

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS,
METALÚRGICA E DE MATERIAIS

REGIS FABIANO DO AMARAL

COMPARATIVO DE EMPENAMENTO E MICROESTRUTURAL EM
CREMALHEIRAS DE AÇO SAE 1045 TEMPERADAS POR INDUÇÃO E POR
CONDUÇÃO

PORTO ALEGRE

2016

REGIS FABIANO DO AMARAL

**COMPARATIVO DE EMPENAMENTO E MICROESTRUTURAL EM
CREMALHEIRAS DE AÇO SAE 1045 TEMPERADAS POR INDUÇÃO E POR
CONDUÇÃO**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia, modalidade Acadêmica

Orientador: Prof. Dr. Alexandre da Silva Rocha

Porto Alegre

2016

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Reitor: Rui Vicenter Oppermann

Vice-Reitor: Jane Fraga Tutikian

ESCOLA DE ENGENHARIA

Diretor: Luiz Carlos Pinto da Silva Filho

Vice-Diretor: Carla Schwengber Caten

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO

Coordenador: Carlos Pérez Bergmann

Ficha Catalográfica

A485c AmaraI, Regis Fabiano do
 Comparativo de empenamento e microestrutural em cremalheiras de aço
 SAE 1045 temperadas por indução e por condução / Regis Fabiano do
 Amaral. – 2016.
 64 f. : il. color.
 Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul,
 Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas,
 Metalúrgica e de Materiais, Porto Alegre, BR-RS, 2016.
 Orientador: Alexandre da Silva Rocha.

 1. Cremalheira de aço. 2. Tratamento térmico. 3. Ensaio mecânicos.
 I. Rocha, Alexandre da Silva, orient. II. Título.

CDU: 629.3(043)

REGIS FABIANO DO AMARAL

**COMPARATIVO DE EMPENAMENTO E MICROESTRUTURAL EM
CREMALHEIRAS DE AÇO SAE 1045 TEMPERADAS POR INDUÇÃO E POR
CONDUÇÃO**

Esta dissertação de mestrado foi analisada e julgada adequada para obtenção do título de Mestre em Engenharia, área de concentração em Processos de Fabricação, e aprovada em sua forma final, pelo orientador e pela Banca Examinadora designada pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGE3M da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Prof. Dr. Alexandre da Silva Rocha

Prof. Dr. Carlos Pérez Bergmann

Aprovado em: ____/____/____

BANCA EXAMINADORA:

Dr. Carlos Raimundo Frick Ferreira, UFRGS _____

Prof. Dr. Vinicus Karlinski de Barcellos, UFRGS _____

Prof. Dr. Vinicius Martins, IFSul – Sapucaia do Sul -RS _____

Dedico este trabalho a minha avó
Alice Ferreira da Silva exemplo de
perseverança, dedicação e fé.

AGRADECIMENTOS

A todos que colaboraram direta ou indiretamente na elaboração deste trabalho, o meu reconhecimento.

A minha esposa Sílvia Regina Closs do Amaral.

Aos meus familiares Dejalme Peixoto, Sirlei Peixoto, Maitê Peixoto.

Ao meu afilhado estudante de engenharia Pedro Henrique Peixoto.

Ao professor Jaime Alvares Spim Junior (*in Memoriam*) pelo estímulo, dedicação e esforço pessoal proporcionado.

Ao professor Marlos Dias Diehl (*in Memoriam*), pelos ensinamentos no começo de minha jornada nesta Universidade.

Aos funcionários do Laboratório de Fundação da UFRGS, pelas sugestões e observações valiosas.

Ao bolsista de iniciação científica Douglas Rodrigues, pelo auxílio nas elaborações experimentais.

A DHB pelo fornecimento de amostras e equipamentos que permitiram o desenvolvimento deste trabalho.

Ao sofrido povo brasileiro, que através do seu trabalho viabiliza o desenvolvimento tecnológico e a universidade pública, gratuita e de qualidade.

RESUMO

COMPARATIVO DE EMPENAMENTO E MICROESTRUTURAL EM CREMALHEIRAS DE AÇO SAE 1045 TEMPERADAS POR INDUÇÃO E POR CONDUÇÃO

A microestrutura de uma peça temperada determina suas características mecânicas.

Dessa forma, torna-se fundamental conhecer os parâmetros que influenciam na formação da estrutura do componente tratado com função dos tratamentos térmicos aplicados, permitindo obter melhorias de qualidade de uma peça frente a sua aplicação. Métodos distintos podem ser empregados para obtenção da camada de têmpera.

Entretanto, esses métodos devem ser parametrizados adequadamente para garantir a qualidade do produto final. No trabalho em questão, aplicaram-se dois métodos distintos de têmpera: por indução e por condução para obtenção da camada martensítica, dureza e durabilidade requerida em cremalheiras de aço SAE 1045, utilizadas em mecanismo de direção automotiva. Fabricou-se um lote de peças, do qual metade das peças foram tratadas por indução e a outra por condução.

Após a têmpera e após o revenido, foi avaliado o nível de empenamento, a dureza superficial, a microdureza, a microestrutura formada. As peças após o término do processo de fabricação, foram montadas no sistema caixa de direção, sendo realizados ensaios de durabilidade e impacto dos mesmos. Os tratamentos realizados demonstraram resultados de empenamento, dureza, microestrutura e ensaios de durabilidade e impacto no produto final, dentro das especificações. O processo de têmpera por condução levou a melhor microestrutura, mais alta dureza e menores níveis de empenamento comparado com o processo de têmpera por indução. Mas, também constatou-se que é possível desenvolver melhorias no processo de indução para atingir-se resultados melhores.

Palavras-chave: Mecanismo de direção, cremalheira, tratamento térmico, empenamento.

ABSTRACT

COMPARISON OF WARPAGE AND MICROSTRUCTURE IN SAE 1045 STEEL RACKS QUENCHED BY INDUCTION AND BY CONDUCTION

The microstructure of a hardened part is determining its mechanical characteristics. Thus, the knowledge of parameters influencing the heat treated part's microstructure is of fundamental importance. This allows to obtain quality improvements for specific applications. Different methods can be used for the obtation of a hardened layer. However, in these methods the parameters have to be correctly set to reach the final product quality. In this work, two diferente techniques were applied, induction and conduction surface hardening to obtain a required martensitic layer depth, hardness and durability of SAE 1045 steel racks used in automotive driving systems. A batche of parts were manufactured, being half of the parts surface hardened by Induction and half by conduction. After hardening and after tempering, the warpage level, surface hardness, microhardness and microstructure were investigated. The parts were mounted in a steering gear system and then endurance tests and impact tests were carried out. The results of warpage levels, hardness, microstructure and endurance tests, as well as the impact tests were in the range of the specifications. The conduction hardening process leads to better microstructure, higher hardness and lower warpage levels compared to induction hardening. But it was found that the Induction hardening can be optimized to reach better results.

Keywords: steering gear, rack, heat treatment, warpage.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Diagrama TTT para uma liga ferro-carbono com composição eutetóide. A, austenita; B, Bainita; M, martensita; P, perlita.....	19
Figura 2 – Efeito do teor de carbono na transformação da austenita em martensita.....	20
Figura 3 - Efeito da temperatura de austenitização na taxa de formação da austenita a partir de uma microestrutura perlítica em um aço eutetóide	22
Figura 4 - Diagrama do equilíbrio ferro-carbono	22
Figura 5 - Divisão progressiva de um grão austenítico pelas placas de martensita	25
Figura 6 - Correlação entre tamanho de pacote de martensita e tamanho de grão austenítico.....	25
Figura 7 – Aumento na resistência da martensita com a diminuição do tamanho dos pacotes, D. A linha superior é para martensita com Fe-0,2%C; a linha inferior é para martensita com Fe-Mg.	26
Figura 8 – Têmpera por indução.....	27
Figura 9 – A relação entre temperatura, tensões e microestrutura.	30
Figura 10 - Classificação Martensítica	32
Figura 11 – Representação esquemática de uma caixa de direção.	36
Figura 12 – Cremalheira.....	37
Figura 13 – Fluxograma sintético da metodologia experimental.....	38
Figura 14 – (A) Aço SAE 1045, material base, microestrutura formada de ferrita e perlita, aumento 100x, (B) Aço SAE 1045, material base, microestrutura formada de ferrita e perlita 1000x, ambas atacada com Nital 3%	39
Figura 15 – Equipamento de medição e desempenho de cremalheiras.	41
Figura 16 – Pontos onde foram feitas as medidas de dureza superficial.....	41
Figura 17 – Regiões onde foram feitas as medidas da microdureza.	42
Figura 18 – Desenho representativo do local da retirada de amostras.	42
Figura 19 – Região de análise da microestrutra nas amostras.....	43
Figura 20 – Banco de teste para realização do teste de durabilidade.....	43
Figura 21 – Equipamento para ensaio de impacto.	44
Figura 22 – Peças apresentando empenamento após têmpera.....	45
Figura 23 - Gráfico Comparativo da medição do empenamento após os dois métodos de têmpera.	46

Figura 24 – Comparativo da medição do empenamento após os dois métodos de têmpera	46
Figura 25 – Medidas de dureza nos pontos indicados na figura 16, para o método de têmpera por indução	47
Figura 26 – Medidas de dureza nos pontos indicados na Figura 16, para o método de têmpera por condução	48
Figura 27 – Medidas de dureza nos pontos indicados na Figura 16, para o método de têmpera por indução e revenimento.	49
Figura 28 – Medidas de dureza nos pontos indicados na Figura 16, para o método de têmpera por condução e revenimento	49
Figura 29 – Peça 01, (A) temperada por indução, microestrutura constuída por martensita, (B) temperada por indução e revenida, microestrutura constuída por martensita revenida, ataque Nital 3%, 1000x	51
Figura 30 – Peça 02, (A) temperada por indução, microestrutura constuída por martensita, (B) temperada por indução e revenida, microestrutura constuída por martensita revenida, ataque Nital 3%, 1000x	51
Figura 31 – Peça 03, (A) temperada por indução, microestrutura constuída por martensita, (B) temperada por indução e revenida, microestrutura constuída por martensita revenida, ataque Nital 3%, 1000x	51
Figura 32 – Peça 01, (A) temperada por condução, microestrutura constuída por martensita, (B) temperada por condução e revenida, microestrutura constuída por martensita revenida, ataque Nital 3%, 1000x	52
Figura 33 – Peça 02, (A) temperada por condução, microestrutura constuída por martensita, (B) temperada por condução e revenida, microestrutura constuída por martensita revenida, ataque Nital 3%, 1000x	52
Figura 34 – Peça 03, (A) temperada por condução, microestrutura constuída por martensita, (B) temperada por condução e revenida, microestrutura constuída por martensita revenida, ataque Nital 3%, 1000x	52
Figura 35 – Cremalheiras tratadas termicamente por indução - (A) - Gráfico do torque a vazio antes da ciclagem no banco de teste, (B) - Gráfico do torque a vazio após os 50000 ciclos no banco de teste	54
Figura 36 – Cremalheiras tratadas termicamente por condução - (A) - Gráfico do torque a vazio antes da ciclagem no banco de teste, (B) - Gráfico do torque a vazio após os 50000 ciclos no banco de teste	54

Figura 37 – Cremalheira após o teste de impacto, não apresentando defeito.....	55
Figura 38 - Cremalheira após o teste de impacto, não apresentando defeito.	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resultado de Composição química do aço em % peso.....	39
Tabela 2 – Média e desvio padrão do empenamento após têmpera por indução e condução.....	46
Tabela 3 - Comparativo da medição do empenamento após os dois métodos de têmpera e revenimento.....	47
Tabela 4 - Microdureza após o revenimento.....	50
Tabela 5 – Classificação do tamanho da martensita, nos métodos de têmpera indutiva e condutiva.	53
Tabela 6 – Classificação do tamanho da martensita, nos métodos de têmpera indutiva e condutiva seguidas de revenido.	53

LISTA DE ABREVIATURAS

CCC	Cúbico de Corpo Centrado
CFC	Cúbico de Face Centrada
Fe ₃ C	Cementita; Carboneto de Ferro
TCC	Tetragonal de Corpo Centrado
TTT	Temperatura, Tempo, Transformação
Mi	Martensita Inicial
Mf	Martensita Final
TTO	Equipamento de Tratamento Térmico

LISTA DE SÍMBOLOS

F	Força
S	Área
δ	Austenita
$^{\circ}\text{C}$	Celsius
s	Segundos

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	17
2. OBJETIVOS	17
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
3.1 TRATAMENTO TÉRMICO	18
3.2 PRINCÍPIOS DE METALURGIA DO TRATAMENTO TÉRMICO POR INDUÇÃO ELETROMAGNÉTICA	20
3.2.1 A Formação da Austenita	21
3.2.2. A Formação da Austenita a partir de Estruturas de Ferrita e Perlita	23
3.2.3. A Martensita e a sua Correlação com a Austenita.....	24
3.3 TÊMPERA SUPERFICIAL	26
3.4 REVENIDO	27
3.5 PROPRIEDADES MECÂNICAS	28
3.5.1 Dureza	28
3.5.1.2 – Microdureza MicrodurezaVickers	29
3.5.2 Empenamento	29
3.6 PROPRIEDADES METALÚRGICAS	31
3.6.1 Conformidade Microestrutural	31
3.6.2 Sanidade.....	32
3.7 SISTEMA CAIXA DE DIREÇÃO TIPO PINHÃO/CREMALHEIRA	35
3.7.1 Cremalheira	36
4. MATERIAIS E MÉTODOS	38
4.1 PLANEJAMENTO DOS EXPERIMENTOS	38
4.2 MATERIAL.....	39
4.3 TÊMPERA POR INDUÇÃO	40
4.4 TÊMPERA POR CONDUÇÃO	40
4.5 REVENIMENTO	40
4.6 MEDIÇÃO DO EMPENAMENTO	40
4.7 ENSAIO DE DUREZA E MICRODUREZA	41
4.8 ANÁLISE METALOGRÁFICA	42
4.9 MONTAGEM DA CAIXA DE DIREÇÃO	43
4.10 ENSAIO DE DURABILIDADE	43

4.11 ENSAIO DE IMPACTO	44
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	45
5.1 EMPENAMENTO.....	45
5.1.1 Empenamento após a Têmpera.....	45
5.1.3 Empenamento após o Revenimento	46
5.2 ENSAIO DE DUREZA	47
5.2.1 Dureza Superficial após Têmpera por Indução	47
5.2.2 Dureza Superficial após Têmpera por Condução.....	48
5.2.3 Dureza Superficial após Revenimento	48
5.2.4 – Microdureza após Revenimento.....	49
5.3 CARACTERIZAÇÃO METALÚRGICA.....	50
5.3. 1 Microestrutura das Cremalheiras	50
5.3. 2 Comparativo Microestrutural entre os Métodos	53
5.4 CARACTERIZAÇÃO DE DURABILIDADE	53
5.5 CARACTERIZAÇÃO DE IMPACTO.....	55
6. CONCLUSÕES	56
7 PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS.....	57
REFERÊNCIAS.....	58
APÊNDICE A.....	61
APÊNDICE B	62
APÊNDICE C	63
APÊNDICE D.....	64

1. INTRODUÇÃO

Uma vez que o Brasil é um dos maiores montadores de automóveis do mundo e desenvolvendo papel importante neste segmento fabril, torna-se evidente o desenvolvimento de novas tecnologias que visem o incremento desta produção, sem prejuízo à qualidade e produtividade. Nesse sentido tem-se um consumidor final cada vez mais exigente, fazendo com que a indústria automotiva reúna esforços massivos em pesquisa e desenvolvimento, buscando atendê-lo, estendendo cada vez mais os prazos de garantia do veículo. Embora o Brasil ocupe a sétima posição entre os maiores produtores de automóveis, sua indústria de autopeças, em especial o setor de mecanismo de direção, encontra-se tecnicamente muito dependente dos grandes polos mundiais de desenvolvimento tecnológico. Tal grau de importância é sustentado por uma ávida procura pela substituição de componentes automobilísticos produzidos com materiais de ligas leves, objetivando o menor peso nos veículos e conseqüentemente menor consumo de combustível. Esses fatores fazem com que haja um aumento de produção, ganho de qualidade e melhor desempenho do produto.

