

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
COORDENAÇÃO DO CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA
ENGENHARIA MECÂNICA**

LEONARDO AUGUSTO RODRIGUES PUHL

**INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE TEMPERATURA E
RESFRIAMENTO DE TÊMPERA EM AÇO SAE 4140**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

GUARAPUAVA

2017

LEONARDO AUGUSTO RODRIGUES PUHL

**INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE TEMPERATURA E
RESFRIAMENTO DE TÊMPERA EM AÇO SAE 4140**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentada como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel, em Engenharia Mecânica, da Coordenação do Curso de Engenharia Mecânica, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Msc. Henrique Ajuz Holzmann

GUARAPUAVA

2017



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Guarapuava
Diretoria de Graduação e Educação Profissional
Coordenação de Engenharia Mecânica
Engenharia Mecânica



TERMO DE APROVAÇÃO

INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE TEMPERATURA E RESFRIAMENTO DE TÊMPERA EM AÇO SAE 4140

por

LEONARDO AUGUSTO RODRIGUES PUHL

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado em 27 de junho de 2017 como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Msc. Henrique Ajuz Holzmann
Prof. Orientador

Msc. Ricardo Bubna Biscaia
Membro Titular

Msc. Wellington Uczak de Goes
Membro Titular

- O Termo de Aprovação assinado encontra-se na Coordenação do Curso -

RESUMO

PUHL, Leonardo Augusto Rodrigues. **Influência dos parâmetros de temperatura e resfriamento de têmpera em aço SAE 4140**. 2017. 47 f. Trabalho de Conclusão de Curso, Bacharelado em Engenharia Mecânica - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Guarapuava, 2017.

Dentre os muitos tratamentos térmicos, a têmpera tem grande empregabilidade no meio industrial pois este tratamento térmico é utilizado com propósito de aumentar a dureza do metal e, com isto, produzir peças com maior confiabilidade, aumentando sua resistência a fadiga, resistência ao desgaste, resistência a cargas estáticas e dinâmicas. Como é conhecido que as propriedades do aço dependem de sua microestrutura, no caso da têmpera, a microestrutura pretendida é a martensita, que se dá com o aquecimento do aço a temperaturas acima da temperatura crítica e o rápido resfriamento em meios refrigerantes que garantam a formação da martensita. Portanto este trabalho tem como objetivo estabelecer faixas de temperaturas e meios de resfriamento que mais se adequam para a obtenção da martensita no aço SAE 4140, selecionando o meio de resfriamento mais adequado, sem provocar distorções na peça como trincas ou deformações, o que foi obtido com sucesso após a análise do perfil de dureza e análise metalográfica realizadas nas amostras, resultando em uma aptitude de temperatura e um meio eficaz para a transformação martensítica.

Palavras-chave: Aço SAE 4140. Tratamento térmico. Têmpera. Microestrutura. Martensita. Temperabilidade. Dureza.

ABSTRACT

PUHL, Leonardo Augusto Rodrigues. **Influence of temperature and quench cooling parameters on SAE 4140 steel**. 2017. 47 f. Course Completion Work, Bachelor of Mechanical Engineering - Federal Technological University of Paraná. Guarapuava, 2017.

Among the many heat treatments, tempering has great employability in the industrial environment because this heat treatment is used for the purpose of increasing the hardness of the metal and, with this, to produce parts with greater reliability, increasing its resistance to fatigue, wear resistance, resistance to static and dynamic loads. As it is known that the properties of steel depend on its microstructure, in the case of tempering, the desired microstructure is martensite, which occurs with the heating of the steel at temperatures above the critical temperature and the rapid cooling in coolant means that guarantee the formation of martensite. Therefore, the objective of this work is to establish temperature ranges and cooling media that are most suitable for obtaining martensite in SAE 4140 steel, selecting the most suitable cooling medium without causing distortions in the part such as cracks or deformations. Which was successfully obtained after the analysis of the hardness profile and metallographic analysis performed in the samples, resulting in a temperature amplitude and an effective medium for the martensitic transformation.

Keywords: Steel SAE 4140. Heat treatment. Quenching. Microstructure. Martensite. Temperament. Toughness.

A mente que se abre a uma nova
ideia jamais voltará ao seu tamanho
original.

Albert Einstein.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por me proporcionar mais esta oportunidade e me abençoar a cada passo dado, a minha família que desde o começo sempre me apoiou e assistiu em todas minhas escolhas, compartilhando ensinamentos e valores. Sempre me encorajando a jamais desistir dos meus sonhos, frente aos percalços da vida.

Ao meu orientador, Henrique Ajuz Holzmann, pela oportunidade, pela paciência e pelo apoio durante todo o processo de desenvolvimento desde trabalho.

A minha namorada Rute Caroline Perardt, pelo amor, carinho e dedicação, sempre estando ao meu lado e me apoiando nos momentos de dificuldade.

Aos meus amigos de graduação, Markus, Júlio, Andrey, Lucas e Guilherme, por anos de convivência, companhia, momentos de descontração e alegria que sempre proporcionaram. A Universidade Tecnológica Federal do Paraná, campus Guarapuava por ser um ambiente de estudo e aprendizagem.

Por fim, agradeço a todos que de alguma forma me deram suporte e colaboraram para o desenvolvimento deste trabalho. A todos vocês, fica aqui o meu muito obrigado!

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Estrutura cristalina cúbica de corpo centrado (CCC)	5
Figura 2 – Estrutura cristalina cúbica de face centrada (CFC)	5
Figura 3 – Estrutura cristalina tetragonal de corpo centrado (TCC)	6
Figura 4 – Diagrama ferro-carbeto de ferro ilustrando as faixas de temperaturas indicadas nos tratamentos térmicos para aços comuns	7
Figura 5 – Diagrama de fases ferro-carbeto de ferro	9
Figura 6 – Diagrama TTT para aço SAE 4140	10
Figura 7 – Curva CCT para aço SAE 4140	11
Figura 8 – Curvas de resfriamento ao longo de um aço genérico de formato cilíndrico	12
Figura 9 – Curvas de temperabilidade para cinco aços diferentes contendo 0,4% p C	13
Figura 10 – Curvas de temperabilidade para quatro ligas com porcentagens de carbono diferentes	14
Figura 11 – Micrografia do aço com 0,5% de carbono temperado em água	16
Figura 12 – Forno tipo Mufla com temperatura controlada	18
Figura 13 – Pontos de interesse para ensaio de dureza	19
Figura 14 – Amostra embutida O1	19
Figura 15 – Trinca de têmpera na amostra A3	25
Figura 16 – Microscopia da amostra A1, com a) e b) sendo no centro; c) e d) no meio e e) e f) na extremidade da amostra, aquecida a 840°C e resfriada em água, AR – Austenita Retida	26
Figura 17 – Microscopia da amostra A3, com a) e b) sendo no centro; c) e d) no meio e e) e f) na extremidade da amostra, aquecida a 880°C e resfriada em água, AR – Austenita retida	27
Figura 18 – Microscopia da amostra A5, com a) e b) sendo no centro; c) e d) no meio e e) e f) na extremidade da amostra, aquecida a 920°C e resfriada em água, AR – Austenita retida	28
Figura 19 – Microscopia da amostra O1, com a) e b) sendo no centro; c) e d) no meio e e) e f) na extremidade da amostra, aquecida a 840°C e resfriada em óleo, AR – Austenita retida	29
Figura 20 – Microscopia da amostra O3, com a) e b) sendo no centro; c) e d) no meio e e) e f) na extremidade da amostra, aquecida a 880°C e resfriada em óleo, AR – Austenita retida	30
Figura 21 – Microscopia da amostra O5, com a) e b) sendo no centro; c) e d) no meio e e) e f) na extremidade da amostra, aquecida a 920°C e resfriada em óleo, AR – Austenita retida	31

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Faixas de temperaturas de normalização para aços	8
Tabela 2 – Severidade de têmpera de diferentes meios (valores típicos de H)	15
Tabela 3 – Disposição de Amostras para tratamento de Têmpera em água.	17
Tabela 4 – Disposição de Amostras para tratamento de Têmpera em óleo.....	18
Tabela 5 – Medição de dureza superficial antes da têmpera	21

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Perfil de dureza no sentido vertical, com aquecimento em 840°C, com gráfico a) resfriamento em água e gráfico b) em óleo	21
Gráfico 2 – Perfil de dureza no sentido horizontal, com aquecimento em 840°C, com gráfico a) resfriamento em água e gráfico b) em óleo	22
Gráfico 3 – Perfil de dureza no sentido vertical, com aquecimento em 880°C, com gráfico a) resfriamento em água e gráfico b) em óleo	23
Gráfico 4 – Perfil de dureza no sentido horizontal, com aquecimento em 880°C, com gráfico a) resfriamento em água e gráfico b) em óleo	23
Gráfico 5 – Perfil de dureza no sentido vertical, com aquecimento em 920°C, com gráfico a) resfriamento em água e gráfico b) em óleo	24
Gráfico 6 – Perfil de dureza no sentido horizontal, com aquecimento em 920°C, com gráfico a) resfriamento em água e gráfico b) em óleo	25

LISTA DE SIGLAS E ACRÔNIMOS

A – Microconstituente austenita

A_{C1} – Temperatura de início de formação de martensita

A_{C3} – Temperatura de fim da formação de austenita

A_f – Temperatura de fim da transformação de ferrita em austenita

A_s – Temperatura de início da transformação de ferrita em austenita

B – Microconstituente bainita

C – Microconstituente cementita

CCT – Curva de transformação contínua

Cr – Cromo

F – Microconstituente ferrita

Fe_3C – Carboneto de ferro

M – Microconstituente martensita

M_s – Temperatura de início da transformação martensítica

Mo – Molibdênio

NaCl – Cloreto de sódio

NaOH – Hidróxido de sódio

Ni – Níquel

P – Microconstituente perlita

TTT – Temperatura, tempo, transformação

α – Ferro alfa

γ – Ferro gama

δ – Ferro delta

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
1.1 OBJETIVO GERAL.....	2
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	2
1.3 JUSTIFICATIVA	3
2 REFERÊNCIAL TEÓRICO.....	4
2.1 ESTRUTURA CRISTALINA DO AÇO.....	4
2.1.1 Formação do Microconstituente Martensita.....	5
2.2 TRATAMENTOS TÉRMICOS.....	7
2.2.1 Têmpera.....	8
2.2.1.1 Velocidade de resfriamento.....	9
2.2.1.2 Temperabilidade dos aços	11
2.2.1.3 Meios de resfriamento e severidade de têmpera	14
2.2.1.4 Metalografia da Martensita.....	16
3 METODOLOGIA	17
3.1 DELIMITAÇÃO DOS PROCESSOS E OBTENÇÃO DOS MATERIAIS.....	17
3.2 PROCESSO DE AQUECIMENTO e resfriamento.....	17
3.3 PROCESSO DE MEDIÇÃO DA DUREZA E ANÁLISE DA MICROESTRUTURA DO MATERIAL.....	18
3.4 ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS	20
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	21
4.1 PERFIL DE DUREZA	21
4.2 ANÁLISE DAS TRINCAS DE TÊMPERA	25
4.3 ANÁLISE DA MICROESTRUTURA OBTIDA	26
5 CONCLUSÃO E PROPOSTA DE TRABALHOS FUTUROS	32

1 INTRODUÇÃO

Segundo dados do Instituto Aço, o Brasil possui uma capacidade instalada de fabricação de 48,9 milhões de toneladas por ano de aço bruto, é o 5º maior exportador líquido de aço e exporta para mais de 100 países, estes dados mostram o potencial deste mercado frente a outros setores.

