

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

HELOISA CAES LAHR

Estudo da influência do processo de pré-aquecimento no tempo de ciclo de
tratamento térmico de engrenagens

São Carlos

2017

HELOISA CAES LAHR

Estudo da influência do processo de pré-aquecimento no tempo de ciclo de
tratamento térmico de engrenagens

Trabalho de Conclusão apresentado ao Curso
de Engenharia de Materiais e Manufatura, da
Escola de Engenharia de São Carlos da
Universidade de São Paulo, como parte dos
requisitos para obtenção do título de
Engenheiro de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. José Benedito
Marcomini

São Carlos

2017

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

L482e Lahr, Heloisa Caes
Estudo da influência do processo de pré-aquecimento
no tempo de ciclo de tratamento térmico de engrenagens.
/ Heloisa Caes Lahr; orientador José Benedito
Marcomini. São Carlos, 2017.

Monografia (Graduação em Engenharia de Materiais e
Manufatura) -- Escola de Engenharia de São Carlos da
Universidade de São Paulo, 2017.

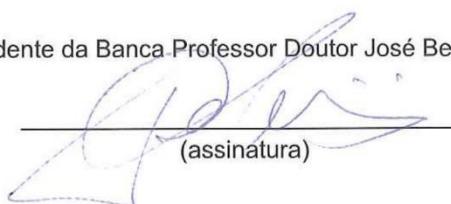
1. Pré-aquecimento. 2. Tratamento térmico. 3.
Engrenagens. I. Título.

FOLHA DE APROVAÇÃO

| |
|---|
| Candidato: Heloisa Caes Lahr |
| Título do TCC: Estudo da influência do processo de pré-aquecimento no tempo de ciclo de tratamento térmico de engrenagens. |
| Data de defesa: 22/11/2017 |

| Comissão Julgadora | Resultado |
|---|-----------|
| Professor Doutor José Benedito Marcomini (orientador) | APROVADO |
| Instituição: EESC - SMM | |
| Professor Doutor Haroldo Cavalcanti Pinto | APROVADO |
| Instituição: EESC - SMM | |
| Professor Doutor Iris Bento da Silva | APROVADO |
| Instituição: EESC - SEM | |

Presidente da Banca Professor Doutor José Benedito Marcomini



(assinatura)

*Dedico este trabalho à minha
família por terem, desde cedo, me
incentivado a estudar e buscar o
que me fizesse feliz.*

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de agradecer imensamente aos meus pais, João e Márcia e minha irmã Marina, por terem sido a base para que eu pudesse seguir minhas escolhas, me ajudando nos momentos difíceis e vibrando com minhas conquistas. Ao meu namorado Victor, por estar sempre ao meu lado, me trazendo a calma nos momentos que precisei e a alegria em todos esses anos juntos.

Agradeço todos os amigos que fiz ao longo desses cinco anos. Obrigada pela amizade, por todas as risadas, conversas, grupos, horas de estudo, festas, e por estarmos juntos nos momentos delicados também.

Aos colegas da Eaton, que me ajudaram ao longo de todo o meu estágio, aos meus coordenadores de estágio Ricardo e Tainá, também a Agnaldo, Beatriz, Darkion, Fabio, Jonas, Marcelo, Paulo, Rafael, Vinicius e Willian.

Ao meu orientador neste trabalho, José B. Marcomini, por toda sua atenção e paciência. Ao meu orientador de iniciação científica, Marcelo A. Chinelatto, por ter me ensinado e orientado em meu primeiro trabalho acadêmico.

E finalmente, agradeço a todos os meus professores, por todo o conhecimento e ensinamento transmitido e à USP, por todas as oportunidades que tive ao longo da faculdade.

“Apesar dos nossos defeitos, precisamos enxergar que somos pérolas únicas no teatro da vida e entender que não existem pessoas de sucesso e pessoas fracassadas. O que existe são pessoas que lutam pelos seus sonhos ou desistem deles”

Augusto Cury (2004)

RESUMO

LAHR, H. C. **Estudo da influência do processo de pré-aquecimento no tempo de ciclo de tratamento térmico de engrenagens.** 2017. 70f. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017.

O presente trabalho foi realizado de modo a estudar a viabilidade técnica e financeira da implementação de uma etapa de pré-aquecimento no tratamento térmico de engrenagens visando reduzir o tempo de rampa de aquecimento. O tempo denominado rampa de aquecimento representa o tempo necessário para que o forno câmara reestabeleça sua temperatura de início de ciclo após a entrada de uma carga no forno de tratamento térmico. Dessa forma, foram realizadas análises metalúrgicas e dimensionais, comparando-se peças tratadas convencionalmente e peças tratadas com a etapa de pré-aquecimento anterior ao tratamento convencional. Após as análises feitas foram realizados testes para avaliar o efeito da etapa de pré-aquecimento na redução do tempo de rampa de aquecimento, considerando diferentes temperaturas. Considerando os aspectos microestruturais e de dureza das peças avaliadas não foram encontradas diferenças significantes entre os dois processos analisados. No que se refere ao aspecto dimensional da peça, o pré-aquecimento causou uma variação na forma geométrica, fator que deve ser corrigido caso este processo venha a ser homologado. O processo com a etapa de pré-aquecimento mostrou-se satisfatório no que diz respeito à redução do tempo de rampa de aquecimento, uma vez que reduziu o tempo de rampa, conforme maior era a temperatura de pré-aquecimento utilizada. Entretanto, após a análise dos custos envolvidos, que incluem o consumo de energia elétrica e gás dos fornos utilizados no tratamento térmico e na etapa de pré-aquecimento, concluiu-se que a viabilidade do processo proposto dependerá da demanda por engrenagens destinadas ao tratamento térmico.

Palavras-chave: Pré-aquecimento. Tratamento térmico. Engrenagens.

ABSTRACT

LAHR, H. C. **Study of the influence of the pre-heating process on the cycle time of heat treatment of gears.** 2017. 70f. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017.

The present work was performed in order to study the technical and financial viability of the implementation of a pre-heating stage in the heat treatment of gears in order to reduce the ramp time of heating. The time referred to as the heating ramp represents the time required for the batch furnace to re-establish its cycle start temperature after entry of a load into the heat treatment furnace. In this way, metallurgical and dimensional analyzes were performed, comparing the conventionally treated components and treated components with the pre-heating stage in addition to conventional treatment. After the analysis, tests were performed to evaluate the effect of the pre-heating stage on the reduction of ramp time of heating, considering different temperatures. Considering the microstructural and hardness aspects of the evaluated samples, no significant differences were found between the two analyzed processes. As regards the dimensional aspect of the component treated with the pre-heating stage was observed a variation in the geometric form, factor that must be corrected during an approval process. The process with the pre-heating stage proved to be satisfactory in reduce ramp time of heating, since it reduced the ramp time, as higher was the pre-heating temperature used. However, after the analysis of the costs involved, which include the electric energy and gas consumption of the furnaces used in the heat treatment and in the pre-heating stage, it was concluded that the viability of the proposed process will depend on the demand for gears destined to the heat treatment.

Keywords: Pre-heating. Heat Treatment. Gears.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1 - Vista aérea da unidade Eaton em Valinhos. | 27 |
| Figura 2 - Tipos de montagem entre eixos - Paralelos ou Reversos..... | 28 |
| Figura 3 - Engrenagens de dentes retos. | 29 |
| Figura 4 - Engrenagens de dentes helicoidais..... | 30 |
| Figura 5 - Engrenagens cônicas de dentes retos. | 30 |
| Figura 6 - Engrenagens cônicas de dentes espiralados..... | 31 |
| Figura 7 - Engrenagens Sem-fim..... | 31 |
| Figura 8 - Exemplo de billet cortado para operação de forjamento. | 33 |
| Figura 9 - Exemplo de engrenagens a) logo após o forjamento b) após o processo de normalização e jateamento. | 33 |
| Figura 10 - Exemplo de engrenagem após o processo de torneamento..... | 34 |
| Figura 11 - Exemplo de engrenagem após o processo de fabricação dos dentes. | 35 |
| Figura 12 - Diagrama de fases ferro-carbono | 37 |
| Figura 13 - Diagrama TTT do aço AISI 4340. | 38 |
| Figura 14 - Relação entre a dureza obtida no processo de têmpera a partir do teor de carbono dos aços. | 39 |
| Figura 15 - Relação da variação da profundidade de camada dependendo do tempo e temperatura de cementação. | 41 |
| Figura 16 - Esquema de um forno contínuo. | 43 |
| Figura 17 - Esquema de um forno câmara..... | 44 |
| Figura 18 - Esquema do ciclo de tratamento térmico realizado em forno câmara | 46 |
| Figura 19 - Região de análise para dimensional sobre esferas. | 48 |
| Figura 20 - Dispositivo de medição de dimensional sobre esferas..... | 48 |
| Figura 21 - Dispositivo de medição de forma geométrica..... | 49 |
| Figura 22 - Regiões de análise de forma geométrica da engrenagem: a) passo b) perfil | 49 |
| Figura 23 - Regiões do dente da engrenagem para análise metalúrgica..... | 50 |
| Figura 24 - Microdurômetro utilizado para medição da profundidade de camada..... | 51 |
| Figura 25 - Microscópio óptico utilizado para observação da microestrutura | 51 |
| Figura 26 - Regiões do dente da engrenagem para análise de dureza | 52 |
| Figura 27 - Durômetro utilizado para medição da dureza superficial e de núcleo. | 53 |
| Figura 28 - Passo dos dentes da engrenagem após o tratamento térmico..... | 55 |
| Figura 29 - Perfil dos dentes da engrenagem após o tratamento térmico. | 56 |
| Figura 30 - Profundidade de camada cementada efetiva no dente obtida para peça tratada seguindo processo convencional (sem etapa de pré-aquecimento). | 57 |
| Figura 31 - Profundidade de camada cementada efetiva no dente obtida para peça tratada com a adição da etapa de pré-aquecimento anterior ao processo convencional..... | 57 |
| Figura 32 – Micrografia realizada em microscópio ótico das regiões do dente que foram analisadas: a) camada cementada b) região de transição c) núcleo. Aumento: 100X. Ataque: Nital 4% | 58 |

| | |
|--|----|
| Figura 33 - Micrografia da região de camada cementada do dente a) peça tratada em processo convencional b) peça tratada com a etapa de pré-aquecimento. Aumento: 500X. Ataque: Nital 4%..... | 59 |
| Figura 34 - Padrão utilizado para determinação da fração de austenita retida | 60 |
| Figura 35 - Micrografia da região de núcleo do dente. a) peça tratada em processo convencional b) peça tratada com a etapa de pré-aquecimento. Aumento: 500X. Ataque: Nital 4%..... | 61 |
| Figura 36 - Tempos de rampa obtidos para os testes realizados. | 63 |
| Figura 37 - Custo de processo para os dois tipos de gases considerados. | 65 |
| Figura 38 - Tempo acumulado de pré-aquecimento e rampa para os testes realizados..... | 66 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1 - Limites de composição química para o aço SAE 8620 | 45 |
| Tabela 2 - Limites de composição química para o aço ETN-22. | 47 |
| Tabela 3 - Redução obtida nos tempos de rampa a partir do processo de pré-aquecimento. | 62 |
| Tabela 4 - Custos obtidos utilizando forno a gás GLP na etapa de pré-aquecimento. | 64 |
| Tabela 5 - Custos obtidos utilizando forno a gás natural na etapa de pré-aquecimento..... | 64 |
| Tabela 6 - Comparativo entre os resultados dos dois processos estudados..... | 68 |

SUMÁRIO

| | |
|--|----|
| 1. INTRODUÇÃO..... | 25 |
| 1.1 Objetivo | 26 |
| 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA..... | 26 |
| 2.1 Eaton Ltda | 26 |
| 2.2 Transmissões Mecânicas | 27 |
| 2.3 Engrenagens..... | 28 |
| 2.3.1 Tipos de engrenagem..... | 28 |
| 2.3.1.1 Engrenagens Cilíndricas Retas | 29 |
| 2.3.1.2 Engrenagens Helicoidais | 29 |
| 2.3.1.3 Engrenagens Cônicas..... | 30 |
| 2.3.1.4 Engrenagens Sem-fim | 31 |
| 2.4 Processos envolvidos na fabricação de engrenagens..... | 32 |
| 2.4.1 Forjamento..... | 32 |
| 2.4.2 Torneamento e Usinagem..... | 33 |
| 2.4.3 Tratamentos Térmico e Termoquímico | 35 |
| 2.4.3.1 Normalização..... | 36 |
| 2.4.3.2 Têmpera..... | 37 |
| 2.4.3.3 Revenimento..... | 39 |
| 2.4.3.4 Cementação | 40 |
| 2.4.3.5 Equipamentos para tratamento térmico | 42 |
| 2.4.3.5.1 Fornos Contínuos..... | 42 |
| 2.4.3.5.2 Fornos Câmara..... | 43 |
| 2.4.4 Retífica | 44 |
| 2.5 O aço..... | 45 |
| 2.5.1 ETN-22 | 45 |
| 2.6 Processo de pré-aquecimento | 46 |
| 3. MATERIAIS E MÉTODOS..... | 47 |
| 3.1 Análise Dimensional..... | 47 |
| 3.2 Análise Metalúrgica..... | 50 |
| 3.3 Ensaio de Dureza | 52 |
| 3.4 Análise Processo Pré-aquecimento..... | 53 |
| 3.5 Análise Financeira | 54 |
| 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO..... | 54 |
| 4.1 Análise Dimensional..... | 54 |
| 4.2 Análise Metalúrgica..... | 56 |

| | | |
|-----|---------------------------------------|----|
| 4.3 | Ensaio de Dureza | 61 |
| 4.4 | Análise Processo Pré-aquecimento..... | 62 |
| 4.5 | Análise Financeira | 63 |
| 5. | CONCLUSÃO..... | 68 |
| | REFERÊNCIAS | 69 |

1. INTRODUÇÃO

Na indústria automotiva é clara a necessidade de que os componentes dos sistemas de suspensão e transmissão apresentem determinadas características de modo a suportar os esforços aos quais são submetidos em suas aplicações. Com o objetivo de atender às especificações técnicas, especialmente no que tange às propriedades mecânicas, as autopeças são submetidas a processos de fabricação, especificamente tratamentos térmicos que promovem a modificação da microestrutura e, consequentemente, o atingimento das propriedades requeridas.

A EATON LTDA. – Divisão Transmissões fabrica componentes automotivos para transmissões mecânicas, tais como eixos e engrenagens, os quais passam pelos processos de fabricação de forjamento, usinagem e tratamento térmico, sendo este último, o processo foco deste trabalho.

Diante desse contexto, a etapa de tratamento térmico apresenta grande importância uma vez que é a etapa por quais todas as peças passam, realizado entre o processo de usinagem e as operações de acabamento e linhas de montagem. Os parâmetros de processo necessitam ser controlados para que as especificações de dureza, profundidade de camada e microestrutura sejam atendidas. Ao mesmo tempo, a operação deve ser flexível para atender a produção e aproveitar todos os recursos e ativos disponíveis para a operação.

Durante o ciclo de tratamento térmico, em específico aqueles realizados em fornos do tipo câmara, observa-se uma demora no início do ciclo. O forno câmara é previamente programado para atingir determinada temperatura, a qual irá permitir a entrada da carga na câmara de tratamento (câmara quente). A partir da entrada da carga, a qual se encontra em temperatura ambiente, ocorre uma queda na temperatura do forno, abaixo da temperatura de início de ciclo. O forno necessita então, reaquecer até atingir a temperatura pré-determinada para o início de ciclo. Isso resulta em uma perda durante o set-up do forno, gerando gastos de insumos tais como gás e energia.