Nesse trabalho foram comparados dois processos de têmpera: o indutivo e o condutivo, aplicados para fabricação de cremalheiras, pertencente ao sistema de direção do veículo. Realizou-se comparativo entre características metalúrgicas e propriedades mecânicas.

2. OBJETIVOS

Objetivou-se a aplicação dos métodos distintos de têmpera por indução e por condução em um componente automotivo, denominado cremalheira e produzido em aço SAE 1045. Para análise do empenamento e correlação com a formação microestrutural martensítica.

Objetivos específicos:

Comparar as microestruturas das peças permitindo uma correlacionar com os métodos de têmpera empregados e o tamanho das agulhas de martensita;

Verificar a influência do processo de aquecimento de têmpera e da velocidade de resfriamento na evolução das características camada, microestrutura e dureza das peças;

Analisar a influencia das direções e intensidades de aquecimento e resfriamento no empenamento das peças;

Comparar o grau de empenamento nas peças após o aquecimento pelos dois métodos de têmpera por indução e condução.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

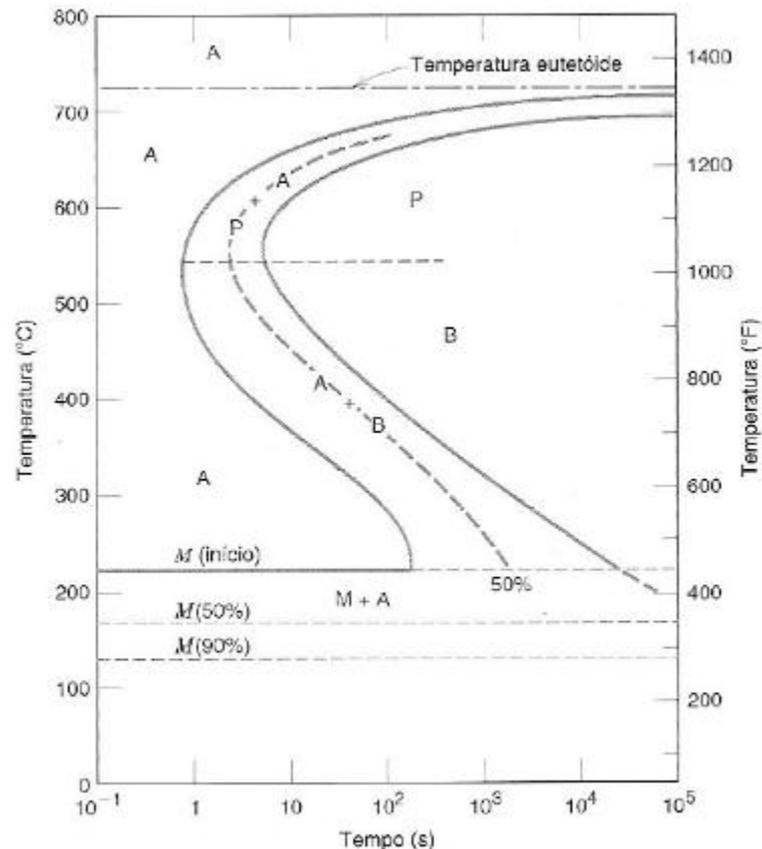
3.1 TRATAMENTO TÉRMICO

Nos aços, a austenita é a fase em equilíbrio em temperaturas elevadas que se transforma em martensita sob-resfriamento rápido o suficiente para alterar as condições de equilíbrio da fase ferrita. A transformação martensítica é adifusional, e por essa razão a martensita tem exatamente a mesma composição que a austenita, até 2% de carbono. Como a difusão é suprimida, normalmente pelo resfriamento rápido, os átomos de carbono não se dividem entre cementita e ferrita, e sim são aprisionados nas posições octaédricas de uma estrutura cúbica de corpo centrado (CCC), produzindo então uma nova fase, a martensita. A solubilidade de carbono em uma estrutura (CCC) é enormemente excedida quando a martensita se forma, esta assume então uma estrutura tetragonal de corpo centrado (TCC) (KRAUSS, 1995).

A martensita é uma fase particular que se forma nos aços. Ela tem sua própria estrutura cristalina e composição e é separada de outras eventuais fases por interfaces bem definidas, entretanto ela é uma fase metaestável que está presente apenas porque a difusão foi suprimida. Se a martensita for aquecida a uma temperatura onde os átomos de carbono tenham mobilidade, estes difundem dos sítios octaédricos para formar carbonetos. Como resultado, a tetragonalidade é aliviada, e a martensita é substituída por uma mistura de ferrita e cementita como previsto pelo diagrama de fase Fe-C, e desde que se trate de um aço ao carbono (KRAUSS, 1995).

A martensita é formada por um mecanismo de cisalhamento, no qual vários átomos se movimentam cooperativamente e quase simultaneamente para efetuar a transformação, mecanismo este bem diferente do movimento de átomo por átomo através da interface durante as transformações difusionais. A cinética da transformação martensítica é atérmica, uma vez que a conversão da microestrutura austenítica em martensítica acontece continuamente com o decréscimo da temperatura durante resfriamento suficientemente rápido e contínuo, conforme Figura 1.

Figura 1 - Diagrama TTT para uma liga ferro-carbono com composição eutetóide. A, austenita; B, Bainita; M, martensita; P, perlita.



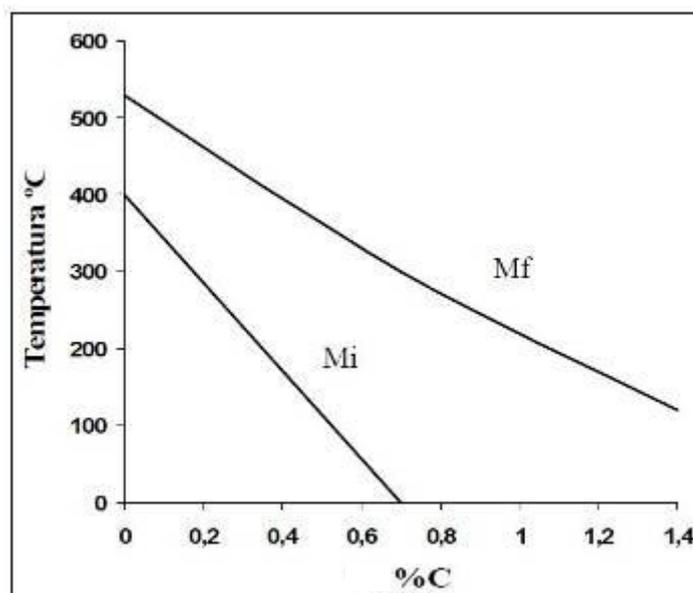
Fonte: CALLISTER, 2002.

Em temperaturas mais baixas, na faixa aproximada de 200°C a 100°C, ocorre uma nova transformação, a qual independente do tempo, como as linhas M_i e M_f indicam, na Figura 2, surge mais um novo constituinte denominado martensita. A martensita é uma fase metaestável que aparece com resfriamento brusco da austenita. Assim, a transformação ocorre por cisalhamento da estrutura, sem difusão. O nome transformação martensítica é aplicado às reações no estado sólido que ocorrem por cisalhamento sem mudanças na composição química e aparecem em vários sistemas, sendo o mais conhecido ferro-carbono. Esse constituinte apresenta-se na forma de agulhas, com coloração clara, dureza elevada, cerca de 65 a 67 HRC, conforme teorias associada a velocidade de resfriamento (KRAUSS, 1995)..

A martensita nos aços apresenta duas morfologias, agulhas e placas. As agulhas, formadas em aços de baixo e médio carbono, são placas longas e finas que se formam lado a lado, e estão alinhadas paralelamente entre si. As agulhas são agrupadas em entidades estruturais maiores, os blocos. Os detalhes microestruturais desse tipo de martensita são muito finos para serem revelados por microscopia ótica. As placas descrevem propriamente a forma das unidades de martensita que se formam em aços de alto teor de carbono (KRAUSS, 1995).

O aumento do teor de carbono nos aços, diminui as temperaturas de início (Mi) e fim (Mf) de formação da martensita, conforme mostrado na Figura 2

Figura 2 – Efeito do teor de carbono na transformação da austenita em martensita.



Fonte: HONEYCOMBE *et al*, 1995.

Deste modo, um aço com 0,8% de carbono resfriado bruscamente até a temperatura ambiente apresentará, aproximadamente 80% de martensita e 20% de austenita não transformada, denominada de austenita retida. Em aços ligados, o volume de austenita retida pode ser mais alto a temperatura ambiente. Para que essa austenita transforme-se em martensita é necessário baixar a temperatura a valores inferiores a 0°C. Gás carbônico (-75°C) sólido ou nitrogênio líquido (-197°C) são empregados neste tratamento, denominado de tratamento sub zero (HONEYCOMBE *et al*, 1995).

3.2 PRINCÍPIOS DE METALURGIA DO TRATAMENTO TÉRMICO POR INDUÇÃO ELETROMAGNÉTICA

O aquecimento por indução é um processo muito rápido. A taxa de aquecimento excede frequentemente o valor de 100°C/s e a alta taxa de aquecimento afeta drasticamente a cinética da formação da austenita, que desloca esta transformação para as temperaturas mais altas (RUDNEV, 2003).

As temperaturas de tratamento apropriadas para aços dependem não somente da taxa de aquecimento, mas são funções da microestrutura anterior e também da concentração de carbono. (RUDNEV, 2003)

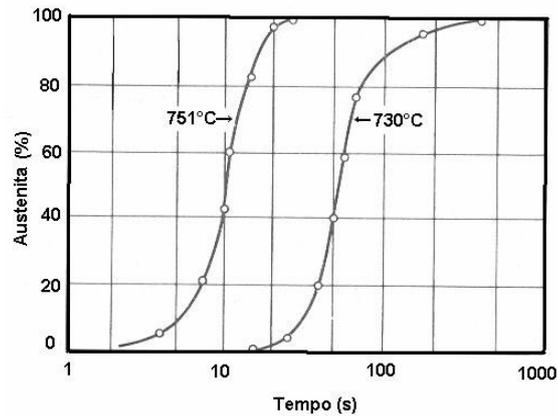
Tais microestruturas, na medida em que permitem reduzir a temperatura requerida para formação da austenita, permitem a resposta rápida e consistente da liga ao tratamento, com uma quantidade mínima de crescimento de grão, menor distorção de forma e tamanho, mínimo de energia requerida e de superfície oxidada. Se a microestrutura inicial de uma peça de aço tiver uma quantidade significativa de perlita grosseira com aglomerados ou faixas de ferrita, ela apresentará maiores dificuldades na obtenção de um tratamento térmico de têmpera e revenimento que resulte em propriedades mecânicas desejadas. As grandes áreas, (conjuntos ou faixas) de ferrita requerem um longo tempo para a homogeneização da microestrutura e, ao fim da têmpera, um complexo de microestrutura ferrítica-martensítica poderá ser formado. Pontos macios e duros dispersados caracterizam esta estrutura de austenitização por indução não uniforme, o que resulta em propriedades mecânicas indesejadas. Temperaturas mais altas e tempos mais longos de permanência são requeridos para austenitizar tais estruturas. Recomenda-se, portanto, maior cuidado ao tratar as microestruturas zonadas e segregadas das peças no estado de entrega. Os aços com grandes carbonetos estáveis têm também resposta ruim ao endurecimento por indução e implicam na necessidade de ter o aquecimento prolongado e temperaturas mais altas para a austenitização. Um tempo mais longo de fornecimento de calor conduz ao crescimento do grão, ao aparecimento da martensita grosseira, zona de transição estendida, maior superfície de oxidação / decarbonetação, além de maior distorção da forma (RUDNEV, 2004).

3.2.1 A Formação da Austenita

A formação da austenita em aços se dá por nucleação e crescimento com o aumento da temperatura, que por sua vez aumenta a mobilidade atômica. A força motriz para o crescimento de grão é a redução da área de contorno de grão por unidade de volume, reduzindo a energia de superfície. Tanto a força motriz termodinâmica como a mobilidade atômica se tornam maiores com o aumento da temperatura e com isso tanto a taxa de nucleação como a taxa de crescimento deverão aumentar continuamente com o aumento da temperatura (BROOKS, 1992).

A Figura 3 mostra o aumento na velocidade de formação da austenita em um aço perlítico com 0,8% de carbono, quando a temperatura de austenitização foi aumentada de 730°C para 751°C (KRAUSS, 1990).

Figura 3 - Efeito da temperatura de austenitização na taxa de formação da austenita a partir de uma microestrutura perlítica em um aço eutetóide

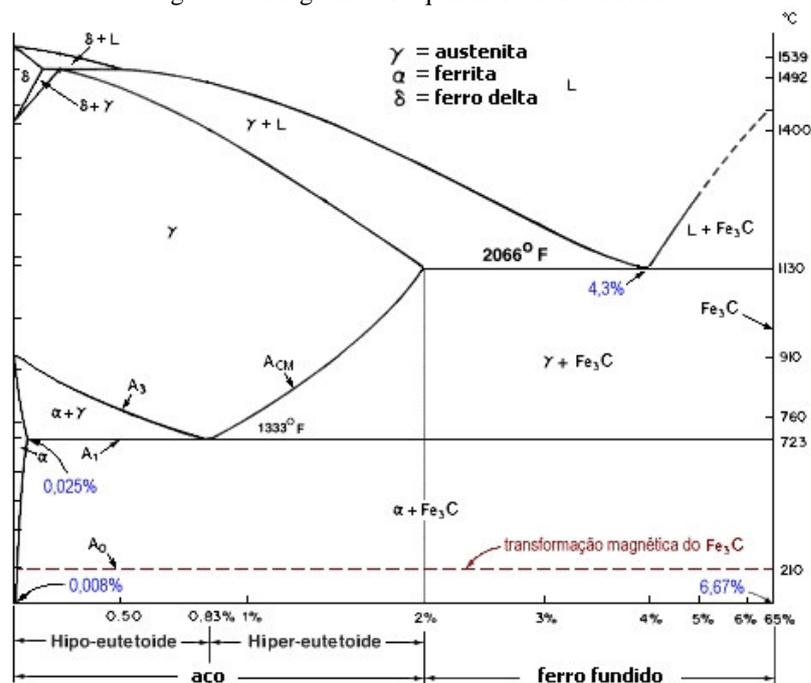


Fonte: Krauss, 1990

A concentração de carbono na austenita aumenta continuamente com o tempo na medida em que mais carbonetos são dissolvidos, alcançando o valor do equilíbrio que é dado pelo limite de solubilidade na temperatura de interesse (BROOKS, 1992).