A produção e manufatura do aço em geral é custosa e reflete muito no valor do produto final. Como o setor passa por retração, afetando diretamente nos custos, trabalhar suas propriedades mecânicas através de processos de tratamento térmico, se torna de suma importância.

Define-se tratamento térmico como um conjunto de operações de aquecimento e resfriamento a que são submetidos os aços, sob condições controladas de temperatura, tempo, atmosfera e velocidade de esfriamento, com o objetivo de alterar as suas propriedades ou conferir-lhes características determinados. As propriedades dos aços dependem, em princípio da sua estrutura. Os tratamentos térmicos modificam, em maior ou menor escala, a estrutura dos aços, resultando na alteração de suas propriedades (CHIAVERINI, 2008).

Os tratamentos térmicos têm como finalidade modificar as principais propriedades físicas e mecânicas dos metais, sendo os aços, aqueles que melhor respondem a tais processos, resultando, mediante processos específicos de tratamento, em produtos mais resistentes à abrasão e ao desgaste, além de uma boa resistência ao choque (MACEDO, 2007).

Os principais tratamentos térmicos empregados na indústria são os de recozimento; normalização; têmpera e revenimento, bem como suas subdivisões.

Dentre os tratamentos térmicos, a têmpera tem grande importância no meio industrial, pois, este processo possibilita o aumento do limite de resistência à tração do aço e também da sua dureza. O processo de têmpera consiste no endurecimento do aço por aquecimento até a temperatura adequada para obter uma microestrutura austenítica, manutenção da peça neste patamar de temperatura por um tempo adequado e resfriamento em um meio que resulte em velocidade apropriada para obter a formação de martensita (COLPAERT, 2008; DE SOUSA, 2007).

A têmpera é geralmente empregada nos processos que necessitam de peças com elevada resistência e confiabilidade, através deste processo é possível se obter

estruturas e propriedades que permitem o emprego do aço em peças como as que se encontram na indústria mecânica, de transporte e em outros segmentos industriais (CHIAVERINI, 2003).

A faixa de temperatura utilizada no processo de têmpera varia conforme a porcentagem de carbono. Os meios de resfriamento mais empregados são: água, óleo, solução salina aquosa e solução aquosa de polímeros.

O controle da temperatura no processo é fundamental, pois necessita-se de uma adequada faixa para a formação da fase austenítica no material, devendo-se garantir que toda a peça esteja aquecida de forma homogênea, com o intuito de formar martensita, evitando a formação de perlita e ferrita em seu interior.

Portanto, este trabalho tem como objetivo a obtenção de faixas de temperatura de aquecimento e meios de resfriamento que melhor se adequam no processo de têmpera, aumentando assim, sua dureza sem que ocorra deformações no aço durante o resfriamento.

1.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar a influência da temperatura de aquecimento e do meio de resfriamento no processo de têmpera do aço SAE 4140.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Realizar o aquecimento para o tratamento térmico de têmpera em amostras de aço SAE 4140, com diferentes faixas de temperaturas;

Realizar o resfriamento em diferentes meios (água e óleo mineral) das amostras de aço;

Analisar a microestrutura das amostras após processo de têmpera;

Analisar o gradiente de dureza das amostras.

1.3 JUSTIFICATIVA

Atualmente, em meio à crise do setor industrial, fechando o ano de 2016 com queda de 6,6% da produção nacional, e, principalmente no setor metalúrgico, cada vez mais o mercado exige maior eficiência no uso de máquinas, energia e matéria prima, menor tempo de processo na fabricação, maiores índices de produtividade, mais adaptabilidade aos processos, com melhor custo-benefício e que esteja dentro dos requisitos desejados.

O processo de têmpera em aços e ligas tem grande relevância e é muito empregado no meio industrial. Pois por meio deste processo pode se obter alta resistência mecânica, alta resistência ao desgaste e alta resistência à fadiga (cargas cíclicas ou flutuantes no tempo), que são propriedades fundamentais para inúmeras aplicações onde o aço SAE 4140 é empregado: como peças internas de motores (virabrequim, comando de válvulas), sistema de transmissão de torque, diferenciais (conjunto de engrenagens), aplicações em cutelaria, fabricação de moldes, fabricação de cilindros de laminação, tubos para indústria mineradora, petroquímica e barramentos de tornos.

Outro ponto importante na têmpera é o consumo de energia necessário para o aquecimento do aço, entender e controlar de forma eficiente este processo evita reaquecimentos desnecessários e por consequência gera economia de tempo e capital envolvido.

Portanto, é de grande importância conhecer e aperfeiçoar o processo de têmpera, buscando reduzir o tempo e os custos nesta etapa, aumentando assim sua produtividade.

2 REFERÊNCIAL TEÓRICO

2.1 ESTRUTURA CRISTALINA DO AÇO

O ferro puro, ao ser aquecido, apresenta mudanças em sua estrutura cristalina antes de se fundir. À temperatura ambiente, a forma estável, chamada ferrita, ou ferro (α), apresenta uma estrutura cúbica de corpo centrada ou CCC. A 912°C a ferrita apresenta uma transformação polimórfica passando a austenita, ou ferro gama (γ), apresentando uma estrutura cristalina cúbica de face centrada ou CFC. A austenita persiste até aproximadamente 1394°C, temperatura em que a austenita CFC reverte novamente a uma fase CCC, conhecida como ferrita delta (δ), e que finalmente se funde a 1538°C. A ferrita (δ) é virtualmente a mesma que a ferrita (α), exceto pela faixa de temperaturas em que cada uma existe, pois a ferrita (δ) é estável somente em temperaturas elevadas (CALLISTER, 2015). O aço é essencialmente definido como liga de ferro com até 2,11% de carbono. Pode-se então especificar os microconstituintes do aço, para melhor entendimento de suas características (BORTOLETO, 2010):

1. Ferrita: Solução sólida do carbono em ferro α ;
2. Austenita: Solução sólida do carbono em ferro γ ;
3. Cementita: Carboneto de ferro (Fe_3C);
4. Perlita: Produto da transformação austenítica composto de ferrita e cementita ($\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$);
5. Bainita: Microconstituente composto de ferrita e cementita, porém com faixa de temperatura e resfriamento entre a martensita e perlita;
6. Martensita: Produto de austenitização com taxa de resfriamento rápida, impedindo a difusão do carbono, ou seja, supersaturada de carbono, com estrutura tetragonal de corpo centrado ou TCC.

A Figura 1 ilustra a estrutura CCC, presente na ferrita ou ferro α e na ferrita δ .

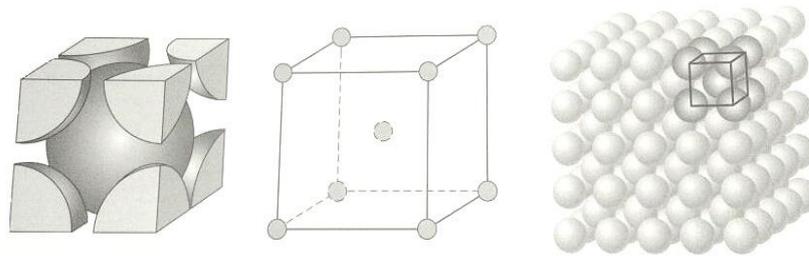


Figura 1 – Estrutura cristalina cúbica de corpo centrado (CCC)

Fonte: Callister, 2015

Como visto, existem algumas possibilidades de microconstituintes nos aços, há várias formas de modificar sua composição, uma delas é pelo tratamento térmico que, quase sempre está ligado a mudança de microconstituente e com isso a mudança da estrutura cristalina (BORTOLETO, 2010).

É necessário entender que as transformações cristalinas resultam em mudanças nas propriedades térmicas e mecânicas do material, além de alterações volumétricas e de solubilidade, o que acarreta deformações e tensões residuais internas no aço (BORTOLETO, 2010).

A Figura 2 ilustra a estrutura CFC, presente na austenita, ou ferro γ .

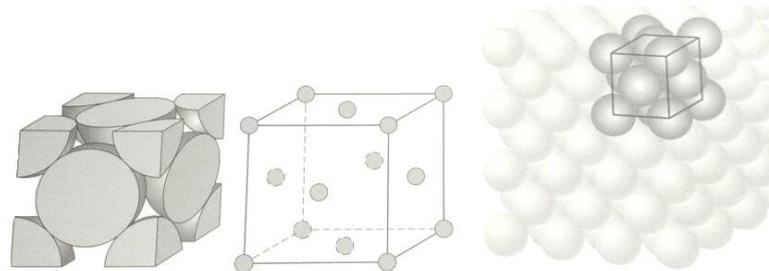


Figura 2 – Estrutura cristalina cúbica de face centrada (CFC)

Fonte: Callister, 2015

2.1.1 Formação do Microconstituente Martensita

A formação da martensita consiste em um mecanismo de cisalhamento e não de difusão, a inexistência de difusão se deve ao fato da martensita se formar somente quando, no resfriamento, uma determinada temperatura de transformação da martensita (M_s) é atingida. O início da formação da martensita é instantâneo e a quantidade de martensita formada cresce à medida que a temperatura diminui (CHIAVERINI, 2008).

O carbono tem grande efeito sobre a dureza da martensita, quanto maior a porcentagem de carbono no aço, mais aumenta sua dureza. Esta relação é devida sua estrutura tetragonal de corpo centrado (TCC), mostrado na Figura 3. Essa estrutura é obtida com o resfriamento rápido e em temperaturas inferiores a M_s , onde não há tempo suficiente para a difusão do carbono, levando a supersaturação de carbono e a distorção do reticulado cristalino pela formação da estrutura TCC. A estrutura martensítica está associada ao surgimento de tensões internas que restringem a movimentação das discordâncias, o que leva a um aumento de resistência mecânica (BERRAHMOUNE, 2006).

O átomo de carbono em solução intersticial no ferro α , transforma o reticulado na sua vizinhança, em reticulado tetragonal, ao invés de cúbico. A forma tetragonal se deve ao fato de que os átomos de carbono se posicionam na aresta do cubo entre os átomos de ferro localizados no vértice. A Figura 3 ilustra o posicionamento do centro dos átomos de carbono (marcados com X), o resultado dessa movimentação atômica é um aumento da distância entre os átomos A e B de ferro e uma diminuição de espaço nas direções transversais a . A variação dos parâmetros do reticulado cubico transforma-o em tetragonal, essa variação é acentuada pelo aumento do teor de carbono (CHIAVERINI, 2008).

Na transformação da estrutura austenítica (CFC) para a estrutura da martensita (TCC) ocorre uma expansão no volume ocupado pelo material (cerca de 4%) que em parte é provocada pela presença do átomo de carbono deslocado na estrutura (BORTOLETO, 2010).

A estrutura cristalina tetragonal de corpo centrado (TCC) é simplesmente um cubo de corpo centrado (CCC) que foi alongado ao longo de sua dimensão em c como mostra a Figura 3 (CALLISTER, 2015).

