, é comum que junto ao combustível venha misturado uma quantidade de óleo lubrificante. (SEARS,1973)

No motor de 4 tempos, o ciclo é composto de quatro etapas. A primeira etapa do ciclo é denominada de admissão, na qual a válvula de admissão permite a entrada da mistura de ar e combustível no cilindro ao mesmo tempo que o pistão se move para aumentar o volume da câmara de combustão. A segunda etapa é compressão, na qual a mistura é comprimida de forma adiabática e recebe calor numa transformação a volume constante. Na terceira etapa, denominada de explosão, tem-se a ignição da mistura que ocasiona a explosão com consequente expansão. No quarto ciclo, a válvula de exaustão é aberta e os gases da queima são liberados. (SEARS,1973)

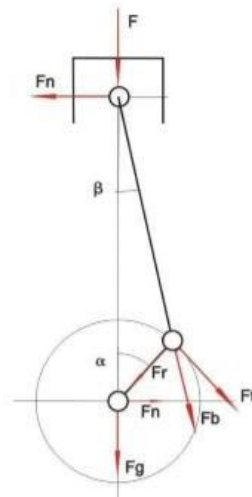
#### 3.2. Virabrequim

O virabrequim é o componente do motor que junto da biela, que transforma o movimento de translação do pistão em movimento de rotação. Esse componente é

considerado crítico para a efetividade e bom funcionamento do motor, tendo ele uma geometria complexa. (MONTAZERSADGH, 2007)

O virabrequim é um componente do motor que sofre carregamentos cíclicos durante toda sua vida útil, sendo que a fadiga é o tipo de falha mais comum. Porém, o componente está submetido a tensões multiaxiais, uma vez que está sujeito a carregamentos complexos, o que ocasiona o problema da fadiga multiaxial. (MINUCCI, 2010) O virabrequim é submetido principalmente a esforços de flexão e torção durante sua utilização. A Figura 1 ilustra os esforços dinâmicos encontrados no virabrequim. A força ( $F_g$ ) atuante no virabrequim resulta da combustão do gás no cilindro. A força ( $F$ ) resultante do pistão é decomposta nas componentes  $F_n$  que atua no cilindro e  $F_b$  que atua na direção da biela. A força  $F_b$  pode ser ainda decomposta como força radial  $F_r$  e como força tangencial  $F_t$ . (MINUCCI, 2010)

Figura 1 - Esforços atuantes no virabrequim e sua decomposição.



FONTE: MINUCCI, 2010.

### 3.3. Aços

O aço é uma liga de natureza relativamente complexa e sua definição não é simples, visto que a rigor o aço não é uma liga binária. (CHIAVERINI, 1996) As ligas de Ferro Carbono são os materiais mais importantes da engenharia, porque são aqueles que encontram o maior número de aplicações devido a alotropia do Ferro e a solução sólida intersticial formada pelo carbono com o Ferro. (KWIETNIEWSKI, 2014). O aço é uma liga Fe-C que pode conter até 2,11% de Carbono, além de certos elementos residuais (oriundos do processo de fabricação) ou elementos de liga que são adicionados com o intuito de modificar as propriedades do material.

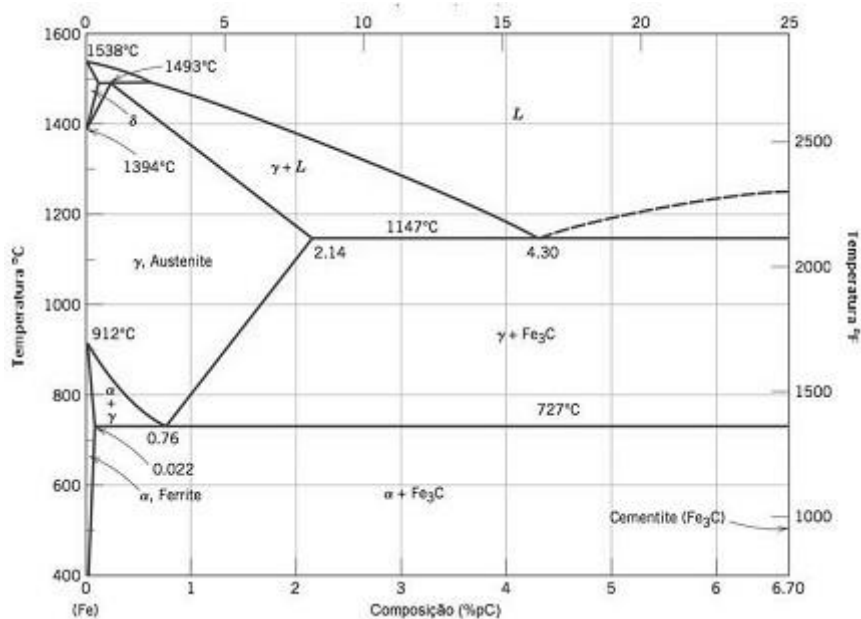


### 3.3.1 Microestrutura dos aços

O aço eutetoide contém teor de carbono de 0,77% em peso. Na composição eutetoide, sob uma taxa de resfriamento lenta, ocorre a transformação da austenita para ferrita e cementita. Essas fases acabam formando uma microestrutura lamelar conhecida como perlita. A perlita existe na forma de grãos que são chamados de colônias. (KWIETNIEWSKI,2014)

Nos aços hipoeutetoides com teores inferiores a 0,77% de carbono serão obtidas colônias de perlita com contorno de ferrita, já nos aços hipereutetoides (teores de carbono acima de 0,77%) serão obtidas colônias de perlita com contorno de cementita. Na Figura 2, está demonstrado o diagrama binário Fe-C, nele é possível visualizar as fases que serão formadas durante o resfriamento da liga. (CHIAVERINI, 1996)

Figura 2 – Diagrama binário da liga Fe-C



Fonte: Callister Jr. W. D., 2018.

A Bainita é uma mistura das fases ferrita e cementita, mas ao contrário das colônias de perlita, a ferrita e a cementita estão presentes em arranjos não lamelares. O tipo de arranjo depende da composição química da liga Fe-C e da taxa de resfriamento, podendo ser formado por ripas (bainita superior) ou por placas (bainita inferior). (KWIETNIEWSKI,2014)

O aumento da velocidade de resfriamento leva a formação da Martensita que ao contrário da Perlita e da Bainita, não ocorre por difusão e sim, por cisalhamento. (KWIETNIEWSKI,2014)

A Martensita é uma solução sólida metaestável, formada por Ferro supersaturado de Carbono intersticial. O Carbono que fica aprisionado em solução sólida dificulta o escorregamento dos planos. A Martensita é uma microestrutura de dureza muito elevada devido a: precipitação de partículas submicroscópicas de carboneto de ferro da Solução Sólida, distorção dos reticulados o que ocasiona a formação de grande densidade de discordâncias em contorno de grão, tensões internas e tamanho de grão muito pequeno. (CHIAVERINI, 1996)

A velocidade de resfriamento depende do meio utilizado para retirar calor da peça podendo o mesmo ser ar, água, solução salina, óleo e água. Durante o resfriamento, a superfície da peça resfria a uma taxa maior que o núcleo, logo existe um gradiente térmico do interior da peça para a superfície, de modo a não se ter um endurecimento uniforme em toda a sua seção. (CHIAVERINI, 1996)

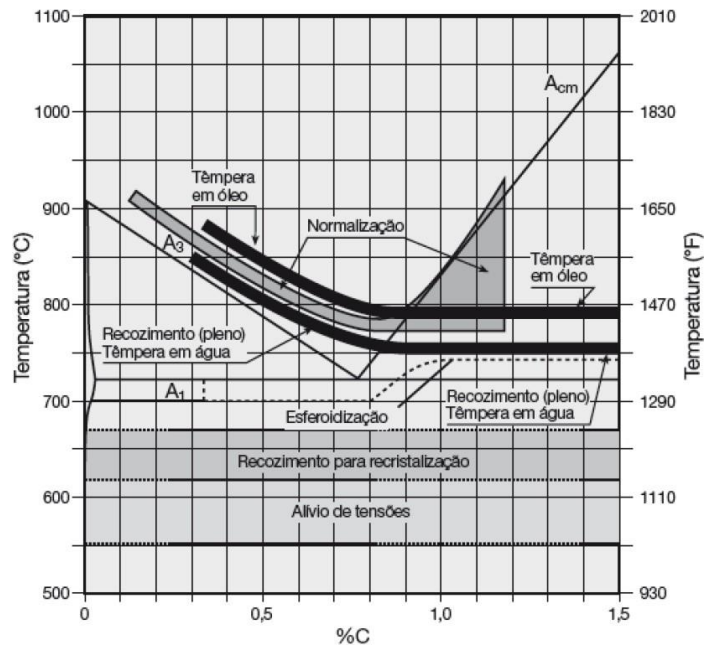
A capacidade de o aço endurecer e formar a martensita é conhecida como temperabilidade e ela depende de fatores como granulação da austenita, elementos de liga, geometria do componente e severidade do meio de resfriamento utilizado. (CHIAVERINI, 1996)

### 3.3.2 Tratamento Térmico

Os tratamentos térmicos são utilizados com o objetivo de alcançar as propriedades necessárias ao produto. As propriedades finais do material dependem do tratamento térmico utilizado e podem ser: aumento ou diminuição da dureza, aumento da resistência mecânica, melhora da ductilidade, melhora da usinabilidade, melhora na resistência ao desgaste, melhora nas propriedades de corte, resistência à corrosão e melhora na resistência ao calor.

Para o tratamento térmico, três fatores são essenciais: o aquecimento, o tempo de permanência na temperatura de aquecimento e o resfriamento. (KWIETNIEWSKI,2014) .Na Figura 3 a seguir, tem-se as faixas de temperatura recomendadas para cada Tratamento Térmico de aços carbono sobrepostas ao diagrama Fe-C.

Figura 3 – Faixas de Temperatura recomendadas para os tratamentos térmico.



FONTE: KWIETNIEWSKI,2014

### 3.3.2.1. Normalização

A normalização consiste no aquecimento do aço a uma temperatura acima da zona crítica, seguido de resfriamento ao ar. A normalização visa refinar a granulação grosseira de peças de aço forjadas e produzir uma estrutura mais uniforme para a têmpera. (KWIETNIEWSKI,2014)

Em geral, a temperatura se situa 30 a 80 °C acima das linhas A3 (hipoeutetóides) ou Acm (eutetóides e hipereutetóides). Os constituintes obtidos na normalização são para aços hipoeutetóides a ferrita e a perlita, perlita fina para aços eutetóides e cementita e perlita fina para aços hipereutetóides. (CHIAVERINI,1996).

### 3.3.2.2. Têmpera

A têmpera consiste no aquecimento do material até sua temperatura de austenitização, seguindo no tempo de encharcamento da peça, com posterior resfriamento rápido. A principal finalidade da têmpera é o aumento da dureza e resistência mecânica através da formação da martensita. Para aços hipoeutetóides, a temperatura de aquecimento deve ficar acima de A3, pois entre A1 e A3 o material apresentaria junto da martensita, uma porcentagem de ferrita. Para aços hipereutetóides é conveniente elevar a temperatura de tratamento acima de A1 pois no resfriamento o resultado será martensita e carbonetos. (KWIETNIEWSKI,2014)

Os meios mais comuns de resfriamento são líquidos ou gasosos, entre os meios líquidos tem-se (água, água contendo sal, óleo e soluções aquosas de polímeros), cada meio apresenta uma severidade de têmpera diferente sendo a salmoura com agitação violenta o meio mais severo. Existem vários métodos de têmpera, sendo um deles, a têmpera direta que consiste no rápido resfriamento do aço, no meio adequado, diretamente da temperatura de austenitização. (KWIETNIEWSKI,2014)

Para ser temperável, um aço deve ter um teor de carbono mínimo. Para aumento do teor de carbono superficial desses materiais, pode-se fazer um processo termo-químico de cementação. A cementação é um processo clássico de endurecimento superficial, consiste no enriquecimento superficial de carbono em certos aços, aquecidos convenientemente em contato com substâncias carbonáceas.(CHIAVERINI,1996).

Através da cementação, se introduz carbono na superfície do aço, de modo que este, depois de temperado, apresente uma superfície mais dura. A elevação do teor de carbono superficial (0,8 a 1% C) é um fenômeno de difusão, isto é, está relacionado com o movimento de carbono no interior do aço. (CHIAVERINI,1996).

