

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANA  
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS  
CURSO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS**

**INFLUÊNCIA DA DUPLA NORMALIZAÇÃO NA VARIAÇÃO  
DIMENSIONAL APÓS PROCESSO DE CEMENTAÇÃO E TÊMPERA  
NO AÇO ETN22**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**LONDRINA  
2019**

**ISABELA ROSADO BELÊ**

**INFLUÊNCIA DA DUPLA NORMALIZAÇÃO NA VARIAÇÃO  
DIMENSIONAL APÓS PROCESSO DE CEMENTAÇÃO E TÊMPERA  
NO AÇO ETN 22**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Departamento Acadêmico de Engenharia de Materiais da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, *campus* Londrina, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Odney Carlos Brondino

**LONDRINA**

**2019**



---

## Apêndice 11 TERMO DE APROVAÇÃO

**ISABELA ROSADO BELE**

### **INFLUÊNCIA DA DUPLA NORMALIZAÇÃO NA VARIAÇÃO DIMENSIONAL APÓS PROCESSO DE CEMENTAÇÃO E TÊMPERA NO AÇO ETN 22**

Trabalho de conclusão de curso apresentado no dia 21 de novembro de 2019 como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Câmpus Londrina. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

---

Profª Drª. Silvia Midori Higa  
(UTFPR – DAEMA)

---

Prof. Dr. Amadeu Lombardi Neto  
(UTFPR – DAMEC)

---

Prof. Dr. Odney Carlos Brondino  
(UTFPR – DAEMA)

---

Profª. Drª. Silvia Midori Higa  
(UTFPR – Departamento Acadêmico de Engenharia de Materiais)  
Coordenadora do Curso de Engenharia de Materiais

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente gostaria de agradecer aos meus pais, Adriana Mendes Rosado Belê e Elizeu Barbosa de Souza Belê, por proporcionarem essa oportunidade e por serem uma referência na minha vida. Agradeço a liberdade que me deram de trilhar meu próprio caminho e o suporte prestado ao longo dele. As minhas irmãs, Maiara Rosado Belê e Mariana Rosado Belê, obrigada por estarem presentes na minha vida mesmo quando estávamos distantes, isso fez toda a diferença.

Agradeço também ao meu namorado, Daniel H. N. Zitelli, por compartilhar todos esses anos comigo, ser meu melhor amigo e por sempre me incentivar a seguir em frente nos momentos de dificuldades.

Agradeço aos meus amigos, por todos os momentos de descontração que compartilhamos dentro e fora da universidade. Cada um desses momentos foi de extrema importância para chegar até aqui.

Agradeço ao meu orientador, Odney Carlos Brondino, por toda a confiança, dedicação e orientação.

Agradeço a Eaton Ltda, por permitir a realização do trabalho nas suas dependências e especialmente ao time do tratamento térmico liderado pelo Jonas A. Pinelli. Obrigada pelo engajamento, confiança, reconhecimento e por fazerem eu me sentir parte do time.

Por fim, agradeço a UTFPR – Londrina por sua estrutura e ao corpo docente da engenharia de materiais, com os quais aprendi muitas lições que vou levar para toda a vida.

## RESUMO

As engrenagens são os componentes mecânicos de grande importância no setor de transmissões automotivas. Um dos problemas que mais custam as indústrias é a distorção dimensional. A distorção é um fenômeno que pode ocorrer devido a uma vasta gama de motivos, sendo de difícil detecção a origem do problema. Na Eaton Ltda., uma das engrenagens fabricadas apresenta tendência de maior estabilidade dimensional quando normalizada duas vezes, quando comparada a uma única normalização. Essa estabilidade é importante, pois permite ajustes no processo que garantam o atendimento as especificações do produto. Sendo assim, esse trabalho buscou na microestrutura do material uma possível explicação para a menor variação das dimensões. Medidas de tensão residual, tamanho de grão, profundidade de camada cementada e austenita retida foram feitas na tentativa de identificar o porquê das diferenças encontradas. Os resultados obtidos não evidenciaram os porquês da estabilidade dimensional com dupla normalização, enquanto os resultados dimensionais deixam clara a melhoria do processo.

**Palavras-chave:** Engrenagem. Normalização. Distorção Dimensional. Tamanho de grão.

## **ABSTRACT**

Gears are the major mechanical components in the automotive transmission industry. One of the problems that cost the industry the most is dimensional distortion. Distortion is a phenomenon that can occur due to a wide range of reasons, and the source of the problem is difficult to detect. At Eaton Ltda one of the manufactured gears tends to have greater dimensional stability when double normalized compared to a single normalization. This stability is important as it allows process adjustments to ensure the achievement of product specifications. Thus, this work sought in the microstructure of the material a possible explanation for the narrow variation of dimensions. Residual stress, grain size, carburized layer depth and retained austenite were measured in an attempt to identify the reason for the differences that have been found. The obtained results did not show the reasons of the dimensional stability with double normalization, while the dimensional results make clear the process improvement.

**Key words:** Gear. Normalization. Dimensional Distortion. Grain size.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Nomenclatura fundamental de uma engrenagem	14
Figura 2 – Engrenagem de dentes retos a) vista frontal e b) vista isométrica	15
Figura 3– Engrenagem cilíndrica de dente helicoidal a) vista esquerda e b) vista isométrica	15
Figura 4 – Engrenagem cônica de dente reto a) vista posterior e b) vista isométrica	16
Figura 5 – Engrenagem cônica de dente reto	17
Figura 6 – Representação esquemática do forjamento a) Matriz aberta; b) matriz fechada e c) sem rebarba.	18
Figura 7 – Cortador a) hob e b) shape	20
Figura 8 – Esquema do processo hobbing	20
Figura 9 – Esquema do processo shaping	21
Figura 10 – Diagrama TTT representando resfriamento da normalização e recozimento	22
Figura 11 Distribuição da tensão residual axial em um cilindro de 40 milímetros de AISI 4140 calculada e medida experimentalmente	24
Figura 12 – Severidade de têmpera	25
Figura 13 – Esquema do ensaio Jominy	26
Figura 14 – Gráfico de dureza por distância da extremidade relacionado ao diagrama TTT	26
Figura 15 – Relação entre as propriedades mecânicas do AISI 4340 e temperatura de revenimento	27
Figura 16 – Diagrama de Ishikawa com diversos fatores que afetam a distorção	28
Figura 17 – Fluxo de processos típicos de componentes de sistemas de transmissão e potenciais causadores de distorção	29
Figura 18 – Fluxo do processo de estudo do presente trabalho	31
Figura 19 – Máquina KlingelInberg <i>GmbH</i> : Centro de medição de engrenagens	32
Figura 20 – Direção de leitura do passo do dente pelo apalpador	33
Figura 21 – Esquema conicidade e tombamento	34
Figura 22 – Equipamento LXR D análise de tensão residual e austenita retida	35

Figura 23 – Posicionamento da engrenagem na máquina para ensaio de tensão residual	36
Figura 24 – Equipamento para obtenção do perfil de dureza	37
Figura 25 – Amostra embutida a quente com baquelite	38
Figura 26 – Gráficos de conicidade verde e pós revenimento	40
Figura 27 – Gráficos de tombamento peças verde e pós revenimento	41
Figura 28 – Gráfico da variação de conicidade e tombamento antes e após processo de cementação, tempera e revenimento	42
Figura 29 – Gráfico de perfil de dureza da peça 5N1, 6N2 e 9N2	45
Figura 30– Regiões analisadas, detalhe 1 e 2, das amostras 5N1, 6N2 e 9N2	46
Figura 31– Micrografia das amostra 5N1: tamanho de grão com ampliação 100x; ataque picral	47
Figura 32 – Micrografia das amostra 6N2: tamanho de grão com ampliação 100x; ataque picral	47
Figura 33 – Micrografia das amostra 9N2: tamanho de grão com ampliação 100x; ataque picral	48
Figura 34 – Micrografia das amostras 5N1, 6N2 e 9N2. Aumento 500x	49
Figura 35 – Micrografia da superfície após revenimento das amostras 5N1, 6N2 e 9N2	50
Figura 36 – Micrografias em escala de cinza	51
Figura 37 – Micrografias em tom de cinza, realçadas com tons de vermelho	52



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição do Aço SAE 8620	30
Tabela 2 – Informações sobre condição, quantidade e código das pelas	32
Tabela 3 – Dados do ensaio geométrico	39
Tabela 4 – Valores de tensão residual	44
Tabela 5 – Valores médios de tensão para N1 e N2	44
Tabela 6 – Dureza superficial, primitivo, raiz e profundidade de camada de 5N1, 6N2 e 9N2	46
Tabela 7 – Fração volumétrica de austenita retida (%) obtidas a partir do software ImageJ®	53

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b>	<b>11</b>
<b>2 OBJETIVOS</b>	<b>12</b>
2.1 OBJETIVO GERAL	12
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	12
<b>3 JUSTIFICATIVA</b>	<b>13</b>
<b>4 REFERENCIAL TEÓRICO</b>	<b>14</b>
4.1 ENGRENAGENS	14
4.1.1 Cilíndricas de Dentes Retos	15
4.1.2 Cilíndrica Helicoidal	15
4.1.3 Cônica	16
4.1.4 Par Pinhão-Coroa Sem Fim	17
4.2 ETAPAS DA FABRICAÇÃO DE UMA ENGRENAGEM POR FORJAMENTO	17
4.2.1 Forjamento	17
4.2.2 Processos De Usinagem	19
4.2.3 Tratamentos Térmicos E Termoquímicos	21
4.2.3.1 Normalização	22
4.2.3.2 Cementação	23
4.2.3.3 Têmpera e revenimento	24
4.3 DISTORÇÃO DIMENSIONAL	27
<b>5 MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>30</b>
5.1 CARACTERÍSTICAS GERAIS	30
5.2 ENSAIO DIMENSIONAL	32
5.3 ENSAIO DE TENSÃO RESIDUAL	35
5.4 ENSAIO DE DUREZA	37
5.5 ENSAIO METALOGRÁFICO	37
<b>6 RESULTADO E DISCUSSÃO</b>	<b>39</b>
6.1 ENSAIO DIMENSIONAL	39
6.2 TENSÃO RESIDUAL	43
6.3 ENSAIO DE DUREZA	44
6.4 MICROESTRUTURA	46

6.4.1 Tamanho de Grão	46
6.4.1 Micrografia de Núcleo e Superfície	48
<b>7 CONCLUSÃO</b>	<b>54</b>
<b>8 SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS</b>	<b>56</b>
<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>57</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A distorção de componentes é um problema inerente aos processos de manufatura. Na indústria automobilística essa variável impacta diretamente a performance do produto podendo produzir ruído excessivo ou falha prematura do componente. Além de também gerar altos custos para as indústrias devido a retrabalho ou até mesmo descarte de peças.

Acreditava-se que o processo de tratamento térmico era o principal causador de deformação térmica, no entanto, com o passar dos anos notou-se que toda a cadeia produtiva, desde a fabricação da matéria-prima, até as condições do acabamento, influencia nas dimensões finais do produto.

Para garantir qualidade dos componentes é importante conhecer, então, cada etapa da manufatura analisando o comportamento dimensional e identificando as variáveis que afetam o dimensional. Dessa forma é possível determinar quais alterações do processo necessitam ser feitas para melhora dos resultados.

O componente estudado nesse trabalho se trata de uma engrenagem forjada, que apresentava distorção significativa, a qual foi resolvida por meio de tratamento térmico de dupla normalização. Entretanto, durante o processo de homologação desse procedimento, realizando somente um ciclo de normalização, não foi possível aprová-lo após a análise dimensional da engrenagem.

Dessa forma, esse trabalho teve como objetivo realizar o acompanhamento do processo de homologação, coleta de dados e realização de ensaios de forma a investigar por meio da microestrutura do material os motivos que levaram à estabilização dimensional pela realização da dupla normalização.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GERAL

Investigar através de análise dimensional, de tensão residual e metalográfica as diferenças entre uma engrenagem com uma ou duas normalizações.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Investigar a variação no dimensional na peça com uma e duas normalizações anterior e posteriormente ao processo de cementação, têmpera e revenimento.
- Investigar após o processo de cementação, têmpera e revenimento, as características metalográficas e de tensão residual das peças normalizadas uma e duas vezes e correlacionar com os dados de análise dimensional.

### 3 JUSTIFICATIVA

O objeto desse estudo foi uma engrenagem em processo de homologação, que tem como peça similar uma outra engrenagem já produzida pela empresa. A engrenagem similar apesar de aprovada em teste metalúrgico sofria uma grande rejeição no ensaio dimensional. Como forma de resolver o problema foram feitas alterações no processo de forma empírica para testar as melhorias no controle dimensional. Uma solução encontrada foi a utilização de um segundo ciclo de normalização, antes do processo de usinagem. Essa solução aumentou os custos de energia da planta, além de causar problemas de fluxo de produção, sem uma resposta do porquê desse método apresentar resultados positivos. O trabalho é baseado na hipótese que a dupla normalização reduz o tamanho do grão médio influenciando em diversas propriedades do aço. Dessa forma, serão analisadas metalurgicamente engrenagens retiradas do mesmo lote, porém em duas condições diferentes, submetidas a um ou dois ciclos de normalização, de forma a correlacionar o efeito desse tratamento com o comportamento dimensional resultante.

## 4 REFERENCIAL TEÓRICO

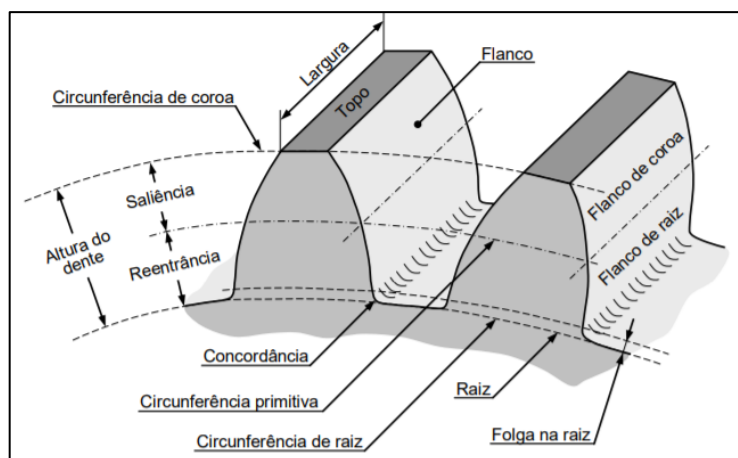
### 4.1 ENGRENAGENS

As transmissões automotivas têm uma vasta gama de componentes que possibilitam o seu funcionamento adequado dentre eles estão as engrenagens, objeto de estudo desse trabalho.