A Figura 4 mostra o diagrama do equilíbrio ferro-carbono, que mostra o campo de estabilidade da austenita (δ).

Figura 4 - Diagrama do equilíbrio ferro-carbono



Fonte: Rudnev, 2003

A presença dos elementos de liga nos aços também altera a estabilidade das fases. O magnésio e o níquel, por exemplo, são estabilizadores de austenita; o silício, o cromo e o

nióbio são estabilizadores de ferrita. Os estabilizadores de ferrita e austenita expandem os respectivos campos de estabilidade das fases. Os estabilizadores da austenita abaixam a temperatura eutetóide, expandindo a faixa acima da qual a austenita é estável. (KRAUSS, 1990).

Para o aquecimento lento, quase no equilíbrio, algumas fórmulas empíricas, que mostram os efeitos dos elementos de liga, foram desenvolvidas por análise de regressão de grande quantidade de dados experimentais, como por exemplo as fórmula elaboradas por Andrews para obter as temperaturas críticas de início de formação da austenita (Ac_1) e de final de formação da austenita (Ac_3), sendo a composição química dada em % em peso . (KRAUSS, 1990).

$$Ac_1 = 723 - 10,7Mn - 16,9Ni + 29,1Si + 16,9Cr + 290As + 6,38W \quad (1)$$

$$Ac_3 = 910 - 203 \sqrt{C} - 15,2Ni + 44,7Si + 104V + 31,5Mo + 13,1W \quad (2)$$

3.2.2. A Formação da Austenita a partir de Estruturas de Ferrita e Perlita

A formação da austenita em aços hipoeutetóides, a partir de uma microestrutura de ferrita primária e perlita, é bem diferente daquela formada a partir de uma microestrutura toda perlítica. As regiões perlíticas tornam-se instáveis acima da temperatura Ac_1 , que é a temperatura de início de formação da austenita. Então, no aquecimento para uma temperatura acima de Ac_1 , as regiões perlíticas convertem-se em austenita e a ferrita primária é inicialmente estável. Os contornos entre a austenita e a ferrita se movem para diminuir a quantidade de ferrita, até que toda a ferrita seja consumida. Simultaneamente, o carbono nas regiões austeníticas estará se difundindo para regiões de baixa concentração de carbono, para aumentar a concentração na austenita recém formadas das regiões ferríticas (BROOKS, 1992).

3.2.3. A Martensita e a sua Correlação com a Austenita

Nos aços, a austenita é a fase que pode se transformar em martensita no resfriamento rápido. A transformação martensítica é adifusional e, portanto, a martensita possui exatamente a mesma concentração de carbono presente na austenita. Assim que a difusão dos átomos de carbono é contida pelo resfriamento rápido, os mesmos não se difundem para formar a ferrita e cementita, mas são instantaneamente aprisionados nos sítios octaédricos da estrutura cúbica de corpo centrado, produzindo um novo constituinte, a martensita. A temperatura de início de formação da martensita diminui significativamente com o aumento da concentração de carbono nos aços. O carbono em solução sólida aumenta a resistência ao cisalhamento da austenita e, portanto, uma grande força motriz é requerida para iniciar o cisalhamento para a formação da martensita em ligas com alta concentração de carbono. Elementos de liga também influenciam a temperatura M_i dos aços, sendo que todos os elementos de liga diminuem a temperatura M_i , exceto o cobalto. A equação (3) desenvolvida por Andrews, fornece bons resultados entre a temperatura M_i calculada e medida experimentalmente sendo a composição química dada em % em peso. (KRAUSS, 1990).

$$M_i(^{\circ}C) = 512 - 453C - 16,9Ni + 15Cr - 9,5Mo + 217(C)^2 - 71,5(C)(Mn) + 67,6(C)(Cr) \quad (3)$$

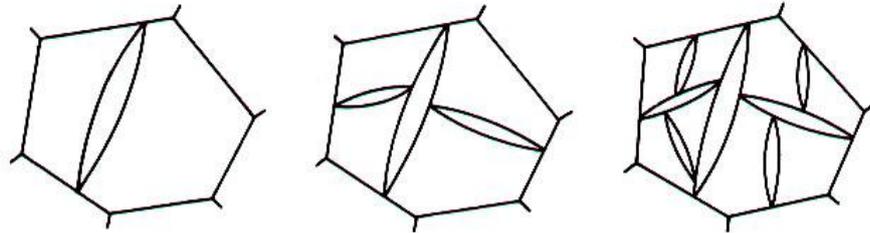
Com respeito à transformação, os contornos de grão austeníticos são sítios preferenciais para a nucleação das fases pro-eutetóides e perlita. Portanto, se o tamanho de grão austenítico em um aço é grosseiro, poucos sítios de nucleação estão disponíveis e a transformação por difusão controlada da austenita é retardada. Como resultado, a temperabilidade martensítica é aumentada (KRAUSS, 1990).

Foi observado também que o tamanho de grão austenítico afeta a resistência mecânica da martensita em aços de baixo carbono. Quando o tamanho de grão da austenita é reduzido, ocorre um aumento significativo da resistência (KRAUSS, 1990).

As ripas de martensita formam unidades de martensita em arranjos paralelos, chamados pacotes, os quais subdividem o grão austenítico prévio, e cada pacote é efetivamente um grão. A orientação específica vem da relação entre austenita e martensita, que exclui a possibilidade das placas martensíticas se estenderem através do contorno de grão da fase austenita. Evidentemente, o tamanho de grão determina o tamanho da primeira placa a se formar, que quase sempre se estende de contorno a contorno. A primeira placa divide o

grão austenítico em duas regiões. As placas que se formam nessas regiões são pequenas e tem uma orientação diferente como mostra a Figura 5 (OLSON, 1992).

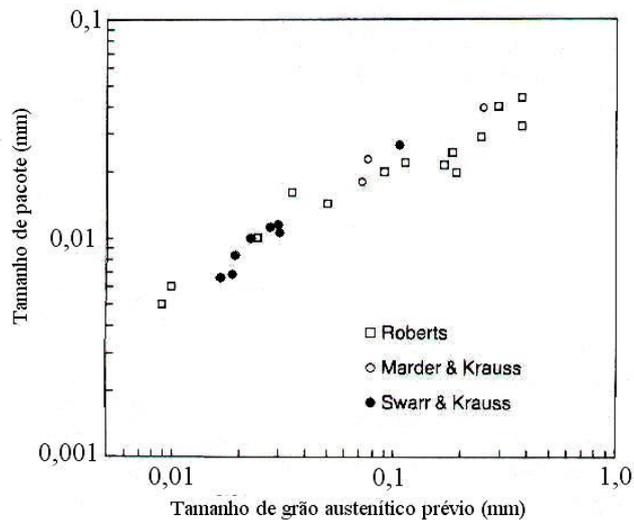
Figura 5 - Divisão progressiva de um grão austenítico pelas placas de martensita



Fonte: Lee, 2006

Como a divisão do grão em regiões, cresce o volume médio das placas decresce Lee, a Figura 6 mostra que tamanho de pacote está diretamente relacionado com tamanho de grão austenítico, e ajuda a explicar porque a resistência da ripa de martensita pode ser relacionada com tamanho de grão prévio da austenita ou tamanho de pacote (KRAUSS, 1990).

Figura 6 - Correlação entre tamanho de pacote de martensita e tamanho de grão austenítico.

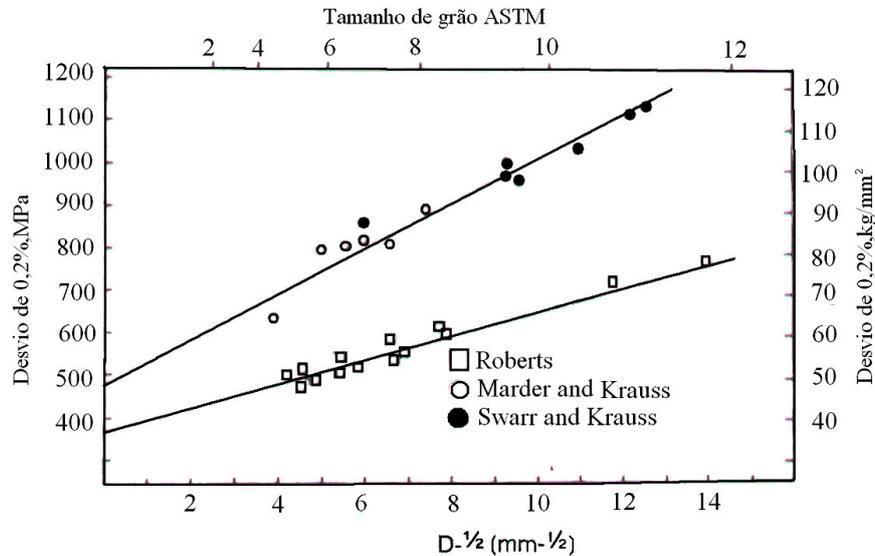


Fonte: Krauss, 1990

Desta maneira, tanto o tamanho do pacote de martensita como o tamanho de grão austenítico podem ser correlacionados com propriedades mecânicas. A Figura 7 mostra o aumento do limite de escoamento com o decréscimo do tamanho dos pacotes de martensita

em uma liga de Fe-0,2%C. Tamanho dos pacotes (D) é representado graficamente no eixo $D^{-1/2}$, no qual é relacionado para como uma representação gráfica de Hall-Petch (KRAUSS, 1990).

Figura 7 – Aumento na resistência da martensita com a diminuição do tamanho dos pacotes, D. A linha superior é para martensita com Fe-0,2%C; a linha inferior é para martensita com Fe-Mg.



Fonte: Krauss, 1990

3.3 TÊMPERA SUPERFICIAL

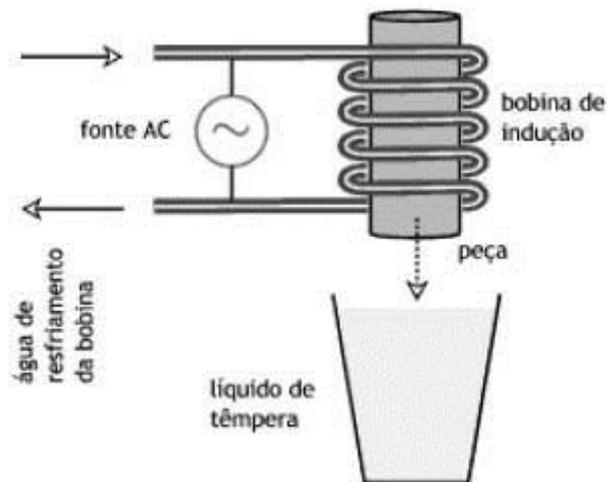
Esta operação tem por objetivo produzir martensita somente em uma camada externa da peça, produzindo assim endurecimento superficial. Aplicada a peças que por sua dimensão, forma ou especificação técnica queira tão somente o endurecimento de parte desta, produzindo assim uma camada externa com elevada dureza e resistente ao desgaste, mas mantendo as propriedades de ductilidade e tenacidade do núcleo. Os processos que compõem a têmpera superficial são têmpera por indução e têmpera por condução (SILVA e MEI, 2008).

Na têmpera por indução a peça é submetida a um rápido aquecimento de fora para dentro e logo após ela é resfriada por ação de um meio de têmpera (ar, água, polímero ou óleo). Com os parâmetros de aquecimento controlados, apenas a superfície é endurecida pela têmpera, pois o interior não atinge a temperatura de transformação (SILVA e MEI, 2008).

O calor é gerado na própria peça por indução eletromagnética, utilizando-se, para isso, bobinas de indução através das quais flui uma corrente elétrica alternada de alta ou baixa frequência, dependendo das dimensões e profundidade de camada desejada na peça. Em geral,

a bobina tem algum meio de refrigeração para prevenir o próprio aquecimento, como a passagem de água no seu interior. Por meio desta técnica pode-se controlar a profundidade de aquecimento, e aplicar em peças de formatos variados. A Figura 8 exibe um esquema simplificado da têmpera por indução; (SILVA e MEI, 2008); (CHIAVERINI, 1979).

Figura 8 – Têmpera por indução.



Fonte: Silva e Mei, 2008

Logo após o ciclo de aquecimento, a peça é submetida ao meio de resfriamento de têmpera que pode ser por imersão ou por jatos de água, provenientes de uma ducha, que fica logo abaixo da bobina e desloca-se juntamente com a mesma (SILVA e MEI, 2008).

3.4 REVENIDO

O revenido busca corrigir os excessos da têmpera, aliviar ou eliminar totalmente as tensões, bem como adequar a dureza, e consequente fragilidade do material, melhorando com isso a ductilidade e resistência ao choque. A operação de revenido é realizada no aço, imediatamente após têmpera, a temperatura abaixo da zona crítica. A temperatura será escolhida de acordo com os resultados finais desejados: aliviar tensões ou eliminá-las completamente e produzir de certo modo redução da dureza. (SILVA e MEI, 2008); (HONEYCOMBE *et al*, 1995).

3.5 PROPRIEDADES MECÂNICAS

3.5.1 Dureza

Dureza é a propriedade mecânica relacionada à resistência que o material tem quando pressionado por outro material ou por marcadores padronizados, apresenta ao risco ou a formação de uma marca pontual. No caso dos metais, dureza pode ser descrita como a medida da resistência a deformação plástica. No entanto, esta definição pode variar. Para os metalúrgicos dureza é a resistência a indentação; para os engenheiros projetistas é uma medida de tensão de escoamento; para os engenheiros de lubrificação é a resistência ao desgaste e ao risco e, para os engenheiros de usinagem, é a resistência ao corte (SOUZA, 1982).

Pode-se definir dureza como a resistência que um material oferece à penetração de outro em sua superfície. O ensaio de dureza pode ser feito em peças acabadas, deixando apenas uma pequena marca, às vezes quase imperceptível. Essa característica faz dele um importante meio de controle da qualidade do produto (DINIZ, 2004).

A maior parte dos ensaios de dureza é baseada em alguma forma de indentação. Existem diversos tipos de ensaios para determinar a dureza, entre eles devem ser destacados os ensaios de indentação estática. Nestes ensaios, uma esfera ou pirâmide de diamante é forçada sobre o material a ser ensaiado. A relação entre a força e a área ou profundidade da indentação apresenta a medida de dureza. Existem dois métodos de ensaios de dureza, os que utilizam a profundidade de penetração, e os ensaios que empregam a medida do diâmetro/diagonais para determinar a dureza. Desta forma os métodos podem ser classificados como macro e micro dureza (SOUZA, 1982).

