

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia

Departamento de Metalurgia

AVALIAÇÃO DO TRATAMENTO TÉRMICO DE COMPONENTE DE JUNTA
HOMOCINÉTICA

Ramon Rosa Miranda

Trabalho de Diplomação

Orientador: Afonso Reguly

Porto Alegre
2011

Dedico esta dissertação aos meus pais, Manoel e Lélia, e a
minha amada esposa, Tatiane.

AGRADECIMENTOS

Ao meu Deus fiel, ao Professor Afonso Reguly, a Universidade Federal do Rio Grande do Sul, a todos os colaboradores da empresa GKN Driveline que contribuíram para me ajudar a produzir este trabalho e aos proprietários da empresa Indutherm por permitirem utilizar seus equipamentos.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	VI
LISTA DE TABELAS	VIII
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS	IX
RESUMO	X
ABSTRACT	XI
1.0 INTRODUÇÃO	1
1.1 GKN	1
1.2 Problema	1
1.3 Objetivos	2
1.4 Proposta	2
1.5 Testes e Ensaios	2
2.0 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1 Semieixo Homocinético	3
2.1.1 Tulipa	4
2.1.2 Material	4
2.2 Tratamento Térmico Superficial	5
2.3 Revenimento	8
3.0 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	19
3.1 Composição Química	19
3.2 Têmpera por Indução	19
3.3 Revenimento Convencional	20
3.4 Revenimento por Indução	20
3.5 Testes Metalúrgicos	21
3.6 Ensaio Mecânicos	21
4.0 RESULTADOS E DISCUSSÃO	23
4.1 Composição Química	23
4.2 Testes Metalúrgicos	23
4.2.1 Têmpera por Indução	23

4.2.2	Revenimento Convencional	26
4.2.3	Revenimento por Indução	28
4.3	Ensaio Mecânico	31
4.3.1	Amostras Temperadas	31
4.3.2	Amostras Revenidas Convencionalmente	32
4.3.3	Amostras Revenidas por Indução	33
5.0	CONCLUSÕES	35
6.0	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	37
6.1	Novos Parâmetros	37
6.2	Material	37
6.3	Dimensional	37
7.0	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	38

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1	Fratura na região da haste da tulipa utilizada no projeto. Fonte: Imagem de documento interno da GKN Driveline.....	1
Figura 2.1	Posição de um semieixo homocinético montado no veículo. Fonte: GASCEM AUTOMOTIVO.....	3
Figura 2.2	À direita, um exemplo de tulipa, e à esquerda, um exemplo de tripeça. Fonte: AUTO PEÇAS VRS.....	4
Figura 2.3	Exemplos de bobinas utilizadas em processos de alta frequência e seus, respectivos, modelos de aquecimento, os quais estão hachurados. Fonte: imagem editada de (CHIAVERINI 2008).....	7
Figura 2.4	Efeitos da temperatura de revenimento sobre as propriedades mecânicas do aço 4340. Fonte: (COLPAERT 2008).....	9
Figura 2.5	Efeito do tempo sobre a dureza de um aço com teor de 0,82 % C em quatro temperaturas de revenimento. Fonte: (SILVA 2008).....	10
Figura 2.6	Microestruturas martensíticas em um aço 1052; (a) não revenida, dureza 62,1 HRc, aumento 200x; (b) revenida a 206 °C, dureza 56,2 HRc, aumento 200x. Fonte: (HAIMBAUGH 2001).	11
Figura 2.7	Dureza em função do tempo e temperatura de revenimento, para um aço 1050. Fonte: imagem editada de (HAIMBAUGH 2001).....	14
Figura 2.8	Resistência à Tração em função da temperatura de revenimento para um aço Revenido por Indução (RI) e outro Revenido em Banho de Sal (RBS). Fonte: imagem editada de (AHN 2005).	15
Figura 2.9	As micrografias de microscopia eletrônica de transmissão mostram a evolução da morfologia dos carbonetos nas seguintes circunstâncias: (a) Revenimento por Indução (RI) a 400 °C, (b) RI a 500 °C, (c) RI a 600 °C, (d) RI a 700 °C, (e) Revenimento em Banho de Sal (RBS) a 400 °C, (f) RBS a 500 °C, (g) RBS a 600 °C e (h) RBS a 700 °C. Fonte: imagem editada de (AHN 2005).....	16
Figura 2.10	Processos relacionados aos parâmetros de processo, frequência e potência. Fonte: imagem editada de (DAVIS 2002).....	17
Figura 3.1	Perfil de têmpera da haste da tulipa utilizada. Fonte: Desenho de Projeto, editado, da GKN Driveline.....	19
Figura 4.1	Perfil de têmpera da região da haste das tulipas temperadas por indução e as especificações máximas (—) e mínimas (—).	24

Figura 4.2	Perfil de dureza no ponto de número 3, ou seja, na região do “spline” da tulipa temperada por indução.	24
Figura 4.3	Micrografias das amostras temperadas por indução: (a) Amostra 1, aumento 200x; (b) Amostra 1, aumento 400x; (c) Amostra 2, aumento 200x; (d) Amostra 2, aumento 400x; (e) Amostra 3, aumento 200x; (f) Amostra 3, aumento 400x	25 e 26
Figura 4.4	Perfil da profundidade de camada temperada da haste da tulipa revenida convencionalmente e as especificações máximas (-) e mínimas (—).	27
Figura 4.5	Perfil de dureza no ponto de número 3, ou seja, na região do “spline” da tulipa revenida convencionalmente.	27
Figura 4.6	Micrografias da amostra revenida convencionalmente: (a) Amostra 4, aumento 200x; (b) Amostra 4, aumento 400x.....	28
Figura 4.7	Perfil da profundidade de camada temperada da haste da tulipa revenida por indução e as especificações máximas (-) e mínimas (—).	29
Figura 4.8	Perfil de dureza no ponto de número 3, ou seja, na região do “spline” da tulipa revenida por indução.	29
Figura 4.9	Micrografias das amostras revenidas por indução: (a) Amostra 5, aumento 200x; (b) Amostra 5, aumento 400x; (c) Amostra 6, aumento 200x; (d) Amostra 6, aumento 400x; (e) Amostra 7, aumento 200x; (f) Amostra 7, aumento 400x.	30 e 31

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Composição química dos aços XC 45, Ck 45 e 1045.	4
Tabela 3.1	Especificações de projeto, dureza e profundidade de camada, para a haste da tulipa utilizada.	19
Tabela 3.2	Parâmetros de processo utilizado na etapa de têmpera por indução da haste da tulipa.	20
Tabela 3.3	Parâmetros de processo utilizado na etapa de revenimento convencional da tulipa.	20
Tabela 3.4	Parâmetros de processo utilizado na etapa de revenimento por indução da tulipa.	21
Tabela 3.5	Especificações de projeto para os ensaios mecânicos de vida em fadiga por torção e de torção.	22
Tabela 3.6	Parâmetros de processo utilizados nos equipamentos de ensaio de vida em fadiga por torção, M0824 e M1330.	22
Tabela 3.7	Parâmetro de processo utilizado no equipamento M1072.	22
Tabela 4.1	Composição química das amostras de tulipas produzidas com aço AFNOR XC 45.	23
Tabela 4.2	Resultados dos ensaios mecânicos realizados em juntas homocinética montadas com tulipas temperadas por indução. *Teste interrompido.	32
Tabela 4.3	Resultados dos ensaios mecânicos realizados em junta homocinética montada com tulipa revenida convencionalmente. *Teste interrompido.	32
Tabela 4.4	Resultados dos ensaios mecânicos realizados em juntas homocinética montadas com tulipas revenidas por indução. *Teste interrompido.	33

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

% Al	porcentagem em peso do elemento alumínio;
% C	porcentagem em peso do elemento carbono;
% Cu	porcentagem em peso do elemento cobre;
% Mn	porcentagem em peso do elemento manganês;
% P	porcentagem em peso do elemento fósforo;
% S	porcentagem em peso do elemento enxofre;
% Si	porcentagem em peso do elemento silício;
Ac ₁	temperatura na qual a austenita começa a se formar durante o aquecimento;
AFNOR	ASSOCIATION FRANÇAISE DE NORMALISATION;
DIN	Deutsches Institut für Normung;
HRC	dureza Rockwell C;
HV	dureza Vickers;
RBS	revenimento em banho de sal;
RI	revenimento por indução;
SAE	Society of Automotive Engineers.

RESUMO

Este trabalho tem por objetivo analisar o problema de fratura de uma tulipa, um dos componentes de uma junta homocinética, da empresa multinacional GKN DRIVELINE. Foram utilizadas amostras dessas tulipas para realizar análise de composição química para comprovar que, realmente, trata-se do aço AFNOR XC 45, além de verificar as condições metalúrgicas após o processo final de tratamento térmico de têmpera por indução. Na tentativa de solucionar o problema, propôs-se a aplicação de um processo de revenimento após o processo de têmpera por indução. E, então, a partir dessa proposta, utilizaram-se os dois métodos de revenimento, convencional e por indução, possíveis de serem realizados na empresa. Após realizar os procedimentos, de revenimento convencional entre 180 e 185 °C durante, aproximadamente, 90 minutos e de revenimento por indução com aquecimento de 8 segundos, potência entre 19 e 21 kW e frequência entre 8 e 10 kHz, foram realizados testes de dureza, análises metalográficas e ensaios mecânicos em amostras que passaram por um desses procedimentos para, então, comparar os resultados com os resultados das amostras que foram apenas temperadas por indução. Com os dados em mãos, analisaram-se os resultados para determinar se o procedimento de revenimento foi, realmente, efetivo e, em caso positivo, qual o melhor para ser utilizado em escala produtiva.

ABSTRACT

This work aims to analyze the problem of fracture of a tulip, a component of a sids shaft, the multinational company GKN DRIVELINE.

Samples of these tulips were to perform chemical analysis to prove that indeed it is AFNOR XC 45 steel and metallurgical conditions to verify the final process after heat treatment by induction hardening.

In an attempt to solve the problem, we proposed the application of a tempering process after the process of induction hardening. And then from that proposal, we used the two methods of tempering, conventional and induction, can be performed in the company.

After performing the procedures of conventional tempering between 180 and 185 °C for approximately 90 minutes and tempering by induction heating of 8 seconds, power from 19 to 21 kW and frequency between 8 and 10 kHz, were performed, therefore, hardness tests, metallographic analysis and mechanical tests on samples that have undergone such a procedure to then compare the results with those of samples that were only tempered by induction.

With data in hand, the results were analyzed to determine if the tempering procedure was really effective and, if so, what is the best to be used in production scale.

1.0 INTRODUÇÃO

1.1 GKN

Este trabalho foi realizado em conjunto com a empresa GKN DRIVELINE, na unidade localizada em Porto Alegre, Rio Grande do Sul.

Esta unidade é responsável por produzir semieixos homocinéticos, os quais têm a função de transmitir, através da caixa de câmbio do veículo, a potência do motor para as rodas, fazendo com que o veículo movimente-se.

1.2 Problema

O problema a ser analisado neste trabalho envolve um novo projeto de junta homocinética, um dos elementos que formam o semieixo homocinético, da empresa.

Problema, esse, que se localiza na tulipa, um dos componentes que formam a junta homocinética. Este componente sofre fratura prematura na região da haste, como pode ser visto na Figura 1.1, durante os ensaios mecânicos a que é submetido.



Figura 1.1 Fratura na região da haste da tulipa utilizada no projeto. Fonte: Imagem de documento interno da GKN Driveline.

Esta tulipa é produzida na própria empresa com o aço AFNOR XC 45, a qual é submetida, como processo final, à têmpera por indução, processo realizado também na empresa.

Por questões de sigilo industrial, não será divulgado nenhum dado que possa identificar o componente ou o projeto em questão.

1.3 Objetivo

O objetivo deste trabalho será analisar e propor uma medida que possa solucionar o problema deste novo projeto de junta homocinética.

Por motivos de produção, alterações dimensionais estão fora de cogitação. Portanto, será feita uma análise do tratamento térmico realizado neste componente.

1.4 Proposta

A proposta deste trabalho para solucionar o problema será realizar um processo de revenimento após a têmpera por indução. Com as possibilidades existentes na empresa para realizar o processo de revenimento, dois métodos serão testados: o convencional e o por indução.

1.5 Testes e Ensaios

Para realizar testes de dureza, medição de camada tratada, análise metalográfica e de perfil de têmpera serão preparadas amostras de tulipas:

- Apenas temperadas;
- Temperadas e revenidas convencionalmente;
- Temperadas e revenidas por indução.