A engrenagem é um elemento de máquina utilizado para transmissão de torque e velocidade angular, em uma vasta gama de aplicações. Esses objetos estão presentes na humanidade desde a antiguidade, tempo no qual eram feitas de materiais fáceis de trabalhar, como madeira. Foi somente após a revolução industrial que a demanda por engrenagens mais resistentes se tornou relevante, com o desenvolvimento e aprimoramento de processos de manufatura, e diferentes tipos de engrenagens foram desenvolvidos (NORTON, 2013).

A Figura 1 mostra as regiões fundamentais de uma engrenagem associada com sua configuração geométrica.

Figura 1 – Nomenclatura fundamental de uma engrenagem



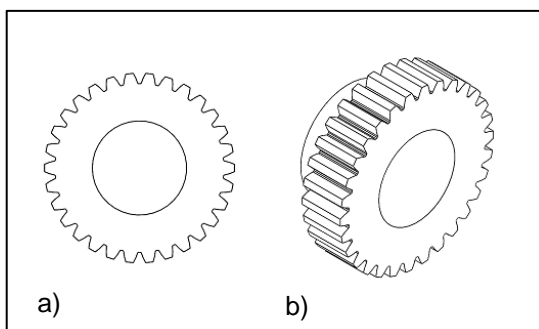
Fonte: FLORES (2014).

As engrenagens podem ser divididas em quatro tipos básicos: cilíndricas de dentes retos, cilíndrica de dentes helicoidais, cônicas e par pinhão-coroa sem fim.

#### 4.1.1 Cilíndricas de dentes retos

As engrenagens cilíndricas de dentes retos, Figura 2, transmitem movimento de um eixo paralelo ao outro através de dentes, também, paralelos (BUDYNAS; NISBETT, 2011). Essas engrenagens são as mais simples de produzir, apresentando baixo custo e não apresentam forças axiais como nos demais tipos de engrenagens. No entanto, apresentam maior emissão de ruídos durante a sua utilização (NORTON, 2013).

Figura 2– Engrenagem de dentes retos a) vista frontal e b) vista isométrica



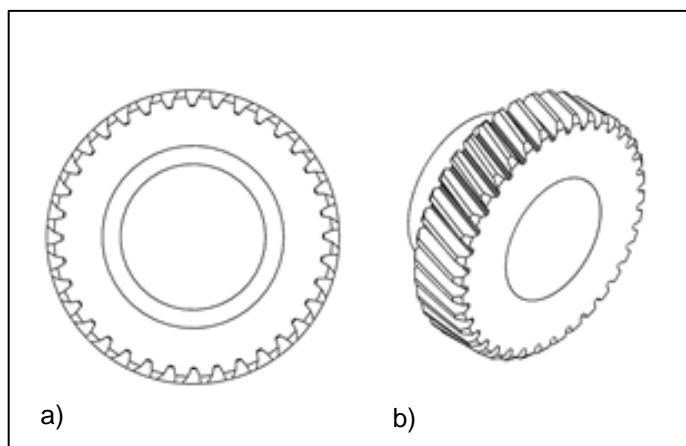
Fonte: Autoria própria (2019).

#### 4.1.2 Cilíndrica helicoidal

As engrenagens de helicoidais, Figura 3, podem ser utilizadas nas mesmas aplicações que as de dentes retos, no entanto, produzem menos ruído durante seu funcionamento. Essa característica está atrelada ao contato entre os dentes, que ocorre de forma gradual devido a existência de um ângulo entre o dentado e ao eixo de rotação, formando um ângulo de hélice. Nas transmissões automotivas, essa classe de engrenagem é a mais utilizada (NORTON, 2013).

Figura 3– Engrenagem cilíndrica de dente helicoidal a) vista esquerda e b) vista isométrica



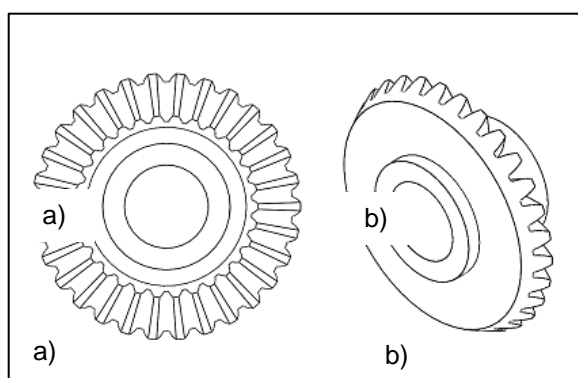


Fonte: Autoria própria (2019).

#### 4.1.3 Cônica

As engrenagens cônicas, Figura 4, são aquelas cortadas em cones acoplados ao invés de cilindros, como os dois itens anteriores. Transmitem movimento, principalmente, entre eixos não paralelos e entrecortam os vértices de cones podendo apresentar dentes retos ou espirais. Quando comparados, os dentes em espiral produzem menor ruído e com o mesmo diâmetro apresentam maior capacidade de carga.

Figura 4 – Engrenagem cônica de dente reto a) vista posterior e b) vista isométrica



Fonte: Autoria própria (2019).

#### 4.1.4 Par pinhão-coroa sem fim

São conjuntos que utilizam um parafuso sem fim, engrenagem helicoidal com no máximo 6 dentes, e uma coroa para transmissão de torque entre eixos perpendiculares entre si. Esse sistema, Figura 5, é utilizado quando é necessária a redução de velocidade e, por consequência, aumento de torque. Devido ao grande atrito durante o contato entre os dentes, é requerida a presença de um banho de óleo, a fim de evitar o superaquecimento aumentando, assim, a vida útil do conjunto (PAULI, 2006).

Figura 5 – Engrenagem cônica de dente reto



Fonte: Norton (2013).

## 4.2 ETAPAS DA FABRICAÇÃO DE UMA ENGRENAGEM POR FORJAMENTO

### 4.2.1 Forjamento

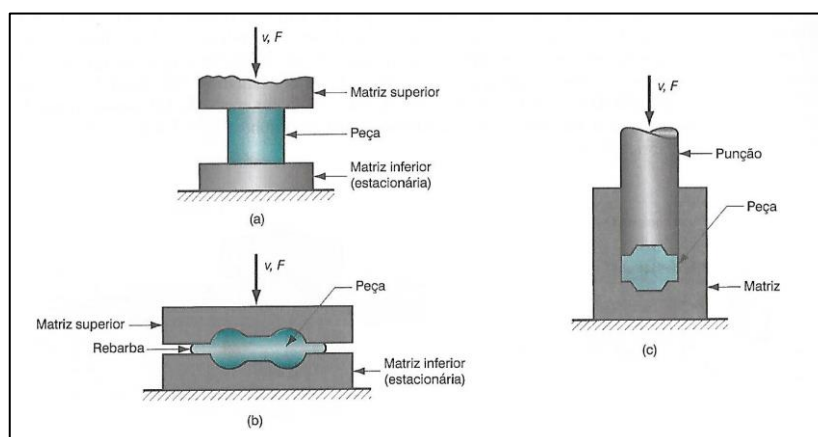
Evidências mostram que o forjamento é utilizado desde 4000 a.C., sendo um dos processamentos de metais mais antigo utilizado pela humanidade. Esse processo consiste na utilização de forças compressivas para moldar o material produzindo uma grande variedade de peças como rotores, turbinas e engrenagens. O forjamento pode

ser classificado quanto ao tipo de equipamento, ou a temperatura de trabalho utilizados (GROOVER, 2014).

As diferenças de ferramental dividem o forjamento em três operações: forjamento em matriz aberta, forjamento em matriz fechada e forjamento sem rebarba. O forjamento realizado em matriz aberta ocorre quando uma prensa, ou martelo, aplica tensões no material, porém não há uma cavidade limitante para onde o material escoará. Enquanto na matriz fechada o material é comprimido e o escoamento é significativamente limitado pela presença de uma matriz gerando rebarbas (GROOVER, 2014).

Já na terceira operação há maior controle do volume de metal que será forjado garantindo que haverá completo preenchimento da matriz, não havendo geração de rebarbas. Os três tipos podem ser vistos no esquema apresentado na Figura 6.

Figura 6 – Representação esquemática do forjamento a) Matriz aberta; b) matriz fechada e c) sem rebarba.



Fonte: Grover (2014).

De acordo com a temperatura de trabalho podemos ter forjamento a frio, a morno ou a quente. O trabalho a frio necessita de maiores níveis de tensão aplicadas, além de ser realizado em materiais que apresentam uma boa ductilidade em temperatura ambiente, a fim de diminuir a propensão a trincas durante o processo. As vantagens de utilizar o forjamento a frio estão na maior acurácia dimensional, melhor acabamento superficial e maior resistência da peça dada pelo alto grau de encruamento (GROOVER, 2014).

Já o forjamento a quente ocorre em  $0,5t_f$ , onde  $t_f$  é a temperatura de fusão do material, tendo como vantagem as menores tensões necessárias, porém apresentam

baixa acurácia dimensional e acabamento superficial de baixa qualidade (GROOVER, 2014).

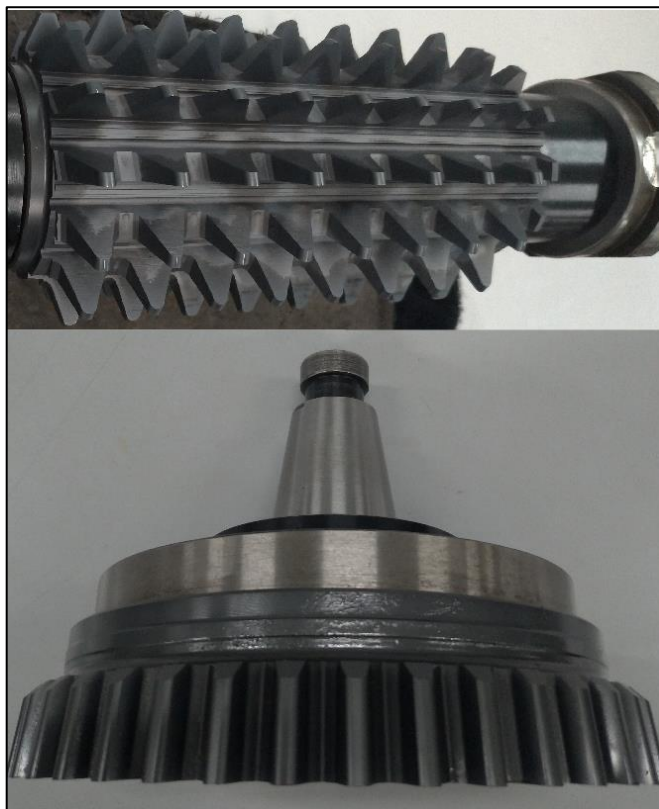
Após o processo de forjamento a microestrutura do material sofre alterações relacionadas ao escoamento e a temperatura presente. Com isso, é necessária a realização de um processo de normalização, visando a homogeneização da microestrutura antes de seguir para os processos de usinagem.

#### 4.2.2 Processos de Usinagem

Após a operação de forjamento e normalização, a peça, *blank*, passa para os processos de usinagem que visam remover material através de uma ferramenta de corte para produzir o formato da engrenagem. A primeira etapa consiste no faceamento da peça, onde através do movimento de rotação da peça em um torno e avanço de uma ferramenta monocortante.

Após o faceamento a peça é levada a operações que visam a fabricação dos dentes, podendo ser helicoidais, retos ou cônicos. A ferramenta de corte é fundamental na obtenção do dentado, podendo ser utilizados o processo de geração de dentes. Dentre as ferramentas utilizadas o *hob* e o *shape*, Figura 7, são as mais utilizadas.

Figura 7 – Cortador a) hob e b) shape



Fonte: Autoria própria (2019).

O processo de *hobbing* só é utilizado na fabricação de engrenagens cilíndricas e, geralmente, dentado externo. É um fresamento ao qual se dá o nome de corte caracol. A remoção de material é dada pela rotação constante tanto do *blank* quanto do *hob*, que avança na sua direção, como indicado na Figura 8 (CASTRO, 2005).

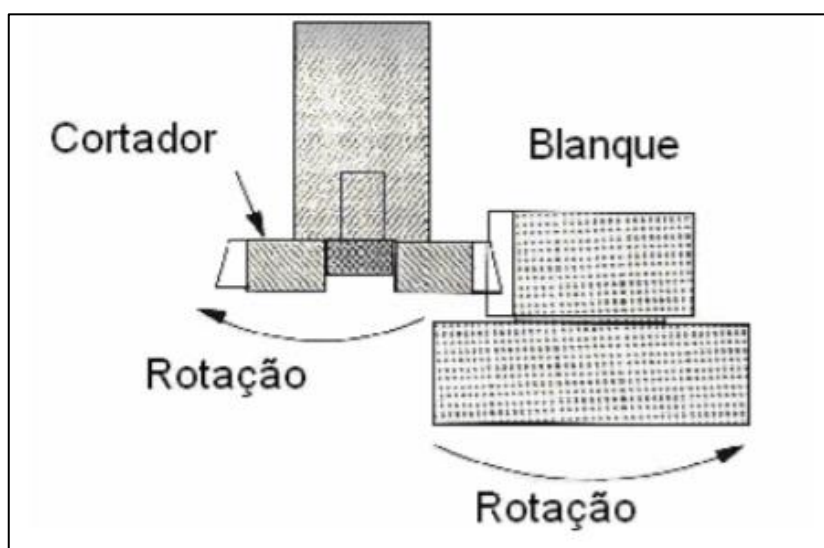
Figura 8 – Esquema do processo hobbing



Fonte: Sandvick [201-].

O processo de *shaping* se dá pelo movimento de aplainamento que utiliza um cortador com o formato dos dentes que serão usinados no *blank* denominado *shaper*. É um processo no qual a ferramenta avança de forma axial em relação ao centro do *blank*, Figura 9. Se os dentes forem helicoidais é utilizado um guia em hélice para o movimento da ferramenta, caso sejam retos, será uma linha reta (CASTRO, 2005).

Figura 9 – Esquema do processo shaping



Fonte: Castro (2005).

Após a abertura dos dentes o *blank* já é denominado engrenagem e está pronto para o processo de acabamento *shaving*. Esse processo tem como finalidade melhorar erros de espaçamento entre os dentes, perfil, passo, batimento e rugosidade deixados pelos processos anteriores, devendo ser realizado anteriormente ao tratamento térmico (CASTRO, 2005).

#### 4.2.3 Tratamentos térmicos e termoquímicos

Os tratamentos térmicos têm como objetivo alterar as respostas mecânicas dos materiais através de mudanças microestruturais sem alteração da composição química dos mesmos. Para isso são utilizados tempo, temperatura e taxas de resfriamento que proporcionem essas alterações (CHIAVERINI, 2008).