A partir da utilização de ferramentas da metodologia Lean Six Sigma para melhorias de processo, tais como: Ciclo PDSA (*Plan, Do, Study e Act*), Mapa de Processo, Diagrama de Análise de Causa Raiz (Ishikawa) e A3 (ferramenta utilizada pela empresa para gerenciamento e acompanhamento de projetos), identificou-se a oportunidade de utilizar uma etapa de pré-aquecimento de cargas. A proposta é que essa etapa seja realizada anterior ao tratamento térmico convencional, em uma câmara alternativa, de

modo a aumentar a temperatura da carga que entrará no forno, diminuindo a queda de temperatura observada e assim reduzir o tempo gasto entre a entrada da carga na câmara de tratamento térmico e o início do ciclo.

Deste modo, o presente trabalho consiste no estudo de como a etapa de pré-aquecimento de cargas pode auxiliar o processo de tratamento térmico e quais são as implicações técnicas e financeiras causadas pela adição deste processo.

1.1 Objetivo

O presente trabalho teve como objetivos:

- Estudar a implementação de uma etapa de pré-aquecimento no tratamento térmico de engrenagens visando reduzir o tempo de rampa de aquecimento. Para atingir este objetivo, foram feitas análises metalúrgicas e dimensionais de peças tratadas convencionalmente e com a etapa de pré-aquecimento, além de testes para avaliar a rampa de aquecimento.
- Avaliar a viabilidade financeira para implementação do processo, tendo em vista, o custo de equipamento, a mão de obra, tempo de processo e demanda da empresa.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Eaton Ltda.

A empresa Eaton Corporation foi criada em 1911 por Joseph O. Eaton e tem sua sede instalada em Cleveland, Ohio nos Estados Unidos. Está presente em 60 países e seu negócio atua basicamente em dois setores: elétrico e industrial, o qual inclui os grupos hidráulicos, aeroespacial e de veículos. [em <http://www.eaton.com/Eaton/OurCompany/index.htm>].

A Eaton Divisão Transmissões iniciou suas atividades na planta da cidade de Valinhos - São Paulo, Brasil, a partir da aquisição da empresa Equipamentos Clark Ltda. no ano de 1996. A consolidação ocorreu com a transferência da fábrica da Eaton em Santo André, presente no Brasil desde 1960. Atualmente a unidade de Valinhos conta com o setor de veículos e hidráulica, sendo responsável pela fabricação de transmissões mecânicas, as quais são comercializadas no Brasil e exterior. Abaixo, na figura 1, temos a vista aérea da unidade em Valinhos [em <http://www.eaton.com.br/EatonBR/index.htm>].

Figura 1 - Vista aérea da unidade Eaton em Valinhos.



Fonte: <http://www.eaton.com.br/EatonBR/index.htm>

2.2 Transmissões Mecânicas

Transmissões mecânicas compreendem equipamentos ou mecanismos que tem como finalidade a propagação da potência, torque ou rotação dentro de uma máquina ou entre dois ou mais elementos. Em um veículo, a transmissão realiza a transferência de potência gerada pelo motor para as rodas de tração do veículo por meio dos componentes do trem de força, tais como, engrenagens, eixos, rolamentos, sincronizadores, dentre outros [Dias, 2011].

A caixa de câmbio está conectada ao motor por intermédio da embreagem, a qual é responsável por transmitir a potência do motor e possibilitar a troca de marchas. Ao ser acionada, a embreagem isola a caixa de câmbio para que seja possível alterar a velocidade de rotação das engrenagens por meio do eixo piloto, sem que o motor esteja transmitindo potência ao sistema mesmo em funcionamento [Dias, 2011]. As engrenagens da caixa de câmbio permitem variar a rotação e o torque fornecido pelo motor de acordo com o que está sendo exigido para a movimentação do veículo, uma vez que possuem diferentes diâmetros. Dessa forma é possível multiplicar ou reduzir a força do motor de acordo com a marcha selecionada. As relações de marcha definem quantas voltas dá a engrenagem motora (a que move a outra) para cada volta da engrenagem movida. No caso da 4^a marcha, por exemplo, a relação é 1:1.

2.3 Engrenagens

Engrenagens são elementos de máquinas rígidos que possuem dentes em sua porção externa ou interna, utilizadas para a transmissão de movimentos rotativos entre eixos.

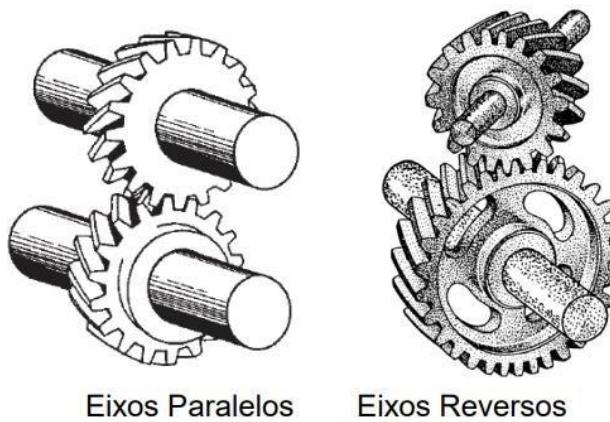
Segundo Shigley (2007), as forças transmitidas entre pares de engrenagens engrenadas fornecem momentos torcionais a eixos, de modo a gerar movimento e transmissão de potência, e criam forças e momentos que afetam o eixo e seus mancais.

Tais elementos necessitam atender a algumas características dependendo da aplicação, mas a principal delas é a de que não haja qualquer diferença de velocidade entre os pontos de contato durante a transmissão do movimento. Uma diferença de velocidade poderia ocasionar uma perda de contato ou o travamento do par de engrenagens.

2.3.1 Tipos de engrenagem

Existem diferentes tipos de engrenagens, dependendo do tipo de aplicação e funcionalidade que se deseja obter para a transmissão. Cada tipo se diferencia basicamente quanto às características do dentado e o uso para dois tipos de montagens, entre eixos paralelos ou não-paralelos (reversos ou cruzado). Os tipos de montagem podem ser observados na figura 2 abaixo.

Figura 2 - Tipos de montagem entre eixos - Paralelos ou Reversos.



Fonte: Pauli, 2006.

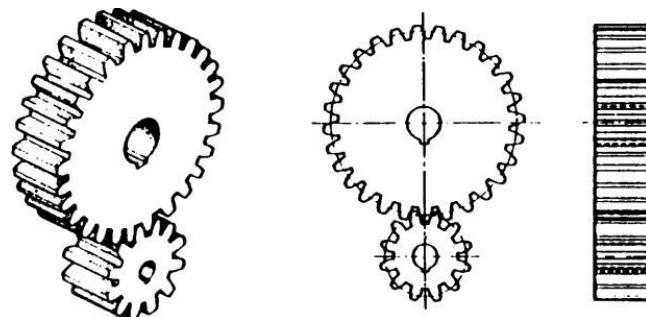
Os quatro principais tipos de engrenagens são [Shigley, 2007]:

- Cilíndricas retas;
- Helicoidais;
- Cônicas;
- Sem-fim.

2.3.1.1 Engrenagens Cilíndricas Retas

Engrenagens cilíndricas de dentes retos possuem dentes retos e paralelos ao eixo de rotação e são empregadas na transmissão de movimento e potência entre eixos paralelos. É o tipo mais simples dentre todos e normalmente utilizada para desenvolver as relações cinemáticas primárias, ou seja, de baixa rotação, por conta do ruído produzido [Shigley, 2007]. Um exemplo de um par de engrenagens com dentes retos pode ser observado na figura 3 abaixo.

Figura 3 - Engrenagens de dentes retos.



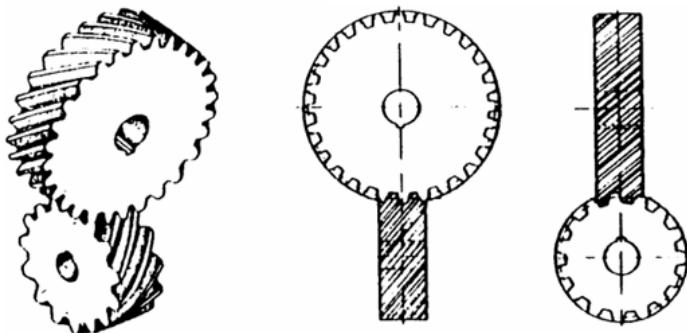
Fonte: Pauli, 2006.

2.3.1.2 Engrenagens Helicoidais

Engrenagens helicoidais diferem do primeiro tipo, pois possuem dentes inclinados, dispostos transversalmente em forma de hélice, em relação ao eixo de rotação. Na indústria automotiva, preferem-se engrenagens desse tipo uma vez que apresentam menos ruído quando solicitadas em rotações elevadas. Isso ocorre devido a seus dentes estarem em componentes axiais, possibilitando um engrenamento mais gradual [Shigley, 2007].

Esse tipo de dente inclinado também cria forças axiais e momentos flexores durante o movimento. São utilizadas para transmitir movimento entre eixos paralelos e não-paralelos (cruzados, formando um ângulo entre si, normalmente de 60° ou 90°. A engrenagem helicoidal descrita, pode ser observada na figura 4 abaixo.

Figura 4 - Engrenagens de dentes helicoidais.



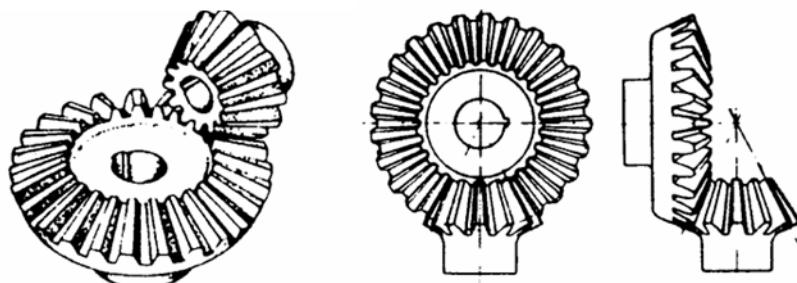
Fonte: Pauli, 2006.

2.3.1.3 Engrenagens Cônicas

As engrenagens cônicas possuem dentes formados em superfícies cônicas e são utilizadas para transmitir movimento entre eixos que se interceptam normalmente em 90° . As engrenagens cônicas podem apresentar dentes retos ou ser do tipo cônicas espiraladas, na qual o dente forma um arco circular [Shigley, 2007].

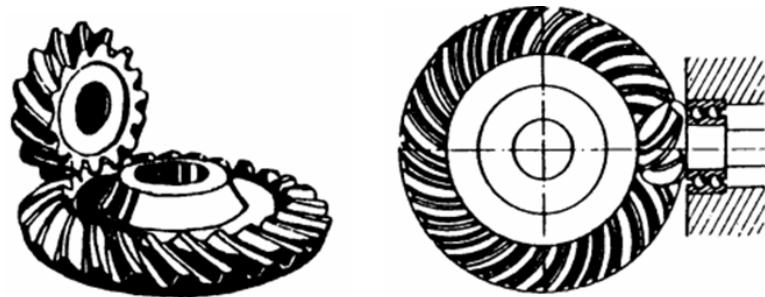
A do tipo dentes retos é utilizada para mudar a rotação e direção da força, em baixas velocidades. Já a do tipo cônica espiralada é empregada quando o par deve transmitir grandes potências e girar suavemente, pois com este formato de dentes consegue-se o engrenamento simultâneo de dois dentes [Norton, 2011]. Ambas requerem uma montagem precisa para o seu funcionamento adequado, como pode ser visto nas figuras 5 e 6 abaixo.

Figura 5 - Engrenagens cônicas de dentes retos.



Fonte: Pauli, 2006.

Figura 6 - Engrenagens cônicas de dentes espiralados.

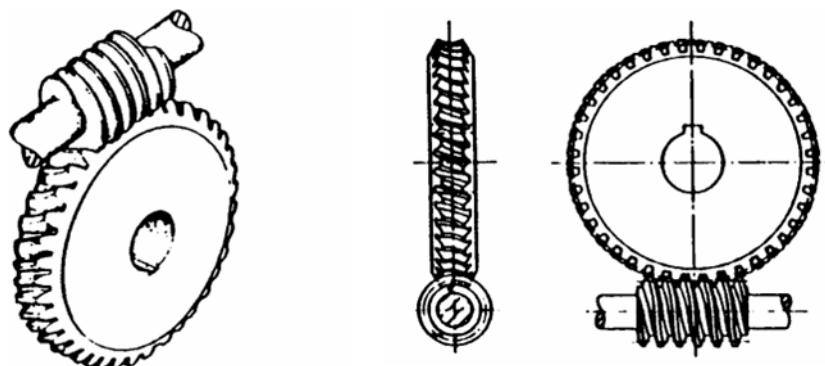


Fonte: Pauli, 2006.

2.3.1.4 Engrenagens Sem-fim

O engrenamento sem-fim é composto por um parafuso sem-fim e uma engrenagem sem-fim. O parafuso sem-fim é uma engrenagem helicoidal com até seis dentes (filetes). O parafuso e a engrenagem sem-fim (coroa) são utilizados para transmissão entre dois eixos perpendiculares entre si. São usados quando se precisa obter grande redução de velocidade e consequente aumento de momento torsor. No engrenamento sem-fim, como nas engrenagens helicoidais, aparece forças axiais que devem ser absorvidas pelos mancais. Devido ao grande atrito de deslizamento entre o sem-fim e a coroa, o conjunto deve funcionar em banho de óleo. O conjunto descrito pode ser observado na figura 7 abaixo.

Figura 7 - Engrenagens Sem-fim.



Fonte: Pauli, 2006.

2.4 Processos envolvidos na fabricação de engrenagens

2.4.1 Forjamento

O forjamento é o mais antigo processo de conformação dos metais, tendo suas origens no trabalho dos ferreiros de muitos séculos atrás. É o processo de conformação através do qual se obtém a forma desejada da peça por martelamento ou aplicação gradativa de uma pressão sobre um material dúctil. Na maioria das operações de forjamento emprega-se um ferramental constituído por um par de ferramentas de superfície plana ou côncava, denominadas matrizes [Bresciani, 1991].

Geralmente, o processo de forjamento é efetuado à quente, embora certas peças pequenas, tais como parafusos, engrenagens e pinos, possam ser forjadas à frio. Através da deformação plástica produzida pelo forjamento, pode-se conseguir dois efeitos: dar a forma desejada à peça e melhorar as propriedades mecânicas do metal, por meio da modificação e distribuição de seus constituintes e refino do grão [Bresciani, 1991].

O forjamento pode ser classificado como sendo de matriz aberta (livre) ou fechada. Na matriz aberta o material é conformado entre matrizes planas ou de formato simples, que normalmente não se tocam. Já no caso de forjamento em matriz fechada, o material é conformado entre duas metades de matriz que possuem, gravadas em baixo-relevo, impressões com o formato que se deseja fornecer à peça. Neste último caso, a deformação ocorre sob alta pressão em uma cavidade fechada ou semifechada, permitindo assim obter-se peças com tolerâncias dimensionais menores do que no forjamento em matriz aberta [Bresciani, 1991].