Enquanto que serão utilizados semieixos homocinéticos, montados com os três tipos de tulipas citadas acima, para realizar os ensaios mecânicos de torção e de vida em fadiga por torção.

2.0 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Semieixo Homocinético

Um semieixo homocinético transfere a potência do motor transversalmente a partir da caixa de câmbio para as rodas em aplicações de tração dianteira, traseira e nas quatro rodas (GKN Driveline 2011 a).

Este sistema possui três elementos principais: junta homocinética interna, eixo interconector e junta homocinética externa (GKN Driveline 2011 a).

A junta homocinética interna, na maioria das aplicações, é uma junta deslizante que permite a variação do comprimento efetivo do semieixo conforme o movimento da suspensão (GKN Driveline 2011 a). Essa junta é montada no lado da caixa/motor (GKN Driveline 2011 b), como pode ser visto na Figura 2.1.

Já a junta homocinética externa é montada no lado da roda (GKN Driveline 2011 c), como também pode ser visto na Figura 2.1. Ela tem a função de transferir torque efetivamente através de ângulos que, em aplicações de tração dianteira, podem atingir até 52° (GKN Driveline 2011 a).

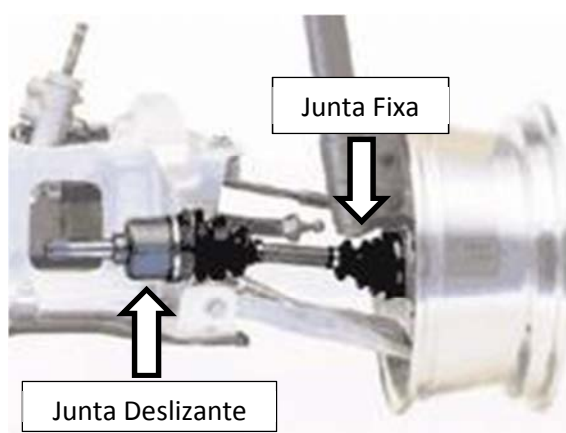


Figura 2.1 Posição de um semieixo homocinético montado no veículo. Fonte: GASCEM AUTOMOTIVO.

2.1.1 Tulipa

A Figura 2.2 mostra a imagem de uma tulipa e uma tripeça, as quais compõem uma junta deslizante de um semieixo homocinético. A tripeça é montada no interior do sino da tulipa.

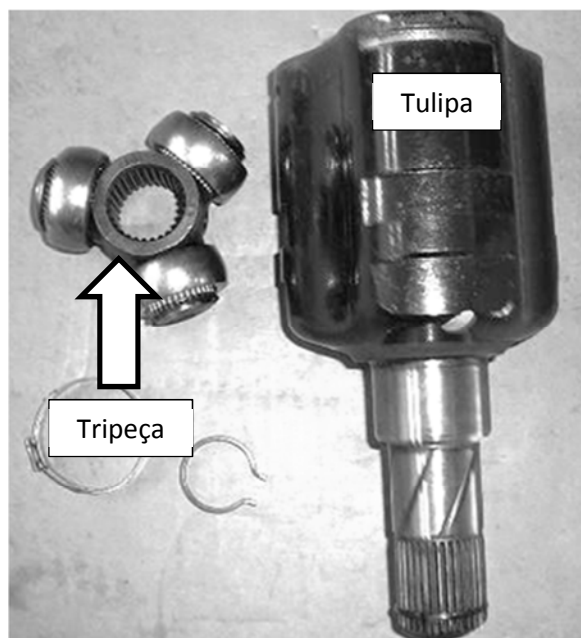


Figura 2.2 À direita, um exemplo de tulipa, e à esquerda, um exemplo de tripeça. Fonte: AUTO PEÇAS VRS.

Dependendo do conjunto tulipa/tripeça, a junta deslizante pode trabalhar com articulação máxima de 26° e deslocamento máximo de 50 mm (GKN Driveline b). É este deslocamento que permite a variação do comprimento efetivo do semieixo conforme o movimento da suspensão (GKN Driveline 2011 a).

2.1.2 Material

O material utilizado na produção da tulipa deste projeto é o aço AFNOR XC 45. O qual é equivalente aos aços DIN Ck 45 e SAE 1045 (TOTTEN 2006). As composições químicas desses aços são mostradas na Tabela 2.1 (METALS Vol. 1).

Tabela 2.1 Composição química dos aços XC 45, Ck 45 e 1045.

Aço	% C	% Si	% Mn	% P	% S
AFNOR XC 45	0,42 – 0,48	0,15 – 0,35	0,50 – 0,80	0,035	0,035
DIN Ck 45	0,42 – 0,50	0,15 – 0,35	0,50 – 0,80	0,035	0,035
SAE 1045	0,42 – 0,50		0,60 – 0,90	0,040 MÁX.	0,050 MÁX.

É considerado um aço de médio carbono com: excelente forjabilidade, boa usinabilidade e rápida resposta ao tratamento térmico, podendo ser tratado em forno ou por indução (CHANDLER 1995).

2.2 Tratamento Térmico Superficial

Tratamento térmico superficial ou, também, têmpera superficial é um processo de têmpera convencional, mas aplicado apenas à superfície (SILVA 2008). A energia térmica aplicada neste tipo de processo é aplicada em certa área da peça com intenção de alterar as propriedades (DAVIS 2002) do aço apenas nesta área.

Esse processo é, frequentemente, mais conveniente que o processo de têmpera total, pois em muitas aplicações necessita-se apenas de uma superfície dura com alta resistência ao desgaste e à abrasão (CHIAVERINI 2008), com o núcleo mantendo-se dúctil para acomodar os impactos que possam ser recebidos (SILVA 2008).

Além de alterar a resistência ao desgaste e à abrasão, a têmpera superficial também altera a resistência à fadiga, à flexão e à torção (DAVIS 2002). É o estado de tensões compressivas gerado na camada endurecida que dificulta a propagação de defeitos por fadiga (COLPAERT 2008).

Esse processo também permite diminuir o risco de empenamento e o surgimento de fissuras originadas no resfriamento, possibilita, também, a utilização de aços carbono, os quais são mais econômicos, ao invés de aços ligas (CHIAVERINI 2008).

A produção de camadas mais profundas do que o necessário podem provocar empenamento, fissuras de têmpera, tensões residuais excessivamente altas ou tensões residuais compressivas de pequeno valor, o que pode diminuir a melhora na resistência à fadiga (CHIAVERINI 2008).

Os tratamentos térmicos superficiais mais usuais são (CHIAVERINI 2008):

- têmpera por chama;
- têmpera por indução;
- têmpera por laser;
- têmpera por feixe eletrônico;

- têmpera por implantação iônica.

O tratamento térmico por indução é um dos processos mais efetivos para diversas aplicações, como: têmpera total, têmpera superficial, revenido, alívio de tensões, normalização, recozimento, entre outros (FERREIRA 2004). Este processo tem sido amplamente utilizado para fabricação de componentes automotivos, de engenharia entre outros (AHN 2005).

Na têmpera por indução, o aquecimento é provocado por indução eletromagnética originada em bobinas de trabalho (SILVA 2008), também conhecidas como indutores, as quais são produzidas com tubos de cobre comercial (CHIAVERINI 2008). Uma corrente alternada fluindo através de um indutor gera um campo magnético altamente concentrado, o qual induzirá um potencial elétrico na peça a ser aquecida (CHIAVERINI 2008). Correntes parasitas são geradas (SILVA 2008) quando a peça é exposta a esse campo magnético, e como a peça representa um circuito fechado, um fluxo de corrente será gerado (CHIAVERINI 2008), causando aquecimento por efeito joule (SILVA 2008), ou seja, aquecimento devido à resistência do metal ao fluxo da corrente induzida (CHIAVERINI 2008).

O modelo de aquecimento obtido depende da forma e do número de voltas da bobina utilizada, da frequência de operação e da força elétrica da corrente alternada (CHIAVERINI 2008). A Figura 2.3 mostra cinco exemplos de bobinas utilizadas em processos de alta frequência e seus, respectivos, modelos de aquecimento, os quais estão hachurados.

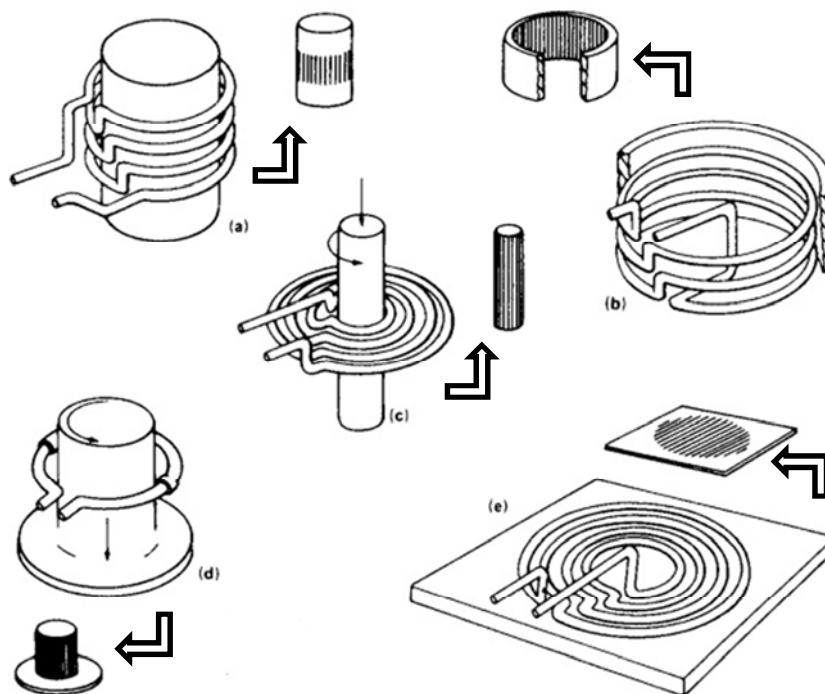


Figura 2.3 Exemplos de bobinas utilizadas em processos de alta frequência e seus respectivos, modelos de aquecimento, os quais estão hachurados. Fonte: imagem editada de (CHIAVERINI 2008).

Já a espessura da camada temperada depende da frequência de operação. Quanto maior for a frequência aplicada com a mesma densidade de potência, menor será a espessura da região aquecida (SILVA 2008), portanto, menor será a espessura da camada temperada. Quando se deseja aquecer camadas com maior espessura, utilizam-se frequências intermediárias ou baixas (CHIAVERINI 2008).

Não é apenas a frequência responsável pela espessura de camada, mas também o tempo de aquecimento e a densidade de força (kW/cm^2) aplicada. Em muitas aplicações, para restringir-se o aquecimento apenas a área superficial, utilizam-se tempos de aquecimentos curtos e densidades de força relativamente altas (CHIAVERINI 2008). Esse tempo deve ser o mais curto possível, para evitar superaquecimento e o surgimento de trincas posteriores (SILVA 2008).

Um dos vários processos de têmpera por indução que existe é a têmpera simultânea, onde a peça a ser temperada gira no interior da bobina até que o tempo de aquecimento seja atingido, momento em que se desliga a força e que um jato de água é, imediatamente, aplicado para resfriar a peça (CHIAVERINI 2008), ocasionando, portanto, a têmpera na região aquecida.

Outro processo é a têmpera contínua, onde a peça gira no interior da bobina, a qual se movimenta ao longo do eixo da peça, proporcionando um aquecimento progressivo, enquanto isso, o dispositivo de resfriamento que é montado próximo à bobina (CHIAVERINI 2008) vai resfriando, ou seja, temperando a região já aquecida.

Alguns dos aços mais utilizados na têmpera por indução, segundo (CHIAVERINI 2008), são:

- Aços de médio teor de carbono, como 1030 e 1045, usados em engrenagens, eixos, entre outros;
- Aços de alto teor de carbono, como 1070, empregados em ferramentas manuais, brocas de perfuração de rochas, etc.;
- Aços ligas empregados em mancais, válvulas de automóveis, entre outros.

2.3. Revenimento

Após realizar um tratamento térmico de têmpera em uma peça é necessário realizar outro tratamento térmico chamado revenimento ou revenido (COLPAERT 2008). Este procedimento é necessário devido à extrema fragilidade da martensita (SILVA 2008), microestrutura formada na têmpera.

Esta microestrutura apresenta também, em geral, alto nível de tensões residuais e baixíssima ductilidade e tenacidade, condições, essas, que impossibilitam seu uso na maioria das aplicações (COLPAERT 2008). Peças deixadas muito tempo nessas condições, de martensita temperada, correm grande risco de trincar, exceto quando possuem um baixíssimo teor de carbono (SILVA 2008).