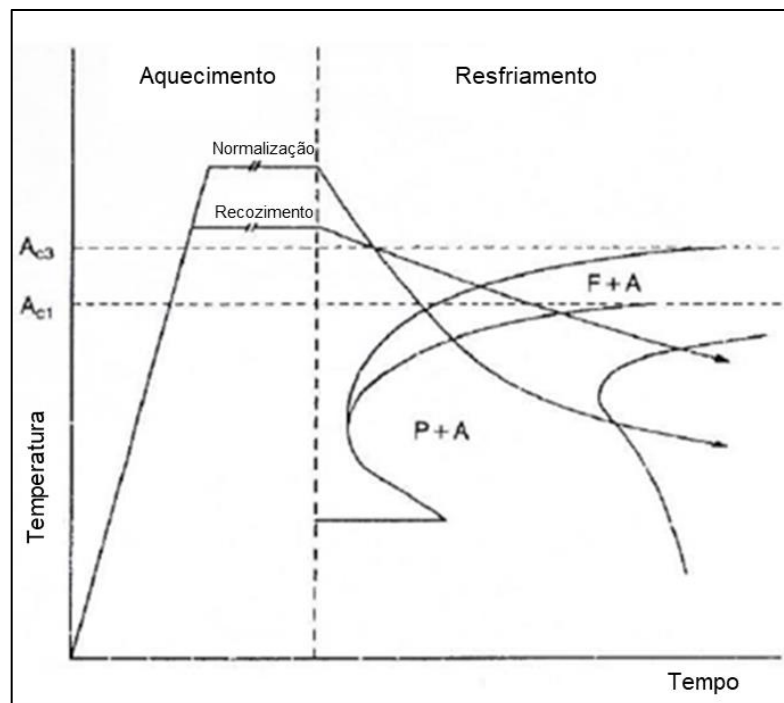
Já os tratamentos termoquímicos têm como objetivo a adição de elementos com pequeno raio atômico, como carbono, nitrogênio e boro, através do fenômeno da

difusão. Dessa forma é possível alterar as condições superficiais de uma peça, aumentando dureza e resistência ao desgaste, mantendo a ductilidade do núcleo. (SILVA; MEI, 2006).

#### 4.2.3.1 Normalização

A normalização é um tratamento térmico que tem como objetivo a obtenção das microestruturas perlíticas e ferríticas através da austenitização e posterior resfriamento ao ar. É similar ao recozimento pleno, no entanto com temperaturas ligeiramente maiores de austenitização e taxa de resfriamento mais bruscas, como pode ser vista na Figura 10. Nos aços hipereutetóides essa temperatura de austenitização é acima da  $A_{cm}$  e nos hipoeutetóides acima da  $A_{c1}$  (CHIAVERINI, 2008).

Figura 10 – Diagrama TTT representando resfriamento da normalização e recozimento



Fonte: Adaptado de (Krauss, 1997).

Ao aquecer o material a essas temperaturas, ocorre o fenômeno de nucleação de grão, que utiliza como força motriz os defeitos cristalinos gerados durante deformações plásticas para gerar novos grãos. O resfriamento em ar apresenta taxas mais altas quando comparado ao processo de recozimento, interrompendo o crescimento desses novos grãos. Gerando tamanho de grão ferrítico e espaço interlamelar perlítico menores, quando comparados ao mesmo material após recozimento (KRAUSS, 1997).

Dessa forma, além de homogeneizar a microestrutura, há ainda o seu refinamento, melhorando a resposta na têmpera e revenimento posterior. Outras aplicações são a melhoria de usinabilidade, modificação das tensões residuais presentes, refino de estruturas brutas de fusão e obtenção de dureza e resistência mecânica superiores e menor ductilidade comparadas ao aço pós recozimento (RUGLIC, 1991).

Ciclos de normalização podem ser utilizados em peças robustas de aços carbono ou baixa liga, onde a temperatura de forjamento é muito elevada. Esse processo é utilizado para solubilização total de constituintes na austenita, sem elevar o tamanho de grão da peça (RUGLIC, 1991).

#### 4.2.3.2 Cementação

A cementação é um processo que visa a difusão de carbono na superfície de um aço, geralmente de baixo carbono, para a posterior realização de têmpera e revenimento. Por ser um processo regido pela difusão as variáveis que afetam o processo são temperatura, tempo e condições da atmosfera (KRAUSS, 1997).

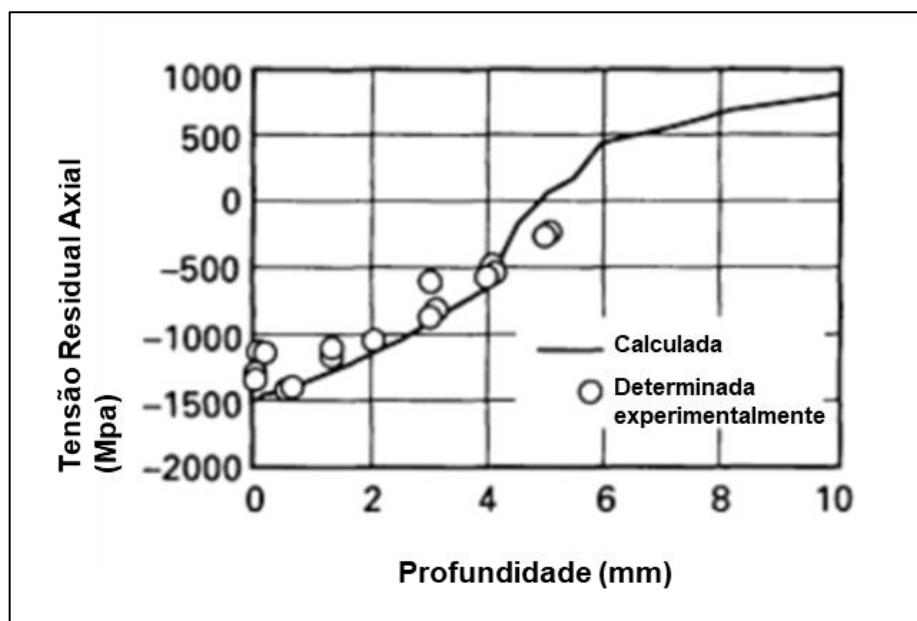
É um processo importante, pois o seu resultado é um gradiente de dureza que permite alta resistência ao desgaste em sua superfície e ductilidade no núcleo da peça. Essa característica garante sua utilização na indústria automobilista em eixos, contra eixos e engrenagens, aumentando sua vida útil (KRAUSS, 1997).

O processo de cementação acompanhado do processo de têmpera gera um gradiente de tensões na peça. A Figura 11 exemplifica a diferença entre as tensões residuais na superfície e no centro da peça. Na superfície, tanto a tensão calculada



como a encontrada experimentalmente são compressivas. Conforme caminha-se em direção ao centro as tensões são de tração (ERICSSON,1991).

Figura 11 Distribuição da tensão residual axial em um cilindro de 40 milímetros de AISI 4140 calculada e medida experimentalmente



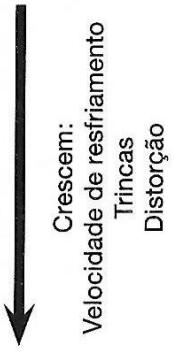
Fonte: ERICSSON (1991).

#### 4.2.3.3 Têmpera e revenimento

A têmpera é o tratamento térmico que tem como principal objetivo a obtenção, nos aços, da estrutura metaestável tetragonal de corpo centrado, TCC, a martensita. Para isso, deve ser aquecido a uma temperatura crítica, no campo da austenita, que varia de acordo com o percentual de carbono, seguido de um resfriamento brusco (CHIAVERINI, 2008). A severidade desse resfriamento e a microestrutura final está relacionada com o meio de têmpera utilizado. Na Figura 12 tem-se a relação entre severidade e meio de têmpera.

Figura 12 – Severidade de têmpera

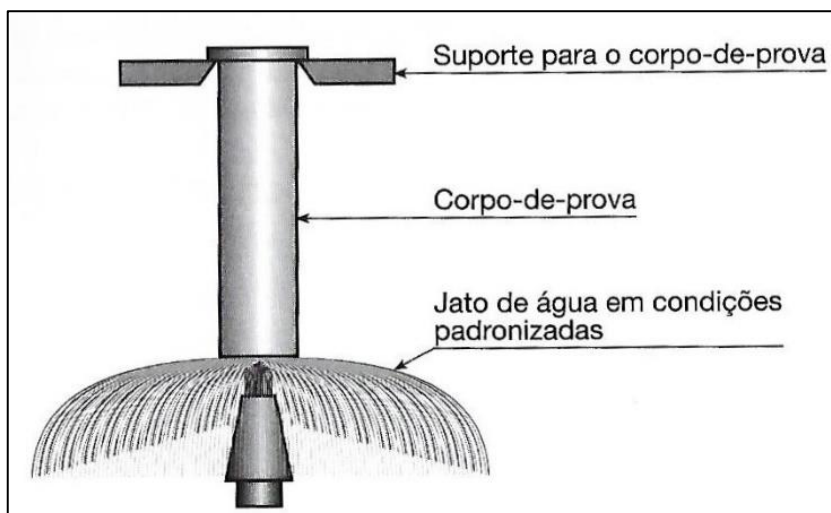
Meio de têmpera	Severidade de têmpera (H)
Óleo sem agitação	0,2
Óleo moderadamente agitado	0,5
Óleo violentamente agitado	0,7
Água sem agitação	1,0
Água fortemente agitada	1,5
Salmoura sem agitação	2,0
Salmoura fortemente agitada	5,0



Fonte: Colpaerte (2008).

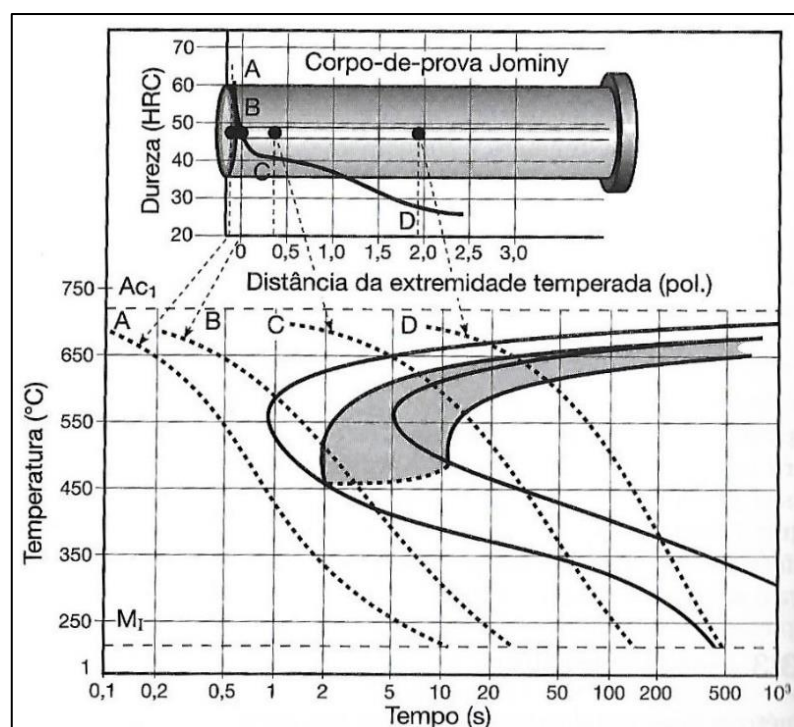
A severidade da têmpera será maior na superfície da peça, deixando uma superfície com maior dureza quando comparada ao seu núcleo. Esse gradiente pode ser medido através do ensaio Jominy. Nesse ensaio, após o tempo de austenitização, padronizado, o cilindro é resfriado por um jato de água em condições controladas. Na Figura 13 é mostrado um esquema do ensaio e a Figura 14 o gradiente de dureza em relação a distância da superfície relacionado com um diagrama de tempo, temperatura e transformação, TTT (COLPAERTE, 2008).

Figura 13 – Esquema do ensaio Jominy



Fonte: Colpaerte (2008).

Figura 14 – Gráfico de dureza por distância da extremidade relacionado ao diagrama TTT

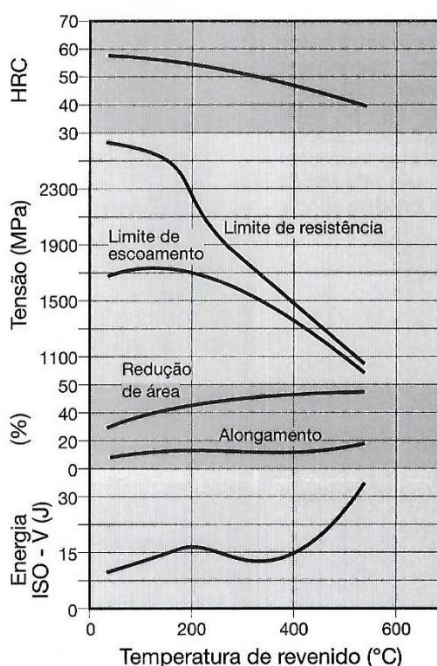


Fonte: Colpaerte (2008).

O rápido resfriamento impede a decomposição difusional da austenita em perlita, bainita ou ferrita. No entanto, ocorre a transformação por cisalhamento em martensita. A austenita não transformada em martensita é denominada retida. Para conversão dessa austenita em martensita e para diminuir a fragilidade do componente é realizado o processo de revenimento. A temperatura e tempo de revenimento variam

de acordo com a composição do aço e as propriedades finais desejadas (KRAUSS, 1997). Na Figura 15 é possível observar a relação entre as propriedades e a temperatura de revenido no aço AISI 4340.

Figura 15 – Relação entre as propriedades mecânicas do AISI 4340 e temperatura de revenimento



Fonte: Colpaerte (2008).

### 4.3 DISTORÇÃO DIMENSIONAL

A distorção dimensional é um problema universal que gera um grande custo para a indústria. Somente na Alemanha calcula-se que em 1995 a perda por distorção foi de aproximadamente 1 bilhão de dólares americanos na indústria de transmissões (THOBEN; et al, 2009 apud MACKENZIE, 2016).

A distorção ocorre não só na etapa de tratamento térmico, mas também ao longo de toda a cadeia dos processos de manufatura. Esse desvio dimensional pode ser ocasionado por diversos fatores. A Figura 16 mostra um diagrama de Ishikawa que ilustra bem a situação. É possível notar que é necessário conhecer profundamente e ter um processo bem controlado para que as especificações de do projeto sejam atendidas.