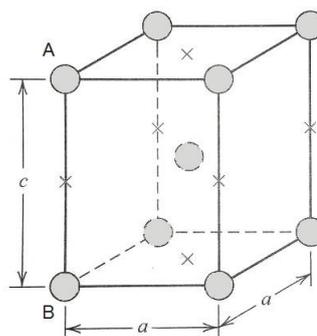


Figura 3 – Estrutura cristalina tetragonal de corpo centrado (TCC)

Fonte: Adaptado de Callister, 2015

2.2 TRATAMENTOS TÉRMICOS

De acordo com a norma NBR - NM 136 (1997), define-se tratamento térmico como a operação ou o conjunto de operações (no caso de tratamento completo) através dos quais se submete o aço, em estado sólido, a um ou vários ciclos térmicos. O meio em que se colocam as peças no intervalo de tempo destas operações pode modificar, a composição química das camadas superficiais da peça. A finalidade de tratamento térmico é a de conferir ao aço propriedades particulares, adequadas à sua transformação ou emprego posterior.

A microestrutura do aço está diretamente ligada às suas propriedades, o emprego dos tratamentos térmicos permite modificá-las com a finalidade de alterar uma ou mais propriedades.

Dentre os tratamentos térmicos existentes, o recozimento tem como objetivo remover tensões internas geradas por processos anteriores (tratamentos mecânicos, soldagem, forjamento, entre outros). Diminuindo então a dureza e melhorando a usinabilidade do aço, e, com isto, altera-se propriedades mecânicas como resistência e ductilidade, ajusta o tamanho de grão e refina estruturas brutas de fusão, produzindo microestrutura definida, restituindo enfim as propriedades alteradas por um tratamento mecânico ou térmico anterior. O tratamento térmico de recozimento consiste no aquecimento do aço acima da zona crítica (faixas de temperaturas ilustradas na Figura 4) durante tempo necessário e suficiente para solubilização do carbono ou dos elementos de liga no ferro gama, seguido de resfriamento lento (CHIAVERINI, 2008).

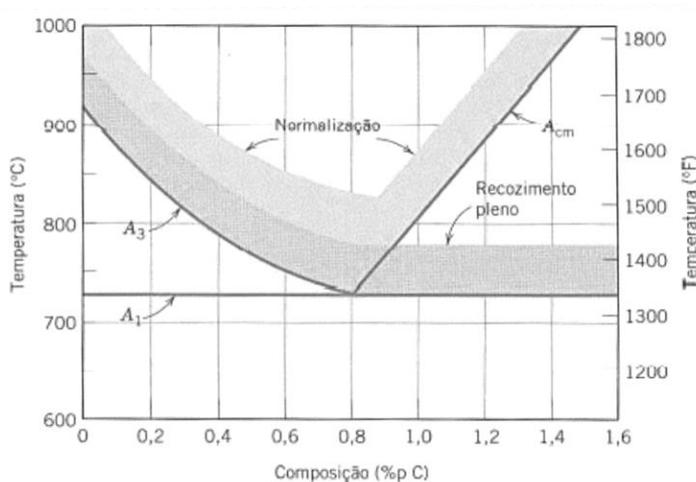


Figura 4 – Diagrama ferro-carbeto de ferro ilustrando as faixas de temperaturas indicadas nos tratamentos térmicos para aços comuns

Fonte: Chiaverini, 2008

As curvas A_3 e A_{cm} ilustram as temperaturas de austenitização completa, (para aços hipoeutetóides curva A_3 , para aços hipereutetóides curva A_{cm}).

Para aços liga as temperaturas de normalização situam a 55°C acima das linhas de austenitização (linhas A_1 e A_{cm} da Figura 4), dependendo do teor de carbono de cada liga.

O processo de normalização é indicado na obtenção de microestruturas homogêneas e refinadas, melhorando a resistência e a tenacidade. Em alguns casos, para se obter uma resposta uniforme a outros tratamentos é necessário partir de uma estrutura uniforme, obtida através de normalização. O ciclo térmico da normalização consiste no aquecimento em temperaturas em que há a completa austenitização como mostra a Tabela 1, seguido de resfriamento ao ar (COLPAERT, 2008).

Tabela 1 – Faixas de temperaturas de normalização para aços

Tipo de aço	Faixa de temperaturas
SAE 1015 à 1020	880°C à 910°C
SAE 1035	850°C à 880°C
SAE 1040, 1045 e 1050	825°C à 850°C
SAE 1060	800°C à 825°C
SAE 1090	800°C à 825°C

Fonte: Chiaverini, 2008

2.2.1 Têmpera

A operação de têmpera visa a obtenção do constituinte martensita, o processo de têmpera consiste em um resfriamento rápido e controlado do material, que anteriormente foi aquecido (temperaturas de 750°C até 1250°C) visando a austenitização total, para que os carbonetos dos elementos de liga se dissolvam, em seguida, resfria-se a peça tratada em meio refrigerante adequado para a transformação martensítica (BORTOLETO, 2010; SOUSA 2007).

Este tratamento térmico é de grande importância, porque é por intermédio dele, acompanhado pelo revenido, que se obtém as estruturas e as propriedades que permitem o emprego do aço em peças que necessitam de maior dureza (CHIAVERINI, 2008).

Para obtenção da martensita é necessário que o aço atinja temperaturas de austenitização. Para que isto ocorra, a ferrita (estrutura CCC) é aquecida de tal forma que ocorre uma transformação polimórfica para a austenita, estrutura cristalina cúbica de face centrada (CFC), como mostra a Figura 5, diagrama de fases ferro-carbeto de ferro abaixo.

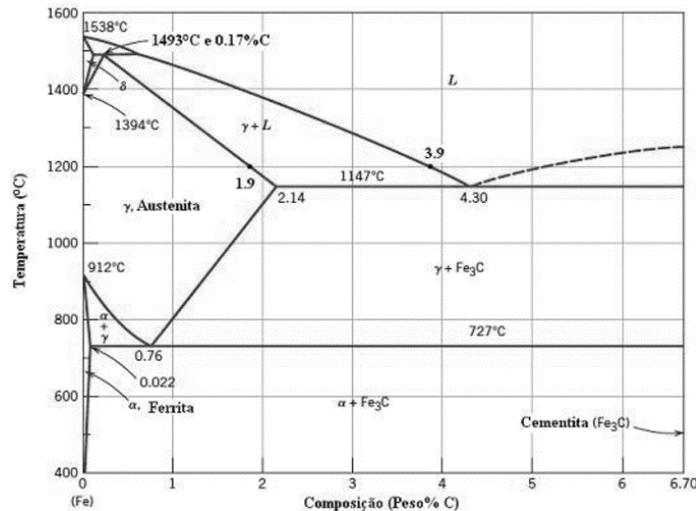


Figura 5 – Diagrama de fases ferro-carbeto de ferro

Fonte: Adaptado de Callister, 2015

Com base na Figura 4 e Figura 5, as temperaturas empregadas na têmpera variam de acordo com o teor de carbono, portanto, escolhem-se temperaturas de 40°C à 60°C acima da temperatura crítica, para efetuar o tratamento de têmpera (ALBANO, 2012; BARREIRO, 1985).

É necessário um tempo de aquecimento para que se ocorra total homogeneização, transformando a estrutura polimórfica de ferro α para ferro γ .

2.2.1.1 Velocidade de resfriamento

Após a realização do aquecimento e austenitização do aço, o mesmo é resfriado de forma rápida, para que a transformação de austenita em martensita ocorra, como é ilustrado no diagrama TTT (temperatura-tempo-transformação).

Para exemplificar a formação da martensita, tomando como exemplo um aço SAE 4140, conforme apresentado no diagrama TTT mostrado na Figura 6 abaixo.

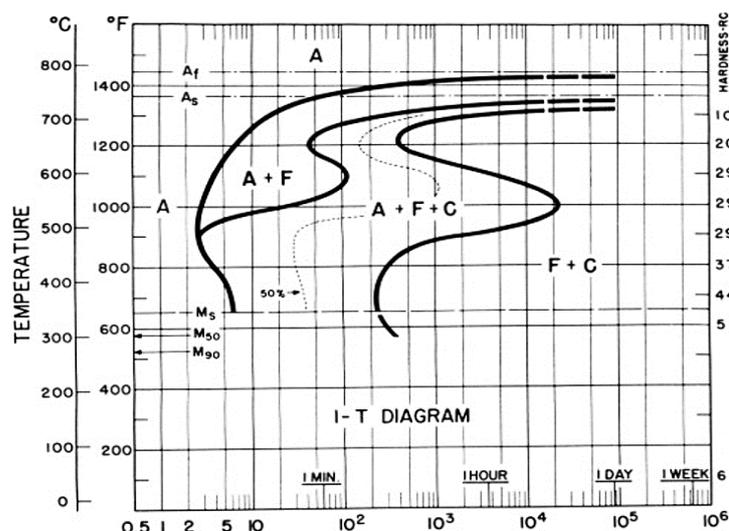


Figura 6 – Diagrama TTT para aço SAE 4140

Fonte: American Society for Metals, 1991

O resfriamento deve ser de tal forma que se evite a transformação da austenita nos seus produtos de decomposição como ferrita ou cementita mais perlita, dando lugar a transformação da martensita. Dependendo da velocidade de resfriamento a que o material é submetido, obtém-se uma determinada proporção entre as diferentes fases do material, o que irá determinar posteriormente as características físicas e mecânicas para este material, sendo elas: dureza, tenacidade, ductibilidade, entre outros (BORTOLETO 2010; American Society for Metals, 1990).

Neste diagrama TTT, o tempo de transformação em uma determinada temperatura é representado através de uma transformação isotérmica, que ocorre em uma temperatura fixa após um resfriamento instantâneo (COLPAERT, 2008).

Pode-se observar também as linhas de temperatura (M_{50}) para a obtenção de 50% de martensita na peça e (M_s) onde começa a formação de martensita. Tempos de resfriamento maiores que 100 segundos não são interessantes para o processo de têmpera, pois não há porcentagem significativa de martensita presente na peça. Este diagrama TTT relaciona cada tipo de aço, a dureza e os microconstituintes formados (American Society for Metals, 1991).

Com objetivo de relacionar a taxa de resfriamento e a porcentagem de formação de martensita, pode-se utilizar o diagrama CCT ou curvas de resfriamento contínuo. Para o aço de baixa liga SAE 4140, comum a Figura 6, tem-se as linhas Ac1 e Ac3 que correspondem as temperaturas de 720°C e 780°C respectivamente.

O diagrama CCT indica que dependendo da velocidade de resfriamento pode-se escolher os meios de resfriamentos mais adequados para a obtenção da martensita, pois relaciona a taxa de resfriamento com as regiões de formação da perlita, ferrita, bainita e martensita, como mostra a Figura 7.

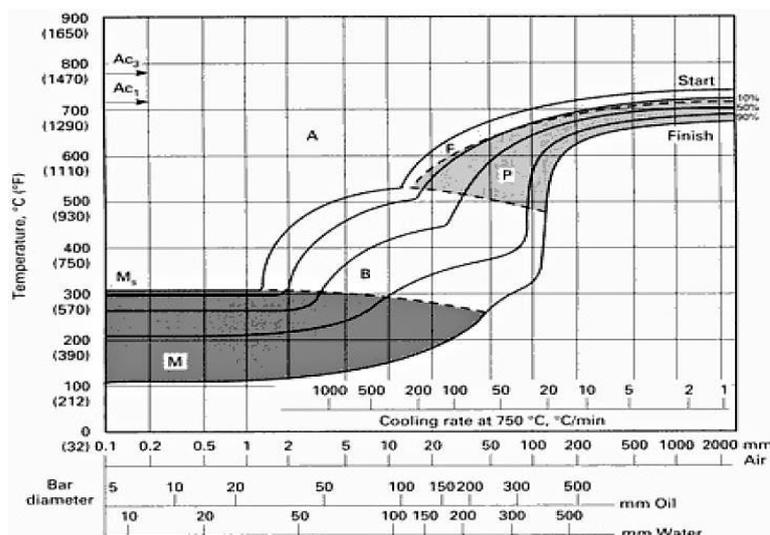


Figura 7 – Curva CCT para aço SAE 4140

Fonte: American Society for Metals, 1991

O diagrama TTT e o diagrama CCT fornecem relações e parâmetros importantes para o processo de têmpera, como a temperabilidade do aço, fornecendo assim as características finais para aplicação da peça temperada.