Em geral, aços de alta temperabilidade (SILVA 2008) e aços com alto teor de carbono, como os aços ferramentas, são revenidos duas ou mais vezes (COLPAERT 2008). Este procedimento se deve ao fato de haver precipitação, durante o primeiro revenimento, de carbonetos na austenita retida, cuja qual não foi transformada na têmpera, o que diminui o teor de carbono dissolvido nessa austenita retida, permitindo, assim, a formação de mais martensita durante o resfriamento do primeiro revenimento e, portanto, realiza-se o segundo revenimento para revenir esta nova martensita (SILVA 2008). Além disso, esse procedimento de múltiplo revenimento visa garantir tenacidade (COLPAERT 2008),

sendo, também, muito eficiente na estabilização dimensional de ferramentas, calibres, entre outros (SILVA 2008).

O processo de revenimento produz alterações microestruturais e alívio das tensões (COLPAERT 2008), aumentando a ductilidade e a resistência ao choque do material (CHIAVERINI 2008). O revenido consiste em aquecer o material a temperaturas inferiores à temperatura A_{c1} (COLPAERT 2008), ou seja, abaixo da temperatura de austenitização, e por um tempo suficiente para homogeneizar a temperatura por toda peça, a fim de obter as propriedades desejadas (SILVA 2008).

A Figura 2.4 mostra os efeitos da temperatura de revenimento sobre as propriedades do aço 4340 (COLPAERT 2008).

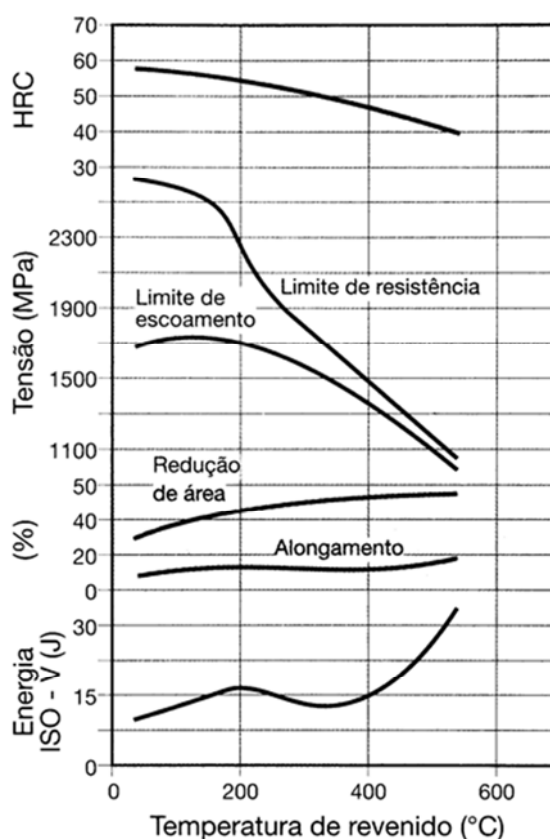


Figura 2.4 Efeitos da temperatura de revenimento sobre as propriedades mecânicas do aço 4340. Fonte: (COLPAERT 2008).

Como pode ser visto na Figura 2.4, enquanto há uma diminuição nas propriedades de resistência, há um aumento nas propriedades de ductilidade e tenacidade, as quais estão relacionadas à resistência ao impacto (SILVA 2008).

A Figura 2.5 mostra o efeito do tempo em diferentes temperaturas de revenimento sobre a dureza de um aço com teor de 0,82 % C.

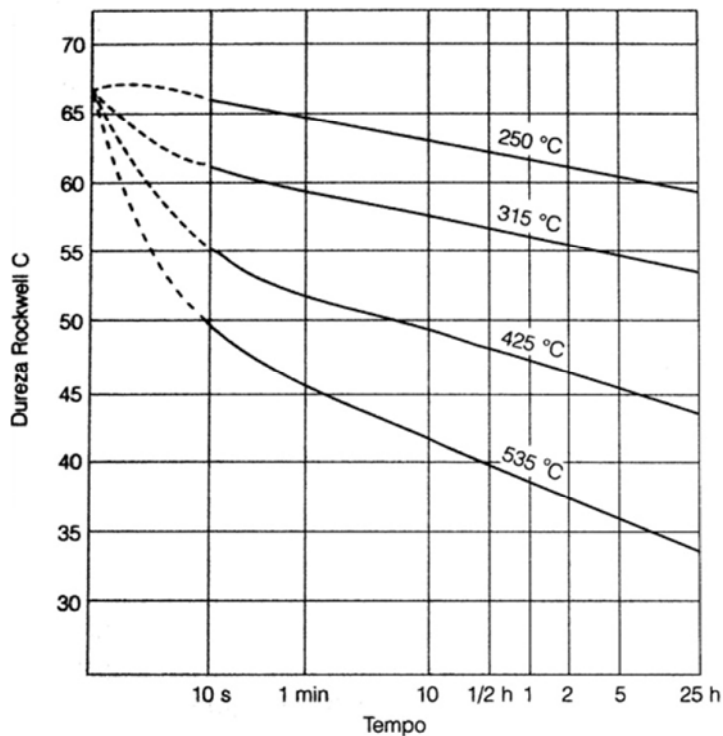


Figura 2.5 Efeito do tempo sobre a dureza de um aço com teor de 0,82 % C em quatro temperaturas de revenimento. Fonte: (SILVA 2008).

Como pode ser analisado na Figura 2.5, o efeito sobre a queda da dureza é mais pronunciado nos primeiros minutos, enquanto que, a partir de duas horas de processo, o efeito de queda da dureza passa a ser inexpressiva (SILVA 2008). Portanto, se se deseja diminuir mais a dureza, é melhor aumentar a temperatura de revenimento do que manter o aço por um longo tempo em uma temperatura menor (SILVA 2008).

A martensita é considerada uma fase metaestável, pois os átomos de carbono permanecem nos interstícios em que se encontravam na austenita, e quando submetida a uma energia para difusão, ou seja, a temperatura de revenimento, o carbono difundir-se-á, precipitando-se como carboneto (SILVA 2008). As partículas de carboneto precipitadas crescem e aglomeram-se, de acordo com o tempo e temperatura de revenimento (CHIAVERINI 2008), além disso, a precipitação conduz a diminuição da dureza (SILVA 2008).

A Figura 2.6 mostra duas microestruturas martensíticas, uma não revenida, com dureza de 62,1 HRc, e outra revenida, a 206 °C e com dureza 56,2 HRc, em um aço 1052.

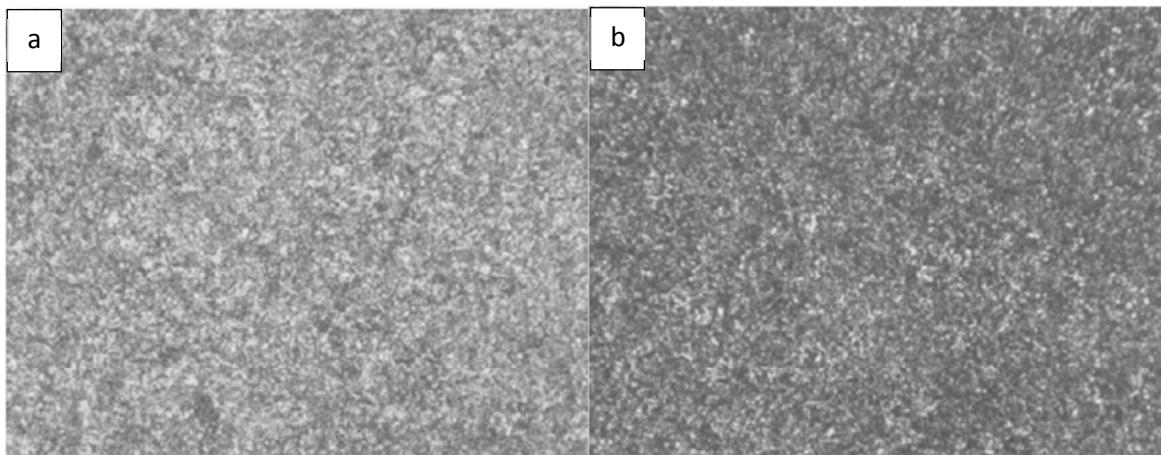


Figura 2.6 Microestruturas martensíticas em um aço 1052; (a) não revenida, dureza 62,1 HRC, aumento 200x; (b) revenida a 206 °C, dureza 56,2 HRC, aumento 200x. Fonte: (HAIMBAUGH 2001).

Pode-se observar, não muito claramente, na Figura 2.6 (a) uma estrutura acicular (HAIMBAUGH 2001), enquanto que na Figura 2.6 (b) há uma diferença na estrutura revenida, a qual é um pouco menos acicular que a não revenida.

Conforme a temperatura de revenimento verificam-se as seguintes transformações nos aços:

- Até 100 °C há uma redistribuição dos átomos de carbono (COLPAERT 2008) em direção a discordâncias ou uma segregação, fenômeno, esse, que pouco afeta a dureza e é predominante em aços de alto carbono (CHIAVERINI 2008).

- Entre 100 e 250 °C, às vezes chamado de 1º estágio do revenido (CHIAVERINI 2008), ocorre segregação do carbono em aços com menos de 0,2 % C, mas sem precipitação, e em aços com mais de 0,2 % C há a precipitação de carbonetos do tipo épsilon, de fórmula $Fe_{2-3}C$ segundo (CHIAVERINI 2008), e reticulado hexagonal de corpo centrado (SILVA 2008). A dureza passa a diminuir a partir dessas temperaturas (CHIAVERINI 2008), mas, às vezes, em aços com alto teor de carbono a precipitação de carbonetos épsilon leva a um aumento de dureza, pelo mecanismo de endurecimento por precipitação (SILVA 2008).

- Entre 200 e 300 °C, às vezes chamado de 2º estágio do revenido, ocorre a transformação da austenita retida em ferrita e cementita, com características de bainita segundo (SILVA 2008), em aços de médio e alto teor de carbono (CHIAVERINI 2008). A precipitação de carbonetos na austenita reduz seu teor de carbono, o que viabiliza a formação de martensita no resfriamento pós-revenimento (COLPAERT 2008).

- Entre 250 e 350 °C, às vezes chamado de 3º estágio do revenido, há a formação de um carboneto metaestável, de fórmula Fe_5C_2 , o qual apresenta, em aços de alto carbono, uma estrutura de massa escura visível em microscópio, a qual era chamada, antigamente, de “troostita” (CHIAVERINI 2008). À medida que as partículas de carbonetos crescem, as partículas de carboneto épsilon vão desaparecendo gradualmente (SILVA 2008).

- Entre 300 e 400 °C inicia-se o coalescimento dos carbonetos (SILVA 2008).

- Entre 350 e 600 °C há uma pronunciada redução na densidade de discordâncias (SILVA 2008), ou seja, há uma recuperação da subestrutura de discordância, onde os aglomerados de carbonetos passam a uma forma esferoidal, com uma estrutura de ferrita fina acicular (CHIAVERINI 2008).

- Entre 500 e 650 °C pode ocorrer, em aços contendo elementos de liga formadores de carbonetos, a precipitação de carbonetos destes elementos, causando aumento de resistência e dureza (COLPAERT 2008). Esse fenômeno é chamado de endurecimento secundário ou de 4º estágio do revenido (CHIAVERINI 2008).

- Entre 600 e 700 °C passa a ocorrer o processo de recristalização e de crescimento de grão (CHIAVERINI 2008), o que forma grãos de ferrita equiaxiais com cementita esferoidal no seu contorno e interior (SILVA 2008). Essa estrutura caracteriza-se por ser muito tenaz e de baixa dureza (CHIAVERINI 2008).

Apesar de não ser possível ver, detalhadamente, a maior parte desses processos através de microscopia ótica, pode-se notar após o revenimento o aumento da velocidade com a qual a estrutura é atacada (COLPAERT 2008).

Voltando a analisar a Figura 2.4, mais especificadamente o gráfico da energia absorvida pela temperatura de revenimento, pode-se observar um intervalo de temperatura, aproximadamente entre 200 e 300 °C, em que há uma queda na energia absorvida, ou seja, uma queda na resistência ao choque do aço 4340. Essa diminuição na resistência ao choque é um fenômeno conhecido como fragilidade do revenido (SILVA 2008).