Para materiais duros, o objeto penetrante é um cone de diamante com ângulo de vértice de 120°. Esta escala é chamada Rockwell C ou HRC. Onde é aplicada uma carga padrão definida em normas e a dureza é dada pela profundidade de penetração [Dinis, 2004].

Neste método, a carga do ensaio é aplicada em etapas, ou seja, primeiro se aplica uma pré-carga, para garantir um contato firme entre o penetrador e o material ensaiado, e depois aplica-se a carga do ensaio propriamente dita (DINIZ, 2004).

A leitura do grau de dureza é feita diretamente num mostrador acoplado à máquina de ensaio, de acordo com uma escala pré determinada, adequada à faixa de dureza do material. Para camadas de têmpera e medidas internas a esta é usado microdureza Vickers, onde é usada uma pirâmide de diamante com ângulo de diedro de 136° que é comprimida, com uma força arbitrária F , contra a superfície do material. Calcula-se a área S da superfície impressa pela medição das suas diagonais. E a microdureza Vickers HV é dada por F/S (DINIZ, 2004).

Dureza Rockwell

O ensaio de dureza Rockwell consiste em indentar o material com um cone de diamante ou indentador de esfera de aço endurecido. O Indentador é pressionado contra a superfície do corpo de prova com uma pré-carga. Quando o equilíbrio é atingido, um dispositivo indicativo que segue os movimentos do indentador e responde a suas variações de profundidade de penetração é ajustado para a posição zero. Ainda com a pré-carga aplicada, uma segunda carga é introduzida, aumentando a penetração, atingindo novamente o equilíbrio a carga é removida, mantendo-se a pré-carga. A remoção da carga provoca uma recuperação parcial, reduzindo a profundidade da penetração. O aumento permanente na profundidade da penetração resultante da aplicação e remoção da carga é usado para calcular o valor da dureza Rockwell (SOUZA, 1982).

3.5.1.2 – Microdureza Vickers

O ensaio de microdureza Vickers consiste em indentar o material sob teste com um indentador de diamante, na forma de uma pirâmide reta de base quadrada e um ângulo de 136° entre as faces opostas, utilizando uma carga de 1 a 100 kgf (MELO, 2014).

A carga plena é aplicada normalmente durante um tempo de 10 a 15 segundos. As duas diagonais da indentação deixadas na superfície do material depois da remoção da carga são medidas usando-se uma lente acoplada no próprio microdurômetro. Com os valores lidos calcula-se a média aritmética. A seguir calcula-se a área da superfície inclinada da indentação. A microdureza Vickers é o quociente obtido dividindo a carga (em kgf) pela área da indentação (MELO, 2014).

3.5.2 Empenamento

O empenamento está associado a distorção de forma oriunda de tensões residuais, que são produzidas no material e nos componentes mecânicos durante o processo de fabricação em vários processos, e todos os processos de manufatura irão introduzir tensões residuais no componente fabricado. As origens das tensões residuais são relacionadas a processos químicos, térmicos ou mecânicos: (NOYAN e COHEN, 1987)

Deformação plástica: forjamento, laminação, extrusão, shot-peening, dentre outros. Ocorre principalmente onde há deformação plástica não uniforme no material.

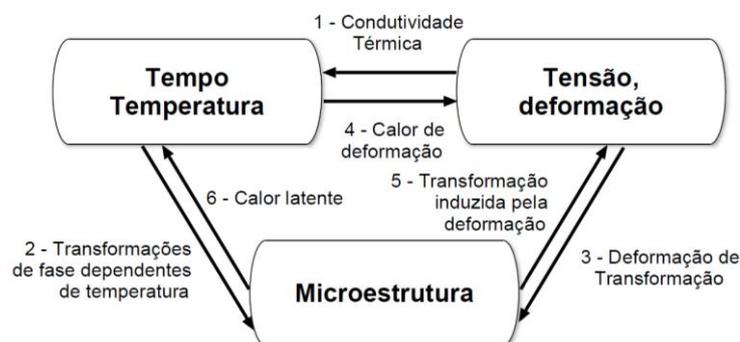
Durante processo de fabricação: usinagem, soldagem, eletrodeposição, dentre outros.

Durante tratamentos térmicos, termoquímicos ou ciclos térmicos: nitretação, PVD, CVD, cementação, têmpera, fundição, dentre outros. Ocorre principalmente onde existe variação de temperatura não uniforme na peça durante um ciclo de aquecimento e resfriamento ou varizações de composição química na peça.

Todos os processos mecânicos de fabricação que envolve deformação plástica não uniforme, gradientes térmicos e/ou transformações de fase, produzirão um componente com tensões residuais, seja ela elevada ou não. Estas tensões residuais afetarão diretamente as propriedades do material em relação a resistência a fadiga, resistência a corrosão, resistência a ruptura (LU, 2002).

As tensões residuais são consequências das interações do material com o meio, e os fatores que a alteram são: tempo, temperatura, tensão, deformação e microestrutura, conforme ilustrado na Figura 9. As características do material que influenciam as tensões residuais são condutividade térmica, calor específico, coeficiente de dilatação, módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson, plasticidade, termodinâmica e cinética das transformações, mecanismos de transformações e transformações plásticas (BHADESHIA, 2002).

Figura 9 – A relação entre temperatura, tensões e microestrutura.



Fonte: Bhadeshia, 2002

Na Figura 9 pode-se observar que para os componentes de conformação mecânica os fatores mais importantes a serem considerados são: a transformação de forma induzida pela deformação que afeta a microestrutura do material e as tensões de deformação, que também influenciarão muito na geração, distribuição e redistribuição das tensões residuais no

material. Outros fatores também poderão ocorrer em menor escala nos processos de conformação mecânica com menor contribuição para distorções. Para a etapa de tratamento térmico por indução os fatores mais importantes a serem considerados são: microestrutura, e temperatura de tratamento, estas propriedades estão diretamente relacionadas com as transformações de fase que ocorrem durante o tratamento térmico. Desta forma, todos os fatores podem influenciar na geração de tensões residuais em uma rota de fabricação partindo de processos de conformação mecânica e terminando com tratamento térmico, alguns com maior influência e outros com menor (NUNES, 2012).

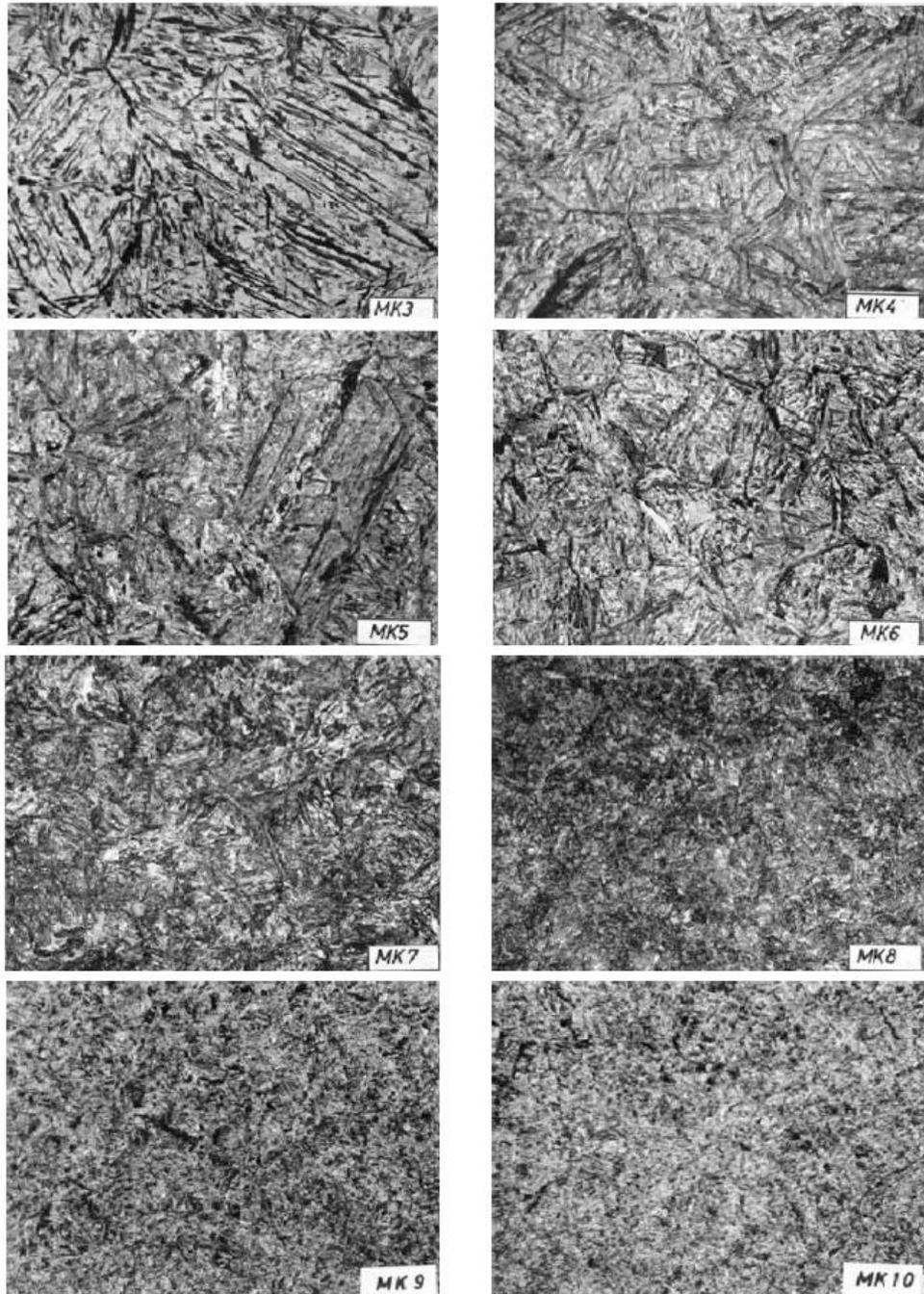
Empenamento é uma variação de forma, ou seja, uma distorção de forma, portanto a norma define o termo “distorção” com sendo alteração dimensional + alteração de forma. Apesar de estas duas alterações poderem ocorrer separadamente, a execução de um tratamento térmico ou termoquímico, quase sempre, provoca a superposição de ambas. Distorções inevitáveis são aquelas decorrentes das alterações que ocorrem durante as etapas de difusão (processos termoquímicos), austenitização e têmpera dos aços. Também são inevitáveis as distorções causadas pelas tensões térmicas, causadas pelos gradientes de temperaturas que se formam durante o aquecimento (expansão) e o resfriamento (contração) de peças. (DIN 17014)

3.6 PROPRIEDADES METALÚRGICAS

3.6.1 Conformidade Microestrutural

Realizou-se a comparação direta do tamanho das agulhas formadas, ampliações de 1000x e comparando com um padrão estabelecido em norma específica, no caso, a PV 1053-2006 onde se estabelece 8 níveis de tamanhos das agulhas, conforme mostra a Figura 10.

Figura 10 - Classificação Martensítica .



Fonte: VW, 2006

3.6.2 Sanidade

Inspeção Visual

O ensaio visual dos metais foi o primeiro método de ensaio não destrutivo aplicado pelo homem. É, com certeza, o ensaio mais barato, usado em todos os ramos da indústria.

Assim, a inspeção visual exige definição clara e precisa de critérios de aceitação e rejeição do produto que está sendo inspecionado. Requer ainda inspetores treinados e especializados, para cada tipo ou família de produtos. (DORNELES, 2016)

Os conceitos de descontinuidade e defeito de peças são termos muito comuns na área de ensaios não destrutivos. De modo geral, nos depara-se na indústria com inúmeras variáveis de processo que podem gerar imperfeições nos produtos. Essas imperfeições devem ser classificadas como descontinuidades ou defeitos. Os responsáveis por essa atividade são os projetistas profissionais, que por meio de cálculos de engenharia selecionam os componentes de um produto que impliquem segurança e apresentem o desempenho esperado pelo cliente.

A principal ferramenta do ensaio visual são os olhos, o olho é considerado um órgão pouco preciso. A visão varia em cada um de nós, e mostra-se mais variável ainda quando se comparam observações visuais num grupo de pessoas. Para minimizar essas variáveis, deve-se padronizar fatores como a luminosidade, a distância ou o ângulo em que é feita a observação. Para eliminar esse problema, nos ensaios visuais, deve-se utilizar instrumentos que permitam dimensionar as descontinuidades, por exemplo, uma escala graduada (régua). Assim, você chegará a conclusões mais confiáveis. A inspeção visual a olho nu é afetada pela distância entre o olho do observador e o objeto examinado. A distância recomendada para inspeção situa-se em torno de 25 cm: abaixo desta medida, começam a ocorrer distorções na visualização do objeto. Existem outros fatores que podem influenciar na detecção de descontinuidades no ensaio visual. (DORNELES, 2016)

As superfícies das peças ou partes a serem examinadas devem ser cuidadosamente limpas, de tal forma que resíduos como graxas, óleos, poeira, oxidação etc. não impeçam a detecção de possíveis descontinuidades e/ou até de defeitos. (DORNELES, 2016)

O acabamento superficial resultante de alguns processos de fabricação pode mascarar ou esconder descontinuidades; portanto, dependendo dos requisitos de qualidade da peça, elas devem ser cuidadosamente preparadas (decapadas, rebarbadas, usinadas) para, só então, serem examinadas. (DORNELES, 2016)

O tipo de luz utilizada também influi muito no resultado da inspeção visual. A luz branca natural, ou seja, a luz do dia, é uma das mais indicadas; porém, por problemas de *layout*, a maioria dos exames é feita em ambientes fechados, no interior de fábricas. Utilizem-se, então, lâmpadas elétricas, que devem ser posicionadas atrás do inspetor, ou em outra posição qualquer, de modo a não ofuscar sua visão. (DORNELES, 2016)

A descontinuidade superficial de um determinado produto deve provocar um contraste, ou seja, uma diferença visual clara em relação à superfície de execução do exame.