A cementação pode ser sólida, líquida ou gasosa, nesta última é utilizada uma atmosfera carbonácea que permanece estável durante todo o processo. A atmosfera é formada por gases carburizantes, os hidrocarbonetos, como gás natural e metanol e gases diluidores que evitam uma atmosfera extremamente excessiva, garantem o movimento rápido do gás no interior do forno e um volume de gás suficiente para manter pressão positiva em todos os pontos. (CHIAVERINI,1996)

### 3.3.2.3. Revenimento

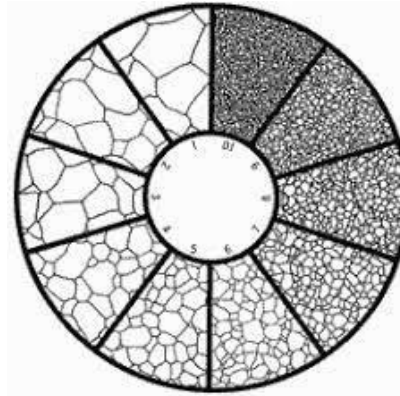
O revenido é o tratamento térmico que sempre acompanha a têmpera, pois alivia ou remove tensões internas, corrige a excessiva dureza e aumenta sua ductilidade. (CHIAVERINI,1996).

O procedimento requer um aquecimento entre 150 °C e 700 °C (a temperatura escolhida depende da microestrutura a qual se quer obter), tempo de encharcamento com posterior resfriamento ao ar. O aquecimento da martensita permite a reversão do reticulado instável ao reticulado estável cúbico centrado, produz ajustes internos que aliviam a tensão, além disso, uma precipitação de partículas de carbonetos que crescem e se aglomeram. (CHIAVERINI,1996).

Além da microestrutura, o tratamento térmico também é responsável pela modificação no tamanho de grão do material. A Figura 4, apresenta o Tamanho de Grão conforme as cartas da norma ASTM E112. No total são 10 cartas que apresentam diferentes tamanhos de

grão médio. Para carta foi atribuído um número de 1 a 10, quanto maior esse número, menor será o diâmetro do grão.

Figura 4 – Classificação dos tamanhos de grão segundo a ASTM E112



Fonte: ASTM E112.

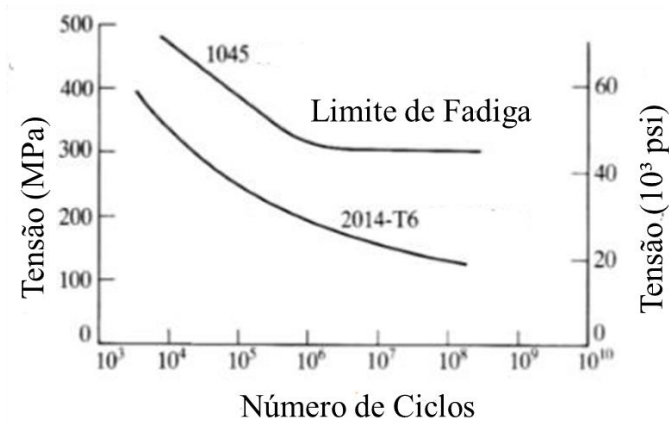
### 3.4. Fadiga

A fadiga é um processo de falha gradativa de um componente submetido a uma sollicitação mecânica cíclica. Na fadiga, o componente sofre deformações que levam o material a deterioração progressiva, dando origem à trinca, a qual cresce até o tamanho crítico e leva o material a ruptura. (CALLISTER, 2018) A falha por fadiga está geralmente ligada a deformações plásticas e, estas, associadas com tensões cisalhantes.

A maioria das falhas em máquinas, veículos e estruturas ocorre devido a carregamentos cíclicos e não a esforços estáticos. Mesmo submetidas a tensões bem menores que o limite de resistência do material, falhas catastróficas podem surgir a partir de falhas microscópicas nos componentes.

Uma falha por fadiga pode ocorrer em diferentes números de ciclos, desde valores na ordem de  $10^1$  a valores na ordem de  $10^8$  ciclos. O número de ciclos que o componente irá suportar depende do nível de sollicitação, uma maior carga aplicada reduz a vida em fadiga, amplitude de carga, frequência e tipo de material. Os materiais como o aço e ligas de titânio, são materiais do tipo II, que nas curvas de S-N, apresentam um patamar que é o limite de resistência a fadiga abaixo do qual nunca irão romper independentemente do número de ciclos (vida infinita). Por outro lado, materiais dúcteis como ligas de alumínio e magnésio (Tipo I), não apresentam esse limite e sim, um comportamento decrescente, ou seja, quanto mesmo em baixas tensões o material pode vir a romper por fadiga (Figura 5). (CALLISTER, 2018)

Figura 5 – Curva S-N para materiais distintos. O aço 1045 apresenta um patamar (limite de fadiga), enquanto a Liga de Alumínio 2014-T6 não.



FONTE: adaptado de NOGUEIRA, 2014.

A fratura que leva a falha de um componente pode nuclear em defeitos ou, em sua ausência, em locais com elevado nível de tensão. Para que o processo de nucleação inicie é necessário que ocorram deformações plásticas podendo elas serem generalizadas ou localizadas. Tais deformações podem ser acentuadas devido a descontinuidade geométricas, metalúrgicas ou devido à sobrecarga de operação, nesses casos o material pode deformar de forma plástica localizada mesmo estando no regime elástico, uma vez que as descontinuidades/sobrecarga atuam como concentradores de tensão. Em alguns casos a trinca que leva a ruptura final do material não passa pela etapa de nucleação, pois a peça possui defeitos agudos, como trincas, pré-existentes. Esses defeitos prévios, normalmente, são provenientes do próprio processo produtivo, como soldagem, retífica e tratamento térmico muito severo. (CALLISTER, 2018)

O crescimento da trinca durante a fadiga pode ser dividido em três estágios. O primeiro estágio corresponde ao modo de propagação microscópico, esse estágio é correspondente a nucleação e a formação das microtrincas, a trinca tem um comprimento da ordem do tamanho do grão, sendo sensível às tensões cisalhantes e a microestrutura e partículas de segunda fase. As microtrincas seguem crescendo até que atinjam um tamanho que passam a se propagar de forma perpendicular às tensões de tração que agem no material, nesse momento se passou ao segundo estágio de propagação em que as tensões de tração controlam o crescimento da trinca. A propagação que ocorre no estágio II corresponde ao modo macroscópico e é caracterizada pela formação de estrias microscópicas que marcam o crescimento da fissura a cada ciclo de carregamento. O tamanho da microtrinca em que ocorre a transição do estágio I para o estágio II depende da solicitação ao qual o material está



submetido. Em visão macroscópica, o estágio II produz marcas na superfície denominadas de linhas de praia que são formadas por paradas no crescimento da trinca (por redução da carga aplicada ou parada do equipamento). O estágio III corresponde ao estágio final de propagação, onde o material irá romper de forma brusca, isso ocorre quando o material restante não suporta mais a carga aplicada. (ROSA, 2002). Na Figura 6, tem-se a representação de uma fratura por fadiga que ocorreu em um eixo.

Figura 6 – Aspecto macroscópico da falha por fadiga, indicando a região de provável nucleação (estágio I), as linhas de praia correspondentes ao período de propagação estável (estágio II) e zona de ruptura final (estágio III).



FONTE: ROSA, 2002.

Existem quatro tipos de projetos diferentes que podem ser realizados nos componentes, os dois primeiros são clássicos tendo em vista que não levam em consideração a presença de defeitos agudos (concentradores de tensão) e se baseiam na interpretação da curva de Woehler do material, do contrário os dois últimos utilizam dos estudos de mecânica da fratura e levam em consideração a existência de defeitos prévios (ROSA, 2002):

- Projeto para vida infinita: é baseado na falha ilimitada, no qual os componentes são dimensionados para vida infinita. As solicitações atuantes estarão abaixo do limite de fadiga do material (Curva de Woehler). Exemplo: eixo de motor;

- Projeto de vida finita: um componente ao ser projeto para carga máxima esperada tem dimensões e pesos excessivos e desnecessários, pois a carga pode vir a ocorrer em poucas vezes durante o uso. Nesse ponto, o projeto de vida finita é justificável e inclui uma margem de segurança considerável. O componente será levado a falha. Exemplo: componentes automobilísticos que requerem troca após uma determinada quantidade de quilômetros;

- Projeto de falha segura: o peso adicional requerido por um alto coeficiente de segurança não pode ser tolerado em alguns casos como a aeronáutica. O critério de falha segura considera uma possível ocorrência de trincas e dimensiona a estrutura/projeto de modo que o defeito seja detectado antes do colapso (paradas de manutenção). Exemplo: fuselagem de aviões;

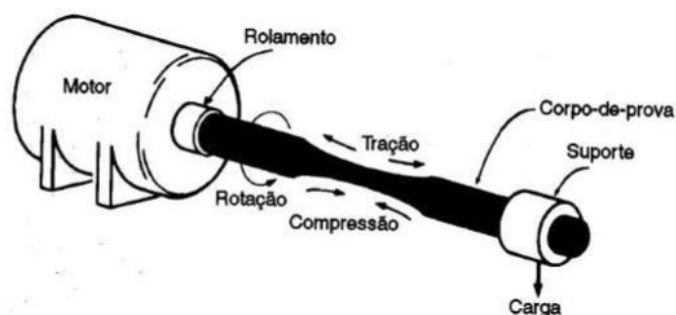
- Projeto com tolerância ao dano: nesse projeto se parte do princípio de o componente tem um defeito prévio. Utilizando os conceitos de mecânica da fratura, o projeto é desenvolvido para a trinca não cresça até o tamanho crítico e que a mesma possa ser identificada em inspeções de rotina. Exemplo: oleodutos.

Para garantir uma boa execução do projeto, são realizados ensaio prévios com o material para entender seu comportamento sobre as solicitações. Os ensaios mais utilizados são de flexão rotativa e tração-compressão. (ROSA,2002).

### 3.4.1 Ensaio de Fadiga

O ensaio de fadiga, tem por objetivo submeter um corpo de prova a solicitações de flexão, enquanto ele é rotacionado em torno de um eixo através de um sistema motriz com contador de ciclos, numa rotação determinada e constante. Com isso, o material é solicitado por uma tensão cíclica alternante, com tensão média nula, onde o corpo de prova, devido à torção, tem o nível de tensão variando de forma senoidal. Na Figura 7, tem-se um esquema da máquina de ensaio que é composta por um motor, um rolamento e o suporte no qual a carga será aplicada. (GARCIA,2000)

Figura 7 – Esquema de máquina usada no ensaio de flexão rotativa.



FONTE: GARCIA,2000.



O critério de falha pode ser a ruptura do corpo de prova, ou então o surgimento de uma trinca observável. O resultado é aplicado na curva de Woehler para entendimento da vida em fadiga do componente na tensão aplicada; na curva, quanto menor a amplitude das tensões cíclicas aplicadas, maior é a vida em fadiga.

No teste por flexão rotativa, o primeiro ensaio faz-se com uma tensão solicitante um pouco inferior do que o limite de resistência do material, em seguida testa-se diferentes condições do material na mesma tensão, ou utiliza-se diferentes tensões (cada vez menores) para a montagem da Curva de S-N. No último caso, é recomendado ensaiar no mínimo 4 corpos de prova por nível de tensão aplicada, sendo realizados 4 níveis diferentes de intensidades de carregamento. Dessa forma, tem-se 16 ensaios que permitem a construção da curva de projeto do componente. (ROSA, 2002).

#### 3.4.2 Concentradores de Tensão

Como mencionado anteriormente, a fratura que leva a falha de um componente pode nuclear em defeitos ou em locais com elevado nível de tensão.

O Fator de Concentração de Tensão ( $K_t$ ) é associado a descontinuidades geométricas do componente, quando multiplicado pela tensão nominal, indicara o nível de tensão efetivo. A descontinuidade gera um efeito de redistribuição de tensões no corpo, onde tem-se uma concentração de linhas de fluxo maior na zona do entalhe o que ocasiona uma distribuição desuniforme de tensões na região. Além do entalhe, a trinca é um concentrador de tensão sendo essa muito mais severa por ser um defeito mais agudo, no qual a densidade de linhas de fluxo fica maior ainda.(STROHAECKER,2016)

#### 4. MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo tem como objetivo apresentar a metodologia e materiais utilizados nas análises metalúrgicas e nos ensaios de fadiga por flexão rotativa dos virabrequins. Para o desenvolvimento deste trabalho, foram realizadas mais de 200 horas de ensaios de fadiga, desconsiderando os tempos de setup da máquina.

Este trabalho foi realizado em uma empresa do ramo metalomecânico do Vale dos Sinos que produz ferramentas motorizadas para diversas áreas de atuação (jardinagem, agropecuária e civil). Os parâmetros de processo como temperatura e tempo dos fornos de tratamento térmico são segredo industrial e não podem ser detalhados.