Essa fragilização do revenido pode ocorrer em diversos aços, como aços carbono e baixa liga (SILVA 2008), e não apenas no intervalo de temperatura citado. Outro exemplo são os aços com níquel e cromo, como da série 31XX, que apresentam fragilização entre 450 e 600 °C (SILVA 2008). A presença de impurezas como antimônio, fósforo, estanho

ou arsênio em quantidades apreciáveis tornam, também, o aço suscetível à fragilização (CHIAVERINI 2008).

Este é um fenômeno revelado apenas pelo ensaio de resistência ao choque, ou seja, a fragilização não afeta as outras propriedades mecânicas e nem a microestrutura (CHIAVERINI 2008).

Portanto, é aconselhável evitar estas faixas de temperatura que em ocorrem fragilização, a menos que o aço seja preparado para evita-la (COLPAERT 2008). Aparentemente, a adição de molibdênio ou silício (SILVA 2008) retarda a suscetibilidade a fragilidade do revenido (CHIAVERINI 2008).

Contudo, a fragilização pode ocorrer, também, durante o resfriamento após o revenido que é realizado em temperaturas acima da faixa de fragilização e, portanto, deve-se realizar um resfriamento rápido para diminuir o tempo de exposição a essa faixa de temperatura (CHIAVERINI 2008).

Se ocorrer fragilização no material, é possível restaurar sua tenacidade aquecendo-o em torno de 600 °C ou mais, seguido de um rápido resfriamento abaixo de 300 °C.

As maiores diferenças entre revenimento em forno e revenimento por indução são os tempos e as temperaturas envolvidas (HAIMBAUGH 2001) e (WEISS 1999). E, assim mesmo, esses dois tipos de revenimento são capazes de produzir produtos finais com propriedades mecânicas (como: resistência à tração, limite de escoamento, alongamento, redução de área, entre outras) semelhantes, mas com microestruturas não totalmente idênticas (HAIMBAUGH 2001).

Contudo, para garantirem-se características semelhantes, devem-se utilizar temperaturas mais altas no revenimento por indução do que no revenimento em forno (WEISS 1999). Essas temperaturas mais altas são necessárias para que possa haver a difusão dos átomos de carbono e, portanto, a formação de carbonetos (HAIMBAUGH 2001).

A Figura 2.7 mostra a dureza de um aço 1050, revenido em forno e revenido por indução, como função do tempo e temperatura de revenimento (HAIMBAUGH 2001).

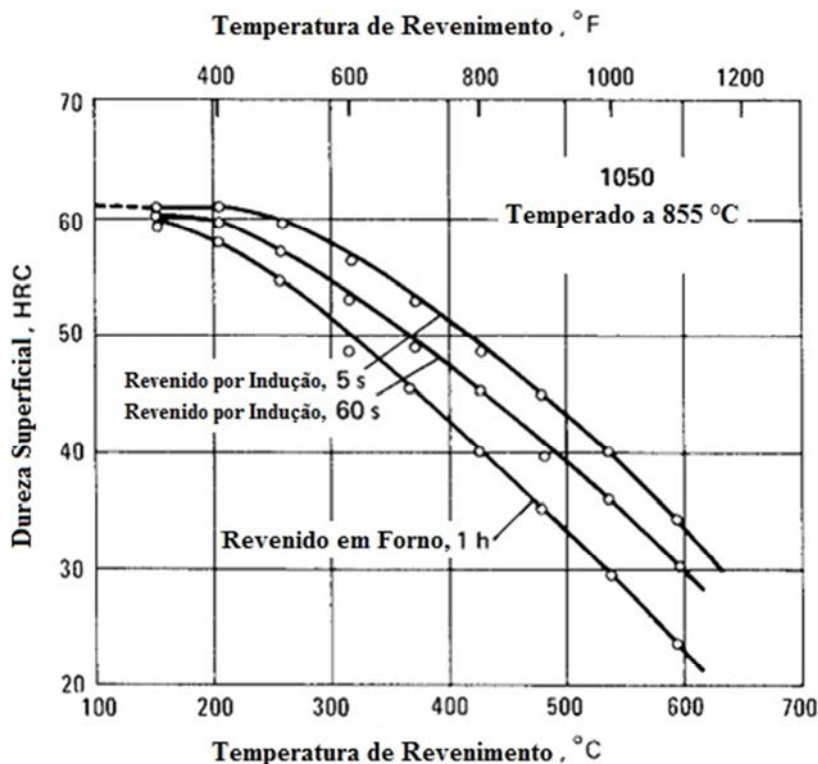


Figura 2.7 Dureza em função do tempo e temperatura de revenimento, para um aço 1050. Fonte: imagem editada de (HAIMBAUGH 2001).

Ao analisar a Figura 2.7, pode se verificar que um ciclo de revenimento em forno com tempo de 1 hora e temperatura de 425 °C produz a mesma dureza superficial, de 40 HRC, que um ciclo de revenimento por indução de 5 segundos e 540 °C, o que comprova que quanto menor o tempo de ciclo, maior deve ser a temperatura utilizada no revenimento (HAIMBAUGH 2001) e (DAVIS 2002).

A função matemática a seguir, chamada de Parâmetro de Revenimento (PR), relaciona o tempo e a temperatura de revenimento (HAIMBAUGH 2001):

$$PR = T (14,44 + \log t)$$

Onde, “T” é a temperatura de revenimento em graus Rankine (°Ra) ou em Kelvin (K), “14,44” é uma constante para aços ao carbono e “t” é o tempo de revenimento em segundos (HAIMBAUGH 2001).

Outra propriedade mecânica afetada pelo revenimento por indução é a resistência à tração. A qual apresenta uma taxa de queda, em relação à temperatura de revenimento, menor em um aço revenido por indução do que a taxa de queda em um aço revenido em banho de sal, fato que é devido ao curto ciclo de revenimento (AHN 2005). A Figura 2.8

mostra a resistência à tração, de um aço revenido por indução e outro revenido em banho de sal, em função da temperatura de revenimento.

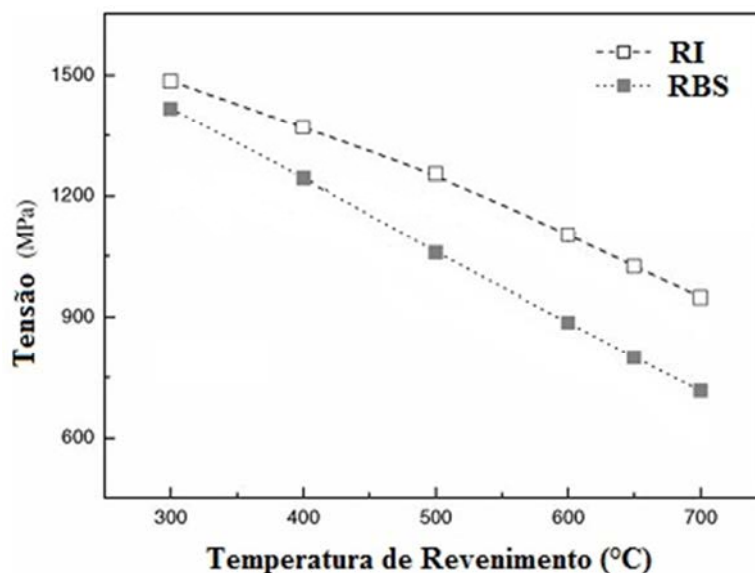


Figura 2.8 Resistência à Tração em função da temperatura de revenimento para um aço Revenido por Indução (RI) e outro Revenido em Banho de Sal (RBS). Fonte: imagem editada de (AHN 2005).

Analisando a Figura 2.8, percebe-se que a diferença na resistência à tração entre os aços, revenidos por indução e revenidos em banho de sal, torna-se mais pronunciada em altas temperaturas de revenimento, acima de 500 °C (AHN 2005). Essa diferença pronunciada é devido ao tempo do revenimento por indução ser insuficiente para diminuir a dureza da matriz do aço (AHN 2005). O aquecimento por indução, além de diminuir a dureza, aumenta a esferoidização dos carbonetos revenidos em temperaturas maiores que 350 °C (LEE 2011).

Por causa da micro precipitação e da esferoidização no revenimento da martensita, o aço temperado e revenido, através de tratamento térmico por indução, mostra uma melhora nas propriedades mecânicas, como no forjamento a frio e no retardo nas propriedades de fratura (LEE 2011). Isso é devido ao fato da indução de alta frequência produzir uma cinética diferente de formação de carbonetos e de esferoidização ao comparar-se com o processo normal de têmpera e revenimento (LEE 2011).

Além disso, a distribuição de partículas de carbonetos no aço revenido em banho de sal é bastante diferente do que aquela no aço revenido por indução (AHN 2005). A presença de partículas de cementita esferoidizadas indica que a esferoidização inicia a 500 °C no revenimento em banho de sal (AHN 2005).

A Figura 2.9 mostra micrografias de aços revenidos por 40 segundos por indução e por 40 minutos em banho de sal, em diferentes temperaturas de revenimento.

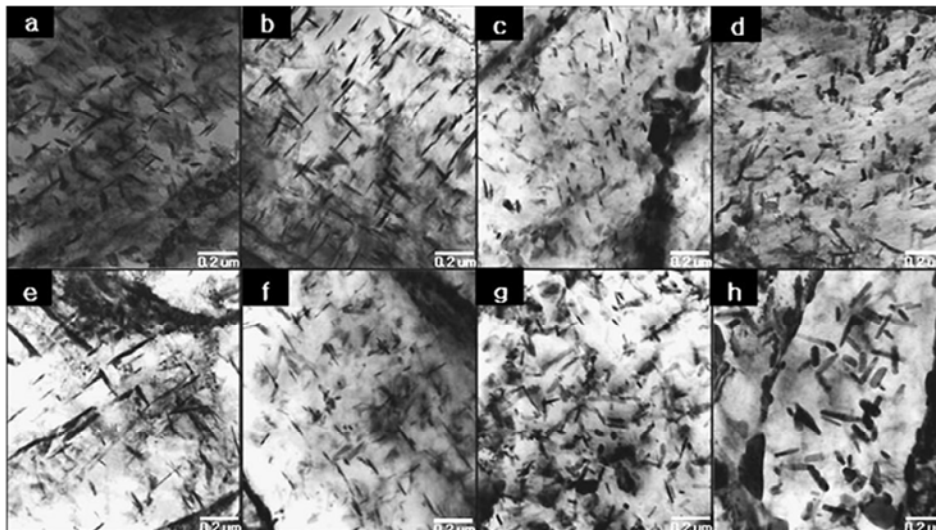


Figura 2.9 As micrografias de microscopia eletrônica de transmissão mostram a evolução da morfologia dos carbonetos nas seguintes circunstâncias: (a) Revenimento por Indução (RI) a 400 °C, (b) RI a 500 °C, (c) RI a 600 °C, (d) RI a 700 °C, (e) Revenimento em Banho de Sal (RBS) a 400 °C, (f) RBS a 500 °C, (g) RBS a 600 °C e (h) RBS a 700 °C. Fonte: imagem editada de (AHN 2005).

Ao comparar a Figura 2.9 (c) e a Figura 2.9 (f), percebe-se que as partículas de cementita começam a mudar suas formas de um tipo agulha para um tipo esferoidal fino em torno dos 600 °C e com 40 segundos de ciclo para aços revenidos por indução, enquanto que, como já citado, a esferoidização no revenimento em banho de sal inicia a 500 °C e com ciclo de 40 minutos (AHN 2005).

Essas observações indicam que as temperaturas de transformação do aço são maiores, quanto menor o tempo de aquecimento (FERREIRA 2004). Além disso, a quantidade e tamanho dos carbonetos aumentam com o aumento da temperatura de revenimento (LEE 2011).

A seguir serão citados alguns fatores importantes para o processo de revenimento por indução:

- Temperaturas: as temperaturas, mais usuais, de revenimento por indução estão na faixa entre 120 e 600 °C (WEISS 1999), ou entre 300 e 600 °C (FERREIRA 2004). Além disso, o revenimento de aços ao carbono a baixas temperaturas, tipicamente

entre 120 e 300 °C, é realizado, principalmente, para aliviar as tensões da têmpera e, portanto, a redução de dureza, em geral, não excede 1 a 2 pontos em HRc (WEISS 1999).

- Tempo: é importante reduzir o tempo entre o processo de têmpera e o de revenimento, pois, um longo tempo pode gerar distorções e/ou trincas (WEISS 1999).
- Geometria: revenir partes complexas por indução exige a escolha ideal da frequência, da densidade de potência e da geometria do indutor, de forma a atender a necessidade de aplicar energia suficiente em certas áreas do componente (WEISS 1999).

A Figura 2.10 mostra os processos possíveis de serem realizados ao variarem-se os parâmetros de processo, frequência e potência.