Esta característica deve ser avaliada antes de se escolher o exame visual como método de determinação de descontinuidades, para evitar que possíveis defeitos sejam liberados equivocadamente. (DORNELES, 2016)

Um fator de fracasso na inspeção visual é a fadiga visual dos inspetores, que observam os mesmos tipos de peças durante longos períodos de trabalho. Para minimizar esse problema, deve-se programar paradas para descanso. Outro recurso é colocar esporadicamente na linha de inspeção peças-padrão, com defeitos mínimos conhecidos, a fim de avaliar o desempenho dos inspetores. Além do treinamento, estes devem receber acompanhamento oftalmológico. Ele faz parte da qualificação dos inspetores e deve ser realizado periodicamente, para garantir sua acuidade visual. (DORNELES, 2016)

Partículas Magnéticas

O ensaio por partículas magnéticas é utilizado na localização de descontinuidades superficiais e sub-superficiais em materiais ferromagnéticos. Pode ser aplicado tanto em peças acabadas quanto semi-acabadas e durante as etapas de fabricação. O processo consiste em submeter à peça, ou parte desta, a um campo magnético. Na região magnetizada da peça, as descontinuidades existentes, ou seja, a falta de continuidade das propriedades magnéticas do material irá causar um campo de fuga do fluxo magnético. Com a aplicação das partículas ferromagnéticas, ocorrerá a aglomeração destas nos campos de fuga, uma vez que serão por eles atraídas devido ao surgimento de pólos magnéticos. A aglomeração indicará o contorno do campo de fuga, fornecendo a visualização do formato e da extensão da descontinuidade. (ADREUCCI, 2002)

Sequência para aplicabilidade do ensaio:

- a) Preparação da Superfície;
- b) Magnetização da peça;
- e) Aplicação das partículas;
- f) Eliminação do excesso de partículas na superfície;
- g) Observação das indicações;
- h) Avaliação
- i) Desmagnetização

3.7 SISTEMA CAIXA DE DIREÇÃO TIPO PINHÃO/CREMALHEIRA

O mecanismo de caixa de direção hidráulica tipo pinhão e cremalheira é um conjunto que tem a função de dirigibilidade do veículo direcionando o mesmo conforme os comandos do motorista, junto ao volante (CRUZ, 2006).

O uso de sistemas de direção hidráulica advém da necessidade de se ter um esforço mínimo no giro do volante em manobras de estacionamento. A assistência hidráulica transferida do volante de direção para as rodas é obtida pela interação de componentes hidráulicos e ligações mecânicas (CRUZ, 2006).

O sistema de direção hidráulica assistida consiste de uma válvula rotativa de centro aberto que direciona o fluido hidráulico fornecido por uma bomba para um dos lados do êmbolo do pistão montado na cremalheira. Esse processo converte a pressão hidráulica em força que movimenta a cremalheira para a esquerda ou para a direita e estes movimentos são transmitidos, através de um sistema articulado (*“inner e outer joints”*), para os braços de direção promovendo o giro das rodas (CRUZ, 2006).

O mecanismo de direção hidráulico é alimentado por uma bomba, que é acionada pelo motor do veículo através do trem de polia. A bomba contém um conjunto de palhetas móveis que, sob ação de força centrífuga, se mantêm em contato com parede interna de uma câmara ovalada da carcaça da bomba. Com o giro do rotor as palhetas recalcam o fluido hidráulico do reservatório e conduzem o mesmo para a saída, sendo que a quantidade de fluido enviado pela bomba depende do número de rotações por minuto do motor do veículo (CRUZ, 2006).

A caixa de direção funciona de maneira semelhante a um cilindro hidráulico que é direcionado por uma válvula rotativa que é centrada mecanicamente por mola (neste caso, por uma barra de torção chamada *“tbar”*) (CRUZ, 2006).

componente se deforme após estes tratamentos térmicos. Por isso, se faz necessário o endireitamento da cremalheira antes que mesma seja retificada (PEREIRA e SILVA, 2003).

A deformação característica é mais pronunciada na região de corte ou brochamento dos dentes. É importante acrescentar que as cremalheiras com perfil Y são cremalheiras forjadas, principalmente pela forma que têm, e que, também, permite-se, em função da estrutura mais compacta do material forjado, trabalhar com diâmetros menores de cremalheira comparativamente às produzidas a partir de barras obtidas pelo processo de brochamento. Isto é muito interessante quando tem-se limitações de projeto que requerem uma utilização de diâmetros menores de cremalheira. A cremalheira também é a haste do cilindro que compõe a caixa de direção hidráulica. Quando a bucha pistão é cravada no corpo da cremalheira, todo o conjunto recebe o nome de pistão-cremalheira ou, simplesmente, pistão. Assim, deduz-se que o pistão deve ser totalmente livre de impurezas que venham arranhá-la e causar vazamentos indesejáveis entre as câmaras (PEREIRA e SILVA, 2003).

A Figura 12 nos mostra a cremalheira, objeto da nossa pesquisa e avaliação.

Figura 12 – Cremalheira.



Fonte: Autoria Própria

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentados os materiais e métodos para confecção das amostras a serem analisadas. Inicialmente, as peças cremalheiras oriundas de barras usinadas que foram brochados o dentado e em seguida temperados por dois métodos distintos: indução e condução.

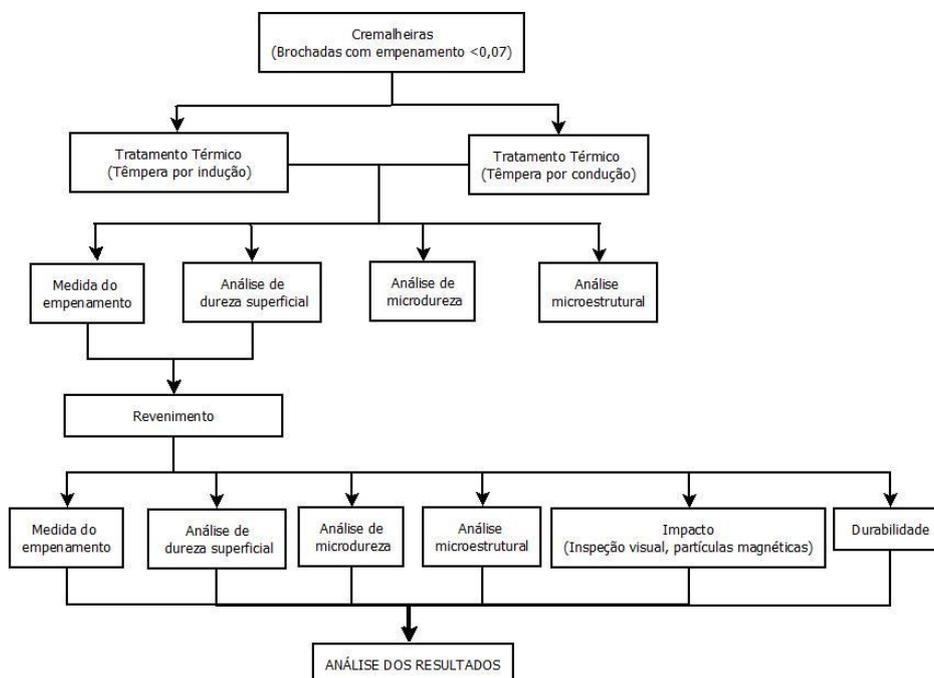
Posteriormente, compararam-se as condições de empenamento e as características metalúrgicas em pontos específicos, das peças temperadas por indução e por condução.

Também se realizaram os ensaios de durabilidade e impacto para peças obtidas pelos dois processos de têmpera e montadas em mecanismo de direção hidráulica.

4.1 PLANEJAMENTO DOS EXPERIMENTOS

O planejamento de experimentos é um método para aumento de eficiência em procedimentos experimentais. Assim, busca-se minimizar o número de experimentos evitando-se repetições desnecessárias e erros contribuindo para a viabilidade econômica e prática dos experimentos (BUTTON, 2005).

Figura 13 – Fluxograma sintético da metodologia experimental.



4.2 MATERIAL

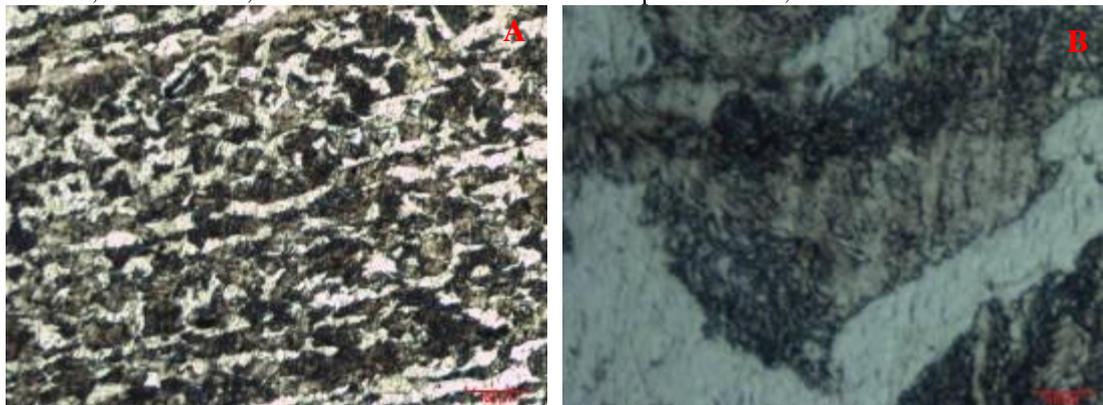
O aço comercial investigado nesse trabalho trata-se de um médio carbono, SAE 1045, largamente utilizado na confecção de produtos automotivos, principalmente para fabricação de cremalheiras, com composição química e microestrutura conforme Tabela 1.

Tabela 1 – Resultado de Composição química do aço em % peso

	%C	%Mn	%P	%S
Especificado	0,43 – 0,50	0,60 – 0,90	0,03	0,05
SAE 1045				
Peças Analisadas	0,48	0,89	0,03	0,04

A Figura 14 mostra a microestrutura do material utilizado para os testes de têmpera por indução e condução. Todas as amostras foram obtidas partindo de barras de uma mesma fornada, portanto com características morfológicas estruturais constituída de ferrita e perlita.

Figura 14 – (A) Aço SAE 1045, material base, microestrutura formada de ferrita e perlita, aumento 100x, (B) Aço SAE 1045, material base, microestrutura formada de ferrita e perlita 1000x, ambas atacada com Nital 3%



Fonte: Autoria Própria

Este material vem da usina em barras de seis metros, que são posteriormente cortadas no tamanho desejado para cada especificação de cremalheira, e posteriormente destinada ao tratamento térmico.

4.3 TÊMPERA POR INDUÇÃO

A partir das cremalheiras com o dentado confeccionado por brochamento, foram temperadas por indução 30 amostras para caracterização do empenamento residual após o processo de têmpera. Esta foi realizada em indutor estático e plano, com fator de potência de 50%, energia de 100 kW de indução por escaneamento com velocidade de 1100 mm/min. O resfriamento foi feito utilizando polímero Aquaquench 260 na concentração de 6% com Ph 9,0 e vazão de 75 l/min.

4.4 TÊMPERA POR CONDUÇÃO

A partir das cremalheiras já com o dentado confeccionado por brochamento, foram temperadas por condução 30 amostras para caracterização do empenamento residual após o processo de têmpera. Esta foi realizada em indutor estático e plano, com fator de potência de 49%, energia de 90 kW, tempo de aquecimento de 13s, o resfriamento foi feito utilizando polímero Aquaquench 260 na concentração de 6% com Ph 9,0 e vazão de 75 l/min, e com tempo de ducha de 15s.

4.5 REVENIMENTO

O tratamento de revenimento foi realizado em forno resistivo durante 1 hora e 30 minutos a temperatura de 280°C ($\pm 5^\circ\text{C}$) e resfriadas ao ar até temperatura ambiente.

4.6 MEDIÇÃO DO EMPENAMENTO

A medição do empenamento foi realizada apoiando as cremalheiras em dois prismas, delimitando o relógio comparador centesimal, ao longo de seu comprimento conforme apresenta a Figura 15, assim determinando o empenamento inicial após cada etapa do processo, em que as cremalheiras foram submetidas. Em seguida, foi realizado o desempenamento das peças deixando-as com 0,07mm de empenamento máximo.

Figura 15 – Equipamento de medição e desempenho de cremalheiras.



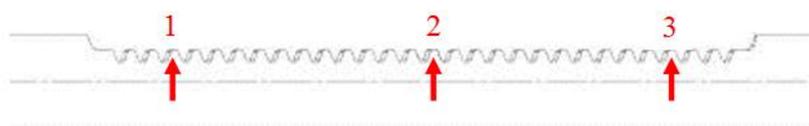
Fonte: Autoria Própria

Um total de três cremalheiras do método de têmpera por indução e três cremalheiras do método de têmpera por condução, e em seguida três do revenimento oriundas de cada método anterior, foram disponibilizadas para caracterização metalúrgica. Afim de realizar teste de aplicabilidade destas peças, foi disponibilizada uma cremalheira de cada um dos métodos para montagem de um mecanismo de direção hidráulica para testar a durabilidade desta quando colocada em banco de teste experimental e ensaio de impacto.

4.7 ENSAIO DE DUREZA E MICRODUREZA

Nas cremalheiras disponibilizadas para caracterização metalúrgica foram realizadas medições de dureza superficial em Rockwell C, nas 30 peças temperadas por indução na TTO 05, nas 30 peças temperadas com condução na TTO 10, bem como as 60 peças após serem revenidas no FOR 11, em cada peça foram feitas três medidas, nos pontos indicados na Figura 16.

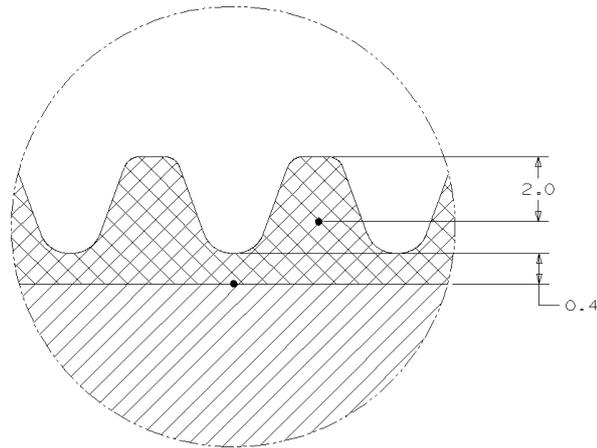
Figura 16 – Pontos onde foram feitas as medidas de dureza superficial.



Fonte: Autoria Própria

Destas 60 peças que foram revenidas, foi retirado 03 de têmpera po indução e 03 de têmpera por condução, seguidas de revenimento para medição da microdureza nas duas regiões distintas, a 2 mm do topo do dente e a 0,4 mm abaixo da raiz do dente, conforme destaca-se os locais de medição da microdureza nas regiões salientadas na Figura 17.

Figura 17 – Regiões onde foram feitas as medidas da microdureza.



Fonte: Autoria Própria

4.8 ANÁLISE METALOGRÁFICA

As peças foram seccionadas para analisar a microestrutura de têmpera nos dois métodos, indução e condução, conforme indicado na Figura 18.

Figura 18 – Desenho representativo do local da retirada de amostras.



Fonte: Autoria Própria

Para análise metalográfica da microestrutura, o corpo de prova das cremalheiras foram seccionadas (cortadas) ao meio, com disco de corte, apropriado para corte de aços de com dureza superficial de 45 a 62 HRC. Fez-se embutimento a frio, lixamento, polimento e logo em seguida ataque com Nital 3%, a Figura 19 nos mostra a região onde foram feitas as imagens metalográficas, para análise da microestrutura formada em ambos os métodos de têmpera após o revenimento.