Os métodos de análise e ensaios abordados nesse capítulo seguiram padrões e normas internas da empresa.

##### 4.1. Corpos de Prova

###### 4.1.1. Materiais

Os virabrequins forjados são provenientes de um fornecedor externo. O aço utilizado em sua fabricação é o 17CrNi6-6, sendo os mesmos obtidos por processo de forjamento a quente. A composição química teórica do aço está detalhada na Tabela 1, além dos elementos citados ainda se tem uma adição de Alumínio para controle do crescimento de tamanho de grão. A microestrutura inicial do material é colônias de perlita e ferrita, sendo sua resistência a tração de 900-1100 MPa e sua tensão de escoamento de 635 MPa.

Tabela 1 – Composição Química do aço 17CrNi6-6

	Especificação	
	Mín. (%)	Máx. (%)
<b>C</b>	0,14	0,2
<b>Si</b>	0,15	0,4
<b>Mn</b>	0,5	0,9
<b>P</b>	0	0,02
<b>S</b>	0	0,005
<b>Cr</b>	1,4	1,7
<b>Ni</b>	1,4	1,7
<b>Mo</b>	-	-
<b>Al</b>	0,025	0,05
<b>Cu</b>	0	0,25
<b>Ti</b>	0	0,005
<b>Sb</b>	0	0,006
<b>Sn</b>	0	0,03
<b>As</b>	0	0,06
<b>Fe</b>	-	-

Fonte: GSA.

#### 4.1.2. Tratamento Térmico dos Virabrequins

Ao chegarem na empresa, os virabrequins forjados passam por uma sequência de operações internas. As etapas são divididas em preparo superficial, tratamento térmico e acabamento, etapa na qual o conjunto é montado.

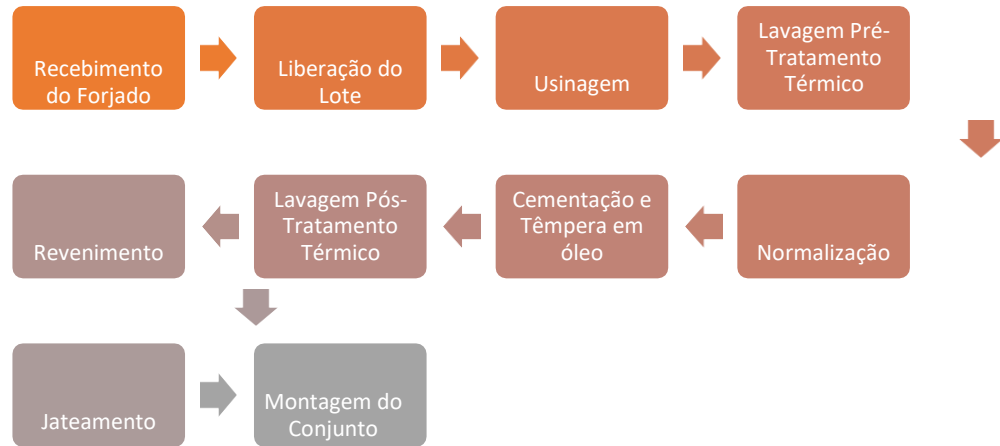
Os virabrequins foram primeiramente usinados (usinagem mole) para obtenção da rosca passante e demais partes do eixo. Após, eles foram lavados para remoção do óleo de resfriamento da usinagem com uma solução de desengraxante alcalino.

Os virabrequins então, seguem para a etapa de tratamento térmico que inicia com a normalização. Após a normalização, a carga é cementada utilizando o processo de cementação gasosa (metano, metanol, nitrogênio) e posteriormente, temperada em óleo.

A carga seguiu então para a etapa de lavagem (remoção do óleo de têmpera) e em sequência, foi revenida. Após o revenimento, as peças foram jateadas com granalha.

O processo de preparação dos virabrequins ocorre internamente na empresa que produz as máquinas motorizadas. O fluxograma do processo está demonstrado na Figura 8. De cada etapa do tratamento térmico foram retirados três virabrequins de cada condição (com e sem normalização) para análises metalográficas.

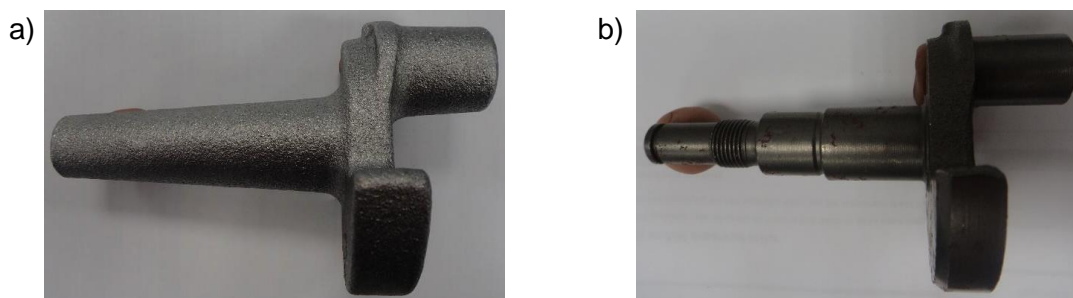
Figura 8 – Fluxograma do Tratamento Térmico.



Fonte: A autora, 2019.

A Figura 9 mostra a imagem do virabrequim forjado em comparação com aquele obtido no final do processo de tratamento térmico.

Figura 9 – (a) Virabrequim forjado a frio e (b) Virabrequim ao final do processo de Tratamento Térmico já usinado.



Fonte: A autora, 2019.

#### 4.1.3. Preparação das Amostras

Os virabrequins tratados seguiram para a etapa de preparação de amostra, sendo divididos em dois grupos, aqueles para ensaio metalúrgico e para ensaio de flexão rotativa. Na tabela 2, encontra-se detalhado a identificação de cada amostra, quantidade analisada, etapa do processo do qual foi retirada e os ensaios que foram realizados.

Tabela 2 – Organização e Identificação das amostras

ID	Qtd.	Processo	Ensaio
F	3	Forjado	Dureza, Microestrutura e Composição Química
UN	3	Usinado e Normalizado	Dureza e Microestrutura
UNT	3	Usinado, Normalizado, Temperado	Dureza, Microestrutura, Tamanho de Grão
UT	3	Usinado, Temperado	Dureza, Microestrutura, Tamanho de Grão
UNTR	3	Usinado, Normalizado, Temperado e Revenido	Dureza, Microestrutura, Tamanho de Grão e CHD
UTR	3	Usinado, Temperado e Revenido	Dureza, Microestrutura, Tamanho de Grão e CHD
UNTRJ	6	Usinado, Normalizado, Temperado e Revenido e Jateado	Ensaio de Flexão Rotativa
UTRJ	6	Usinado, Temperado e Revenido e Jateado	Ensaio de Flexão Rotativa

Fonte: A autora, 2019.

#### 4.1.3.1.Corte

As amostras foram cortadas conforme Figura 10, o local de retirada da amostra foi na região do pino com corte transversal em máquina de disco abrasivo. O corte da peça foi realizado de forma lenta e progressiva sob refrigeração com óleo em mistura aquosa, uma vez que a elevada dureza do material requer cuidado para evitar aquecimento local.

As amostras para análise de tamanho de grão foram cortadas na região da rosca, uma vez que está é considerada crítica para análise de falha.

Figura 10 – A seta em laranja indica o local de retirada da amostra para práticas metalográficas.



Fonte: A autora, 2019.

#### 4.1.3.2.Embutimento

Após o corte, as amostras foram embutidas à quente. As resinas para embutimento a quente apresentam baixa viscosidade e contração, boa adesão à amostra e resistência a ação de agentes químicos.

A máquina utilizada para embutimento é da marca Buehler utilizando resina epóxi (Epoximet G, Buehler) para embutimento a quente. O ciclo de sinterização dura ao todo 6 minutos: 3 minutos para aquecimento, 3 minutos de resfriamento sendo a pressão utilizada de 200 Bar (Método de Compactação a quente).

#### 4.1.3.3.Lixamento e Polimento

O lixamento foi realizado com o intuito de preparar a amostra para análises posteriores tornando a superfície plana isenta de deformações plásticas, mecânicas de óxidos. O processo foi realizado em lixadora rotativa em meio úmido (água). Utilizou-se uma sequência de 8 lixas iniciando pela mais grossa (P80) e indo até a de granulometria mais fina (P2500). O objetivo de usar lixas em sequência foi a eliminação gradativa das camadas alteradas por corte e lixamento anteriores.

Após o lixamento, as amostras foram polidas em pano de feltro com solução de alumina 1 $\mu$ m em meio aquoso. No final do polimento, a superfície era especular isenta de riscos e rugosidades, uma vez que essas poderiam conduzir à dispersão da luz e prejudicar a análise ao microscópio óptico.

#### 4.1.3.4.Ataque Químico

Para análise microestrutural, o ataque químico foi realizado com Nital 5%. O método utilizado para ataque foi de imersão a frio por cerca de 15 segundos. O ataque químico com Nital é seletivo e produz um ótimo contraste entre as colônias de perlita e os grãos de ferrita.

Para análise de tamanho de grão, o ataque foi feito por imersão a frio em uma solução de Picral 5% por 30 minutos. O Picral 5% é uma solução aquosa de ácido pícrico com água e detergente neutro que revela os contornos de grão e possibilita sua comparação com ASTM E112.

#### 4.2. Microscopia Óptica

A microscopia óptica foi utilizada para visualização da microestrutura e do tamanho de grão, o microscópio utilizado é da marca Olympus BX60 e o software para aquisição de imagens é da marca Leica. As análises de microestrutura foram realizadas com aumento de 200x e 500x. As análises de tamanho de grão foram realizadas após ataque em Picral 5% utilizando uma ampliação de 100x.

#### 4.3. Composição Química

A composição química foi medida no virabrequim forjado após corte e lixamento dos mesmos. A leitura de composição química foi realizada em triplicata por analisador de metais. O método utiliza o equipamento Spectromax que faz a leitura por espectroscopia de emissão óptica.

A amostra do material é vaporizada com a pistola por uma descarga de arco elétrico. Os átomos e íons contidos no vapor atômico são excitados para emitir radiação. Os comprimentos de onda emitidos por cada elemento são lidos e a intensidade de radiação, que é proporcional à concentração do elemento na amostra, é recalculada internamente.

#### 4.4. Dureza Superficial

A dureza superficial dos virabrequins forjados foi medida por indentação utilizando o método de Dureza Brinell (HB) uma carga de 187,5 kgf e uma esfera com 2,5 mm de diâmetro.

A dureza superficial dos virabrequins tratados termicamente foi medida por indentação utilizando o método de Dureza Rockwell C (HRC) e Dureza Vickers (HV). A Dureza Rockwell C usa uma carga de 150 Kg e um indentador de diamante piramidal. A Dureza Vickers utiliza uma carga de 10 Kg e um indentador piramidal 136 ° com base quadrada que caracteriza a medida de HV10.

#### 4.5. Profundidade de Camada Cementada

A profundidade de camada cementada (CHD) é medida no equipamento Q10A da marca Qness. O equipamento contém o software que realiza a medida da camada cementada. No software são fixados 11 pontos de medida com espaçamento de 0,1 mm entre eles, o equipamento utiliza como limite de profundidade de camada o valor de dureza de 600 HV3. Ao atingir valores inferiores a esse, o equipamento calcula o valor da profundidade camada por interpolação.



#### 4.6. Ensaio de Flexão Rotativa

O ensaio de Flexão Rotativa foi realizado em uma máquina desenvolvida internamente para teste de virabrequins em desenvolvimento. A máquina de ensaio consiste em um acoplador para o corpo de prova, um fio de aço que será responsável pela transmissão de carga da célula para a rosca do virabrequim e o motor que imprimirá as rotações necessárias para o ensaio (Figura 11). O motor tem uma redução 3:1 e chega a 4000 rpm. Para acoplar o fio de aço ao virabrequim foi produzido um dispositivo usando como base o arrastador da embreagem (Figura 12).

Figura 11 – Máquina de Ensaio de Fadiga Rotativa



Fonte: a autora, 2019.



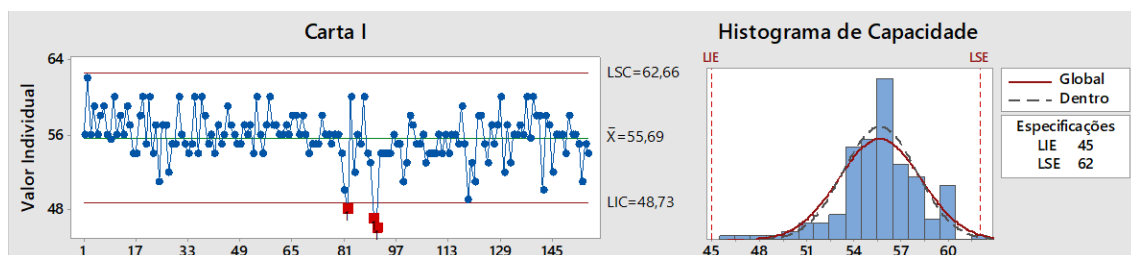
Figura 12 – Dispositivo de Acoplamento



Fonte: a autora, 2019.