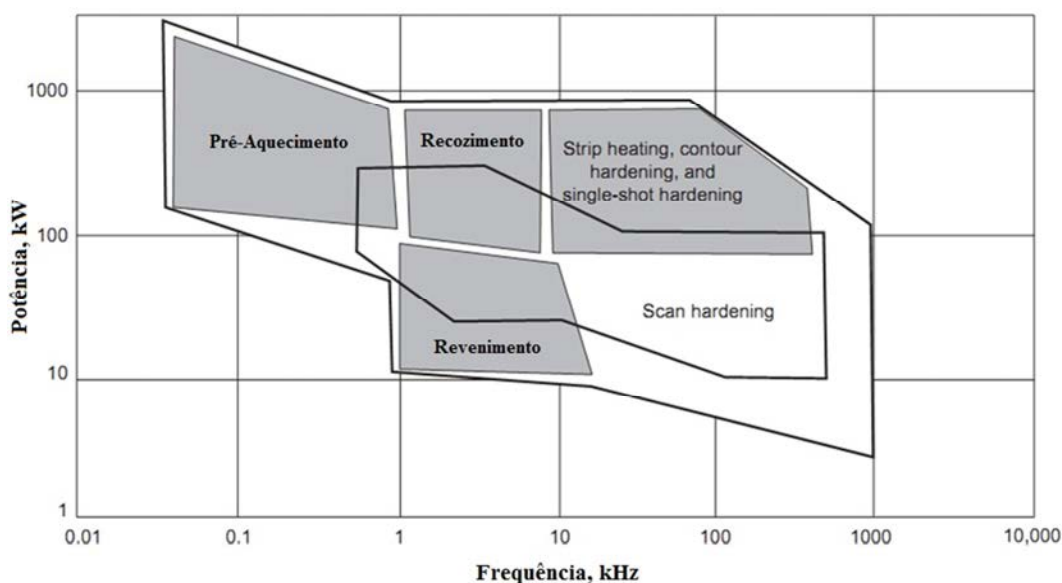


Figura 2.10 Processos relacionados aos parâmetros de processo, frequência e potência. Fonte: imagem editada de (DAVIS 2002).

Ao analisar a Figura 2.10, pode-se verificar que o revenimento por indução pode ser realizado, aproximadamente, entre as faixas de 1 a 10 kHz e de 10 a 90 kW.

Em geral, uma peça que foi temperada pelo lado externo, deve ser revenida, quando possível, pelo lado interno e vice-versa (HAIMBAUGH 2001). Pois, no aquecimento pelo lado oposto, as temperaturas mais altas, aplicadas na superfície, não afetam as propriedades do material e proporcionam, através de uma lenta condução de calor, um aquecimento gradual, através da camada temperada, com temperaturas mais uniformes (HAIMBAUGH 2001).

Geralmente, não se utiliza o mesmo indutor para temperar e revenir a mesma peça, por muitas razões e, a seguir, algumas serão citadas (WEISS 1999):

- Indutores para têmpera podem exigir formas mais complexas, para aumentar o aquecimento em certas regiões. Enquanto que indutores para revenimento devem aquecer áreas maiores, ou seja, não necessitam de geometrias complexas;
- As densidades de potência para têmpera são muito maiores do que para o revenimento. Pois, no revenimento necessita-se de um aquecimento gradual, para não exceder a temperatura ideal para revenir;
- Diferente dos indutores de têmpera, os indutores para revenimento nem sempre exigem o uso de concentradores de fluxo magnético.

3.0 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

3.1 Composição Química

Realizou-se a análise da composição química em quatro amostras de tulipas para comprovar a utilização do aço AFNOR XC 45 e a sua qualidade. Essa análise foi realizada no Laboratório Metalúrgico da empresa, no espectrômetro de emissão ótica LM 066.

3.2 Têmpera por Indução

A tulipa do projeto em questão é submetida a duas etapas de têmpera por indução, uma etapa para tratar o sino e outra para tratar a haste, a qual é o nosso foco de análise.

A Figura 3.1 mostra o perfil de têmpera exigido para a haste, enquanto a Tabela 3.1 mostra as especificações de projeto para a mesma região citada. Mas como já comentado, por motivos de sigilo industrial, essa imagem foi editada, a partir do desenho de projeto, para impedir o reconhecimento da tulipa e do projeto.

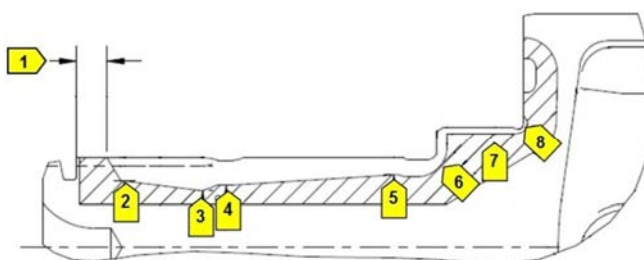


Figura 3.1 Perfil de têmpera da haste da tulipa utilizada. Fonte: Desenho de Projeto, editado, da GKN Driveline.

Tabela 3.1 Especificações de projeto, dureza e profundidade de camada, para a haste da tulipa utilizada.

Dureza Superficial [HRc]		Camada Efetiva [HRc]			N° 1 – Cota Sem Têmpera [mm]	
58 – 63		50			0,50 – 5,00	
N° 2 [mm]	N° 3 [mm]	N° 4 [mm]	N° 5 [mm]	N° 6 [mm]	N° 7 [mm]	N° 8 [mm]
2,10 – 5,50	3,60 – 5,50	3,60 – 5,50	2,50 MÍN.	1,50 MÍN.	1,00 MÍN.	0,60 – 4,50

Para obter essas especificações e o perfil mostrado acima, utilizou-se a máquina de indução GH 1871, programada com os parâmetros de processo mostrados na Tabela 3.2 e o indutor GI 3-20.

Tabela 3.2 Parâmetros de processo utilizado na etapa de têmpera por indução da haste da tulipa.

Potência	Frequência	Tempo de Aquecimento	Tempo de Ducha
95 - 100 kW	14 kHz	4 segundos	14 segundos

3.3 Revenimento Convencional

Como proposta de solução para o problema do novo projeto da empresa, realizou-se um processo de revenimento convencional, ou seja, em um forno, após a etapa de têmpera por indução da tulipa.

A Tabela 3.3 mostra os parâmetros de processo que foram programados no forno de revenimento MM 0626, o qual foi utilizado para revenir a tulipa em questão.

Tabela 3.3 Parâmetros de processo utilizado na etapa de revenimento convencional da tulipa.

Temperatura	Tempo
180 °C – 185 °C	Aproximadamente 90 minutos

3.4 Revenimento por Indução

Como segunda alternativa para o processo de revenimento, realizou-se um revenimento por indução, também, logo, após a etapa de têmpera por indução.

Realizou-se esse processo de revenimento por indução na máquina de indução GH 1871, a mesma utilizada no processo de têmpera. Ela foi programada com os parâmetros de processo mostrados na Tabela 3.4 e o indutor GI 3-20, também, o mesmo do processo de têmpera.

Tabela 3.4 Parâmetros de processo utilizado na etapa de revenimento por indução da tulipa.

Potência	Frequência	Tempo de Aquecimento
19 - 21 kW	8 - 10 kHz	10 segundos

Ao analisarem-se na Tabela 3.4 os valores de potência e de frequência utilizados, pode-se verificar, de acordo com a Figura 2.10, que se trata, realmente, de um processo de revenimento.

3.5 Testes Metalúrgicos

Foi realizado uma preparação metalográfica (corte, lixamento e polimento) e um ataque químico com o reagente nital 5% em amostras de tulipas que foram submetidas: apenas a têmpera por indução, têmpera e revenimento convencional ou têmpera e revenimento por indução.

Com as amostras preparadas, realizaram-se testes de dureza no macro durômetro LM 077 para determinar o perfil de têmpera e de dureza ao longo da haste, como mostrado na Figura 3.1 e segundo a Tabela 3.1.

Também se realizou a análise metalográfica das amostras preparadas no microscópio LM 014, para comparar as microestruturas finais de cada processo.

3.6 Ensaios Mecânicos

Para realizar os ensaios mecânicos, de vida em fadiga por torção e de torção, exigidos, utilizou-se semieixos homocinéticos montados com tulipas que foram: apenas temperadas, temperadas e revenidas convencionalmente ou temperadas e revenidas por indução.

Utilizaram-se os equipamentos M0824 e M1330 para realizar os ensaios de vida em fadiga por torção, enquanto os ensaios de torção foram realizados no equipamento M1072.

A Tabela 3.5 mostra as especificações exigidas por esses ensaios. Já a Tabela 3.6 mostra os parâmetros utilizados nos equipamentos utilizados para realizar os ensaios de

vida em fadiga por torção, enquanto a Tabela 3.7 mostra os parâmetros utilizados no equipamento M1072 de ensaios de torção.

Tabela 3.5 Especificações de projeto para os ensaios mecânicos de vida em fadiga por torção e de torção.

Vida em Fadiga por Torção	Torção
≥ 50.000 ciclos	≥ 3100 Nm

Tabela 3.6 Parâmetros de processo utilizados nos equipamentos de ensaio de vida em fadiga por torção, M0824 e M1330.

Torque	Ângulo	Frequência
-900 Nm a +900 Nm	0°	2 – 4 Hz

Tabela 3.7 Parâmetro de processo utilizado no equipamento M1072.

Ângulo
0°

4.0 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Composição Química

A Tabela 4.1 mostra os resultados obtidos na análise de composição química realizada em quatro amostras de tulipas do projeto, produzidas com aço AFNOR XC 45.

Tabela 4.1 Composição química das amostras de tulipas produzidas com aço AFNOR XC 45.

Amostras	% C	% Si	% Mn	% P	% S	% Al	% Cu
I	0,46	0,26	0,70	0,020	0,017	0,020	0,11
II	0,47	0,28	0,74	0,025	0,021	0,019	0,12
III	0,46	0,26	0,70	0,022	0,017	0,020	0,11
IV	0,47	0,27	0,73	0,023	0,019	0,020	0,12

Como pode ser analisado de acordo com a Tabela 2.1, o material que foi utilizado para produzir as tulipas é, realmente, um aço AFNOR XC 45. Além disso, pode-se ver que a variação, entre uma amostra e outra, é muito pequena, o que indica que o material é de boa qualidade.

4.2 Testes Metalúrgicos

4.2.1 Têmpera por Indução

A Figura 4.1 mostra os resultados obtidos, através do teste de dureza, utilizados para definir o perfil de têmpera da região da haste nas amostras das tulipas temperadas por indução.

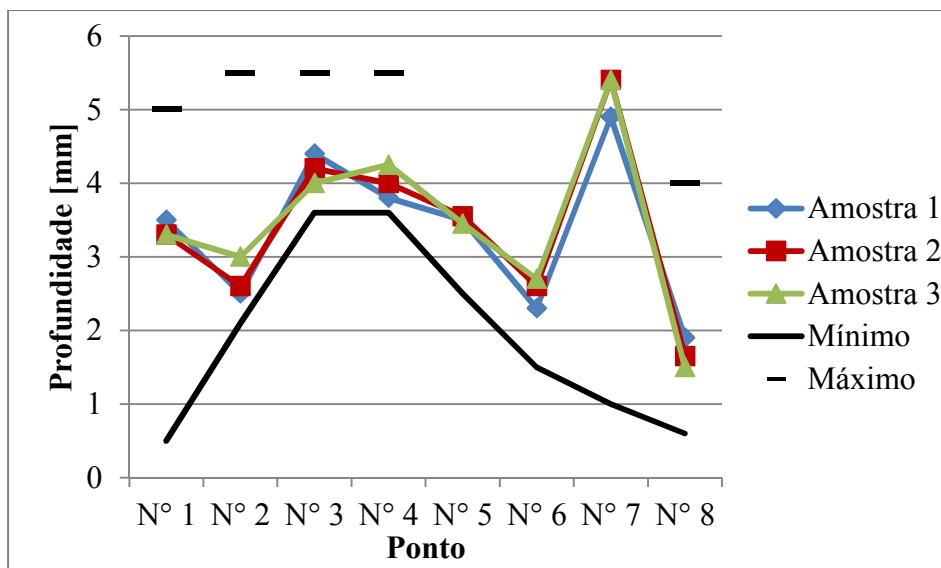


Figura 4.1 Perfil de temperatura da região da haste das tulipas temperadas por indução e as especificações máximas (---) e mínimas (—).