A deformação plástica ocasionada pelo processo de forjamento faz com que o metal apresente grãos equiaxiais, ou seja, com dimensões semelhantes. Após o forjamento é necessário um tratamento térmico de normalização, a ser explicado no item 2.5.2, para produzir um tamanho de grão uniforme e minimizar as tensões residuais internas geradas pelo processo [ASM Handbook, 1991, Vol. 14].

Para a fabricação de uma engrenagem, uma barra do metal desejado é cortada em uma máquina de serra em pequenos billets, nas dimensões pré-determinadas de projeto, como visto na figura 8 abaixo.

Figura 8 - Exemplo de billet cortado para operação de forjamento.



Fonte: Cedida por Eaton Ltda. – Divisão de Transmissões.

O billet é então direcionado à prensa de matriz fechada, na qual o metal será conformado, assumindo a pré-forma da engrenagem. A partir da pré-forma dada, a peça ainda passa por uma prensa rebarbadeira para a realização do furo no centro. Após o forjamento a peça passa pelo processo de normalização e, devido à oxidação da peça ao ar, é necessária ainda uma etapa de jateamento com granulhas de aço para eliminar os óxidos formados na superfície da peça. Exemplos de engrenagens após passarem pelas etapas descritas podem ser vistas na figura 9 abaixo.

Figura 9 - Exemplo de engrenagens a) logo após o forjamento b) após o processo de normalização e jateamento.



Fonte: Cedida por Eaton Ltda. – Divisão de Transmissões.

2.4.2 Torneamento e Usinagem

Segundo Ferraresi, torneamento é um processo de usinagem no qual se obtém superfícies de revolução com o auxílio de uma ou mais ferramentas monocortantes.

Durante o processo nos tornos, a peça que se deseja usinar executa o movimento de rotação em torno de seu próprio eixo, enquanto a ferramenta de corte se desloca ao

longo do eixo e realiza os movimentos de avanço longitudinal e/ou transversal. Na maioria dos casos o eixo de rotação é horizontal, mas pode ser também vertical.

O processo de torneamento consiste na fabricação de uma peça bem definida em formas e dimensões, por meio da remoção do excesso de material da mesma na forma de cavacos. O excesso é retirado por uma ferramenta de corte que possui dureza maior que a do material a ser usinado e que está presa à porta-ferramenta do torno. Em geral, a matéria-prima tem, inicialmente, a forma cilíndrica.

Este processo é realizado após o processo de normalização e limpeza, com a finalidade de desbaste, se aproximando das dimensões finais da peça. Na figura 10 abaixo pode se observar uma peça após a operação de torneamento.

Figura 10 - Exemplo de engrenagem após o processo de torneamento.



Fonte: Cedida por Eaton Ltda. – Divisão de Transmissões.

Após o processo de torneamento a peça é direcionada às operações de usinagem para a fabricação dos dentes, os quais podem ser retos ou helicoidais. No processo de fabricação de dentes, a forma do dente da engrenagem é gerada pela ferramenta de corte. O processo mais comumente utilizado é o "Hobbing". Neste processo, a peça torneada rotaciona constantemente, enquanto a ferramenta de corte ("hob") avança em direção à peça. Para casos de fabricação de dentes internos, por exemplo, o "Hobbing" não é recomendado, realizando-se, portanto, o processo de "Shaping".

O processo de "Shaping" também é um processo de geração de dentes, mas a ferramenta de corte ("shaper") avança em direção ao centro da peça. No caso de dentes retos há um avanço axial reto, e no caso de dentes helicoidais o avanço da ferramenta será um movimento helicoidal definido por guia em hélice [Lynwander, 1983].

Após a fabricação dos dentes deve-se realizar a operação de acabamento, a qual pode ser feita antes ou após o tratamento térmico. O processo de “Shaving” é uma operação de acabamento a qual melhora o erro de espaçamento entre dentes, o perfil, o passo, o batimento e a superfície de acabamento que foram geradas no “Hobbing” ou no “Shaping”, portanto é um processo que ocorre antes do tratamento térmico.

Já o processo de “Grinding” consiste em uma retífica após o tratamento térmico, a qual tem por objetivo corrigir as deformações no dente decorrentes do tratamento, possibilitando a obtenção de dentes de engrenagem com uma melhor qualidade em termos de precisão. O exemplo de uma engrenagem que passou pelos processos descritos acima pode ser vista na figura 11 abaixo.

Figura 11 - Exemplo de engrenagem após o processo de fabricação dos dentes.



Fonte: Cedida por Eaton Ltda. – Divisão de Transmissões.

2.4.3 Tratamentos Térmicos e Termoquímicos

A etapa de tratamento térmico consiste em operações de aquecimento e resfriamento subsequente, dentro de condições controladas de tempo e temperatura, às quais peças metálicas são submetidas, com o objetivo de alterar a microestrutura e suas propriedades físicas e mecânicas, sem alterar significativamente a forma do produto [Brooks, 1986].

O tratamento térmico às vezes acontece inadvertidamente, como “efeito colateral” de um processo de fabricação que causa aquecimento ou resfriamento no metal, como nos casos de soldagem e de forjamento. Normalmente é associado ao aumento da resistência do material, mas também pode ser usado para melhorar a usinabilidade, a

conformabilidade e restaurar a ductilidade depois de uma operação a frio [ASM Handbook, 1991, Vol. 4].

No processo de fabricação contemplado neste trabalho, o tratamento térmico é realizado para que as peças obtenham melhores propriedades de tenacidade, dureza e resistência mecânica. Cada peça, de acordo com sua aplicação, terá uma especificação determinada pelo cliente de dureza e microestrutura, o que irá requerer diferentes materiais, tempos de ciclos, tipos de fornos, temperaturas e formas de carregamento da peça.

Os tratamentos térmicos envolvidos no processo de fabricação de uma engrenagem se resumem basicamente em normalização, têmpera e revenimento. Normalmente, em uma etapa anterior à têmpera, é realizada também o processo de cementação, um tratamento termoquímico. Tal processo combina a ação do calor com a ação química, fato que promove um endurecimento superficial através da modificação da composição química e microestrutural em regiões superficiais por meio de difusão atômica [Silva, 2010]. O objetivo da cementação é obter o aumento de dureza e resistência ao desgaste de uma camada superficial, mantendo-se a microestrutura do núcleo dúctil e tenaz. Logo, a cementação é aplicada em peças que serão utilizadas sob condições nas quais seja necessária superfície com elevada dureza e resistente ao desgaste, e núcleo tenaz capaz de resistir ao impacto quando em uso, como é o caso de engrenagens.

Todos os processos térmicos e termoquímicos, bem como os equipamentos utilizados serão explicados nos itens a seguir.

2.4.3.1 Normalização

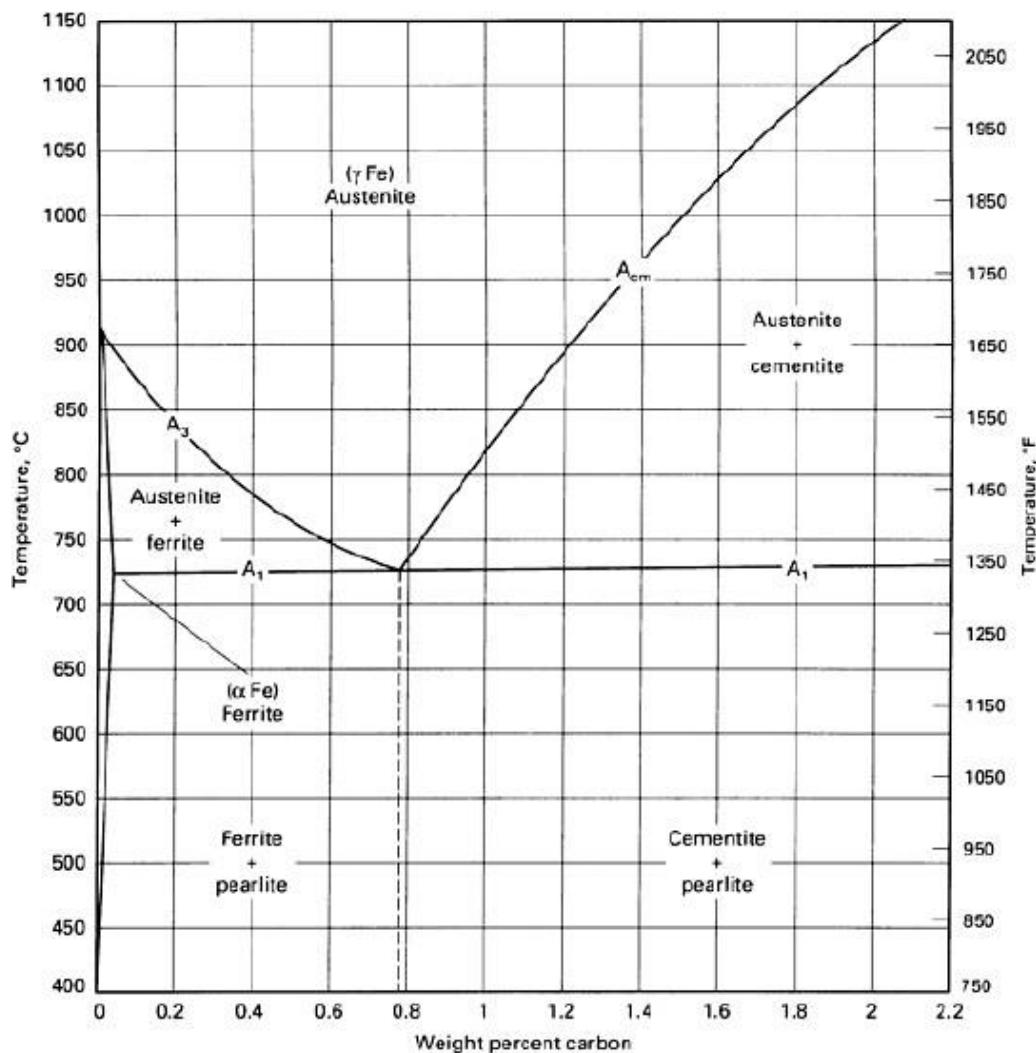
O tratamento térmico de normalização consiste no aquecimento do aço até sua completa austenitização, seguido de resfriamento ao ar. Tem como objetivo a homogeneização e o refino do tamanho de grão de estruturas grosseiras obtidas de trabalho à quente, como laminação e forjamento, de aços fundidos e soldagem. Também pode ser um processo aplicado para o alívio de tensões causadas por operações de repuxo ou soldagem. Assim, promove o refino dos grãos de austenita e ferrita, além de obtenção de uma perlita relativamente fina [Bhadeshia e Honeycombe, 1982].

Para que a austenitização ocorra o aço é aquecido acima da temperatura crítica do diagrama Fe-Fe₃C, sendo acima de A₃ para aços hipoeutetóides e acima de A_{cm} para aços hipereutetóides. Para ser adequadamente classificado como um tratamento de

normalização, o aquecimento deve garantir uma fase austenítica homogênea (cúbica de face centrada) antes do resfriamento [ASM Handbook, 1991, Vol. 4].

A normalização se faz normalmente, para aços com até 0,4% C, após o processo de forjamento, para refinar o tamanho de grão e antes do tratamento térmico de cementação e têmpera para evitar o aparecimento de trincas e empenamento [Silva, 2010]. Na figura 12 abaixo pode-se observar o diagrama de fases ferro-carbono.

Figura 12 - Diagrama de fases ferro-carbono.



Fonte: ASM Handbook, 1991, Vol. 4.

2.4.3.2 Têmpera

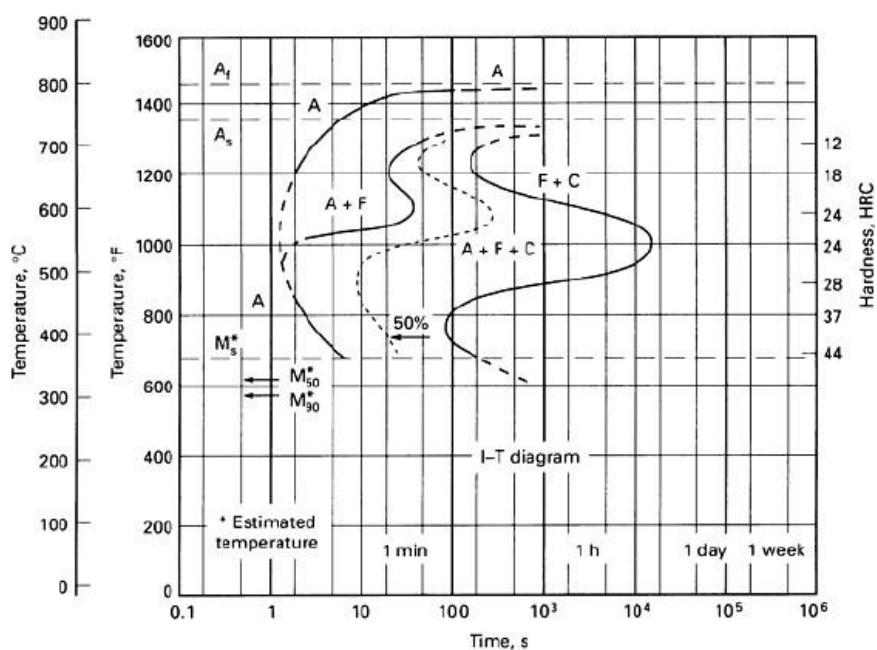
O tratamento térmico de têmpera, realizado após a normalização, consiste em aquecer o material até a temperatura de austenitização e realizar um resfriamento brusco, de modo a evitar as transformações das microestruturas perlita e bainita, visando obter a estrutura martensítica [Silva, 2010]. A martensita se forma quando o resfriamento é rápido

o suficiente para evitar a difusão do carbono, ficando o mesmo retido em solução. A partir da estrutura martensítica, obtém-se então, uma peça de aço com dureza e resistência mecânica elevadas.

Após o aquecimento até a temperatura de austenitzação, deve-se controlar o resfriamento a ser feito na sequência, o qual deve ser brusco. Para o controle da taxa de resfriamento são determinados os meios de têmperas com diferentes capacidades de extração de calor (severidade), sendo os mais comuns água, óleo ou ar. A severidade do meio de resfriamento pode gerar gradientes de temperatura entre o centro e a superfície da peça. Quanto maior a severidade do meio, maior será o gradiente, o que irá favorecer o aparecimento de tensões internas na peça, as quais podem causar empenamento ou rupturas [Bhadeshia e Honeycombe, 1982].

A temperabilidade da peça, ou seja, a facilidade com a qual a martensita é formada irá depender de fatores como por exemplo, a porcentagem de carbono do aço e a presença e quantidade de elementos de liga. Para se avaliar em quais condições deve-se realizar o resfriamento na têmpera, leva-se em conta a composição do aço, existindo para cada composição uma curva TTT de transformação. Na figura 13 abaixo, temos a curva TTT de um aço AISI 4340, por exemplo.

Figura 13 - Diagrama TTT do aço AISI 4340.

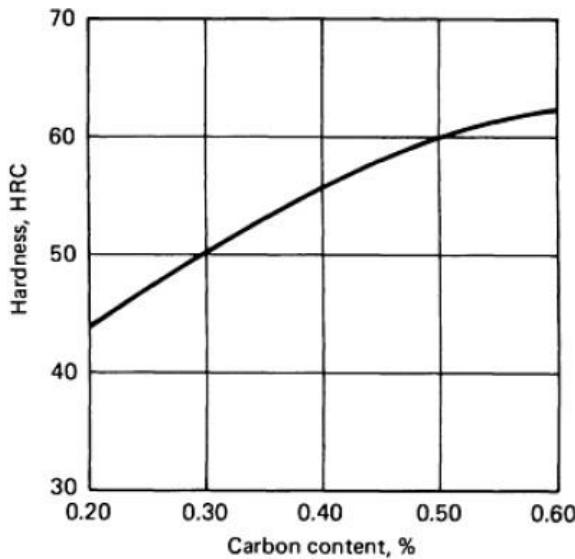


Fonte: ASM Handbook, 1991.