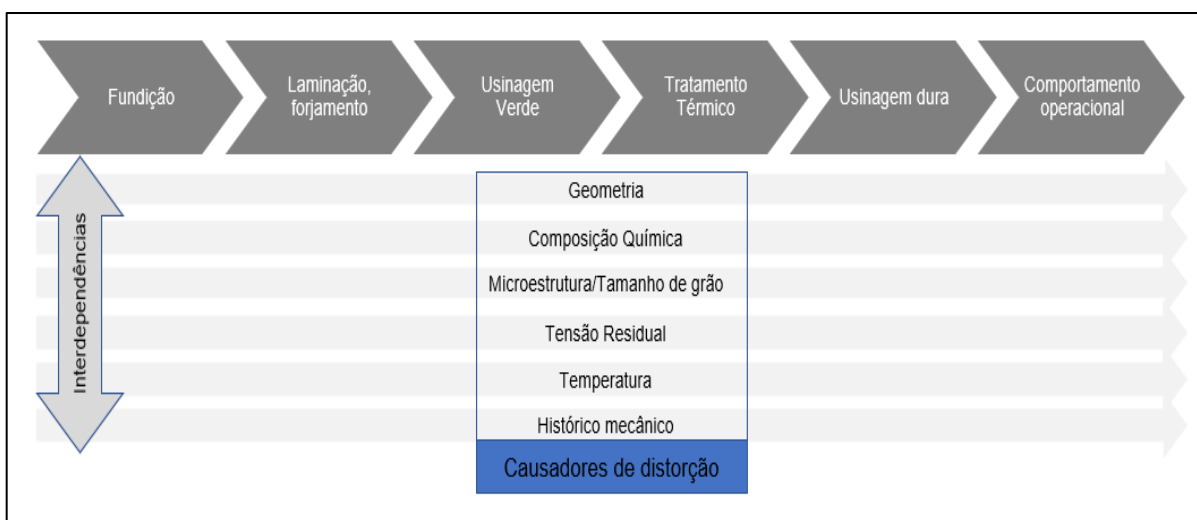
Figura 16 – Diagrama de Ishikawa com diversos fatores que afetam a distorção



Fonte: Adaptado de (MACKENZIE, 2016).

Na Figura 17 pode-se ver o fluxo típico de componentes de transmissão, que é o caso do objeto de estudo desse trabalho. As variações dimensionais vão se propagando ao longo da cadeia produtiva, por isso é importante conhecer cada etapa do processo e qual a influência dela na estabilidade dimensional. Dessa forma, podemos trabalhar a etapa seguinte de forma a minimizar ou corrigir os desvios.

Figura 17 – Fluxo de processos típicos de componentes de sistemas de transmissão e potenciais causadores de distorção



Fonte: Adaptado de (ZOCH, 2008)

## 5 MATERIAIS E MÉTODOS

### 5.1 CARACTERÍSTICAS GERAIS

O objeto de estudo nesse trabalho é uma engrenagem de ré, com dentes helicoidais. As engrenagens foram forjadas em matriz fechada a 1150°C, ou seja, a quente, a partir de barras do ETN 22, similar ao SAE 8620, sendo um aço para cementação ligado com cromo, níquel e molibdênio, como mostra a Tabela 1, que proporcionam melhor temperabilidade.

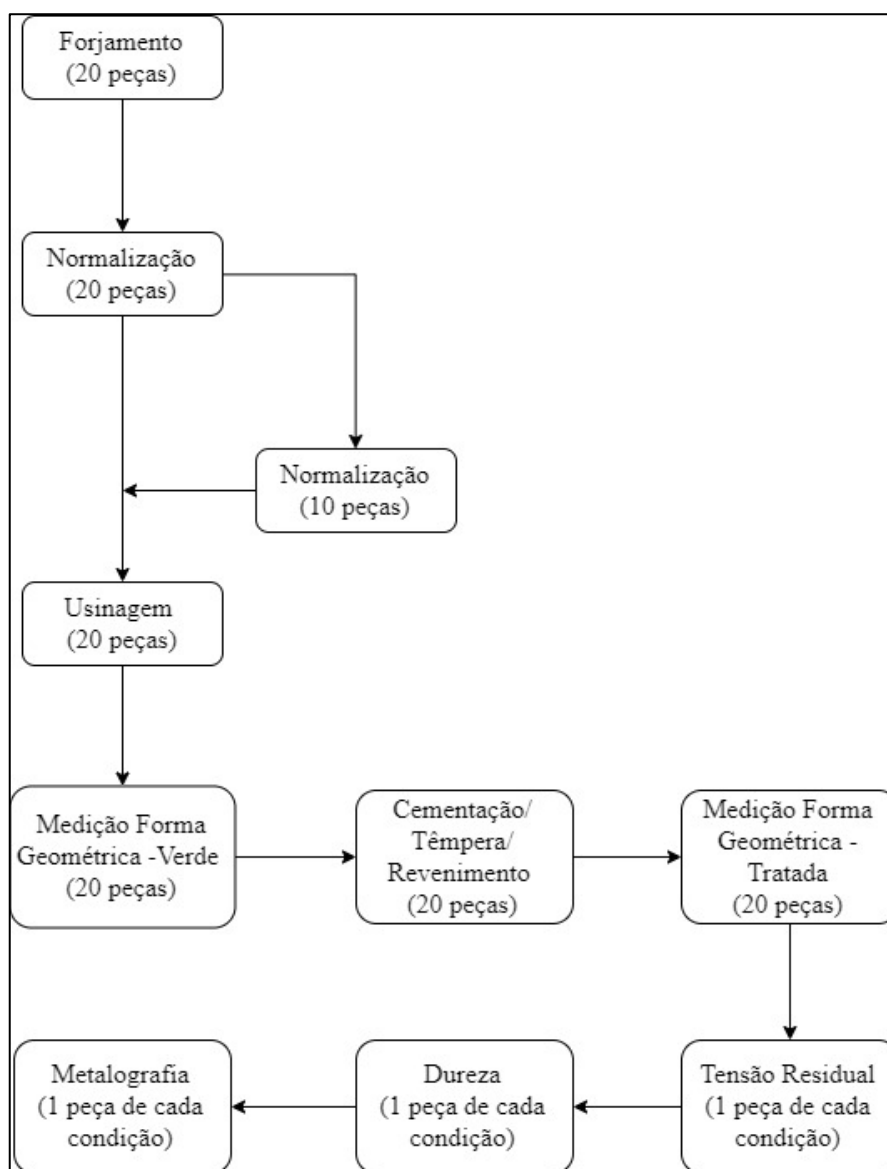
Tabela 1 – Composição do Aço SAE 8620

Elemento	Carbono	Silício	Manganês	Níquel	Cromo	Molibdênio
%mínima	0,17	0,1	0,6	0,35	0,35	0,15
%máxima	0,23	0,4	0,95	0,75	0,75	0,25

Fonte: GGD metals [20--]

A separação das engrenagens utilizadas no estudo ocorreu durante o fluxo de homologação da peça. Esse processo envolve a análise dimensional e metalúrgica das peças, para comprovação de que atendem as especificações do cliente. Para o *part number*, PN, em estudo, como já discutido anteriormente, era sabido que a dupla normalização poderia melhorar os resultados dimensionais. A Figura 18 mostra o fluxo das peças durante o processo de estudo.

Figura 18 – Fluxo do processo de estudo do presente trabalho



Fonte: Autoria própria (2019).

A etapa de normalização ocorre a 930°C durante um período de 2h30min, após esse tempo, as engrenagens passam para um local onde serão resfriadas ao ar. Aquelas que passaram pelo processo da segunda normalização, resfriam até a temperatura ambiente e então são recolocadas no processo com os mesmos parâmetros de temperatura e tempo utilizados na primeira vez.

Após as etapas de normalização, as peças foram devidamente identificadas por N1 e N2, conforme Tabela 2. Essas peças foram dispostas de forma aleatória no carrinho, passando pelo processo de modo a diminuir as variáveis, e seguiram o restante das etapas mostradas no fluxograma.



Tabela 2 – Informações sobre condição, quantidade e código das pelis

Condição	Código	Quantidade
Normalizada uma vez	N1	10
Normalizada duas vezes	N2	10

Fonte: Autoria própria (2019).

## 5.2 ENSAIO DIMENSIONAL

O ensaio de forma geométrica visa analisar o passo e o perfil envolvente do dentado para obter diversas relações, entre elas a conicidade e tombamento, que são as medidas relacionadas ao desvio do ângulo de hélice em relação ao projetado. Para realizar a leitura as peças foram posicionadas no centro de medição de engrenagens, similar ao indicado na Figura 19, produzindo gráficos que mostram o comportamento dimensional da engrenagem.

Figura 19 – Máquina Klingelberg GmbH: Centro de medição de engrenagens



Fonte: NEI (2016).

Para realizar as medições, 4 dentes separados por aproximadamente 90° e de forma independente para o flanco direito e esquerdo foram avaliados. Essas medidas ocorrem no sentido do passo do dente, como mostrado na Figura 20. Essas medições foram feitas após a operação de *shaver* com a peça verde, ou seja, antes do processo termoquímico, e após o processo de cementação, têmpera e revenido. Dessa forma, foi possível comparar a influência que o tratamento térmico teve no dimensional das peças.

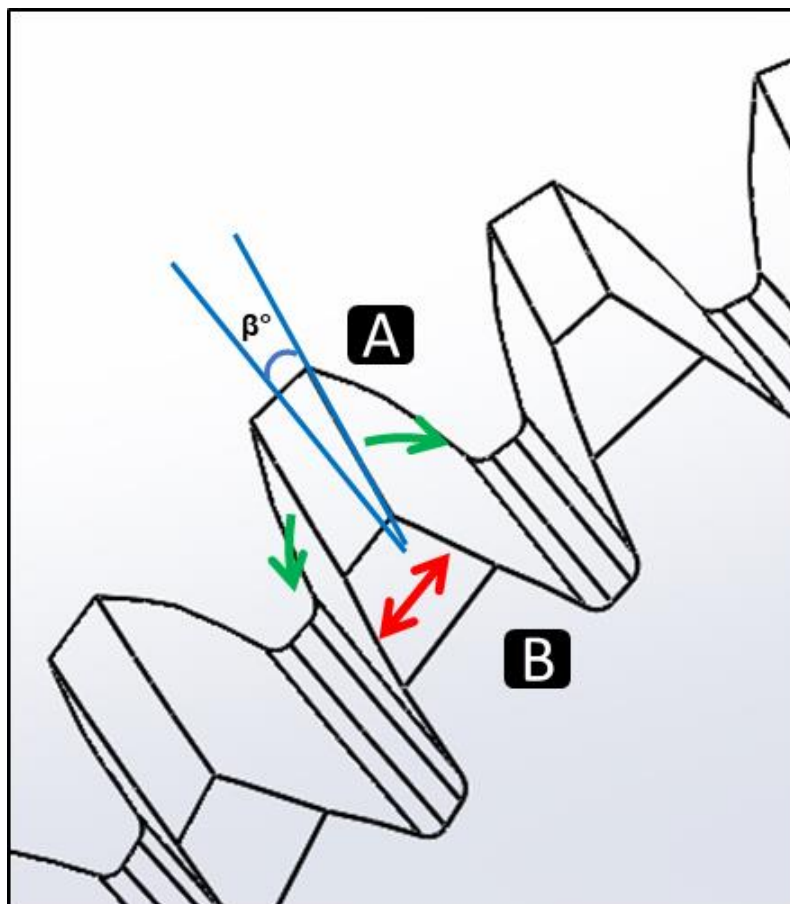
Figura 20 – Direção de leitura do passo do dente pelo apalpador



Fonte: Jaster [201-].

O tombamento é a medida da variação do ângulo  $\beta$ , ângulo de hélice, nos sentidos demonstrados pelas setas verdes, Figura 21, indicando se o dente está deformado a favor, ou contra o ângulo  $\beta$ . Podendo estar deslocado tanto para direita, quanto esquerda.

Figura 21 – Esquema conicidade e tombamento



Fonte: Autoria própria (2019).

Para determinação da conicidade mede-se a variação que o ângulo apresenta ao longo do passo para ambos os flancos. A partir disso somou-se os dois valores quando positivos e subtraiu-se quando negativos, sendo que o sinal final foi determinado pelo sinal do número de maior módulo. Dessa forma é possível verificar que o dente está cônico para cima, ou seja, a região A, Figura 21, apresenta maior espaçamento quando comparado a região b, ou cônica para baixo quando o contrário acontece.

Além disso, foi realizada a análise de deformação determinando a variação da conicidade e tombamento entre os valores encontrados na peça verde e na mesma peça após o tratamento térmico. Os gráficos foram todos realizados no Minitab®, uma ferramenta de análise de dados.

### 5.3 ENSAIO DE TENSÃO RESIDUAL

O ensaio realizado utiliza a distância interatômica para determinar o grau de tensão presente na peça. Raios x são emitidos na peça e conhecendo a matéria-prima da peça é possível determinar se há tensões de compressão ou tração na área analisada. Nas engrenagens foram realizados na face o ensaio superficial e subsuperficial em um equipamento similar ao mostrado na Figura 21.

Figura 22 – Equipamento LXRD análise de tensão residual e austenita retida

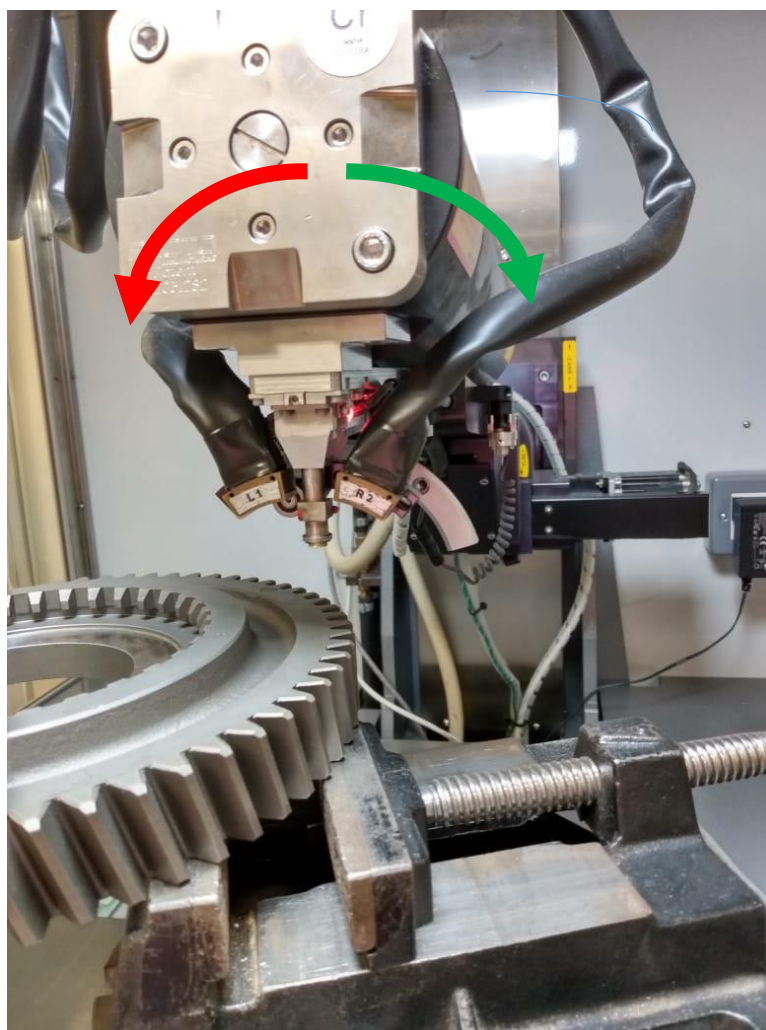


Fonte: Proto [20--]

Uma engrenagem de cada condição, N1 e N2, foi selecionada para realizar o ensaio de tensão residual de forma randômica. Para obter a tensão sub-superficial primeiramente foi isolada uma região de cerca de 25 mm<sup>2</sup> na região da face da engrenagem N1, sendo então possível a aplicação de uma solução contendo ácido sulfúrico, fluorídrico e peróxido de oxigênio por 120 segundos.