Pode-se analisar através da Figura 4.1 que o perfil de temperatura das três amostras está de acordo com as especificações exigidas e, além disso, os perfis são bem semelhantes, ou seja, a maior parte dos pontos apresenta, apenas, uma pequena variação de uma amostra para outra, como pode ser visto nos pontos de número: 1, 5, 6, 7 e 8.

Foi realizado, também, um perfil de dureza no ponto de número 3, indicado na Figura 3.1, das amostras, pois é a região do “spline” da tulipa, onde a fratura tem início nos ensaios mecânicos. A Figura 4.2 mostra os resultados do perfil de dureza nesse ponto para as três amostras temperadas por indução.

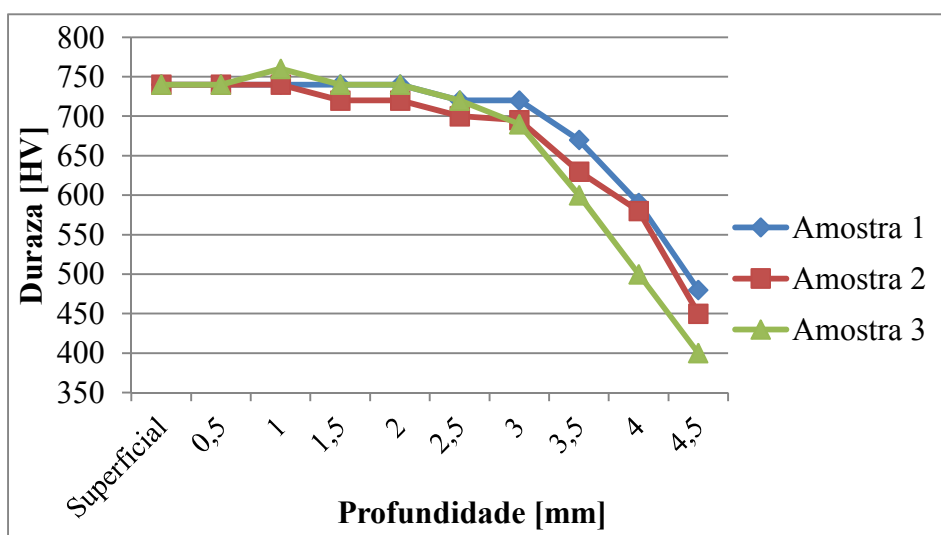


Figura 4.2 Perfil de dureza no ponto de número 3, ou seja, na região do “spline” da tulipa temperada por indução.

Como se pode observar na Figura 4.2, o perfil de dureza é bastante semelhante nas três amostras, principalmente, nos 3 mm iniciais. Além disso, a dureza superficial, de 740 HV ou 61,8 HRc, e a profundidade de camada, variando entre 4,0 e 4,5 mm, atenderam as especificações de projeto.

A Figura 4.3 mostra as micrografias realizadas nessas três amostras temperadas por indução.

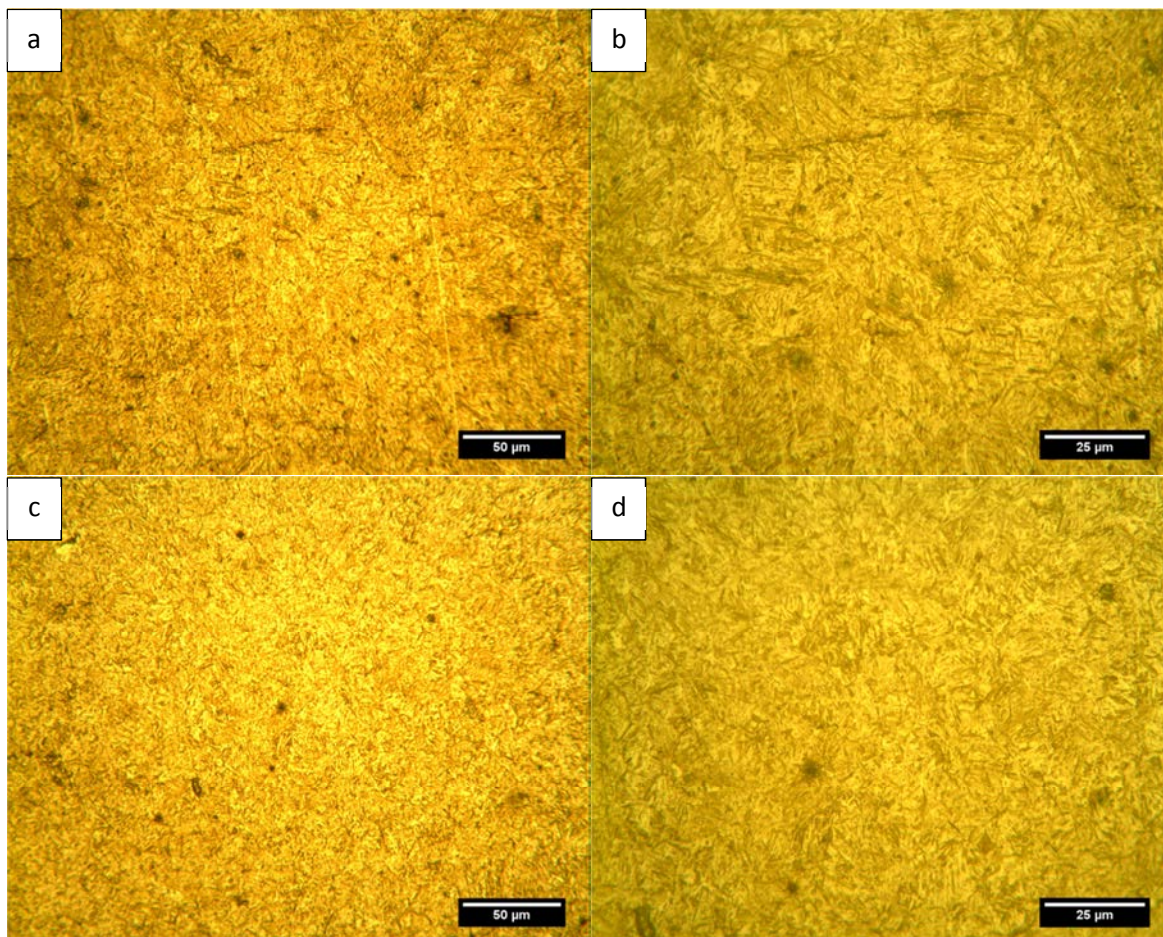


Figura 4.3 Micrografias das amostras temperadas por indução: (a) Amostra 1, aumento 200x; (b) Amostra 1, aumento 400x; (c) Amostra 2, aumento 200x; (d) Amostra 2, aumento 400x; (Continua).

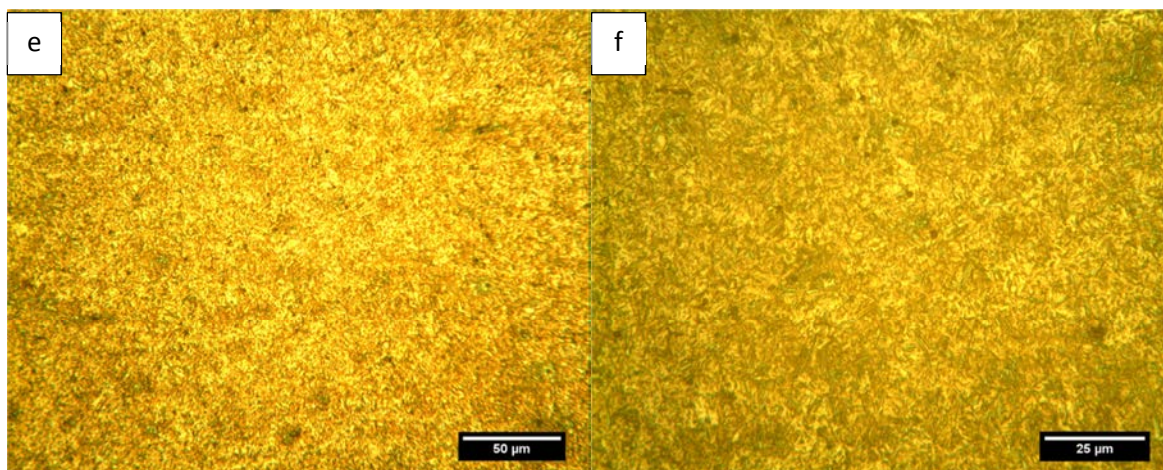


Figura 4.3 Micrografias das amostras temperadas por indução: (e) Amostra 3, aumento 200x; (f) Amostra 3, aumento 400x.

Ao analisar a Figura 4.3, pode-se ver que as estruturas martensítica das três amostras são bastante semelhantes entre si e, além disso, pode-se perceber uma semelhança entre as Figuras 4.3 (a), (c) e (d) e a Figura 2.6 (a), a qual possui uma estrutura martensítica acicular, segundo (HAIMBAUGH 2001).

4.2.2 Revenimento Convencional

Após observar a boa padronização da têmpera por indução, resolveu-se analisar apenas uma amostra de tulipa temperada por indução e revenida convencionalmente. Pois, entende-se que o processo de revenimento convencional é um processo seguro, ou seja, um processo que não apresentará variações significativas entre uma amostra e outra.

A Figura 4.4 mostra, a partir da amostra revenida convencionalmente, o resultado obtido no perfil de profundidade de camada temperada da região da haste.

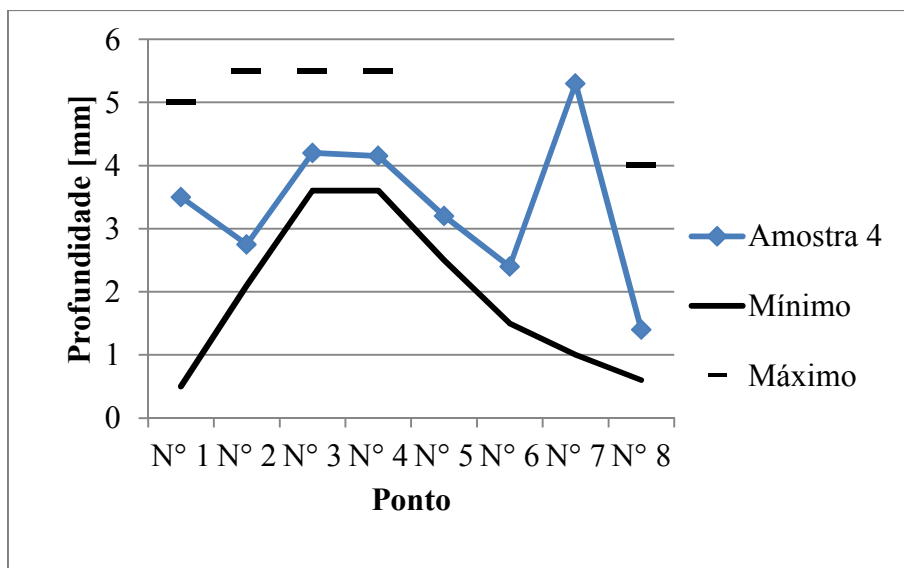


Figura 4.4 Perfil da profundidade de camada temperada da haste da tulipa revenida convencionalmente e as especificações máximas (—) e mínimas (—).

Pode-se ver na Figura 4.4 que o perfil da profundidade de camada temperada atende as especificações exigidas. Além disso, ao comparar esse resultado com os da Figura 4.1, nota-se que os perfis são bem semelhantes e, portanto, pode-se admitir que o revenimento não causou grandes alterações nas profundidades de camada temperada.

Também foi realizado um perfil de dureza no ponto de número 3, indicado na Figura 3.1, da amostra. E a Figura 4.2 mostra o resultado do perfil de dureza obtido nesse ponto para a amostra revenida convencionalmente.