Para a montagem do sistema de ensaio, o acoplador foi rosqueado usando o torque médio do processo de montagem da máquina de 55 Nm. O torque médio foi obtido através do acompanhamento do processo de montagem da máquina durante o período de um ano. A carta de controle gerada no processo, bem como o histograma de capacidade está presente na Figura 13.

Figura 13 – *Process Capability* para o valor médio de torque na montagem da máquina.



Fonte: a autora, 2019.

O primeiro conjunto de ensaios, teve por objetivo verificar o comportamento do virabrequim em diferentes carregamentos. As cargas utilizadas variaram de 10 a 130 kg. No total, foram realizados sete ensaios com diferença de 20 kg cada. O comportamento obtido foi comparado a curva montada pela técnica de análise elementos finitos.

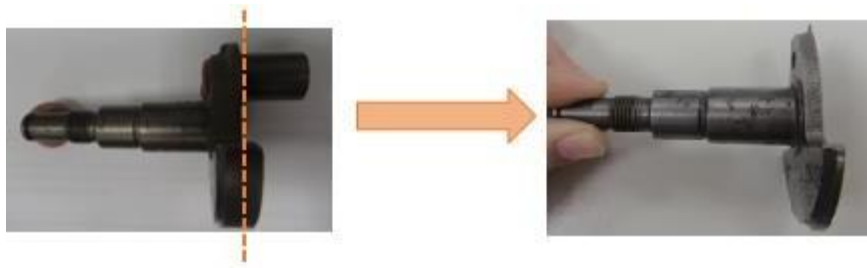
Os ensaios de fadiga por flexão rotativa foram realizados ao ar em ambiente controlado. Os parâmetros para parada do ensaio foram a quebra do virabrequim ou a

contagem do número de ciclos superior a  $1 \times 10^6$ , essa contagem de ciclos leva em consideração o histórico de tempo de funcionamento das máquinas que vieram para análise de falha.

A segunda leva de ensaios, utilizou uma carga de 80 kg. Nessa carga, o material está submetido a uma tensão menor que a tensão de escoamento do aço 17Cr-Ni6,6. Os ensaios foram realizados com virabrequins normalizados e sem normalização num período de 72 h com 4000 rpm.

Para os ensaios de flexão rotativa, os virabrequins sofreram um corte na região do contrapeso para tornar as duas faces paralelas. O corte foi realizado pela técnica de usinagem por eletroerosão a fio; no qual, o material é removido da peça por descargas elétricas. Na Figura 14, tem-se o antes de e depois do corte. A remoção de material é realizada com o intuito de facilitar o acoplamento do virabrequim na máquina de ensaio, a menor quantidade possível de material é retirada.

Figura 14 – Condição inicial do virabrequim em comparação a condição após o desbaste em máquina para facilitar acoplamento em máquina de ensaio de fadiga.

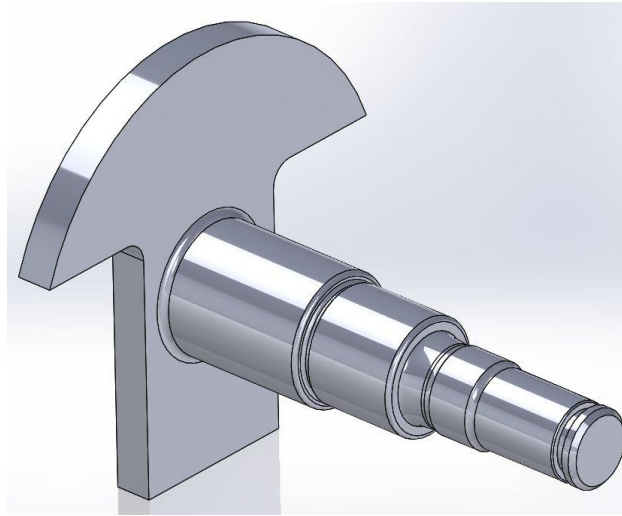


Fonte: a autora, 2019.

#### 4.7 Análise por Elementos Finitos

A análise por Elementos Finitos (FEA) foi realizada para comparar com os resultados obtidos no ensaio de flexão rotativa. Inicialmente, o virabrequim foi desenhado em software de CAD 3D utilizando as medidas no desenho original do componente. O contrapeso foi removido uma vez que ele não foi utilizado também no ensaio de fadiga (Figura 15).

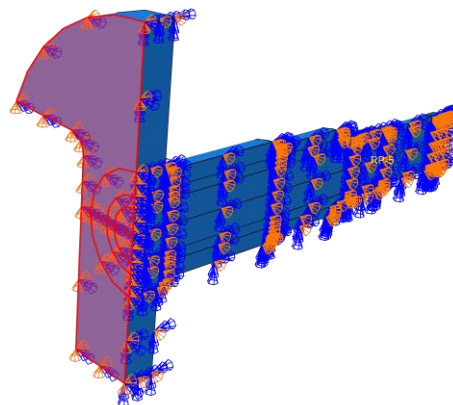
Figura 15 – Desenho em três dimensões do virabrequim



Fonte: a autora, 2019.

O software utilizado para análise de elementos finitos foi o ABAQUS, o engaste do virabrequim foi realizado na região do contrapeso e em condição de simetria (Figura 16). A simulação utilizou de elementos tridimensional de seis lados sem redução de integração.

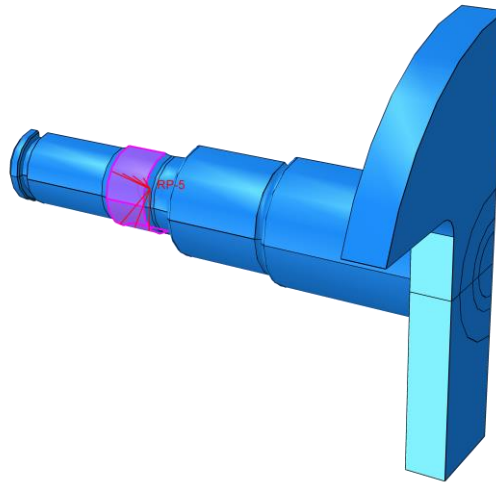
Figura 16 – Engaste na região do contrapeso



Fonte: a autora, 2019.

A carga foi aplicada na região da rosca conforme a Figura 17. A análise foi feita de forma estática com cargas que variam de 0-200 kg usando um incremento de 20 kg por análise. O material considerado foi o aço 17Cr-Ni6,6 sem cementação do qual a tensão de escoamento é de 635 MPa. O número total de nós foi de 286282 e de elementos 268297.

Figura 17 – Aplicação de carga na região da rosca.



Fonte: a autora, 2019

#### 4.8 Análise de falha

De março a junho de 2019, foram recebidos cerca de 10 virabrequins fraturados em máquinas de campo. Os virabrequins foram analisados conforme o escopo a seguir:

- Análise Fractográfica da superfície fraturada;
- Análise por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) da superfície de fratura para identificar o tipo de fratura (dúctil, frágil, intergranular);
- Avaliação da microestrutura e do tamanho de grão;
- Dureza Superficial HV10;
- Por fim, medida da profundidade de camada cementada (CHD) por mediação de dureza HV3.

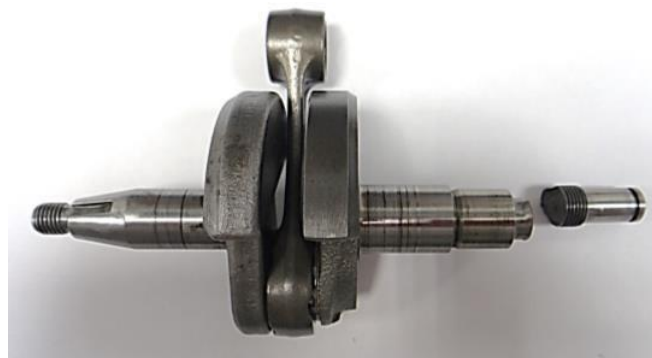
## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos nas análises realizadas (microestrutura, dureza, tamanho de grão, CHD e composição química) e nos ensaios de fadiga por flexão rotativa dos virabrequins. Considerando que as análises de vida em fadiga pelo ensaio de flexão rotativa são o foco deste trabalho, estes resultados são analisados em detalhe e comparados com dados obtidos nas análises metalúrgicas.

### 5.1. Resultados da análise de histórico

A análise do histórico dos virabrequins que vieram quebrados de campo demonstrou que a falha em campo ocorreu após um tempo médio de uso de 55 horas (Figura 18).

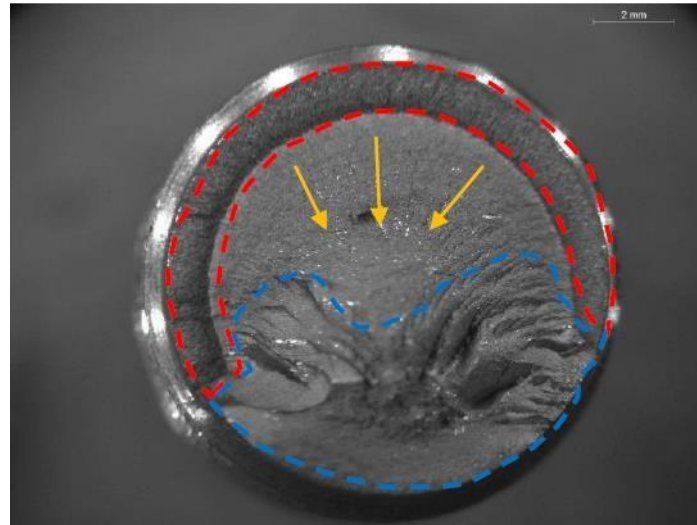
Figura 18 – Virabrequim com fratura na região da rosca no lado da embreagem do motor.



Fonte: a autora, 2019

A falha em todos os casos apresentou fractografia semelhante com a da Figura 19. A região em vermelho representa a zona de iniciação da trinca que foi nucleada em diversos pontos. A região em amarelo é referente a zona de propagação da trinca, não são observadas marcas de fadiga. Por fim, a região em azul é o local de falha catastrófica, na qual o material rompeu por não suportar mais a carga a qual estava submetido.

Figura 19 – Superfície de Fratura do Virabrequim. Aumento: 25x.



Fonte: a autora, 2019

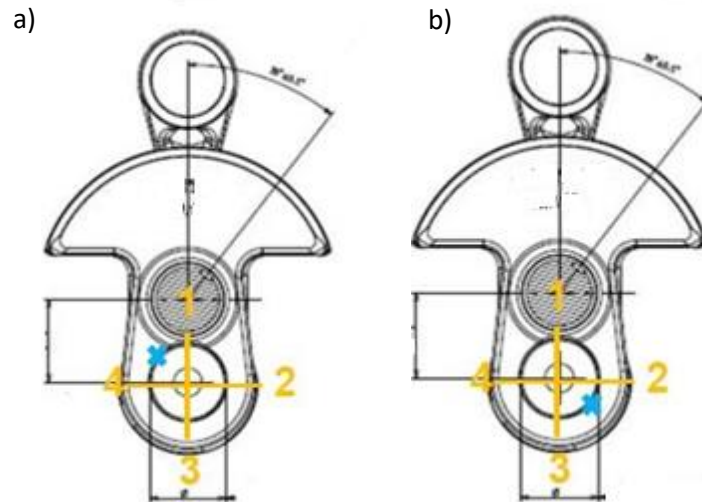
Uma análise do componente demonstra que todas as falhas iniciaram na marca de usinagem próxima a redução de diâmetro ( indicada por uma seta na Figura 20). Logo, uma causa potencial da falha desse componente seja a marca de usinagem, uma vez que ela pode atuar como um concentrador de tensão local, além da redução de diâmetro. Como mostra a Figura 21, em relação ao eixo, as zonas de rupturas foram em locais diferentes, ou seja, o componente não tem um concentrador de tensão local igual para todos ou relativo à distribuição de massa, uma vez que algumas falhas ocorrem no lado do componente que apresenta maior massa. Em a), a falha final ocorreu no quadrante 1-4, enquanto em b) a falha ocorre entre 2-3.

Figura 20 – Visão lateral da região de fratura no virabrequim.



Fonte: a autora, 2019

Figura 21 – Zonas de ruptura final do componente em relação ao diâmetro não ocorrem no mesmo local para diferentes falhas.