Após a remoção do ácido da cavidade utilizando uma seringa, uma solução de limpeza foi injetada no local, também, por 120 segundos. A peça foi então posicionada de forma paralela ao cabeçote da máquina e localizou-se o pointer na área que foi analisada. O mesmo procedimento foi realizado para a condição N2. A Figura 22 representa o posicionamento da peça na máquina.

Figura 23 – Posicionamento da engrenagem na máquina para ensaio de tensão residual



Fonte: Autoria própria (2019).

O cabeçote da máquina gira primeiramente na direção da seta verde, percorrendo os ângulos de  $0^\circ$ ;  $3,45^\circ$ ;  $11,84^\circ$  e  $20^\circ$ . Após a varredura nos ângulos positivos, ele retorna a posição inicial e executa o mesmo movimento para a esquerda, seta vermelha, fazendo as medições nos ângulos negativos.

## 5.4 ENSAIO DE DUREZA

As engrenagens utilizadas no ensaio de tensão residual foram utilizadas para realizar o perfil de dureza através de um equipamento, similar ao presente na Figura 23, o qual também determina a profundidade de camada cementada.

Figura 24 – Equipamento para obtenção do perfil de dureza



Fonte: Autoria própria (2019).

A engrenagem foi cortada e embutida a quente, na embutidora Cito Press 15<sup>®</sup>, na região do dente. A máquina de ensaio automática, Tukson 2500 da Wilson Hardness<sup>®</sup>, Figura 23, realizou a medição do gradiente até atingir a dureza de 513 HV 1, que é estabelecida por norma para determinação da profundidade da camada cementada.

## 5.5 ENSAIO METALOGRAFICO

Para obtenção da caracterização microestrutural as engrenagens utilizadas no ensaio de tensão residual e dureza foram embutidas na embutidora Cito Press 15<sup>®</sup> da empresa Struers<sup>®</sup> em baquelite, conforme a Figura 24 e enviadas a um laboratório especializado, prestador de serviços para a Eaton Ltda, o qual determinou o tamanho de grão das amostras. Além desse parâmetro, foi determinada a profundidade da primeira bainita e micrografias do núcleo e camada cementada foram feitas.

Figura 25 – Amostra embutida a quente com baquelite



Fonte: Autoria própria (2019)

## 6 RESULTADO E DISCUSSÃO

### 6.1 ENSAIO DIMENSIONAL

A Tabela 3 são apresentados os dados obtidos no ensaio geométrico.

Tabela 3 – Dados do ensaio geométrico

		Verde		Cementado	
		$f_{h\beta}$			
		Flanco Esquerdo (micrometro) Mín -10 Máx 0	Flanco Direito (micrometro)	Flanco Esquerdo (micrometro) Mín -14 Máx 14	Flanco Direito (micrometro)
Uma normalização	1N1	-2,1	4,7	29,1	2,1
	2N1	-1,6	5	29,8	18,8
	3N1	-1,9	4,8	6,7	-13,2
	4N1	-2,7	4,8	-7,5	-19,4
	5N1	0,6	10,8	6,4	2,1
	6N1	-1,5	5,4	44,1	20,7
	7N1	-1,6	5,6	52,1	25,2
	8N1	-1,3	4,5	24,8	6,7
	9N1	-2	4,8	-16,9	-23,5
	10N1	-0,9	5,2	4,9	-6,1
Duas normalizações	1N2	-5	4	-13,3	-26,4
	2N2	-7,1	3,2	-3,5	-16,6
	3N2	-6,7	4,1	-11,8	-19,2
	4N2	-4,6	8,2	-5,6	-12,1
	5N2	-6,4	3,5	-9,4	-26,1
	6N2	-5,7	4,2	-19,2	-27,2
	7N2	-6,1	3,5	11,1	-6,3
	8N2	-7	4	-14,6	-29,3
	9N2	-5,2	7,7	44,6	30,3
	10N2	-6,4	3,9	0	-22,4

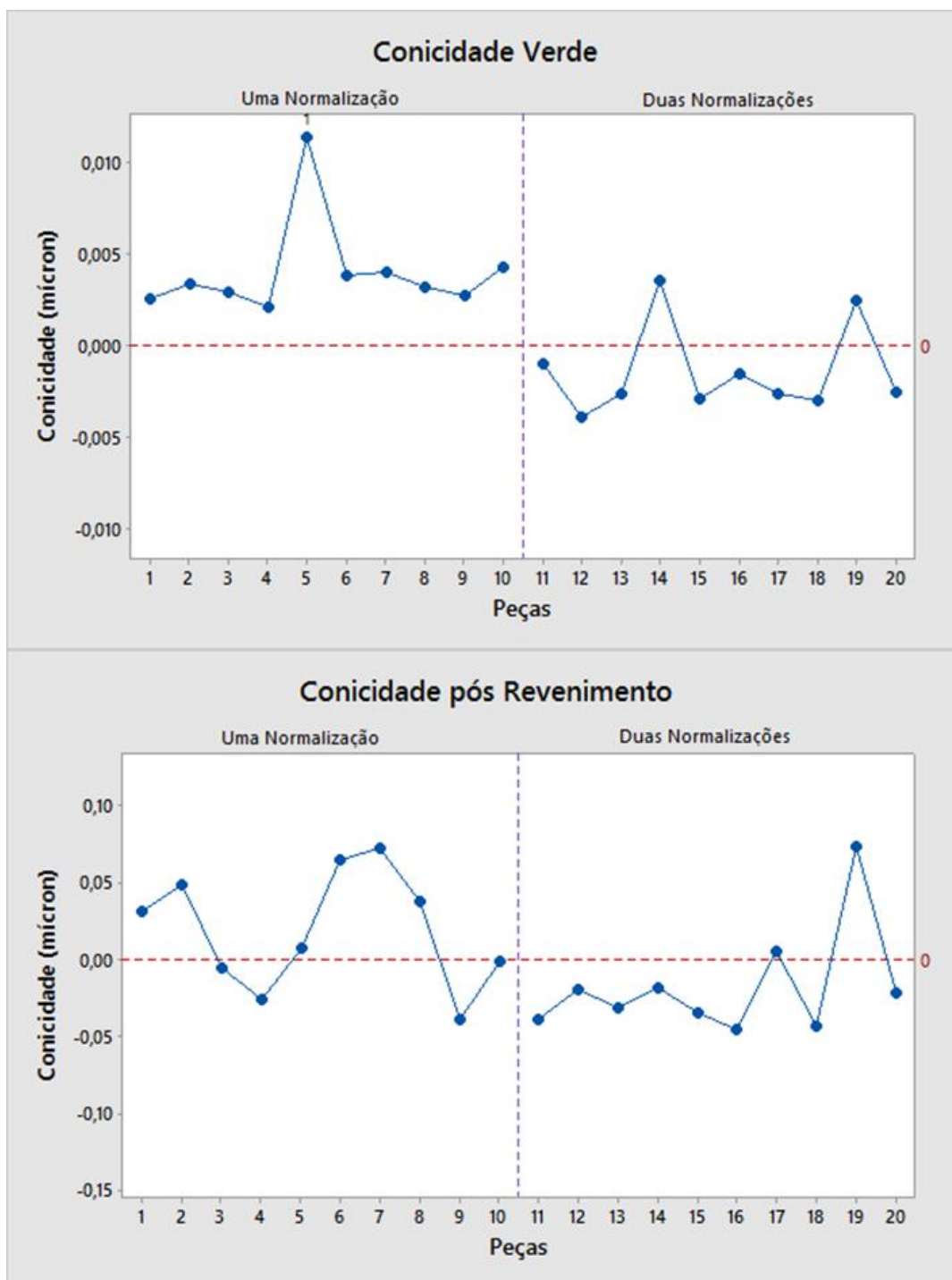
Fonte: Autoria própria (2019)

Utilizando a relação descrita na seção 5.1 os gráficos ilustrados nas Figuras 25 e 26 foram construídos. Já os gráficos presentes na Figura 27 representam a



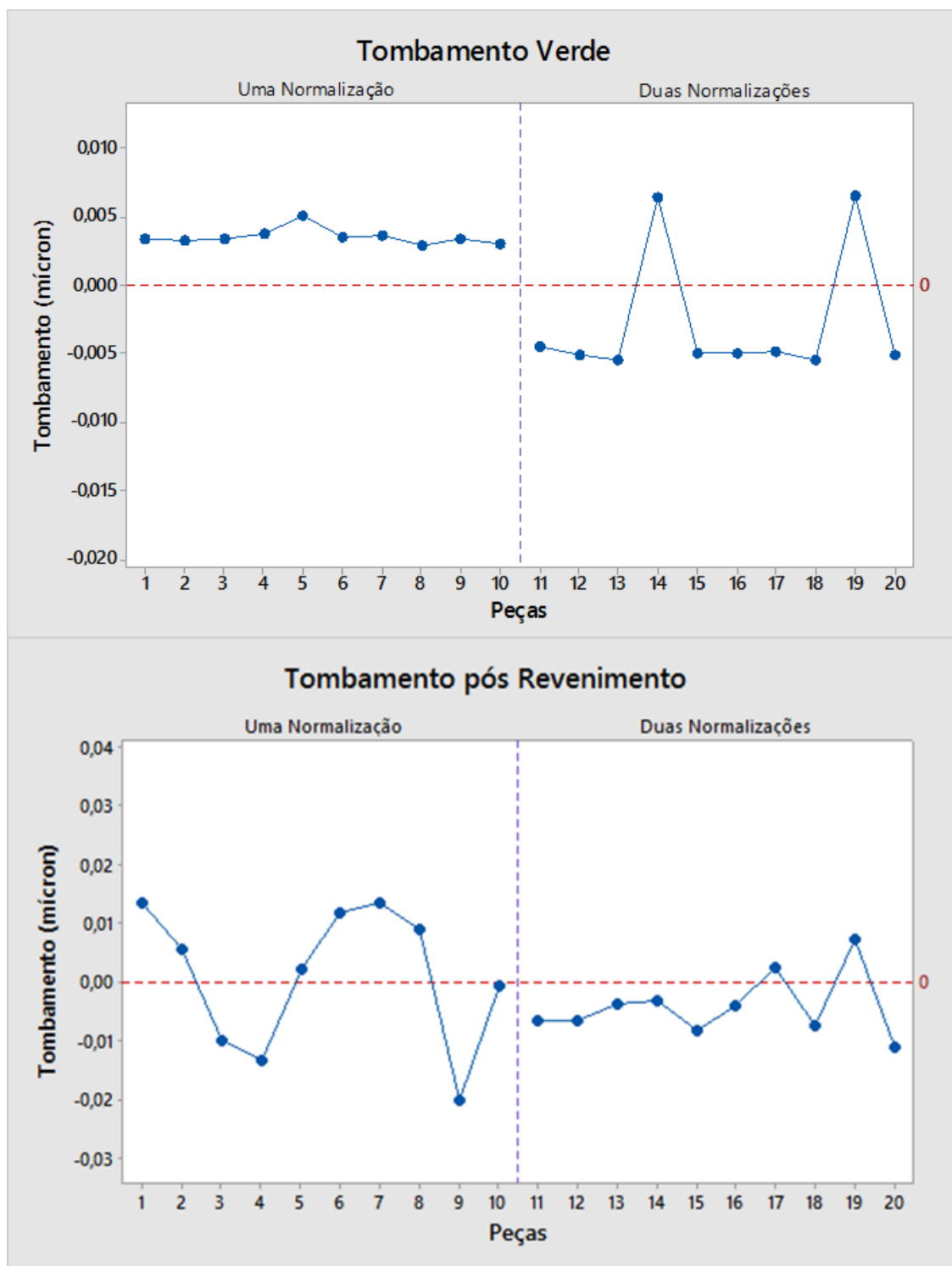
variação da conicidade e tombamento antes e após a cementação, têmpera e revenimento.