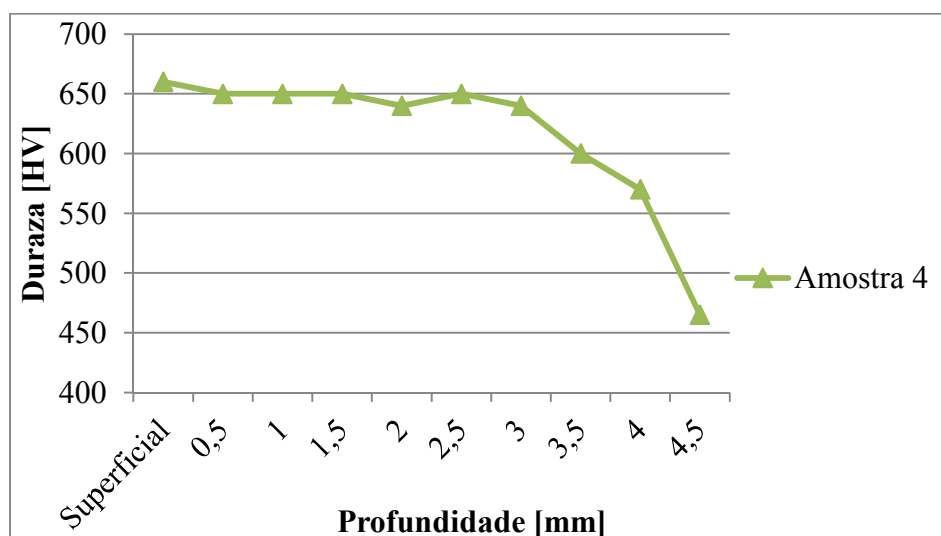


Figura 4.5 Perfil de dureza no ponto de número 3, ou seja, na região do “spline” da tulipa revenida convencionalmente.

Como se pode observar na Figura 4.5, o perfil de dureza foi, consideravelmente, alterado após o revenimento convencional. Enquanto a dureza superficial decaiu para 660 HV ou 58,3 HRc, a profundidade de camada manteve-se em torno de 4,2 mm e, além disso, pode-se ver que a dureza manteve-se, praticamente, uniforme nos primeiros 3 mm de profundidade.

A Figura 4.6 mostra as micrografias obtidas na amostra revenida convencionalmente.

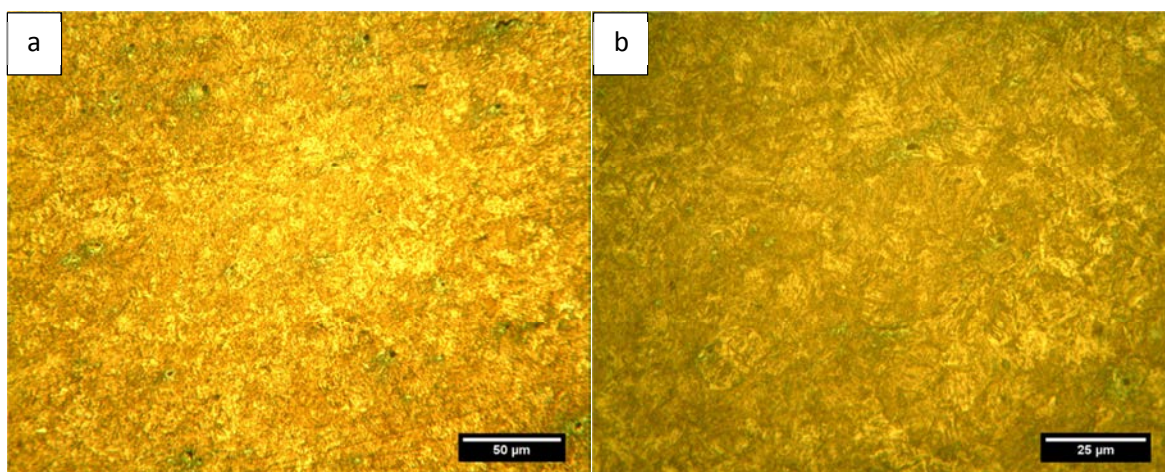


Figura 4.6 Micrografias da amostra revenida convencionalmente: (a) Amostra 4, aumento 200x; (b) Amostra 4, aumento 400x

Ao analisar a Figura 4.6, pode-se ver que a estrutura martensítica da amostra revenida convencionalmente é bastante diferente das amostras temperadas por indução, ou seja, das amostras não revenidas, mostradas na Figura 4.3. Assim como na Figura 2.6, podemos perceber que o revenimento diminui a característica acicular da martensita.

4.2.3 Revenimento por Indução

A Figura 4.7 mostra, a partir das amostras revenidas por indução, os resultados obtidos no perfil de profundidade de camada temperada da região da haste.

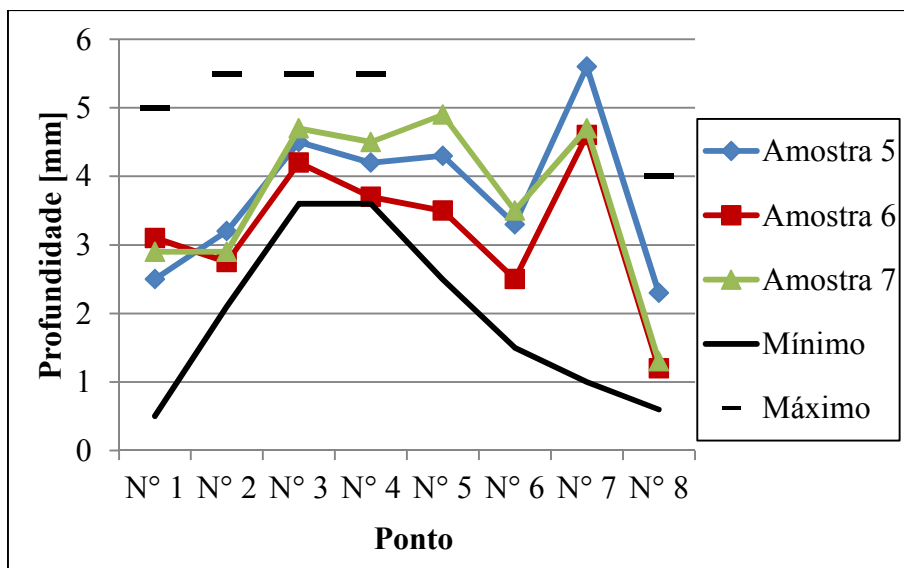


Figura 4.7 Perfil da profundidade de camada temperada da haste da tulipa revenida por indução e as especificações máximas (—) e mínimas (—).

Pode-se ver na Figura 4.7 que o perfil da profundidade de camada temperada atende as especificações exigidas, mas apresentam variações consideráveis em quase todos os pontos. Esse fato pode ser devido às amostras não pertencerem ao mesmo lote de produção.

Também foi realizado um perfil de dureza no ponto de número 3, indicado na Figura 3.1, das amostras. E a Figura 4.8 mostra os resultados do perfil de dureza nesse ponto para as amostras revenidas por indução.

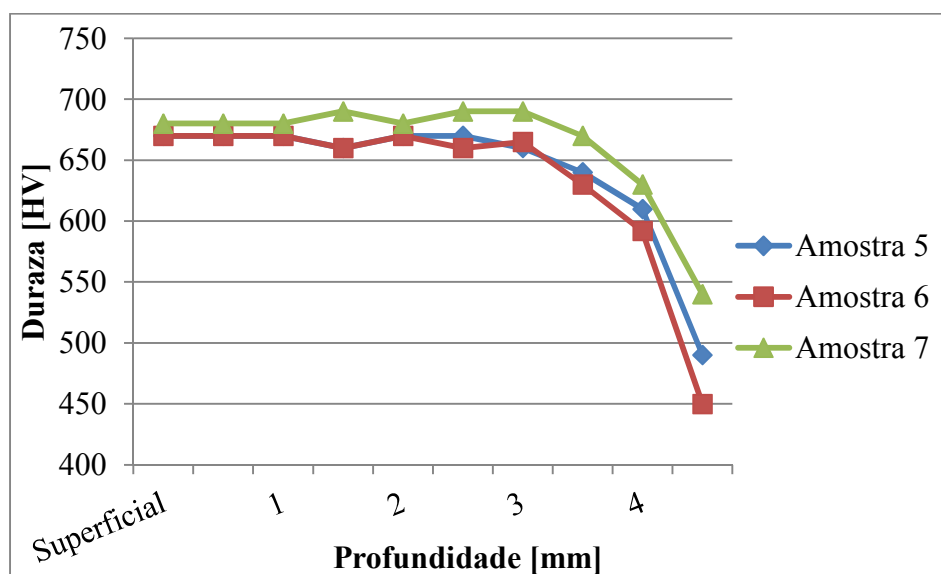


Figura 4.8 Perfil de dureza no ponto de número 3, ou seja, na região do “spline” da tulipa revenida por indução.

Como se pode observar na Figura 4.8, o perfil de dureza foi, consideravelmente, alterado após o revenimento convencional. Enquanto a dureza superficial decaiu para 670 a 680 HV, ou 58,8 a 59,2 HRC, a profundidade de camada variou entre 4,2 e 4,7 mm. Além disso, pode-se ver, também, que a dureza manteve-se, praticamente, uniforme nos primeiros 3 mm de profundidade, mas em comparação com revenimento convencional, a dureza ficou um pouco mais alta, o que indica que a temperatura atingida no revenimento por indução deve ter sido menor do que a temperatura equivalente a temperatura do revenimento convencional. Essa temperatura equivalente pode ser calculada pela equação abaixo, segundo (HAIMBAUGH 2001).

$$PR = T (14,44 + \log t);$$

A temperatura equivalente é obtida ao igualar-se um lado com os parâmetros, tempo (90 min) e temperatura (180 a 185 °C), do revenimento convencional e o outro com o parâmetro, tempo (8 s), do revenimento por indução. Após a realização dos cálculos, chegou-se na temperatura equivalente entre 258 e 264 °C.

Portanto, pode-se concluir que a temperatura do revenimento por indução atingiu uma temperatura inferior a 258 °C, pois a dureza superficial ficou, entre 10 e 20 HV, superior a do revenimento convencional.

A Figura 4.9 mostra as micrografias obtidas nas três amostras revenidas por indução.

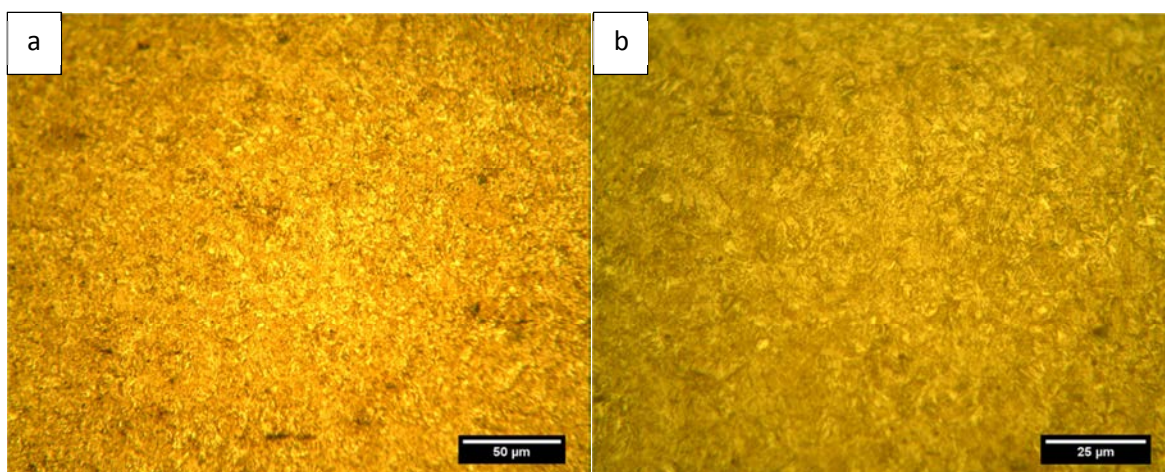


Figura 4.9 Micrografias das amostras revenidas por indução: (a) Amostra 5, aumento 200x; (b) Amostra 5, aumento 400x;