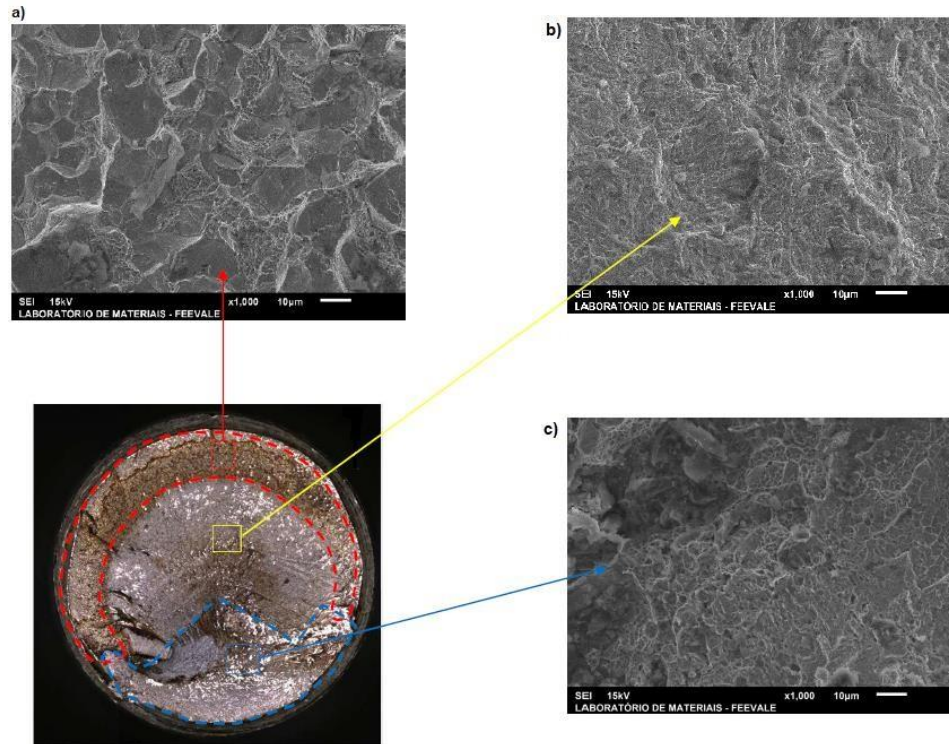
Fonte: a autora, 2019.

As análises de MEV mostraram três diferentes regiões. Na Figura 22, em a) tem a região de fratura frágil intergranular, essa região diz respeito à camada cementada que devido ao maior potencial de carbono (aproximadamente 1%) apresenta comportamento frágil. Em b) tem-se a região de propagação da trinca a qual apresenta uma superfície de fratura dúctil. Por fim, em c) que é a região de ruptura final (quando o material não suportou mais a tensão) tem-se também a característica de uma fratura dúctil.

As imagens de MEV, bem como a de microscopia óptica não permitiram o encontro de uma única zona de nucleação para a iniciação. Acredita-se que a falha teve início em vários pontos da borda do virabrequim.



Figura 22 – Análise de Microscopia Eletrônica de Varredura da superfície de fratura. Em a) fratura frágil nos contornos de grão devido ao elevado potencial de carbono no local. Em b), na região de propagação a fratura ocorreu de forma dúctil como em c), na região de falha.

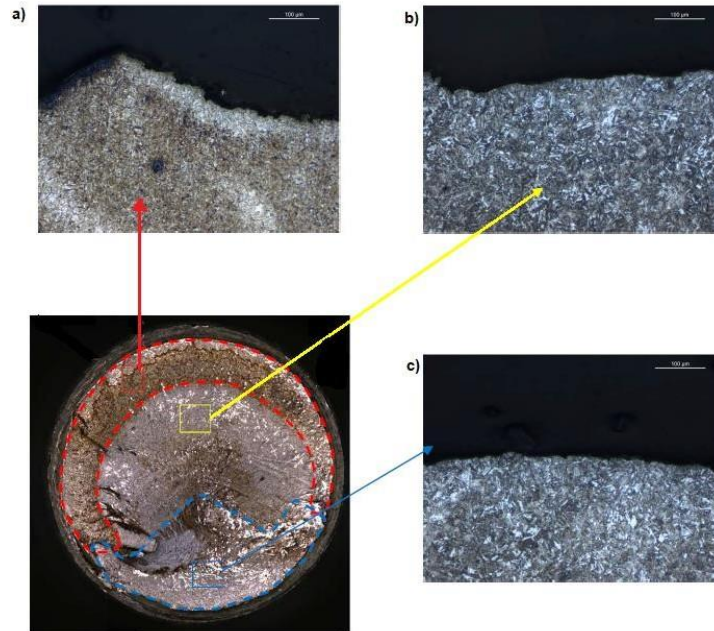


Fonte: a autora, 2019.

A Figura 23, mostra as microestruturas presentes na superfície da fratura. Em a), na região próxima a superfície, tem uma microestrutura de martensita revenida uma vez que esse é o local com maior teor de carbono do componente e o primeiro a resfriar. Em b) e c), tem-se microestruturas de martensita revenida e bainita devido ao menor teor de carbono na região central da peça e a menor taxa de resfriamento durante a têmpera.



Figura 23 – Análise de Microestrutura da Superfície de Fratura. Em a) na zona de maior potencial de carbono tem-se a presença de martensita revenida e austenita retida. Em b) e c) tem-se martensita revenida e bainita devido ao menor potencial de carbono e taxa de resfriamento.



Fonte: a autora, 2019.

Os resultados de análise de Dureza Superficial e Camada Cementada estão presentes na Tabela 3. Antes da montagem da máquina, é montado o conjunto do virabrequim que é composto por dois virabrequins referentes ao lado do volante e da embreagem, uma biela e uma gaiola de agulhas. O conjunto final é retificado na região do eixo e, portanto, tem uma especificação de CHD  $\geq 0,6$  mm e uma dureza superficial maior que 720 HV10. Nota-se que em alguns casos a camada cementada ficou abaixo ou próximo ao limite inferior de especificação para o pino do virabrequim isso ocorre devido ao aquecimento local durante o funcionamento da máquina que atinge temperaturas suficientes para difundir o carbono na superfície e diminuir a dureza no local. A CHD do eixo apresentou todos os valores acima do especificado, bem como a dureza do pino.

Tabela 3 – Medida de Dureza Superficial e Profundidade de Camada Cementada

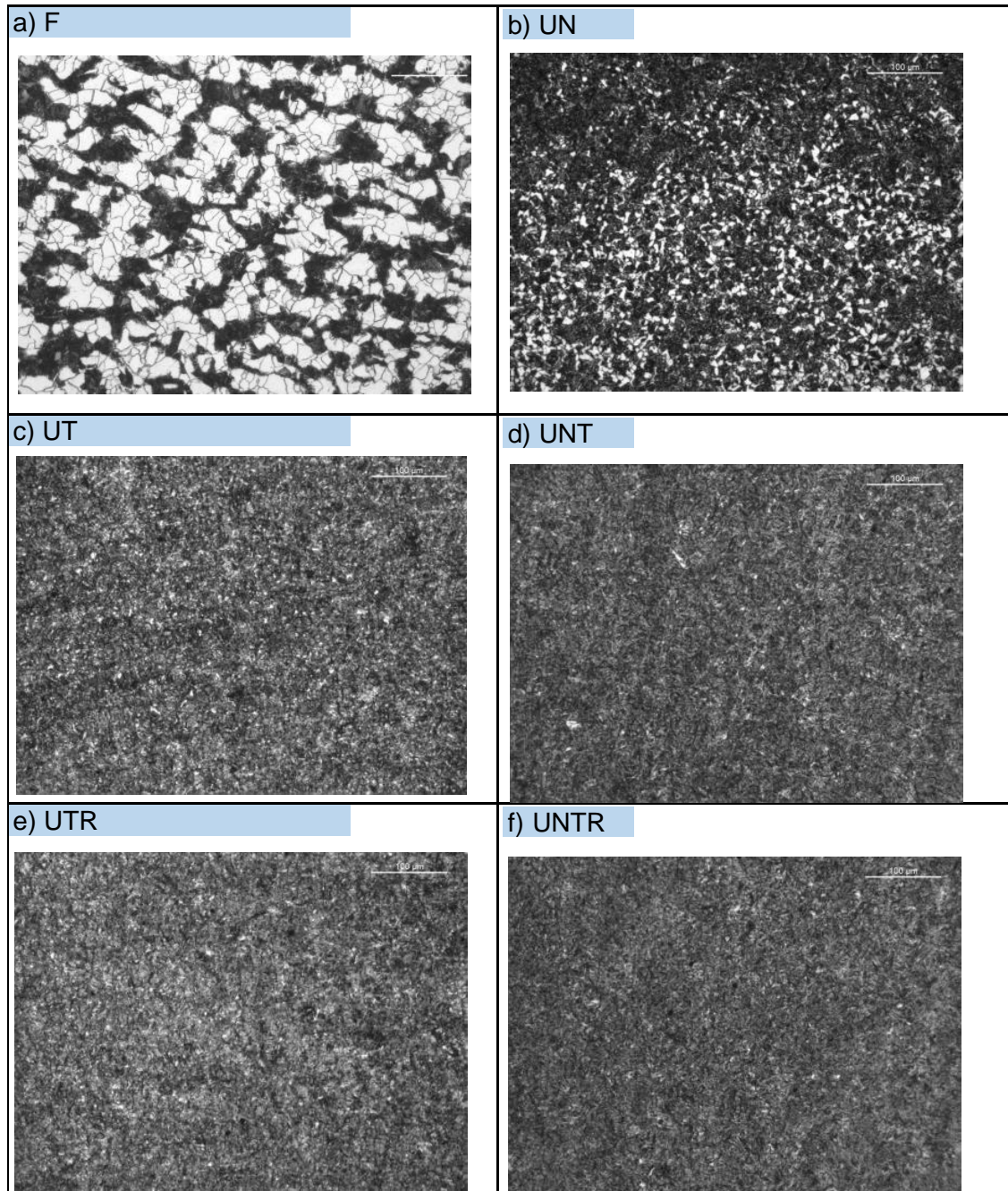
ID	Min CHD – Pino (mm)	Max CHD – Pino (mm)	Min CHD – Eixo (mm)	Max CHD Eixo (mm)	Dureza do Pino (HV10)
1	0,665	0,753	-	-	724
2	0,585	0,662	-	-	726
3	0,622	0,669	-	-	732
4	0,762	0,795	0,829	0,847	748
5	0,707	0,767	-	-	750
6	0,73	0,79	0,84	0,87	754
7	0,77	0,83	0,96	1,00	749
8	0,816	0,832	0,900	0,978	736
9	0,617	0,717	0,739	0,787	751
10	0,70	0,82	0,90	0,93	742
11	0,790	0,790	0,873	0,847	749

Fonte: a autora, 2019.

## 5.2. Microestrutura

Na Figura 24 tem-se a microestrutura da superfície no aumento de 200x, ao se comparar as imagens das letras a) e e), nota-se uma modificação microestrutural após a cementação na superfície e têmpera em óleo, antes tinham-se grãos de ferrita e colônias de perlita e agora, tem-se martensita revenida. Além disso, percebe-se que a microestrutura de e) e f) são semelhantes o que demonstra que a normalização não afeta de forma significativa a obtenção microestrutural, mas um olhar atento a outros fatores como tamanho de grão e camada cementada são necessários.

Figura 24 – Imagens da superfície dos virabrequins com aumento de 200x. As amostras foram identificadas de acordo com a Tabela 2.