Figura 26 – Gráficos de conicidade verde e pós revenimento



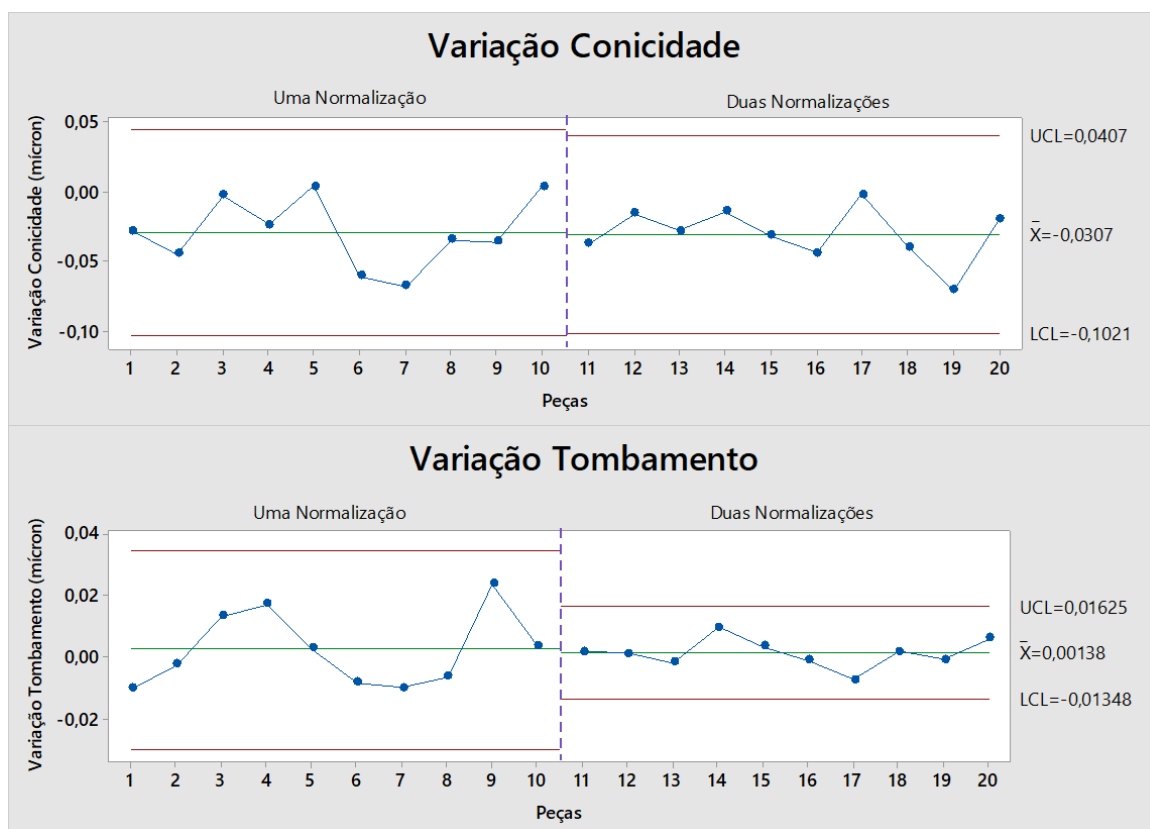
Fonte: Autoria Própria (2019).

Figura 27 – Gráficos de tombamento peças verde e pós revenimento



Fonte: Autoria própria (2019).

Figura 28 - Gráfico da variação de conicidade e tombamento antes e após processo de cementação, tempera e revenimento



Fonte: Autoria própria (2019).

Ao analisar esses gráficos é importante considerar que quanto menor a dispersão dos resultados, mais fácil é realizar correções em operações anteriores a cementação, têmpera e revenimento, para obtenção das dimensões dentro das especificações. No caso dessa engrenagem, a correção ocorre na operação de *shaver*. Para que seja possível determinar qual a correção a ser dada é importante que haja um comportamento o mais previsível possível.

Esse comportamento não é encontrado nas peças normalizadas uma única vez como pode ser visto na Figura 25 e 26 onde após o processo de cementação, têmpera e revenimento as peças com duas normalizações tendem a permanecer com tombamento e conicidade negativos, ou seja, com desvio para a esquerda. Essa previsibilidade permite que o processo seja modificado a favor da especificação, sendo mais confiável e produzindo peças com maior qualidade.

Como modo de investigação, a peça número 19, equivalente ao 9N2, foi retirada para análises posteriores juntamente com a 5N1, pior caso de conicidade verde, e a peça 6N2 que apresentou bons resultados. Essa decisão foi tomada após

verificar como o comportamento dela se distanciou das outras peças normalizadas duas vezes. E esse comportamento se repetiu no tombamento, como pode ser visto na Figura 25.

Na Figura 27, vê-se a variação da conicidade antes e após os processos termoquímicos e térmicos. É possível notar a diminuição da média e a diminuição do *up control limit*. UCL, limite de controle superior e elevação do *low control limit*, LCL limite de controle inferior. Esses limites mostram que a variabilidade do processo reduziu quando comparados N1 e N2. Essa diminuição torna-se mais evidente na variação do tombamento, onde a variabilidade reduziu drasticamente de uma condição para a outra, tornando o processo mais robusto.

Com os resultados do ensaio dimensional fica evidente que há uma redução na deformação durante os processos de cementação, têmpera e revenimento quando realizado um segundo ciclo de normalização.

As análises do desvio no ângulo de hélice mostram a relevância de realizar o segundo ciclo de normalização nas engrenagens dessa família. Apesar de ser uma evidência, os ensaios dimensionais não trazem informações do porquê esse segundo ciclo diminui a dispersão dos resultados, tendendo a deformar os dentes e distorcê-los para o lado esquerdo, ao invés de aleatoriamente.

## 6.2 TENSÃO RESIDUAL

Os dados de tensão residual estão compilados na Tabela 4. Os valores negativos representam tensões de compressão, enquanto os positivos apresentam tensões trativas. Após o processo de têmpera, as tensões esperadas na superfície são de compressão e devem superar as tensões subsuperficiais. Isso ocorre devido a severidade da têmpera que é superior na superfície quando comparada a camada cerca de 30 micrometros abaixo, evidenciando que os resultados são condizentes com a literatura, como pode ser observado na Figura 11 na seção 4.2.3.2.

Tabela 4 – Valores de tensão residual

Peça	Ângulo	Tensão subsuperficial (ksi)	Tensão superficial (ksi)
5N1	0	-57,43	-87,18
	180	-52,72	-92,68
6N2	0	-43,16	-72,96
	180	-30,42	-81,90
9N2	0	-10,20	-52,94
	180	-18,77	-65,02

Fonte: Autoria própria (2019).

Na Tabela 5 são mostrados os valores médios para cada uma das condições. Os dados revelam que tensão superficial na peça normalizada apenas uma vez é aproximadamente duas vezes mais alta quando comparada àquelas que sofreram dois ciclos de normalização. Uma inferência para esse comportamento seria a presença de tensões não aliviadas do forjamento que se propagaram por todo o processo de fabricação da engrenagem, causando o comportamento de dispersão discutido na subseção 6.1.

Tabela 5 – Valores médios de tensão para N1 e N2

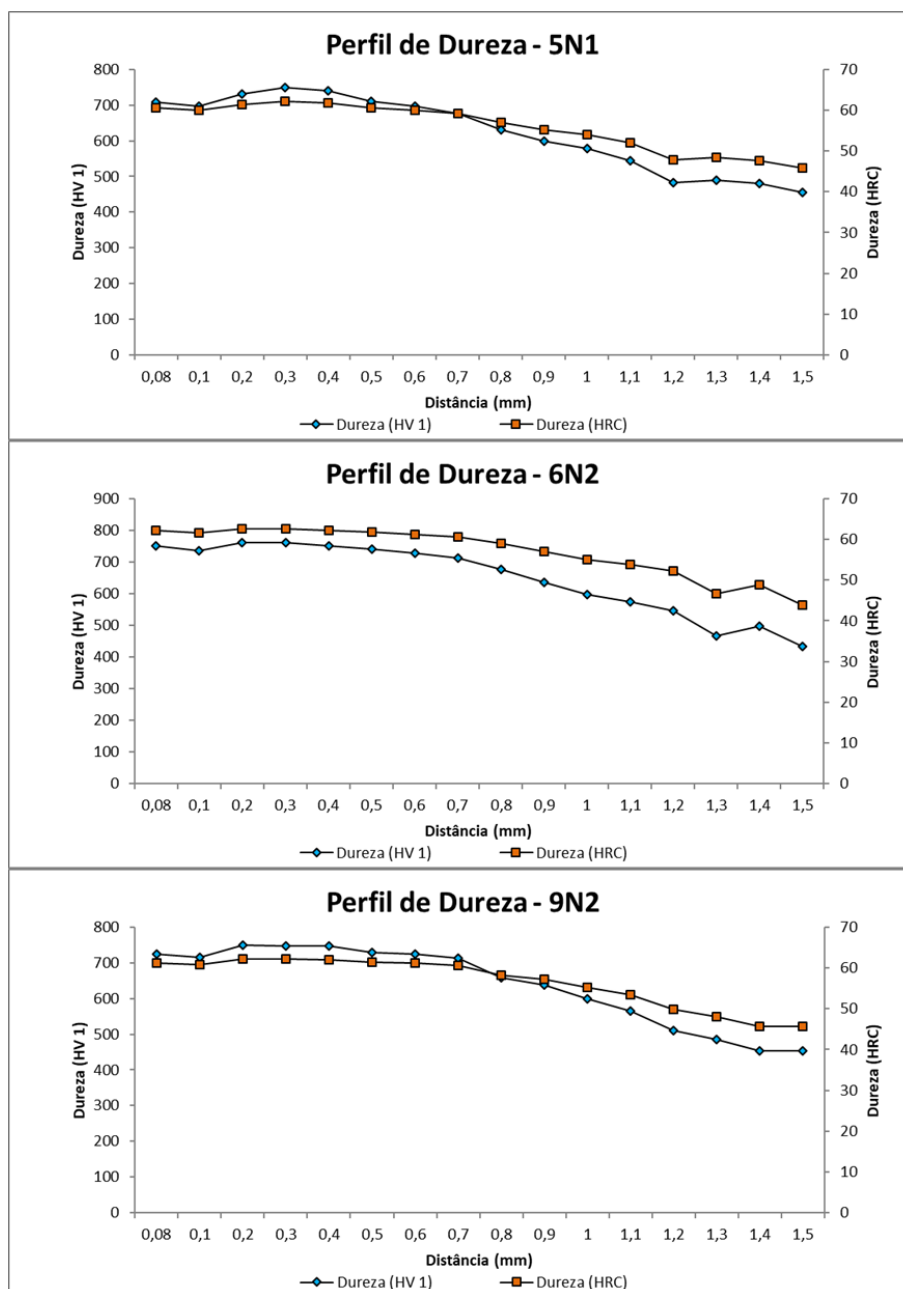
Condição	Tensão média subsuperficial (ksi)	Tensão média superficial (ksi)
N1	-55,08	-179,86
N2	-25,64	-68,21

Fonte: Autoria própria (2019)

### 6.3 ENSAIO DE DUREZA

Na Figura 28 são mostrados os gráficos obtidos para determinação da profundidade da camada cementada. Cada gráfico mostra o perfil de dureza tanto na escala *Vickers* quanto *Rockwell C*, que são as mais utilizadas na indústria. As medidas de dureza da raiz, primitivo e superfície do dente, além da profundidade de camada, estão dispostas na Tabela 6.

Figura 29 – Gráfico de perfil de dureza da peça 5N1, 6N2 e 9N2



Fonte: Autoria própria (2019).

A análise das curvas presentes na Figura 28 não apresentam variações no perfil de dureza e profundidade de camada. As diferenças entre as condições não são acentuadas e a variação entre os resultados não é significativo. Essa observação se mantém ao analisar-se os resultados dispostos na Tabela 6. Os valores encontrados são muito próximos entre si, podendo ser inferido que a dupla normalização no início da cadeia produtiva não interfere no processo de cementação.

Tabela 6 – Dureza superficial, primitivo, raiz e profundidade de camada de 5N1, 6N2 e 9N2

Peça	5N1	6N2	9N2
Dureza Superficial (HRC)	61	62	61
Dureza Primitivo (HRC)	39	36	36
Dureza Raíz (HRC)	32	29	32
Profundidade de camada (mm)	1,15	1,24	1,20

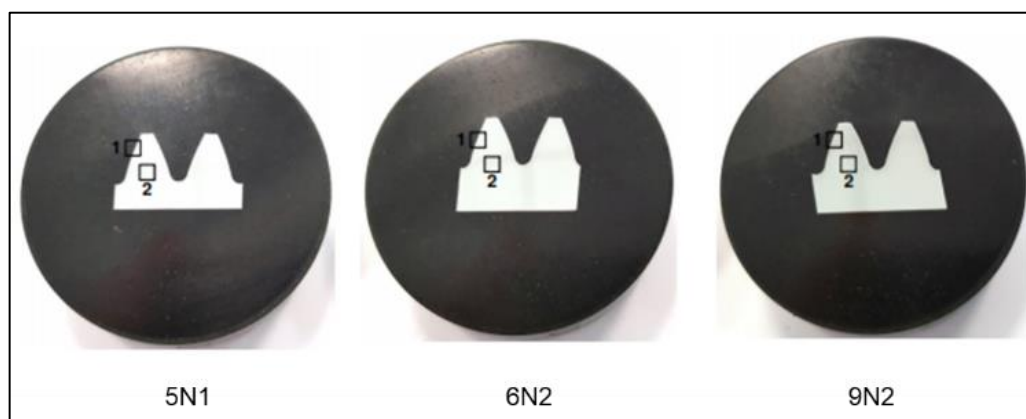
Fonte: Autoria própria (2019).

## 6.4 MICROESTRUTURA

### 6.4.1 Tamanho de grão

Na Figura 29 são mostradas as regiões nas quais foi analisado o tamanho de grão. De acordo com o relatório técnico, a medida do tamanho de grão foi realizada conforme a norma ASTM E112 utilizando uma tela padrão do microscópio óptico com ampliação de 100x com ataque de picral.

Figura 30– Regiões analisadas, detalhe 1 e 2, das amostras 5N1, 6N2 e 9N2

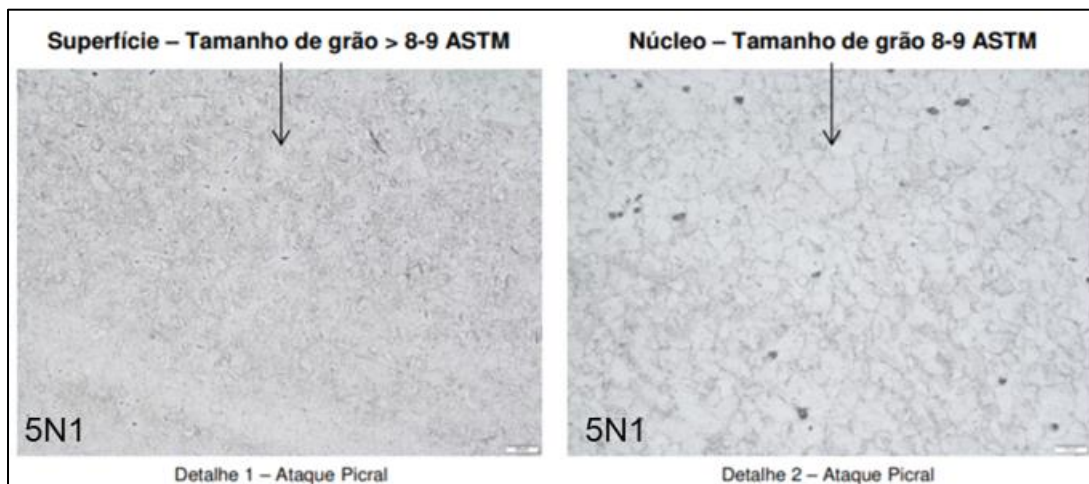


Fonte: Relatório Técnico Mahle (2019).