2.2.1.2 Temperabilidade dos aços

A temperabilidade do material da peça é a característica que define a variação de dureza desde a superfície até o núcleo da peça quando temperada. Está associada à capacidade de determinado aço formar martensita e, portanto, à velocidade crítica de têmpera. O tamanho de grão e a homogeneidade da microestrutura inicial (austenítica) têm efeito sobre a temperabilidade do aço, enquanto o carbono tem um forte efeito sobre a dureza da martensita. A maior parte dos elementos de liga adicionados ao aço retarda as transformações e decomposição difusional da austenita, aumentando sua temperabilidade, assim a velocidade crítica para a

formação da martensita é menor em aços que contêm maior teor de elementos de liga (COLPAERT, 2008).

Temperabilidade não é sinônimo de dureza, um aço com uma temperabilidade elevada é aquele que forma martensita, não apenas em sua superfície, mas em um elevado grau também em todo seu interior (CALLISTER, 2015).

Para exemplificar a temperabilidade de um aço e a sua relação com os microconstituintes formados ao longo da peça, a Figura 8 ilustra um cilindro que está sendo resfriado. Na superfície, onde a troca de calor é maior e conseqüentemente o tempo para atingir a temperatura M_s é menor, obtém-se somente martensita, já no centro, onde o resfriamento ocorre de forma mais lenta, há formação de porcentagens de martensita e bainita, que por conseqüência fornece características distintas na superfície e no centro da peça. Na superfície há alta dureza devido a formação somente de martensita, no centro há combinação de dureza e ductibilidade, pois a bainita é mais dúctil comparada a martensita, pode-se até desprezar a ductibilidade da martensita (COLPAERT, 2008).

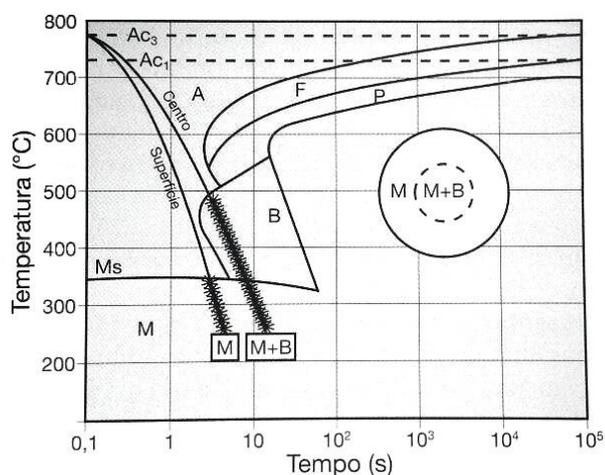


Figura 8 – Curvas de resfriamento ao longo de um aço genérico de formato cilíndrico
Fonte: Colpaert, 2008

Diferentes condições de resfriamento geram diferentes microestruturas formadas ao longo da peça, dependendo das dimensões da peça, do meio de resfriamento e da temperabilidade do aço. Os elementos de liga também influenciam na profundidade de penetração da têmpera, como exemplifica a Figura 9.

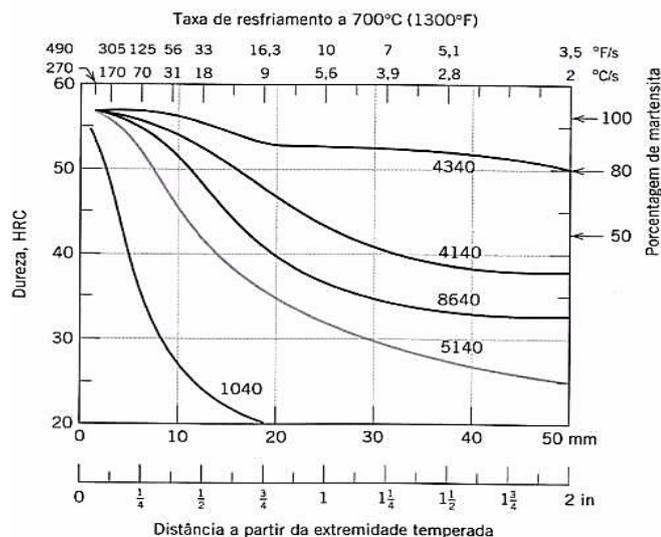


Figura 9 – Curvas de temperabilidade para cinco aços diferentes contendo 0,4% p C
Fonte: Callister, 2015

Com base na Figura 9, ilustra-se cinco aços com a mesma porcentagem de carbono (0,4%), porém com elementos de liga diferentes, segue os elementos presentes em cada aço:

SAE 1040 – Sem adição de elementos de liga;

SAE 4140 – 1,0 Cr e 0,20 Mo;

SAE 4340 – 1,85 Ni, 0,80 Cr e 0,25 Mo;

SAE 8640 – 0,55 Ni, 0,5 Cr e 0,20 Mo;

SAE 5140 – 0,85 Cr.

Percebe-se as diferenças de temperabilidade com a adição dos elementos de liga, para o aço SAE 1040, que não contém elementos de liga, a temperabilidade é baixa, pois sua dureza cai de maneira brusca após uma distância de 10 mm, cerca de 30 HRC de queda. Para os aços que contêm elementos de liga a queda é menos acentuada, o aço SAE 4340 é o mais temperável, pois praticamente não há queda de sua dureza conforme a distância aumenta a partir da extremidade temperada.

Como evidenciado anteriormente, a temperabilidade de um aço é influenciada pela porcentagem de carbono presente no material, adicionando mais carbono a uma liga, aumenta-se sua temperabilidade, pois os átomos de carbono aparecem como impurezas intersticiais na martensita devido a sua estrutura TCC.

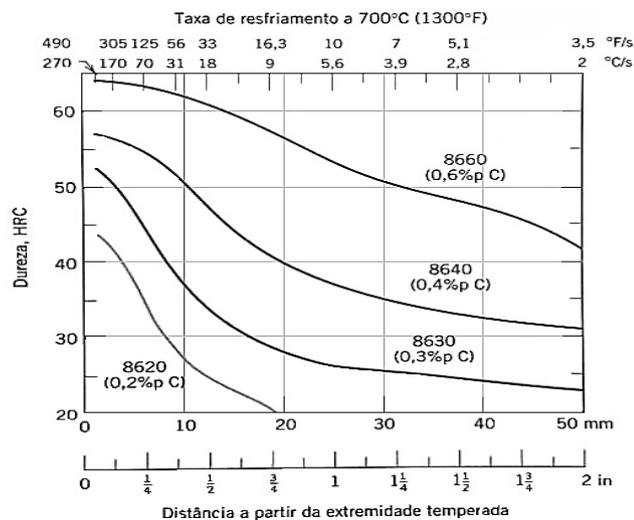


Figura 10 – Curvas de temperabilidade para quatro ligas com percentagens de carbono diferentes

Fonte: Callister, 2015

Na Figura 10, foi realizado o tratamento térmico de têmpera em quatro aços-liga SAE 86xx, variou-se a percentagem de carbono de cada aço-liga, fica evidenciado que a dureza do aço aumentou conforme foi adicionado carbono na liga. Como exemplo o aço SAE 8660 com 0,60% de carbono é mais temperável que o aço SAE 8620 com 0,20% de carbono.

2.2.1.3 Meios de resfriamento e severidade de têmpera

Os meios de resfriamento são escolhidos de acordo com as características finais das peças, do tipo de material e das propriedades requeridas. As soluções aquosas com maior agitação são os meios preferidos, pois há troca de calor mais intensa entre o meio e a peça, desde que a peça possua geometria simples, que não provoque excessivo empenamento ou trincas durante a têmpera (DE SOUSA, 2007).

Portanto, é crucial a escolha do meio de resfriamento mais equilibrado para se obter a martensita e evitar as distorções que possam eventualmente ocorrer. A Tabela 2 apresenta os meios de resfriamento relacionados a severidade de têmpera, por comparação a água sem agitação como meio de resfriamento tem “severidade” ou “H” = 1 (como H sendo um parâmetro de referência de resfriamento, em água e sem agitação).

Tabela 2 – Severidade de têmpera de diferentes meios (valores t picos de H)

Estado de agita�o	óleo	�gua	Salmoura
Nenhuma	0,25 – 0,30	1,0	2,2
Pouca	0,30 – 0,35	1,00 – 1,10	2,0 – 2,2
Moderada	0,35 – 0,40	1,10 – 1,30	-
Boa	0,40 – 0,50	1,40 – 1,50	-
Forte	0,50 – 0,80	1,60 – 2,0	-
Violenta	0,80 – 1,10	4,0	5,0

Fonte: Chiaverini, 2008

Pode-se ainda listar as vantagens e desvantagens de cada meio de resfriamento.

- A  gua possui características desejáveis pois   de baixo custo, não tóxica, possui grande disponibilidade e   não inflamável, porém o poder de resfriamento da água decresce rapidamente com o aumento da temperatura, a agita o da água   uma forma de aumentar a velocidade de resfriamento, pois permite um contato mais direto da água fria com a superfície da peça (DE SOUSA, 2007).

- Os  leos convencionais são um meio de resfriamento mais brando que a água ou salmouras, o que diminui o gradiente de temperatura entre a superfície e o centro da peça, e conseqentemente diminui as chances de ocorrer alguma distor o na peça. Os  leos de resfriamento rápido, são óleos que possuem aditivos para aumentar a taxa de resfriamento, chegando próximo ao resfriamento da água, os aditivos também melhoram a resistência a oxida o, diminuem a forma o de espuma e melhoram as características da curva de resfriamento. Porém os óleos se degradam conforme seu uso, o que afeta muito sua eficácia em poder resfriar a peça, ou seja, óleos oxidados com o uso demoram mais para resfriar a peça, e também são inflamáveis pois a formula o dos aditivos tem como base os derivados do petróleo. (DE SOUSA, 2007).

- As salmouras são soluçoes aquosas de cloreto de sódio ou cálcio, combinadas com aditivos. A velocidade de resfriamento dessas soluçoes   maior que a da água pois, os minúsculos cristais de sal presentes na salmoura que entram em contato com a peça, fragmentam-se violentamente, causando mais agita o que acaba com o filme de vapor na superfície da peça, o que resulta e velocidades de

resfriamento maiores. Devido à alta velocidade de resfriamento a salmoura é recomendada para aços com baixa temperabilidade e de geometria simples, as salmouras possuem desvantagens de serem corrosivas, o que necessita de equipamentos para manuseio e armazenamento. Os sais mais utilizados são concentrações de NaCl 10% e NaOH 3% (DE SOUSA, 2007).

- As soluções de polímeros como meio de resfriamento possuem características de reduzirem o risco de incêndio e fumaça, problemas que podem acontecer com o uso dos óleos. As soluções de polímeros mais utilizadas são as com base nos polímeros poliaquileno glicol (PAG) e polivinil pirrolidone (PVP). As características de velocidade de resfriamento são influenciadas pelo tipo de polímero e sua concentração na solução (DE SOUSA, 2007).