Figura 19 – Região de análise da microestrutura nas amostras



Fonte: Autoria Própria

4.9 MONTAGEM DA CAIXA DE DIREÇÃO

Com a cremalheira disponibilizada para ensaio de durabilidade e impacto, foi providenciado a montagem da caixa de direção, o amaciamento da mesma em bancada, deixando no estado de apta para montagem em veículo, ou seja, com todos os componentes e ajustes necessários, e desta forma, testou-se como os métodos distintos de têmpera poderiam ter afetado seu desempenho.

4.10 ENSAIO DE DURABILIDADE

O teste consiste em medir o torque a vazio antes de ciclagem no banco de teste, e após realizar 50000 ciclos de batente a batente, e assim tornar a medir o torque a vazio.

Figura 20 – Banco de teste para realização do teste de durabilidade



Fonte: Autoria Própria

4.11 ENSAIO DE IMPACTO

As cremalheiras são montadas em mecanismo de direção, isento de barras e ponteiras, assim a conectamos no dispositivo, conforme Figura 21, onde é 1 local de fixação da carcaça pelos olhais no dispositivo, e 2 o peso de giro no pinhão, em 3 o dispositivo de impacto na cremaheira, e 4 a altura de queda. Desta forma aplicamos uma carga de 22.200N +/- 1000, de uma altura de 15 a 25 cm, com um peso de queda de 54,68 Kg.

Assim após ensaios a peças são submetidas a inspeção visual e por partículas magnéticas, não podendo apresentar fratura, trincas ou fissuras.

Figura 21 – Equipamento para ensaio de impacto.



Fonte: Autoria Própria

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados de análise das cremalheiras, o nível de empenamento destas após ser submetidas aos dois métodos de têmpera, a dureza superficial, a caracterização metalúrgica, e por fim os testes de bancada.

Os resultados foram comparados entre os dois métodos de têmpera, salientado qual obteve os melhores resultados nas etapas de têmpera, revenimento, desempenho e teste em bancada.

5.1 EMPENAMENTO

As peças oriundas dos processos de usinagem das barras e brochamento do dentado, apresentaram empenamento inicial de 0,07 mm o que é aceitável para o produto cremalheira e sua aplicabilidade. Porém após submetidas ao tratamento térmico pelos métodos indutivo e condutivo. Apresentaram empenamento conforme Figura 22.

Figura 22 – Peças apresentando empenamento após têmpera

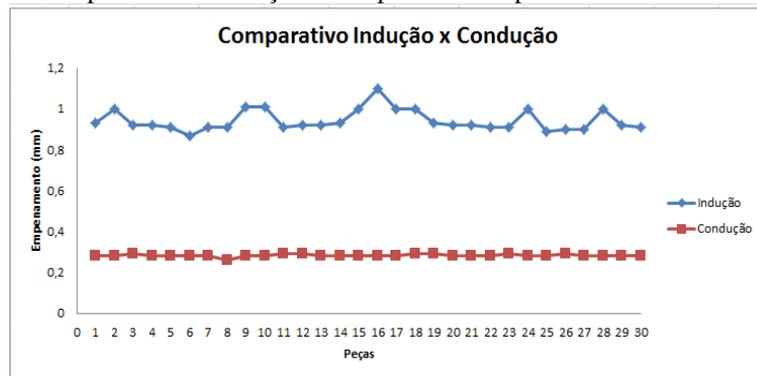


Fonte: Autoria Própria

5.1.1 Empenamento após a Têmpera

Após tratar termicamente as cremalheiras, foram realizadas as medições do empenamento nas peças. Mediu-se ao longo do comprimento das cremalheiras o empenamento, apresentando resultados conforme descrito no Figura 21:

Figura 23 - Gráfico Comparativo da medição do empenamento após os dois métodos de têmpera.



Fonte: Autoria Própria

Notou-se que as peças ao saírem da têmpera por condução apresentaram níveis menores de empenamento residual, acredita-se que isto foi devido ao processo de indução ser vertical por escaneamento, e o processo condutivo é estático apresentando ainda contrapontos que limitam a deformação da peça, durante o aquecimento.

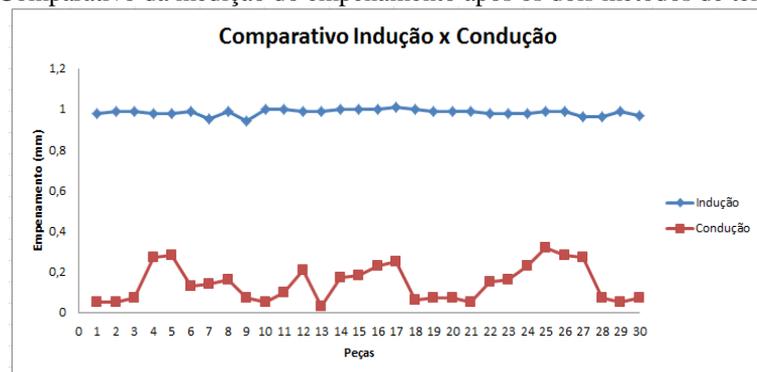
Tabela 2 – Média e desvio padrão do empenamento após têmpera por indução e condução.

	Empenamento (mm) (Indução)	Empenamento (mm) (Condução)
Média	0,943	0,282
Desvio	0,051	0,006

5.1.3 Empenamento após o Revenimento

Após tratar termicamente as peças foram revenidas na mesma fornada apresentando o resultado de empenamento, conforme Figura 24:

Figura 24 – Comparativo da medição do empenamento após os dois métodos de têmpera



Fonte: Autoria Própria

Ao comparar os dois métodos após o revenimento notou-se que durante o método de têmpera por condução conseguiu-se direcionar a deformação primária, fazendo com que, após o revenimento, o alívio de tensão gerado na peça provoque retornabilidade ao ponto inicial, deixando em alguns casos uma ínfima deformação residual final, como se pode ver no Gráfico 2, onde algumas peças sequer necessitariam passar pela etapa de desempenamento, podendo ser polidas e colocadas direto na montagem, pois para um empenamento especificado de 0,07 mm máximo, obtivemos valores até inferiores a este. A Tabela 3 apresenta a média e o desvio padrão para os dois métodos após têmpera e revenimento.

Tabela 3 - Comparativo da medição do empenamento após os dois métodos de têmpera e revenimento

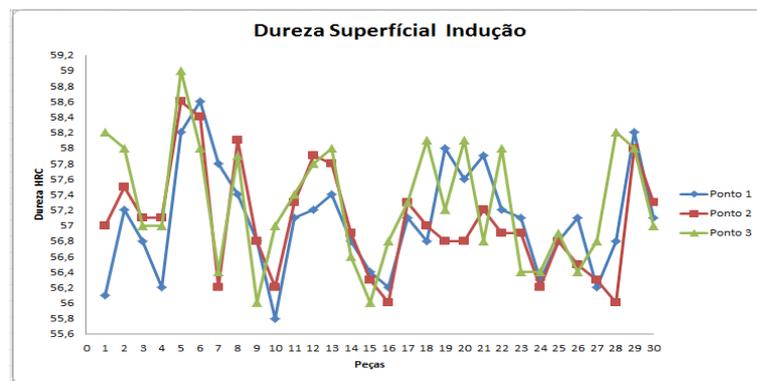
	Empenamento (mm) (Indução)	Empenamento (mm) (Condução)
Média	0,985	0,143
Desvio	0,015	0,088

5.2 ENSAIO DE DUREZA

5.2.1 Dureza Superficial após Têmpera por Indução

Após cremalheiras temperadas por indução, apresentaram dureza superficial, conforme os resultados descritos na Figura 25 e apresentados no apêndice C:

Figura 25 – Medidas de dureza nos pontos indicados na figura 16, para o método de têmpera por indução

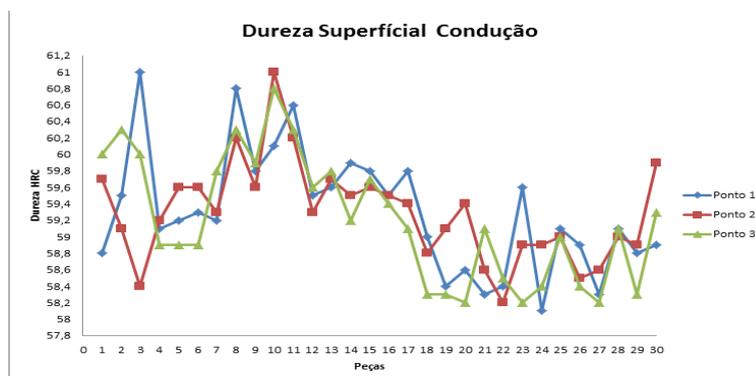


Fonte: Autoria Própria

5.2.2 Dureza Superficial após Têmpera por Condução

Após tratar termicamente as cremalheiras por condução, foram realizadas as medições de dureza superficial, com os resultados descritos conforme Figura 26 e apresentados no apêndice C:

Figura 26 – Medidas de dureza nos pontos indicados na Figura 16, para o método de têmpera por condução.



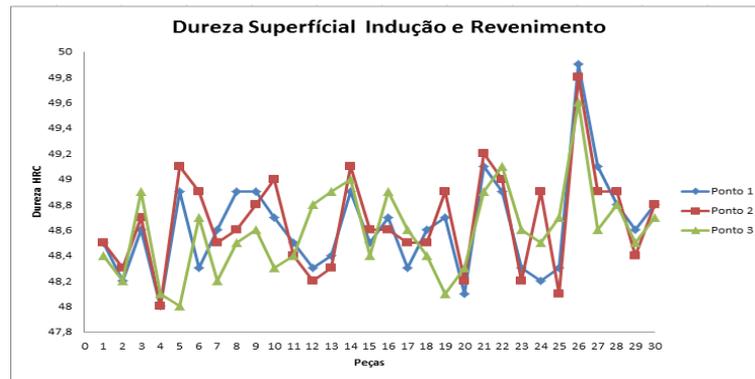
Fonte: Autoria Própria

Mediu-se a dureza após a etapa de têmpera, onde os resultados para têmpera por condução ficaram em média maiores em comparação a têmpera indutiva, acredita-se que o giro do escaneamento correlacionado com a velocidade de avanço do indutor/ducha do equipamento utilizado não propiciou uma martensita refinada, ou seja, com agulhas tamanho 08 ou 10, provocando assim um decréscimo na dureza em relação à indução.

5.2.3 Dureza Superficial após Revenimento

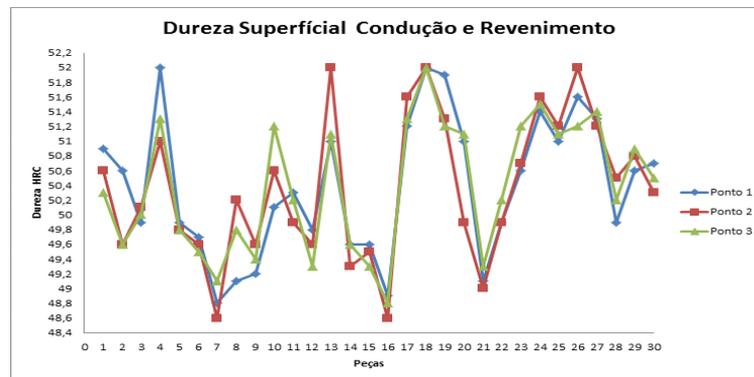
Após tratar termicamente as peças foram revenidas na mesma fornada apresentando resultados conforme Figura 27 e 28 e o Apêndice D:

Figura 27 – Medidas de dureza nos pontos indicados na Figura 16, para o método de têmpera por indução e revenimento.



Fonte: Autoria Própria

Figura 28 – Medidas de dureza nos pontos indicados na Figura 16, para o método de têmpera por condução e revenimento.



Fonte: Autoria Própria

Devido à temperatura de revenimento utilizada ter sido igual nos dois métodos, e as peças temperadas por indução terem ficado com dureza mais baixa, concomitantemente esse apresentou os menores valores de dureza após o revenimento.

Porém, ambos os métodos apresentaram dureza dentro do especificado entre 48 e 52 HRC, onde a indução ficou em média com dureza próxima do limite inferior e a condução mais próxima do limite superior.

5.2.4 – Microdureza após Revenimento

Nas peças oriundas da têmpera por indução como nas peças da têmpera por condução, após o revenimento foi medida a microdureza e os resultados estão apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - Microdureza após o revenimento.

Peça Indução	Micro Dureza (HV_{0,5})		Peça Condução	Micro Dureza (HV_{0,5})	
	2 mm	0,4 mm		2 mm	0,4 mm
A	493,6	486,9	A	519,8	492,3
B	498,4	479,9	B	518,2	494,9
C	501,7	479,8	C	516,1	498,2
Média	497,9	482,2	Média	518,0	495,1
Desvio	3,326	3,324	Desvio	1,515	2,414

Na Tabela 4 podemos observar que as peças oriundas do tratamento térmico de condução apresentaram uma leve diferença a maior para os valores de microdureza, tanto par medida a 2 mm do topo do dente, como para medida a 0,4 mm da raiz do dente.

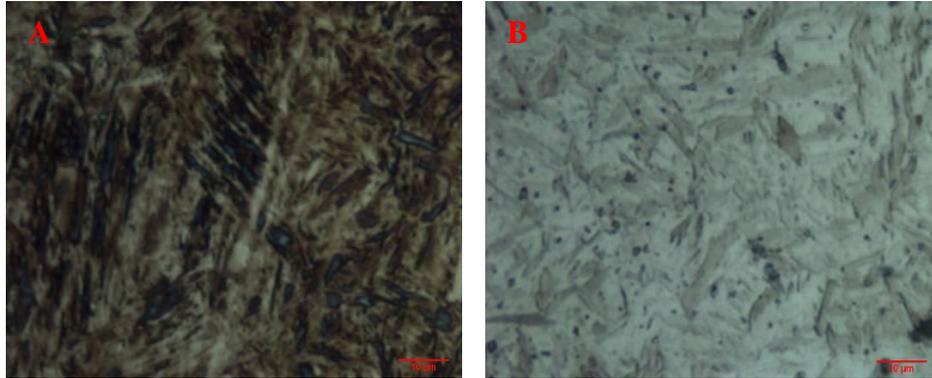
5.3 CARACTERIZAÇÃO METALÚRGICA

5.3.1 Microestrutura das Cremalheiras

As Figuras de 29 a 34 onde mostram as microestruturas das cremalheiras tratadas por indução e condução e posteriormente revenidas. Os dois métodos produziram martensita na forma de agulhas. É possível observar, analisando por comparação com as micrografias padrão expostas na norma da Volkswagem Group, denominda VW PV 105, que as cremalheiras tratadas por indução apresentam agulhas de tamanho maior quando comparadas com as cremalheiras tratadas por condução. Na indução as cremalheiras apresentaram classificação de tamanho das agulhas de 04 e na condução 07. Está diferença no tamanho das agulhas manteve-se nos dois métodos mesmo após o revenimento das cremalheiras. Sendo que se obteve na indução tamanho médio de agulhas, classe 07 e no método por condução 08, devido a possível reorganização microestrutural, devido à dissolução de carbonetos.