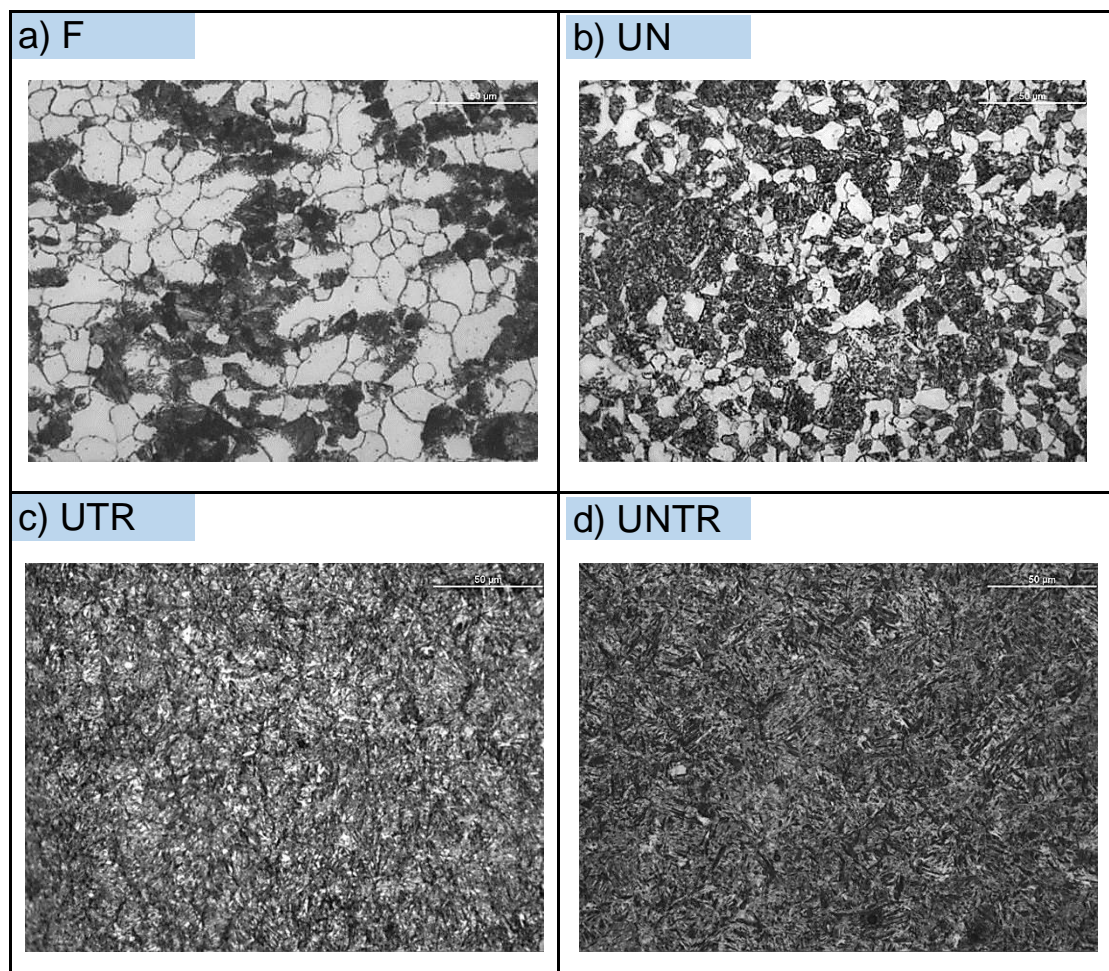


Fonte: a autora, 2019



Na Figura 25, agora com aumento de 50x, pode-se perceber com melhor detalhe a modificação ocasionada pela normalização de a) para b), notando-se uma melhor distribuição das colônias de perlita e grãos de ferrita. Ao comparar as imagens c) e d), nota-se que as microestruturas não tem uma diferença visual significativa, mas como dito anteriormente é necessária a análise do tamanho de grão e da dureza superficial.

Figura 25 – Imagens da superfície dos virabrequins com aumento de 500x. As amostras foram identificadas de acordo com a Tabela 2.

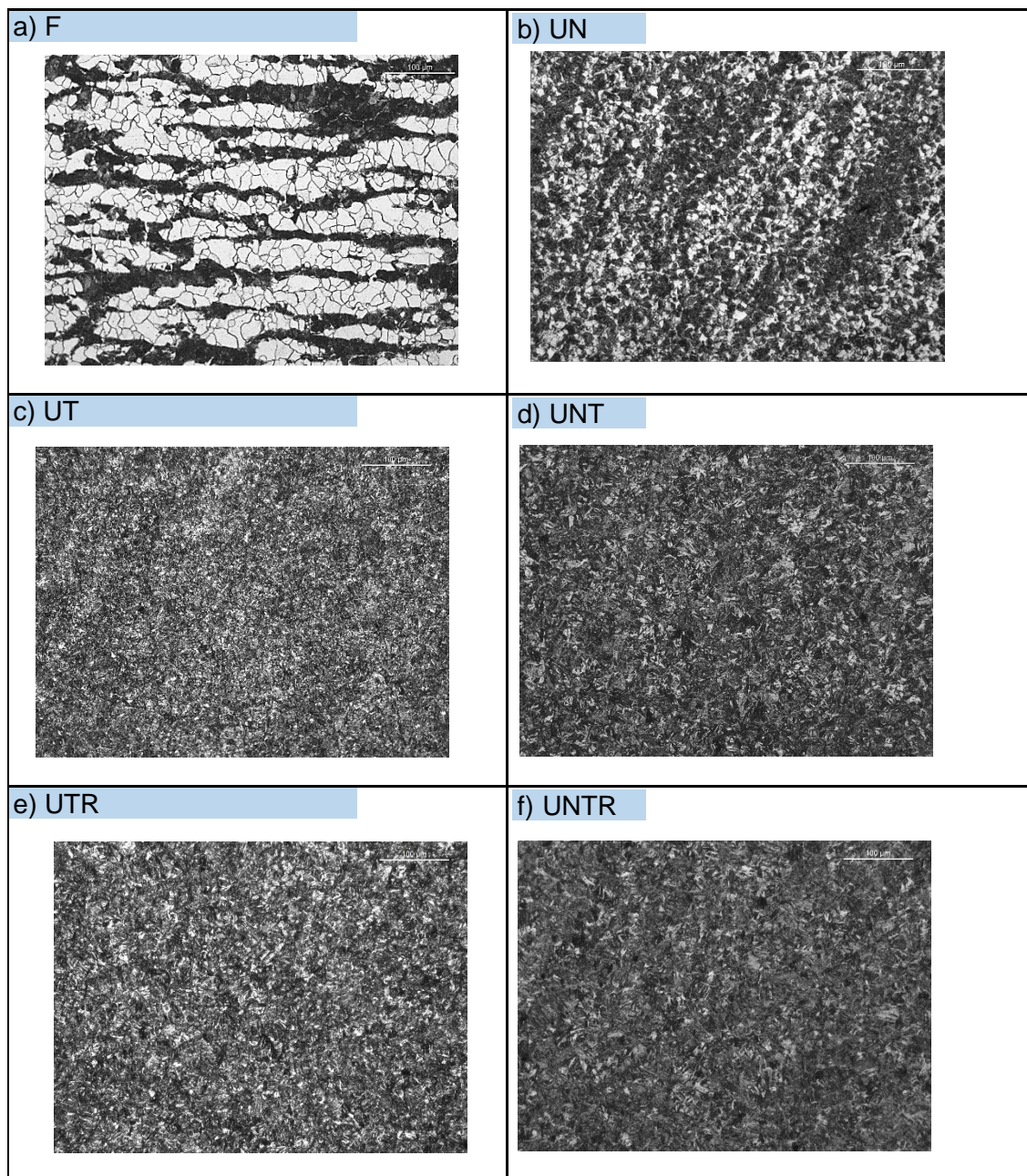


Fonte: a autora, 2019



A Figura 26 demonstra, as microestruturas obtidas na região central da amostra com aumento de 20x. Ao comparar as imagens a) e e), as colônias de perlita e grãos de ferrita após o tratamento térmico transformaram-se em bainita. A transformação não resulta em martensita (Figura 26) uma vez que o teor de carbono do centro é inferior ao da borda (cimentação superficial), além disso, a taxa de resfriamento em ambos é diferente.

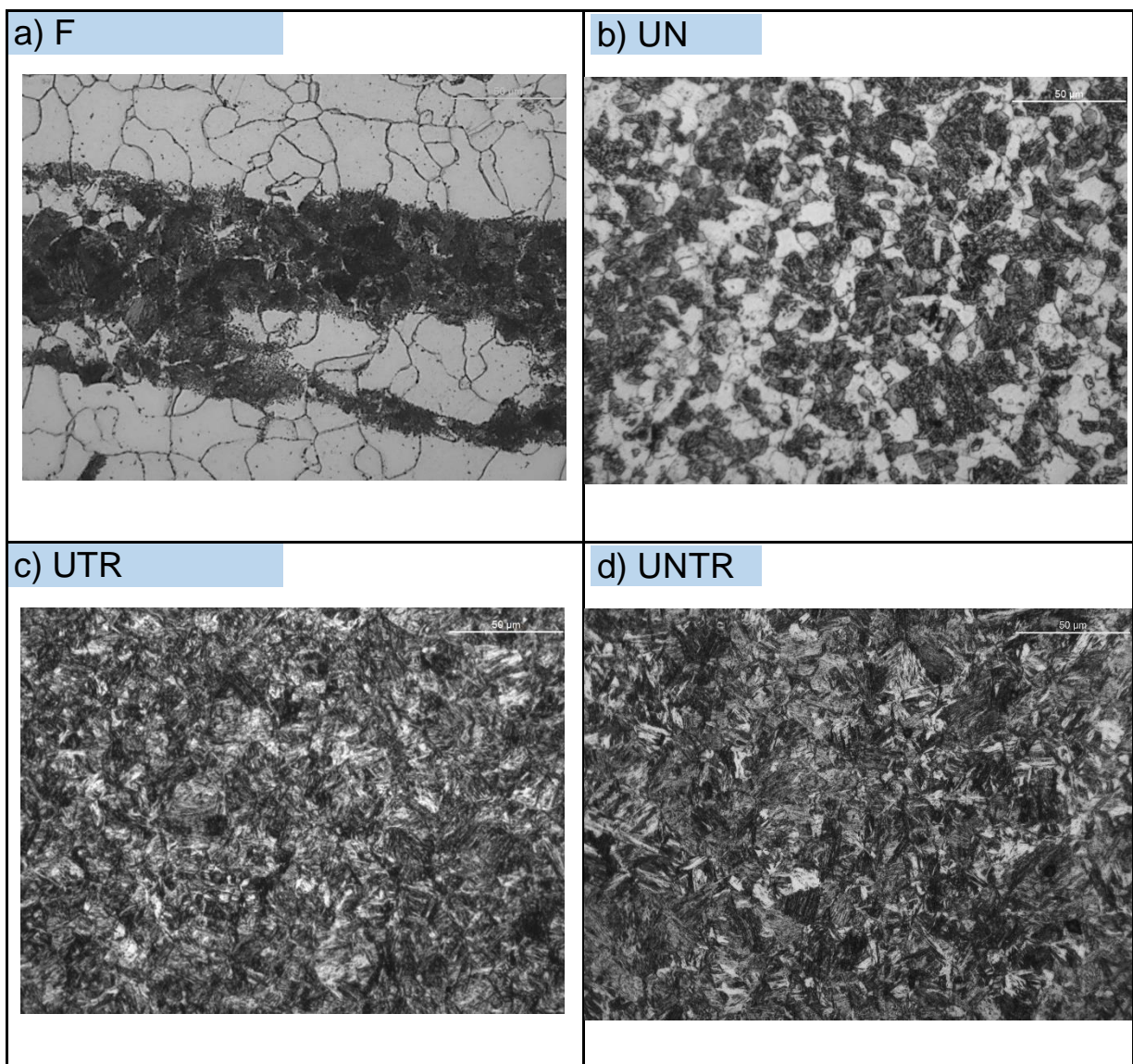
Figura 26 – Imagens do centro dos virabrequins com aumento de 200x. As amostras foram identificadas de acordo com a Tabela 2.





Na Figura 27, tem-se a microestrutura do centro em aumento de 500x. Ao relacionar com as letras c) e d) com as letras e) e f) da Figura 26, percebe-se a diferença microestrutural entre bainita (situação com menor teor de carbono no centro do virabrequim) e martensita (maior teor de carbono devido a cementação superficial). Além disso, ao se comparar a Figura 27 a) com a Figura 25 a), nota-se uma modificação na distribuição das colônias de perlita, no centro do virabrequim as colônias têm um aspecto mais bandeado quando comparado com a superfície.

Figura 27 – Imagens do centro dos virabrequins com aumento de 500x. As amostras foram identificadas de acordo com a Tabela 2.