Como visto no diagrama da figura acima, abaixo de M_s inicia-se a formação de martensita. Em alguns casos, se a temperatura M_f – temperatura final de transformação de martensita – for muito inferior à temperatura ambiente, deve-se realizar um resfriamento a uma temperatura sub-zero para transformar a maioria da austenita retida [Reed-Hill, 1982]

No que se refere aos elementos de liga, a presença dos mesmos, com exceção do cobalto, desloca a curva TTT para a direita, facilitando a formação da martensita, ou seja, aumenta a temperabilidade. Em alguns aços, a formação de martensita pode ser obtida até mesmo com resfriamentos lentos. Quanto ao teor de carbono, com o seu aumento, a temperatura de início e fim de formação da martensita diminui, o que favorece a formação e o aumento da dureza da martensita. O aumento de dureza obtida por meio de têmpera é observada até aproximadamente 0,6% de carbono. Para teores de carbono superiores o aumento de dureza não é tão considerável devido à maior formação de austenita retida. Na figura 14 abaixo pode ser observada a relação entre a dureza e o teor de carbono do aço.

Figura 14 - Relação entre a dureza obtida no processo de têmpera a partir do teor de carbono dos aços.



Fonte: ASM Handbook, 1991.

2.4.3.3 Revenimento

Após o tratamento de têmpera, obtém-se uma estrutura martensítica extremamente dura e frágil. Dessa forma, normalmente realiza-se o tratamento de revenimento após o tratamento de têmpera, o qual tem por objetivo melhorar a tenacidade do aço, aliviando as

tensões internas causadas pelo tratamento anterior e corrigir a alta dureza e fragilidade do material [Silva, 2010].

Neste processo, o aço é aquecido a uma temperatura inferior à de austenitização, mantido por tempo suficiente até obter as propriedades desejadas e então resfriado lentamente ao ar. Sendo a martensita uma estrutura metaestável, o carbono presente na mesma se precipita sob a forma de carbonetos, o que gera uma martensita de baixo carbono, diminuindo a dureza do material [Silva, 2010]. A essa estrutura dá-se o nome de martensita revenida, com uma tenacidade superior à da sua estrutura de origem. Durante o revenimento também pode ocorrer a decomposição da austenita retida em bainita, processo que ocorre entre 100 °C e 300 °C.

2.4.3.4 Cementação

Como definido anteriormente, a cementação é um tipo de tratamento termoquímico que promove o endurecimento superficial a partir da difusão de carbono para a superfície do componente, o qual é aquecido em temperaturas suficientes para produzir a microestrutura austenítica. A austenita é posteriormente convertida em martensita por meio de têmpera. Subsequente a esses processos é realizado o tratamento de revenimento para restituir a ductilidade ao aço temperado [ASM Handbook, 1991, Vol. 4].

Por meio da modificação da composição química e microestrutural, ocorre um aumento do teor de carbono na superfície do aço, o que faz com que este apresente um aumento de dureza e resistência ao desgaste da camada superficial, aumentando a resistência a propagação de trincas devido às tensões de compressão, mas mantendo a microestrutura do núcleo dúctil e tenaz [Bhadeshia e Honeycombe, 1982].

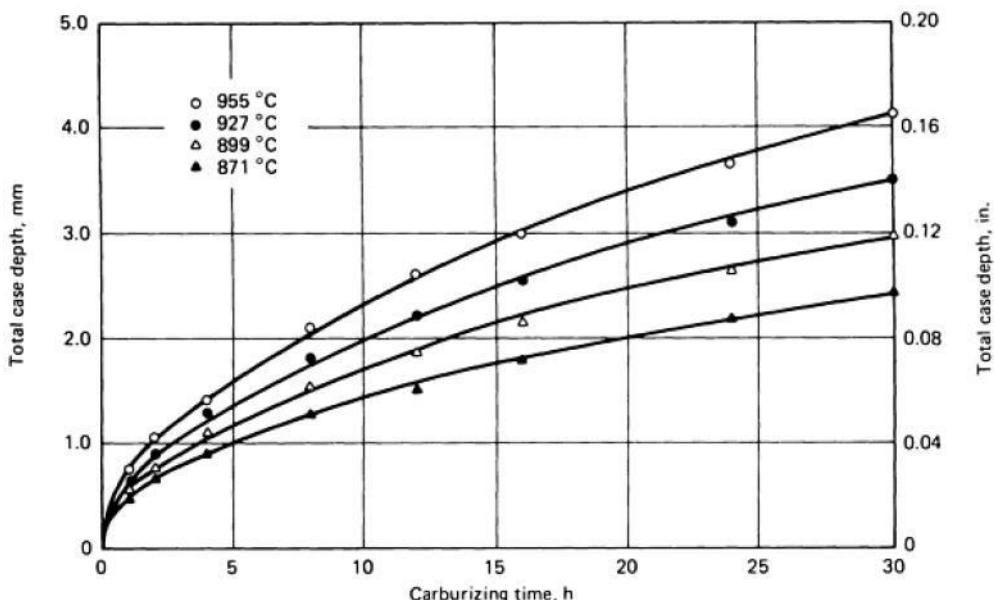
O processo pode ser realizado por via sólida, líquida ou gasosa, no qual se realiza com o aquecimento da peça a uma temperatura acima à da zona crítica - entre 815 e 950°C - na qual o ferro se encontrará na fase austenita (γ), a qual possui maior solubilidade de carbono, facilitando a difusão do mesmo. Após a homogeneização da temperatura por toda a peça, inicia-se a cementação a partir da reação do ferro do aço com o carbono da atmosfera cementante, tornando a superfície uma região enriquecida com carbono [Silva, 2010].

Por fim, é necessário um tratamento de têmpera para refinar a estrutura e obter propriedades tais como aumento da dureza e resistência ao desgaste. Deve-se considerar neste caso duas regiões: a superfície, de alto teor de carbono e o núcleo, de baixo teor de

carbono. Dessa forma as partes externa e interna estão com diferentes microestruturas e irão resfriar em taxas diferentes (superfície resfria mais rapidamente) o que promove o surgimento de tensões mecânicas consideráveis [ASM Handbook, 1991, Vol. 4].

A profundidade da camada cementada irá depender da temperatura, do tempo de permanência, da composição do gás cementante e da composição química do aço. No caso deste último, quanto menor o teor de carbono, mais fácil é a cementação. Em relação à temperatura e ao tempo de permanência, a relação pode ser observada na figura 15 abaixo.

Figura 15 - Relação da variação da profundidade de camada dependendo do tempo e temperatura de cementação.



Fonte: ASM Handbook, 1991, Vol. 4.

Como dito anteriormente, no processo de cementação, ocorre um aumento da porcentagem de carbono na superfície, o qual penetra por meio da difusão. Segundo Krauss, a difusão é o fenômeno de transporte de matéria por movimento atômico, a qual está presente em quase todos os fenômenos ocorridos durante o tratamento térmico.

No caso da cementação, a difusão ocorre em regime não-estacionário, ou seja, o fluxo de difusão e o gradiente de concentração variam ao longo do tempo, podendo ocorrer um acúmulo ou um esgotamento. Neste caso, para compreender a difusão de carbono na austenita utiliza-se a equação diferencial parcial da Segunda Lei de Fick conforme equação 1 abaixo, a qual relaciona a concentração de carbono com a profundidade de camada obtida a partir de um coeficiente de difusão D.

$$\frac{C_x - C_0}{C_s - C_0} = \frac{1}{2} \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) \quad (\text{Equação 1})$$

Aplicando as condições de contorno, uma solução para a segunda Lei de Fick é obtida por meio da equação 2:

$$\frac{C_x - C_0}{C_s - C_0} = \frac{1}{2} \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) \quad (\text{Equação 2})$$

Na qual, C_x é a concentração em uma profundidade x após um tempo t ; C_0 é a concentração inicial; C_s é a concentração constante em $x=0$ (superfície); x é a profundidade de camada; $\operatorname{erf} (x/2\sqrt{Dt})$ é a função erro de Gauss, cujos valores são obtidos por meio de tabelas consultadas [ASM Handbook, 1991, Vol. 4]. A partir da solução descrita na equação 2 acima e do valor do coeficiente de difusão D , é possível prever o gradiente de carbono e a profundidade de penetração que ocorrem para qualquer combinação de tempo, temperatura e concentração inicial de carbono na superfície.

2.4.3.5 Equipamentos para tratamento térmico

Os fornos de tratamento térmico normalmente podem ser classificados, quanto ao tipo de movimentação, em dois tipos: batch (batelada) e contínuos. Na empresa Eaton, as engrenagens podem ser tratadas em forno câmara, do tipo batch, ou em fornos contínuos.

2.4.3.5.1 Fornos Contínuos

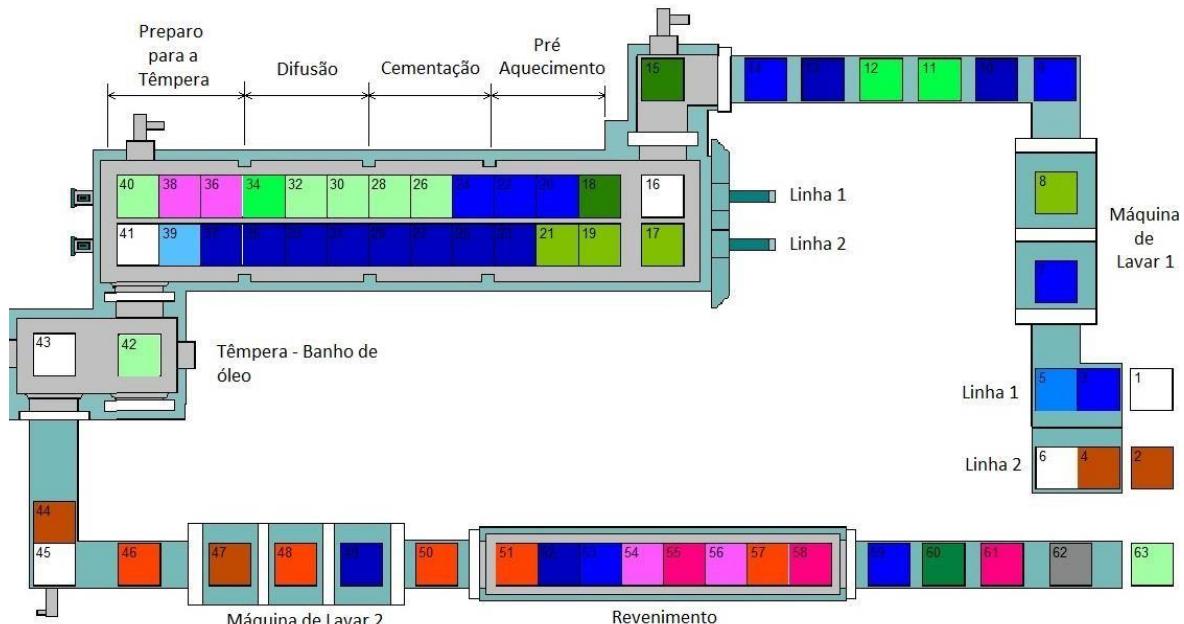
Os fornos contínuos possuem um sistema de transporte automático, por meio de esteiras, que permite que as cargas sejam tratadas continuamente, tendo portas de entrada e saída distintas. É composto basicamente por câmaras isoladas (zonas) por refratários, portas de acesso e sistema de aquecimento [Smith, 1991].

Como dito anteriormente, os fornos funcionam em ciclos ininterruptos e por isso são facilmente adaptáveis à automação e, preferíveis quando se tem um alto volume de peças a serem tratadas. O alto volume, em termos de massa (Kg) por hora, reduz o custo de tratamento, quando comparado a um forno do tipo câmara, por exemplo.

Para que ocorra a entrada contínua de cargas, há uma repetição dos ciclos tempo-temperatura, que são função da cadência de movimentação das esteiras através das zonas de aquecimento do forno. Entretanto, com a movimentação e abertura frequente das portas

ocorre uma variação da atmosfera das zonas de aquecimento [Smith, 1991]. O esquema de um forno contínuo industrial pode ser observado na figura 16 abaixo.

Figura 16 - Esquema de um forno contínuo.



Fonte: Cedida por Eaton Ltda. – Divisão de Transmissões.

2.4.3.5.2 Fornos Câmara

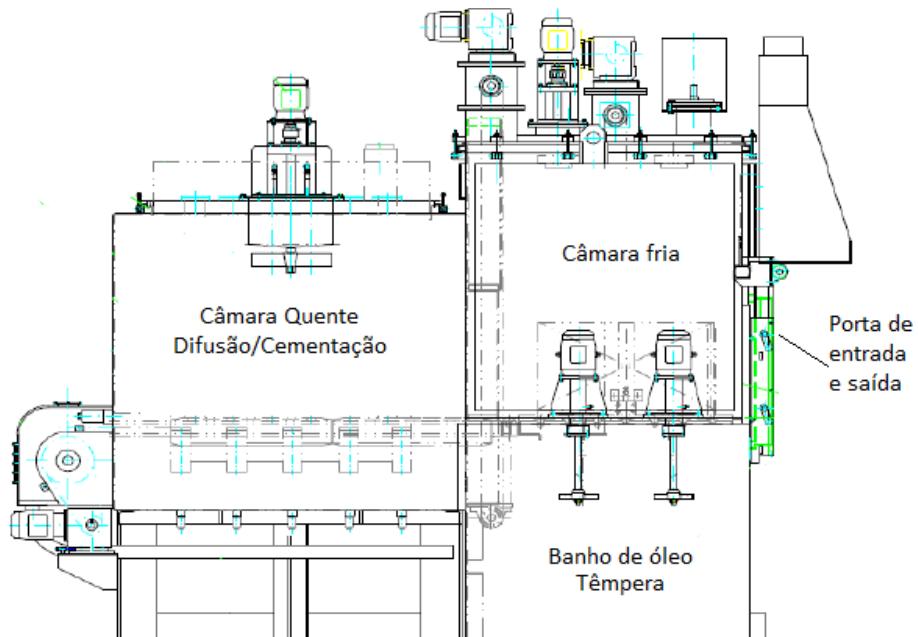
Segundo Smith, o forno do tipo batch, consiste em uma câmara isolada, na qual se realiza a cementação, e um sistema de aquecimento no interior de uma carcaça de aço. Pode-se ter uma ou mais portas de acesso a essa câmara.

Em fornos desse tipo, o carregamento de cargas é realizado manualmente, não ocorrendo desgaste excessivo devido à movimentação de cargas. É preferível para peças de grande porte, que possuem ciclos longos e que requerem alta profundidade de camada ou também no caso de baixos volumes, em termos de massa (Kg) por hora. Tais fatores elevam o custo da mão de obra necessária ao processo, o que eleva o custo do tratamento em fornos desse tipo.