2.2.1.4 Metalografia da Martensita

Para efeito de comparação com os resultados obtidos, tem-se como parâmetro a Figura a seguir, que ilustra os grãos em forma de “agulhas” (regiões escuras na Figura 11), onde tem-se a fase martensítica, já regiões em tons claros são austenita retida, que não se transformou durante o resfriamento brusco.

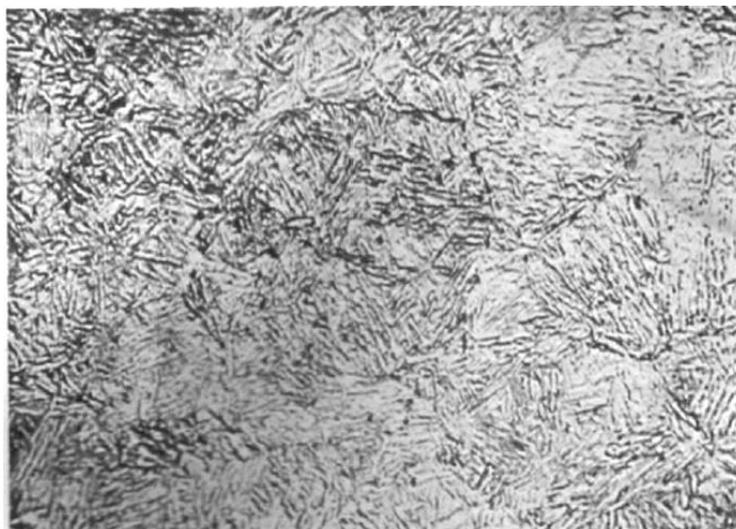


Figura 11 – Micrografia do aço com 0,5% de carbono temperado em água

Fonte: Colpaert, 1974

3 METODOLOGIA

3.1 DELIMITAÇÃO DOS PROCESSOS E OBTENÇÃO DOS MATERIAIS

Esta atividade tem como objetivo o estudo dos parâmetros para realização do tratamento térmico de têmpera. Foi utilizado o aço SAE 4140 laminado, em forma de barra chata, sendo o mesmo temperável e utilizado corriqueiramente em tratamento térmico de têmpera.

Foi realizado o corte desta barra chata em 12 partes iguais, com dimensão de 27 mm de espessura; 50 mm de comprimento e 15 mm de largura.

3.2 PROCESSO DE AQUECIMENTO E RESFRIAMENTO

O processo de aquecimento do aço foi realizado em um forno tipo Mufla com temperatura controlada, no laboratório de Ensaios Mecânicos da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Câmpus Guarapuava.

Cada amostra de aço foi aquecida em uma faixa de temperatura específica, para evitar possíveis desvios e erros de característica experimental, mantendo a precisão na coleta de dados, cada amostra têm sua respectiva réplica, com mesma dimensão, faixa de temperatura, tempo de forno e meio de resfriamento, como ilustra a Tabela 3 e Tabela 4.

Tabela 3 – Disposição de Amostras para tratamento de Têmpera em água.

Amostra e Réplica	Faixa de Temperatura	Meio de Resfriamento	Tempo de Forno após estabilizada a temperatura
1 e 2	840°C	Água	1 hora
3 e 4	880°C	Água	1 hora
5 e 6	920°C	Água	1 hora

Fonte: Autoria própria

Sendo a amostra de ensaio número ímpar e sua réplica número par, como exemplo, amostra número 1 e sua respectiva réplica, a amostra número 2. Para melhor entendimento, as amostras resfriadas em água são marcadas com a letra A seguido de seu número e as amostras em óleo com a letra O seguido de seu número.

Tabela 4 – Disposição de Amostras para tratamento de Têmpera em óleo.

Amostra e Réplica	Faixa de Temperatura	Meio de Resfriamento	Tempo de Forno após estabilizada a temperatura
1 e 2	840°C	Óleo	1 hora
3 e 4	880°C	Óleo	1 hora
5 e 6	920°C	Óleo	1 hora

Fonte: Autoria própria

Durante esta etapa acompanhou-se os parâmetros de temperatura e tempo de manutenção para homogeneização da microestrutura. No processo de aquecimento, utilizou-se o forno tipo Mufla como mostra a Figura 12.



Figura 12 – Forno tipo Mufla com temperatura controlada

Fonte: Autoria própria

Para o processo de resfriamento, realizou-se o resfriamento das amostras em dois meios refrigerantes: água e óleo, ambos sem agitação e em temperatura inicial ambiente, aproximadamente 22°C. Com o objetivo de formar diferentes microestruturas e por consequência, gerar diferentes valores de dureza na superfície e no centro das amostras. Parâmetros como meio de resfriamento e severidade de resfriamento foram analisados neste processo.

3.3 PROCESSO DE MEDIÇÃO DA DUREZA E ANÁLISE DA MICROESTRUTURA DO MATERIAL

Nesta etapa realizou-se a análise de dureza de cada uma das amostras, por meio do gradiente de dureza. Inicialmente efetivou-se um corte transversal, através da Cortadora Metalográfica CM40/60, em cada uma das amostras após o processo

de têmpera, com o perfil em mãos marcou-se pontos de medição de dureza espaçados de 3 milímetros, partindo do centro da amostra (ponto 0) em direção as extremidades, como mostra a Figura 13.

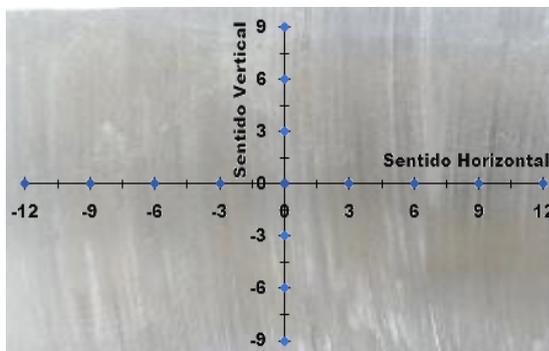


Figura 13 – Pontos de interesse para ensaio de dureza
Fonte: Autoria própria

Para a medição do perfil de dureza utilizou-se o Durômetro Mecânico de Bancada marca DIGIMESS com indentador esférico com ponta de diamante e pré carga de 150 kgf, presente no laboratório de Ensaios Mecânicos da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Câmpus Guarapuava. Foi utilizado como parâmetro de medida a escala de dureza Rockwell C.

Após realização das medidas de dureza, as amostras foram cortadas obtendo-se um perfil de metal que abrange desde o centro até a extremidade, sem que houvesse alteração de estrutura. Assim as amostras foram embutidas a quente através da Prensa Embutidora Metalográfica Manual EM30D (\varnothing 30mm), sendo utilizado o material de adição a baquelite, conforme Figura 14.

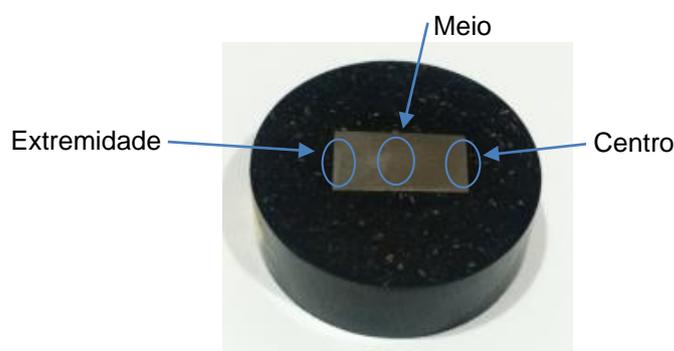


Figura 14 – Amostra embutida O1
Fonte: Autoria própria

Com as amostras embutidas parte-se ao lixamento, realizado através da Politriz Lixadeira Metalográfica - PL02, em uma sequência de lixas de carbeto de silício

com 220, 320, 400, 600 e 1200 mesh. Na finalização as amostras são limpas e polidas com abrasivo de alumina 0,5 microns.

Para destacar os contornos de grão e as estruturas do metal, realizou-se um ataque químico, feito através do reagente Nital a 3% com o tempo de ataque de 10 segundos. Assim as amostras foram levadas até o microscópio óptico marca Olympus modelo BX521 para realização da análise da micrografia das estruturas, com ampliação de 20x e 100x, e foi analisado 3 pontos de interesse, no centro, meio termo entre centro e extremidade e sua extremidade.

3.4 ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS

A fim de se obter o perfil de dureza das amostras após realização da têmpera, os gráficos gerados da medição de dureza, foram divididos em gráficos de comum interesse, para análise e comparação em cada faixa de temperatura usada e meio de resfriamento.

Analogamente para a microestrutura formada, será também comparada para cada faixa de temperatura e meio de resfriamento.

Para alcançar maior precisão nos dados coletados, foi utilizado o cálculo de desvio padrão para o ensaio de dureza, dado pela Equação 1.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{(n-1)}} \quad (1)$$

Onde x é o valor de cada medição, \bar{x} é o valor da média de amostra e n é o tamanho amostral.

Foi realizado o ensaio de dureza em um corpo de prova padrão, com dureza de 62,2 HRC e após 20 medições, calculado o desvio padrão dessa amostragem, adicionando a plotagem dos gráficos para melhor interpretação e precisão dos dados do perfil de dureza.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 PERFIL DE DUREZA

Como parâmetro inicial, foi realizado o ensaio de dureza antes da têmpera, com valores em escala Rockwell C, como ilustra a tabela 5.

Ponto de análise	Dureza em HRC
1	18
2	21
3	17
4	18,5
5	20

Fonte: Autoria Própria

Foram comparados os gráficos do perfil de dureza para cada faixa de temperatura, com meio de resfriamento em água (gráfico a esquerda) e em óleo (gráfico a direita) os resultados podem ser observados pelos Gráficos 1; 2; 3; 4; 5 e 6.

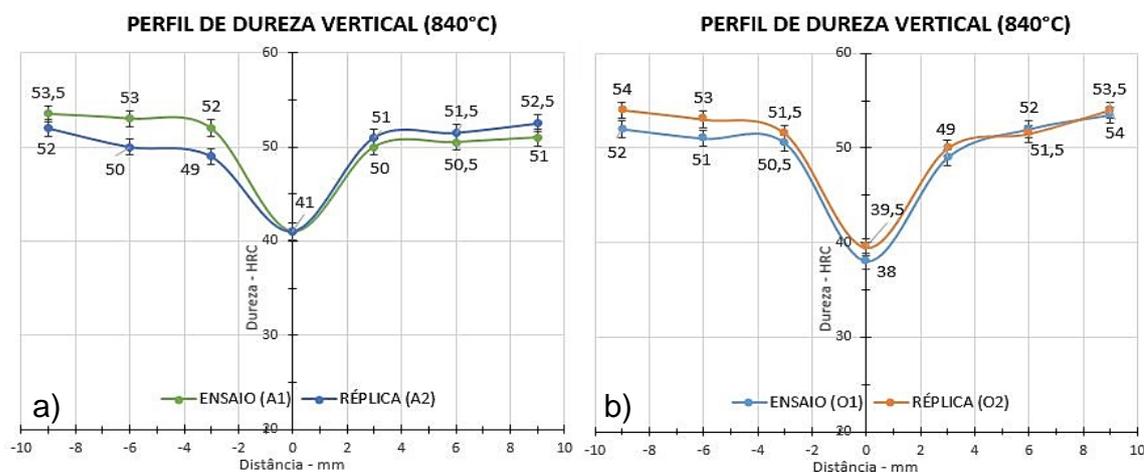


Gráfico 1 – Perfil de dureza no sentido vertical, com aquecimento em 840°C, com gráfico a) resfriamento em água e gráfico b) em óleo

Fonte: Autoria própria

Pode-se visualizar através do Gráfico 1 o comparativo do perfil de dureza em meio de resfriamento água e óleo para uma temperatura de aquecimento de 840°C.