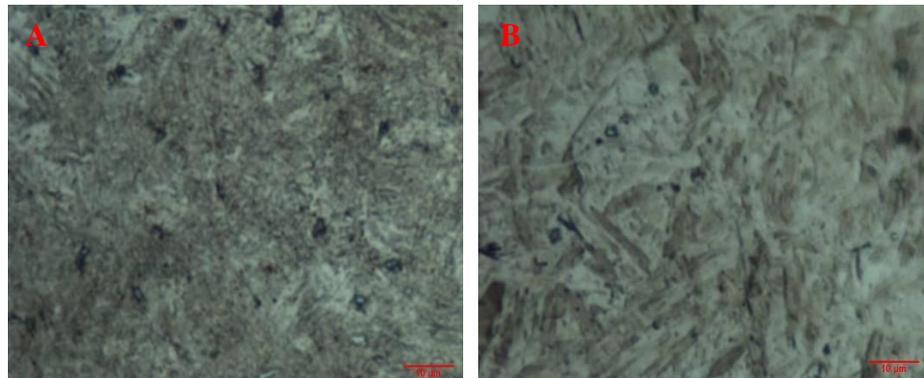
Microestruturas das Peças Tratadas por Indução

Figura 29 – Peça 01, (A) temperada por indução, microestrutura constituída por martensita, (B) temperada por indução e revenida, microestrutura constituída por martensita revenida, ataque Nital 3%, 1000x



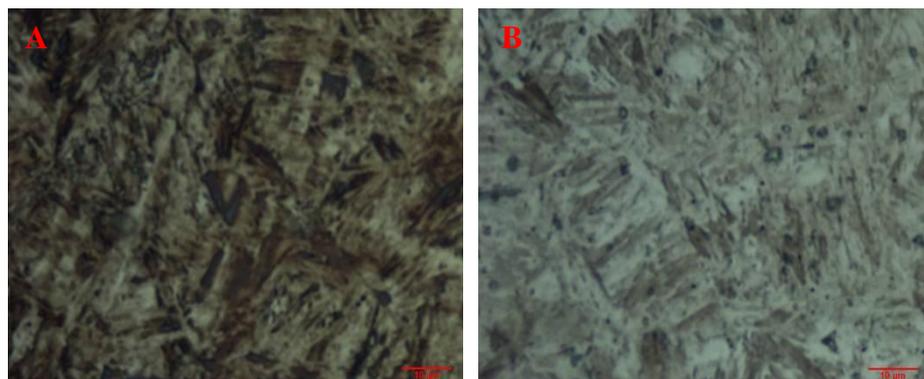
Fonte: Autoria Própria

Figura 30 – Peça 02, (A) temperada por indução, microestrutura constituída por martensita, (B) temperada por indução e revenida, microestrutura constituída por martensita revenida, ataque Nital 3%, 1000x



Fonte: Autoria Própria

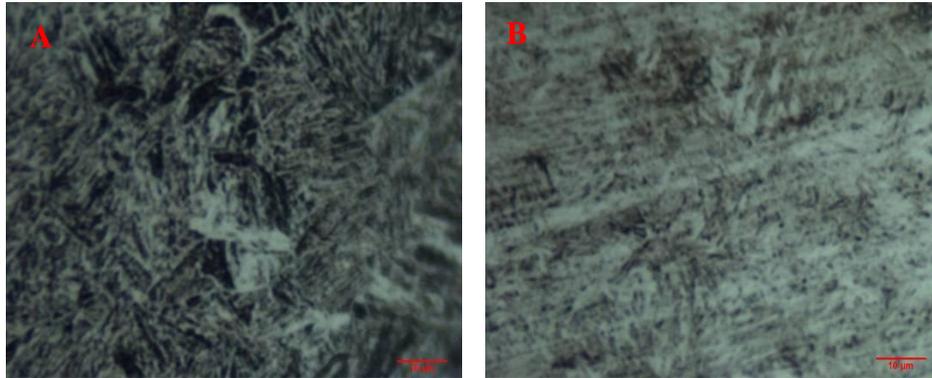
Figura 31 – Peça 03, (A) temperada por indução, microestrutura constituída por martensita, (B) temperada por indução e revenida, microestrutura constituída por martensita revenida, ataque Nital 3%, 1000x



Fonte: Autoria Própria

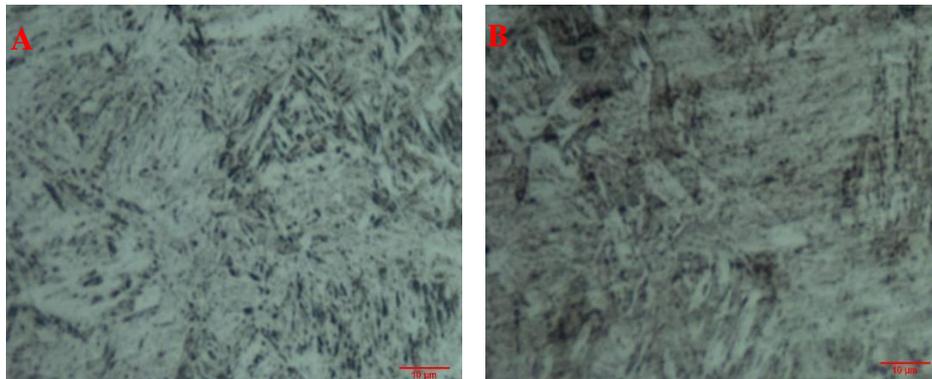
Microestruturas das peças tratadas por condução

Figura 32 – Peça 01, (A) temperada por condução, microestrutura constituída por martensita, (B) temperada por condução e revenida, microestrutura constituída por martensita revenida, ataque Nital 3%, 1000x



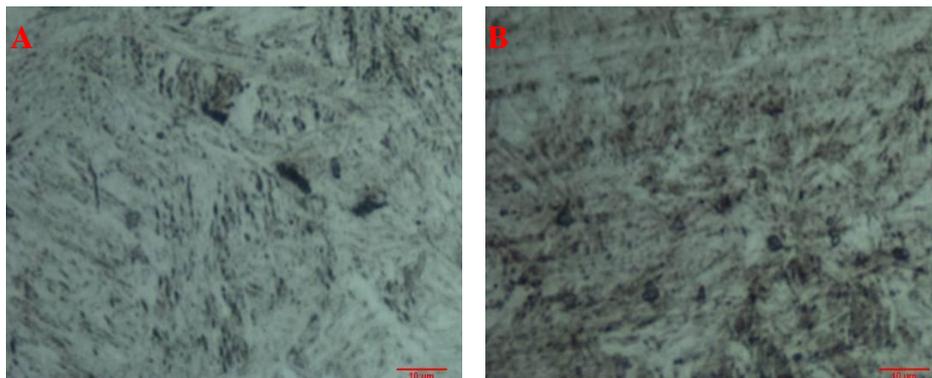
Fonte: Autoria Própria

Figura 33 – Peça 02, (A) temperada por condução, microestrutura constituída por martensita, (B) temperada por condução e revenida, microestrutura constituída por martensita revenida, ataque Nital 3%, 1000x



Fonte: Autoria Própria

Figura 34 – Peça 03, (A) temperada por condução, microestrutura constituída por martensita, (B) temperada por condução e revenida, microestrutura constituída por martensita revenida, ataque Nital 3%, 1000x



Fonte: Autoria Própria

5.3. 2 Comparativo Microestrutural entre os Métodos

Foi realizado um comparativo entre os métodos, estipulando o tamanho das agulhas de martensita formada, baseando-se na Figura 10 apresentada pela VW PV 1053(2006), que nos apresenta a classificação para a formação martensítica, conforme Tabela 5 e 6.

Tabela 5 – Classificação do tamanho da martensita, nos métodos de têmpera indutiva e condutiva.

Peça Indução	Tamanho (DIN 643 VW PV1053)	Peça Condução	Tamanho (DIN 643 VW PV1053)
01	4	01	6
02	7	02	7
03	4	03	7

Tabela 6 – Classificação do tamanho da martensita, nos métodos de têmpera indutiva e condutiva seguidas de revenido.

Peça Indução	Tamanho (DIN 643 VW PV1053)	Peça Condução	Tamanho (DIN 643 VW PV1053)
01	6	01	8
02	6	02	7
03	6	03	8

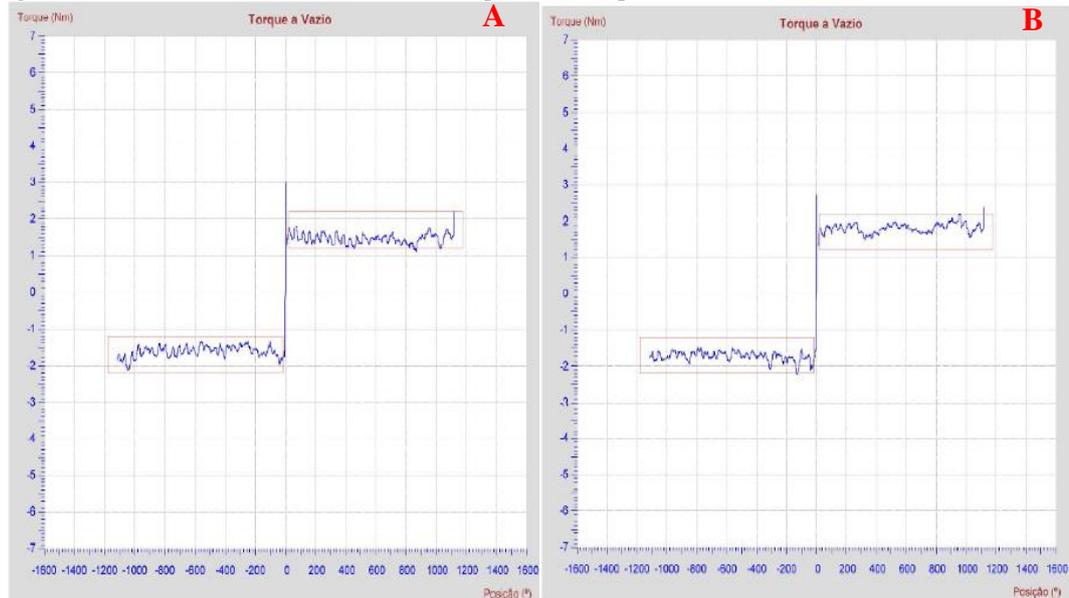
As peças temperadas por indução apresentaram ripas maiores de martensita, devido a extração de calor não ter sido tão eficiente, pelos motivos da ducha ter sido adaptada de outro método, bem como pelo escaneamento, neste caso, específico não ter favorecido a transformação.

5.4 CARACTERIZAÇÃO DE DURABILIDADE

Após o mecanismo ser montado, foram realizados os testes de durabilidade das peças oriundas do processo de têmpera por indução e têmpera por condução, para verificar o comportamento das mesmas, e principalmente do processo indutivo, frente aos testes de validação de produto. As peças provenientes do processo de condução foram validadas, porém tratar-se de produto corrente, que apresenta demanda de mercado de 100.000 mil peças mês, sem nenhum histórico de devolução por problema de durabilidade.

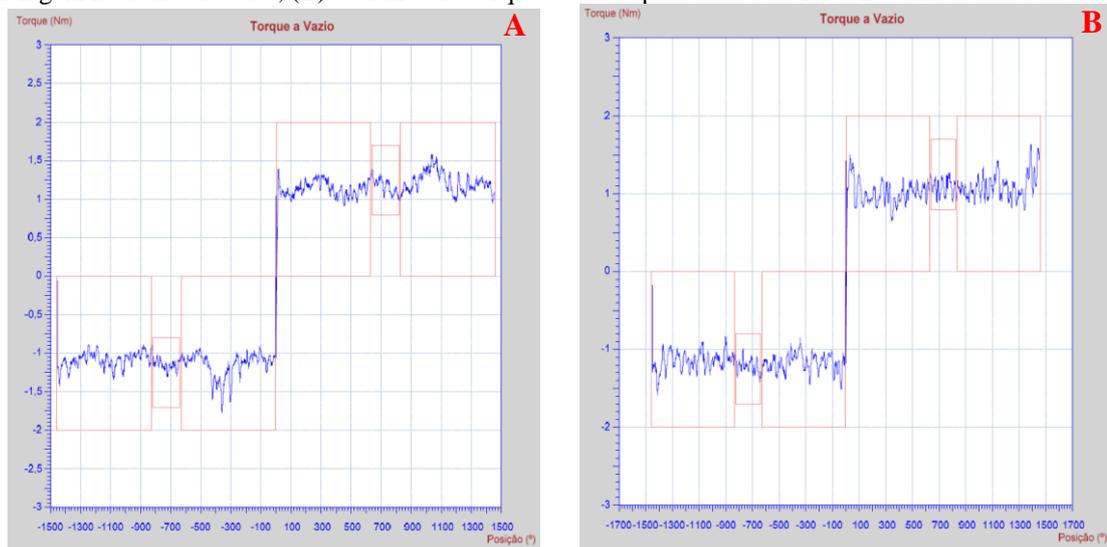
Desta forma, o teste de durabilidade foi realizado em um mecanismo de direção hidráulica, montados com cremalheiras do processo de indução e condução, apresentando resultados como mostram, como mostram os gráficos da Figura 35 e 36.

Figura 35 – Cremalheiras tratadas termicamente por indução - (A) - Gráfico do torque a vazio antes da ciclagem no banco de teste, (B) - Gráfico do torque a vazio após os 50000 ciclos no banco de teste



Fonte: Autoria Própria

Figura 36 – Cremalheiras tratadas termicamente por condução - (A) - Gráfico do torque a vazio antes da ciclagem no banco de teste, (B) - Gráfico do torque a vazio após os 50000 ciclos no banco de teste.



Fonte: Autoria Própria

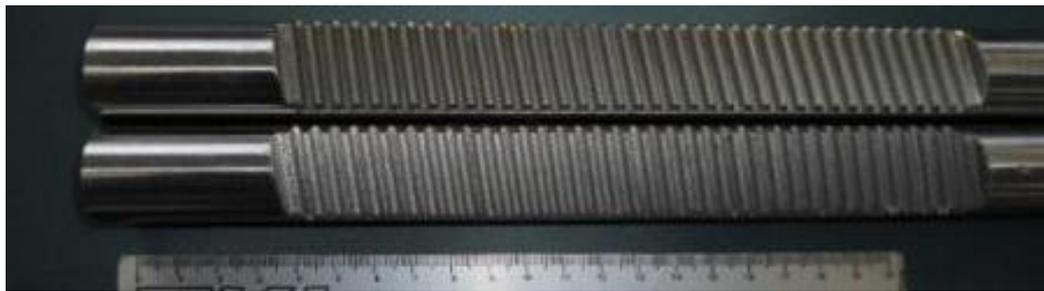
Destaca-se que o contato de engrenamento do pinhão com a cremalheira não apresentou nenhum pico de força durante a rolagem sobre todos os dentes da mesma, o que destaca pela linearidade da cremalheira, o qual não apresenta distorções residuais do tratamento térmico, apresentando assim um nível excelente de engrenamento. Tais resultados expressam-se satisfatórios tanto na montagem quanto no teste após os 50.000 ciclos. Os testes de durabilidade que foram realizados com a caixa de direção hidráulica montada, não apresentaram nenhuma variação com relação a ambos os processos. Tanto para o ensaio de

torque a vazio em ambos os casos as peças apresentaram torque próximos para peças antes e depois da ciclagem.