Nas Figura 30, 31 e 32 são mostradas as microestruturas atacadas. Observando as imagens, em nenhuma das condições, seja N1 ou N2, foi possível revelar satisfatoriamente o tamanho de grão na camada cementada, detalhe 1. No entanto, o relatório técnico relata que os grãos aparentam ser menores que os

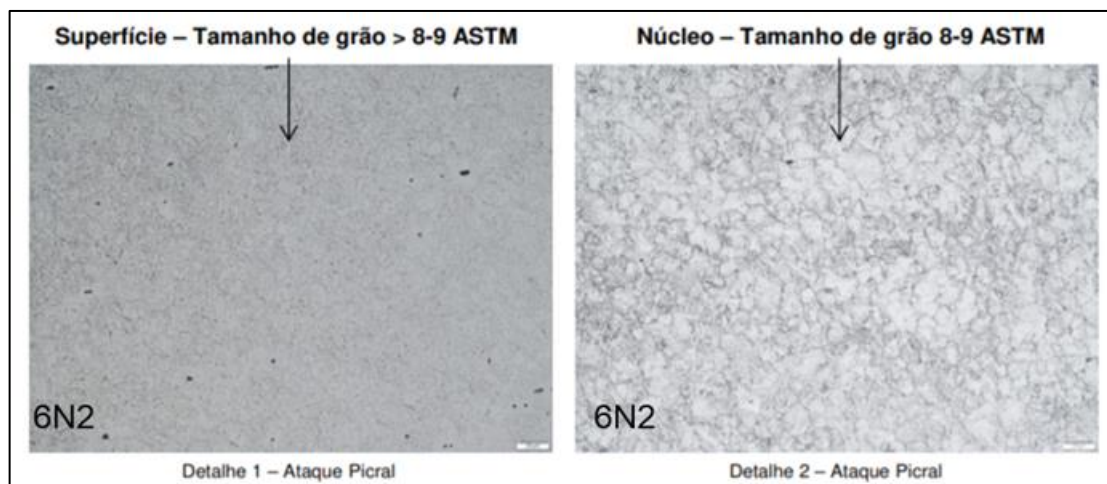
encontrados na região do núcleo, situando-se entre 8-9 ASTM, ou seja, aproximadamente 19 micrometros.

Figura 31– Micrografia das amostra 5N1: tamanho de grão com ampliação 100x; ataque picral



Fonte: Relatório técnico Mahle (2019).

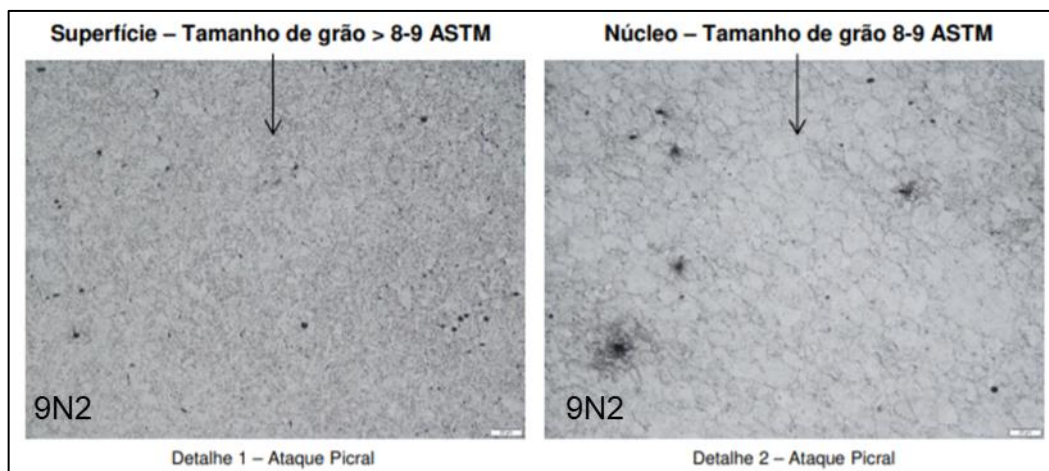
Figura 32 – Micrografia das amostra 6N2: tamanho de grão com ampliação 100x; ataque picral



Fonte: Relatório técnico Mahle (2019).



Figura 33 – Micrografia das amostra 9N2: tamanho de grão com ampliação 100x; ataque picral



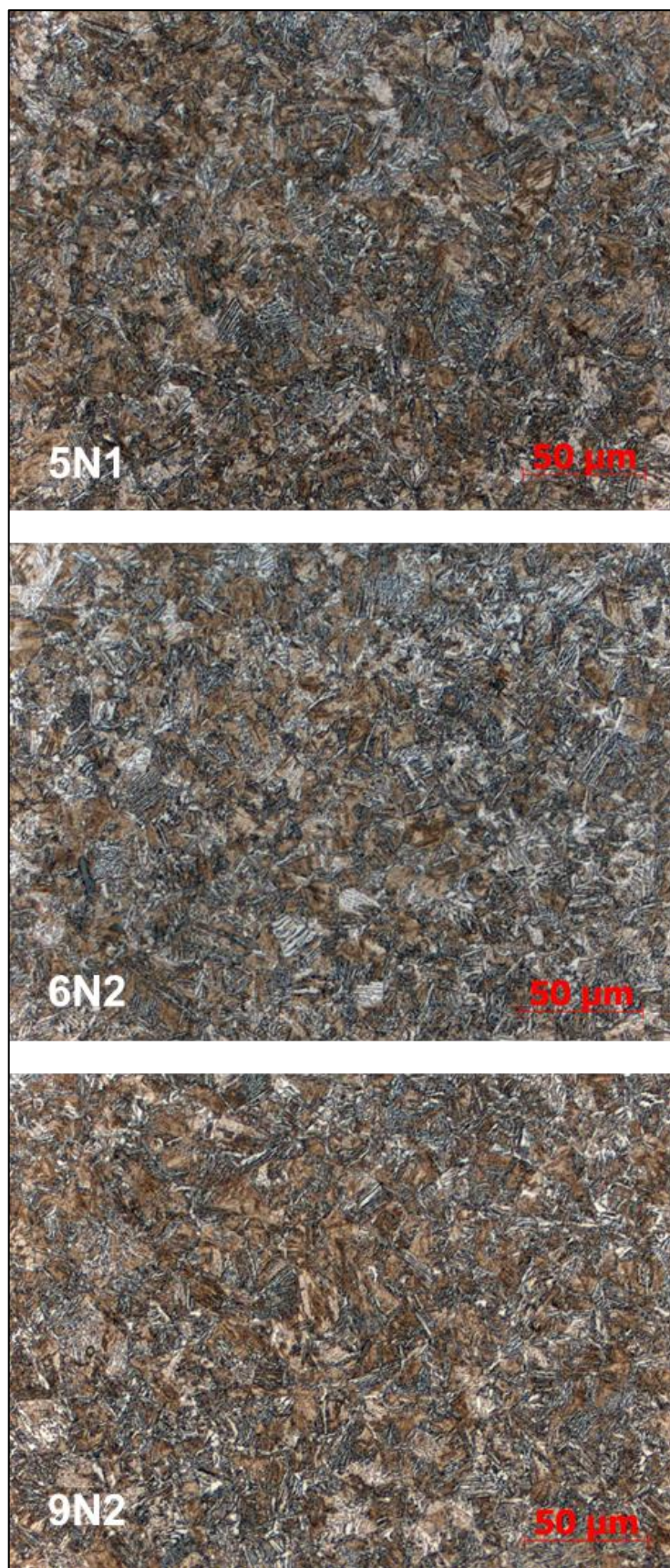
Fonte: Relatório técnico Mahle (2019).

Os resultados obtidos na análise de tamanho de grão vão contra a hipótese principal do presente estudo, que via a diminuição do tamanho de grão através dos ciclos de normalização como uma forma de melhorar as propriedades de absorção de energia, e assim diminuição da distorção dimensional.

#### 6.4.1 Micrografia de núcleo e superfície

As micrografias da camada cementada estão na Figura 33. A região escura é composta por martensita e bainita, enquanto os pontos brancos são traços de ferrita. Não há diferenças relevantes entre as três peças.

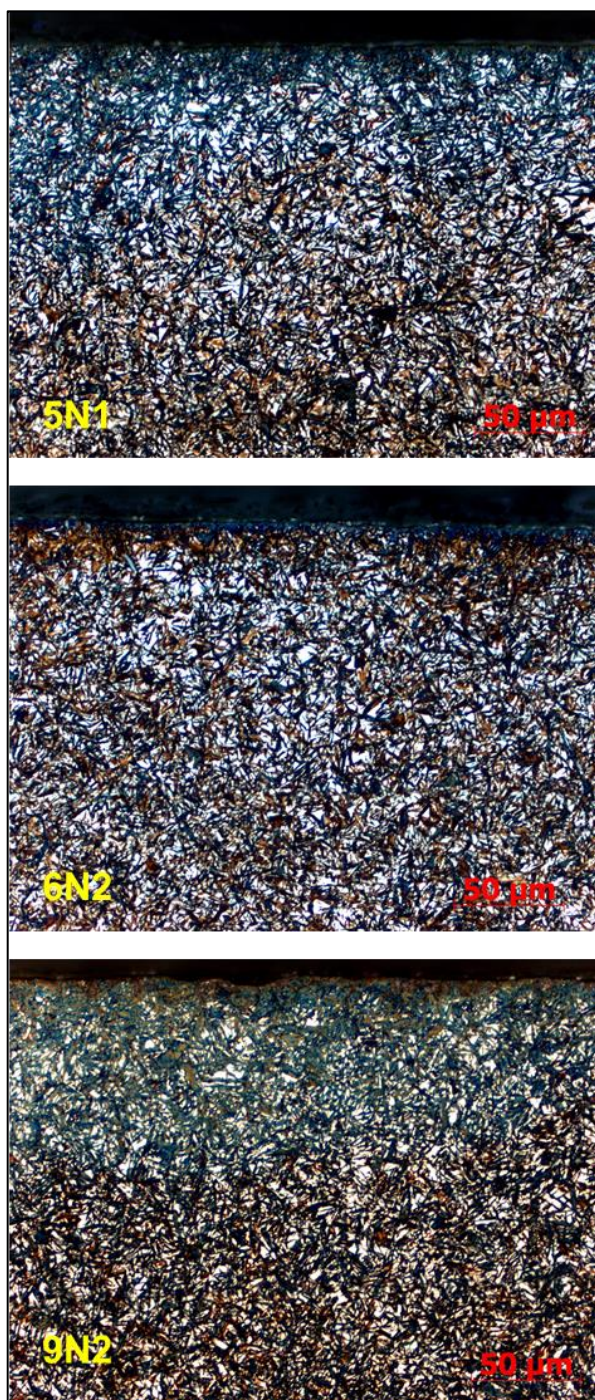
Figura 34 - Micrografia das amostras 5N1, 6N2 e 9N2. Aumento 500x



Fonte: Laboratório Eaton Ltda. (2019).

A região da camada cementada é composta por martensita e austenita retida. Na Figura 34 são mostradas as micrografias das três peças analisadas. Essas imagens, de acordo com o aumento, foram realizadas em uma região bem próxima da superfície.

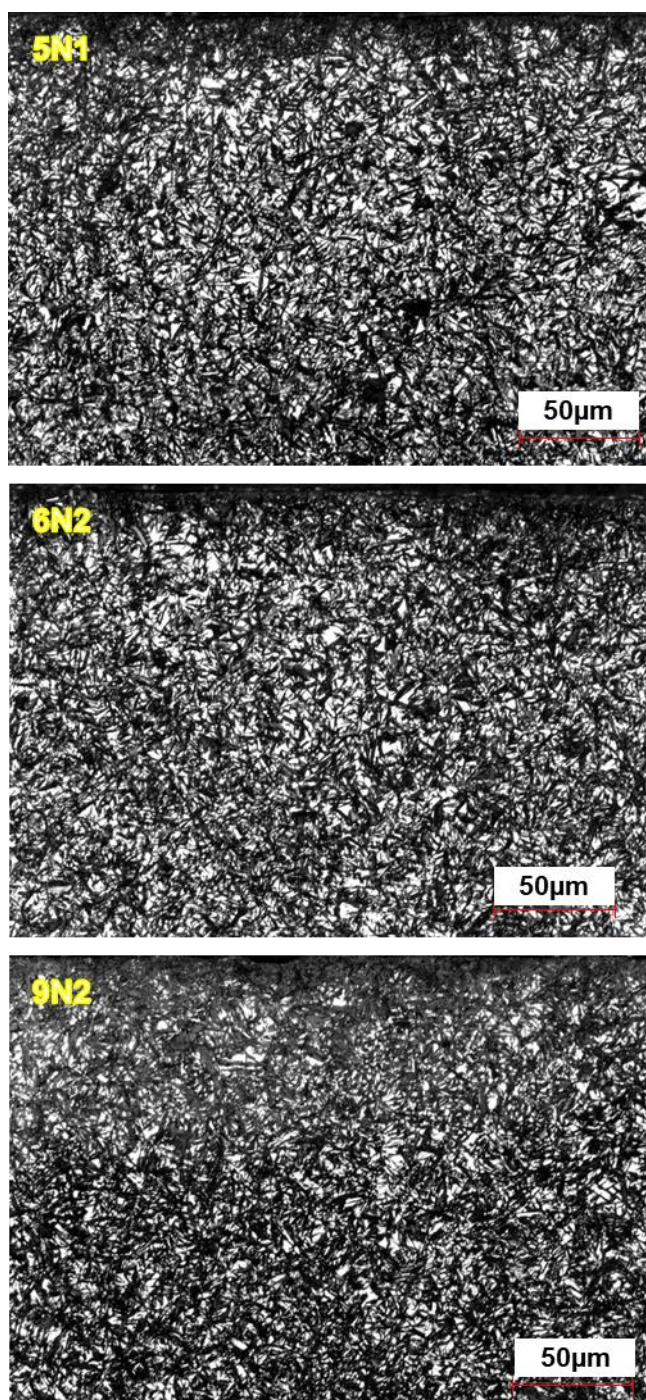
Figura 35 – Micrografia da superfície após revenimento das amostras 5N1, 6N2 e 9N2



Fonte: Laboratório Eaton Ltda. (2019).