Observa-se que em ambos gráficos houve o aumento de dureza em todo o perfil analisado, devido ao tratamento térmico de têmpera, o qual altera a microestrutura do material, formando uma estrutura martensítica. No centro de todas as amostras nota-se um valor reduzido na medida de dureza se comparado às

extremidades, pois ocorre um resfriamento mais lento, e, com isto, menor porcentagem de formação da martensita. Quanto mais próximo às extremidades da amostra, nota-se o aumento de dureza, pois nesta região ocorre uma maior taxa de resfriamento comparada ao centro, e por consequência, maior porcentagem de formação de martensita em sua microestrutura.

Para o perfil de dureza no sentido horizontal, com a temperatura de aquecimento de 840°C, fica evidenciado o aumento de dureza gradativo quando aproximado das extremidades como demonstra o Gráfico 2.

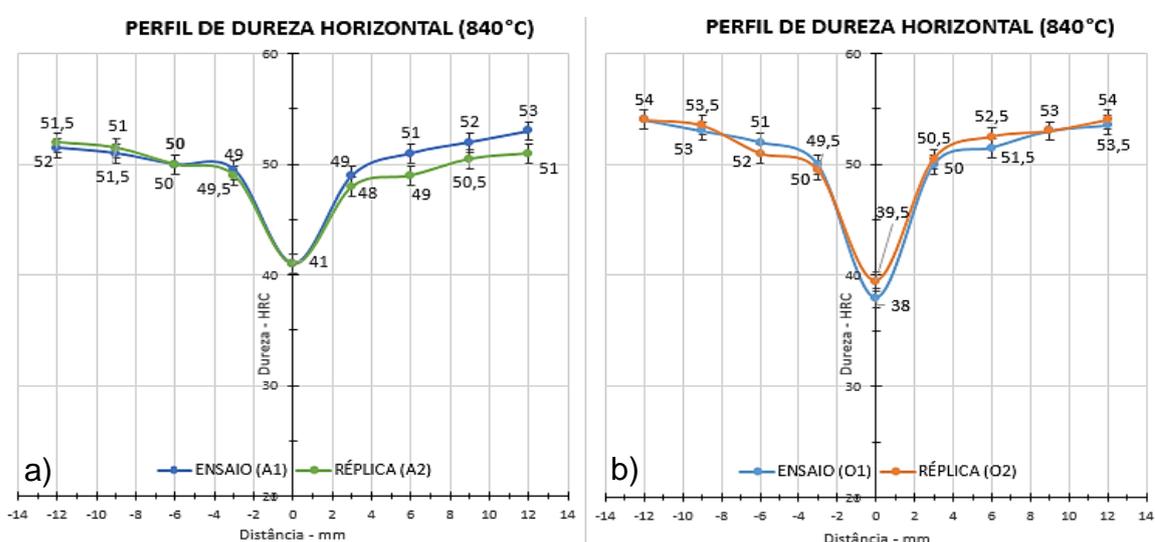


Gráfico 2 – Perfil de dureza no sentido horizontal, com aquecimento em 840°C, com gráfico a) resfriamento em água e gráfico b) em óleo

Fonte: Autoria própria

No resfriamento em óleo, para a temperatura de 840°C, tanto a amostra do ensaio como da réplica obtiveram valores de dureza próximos. Porém, para o resfriamento em água, os valores de dureza variaram entre a amostra e sua réplica, este fenômeno ocorre, pois no resfriamento em água sem agitação, ocorre a formação de uma película de vapor em torno da peça, o que retarda seu resfriamento inicial (American Society for Metals, 1991).

Quando alterado a faixa de temperatura para 880°C, observa-se alterações nos valores de dureza, desde o centro, até sua extremidade, ilustrado pelo Gráfico 3.

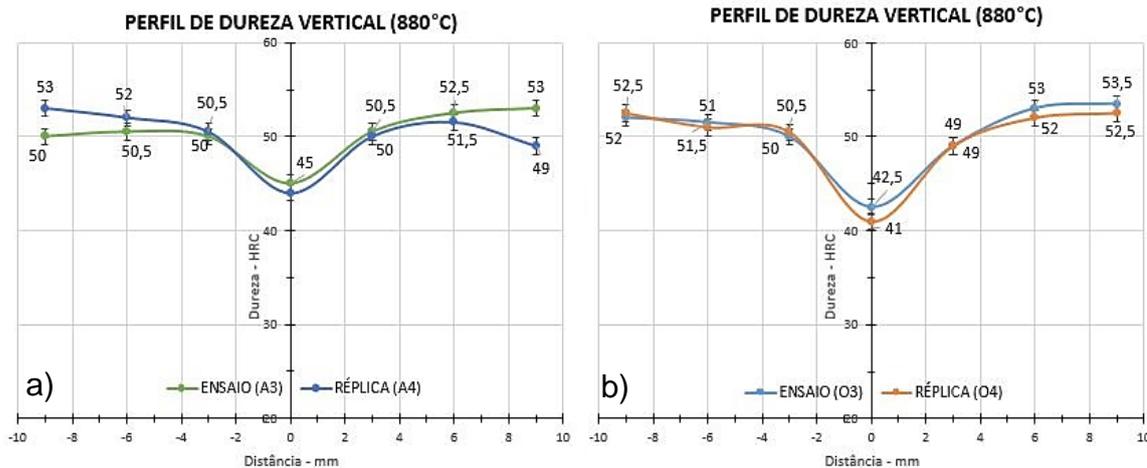


Gráfico 3 – Perfil de dureza no sentido vertical, com aquecimento em 880°C, com gráfico a) resfriamento em água e gráfico b) em óleo
Fonte: Autoria própria

Para esta temperatura de aquecimento (880°C), houve o aumento de dureza em geral, comparado a temperatura de 840°C. Pode-se notar também que na amostra A4 houve uma diminuição de dureza na sua extremidade, isto se deve pela ocorrência de trincas em sua superfície, que por sua vez foram ocasionadas pela severidade do resfriamento.

Já para o perfil de dureza horizontal, com aquecimento a 880°C, nota-se que houve diminuição de dureza nas duas amostras resfriadas em água, como ilustra o Gráfico 4.

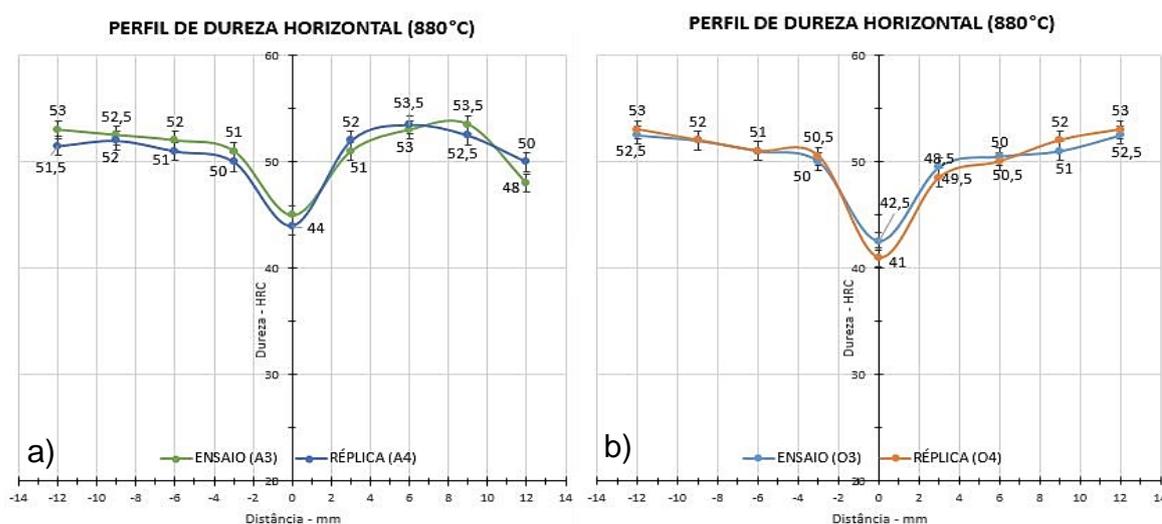


Gráfico 4 – Perfil de dureza no sentido horizontal, com aquecimento em 880°C, com gráfico a) resfriamento em água e gráfico b) em óleo
Fonte: Autoria própria

Pelos valores apresentados no Gráfico 4, verifica-se que para o resfriamento em água, os valores de dureza em geral, foram maiores comparados ao resfriamento em óleo. Isto se dá devido a água ser um meio mais severo de resfriamento do que o óleo, fazendo com que a amostra perca calor mais rápido do que em óleo. Logo tem-se maior porcentagem de martensita em sua microestrutura, resultando em maiores valores de dureza. Porém, em meios mais severos, aumenta-se a probabilidade da ocorrência de trincas. Estas trincas de têmpera ocorreram nas amostras A3 e A4, na extremidade do Gráfico 4 a).

Pode-se então comparar o resfriamento em água e em óleo, onde em água ocorreram trincas de têmpera em duas amostras, já no resfriamento em óleo, houve o aumento de dureza esperado, sem ocorrer deformações e falhas nas amostras, ou seja, as amostras mantiveram seu formato inicial, o que é muito importante no processo final de uma peça.

Para a última faixa de temperatura de aquecimento em 920°C, pode-se visualizar, que em ambos os meios de resfriamento houve um aumento de dureza no centro das amostras, se comparada às faixas de temperaturas inferiores, ilustrada pelo Gráfico 5.

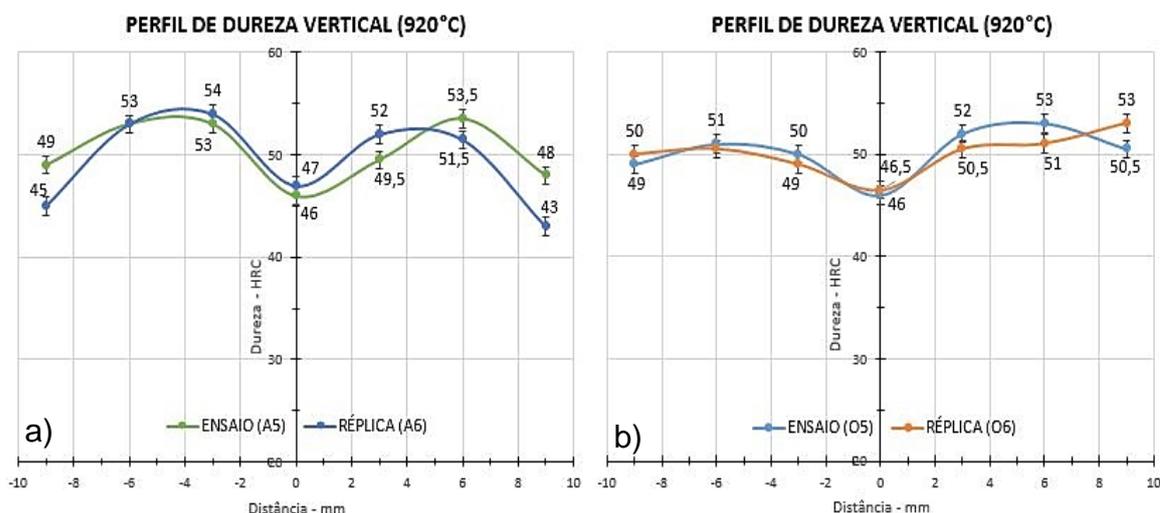


Gráfico 5 – Perfil de dureza no sentido vertical, com aquecimento em 920°C, com gráfico a) resfriamento em água e gráfico b) em óleo
Fonte: Autoria própria

Em contrapartida, nas extremidades das amostras A5, A6 e O5 verificou-se a presença de trincas de têmpera novamente, diminuindo os valores de dureza nestes pontos. Para o sentido horizontal nota-se também as presenças das trincas causadas pela têmpera, dada pelo Gráfico 6.