No caso do forno câmara, a estrutura é semelhante, sendo composto por uma câmara fria, uma câmara quente e uma zona onde se realiza a têmpera. Há apenas uma porta para a entrada e a saída da carga tratada. A carga é inserida na câmara fria até a completa estabilização de atmosfera e pressão. Após isso, inicia-se a movimentação para a câmara quente, dando início a difusão. A peça já então cementada, com o auxílio de um

elevador, desce para o banho de óleo para a realização da têmpera, visando obter a estrutura martensita. O revenimento é realizado em um forno separadamente. Na figura 17 abaixo é possível observar a estrutura de um forno batch do tipo câmara.

Figura 17 - Esquema de um forno câmara.



Fonte: (Adaptado) Leitão, 2017.

2.4.4 Retífica

A Retificação é um processo de usinagem pelo qual se remove material da peça ao se estabelecer contato entre a peça e uma ferramenta abrasiva chamada rebolo. O rebolo gira em alta velocidade em torno do seu próprio eixo, e pode executar movimento de translação. A peça a ser retificada também pode movimentar-se [Coelho, 2009].

Tal processo é aplicado à peça após a execução de todos os outros processos de usinagem. A retificação é feita com o objetivo de se atender às tolerâncias geométricas e dimensionais especificadas. Como consequência do processo, por ser de alta precisão, é proporcionado à peça um grau de acabamento superior. Além disso, obtém-se a correção das imperfeições das peças mecânicas que foram submetidas a processos de tratamento térmico, como, por exemplo, a têmpera. A retificação pode ser realizada em retifica cilíndrica (externa ou interna, no caso de furos internos) ou plana.

Após a etapa de retífica a engrenagem segue para a linha de montagem junto com os demais componentes necessários para a composição de uma caixa de câmbio.

2.5 O aço

Segundo Silva e Mei, aços são ligas metálicas ferrosas que contém de 0,008% a 2,11% de carbono, além de concentrações apreciáveis de outros elementos de liga.

Para se definir mais precisamente os tipos de aços existentes, pode-se dividir em duas categorias: aço-carbono e aço-liga. Os aços-carbono incluem os aços com teor residual de elementos de liga e se subdividem em baixo carbono (inferior a 0,2%), médio carbono (entre 0,2% a 0,5%) e alto carbono (acima de 0,5%). Já os aços-liga, apresentam maiores teores de elementos de liga e podem ser classificados ainda como sendo de baixa liga (elementos de liga abaixo de 8%) ou alta liga (acima de 8%) [Chiaverini, 2005].

2.5.1 ETN-22

O ETN-22 é um aço desenvolvido pela EATON Truck e foi o material utilizado para a fabricação das peças estudadas neste trabalho. Em relação às suas características, o ETN-22 assemelha-se ao aço SAE 8620 em suas propriedades e composição, diferindo apenas por não apresentar o elemento químico níquel. É, portanto, um aço com baixo teor de carbono (0,20%) e que apresenta boa temperabilidade, boa usinabilidade e resistência mecânica. É utilizado na fabricação de engrenagens, pinos e peças onde existe a necessidade de uma maior dureza superficial, a ser obtida pelo tratamento térmico de cementação.

Na tabela 1 abaixo pode ser observada a composição química do aço SAE 8620.

Tabela 1 - Limites de composição química para o aço SAE 8620.

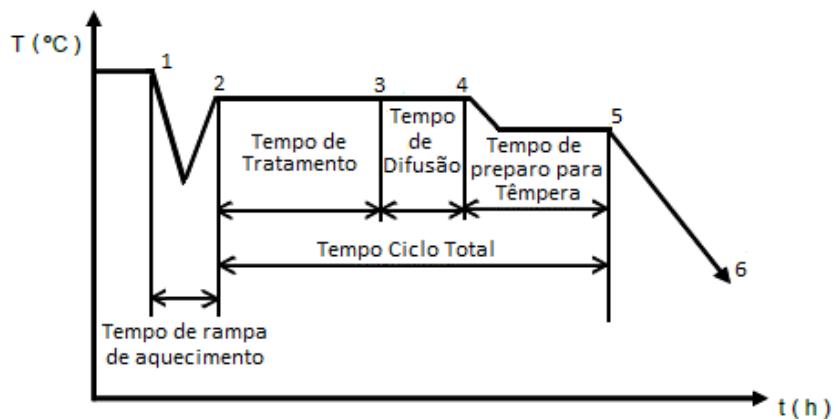
| SAE | Limites de Composição Química (%) | | | | | | | |
|------|-----------------------------------|-----------|--------|--------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | C | Mn | P máx. | S máx. | Si | Ni | Cr | Mo |
| 8620 | 0,18-0,23 | 0,70-0,90 | 0,030 | 0,040 | 0,15-0,35 | 0,40-0,70 | 0,40-0,60 | 0,15-0,25 |

Fonte: Cedida por Eaton Ltda. – Divisão de Transmissões.

2.6 Processo de pré-aquecimento

Como dito anteriormente, em especial em fornos do tipo câmara, observa-se uma demora no início do ciclo de tratamento térmico. O esquema de um ciclo de tratamento térmico em forno câmara, o qual inclui cementação e têmpera, pode ser observado na figura 18 abaixo.

Figura 18 - Esquema do ciclo de tratamento térmico realizado em forno câmara.



Fonte: Mattos, 2008.

No ponto 1, o forno encontra-se já aquecido na temperatura determinada e está em espera, aguardando enquanto a carga é colocada na câmara fria. Na sequência, após estabilização do forno, a câmara quente se abre e ocorre a entrada da carga, o que pode ser observado pela queda repentina de temperatura entre os pontos 1 e 2, uma vez que a carga está em temperatura ambiente.

O tratamento se inicia no ponto 2, a partir do atingimento da temperatura de início do ciclo de cementação, seguido da difusão (3). A partir do ponto 4, a cementação é finalizada e inicia-se a têmpera, com uma leve adequação de temperatura. O ciclo termina no ponto 5, seguido de resfriamento brusco no banho de óleo da têmpera (6).

O processo resume-se então a um pré-aquecimento em uma câmara alternativa, de modo a reduzir a queda de temperatura entre os pontos 1 e 2 da figura acima, reduzindo o tempo de rampa de aquecimento, ou seja, o tempo necessário para que o forno câmara reestabeleça sua temperatura de início de ciclo após a entrada de uma carga no forno de tratamento térmico.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Em um primeiro momento, determinou-se em qual forno câmara o estudo seria feito e a partir disso iniciou-se a coleta dos dados para definição da peça a ser estudada. Foram coletados dados durante dois meses de produção normal do forno e a partir disso, escolheu-se um tipo de engrenagem disponível pela produção, a qual apresentava um dos maiores tempos de retomada de temperatura entre a entrada da carga no forno e o início de ciclo. A engrenagem foi fabricada com a liga ETN-22, a qual apresenta composição semelhante a do aço 8620, como pode ser observada na tabela 2 abaixo.

Tabela 2 - Limites de composição química para o aço ETN-22.

| Aço | Limites de Composição Química (%) | | | | | | |
|--------|-----------------------------------|-----------|--------|--------|-----------|-----------|-----------|
| | C | Mn | P máx. | S máx. | Si | Cr | Mo |
| ETN-22 | 0,18-0,23 | 0,70-0,90 | 0,030 | 0,040 | 0,15-0,35 | 0,40-0,60 | 0,15-0,25 |

Fonte: Cedida por Eaton Ltda. – Divisão de Transmissões.

Os tratamentos térmicos pelos quais a peça é submetida consistem, segundo o processo, em cementação, têmpera e revenimento. Para se estudar o efeito causado pela etapa de pré-aquecimento no tratamento térmico foram realizados testes de modo a avaliar os aspectos dimensionais e metalúrgicos. Com a aprovação desses aspectos, pode-se realizar a análise do processo, com a definição da temperatura mais vantajosa a ser utilizada na etapa de pré-aquecimento, e avaliação dos custos envolvidos.

3.1 Análise Dimensional

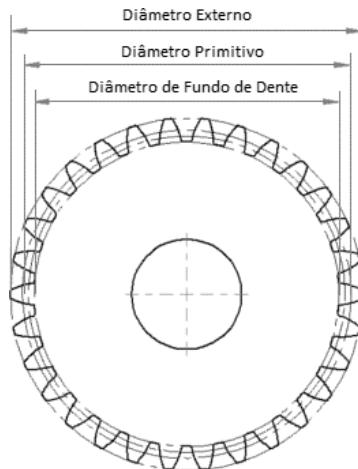
Para o estudo dimensional foram selecionadas e rastreadas dez engrenagens em material ETN-22. Cinco peças foram tratadas no forno câmara escolhido, seguindo o processo convencional e as demais cinco peças foram submetidas ao processo de pré-aquecimento, sendo a temperatura definida para este processo de 400°C, e em seguida tratadas no forno câmara, seguindo o processo convencional.

O objetivo desta etapa foi avaliar como o dimensional das peças é afetado pelo tratamento térmico realizado com e sem a etapa de pré-aquecimento. Para isso, o estudo foi realizado inicialmente nas peças usinadas (peças verdes). Após o tratamento térmico realizado (com e sem a etapa de pré-aquecimento) realizou-se o mesmo estudo.

Nesta etapa foram realizados o estudo dimensional sobre esferas e estudo de forma geométrica do passo e perfil da engrenagem.

O dimensional sobre esferas é realizado obtendo-se a distância entre as raízes primitivas de dois dentes opostos na engrenagem (diâmetro primitivo), como observado na figura 19 abaixo.

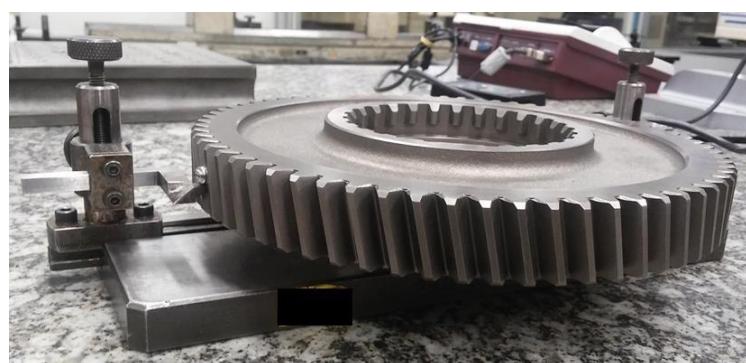
Figura 19 - Região de análise para dimensional sobre esferas.



Fonte: Cedida por Eaton Ltda. – Divisão de Transmissões.

Para isso a peça é apoiada em um dispositivo, o qual utiliza esferas padronizadas e um micrômetro. O procedimento foi realizado para as dez peças de estudo de modo a comparar tanto peças tratadas com peças a verde, quanto peças tratadas em processo convencional com as tratadas com a etapa de pré-aquecimento. O dispositivo de medição pode ser observado na figura 20 abaixo.

Figura 20 - Dispositivo de medição de dimensional sobre esferas.



Fonte: Cedida por Eaton Ltda. – Divisão de Transmissões.

No estudo de forma geométrica do passo e perfil da engrenagem foram verificados quatro dentes da engrenagem, separados por um ângulo de 90° . Foi utilizado neste processo um dispositivo para percorrer o perfil e passo do dente, semelhante ao mostrado abaixo na figura 21.

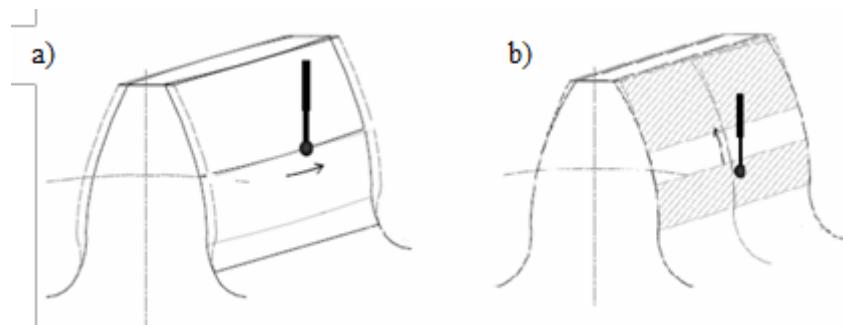
Figura 21 - Dispositivo de medição de forma geométrica



Fonte: Cedida por Eaton Ltda. – Divisão de Transmissões.

As regiões que correspondem ao passo e ao perfil da engrenagem podem ser observadas conforme o esquema da figura 22 abaixo.

Figura 22 - Regiões de análise de forma geométrica da engrenagem: a) passo b) perfil.



Fonte: Cedida por Eaton Ltda. – Divisão de Transmissões.

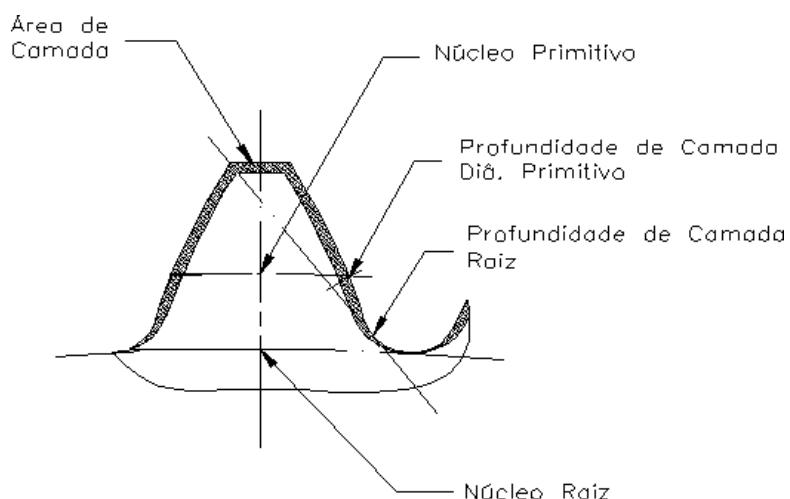
3.2 Análise Metalúrgica

A análise metalúrgica foi feita de modo a comparar os resultados obtidos com as especificações do produto. Nesta etapa foram comparadas duas engrenagens devidamente rastreadas feitas em material ETN-22, uma delas tratada no forno câmara escolhido, seguindo o processo convencional e a outra submetida ao processo de pré-aquecimento a 400°C e em seguida tratada no forno câmara, seguindo o processo convencional.

Para a realização desta etapa, após os tratamentos térmicos, a peça foi cortada na região e posição determinada, seguido do processo de embutimento, e preparação da superfície com lixamento, polimento e ataque em nital 4% para observação da microestrutura.

Seguindo as especificações em desenho, foram analisadas as regiões de superfície, núcleo, diâmetro primitivo e raiz do dente das duas engrenagens. Deste modo determinou-se a profundidade de camada cementada efetiva, no diâmetro primitivo e raiz do dente, e realizou-se análise da microestrutura na camada cementada e núcleo, além da verificação da presença de austenita retida. As regiões analisadas podem ser observadas na figura 23 abaixo.

Figura 23 - Regiões do dente da engrenagem para análise metalúrgica.



Fonte: Cedida por Eaton Ltda. – Divisão de Transmissões.

Para a obtenção do valor da profundidade de camada efetiva foi utilizado um microdurômetro. A camada é medida em milímetros e a profundidade é determinada na posição em que se obtém um valor de dureza de 513 HV (50 HRC). O equipamento utilizado para a medição da profundidade de camada pode ser visto na imagem 24 abaixo.

Figura 24 - Microdourômetro utilizado para medição da profundidade de camada.



Fonte: Cedida por Eaton Ltda. – Divisão de Transmissões.

Para a observação da microestrutura foi utilizado um microscópio óptico com aumento de 500 vezes, como observado abaixo na figura 25.