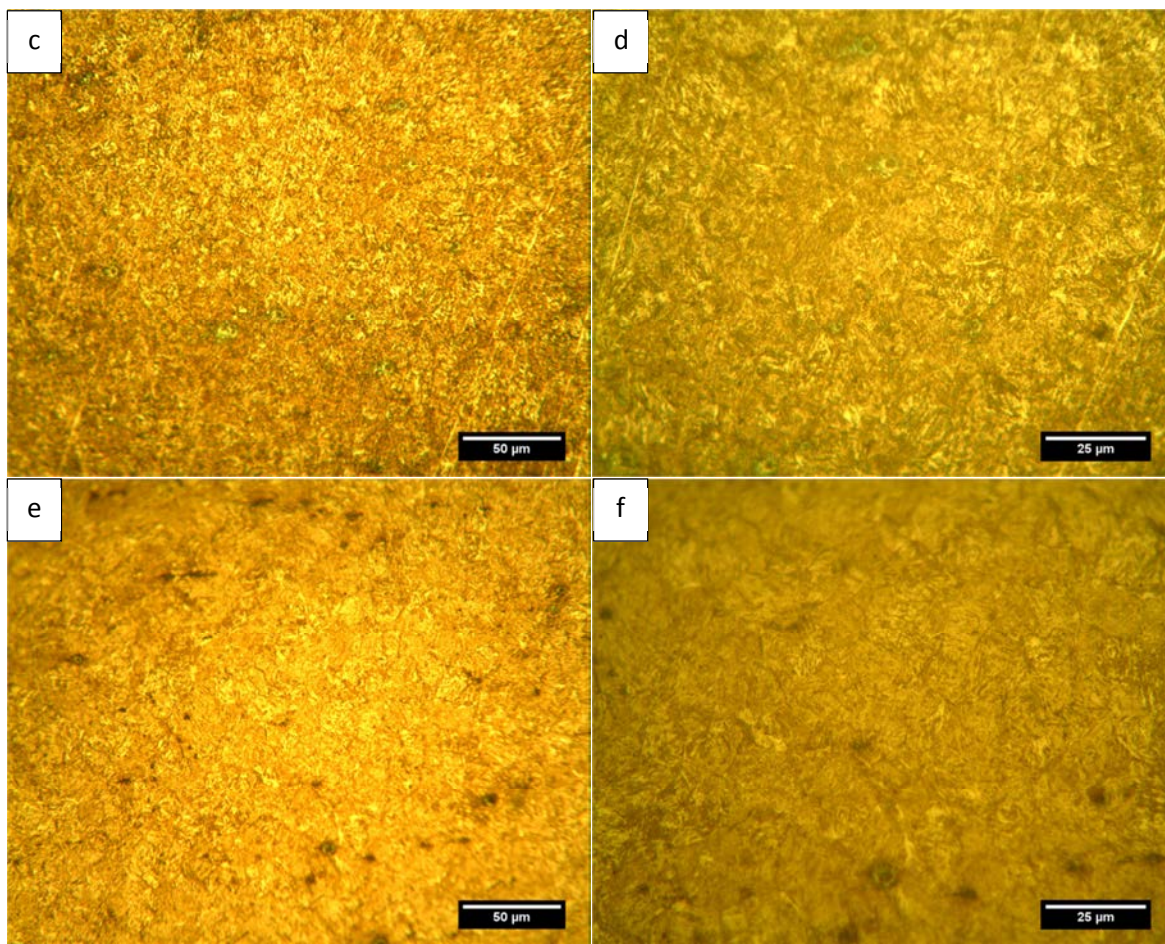


Figura 4.9 Micrografias das amostras revenidas por indução: (c) Amostra 6, aumento 200x; (d) Amostra 6, aumento 400x; (e) Amostra 7, aumento 200x; (f) Amostra 7, aumento 400x.

Ao analisar a Figura 4.9, pode-se ver que as estruturas revenidas das três amostras são bastante semelhantes entre si e, além disso, pode-se perceber uma semelhança entre as microestruturas da Figura 4.6 e a Figura 4.9, as quais possuem estrutura martensítica menos acicular do que as microestruturas da Figura 4.3.

4.3 Ensaio Mecânicos

4.3.1 Amostras Temperadas

A Tabela 4.2 mostra os resultados obtidos nos ensaios mecânicos, de vida em fadiga por torção e de torção, realizados em amostras de semieixos homocinéticos montados com tulipas apenas temperadas por indução.

Tabela 4.2 Resultados dos ensaios mecânicos realizados em juntas homocinética montadas com tulipas temperadas por indução. *Teste interrompido.

Amostras	Vida em Fadiga por Torção	Torção
A	2.000.000* ciclos	2.843 Nm
B	1.000.000* ciclos	2.881 Nm
C	420.551* ciclos	2.942 Nm

Como pode ser visto na Tabela 4.2, os ensaios de vida em fadiga por torção foram interrompidos, pois o número de ciclos alcançado chega a ser de 8 a 40 vezes maior do que o número de ciclos exigido. Portanto, não há problema no ensaio de vida em fadiga por torção.

Mas ao analisarem-se os resultados dos ensaios de torção da Tabela 4.2 e a especificação exigida, indicada na Tabela 3.5, pode-se ver que essas amostras de semieixos, montados com tulipas temperadas por indução, foram rejeitadas por não atenderem as especificações exigidas.

4.3.2 Amostras Revenidas Convencionalmente

O resultado obtido no ensaio mecânico de torção realizado em uma amostra de semieixo homocinético montado com tulipa temperada por indução e revenida convencionalmente é mostrado na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 Resultados dos ensaios mecânicos realizados em junta homocinética montada com tulipa revenida convencionalmente. *Teste interrompido.

Amostras	Vida em Fadiga por Torção	Torção
D	$\geq 1.163.078$ ciclos *	3.880 Nm

Como pode ser visto na Tabela 4.3, o ensaio de vida em fadiga por torção, também, foi interrompido, pois o número de ciclos alcançado chega a ser 23 vezes maior do que o número de ciclos exigido. Portanto não há problema no ensaio de vida em fadiga por torção.

Ao analisar-se o resultado do ensaio de torção da Tabela 4.3 e a especificação exigida, indicada na Tabela 3.5, pode-se ver que essa amostra de semieixo, montado com tulipa revenida convencionalmente, foi aprovada, pois atende a especificação exigida.

4.3.3 Amostras Revenidas por Indução

Os resultados obtidos nos ensaios mecânicos, de vida em fadiga por torção e de torção, realizados em amostras de semieixos homocinéticos montados com tulipas temperadas e revenidas por indução são mostrados na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 Resultados dos ensaios mecânicos realizados em juntas homocinética montadas com tulipas revenidas por indução. *Teste interrompido.

Amostras	Vida em Fadiga por Torção	Torção
E	$\geq 1.518.240$ ciclos *	3.193 Nm
F	≥ 386.057 ciclos *	3.230 Nm
G	≥ 236.391 ciclos *	3.269 Nm

Como pode ser visto na Tabela 4.4, os ensaios de vida em fadiga por torção, também, foram interrompidos, pois o número de ciclos alcançado chega a ser de 4 a 30 vezes maior do que o número de ciclos exigido. Portanto, não há problema no ensaio de vida em fadiga por torção.

Mas ao analisarem-se os resultados dos ensaios de torção da Tabela 4.4 e a especificação exigida, indicada na Tabela 3.5, pode-se ver que essas amostras de semieixos, montados com tulipas revenidas por indução, foram aprovadas, pois atendem a especificação exigida. Mas ao compararem-se esses resultados com o resultado do revenimento convencional, pode-se ver que este último processo apresenta resultado superior ao do revenimento por indução.

Mas, mesmo o revenimento convencional apresentando resultado, no ensaio mecânico de torção, superior ao do revenimento por indução, a empresa decidiu escolher o processo de revenimento por indução para ser adicionado aos processos de produção da tulipa. Pois, trata-se de um processo muito mais rápido do que o revenimento convencional e, além disso, o revenimento convencional exigiria um deslocamento das peças, dentro da fábrica, desde a máquina de indução GH 1871 até o forno MM 0626, o que acrescentaria mais tempo ao tempo total de produção.

E, então, para tornar o processo de produção mais rápido possível, a empresa resolveu investir em uma nova máquina de indução, a GH 1135, para realizar apenas o processo de revenimento por indução, visto que, nos testes realizados neste trabalho, utilizou-se a mesma máquina de indução, a GH 1871, para realizar a têmpera e o

revenimento por indução. Essa nova máquina deve ser colocada em funcionamento no primeiro trimestre de 2012.

5.0 CONCLUSÕES

Após analisar os resultados obtidos nos experimentos realizados pode-se concluir que:

- O tratamento térmico de têmpera por indução realizado na haste da tulipa do novo projeto de junta homocinética da empresa GKN Driveline é um processo que atende as especificações de projeto, ou seja, os parâmetros de processo e a máquina GH 1871, utilizados no processo, produzem a dureza superficial e o perfil de têmpera, exigidos pelas especificações do projeto. Mas como se pode ver, a tulipa apenas temperada por indução não pode ser utilizada no novo projeto, pois ela é reprovada no ensaio mecânico de torção, ou seja, ela não atende a especificação de 3100 Nm exigida por esse ensaio mecânico.
- O revenimento convencional, uma das soluções proposta, utilizou o forno MM 0626 e os parâmetros de processo de 180 a 185 °C e de 90 minutos, os quais produziram uma dureza superficial de 660 HV, ou 58,2 HRc, e o perfil de profundidade de camada temperada que atendem as especificações exigidas. Além disso, o ensaio mecânico de torção apresentou um resultado, torque de 3.880 Nm, que pode ser considerado muito bom.
- O revenimento por indução, outra das soluções proposta, utilizou a máquina de indução GH 1871 e os parâmetros de processo de 8 a 10 kW, de 19 a 21 kHz e de 8 segundos de aquecimento, os quais produziram uma dureza superficial entre 670 e 680 HV, ou 58,8 e 59,2 HRc, e o perfil de profundidade de camada temperada que atendem as especificações exigidas. Além disso, os resultados obtidos no ensaio mecânico de torção, torque mínimo de 3.193 Nm, apresentaram uma melhora em relação aos resultados das amostras apenas temperadas. Essa melhora obtida pelo revenimento por indução garante a aprovação no ensaio mecânico de torção.
- Os resultados dos processos de revenimento aplicados mostraram-se satisfatórios, pois, além de garantirem as especificações de dureza superficial e de perfil de

têmpera exigidos pelo projeto, eles, também, garantiram a aprovação das tulipas nos ensaios mecânicos de torção. O que fez a empresa adotar o processo de revenimento após a têmpera por indução.

6.0 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

6.1 Novos Parâmetros

Como foi citada, a máquina de indução GH 1135 está sendo preparada, especialmente, para realizar o processo de revenimento por indução e, portanto, poderia ser realizado um estudo para otimizar os parâmetros de processo para essa nova máquina, além de projetar um novo indutor, exclusivo para o revenimento.

6.2 Material

Uma solução alternativa para solucionar o problema seria selecionar um novo material para produzir esse componente. Mas esta alternativa poderia exigir muito tempo para poder ser colocada em produção e, por isso, não foi uma proposta para este trabalho.

6.3 Dimensional

Uma segunda alternativa seria projetar uma nova tulipa, alterando as atuais medidas dimensionais. Esta solução foi descartada neste trabalho por se tratar de uma medida que demandaria um elevado tempo para poder ser colocada em teste e, por fim, em produção.

7.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AHN, S. et. al. **Microstructural Evolution and Mechanical Properties of Low Alloy Steel Tempered by Induction Heating**, Journal of Materials Processing Technology, p.54-58, 2005.

CHANDLER, H. et. al. **Heat Treater's Guide: Practices and Procedures for Irons and Steels**, Segunda Edição. ed. ASM International 1995.

CHIAVERINI, V. **Aços e Ferros Fundidos**, Sétima Edição. ed. ABM: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais 2008.

COLPAERT, H.; SILVA, A. **Metalografia dos Produtos Siderúrgicos Comuns**, Quarta Edição. ed. Blücher 2008.

DAVIS, J. **Surface Hardening of Steels: Understanding the Basics**, Primeira Edição. ed. ASM International 2002.

FERREIRA, C. et. al. **Tratamento Térmico por Indução Eletromagnética em Tubos de Aço SAE 1045 para Produção de Hastes de Sondagem Geológica**, REM jan. mar., p.23-26, 2004.

HAIMBAUGH, R. **Practical Induction Heat Treating**, Primeira Edição. ed. ASM International 2001.

Metals Handbook. **Properties and Selections: Irons, Steels and High-Performance Alloys**, Volume 1. ed. ASM International.

SILVA, A.; MEI, P. **Aços e Ligas Especiais**, Segunda Edição. ed. Blücher 2008.

TOTTEN, G. **Steel Heat Treatment: Metallurgy and Technologies**, Segunda Edição. ed. CRC Press: Portland State University 2006.

WEISS, K. et. al. **Induction Tempering of Steel**, Advanced and Materials & Processes 156 ago., p.19-23, 1999.

Semi-eixos Homocinéticos. (a) GKN Driveline.
<<http://gkndriveline.com/drivelinecms/opencms/pt/products/cvj-sideshafts/>> Acesso 20 Nov. 2011.

Juntas Deslizantes com Tripeça. (b) GKN Driveline.
<<http://gkndriveline.com/drivelinecms/opencms/pt/products/cvj-sideshafts/sideshaft-cv-joints/tripod-plunging-joints.html>> Acesso 20 Nov. 2011.

Juntas Fixas. (c) GKN Driveline.
<<http://gkndriveline.com/drivelinecms/opencms/pt/products/cvj-sideshafts/sideshaft-cv-joints/fixed-joints.html>> Acesso 20 Nov. 2011.