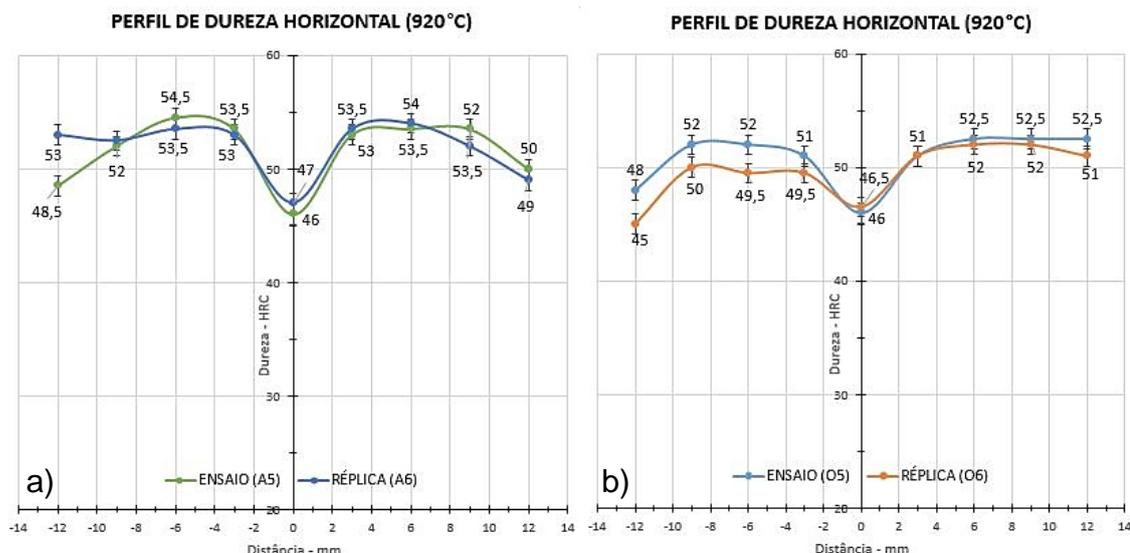


Gráfico 6 – Perfil de dureza no sentido horizontal, com aquecimento em 920°C, com gráfico a) resfriamento em água e gráfico b) em óleo

Fonte: Autoria própria

4.2 ANÁLISE DAS TRINCAS DE TÊMPERA

As trincas de têmpera podem ocorrer devido ao rápido resfriamento, onde há maior diferença de temperatura, gerando assim gradientes de temperatura no interior da peça e, conseqüentemente, gradientes de tensão interna.

Outro fator favorável a ocorrer trinca é devido à variação de volume que ocorre durante a transformação martensítica, pois a martensita tem estrutura tetragonal de corpo centrado (TCC), e esta estrutura pode ser visualizada como uma distorção da estrutura CCC, ou seja, um alongamento em uma direção, causada pelo interstício do elemento carbono (BERRAHMOUNE, 2006).

Isto se reflete na microestrutura da amostra, como tensões internas elevadas, e quando estas tensões são suficientemente grandes, ocorre então a trinca de têmpera, como fica evidenciado na Figura 15.

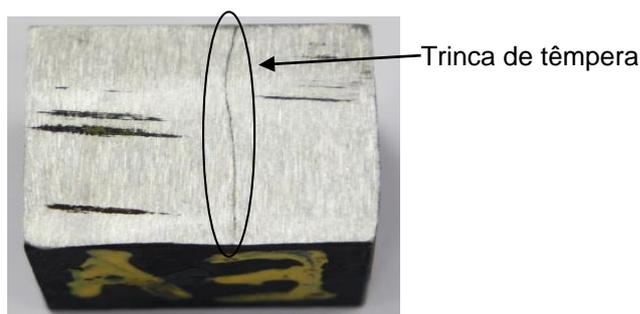


Figura 15 – Trinca de têmpera na amostra A3

Fonte: Autoria própria

O plano onde a trinca está foi esmerilhado, retirando a película de óxido, para melhor visualização da trinca. As amostras onde foram encontradas trincas foram as amostras: A3; A4; A5; A6; O5 e O6.

4.3 ANÁLISE DA MICROESTRUTURA OBTIDA

Foram verificadas as microestruturas em 6 amostras, 3 resfriadas em água e 3 em óleo. Em cada amostra foram analisados 3 pontos de interesse, as Figuras 16, 17, 18, 19, 20 e 21 demonstram as microestruturas após o processo de têmpera.

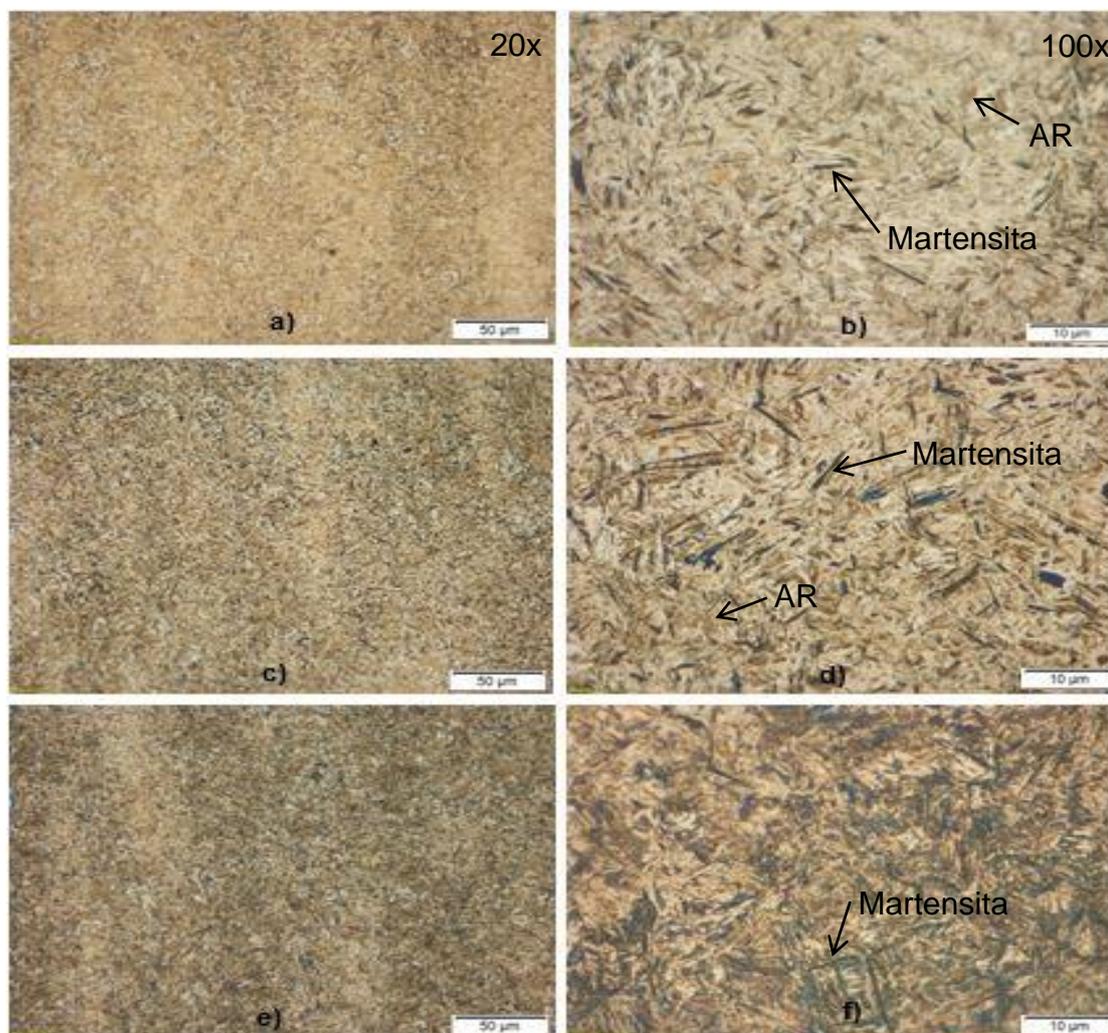


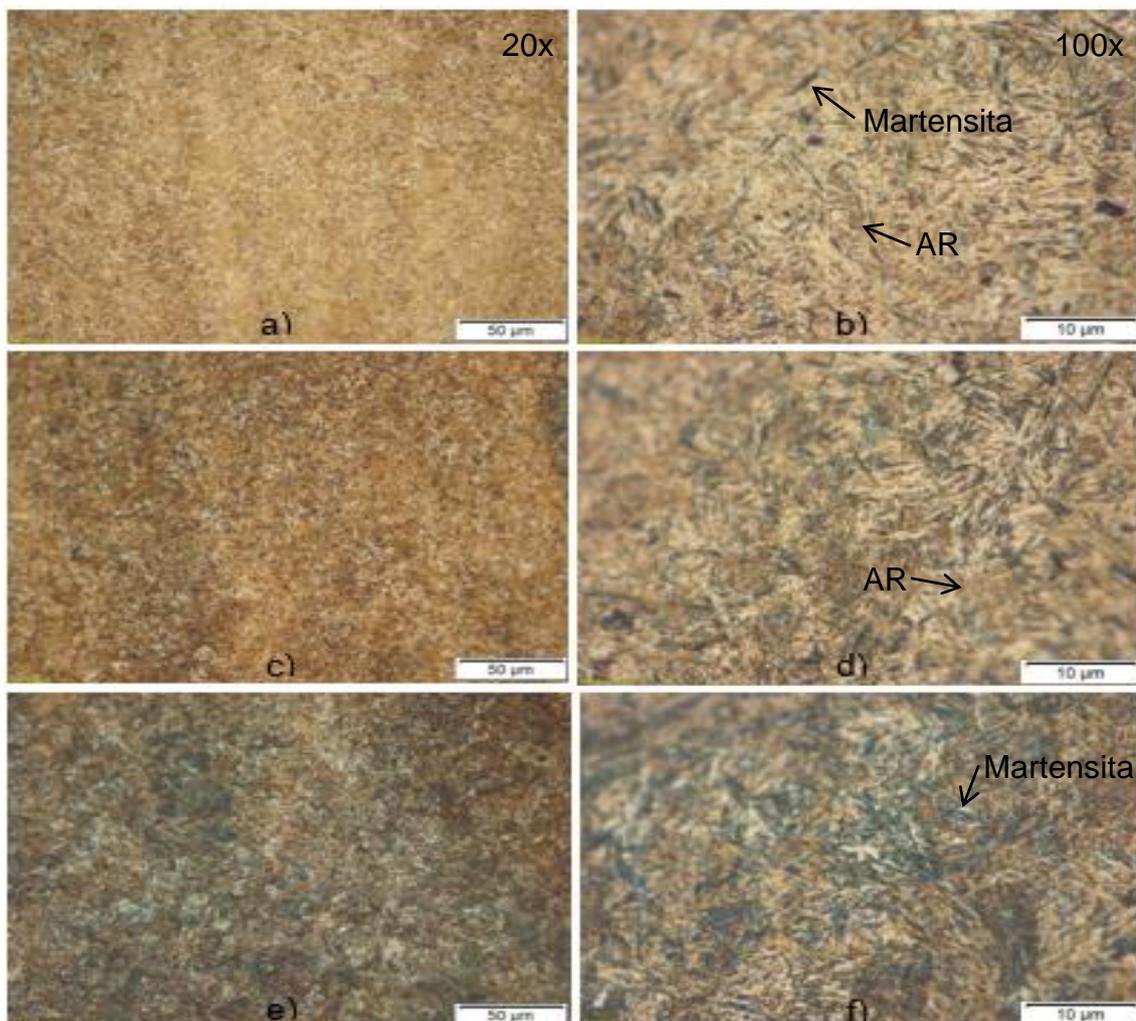
Figura 16 – Microscopia da amostra A1, com a) e b) sendo no centro; c) e d) no meio e e) e f) na extremidade da amostra, aquecida a 840°C e resfriada em água, AR – Austenita Retida