Figura 25 - Microscópio óptico utilizado para observação da microestrutura.



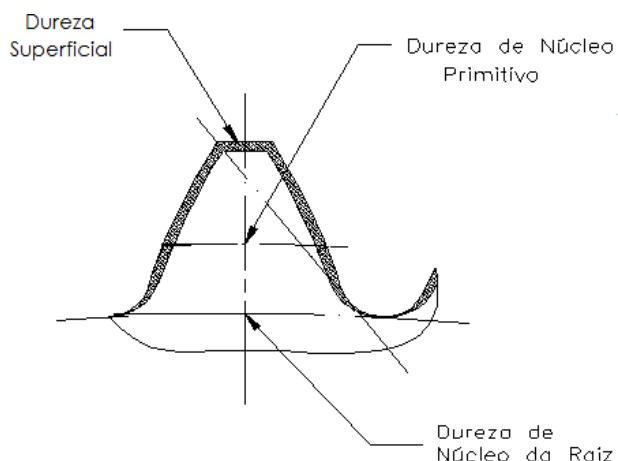
Fonte: Cedida por Eaton Ltda. – Divisão de Transmissões.

3.3 Ensaio de Dureza

O ensaio mecânico de dureza foi realizado nas mesmas amostras utilizadas para a análise metalúrgica. Dessa forma foram comparadas duas engrenagens devidamente rastreadas feitas em material ETN-22, uma delas tratada no forno câmara escolhido, seguindo o processo convencional e a outra submetida ao processo de pré-aquecimento a 400°C e em seguida tratada no forno câmara, seguindo o processo convencional.

Como regiões de análise foi realizada a medida da dureza superficial e do núcleo, considerando o diâmetro primitivo e raiz do dente da engrenagem, como observado na figura 26 abaixo.

Figura 26 - Regiões do dente da engrenagem para análise de dureza.



Fonte: Cedida por Eaton Ltda. – Divisão de Transmissões.

Foi utilizado um durômetro em escala Rockwell C, como pode ser visto na figura 27 abaixo.

Figura 27 - Durômetro utilizado para medição da dureza superficial e de núcleo.



Fonte: Cedida por Eaton Ltda. – Divisão de Transmissões.

3.4 Análise Processo Pré-aquecimento

Após a realização dos testes para avaliação dos aspectos dimensionais, metalúrgicos e mecânicos, iniciou-se a análise do processo de pré-aquecimento propriamente dito. Nesta etapa, teve-se como objetivo apenas o estudo do que denominaremos como rampa de aquecimento, ou seja, o tempo entre a entrada da carga no forno e o início de ciclo.

Foram determinadas quatro possíveis temperaturas de pré-aquecimento a serem avaliadas: 180°C, 300°C, 400°C, 450°C. Neste caso, a temperatura mínima de 180 °C foi escolhida por ser a temperatura próxima de set-up do forno escolhido para a etapa de pré-aquecimento e a temperatura máxima de 450°C para que não ocorresse oxidação das peças ao ar. Foram realizados dois testes em cada temperatura e avaliados os tempos de rampa e de pré-aquecimento.

Nesta análise foi utilizada uma carga completa de engrenagens fabricadas em material ETN-22, a qual se manteve a mesma durante todos os testes, apresentando portanto a mesma massa e quantidade de peças a serem aquecidas.

3.5 Análise Financeira

A análise financeira foi realizada utilizando as informações fornecidas pela empresa. Para o processo convencional de tratamento térmico foi utilizado um forno elétrico e para a etapa de pré-aquecimento um forno à gás e, portanto, foram considerados o consumo de gás e energia elétrica durante o tempo de ciclo avaliado. Além disso, considerou-se o consumo de gás cementante utilizado para manter a atmosfera do forno.

No caso do tratamento via processo convencional, estimou-se o consumo elétrico desde o momento de entrada da carga no forno e o consumo de gás cementante até o início da etapa de cementação. Para o tratamento térmico via etapa de pré-aquecimento seguido do processo convencional, considerou-se o consumo de gás até o atingimento da temperatura de pré-aquecimento escolhida, somado ao consumo elétrico e de gás cementante desde o momento de entrada da carga no forno até o início da etapa de cementação.

Além disso, foram avaliadas as necessidades de mão de obra e tempo de processo, bem como a disponibilidade de equipamentos ou a possibilidade de eliminação de um equipamento mediante redução de tempo de processo.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As especificações de produto utilizadas durante análise dimensional e metalúrgica, bem como os valores para análise financeira, não serão demonstrados devido ao sigilo industrial da empresa Eaton Ltda..

4.1 Análise Dimensional

Inicialmente foi realizada a análise dimensional das peças antes de serem submetidas ao tratamento térmico (peças verdes). Foi medido então o dimensional sobre esferas e todos os valores encontraram-se dentro do especificado.

Após o tratamento térmico foi realizado o mesmo procedimento descrito anteriormente. Em relação às peças verdes, a variação do dimensional sobre esferas foi em torno de 32 μm maior, resultado que se encontra dentro do especificado. Quando analisamos separadamente as peças tratadas em processo convencional, das peças que passaram pela etapa de pré-aquecimento, observa-se uma maior variação do dimensional para as peças que foram pré-aquecidas, obtendo-se um valor em torno de 35 μm contra uma variação de 29 μm para as tratadas em processo convencional. Os valores obtidos confirmam o esperado, uma

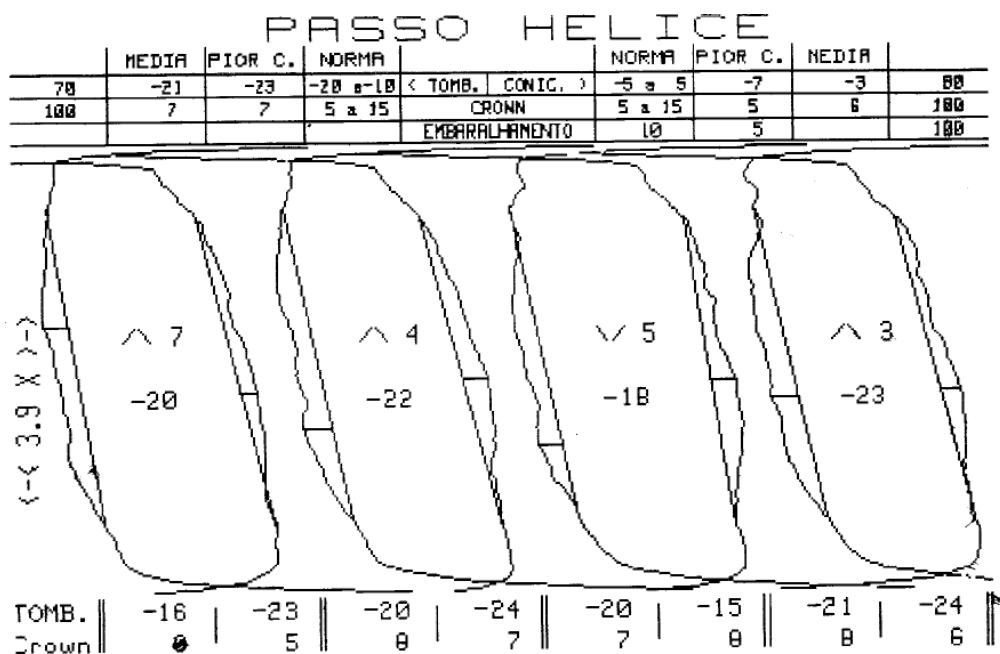
vez que a permanência das peças em altas temperaturas por tempos maiores, afeta o dimensional das mesmas. Entretanto, os valores encontram-se dentro dos limites especificados e as peças foram aprovadas do ponto de vista dimensional.

No estudo de forma geométrica foram analisados quatro dentes separados por um ângulo de 90° . Primeiramente foram medidos passo e perfil das peças a verde, e os valores obtidos estavam dentro do especificado.

Após o tratamento térmico realizado, com e sem a etapa de pré-aquecimento, as engrenagens foram novamente medidas no passo e perfil.

Em relação ao passo, observou-se que os dentes das engrenagens, em ambos os tratamentos térmicos realizados, não estavam uniformes e apresentaram os valores de tombamento e conicidade do dente fora do especificado. Os valores obtidos para o passo podem ser observados no gráfico da figura 28 abaixo.

Figura 28 - Passo dos dentes da engrenagem após o tratamento térmico



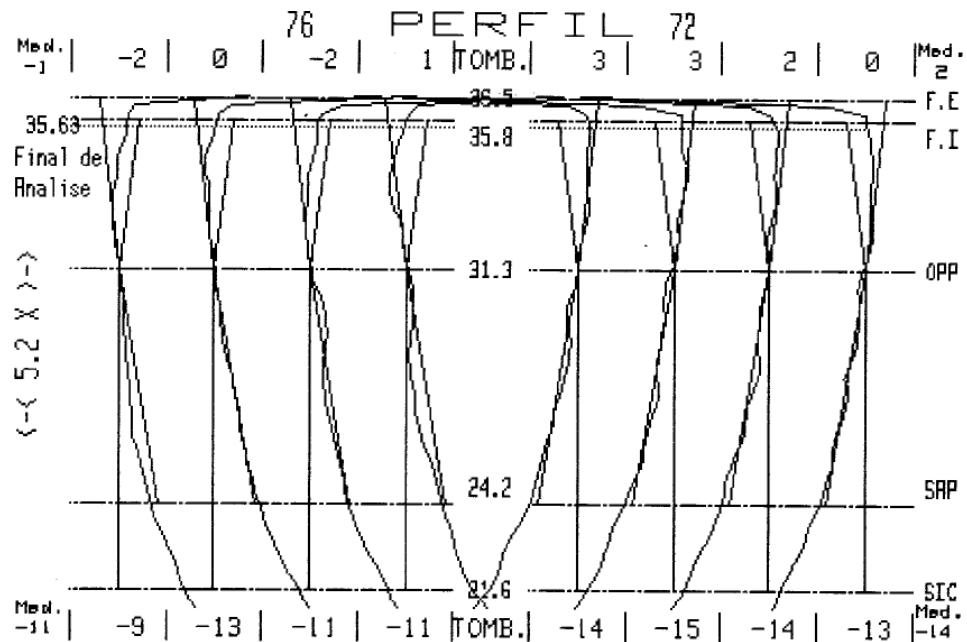
Fonte: Cedida por Eaton Ltda. – Divisão de Transmissões.

Tais fatores podem ser afetados pelos parâmetros utilizados na operação de acabamento ou pelo ciclo de tratamento térmico. Para identificar a causa raiz do problema é necessária uma análise detalhada de todos os dentes da engrenagem, bem como a análise da necessidade de utilização de um fator de correção para a conicidade. Isso implica que em caso

de viabilidade de implementação do processo de pré-aquecimento é necessária uma atenção aos aspectos de forma geométrica no passo da peça a ser tratada.

Em relação ao perfil todas as engrenagens apresentaram os valores dentro do especificado e foram aprovadas, conforme gráfico da figura 29 abaixo.

Figura 29 - Perfil dos dentes da engrenagem após o tratamento térmico.

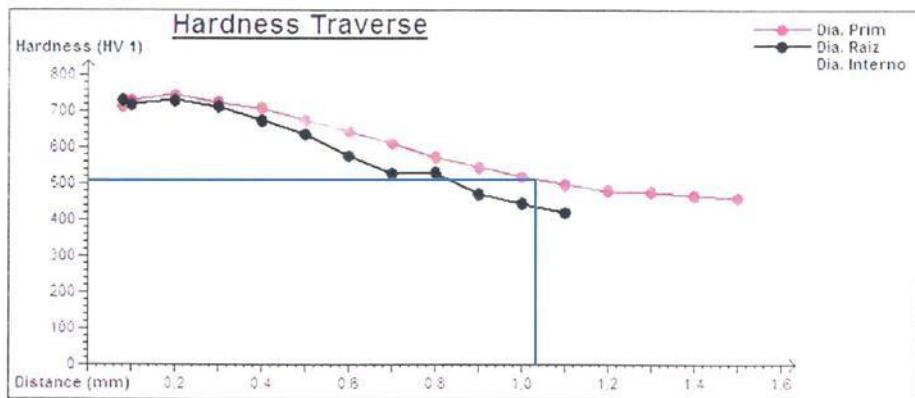


Fonte: Cedida por Eaton Ltda. – Divisão de Transmissões.

4.2 Análise Metalúrgica

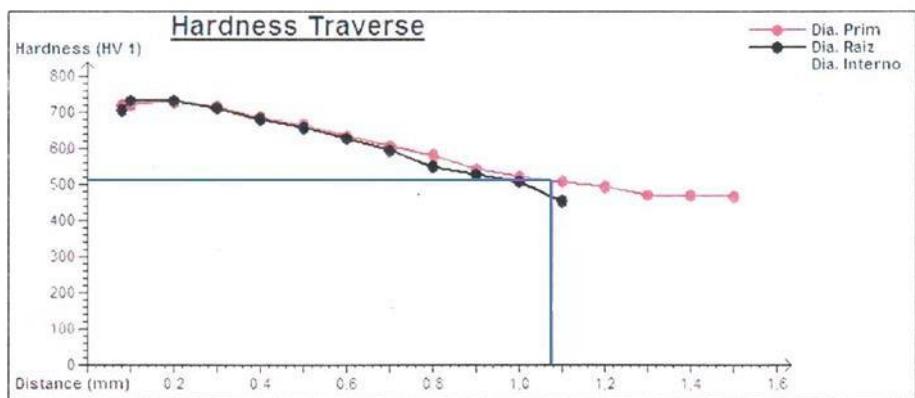
Para realização da análise metalúrgica foram comparadas amostras de duas engrenagens, uma delas tratada no forno câmara escolhido, seguindo o processo convencional e a outra submetida ao processo de pré-aquecimento a 400°C e em seguida tratada no forno câmara, seguindo o processo convencional. Para avaliação do valor de profundidade de camada cementada efetiva foi medida a posição (em milímetros) em que se obteve um valor de dureza de 513 HV (50 HRC), como observado nos gráficos das figuras 30 e 31 abaixo.

Figura 30 - Profundidade de camada cementada efetiva no dente obtida para peça tratada seguindo processo convencional (sem etapa de pré-aquecimento).



Fonte: Cedida por Eaton Ltda. – Divisão de Transmissões.

Figura 31 - Profundidade de camada cementada efetiva no dente obtida para peça tratada com a adição da etapa de pré-aquecimento anterior ao processo convencional.



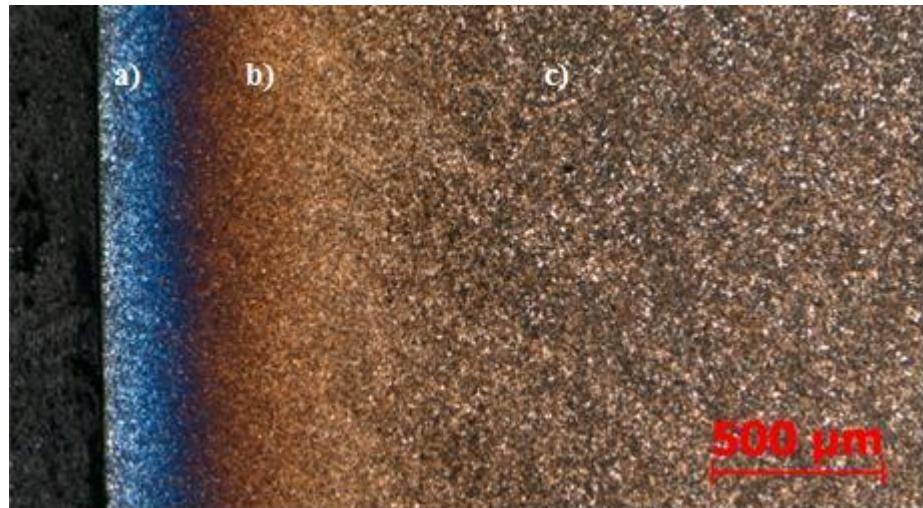
Fonte: Cedida por Eaton Ltda. – Divisão de Transmissões.