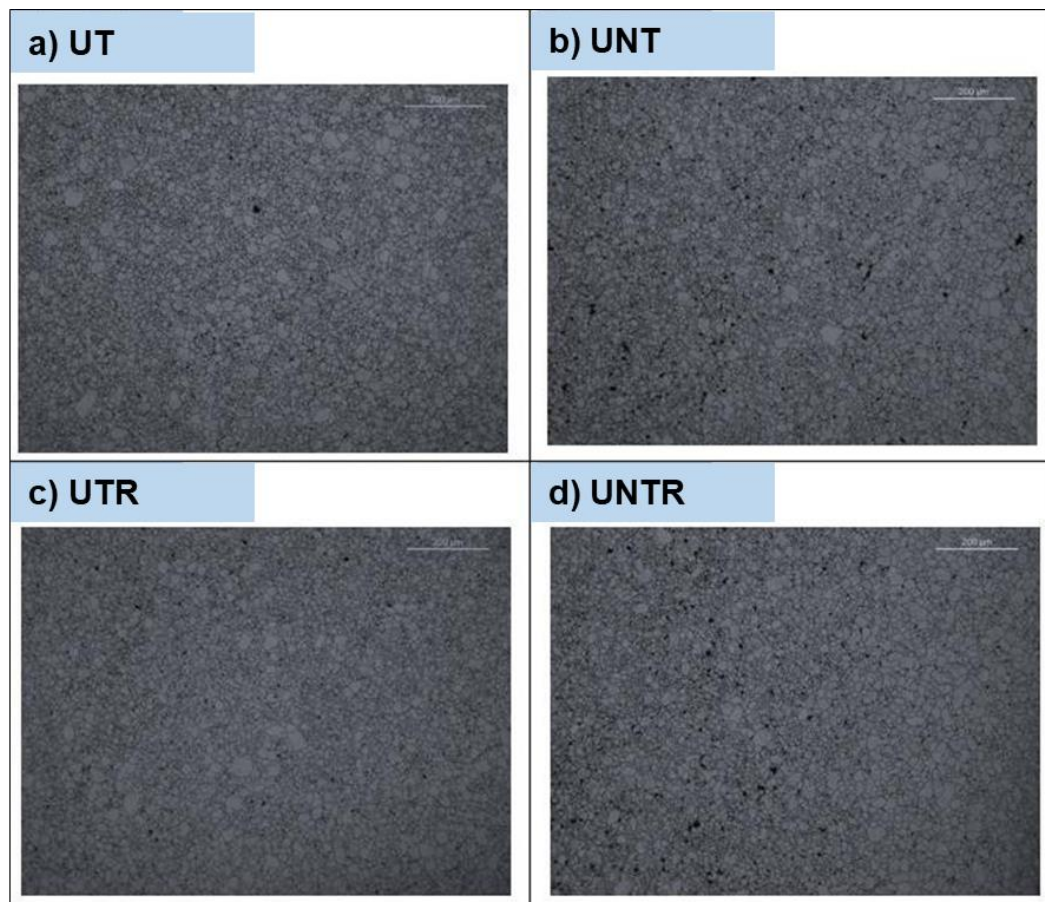


Fonte: a autora, 2019

### 5.3. Tamanho de Grão

As análises de tamanho de grão dos diferentes virabrequins foram realizadas na superfície dos eixos dos virabrequins. Percebe-se pela Figura 28, que o tamanho de grão na região é heterogêneo para todas as condições de tratamento térmico, sendo eles maiores que 5 de acordo com a classificação da ASTM E112. Além disso, notou-se que eles são dispersos de forma aleatória (sem concentração de grão maiores nas bordas).

Figura 28 – Tamanho de Grão das amostras após tratamento térmico. Ataque: Picral 5%.  
Ampliação: 100x.



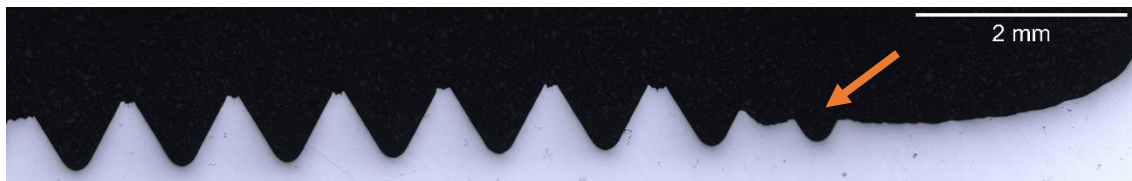
Fonte: a autora, 2019.

### 5.4 Análise da Região da Rosca

Ao analisar o primeiro filete da rosca (Figura 29), nota-se uma heterogeneidade de tamanho de grão no fundo do filete (Figura 30), se sabe pela teoria que o tamanho de grão é um concentrador de tensão. Uma observação em maior aumento (Figura 31), faz perceber a

presença de microtrincas, estas já formadas no processo de laminação na obtenção da rosca no eixo, tais microtrincas podem ser responsáveis pela iniciação da propagação de trinca em uma falha nesse local, uma vez que são concentradores de tensão.

Figura 29 – Rosca do Virabrequim. O primeiro filete é mostrado pela seta. Aumento de 50x.



Fonte: a autora, 2019.

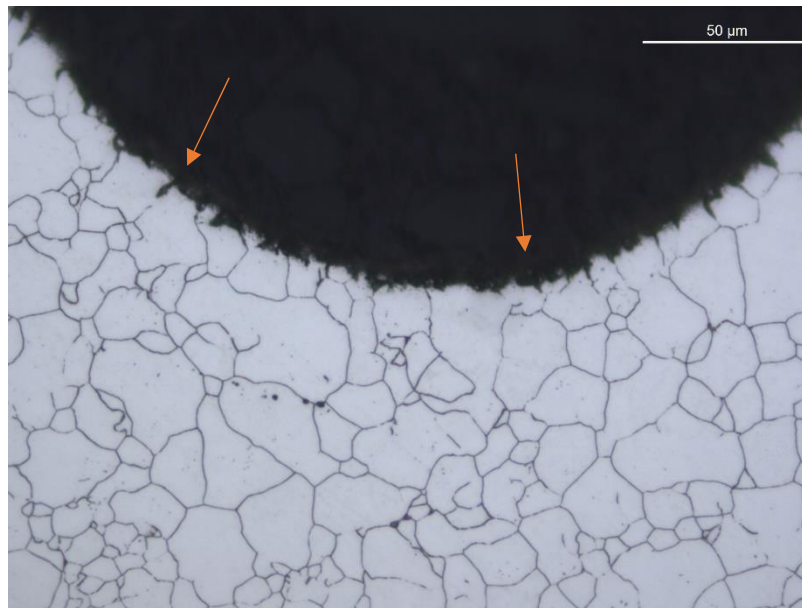
Figura 30 – Heterogeneidade no tamanho de grão no fundo de rosca. Aumento de 200x.  
Ataque: Picral.



Fonte: a autora, 2019.



Figura 31 - Heterogeneidade no tamanho de grão no fundo de rosca, com detalhe para as microtrincas. Aumento de 500x. Ataque: Picral.



Fonte: a autora, 2019.

#### 5.5 Profundidade de Camada Cementada (CHD)

A especificação para camada cementada é que a mesma deve ser de 0,9 a 1,1 mm após o processo de tempera e revenimento. A Tabela 4, demonstra os valores de CHD mínimos e máximos medidos nas amostras cementadas. A CHD no caso das amostras sem normalização é menor do que aquelas que foram normalizadas, mostrando que ao modificar a distribuição da microestrutura do forjado pela normalização, a cementação é facilitada.

Tabela 4 – Medida de Profundidade de Camada Cementada

ID	Amostra	Mín. (mm)	Máx. (mm)	$\Delta$ (mm)
RN	1	0,974	0,944	0,020
	2	0,981	1,018	0,037
	3	0,960	1,000	0,04
RSN	1	0,789	0,791	0,002
	2	0,720	0,774	0,054
	3	0,729	0,750	0,021

Fonte: a autora, 2019.

## 5.6 Dureza

Na Tabela 5, tem-se as durezas superficiais medidas para as amostras que não sofreram o processo de normalização. Nota-se que a dureza aumenta da amostra forjada para tratada uma vez que a mesma tem sua microestrutura modificada de grãos de ferrita e colônias de perlita para martensita, além de um acréscimo no teor de carbono. Quando revenida, a dureza da amostra diminui uma vez que a sua microestrutura é modificada para martensita revenida pela alteração da estrutura cristalina e está apresenta uma dureza menor que martensita.

Tabela 5 – Medidas da Dureza nas amostras não-normalizadas.

	<b>Método</b>	<b>Amostra</b>	<b>Medida 1</b>	<b>Medida 2</b>	<b>Média</b>
<b>F</b>	<b>HB 185,5/2,5</b>	1	156	158	<b>162</b>
		2	166	168	<b>167</b>
		3	165	167	<b>166</b>
<b>UT</b>	<b>HRC</b>	1	61	63	<b>62</b>
		2	63	64	<b>64</b>
		3	62	64	<b>63</b>
	<b>HV10</b>	1	815	825	<b>820</b>
		2	797	834	<b>816</b>
		3	813	821	<b>817</b>
<b>UTR</b>	<b>HRC</b>	1	60	62	<b>61</b>
		2	59	61	<b>60</b>
		3	61	61	<b>61</b>
	<b>HV10</b>	1	739	739	<b>739</b>
		2	745	743	<b>744</b>
		3	743	738	<b>741</b>

Fonte: a autora, 2019.

A Tabela 6 apresenta os valores de dureza medidos para os virabrequins que sofreram tratamento térmico de normalização antes do processo de cementação e têmpera. Das amostras forjadas (Tabela 5) para as amostras normalizadas (Tabela 6), nota-se um aumento na dureza do material, possivelmente, devido à melhor distribuição de colônias de perlita e grãos de ferrita. Em relação as amostras normalizadas e tratadas, percebe-se um acréscimo no valor da dureza devido ao aumento no teor de carbono pela cementação e à transformação microestrutural ocasionada pela têmpera. Ao compararmos as amostras temperadas e revenidas nota-se uma diminuição na dureza devido a alteração da estrutura cristalina.

Tabela 6 – Medidas da Dureza nas amostras normalizadas

ID	Método	Amostra	Medida 1	Medida 2	Média
UN	HB 187,5/2,5	1	296	297	<b>297</b>
		2	291	298	<b>295</b>
		3	296	296	<b>296</b>
UNT	HRC	1	64	63	<b>64</b>
		2	64	64	<b>64</b>
		3	64	64	<b>64</b>
	HV10	1	804	820	<b>812</b>
		2	809	809	<b>809</b>
		3	808	806	<b>807</b>
UNTR	HRC	1	60	61	<b>61</b>
		2	60	61	<b>61</b>
		3	60	61	<b>61</b>
	HV10	1	741	744	<b>743</b>
		2	743	741	<b>742</b>
		3	743	743	<b>743</b>

Fonte: a autora, 2019.

Ao se comparar o resultado das amostras UTR e UNTR que diferem quanto ao processo de normalização, as durezas são próximas o que vai de acordo com a microestrutura que é semelhante nos dois casos.

### 5.7 Composição Química

A composição química medida no Spectromax nos virabrequins forjados está presente na Tabela 7. Ao comparar com a composição teórica se confirma que o aço utilizado na fabricação do virabrequim é o 17CrNi6-6.

Tabela 7 – Composição Química do virabrequim forjado.

	Especificação		Medida 1	Medida 2	Medida 3	Média
	Mín. (%)	Máx. (%)				
<b>C</b>	0,14	0,2	0,165	0,150	0,148	0,154
<b>Si</b>	0,15	0,4	0,356	0,350	0,352	0,353
<b>Mn</b>	0,5	0,9	0,53	0,53	0,53	0,53
<b>P</b>	0	0,02	0,017	0,019	0,020	0,019
<b>S</b>	0	0,005	0,0031	0,0035	0,0039	0,0035
<b>Cr</b>	1,4	1,7	1,49	1,49	1,49	1,49
<b>Ni</b>	1,4	1,7	1,54	1,53	1,55	1,54
<b>Mo</b>	-	-	0,053	0,055	0,055	0,054
<b>Al</b>	0,025	0,05	0,037	0,027	0,027	0,03
<b>Cu</b>	0	0,25	0,177	0,180	0,178	0,178
<b>Ti</b>	0	0,005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005
<b>Sb</b>	0	0,006	<0,0010	<0,0010	<0,0010	<0,0010
<b>Sn</b>	0	0,03	0,011	0,012	0,012	0,012
<b>As</b>	0	0,06	0,0078	0,0090	0,010	0,0089
<b>Fe</b>	-	-	<95,5	<95,5	<95,5	<95,5

Fonte: a autora, 2019.

#### 5.8 Ensaio de Fadiga por Flexão Rotativa

Os resultados por flexão rotativa levaram a falha do componente para as duas cargas de 110 e 130 kg. Nas demais cargas aplicadas, os componentes não apresentaram falha após 24h. Na Tabela 8, estão presentes os resultados obtidos nos ensaios.

Tabela 8 – Número de ciclos suportados por cada componente.

Carga (Kg)	Tempo (h)	Rotações (rpm)	Nº Ciclos
130*	6,2	1700	6,32E+05
110*	19,02	1700	1,94E+06
90	24	4000	5,76E+06
70	24	4000	5,76E+06
50	24	4000	5,76E+06
30	24	4000	5,76E+06

Fonte: a autora, 2019.