5.5 CARACTERIZAÇÃO DE IMPACTO

O teste de impacto após ser realizado no mecanismo, quando da inspeção visual da cremalheira, por não foi detectado nenhum tipo de defeito, conforme Figura 37.

Figura 37 – Cremalheira após o teste de impacto, não apresentando defeito.



Fonte: Autoria Própria

O teste de impacto após ser realizado no mecanismo, quando de inspeção da cremalheira, por ensaio não destrutivo de partículas magnéticas não foi detectado nenhum tipo de defeito.

Figura 38 - Cremalheira após o teste de impacto, não apresentando defeito.



Fonte: Autoria Própria

6. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos decorrentes do desenvolvimento de um aparato experimental que viabilizasse o estudo da influência microestrutural, propriedades mecânicas e empenamento quando comparados os métodos de têmpera por indução e têmpera por condução no aço SAE 1045 em barras lineares permitiu que fossem extraídas as seguintes conclusões:

- o método de têmpera por condução apresentou condições microestruturais melhores do que o método indutivo, apresentando diminuição da zona de transição;
- as distorções ocasionadas nas peças oriundas do método de condução melhoraram significativamente, onde algumas, em alguns casos, não houve a necessidade de desempenar, pois apresentam plena condição de montagem, estando conforme o especificado de funcionalidade;
- as peças oriundas do método de condução apresentaram melhor formação martensítica, bem como dureza final mais elevada quando comparado com as peças da indução.
- as peças tratadas nos dois métodos, apresentaram aprovação nos testes de durabilidade e impacto a que foram submetidas, após desempenamento e posterior montagem no mecanismo de direção.
- constatou-se que é possível desenvolver melhorias no processo de indução para atingir-se resultados melhores.

7 PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

- Desenvolvimento de uma rotina de processo, com base no mesmo aparato experimental que permita uma qualificação da evolução no nível de empenamento das peças;
- Avaliação dos tipos de defeitos gerados na têmpera por indução versus condução;
- Otimização dos parâmetros de processo para melhor relação entre espessura e morfologia da camada de têmpera e durabilidade da peça em campo.

REFERÊNCIAS

- ANDREUCCI, R. “Ensaio por Partículas Magnéticas, ABENDE, 2 edição, 2002.
- BAYER, R. G; *Mechanical Wear: Fundamentos and Testing*. Marcel Dekker: New York, 2004.
- BHADESHIA, H. K. D. H. “*Material factors*” in: *Handbook of residual Stress and Deformation of Steel*. ASM International, Ohio, 2002, p-3.
- BROOKS, C. R; Principles of the Austenitization of Steels. Esvier Science Publishers
- BUCKLEY, D. H; *Surface Effects in Adhesion, Friction and Lubrification*, Elisevier: Amsterdam, 1981.
- BUTTON, S. Metodologia para planejamento experimental e análise de resultados. Campinas: Universidade Estadual de Campinas, p. 88, 2005.
- CALLISTER JR. W. D; *Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução*. LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A, 2002.
- CHIAVERINI, V. G., *Aços e Ferros Fundidos*. 4º Edição. São Paulo: Associação Brasileira de Metais, 1979.
- CRUZ J. M. X; *Estudo de Caso de Ruído “Knock Noise” em Mecanismo de Caixa de Direção Hidráulica Tipo Pinhão-cremalheira*. 2006
- DIN EN 17014 - *Heat treatment of ferrous materials; notation to indicate heat treatment processes*, DIN, 1988.
- DIN EN ISO 643 -- *Micrographic determination of the apparent grain size*, DIN, 2012.
- DINIS, L. M. J. S; *Planos de Aula*. Mecânica dos Sólidos, FEUP, 2004.
- DORNELES, V; *Ensaio Visuais*. Material Didático. Rio Grande, 2016.
- HONEYCOMBE. R. W. K; BHADESHIA. H. K.D.H. *Steels, Microestrutura and Properties*. Londres: Edward Arnold, 1995.
- KENNETH G. B; *Surface Engineering for Wear Resistance*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1988.
- KRAUSS, G; *Martensite in steel: strength and structure*. Materials Science and Engineering, Colorado, 1999.
- KRAUSS, G; *Steels: Heat Treatment and Precessing Principles*. ASM International, 1990.
- KRAUSS, G; *Steels: Heat Treatment and Processing Principles*. 4 ed. Ohio, ASM International, 1995.

LEE, S. J; PARK, Y. M; LEE, Y. K; Relationship Between Austenite Grain Size, Martensite Start Temperature, and Transformation Kinetics of AISI 4340 Steel. *Materials Letters*, 2006.

Ltd, 1992.

LU, J. “ Prestress Engineering of Structural Material: A Global Design Approach to the Residual Stress Problem”. *Handbook of Residual Stress and Deformation of Steel*. ASM International, Ohio, 2002, p-11.

MELO, S., *Ensaios de Materiais*, FEUP, 2014.

METALS HANDBOOK – *Metallography and Microstructures*, ASM International, V.9, Metals Park, OH, 1998.

NOYAN, I. C. ; COHEN, J. B. “ residual Stress – Measurement by Diffraction and Interpretation”. New York: Springer-Verlag, 1987, p-276.

NUNES, R. M. “Estudo de Distorção de Barras Cilíndricas de Aço ABNT 1045 em uma Rota de Fabricação Envolvendo Trefilação Combinada e Têmpera por Indução”, RS-Brasil, 2012.

OLSON, G.B., OWEN, W.S. MARTENSITE: A Tribute to Morris Cohen. ASM International, 1992, p. 215-224.

PEREIRA, H. D. e SILVA, J. N; *Quality Improvement of Power Assisted Steering Gear*. In: 12º Congresso e Exposição Internacionais de Tecnologia de Mobilidade, 2003, São Paulo.

RUDNEV, V. Can Fe-Fe₃C phase transformation diagram be directly applied in induction hardening of steel, Professor Induction Series, Heat Treating Progress, ASM Int., June/July, 2003.

RUDNEV, V. I; LOVELESS, D. L; COOK, R. L. e BLACK, M. R. Handbook of RUDNEV, V. Induction Heat Treating: The Basics & Beyond. In: II Conferência SENAI, *Centro Tecnológico de Fundação Marcelino Corradi*, Laboratório de Materiais, Itaúna, 2012.

SILVA, A. L. V. da C; MEI P. R; *Aços e Ligas Especiais*, 2º Edição, Editora Blucher, 2008.

SOUZA, S. A. *Ensaios Mecânicos de Materiais*, 5º Ed. São Paulo: Editora: Edgar Blücher, 1982.

TSUCHIYAMA T. *et al*, *Quenching and partitioning treatment of a low-carbon martensitic stainless steel*. *Materials Science and Engineering*, Fukuoka, 2011.

VISTEON CORPRATION. *Desenhos de Produto*. São Paulo, 2006.

VW PV1053; *Induction Hardened Steels*, Volkswagen Group, 2006.

APÊNDICE A

Tabela 1 - Empenamento das cremalheiras após o tratamento térmico de indução e condução

Peça	Empenamento (mm) (Indução)		Peça	Empenamento (mm) (Condução)
01	0,93		01	0,28
02	1,00		02	0,28
03	0,92		03	0,29
04	0,92		04	0,28
05	0,91		05	0,28
06	0,87		06	0,28
07	0,91		07	0,28
08	0,91		08	0,26
09	1,01		09	0,28
10	1,01		10	0,28
11	0,91		11	0,29
12	0,92		12	0,29
13	0,92		13	0,28
14	0,93		14	0,28
15	1,00		15	0,28
16	1,10		16	0,28
17	1,00		17	0,28
18	1,00		18	0,29
19	0,93		19	0,29
20	0,92		20	0,28
21	0,92		21	0,28
22	0,91		22	0,28
23	0,91		23	0,29
24	1,00		24	0,28
25	0,89		25	0,28
26	0,90		26	0,29
27	0,90		27	0,28
28	1,00		28	0,28
29	0,92		29	0,28
30	0,91		30	0,28

APÊNDICE B

Tabela 2 – Empenamento das peças após revenimento

Peça	Empenamento (mm) (Indução)		Peça	Empenamento (mm) (Condução)
01	0,98		01	0,05
02	0,99		02	0,05
03	0,99		03	0,07
04	0,98		04	0,27
05	0,98		05	0,28
06	0,99		06	0,13
07	0,95		07	0,14
08	0,99		08	0,16
09	0,94		09	0,07
10	1,00		10	0,05
11	1,00		11	0,10
12	0,99		12	0,21
13	0,99		13	0,03
14	1,00		14	0,17
15	1,00		15	0,18
16	1,00		16	0,23
17	1,01		17	0,25
18	1,00		18	0,06
19	0,99		19	0,07
20	0,99		20	0,07
21	0,99		21	0,05
22	0,98		22	0,15
23	0,98		23	0,16
24	0,98		24	0,23
25	0,99		25	0,32
26	0,99		26	0,28
27	0,96		27	0,27
28	0,96		28	0,07
29	0,99		29	0,05
30	0,97		30	0,07

APÊNDICE C

Tabela 3 – Dureza Superficial após têmpera por indução e por condução

Peça	Dureza Superficial (HRC) (Indução)			Peça	Dureza Superficial (HRC) (Condução)		
	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3		Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3
01	56,1 – 57,0 – 58,2			01	58,8 – 59,7 – 60,0		
02	57,2 – 57,5 – 58,0			02	59,5 – 59,1 – 60,3		
03	56,8 – 57,1 – 57,0			03	61,0 – 58,4 – 60,0		
04	56,2 – 57,1 – 57,0			04	59,1 – 59,2 – 58,9		
05	58,2 – 58,6 – 59,0			05	59,2 – 59,6 – 58,9		
06	58,6 – 58,4 – 58,0			06	59,3 – 59,6 – 58,9		
07	57,8 – 56,2 – 56,4			07	59,2 – 59,3 – 59,8		
08	57,4 – 58,1 – 57,9			08	60,8 – 60,2 – 60,3		
09	56,8 – 56,8 – 56,0			09	59,8 – 59,6 – 59,9		
10	55,8 – 56,2 – 57,0			10	60,1 – 61,0 – 60,8		
11	57,1 – 57,3 – 57,4			11	60,6 – 60,2 – 60,3		
12	57,2 – 57,9 – 57,8			12	59,5 – 59,3 – 59,6		
13	57,4 – 57,8 – 58,0			13	59,6 – 59,7 – 59,8		
14	56,8 – 56,9 – 56,6			14	59,9 – 59,5 – 59,2		
15	56,4 – 56,3 – 56,0			15	59,8 – 59,6 – 59,7		
16	56,2 – 56,0 – 56,8			16	59,5 – 59,5 – 59,4		
17	57,1 – 57,3 -57,3			17	59,8 – 59,4 – 59,1		
18	56,8 – 57,0 – 58,1			18	59,0 – 58,8 – 58,3		
19	58,0 – 56,8 -57,2			19	58,4 – 59,1 – 58,3		
20	57,6 – 56,8 – 58,1			20	58,6 – 59,4 – 58,2		
21	57,9 – 57,2 – 56,8			21	58,3 – 58,6 – 59,1		
22	57,2 – 56,9 -58,0			22	58,4 – 58,2 – 58,5		
23	57,1 – 56,9 – 56,4			23	59,6 – 58,9 – 58,2		
24	56,3 – 56,2 -56,4			24	58,1 – 58,9 – 58,4		
25	56,8 - 56,8 – 56,9			25	59,1 – 59,0 – 59,0		
26	57,1 – 56,5 -56,4			26	58,9 – 58,5 – 58,4		
27	56,2 – 56,3 – 56,8			27	58,3 – 58,6 – 58,2		
28	56,8 – 56,0 -58,1			28	59,1 – 59,0 – 59,1		
29	58,2 – 58,0 -58,0			29	58,8 – 58,9 – 58,3		
30	57,1 – 57,3 – 57,0			30	58,9 – 59,9 – 58,3		

APÊNDICE D

Tabela 4 – Dureza Superficial após revenimento.

Peça	Dureza Superficial (HRC) (Indução)		Peça	Dureza Superficial (HRC) (Condução)
01	48,5 – 48,5 – 48,4		01	50,9 – 50,6 – 50,3
02	48,2 – 48,3 – 48,2		02	50,6 – 49,6 – 49,6
03	48,6 – 48,7 – 48,9		03	49,9 – 50,1 – 50,0
04	48,0 – 48,0 – 48,1		04	52,0 – 51,0 – 51,3
05	48,9 – 49,1 – 48,0		05	49,9 – 49,8 – 49,8
06	48,3 – 48,9 – 48,7		06	49,7 – 49,6 – 49,5
07	48,6 – 48,5 – 48,2		07	48,8 – 48,6 – 49,1
08	48,9 – 48,6 – 48,5		08	49,1 – 50,2 – 49,8
09	48,9 – 48,8 – 48,6		09	49,2 – 49,6 – 49,4
10	48,7 – 49,0 – 48,3		10	50,1 – 50,6 – 51,2
11	48,5 – 48,4 – 48,4		11	50,3 – 49,9 – 50,2
12	48,3 – 48,2 – 48,8		12	49,8 – 49,6 – 49,3
13	48,4 – 48,3 – 48,9		13	51,0 – 52,0 – 51,1
14	48,9 – 49,1 – 49,0		14	49,6 – 49,3 – 49,6
15	48,5 – 48,6 – 48,4		15	49,6 – 49,5 – 49,3
16	48,7 – 48,6 – 48,9		16	48,9 – 48,6 – 48,8
17	48,3 – 48,5 – 48,6		17	51,2 – 51,6 – 51,3
18	48,6 – 48,5 – 48,4		18	52,0 – 52,0 – 52,0
19	48,7 – 48,9 – 48,1		19	51,9 – 51,3 – 51,2
20	48,1 – 48,2 – 48,3		20	51,0 – 49,9 – 51,1
21	49,1 – 49,2 – 48,9		21	49,1 – 49,0 – 49,3
22	48,9 – 49,0 – 49,1		22	49,9 – 49,9 – 50,2
23	48,3 – 48,2 – 48,6		23	50,6 – 50,7 – 51,2
24	48,2 – 48,9 – 48,5		24	51,4 – 51,6 – 51,5
25	48,3 – 48,1 – 48,7		25	51,0 – 51,2 – 51,1
26	49,9 – 49,8 – 49,6		26	51,6 – 52,0 – 51,2
27	49,1 – 48,9 – 48,6		27	51,3 – 51,2 – 51,4
28	48,8 – 48,9 – 48,8		28	49,9 – 50,5 – 50,2
29	48,6 – 48,4 – 48,5		29	50,6 – 50,8 – 50,9
30	48,8 – 48,8 – 48,7		30	50,7 – 50,3 – 50,5