Observa-se pelos gráficos acima, que a peça tratada em processo contendo a etapa de pré-aquecimento apresentou uma camada efetiva ligeiramente maior, quando comparada à peça tratada em processo convencional, tanto no diâmetro primitivo quanto na raiz do dente da engrenagem. Tal aumento é insignificante e mostra que o parâmetro analisado não foi afetado pela adição da etapa de pré-aquecimento, estando os valores de profundidade de camada efetiva, em ambos os processos, dentro do especificado.

Com relação à microestrutura, foram analisados camada cementada e núcleo do dente. Na figura 32 abaixo, com aumento de 100 vezes, se pode ter uma visão geral das regiões do

dente que foram analisadas, a partir do ataque com nital 4%. Como exemplo, região do dente de peça tratada seguindo processo convencional.

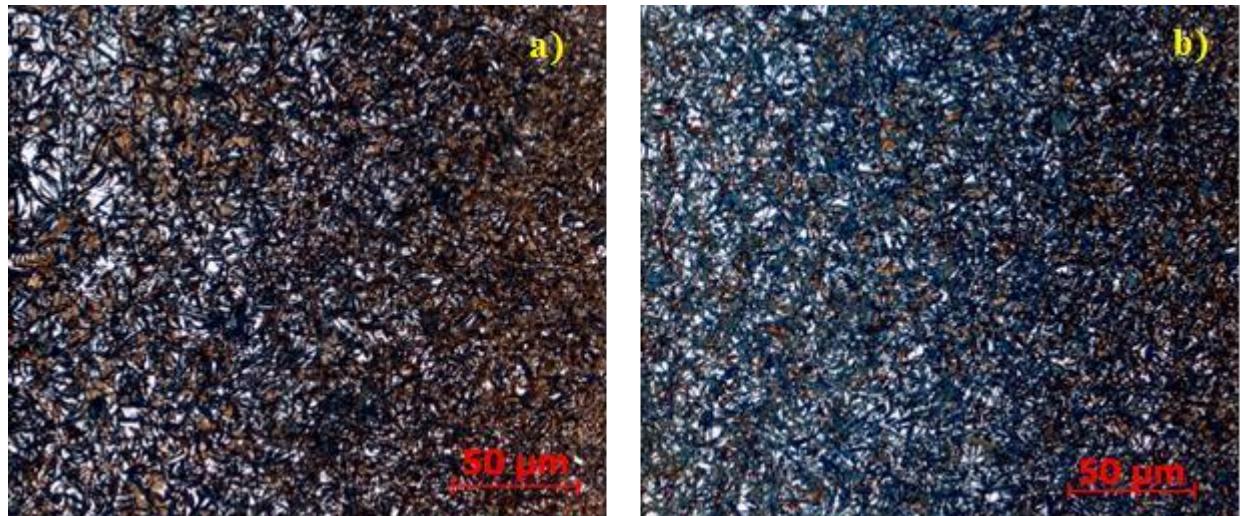
Figura 32 – Micrografia realizada em microscópio ótico das regiões do dente que foram analisadas: a) camada cementada b) região de transição c) núcleo. Aumento: 100X. Ataque: Nital 4%.



Fonte: Cedida por Eaton Ltda. – Divisão de Transmissões.

Na figura 33 abaixo, com aumento de 500 vezes, pode-se observar a região de camada cementada a partir do ataque com nital 4%. Comparando as análises realizadas para as duas amostras, pode-se observar que ambas apresentam na camada cementada a estrutura martensita, que compreendem as regiões em tons de marrom, além da fração semelhante de austenita retida, identificada pelas regiões mais claras.

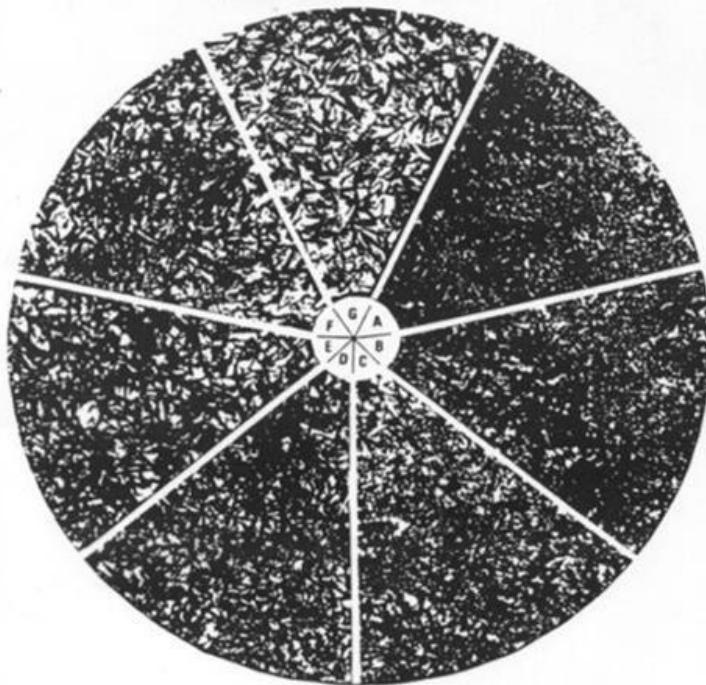
Figura 33 - Micrografia da região de camada cementada do dente a) peça tratada em processo convencional b) peça tratada com a etapa de pré-aquecimento. Aumento: 500X. Ataque: Nital 4%.



Fonte: Cedida por Eaton Ltda. – Divisão de Transmissões.

Devido aos elementos de liga presentes no aço ETN-22, com o qual as peças foram fabricadas, ocorre um deslocamento da curva TTT para a direita, facilitando a têmpera. Dessa forma a camada cementada é composta pela estrutura martensita e por uma fração de austenita retida, formada durante o processo de têmpera, a qual se decompõe parcialmente em bainita durante o tratamento de revenimento. A fração de austenita retida é medida comparando-se a micrografia com o padrão de análise utilizado pela empresa, mostrado na figura 34 abaixo.

Figura 34 - Padrão utilizado para determinação da fração de austenita retida.



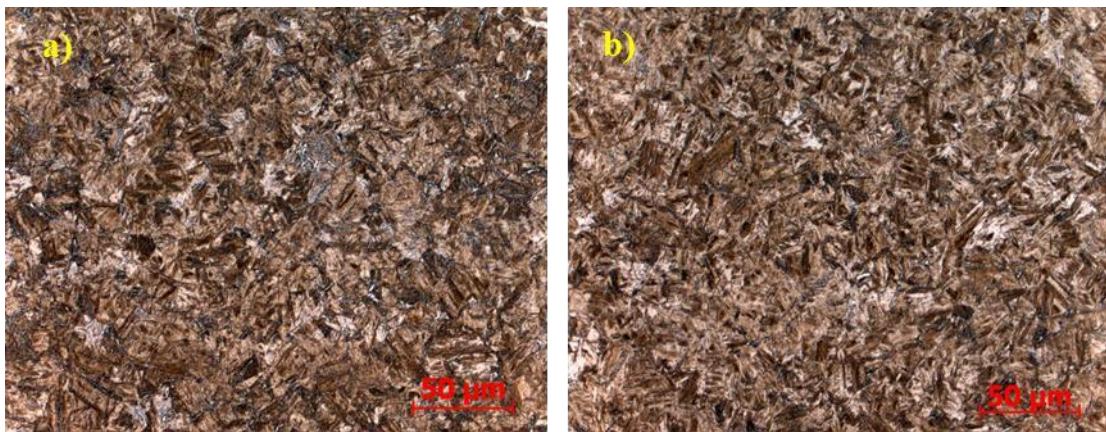
Fonte: Cedida por Eaton Ltda. – Divisão de Transmissões.

Neste padrão, observa-se frações de A a G, onde cada letra representa a porcentagem de austenita retida. Nas amostras em questão, a análise indicou a presença de austenita retida na camada, a qual foi classificada como fração C.

Para identificar as microestruturas presentes no núcleo do dente, deve-se considerar que o resfriamento se inicia logo abaixo da temperatura de austenitização, porém o núcleo apresenta uma taxa de resfriamento mais lenta, uma vez que durante o processo de têmpera são gerados gradientes de temperatura entre o núcleo e a superfície da peça tratada. O gradiente irá depender da severidade do meio, sendo neste caso, peças resfriadas em óleo.

Sendo assim, os núcleos das amostras analisadas, conforme figura 35, quando comparados, apresentam poucas diferenças entre si, sendo compostos por martensita, regiões em tons de marrom, agulhas de ferrita separadas por partículas alongadas de cementita (bainita superior) e austenita (regiões claras).

Figura 35 - Micrografia da região de núcleo do dente. a) peça tratada em processo convencional b) peça tratada com a etapa de pré-aquecimento. Aumento: 500X. Ataque: Nital 4%.



Fonte: Cedida por Eaton Ltda. – Divisão de Transmissões.

4.3 Ensaio de Dureza

O ensaio mecânico de dureza foi realizado nas mesmas amostras utilizadas para a análise metalúrgica. Foram analisadas a medida da dureza superficial da peça e a dureza de núcleo, considerando o diâmetro primitivo e raiz do dente da engrenagem, conforme figura 26.

Para a dureza superficial foi realizada a medida em três pontos diferentes da peça e obtido a média. Comparando os valores, a amostra da peça que passou pela etapa de pré-aquecimento apresentou uma dureza em torno de apenas 1% menor em relação à amostra da peça tratada em processo convencional. Ambos os valores se encontram dentro das especificações de produto.

No caso da dureza de núcleo medida no diâmetro primitivo do dente não houve variação entre os valores obtidos nas duas amostras. Para a dureza de núcleo medida na raiz do dente, houve um aumento de apenas 1% da dureza obtida na amostra da peça que passou pela etapa de pré-aquecimento. Todos os valores obtidos se encontram dentro do especificado.

Por meio desse ensaio foi possível observar a diferença de dureza de núcleo entre o diâmetro primitivo e raiz do dente da engrenagem. A dureza de núcleo, a qual é medida na região

central do dente, é normalmente mais baixa quando medida na raiz do dente quando comparada à dureza de núcleo medida no diâmetro primitivo do dente, uma vez que a região da raiz é mais interna e, portanto, menos suscetível aos efeitos de temperabilidade, embora a peça tenha elementos de liga que facilitem a têmpera. Tal característica é de fato desejável a

partir dos tratamentos termoquímicos realizados, uma vez que deseja-se obter o aumento de dureza e resistência ao desgaste da camada superficial, mantendo-se a microestrutura do núcleo mais dúctil e tenaz, para resistir aos esforços aos quais a engrenagem será solicitada.

4.4 Análise Processo Pré-aquecimento

O objetivo desta etapa foi estudar a rampa de aquecimento entre a entrada da carga no forno e o início de ciclo. Uma vez que o tempo de ciclo entre o início da cementação e o término após a realização da têmpera não foi alterado para os dois processos, estudou-se apenas o tempo desde a entrada da carga no forno até o início de ciclo, o qual será denominado como tempo de rampa.

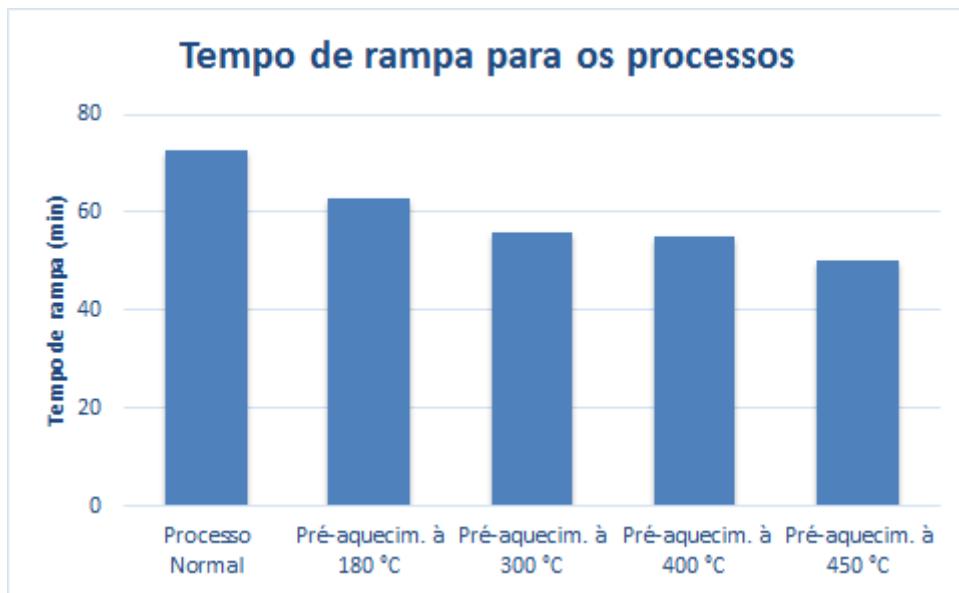
A partir dos testes feitos nas quatro temperaturas determinadas observou-se de fato, uma redução no tempo de rampa para as cargas que passaram pela etapa de pré-aquecimento em relação às tratadas no processo convencional. Os resultados dos testes realizados, em relação ao tempo de rampa do processo convencional, podem ser observados na tabela 3 e no gráfico da figura 36 abaixo.

Tabela 3 - Redução obtida nos tempos de rampa a partir do processo de pré-aquecimento.

| Tratamento | Processo Convencional | Pré à 180 °C | Pré à 300 °C | Pré à 400 °C | Pré à 450 °C |
|--------------------|-----------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Tempo de rampa (%) | 100 | 86,9 | 77,2 | 75,9 | 68,9 |

Fonte: Cedida por Eaton Ltda. – Divisão de Transmissões.

Figura 36 - Tempos de rampa obtidos para os testes realizados.



Fonte: Cedida por Eaton Ltda. – Divisão de Transmissões.

Como observado acima, a redução no tempo de rampa é mais significativa quanto maior for a temperatura da etapa de pré-aquecimento, indicando que de fato a entrada de uma carga no forno, em uma temperatura superior a ambiente, resulta em um menor tempo de espera até que o forno reestabeleça a temperatura necessária para iniciar o ciclo de tratamento térmico. Consequentemente, quanto maior a temperatura de pré-aquecimento utilizada, maior será o tempo de pré-aquecimento necessário para que a carga atinja essa temperatura, como será observado na figura 38.

4.5 Análise Financeira

A partir do consumo de energia elétrica e gás dos fornos utilizados no tratamento segundo processo convencional e no tratamento com a etapa de pré-aquecimento adicional, estimou-se o valor gasto para o tratamento térmico de uma carga da engrenagem escolhida. Os custos dos gases utilizados, bem como os tempos de pré-aquecimento e tratamento no forno câmara não serão aqui demonstrados devido ao sigilo da empresa. Os custos obtidos podem ser observados na tabela 4 abaixo.