Na Figura 32 , a seguir tem-se a fratura ocasionada pela aplicação de carga de 130 kg após aproximadamente 6h de ensaio.

Figura 32 – Fratura do virabrequim após ensaio de flexão rotativa.

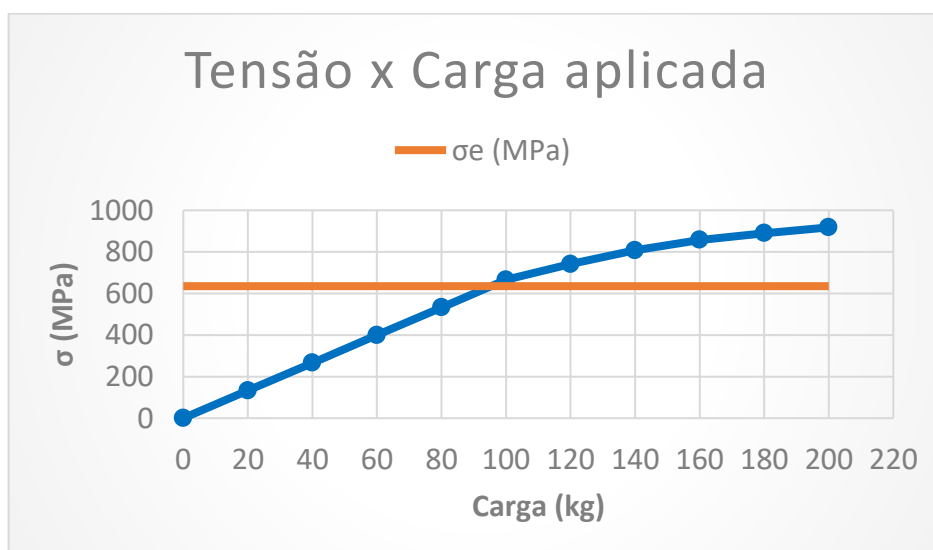


Fonte: a autora, 2019.

### 5.9 Análise de Elementos Finitos (FEA)

A análise de elementos finitos (FEA), mostrou que em cargas acima de 90 kg o material atinge a tensão de escoamento e começa a deformar de forma permanente. Na Figura 33, tem o gráfico com os valores de tensão máxima principal plotados.

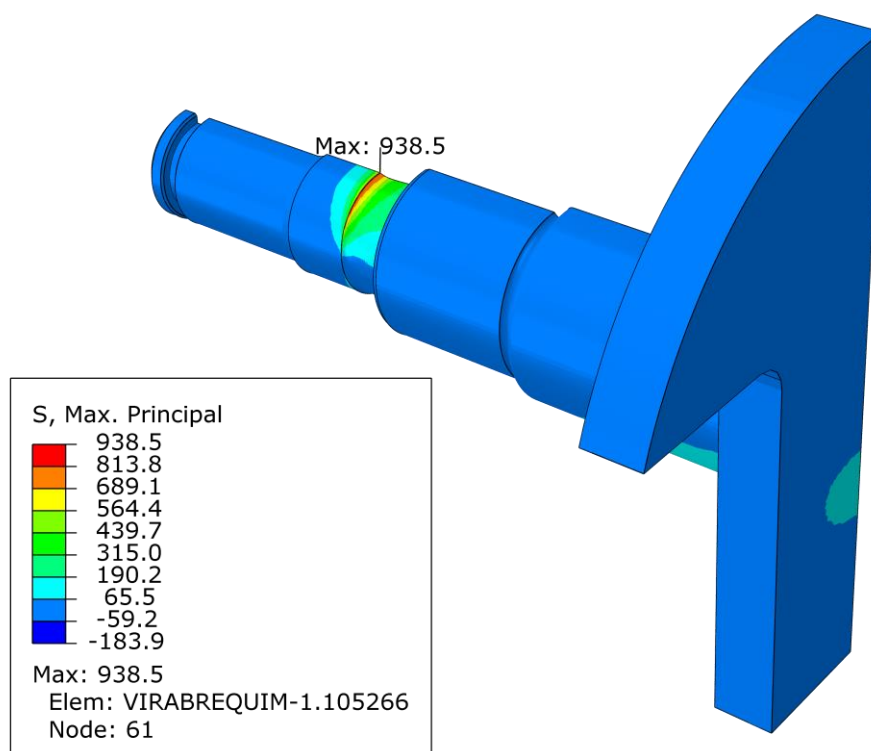
Figura 33 – Curva de Tensão Principal por carga aplicada na região da rosca



Fonte: a autora, 2019.

Na Figura 34 , tem-se a malha do virabrequim com uma carga aplicada de 200 Kg, a tensão máxima principal é de aproximadamente de 938,5 MPa o que excede em mais de 300 MPa a tensão de escoamento do componente. Na análise da malha, foi possível constatar que a tensão máxima principal ocorre na região do primeiro filete da rosca o que vai de encontro com o observado nas falhas em campo e nos virabrequins que fraturaram no ensaio de flexão rotativa.

Figura 34 – Virabrequim com carga de 200 kg aplicada na região da rosca



Fonte: LAMEF, 2019.

## 6 CONCLUSÕES

Com os resultados expostos, conclui-se que:

- As durezas das amostras com diferentes tratamentos térmicos mostraram-se semelhantes, bem como a microestrutura final obtida nos dois processos;
- As amostras normalizadas apresentaram uma profundidade de camada cementada maior que as não normalizadas, o que indica que a redistribuição das microestruturas auxilia no processo de difusão de carbono;
- O tamanho de grão para dos dois diferentes processos de tratamento térmico mostrou-se semelhante, sendo o tamanho de grão  $\geq 5$  de acordo com a ASTM E112 distribuídos de forma heterogênea por todo eixo;
- As análises das falhas em campo mostraram que o virabrequim rompe na região da marca de laminação, próximo ao primeiro filete da rosca;
- Uma análise mais detalhada da região da rosca mostrou que no primeiro filete nos contornos de grão é possível visualizar a presença de microtrincas que poderiam atuar como concentradores de tensão;
- Amostras com carga acima de 100 kg apresentaram falha no ensaio de flexão rotativa o que vai de encontro com a AEF que demonstrou que acima desse valor ocorre deformação permanente no material;
- As amostras ensaiadas com a carga de 80 Kg (com e sem normalização), não apresentaram falhas o que pode significar que a camada abaixo de  $1 \pm 0,1$  mm não modifica a vida em fadiga do componente;
- As análises das superfícies que sofreram fratura no ensaio em máquina são diferentes das que sofreram falha em campo o que levanta a hipótese de fadiga multiaxial quando o virabrequim está em uso no campo.



## 7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros, recomenda-se:

- Ensaio para caracterização das propriedades mecânicas do eixo (17Cr-Ni6,6 com camada cementada);
- Melhoria na máquina de ensaio de fadiga rotativa devido a suas limitações quanto a montagem do corpo de prova;
- Teste em *Shaker* para simular as faixas de carregamento vibracional do sistema de eixo;
- Ensaio de torque variando a aplicação do mesmo em virabrequins com/sem variação de camada cementada;
- Ensaio de vida em fadiga em diferentes condições do virabrequim:
  - Padrão de Produção;
  - Ausência da marca de início de filete na rosca;
  - Rosca sem cementação;
  - Modificação na heterogeneidade nos tamanhos de grão.
- Por fim, recomenda-se ensaio em máquina das melhores condições do ensaio anterior.

## 8 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASM International. Metals Handbook: Heat Treating. Vol. 4. 1991.

ASM International. Metals Handbook: Materials Characterization. Vol. 10. 9ª Edição. 1986

ASM International. Metals Handbook: Fractography. Vol. 12. 1987

ASM International. Metals Handbook: Fatigue and Fracture. Vol. 19. 1996

ASTM – E112 -13. Standard Test Methods for Determining Average Grain Size.

BECERRA, J. A.; JIMENEZ, F. J.; TORRES, M.; SANCHEZ, D.T.; CARVAJAL, E. Failure Analysis of reciprocating compressor crankshafts. Engineering Failure Analysis. Dezembro de 2010. Espanha.

BUDYNAS, Richard G.; NISBETT, J. Keith. Elementos de Máquinas de Shigley. Projeto de Engenharia Mecânica. AMGH Editora Ltda. 8ª Edição. São Paulo. 2011.

CALLISTER, William D. Ciência e Engenharia de Materiais: uma introdução. 9ed. Rio de Janeiro: LTC, 2018.

CHIAVERINI, Vicente. Aços e Ferros Fundidos. Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais. São Paulo, 7ª Edição, 1996.

COLPAERT, Hubertus. Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns. Editora Blucher; Edição 4ª. São Paulo, 2008.

DIETER, George E. Metalurgia Mecânica. Guanabara Dois. 2ª Edição.

FONTE, M.; INFANTE, V.; FREITA, M.; REIS, L. Failure mode analysis of two diesel engine crankshafts. Procedia Structural Integrity. Fevereiro, 2016. Portugal.

FONTE, M.; ANES, V.; DUARTE, P.; REIS, L. FREITA, M. Crankshaft failure analysis of a boxer diesel motor. Engineering Failure Analysis. Abril, 2015. Portugal.

GARCIA, Amauri; SPIM, Jaime Alvares; DOS SANTOS, Carlos Alexandre. Ensaio dos Materiais. LTC Editora. 2000.

ICKERT, Fernando. Ensaio de fadiga por flexão para eixos desenvolvidos com diferentes materiais. Faculdade Horizontina. Horizontina, 2014.

INTERACTION PLEXUS. Formação de Green Belt. 2019

KAREEM, B. Mechanical failure analysis of automobile crankshafts under service reconditioned modelling approach. Engineering Failure Analysis. 2017. Nigeria.

KWIETNIEWSKI, Carlos Eduardo Fortis; KISS, Francisco José; STROHAECKER, Telmo Roberto; REGULY, Afonso. Tratamento Térmico de Aços e Ferros Fundidos. Escola de Engenharia. Departamento de Metalurgia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2014

MINUCCI, Frederico Rodrigues. Fadiga Multiaxial Aplicada à Avaliação da Vida de Virabrequins. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. Campinas, 2010.

MONTAZERSADGH, Farzin H.; FATEMI, Ali. Dynamic Load and Stress Analysis of a Crankshaft. University of Toledo. 2007.

NASCIMENTO, Denise Ferreira Laurito. Estudo do comportamento em fadiga de baixo ciclo e fadiga sob cargas multiaxiais das ligas de alumínio AA6005, AA6063 e AA6351. Escola de Engenharia de Lorena, Universidade de São Paulo. Lorena, 2015.

NOGUEIRA, Rodrigo Moura. Máquina de Testes de Fadiga Mecânica Por Flexão Rotativa. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – Departamento de Engenharia Mecânica.

NORTON, Robert L. Projeto de Máquinas: uma abordagem integrada. 4º Ed. 2013. Bookman.

ROSA, Edison. Análise de Resistência Mecânica: Mecânica da Fratura e Fadiga. Departamento de Engenharia Mecânica. Grupo de Análise de Projeto Mecânico. Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) . Outubro, 2002.

SANDYA, K; KEERTHI M.; SRINIVAS. Modeling and stress analysis of crankshaft using FEM package ansys. Internacional Reserach Journal of Engineering and Techninology (IRJET). Janeiro, 2016. India.

SEARS, F. W., ZEMANSKY, M. V. Física. Brasília, v.2. Ed Universidade de Brasília, 1973.

SENAI. Curso de Tratamento Térmico – Módulo I. 2018

SINGH, S. S. K.; ABDULLAH, S.; NIKABDULLAH, N. The needs of understanding stochastic fatigue failure for the automobile crankschaft: A review. Engineering Failure Analysis.

SOUZA, Sérgio Augusto. Ensaios Mecânicos de Materiais Metálicos. Editora Blucher. 5º Edição. 1982.

STROHAECKER, Telmo Roberto. Mecânica da Fratura. Escola de Engenharia. Laboratório de Metalurgia Física. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2016.

THEJASREE, P.; KUMAR, G. Dileep; LAKSHMI, S. Leela Prasanna. Modelling and Analysis of Crankshaft for passenger car using ANSYS. Materials Today Proceedings. 2017.

TRONCO, Luiz Fernando. Desenvolvimento de procedimento para a realização de ensaio de fadiga por flexão-rotativa e obtenção da vida em fadiga da liga AA6063-T6. Universidade Tecnológica do Paraná. Curso de Engenharia Mecânica. Pato Branco, 2016.

WITEK, Lucjan; STACHOWICZ, Feliks; ZAŁĘSKI, Arkadiusz. Failure Investigation of the crankshaft of diesel engine. Procedia Structural Integrity. Setembro 2017, Portugal.