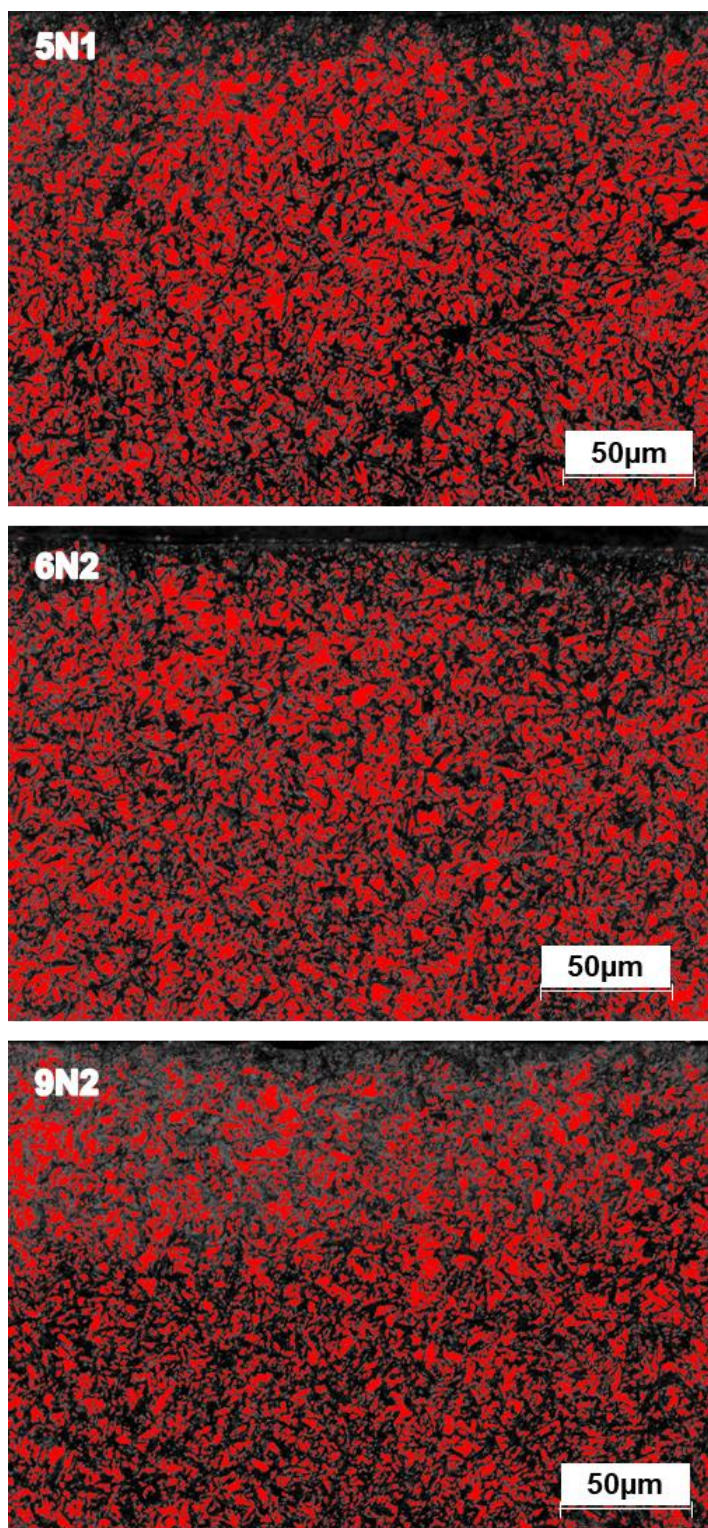
A porcentagem de austenita retida foi identificada a partir do software ImageJ®. Para realizar a análise, converteu-se a imagem original em uma imagem em escala de cinza, Figura 35. Utilizando a função de detecção automática do software, foram detectadas as partes brancas, austenita retida, que foram preenchidas pela cor vermelha, Figura 36.

Figura 36 – Micrografias em escala de cinza



Fonte: Autoria própria (2019).

Figura 37 – Micrografias em tom de cinza, realçadas com tons de vermelho



Fonte: Autoria própria (2019).

Dessa forma foi possível padronizar a detecção e obter os resultados apontados na Tabela 7. Os resultados foram analisados e comparados com a micrografia original.

Tabela 7 – Fração volumétrica de austenita retida (%) obtidas a partir do software ImageJ®

<b>Peça</b>	<b>Fração volumétrica (%)</b>
<b>5N1</b>	29,79%
<b>6N2</b>	28,43%
<b>9N2</b>	25,48%

Fonte: Autoria própria (2019).

De acordo com Lombardo et al. (2010), através de um trabalho comparativo entre os valores encontrados para a austenita retida a partir da análise digital de imagens e os determinados a partir da técnica de DR-X, concluiu que ambos são equivalentes apresentando valores próximos. Dessa forma, os valores encontrados e expressos na Tabela 7 são válidos e representam a realidade, além de estarem dentro do especificado pela norma Eaton, que delimita entre 10% a 30% de austenita retida.

A austenita retida é oriunda da têmpera e a fração mostrada na Tabela 7 é o remanescente após o revenimento. Dessa forma, apesar de haver austenita retida na microestrutura é possível inferir que a porcentagem era superior previamente ao revenimento. Essa transformação de fase é um potencial gerador de distorção dimensional, uma vez que há uma expansão volumétrica na decomposição da austenita retida (CIFUENTES, 2002).

No entanto, os valores encontrados tanto para as peças com uma quanto duas normalizações não apresentaram uma diferença significativa. Por conseguinte, não há indício de que o ciclo de tratamento influencia na fração de austenita retida da peça após o revenimento.

## 7 CONCLUSÃO

A partir dos resultados obtidos foram feitas as seguintes considerações:

- Os resultados de conicidade e tombamento das peças deixam claro que existe uma diferença no comportamento dimensional das peças quando elas são normalizadas uma ou duas vezes após o processo de forjamento. Esse comportamento estabilizado é extremamente importante para que o processo de manufatura possa realizar correções de forma a obter a peça final dentro da especificação.
- O ensaio de tensão residual mostrou que a peça 5N1, 6N2 e 9N2 apresentaram baixa tensão residual na face, tanto superficialmente, quanto sub-superficialmente. Esse resultado, apesar de não apresentar diferenças significativas entre os ciclos de normalização, evidenciou a baixa tensão residual das peças após a etapa de revenimento.
- A profundidade de camada determinada pelo gradiente de dureza a partir da superfície apresentou valores próximos para as duas condições, não sendo possível determinar se foram afetados pelo segundo ciclo de normalização ou não.
- A análise de tamanho de grão do núcleo das peças estabeleceu que as três peças apresentaram tamanho de grão 8-9 ASTM. Já a superfície, devido as dificuldades de ataque da amostra para revelação dos grãos apresenta supostamente tamanho de grão menor que 8-9 ASTM. Esse resultado refuta a hipótese principal, redução do tamanho de grão pelo segundo ciclo de normalização, do presente trabalho.
- A microestrutura do núcleo das peças apresentou bainita e perlita, visualmente não apresentaram diferenças significativas entre as amostras.
- A determinação de austenita retida foi realizada pela análise de imagem digital e não houve variação significativa entre as amostras.
- Não foi possível identificar variações metalúrgicas significativas entre as peças 6N2 e 9N2, apenas diferença no comportamento dimensional.

A partir das considerações elucidadas a conclusão é que, apesar de dimensionalmente haver diferença entre os ciclos de normalização, não foi encontrada evidência microestrutural no presente trabalho. As variações nos resultados obtidos

são de baixa ordem de grandeza e para serem julgados responsáveis pelas alterações dimensionais há a necessidade de um estudo com número amostral maior, de forma a ser comprovado estatisticamente, algo pouco viável dentro da industrial.



## **8 SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS**

Como sugestão de trabalho futuro seria interessante a realização de um estudo com uma maior quantidade de peças em cada condição, acompanhando também peças sem nenhuma normalização.

## REFERÊNCIAS

BUDYNAS, Richard G; NISBETT, J. Keith. **Elementos de Máquinas de Shigley**. 8. ed. Porto Alegre: Amgh Editora Ltda., 2011.

CALLISTER, W. D., RETHWISCH, D. G., **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma introdução**. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2018.

CASTRO, Ricardo Millego de. **Ritério de projeto para engrenagens helicoidais aplicadas em transmissões mecânicas veiculares**. 2005. 172 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Pme, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005. Disponível em: <[http://www.automotiva-poliusp.org.br/wp-content/uploads/2013/02/castro\\_ricardo.pdf](http://www.automotiva-poliusp.org.br/wp-content/uploads/2013/02/castro_ricardo.pdf)>. Acesso em: 18 set. 2019.

CHIAVERINI, Vicente. **Tratamento térmico das ligas metálicas** 1. ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2008.

CIFUENTES, J. A.; CUMINO, Ricardo Strangis; SILVA, W G; GOLDENSTEIN, Hélio; GRELL, K. L. Influência da decomposição da autenita residual na estabilidade dimensional de componentes de aço SAE 52100. **Anais.. Natal: PDCEM/CCET/UFRN**, 2002.

COLPAERT, H., **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**. 4. ed. São Paulo: Editora Blucher, 2008.

ERICSSON, T. Principles of heat treating of steels. In: **ASM METALS HANDBOOK**. Heat Treating. v. 4, ASM Handbook, ASM International, 1991.

FLORES, Paulo; GOMES, José. **Cinemática e Dinâmica de Engrenagens**. Guimarães: Universidade do Minho, 2014. 45 p. Disponível em: <<https://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/34120/1/6.12.49%202014.pdf>>. Acesso em: 22 set. 2019.

GGD 8620. **GGD Metals**, 2019. Disponível em: < <https://ggdmetals.com.br/wp-content/uploads/2015/07/A%C3%87O-8620.pdf>> Acesso em: 18 out. 2019.

GROOVER, Mikell. **Introdução aos Processos de Fabricação**. Rio de Janeiro: Ltc, 2014. 758 p. Tradução de: Anna Carla Araujo.

JASTER, Matthew. **Big or Small: Inspection is Key to Success**. Disponível em: <[https://www.gartechnology.com/big\\_gears.htm](https://www.gartechnology.com/big_gears.htm)>. Acesso em: 18 out. 2019.

KRAUSS, George. Heat Treatments to Produce Ferrite and Perlite. In: KRAUSS, George. **Steels: heat treatment and processing principles**. 5. ed. Ohio: Asm International, 1997. Cap. 5. p. 107-142.

LOMBARDO, S. et al. Método para o cálculo da fração volumétrica de austenita retida através do software de análise digital de imagens. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE CIÊNCIA DOS MATERIAIS, 19., 2010, Campos do Jordão. **Anais...**. Campos do Jordão: Cbecimat, 2010. p. 4968 - 4975. Disponível em: <[https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/\\_Public/42/052/42052586.pdf?r=1&r=1](https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/42/052/42052586.pdf?r=1&r=1)>. Acesso em: 01 nov. 2019.

MACKENZIE, Scott. Metallurgical Aspects of Distortion and Residual Stresses in Heat Treated Parts. In: INTERNATIONAL FEDERATION OF HEAT TREATMENT AND SURFACE ENGINEERING, 23., 2016, Savannah. **Proceedings...**. Savannah: ASM International, 2016. p. 392 - 402. Disponível em: <[https://www.researchgate.net/publication/303566051\\_Metallurgical\\_Aspects\\_of\\_Distortion\\_and\\_Residual\\_Stresses\\_in\\_Heat\\_Treated\\_Parts](https://www.researchgate.net/publication/303566051_Metallurgical_Aspects_of_Distortion_and_Residual_Stresses_in_Heat_Treated_Parts)>. Acesso em: 20 set. 2019.

**MAHLE**. Avaliação de tamanho de grão – Amostras Eaton. Jundiaí, 2019.

**NEI**. Medidora de engrenagens avalia características gerais. 2016. Disponível em: <<https://www.nei.com.br/produto/2016-09-medidora-de-engrenagens-klingsberg-do-brasil-repres-e-com-ltda?id=fbf734bb-58ff-4440-9610-78ab8f77e947>>. Acesso em 20 set. 2019.

NORTON, L. R. **Projeto de máquinas, uma abordagem integrada**. 2a Ed., São Paulo: Bookman, 2007.

PAULI, E. A.; ULIANA, F. S. **Noções Básicas de Elementos de Máquinas**. Apostila Escola SENAI-ES, 2006.

**PROTO**. LXRd: Laboratory Residual Stress and Retained Austenite Measurement Systems. [20--] Disponível em: <<https://www.protoxrd.com/lxrd-laboratory.html>> Acesso em: 20 set. 2019.

RHEINHEIMER, Carlos Eduardo Borsoi. **Influências do revestimento no desgaste da ferramenta no processo hobbing**. 2018. 83 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Processos de Fabricação e Produção de Componentes, Ferramentas e Matrizes, Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2018. Disponível em: <<https://repositorio.ucs.br/xmlui/bitstream/handle/11338/3658/Dissertacao%20Carlos%20Eduardo%20Borsoi%20Rheinheimer.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso em: 18 out. 2019.

RUGLIC, T. Normalizing of steel. In: **ASM METALS HANDBOOK**. Heat Treating. v. 4, ASM Handbook, ASM International, 1991.

SANDVICK. **Ferramentas para o fresamento.** Disponível em: <<https://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/products/pages/milling-tools.aspx>>. Acesso em: 23 out. 2019

SILVA, A.L., MEI, P.R., **Aços e Ligas Especiais** 2. ed. São Paulo: Editora Blucher, 2006.

THOBEN, K.D, et al. Distortion Engineering. In: MACKENZIE, Scott. Metallurgical Aspects of Distortion and Residual Stresses in Heat Treated Parts. In: INTERNATIONAL FEDERATION OF HEAT TREATMENT AND SURFACE ENGINEERING, 23., 2016, Savannah. **Proceedings...** . Savannah: ASM International, 2016. p. 392 - 402. Disponível em: <[https://www.researchgate.net/publication/303566051\\_Metallurgical\\_Aspects\\_of\\_Distortion\\_and\\_Residual\\_Stresses\\_in\\_Heat\\_Treated\\_Parts](https://www.researchgate.net/publication/303566051_Metallurgical_Aspects_of_Distortion_and_Residual_Stresses_in_Heat_Treated_Parts)>. Acesso em: 20 set. 2019.

VALINHOS. Eaton Transmissões – Valinhos. **EATON**. 2019. Disponível em: <<http://www.eaton.com.br/EatonBR/NossaEmpresa/Opera%C3%A7%C3%B5es/Valinhos/index.htm>> Acesso em: 10 out. 2019.

ZOCH, Hans-Werner. Distortion Engineering: Vision or Ready to Application. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON DISTORTION ENGINEERING, 2., 2008, Bremen. **Proceedings...** . Bremen: Ide, 2008. p. 3 - 12. Disponível em: <<http://www.distortion-engineering.de/pdf/IDE%202008%20Proceedings.pdf>>. Acesso em: 19 out. 2019.