Tabela 4 - Custos obtidos utilizando forno a gás GLP na etapa de pré-aquecimento.

| Tratamento | Processo Convencional | Pré à 180 °C | Pré à 300 °C | Pré à 400 °C | Pré à 450 °C |
|----------------------------|-----------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Custo envolvido (%) | 100 | 131,2 | 263,4 | 415,6 | 393,9 |

Fonte: Cedida por Eaton Ltda. – Divisão de Transmissões.

Analizando os custos apresentados na tabela acima, observa-se que o processo utilizando a etapa de pré-aquecimento possui um custo maior em relação ao processo convencional de tratamento térmico. De fato, quanto maior a temperatura de pré-aquecimento utilizada, maior será o consumo de gás para o pré-aquecimento da peça, resultando em um custo em torno de três vezes maior para a temperatura de 450 °C. No caso, a temperatura de 180 °C mostra-se como a mais vantajosa dentre as quatro, embora ainda apresente um custo 31% maior em relação ao processo convencional.

O forno utilizado para a etapa de pré-aquecimento utiliza o gás GLP para aquecimento. Diante dos resultados e a modo de comparação, estimou-se os custos envolvidos caso a etapa de pré-aquecimento fosse feita em um forno que utilizasse gás natural. Os resultados obtidos podem ser vistos na tabela 5 abaixo.

Tabela 5 - Custos obtidos utilizando forno a gás natural na etapa de pré-aquecimento.

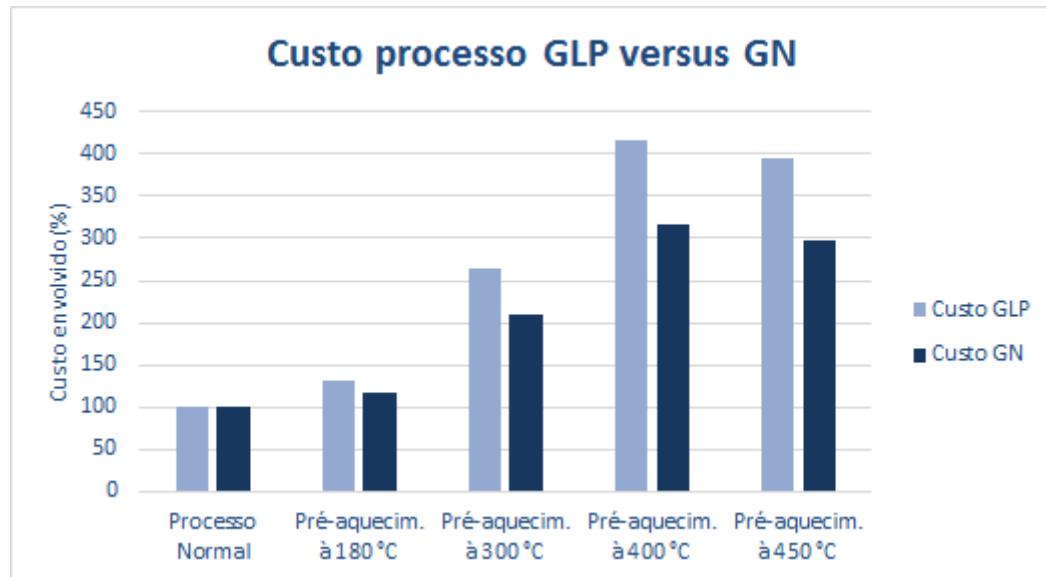
| Tratamento | Processo Convencional | Pré à 180 °C | Pré à 300 °C | Pré à 400 °C | Pré à 450 °C |
|----------------------------|-----------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Custo envolvido (%) | 100 | 118,2 | 208,7 | 315,7 | 298,4 |

Fonte: Cedida por Eaton Ltda. – Divisão de Transmissões.

No caso, a temperatura de 180 °C mantém-se como a mais vantajosa dentre as quatro, embora ainda apresente um custo 18% maior em relação ao processo convencional. Observa-se a partir dos resultados acima e da comparação dos custos envolvidos utilizando os dois tipos de gás na etapa de pré-aquecimento, que, embora o processo de pré-aquecimento utilizando o gás natural seja mais barato em relação ao processo utilizando gás GLP, o

processo com a etapa de pré-aquecimento mantém-se mais caro em relação ao processo convencional de tratamento térmico. A figura 37 abaixo mostra o comparativo de custo entre os dois gases considerados.

Figura 37 - Custo de processo para os dois tipos de gases considerados.

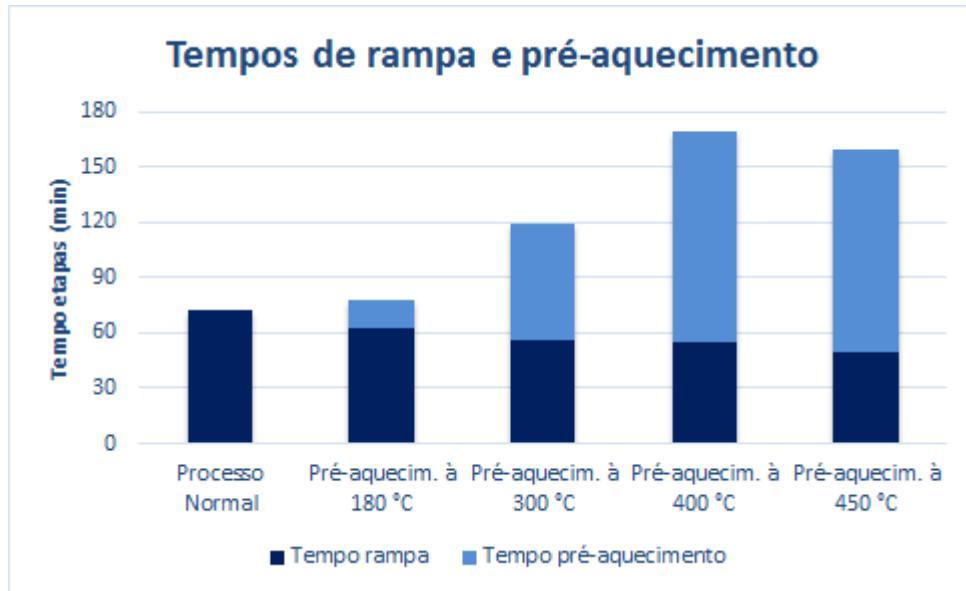


Fonte: Cedida por Eaton Ltda. – Divisão de Transmissões.

Em relação à mão de obra, entende-se que não há necessidade de um investimento nesse aspecto, uma vez que o procedimento de pré-aquecimento seria semelhante ao processo de revenimento, por exemplo, o qual também é realizado em um forno separado e já inclui movimentação de cargas de um forno para o outro.

Quanto ao tempo de processo, foi analisado o aumento do tempo de processo devido à inclusão da etapa de pré-aquecimento, bem como o tempo de movimentação da carga de um forno a outro. O acumulado do tempo de pré-aquecimento e de rampa para cada teste realizado podem ser observados no gráfico da figura 38 abaixo.

Figura 38 - Tempo acumulado de pré-aquecimento e rampa para os testes realizados.



Fonte: Cedida por Eaton Ltda. – Divisão de Transmissões.

Como visto acima, os tempos de pré-aquecimento necessários para as três maiores temperaturas (300 °C, 400 °C e 450 °C) ultrapassaram em mais de 1 hora e foram considerados excessivos, podendo vir a atrasar a entrada da carga no forno de tratamento térmico deixando esse forno câmara com um tempo ocioso. Já para a temperatura de 180 °C, o tempo obtido foi em torno de 15 minutos, o que não traz grandes prejuízos ao tempo de processo. O tempo de movimentação da carga entre um forno e outro foi medido e não ultrapassou 3 minutos, fato que não prejudica o tempo de processo, mas resulta em uma perda de calor da carga devido à essa movimentação. Ressalta-se aqui que o percurso analisado foi o maior possível e o tempo de movimentação pode ser menor, caso se escolha um forno de tratamento mais próximo ao forno da etapa de pré-aquecimento.

Em relação à disponibilidade de equipamentos, a ressalva é que deve ocorrer um bom planejamento de quais cargas serão tratadas, bem como os seus tempos de ciclo, uma vez que o forno câmara deve estar livre para que a carga pré-aquecida possa ser tratada logo após o atingimento da temperatura de pré-aquecimento, para evitar grandes perdas de temperatura durante a sua movimentação.

Seguindo por essa linha, avaliou-se a capacidade dos fornos câmaras para verificar se seria possível desligar algum equipamento com a implementação da etapa de pré-aquecimento. O estudo de capacidade inclui horas disponíveis de trabalho do equipamento,

horas utilizadas para o tratamento térmico de cada peça, projeção de demanda e tempo padrão de cada peça, bem como as horas economizadas a partir da redução do tempo de rampa com a etapa de pré-aquecimento. O indicador de capacidade ao qual daremos o nome de CM é dado por:

(Equação 3)

Considerando o tratamento térmico utilizando o processo normal, o qual não apresenta horas economizadas, observa-se um CM atual de 90%, o que indica que não há necessidade de utilização de um equipamento adicional para suprir a demanda de peças que devem passar pela operação de tratamento térmico. A partir do tratamento com a etapa de pré-aquecimento observa-se uma economia em horas de tratamento e o indicador CM passa a ser de 70%, ou seja, a partir desse processo é possível obter uma redução de até 20% no uso de um equipamento, o que implica em redução de custos com energia elétrica e gases.

Sendo assim, entende-se que com a demanda atual o processo utilizando a etapa de pré-aquecimento não é vantajoso, uma vez que não é necessário a utilização de um equipamento adicional e a redução no tempo de rampa só aumentaria o tempo de equipamento ocioso, além do maior custo como demonstrado nas tabelas 5 e 6.

Entretanto o processo pode se tornar vantajoso caso a demanda por tratamento térmico de engrenagens aumente e o CM passe a ser de 100% a 120%, o que indica a necessidade de utilização de um equipamento adicional para suprir a demanda por tratamento térmico. Assim, com a utilização da etapa de pré-aquecimento há uma redução em 20% do CM e um equipamento pode ser desligado ou deixar de ser utilizado, representando uma redução de energia elétrica e gás significativa considerando que os fornos permanecem ligados diariamente.

Seguindo por essa linha, a partir de um CM maior que 120%, o processo torna a não ser vantajoso pelos mesmos motivos explicados acima.

A partir da tabela 6 abaixo é possível observar o comparativo entre os resultados analisados para os tratamentos térmicos seguindo processo convencional e com a etapa de pré-aquecimento adicional ao processo.

Tabela 6 - Comparativo entre os resultados dos dois processos estudados.

| Processo / Análise | Tratamento Convencional | Tratamento com adição da etapa de pré-aquecimento |
|----------------------------------|---|---|
| Dimensional | - | Necessita correção para conicidade |
| Dureza | - | Não alterada |
| Microestrutura Superfície | Martensita / Austenita C | Não alterada |
| Microestrutura Núcleo | Martensita / Austenita / Bainita Superior | Não alterada |
| Tempo de rampa | - | Menor |
| Custo | - | Maior |
| CM | 90% | 70% |

Fonte: Própria.

5. CONCLUSÃO

Após a realização do presente trabalho pode-se avaliar os efeitos gerados pela etapa adicional de pré-aquecimento no tratamento térmico de engrenagens. Em relação aos aspectos microestruturais e de dureza das peças avaliadas não foram encontradas diferenças significantes. No que se refere ao aspecto dimensional da peça, a pré-aquecimento causou uma variação na forma geométrica de passo do dente da engrenagem, fator que deve ser corrigido individualmente para cada tipo de peça, caso este processo seja implementado.

Frente ao objetivo principal do projeto em reduzir o tempo de rampa de aquecimento, o processo de pré-aquecimento mostrou-se satisfatório uma vez que reduziu o tempo de rampa conforme maior era a temperatura de pré-aquecimento utilizada, respeitando o limite de temperatura estabelecido.

Após a análise dos custos envolvidos, que basicamente resumiu-se ao consumo de energia elétrica e gás dos fornos utilizados no tratamento térmico e na etapa de pré-aquecimento, conclui-se que o processo de pré-aquecimento proposto não é financeiramente vantajoso tendo em vista a atual demanda da área e seu maior custo em relação ao processo

convencional, mas pode tornar-se vantajoso caso a demanda por tratamento térmico de engrenagens aumente ocorra a necessidade de um equipamento adicional.

REFERÊNCIAS

ASM Handbook, Volume 4. **Heat Treating**. ASM International, 1991.

ASM Handbook, Volume 14. **Forming and Forging**. ASM International, 1991.

BHADESHIA, H. K. D., HONEYCOMBE, R. W. K. **Steels, Microstructure and Properties**. Elsevier, 3^a Ed., 2006.

BRESCIANI, F. et al. **Conformação Plástica dos Metais**. Ed. Unicamp, 1991.

BROOKS, C. R., **Principles of the heat treatment of plain carbon and low alloy steels**. ASM International, 1996.

CALLISTER, W. D. JR.. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. 8^a Ed., LTC Editora, 2013.

CHIAVERINI, V. **Aços e ferros fundidos**. ABM, S. Paulo, 7^a Ed., 2005.

CHIAVERINI, V. **Tratamentos Térmicos das Ligas Metálicas**. ABM, São Paulo, 2^a Ed., 2008.

COELHO, R. T., MACHADO, A. R., ABRÃO, A. M. S. **Teoria da Usinagem dos materiais**. Editora Blücher, 1^a Ed., 2009.

DIAS, J. **Transmissões Mecânicas**. Apostila para curso de especialização em engenharia automotiva, UTFPR, 2011.

FERRARESI, D. **Fundamentos da Usinagem dos Metais**. Editora Blücher, 1^a Ed., 1970.

KRAUSS, G. **Principles of heat Treatment of Steel**. Ohio, a. Society for Metais, 1980.

LEITÃO, C. J. **Microestruturas e Propriedades de aços Cementados e Carbonitretados – Curso Introdução ao Tratamento Térmico e Metalografia**, Grupo Aprenda, 2017.

LYNWANDER, P. **Gear drive systems: design and application**. 1^a Ed., 1983.

MATTOS, W. M. Parâmetros de operação para tratamento de têmpera - Fornos

Câmaras. Anexo I. Valinhos: EATON LTDA. - Engenharia de Tratamento Térmico, 2013.

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

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

REED-HILL E. R. Princípios de Metalurgia Física. Rio de Janeiro, Guanabara Dois S.A., 2^a Ed., 1982.

RODRIGUES, F. H. Avaliação de processos de tratamento térmico na indústria automotiva. VI Conferência Brasileira sobre Temas de Tratamento Térmico, Atibaia, 2012.

SANTOS A. A. Jr. Elementos de máquinas & sistemas mecânicos – Engrenagens Helicoidais. Apostila para curso fabricação mecânica, Campinas, 2002.

SHIGLEY, J. E. MISCHKE, C. R., BUDYNAS, R. G. Projeto de Engenharia Mecânica. 7^a Ed., Bookman, 2005.

SILVA, A. L. C.; MEI, P. R. Aços e Ligas Especiais. 3^a Ed., São Paulo: Ed. Edgard Blucher. 2010.

SMITH, J. W. Types of Heat Treating Furnaces. ASM Handbook: Heat Treating, vol.4 1991.

UNTERWEISER, P. M., BOYER H. E. Heat treater's guide – Standard practices and procedures for steel. ASM, 1982.

Disponível em <<http://www.eaton.com.br/EatonBR/index.htm>>