Fonte: Autoria própria

Pela Figura 16, percebe-se claramente o aumento da porcentagem de martensita ao longo da amostra, nota-se a transformação martensítica em todos os

locais, no centro, mais ao meio e na extremidade da amostra. Porém, percebe-se as diferenças na quantidade de martensita formada em cada local, como na extremidade (quadros e) e f)) onde o resfriamento foi mais rápido, formou-se alta quantidade de martensita, em forma de “agulha” ou “ripas” (região em preto no quadro).

No centro e no meio, quadros a); b); c) e d) da Figura 17, formaram grandes regiões de austenita retida (AR) que não se transformou durante o resfriamento (regiões de tons de marrom), para as regiões de tons claros, pode ter ocorrido as fases ferríticas em forma de placas, onde ocorreu o resfriamento mais brando comparada a extremidade.



**Figura 17 – Microscopia da amostra A3, com a) e b) sendo no centro; c) e d) no meio e e) e f) na extremidade da amostra, aquecida a 880°C e resfriada em água, AR – Austenita retida
Fonte: Autoria própria**

Na Figura 17, a partir das microestruturas da amostra A3, nota-se a transformação martensítica muito similar a transformação da amostra A1, com

concentração maior de martensita na extremidade temperada, e conseqüentemente, menor formação ferrítica ou presença da austenita retida (AR).

Isto foi refletido nos ensaios de dureza, onde os valores ficaram bem próximos entre as faixas de temperatura de 840°C e 880°C, com uma pequena variância na faixa de 880°C, valores ligeiramente maiores do que a primeira faixa de aquecimento.

Para a amostra A5, constata-se a transformação martensítica em uma maior porção se comparada as duas primeiras faixas de aquecimento, ilustrada pela Figura 18.

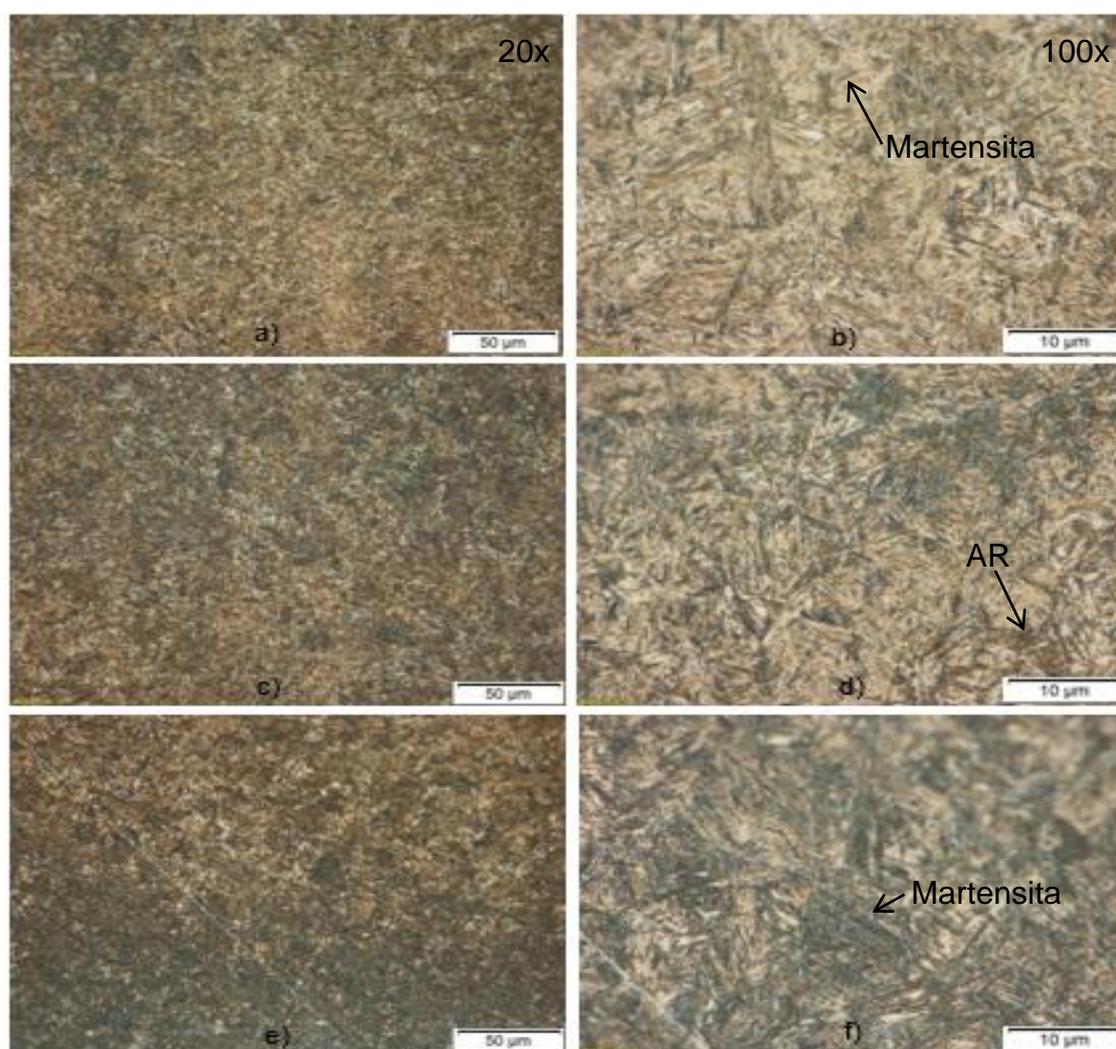


Figura 18 – Microscopia da amostra A5, com a) e b) sendo no centro; c) e d) no meio e e) e f) na extremidade da amostra, aquecida a 920°C e resfriada em água, AR – Austenita retida
Fonte: Autoria própria

Na Figura 18, pode-se identificar maior porcentagem de martensita formada nos 3 pontos de interesse, isto mais uma vez foi refletido nos valores de dureza para a faixa de aquecimento em 920°C, onde os valores foram mais elevados, com exceção dos valores onde ocorreram trincas.

Por ocorrer maior porção de martensita, o material ficou “mais duro”, porém mais frágil, característica da microestrutura martensítica. Aumentando consideravelmente as tensões internas e elevando a chance de ocorrência de trincas de têmpera durante o resfriamento. Pode-se ainda perceber pelo quadro e), o contraste da formação de martensita bem na extremidade e, caminhando em direção ao centro, menor porcentagem de martensita. Verifica-se também nos quadros e) e f) riscos residuais do processo de lixamento e polimento.

Para as Figuras 19 e 20 e 21 tem-se as amostras O1, O3 e O5, resfriadas em óleo.

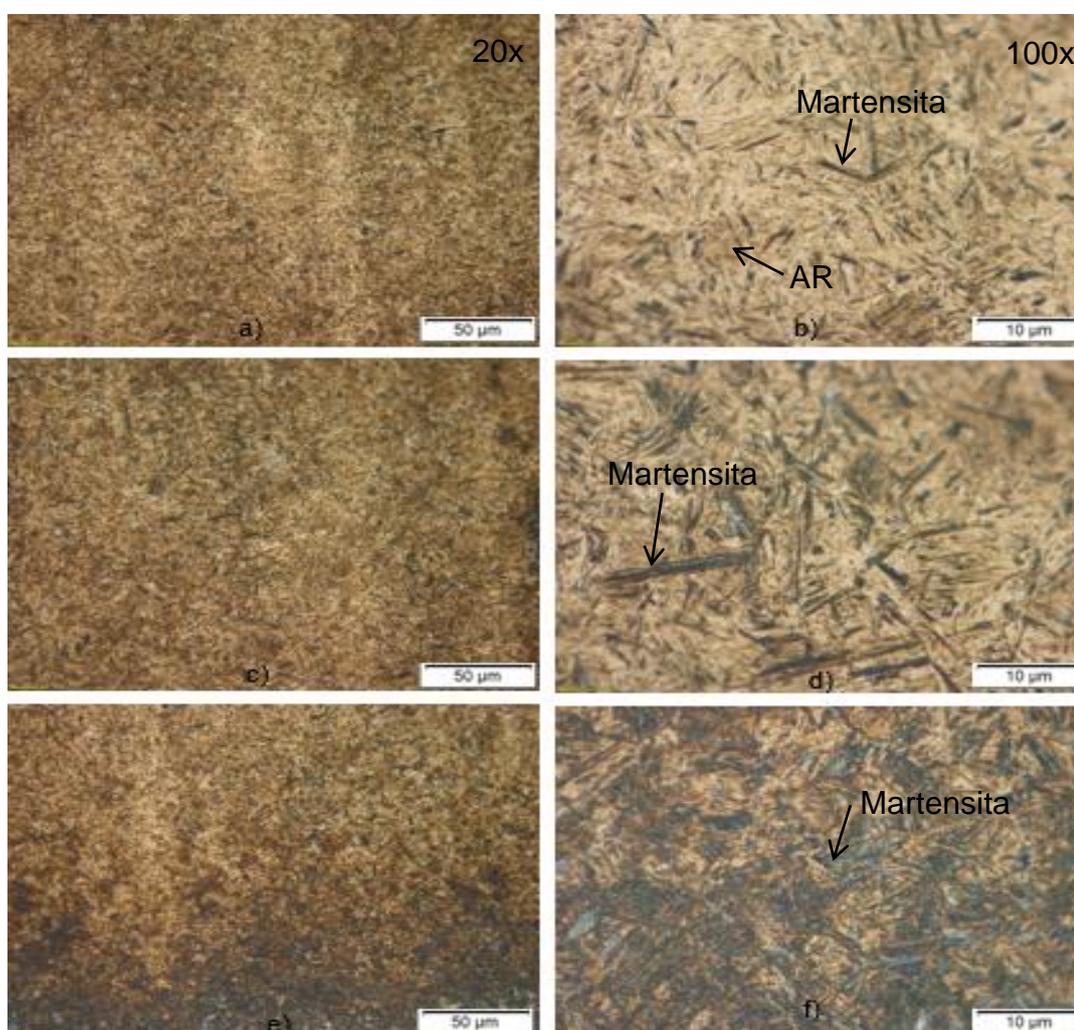


Figura 19 – Microscopia da amostra O1, com a) e b) sendo no centro; c) e d) no meio e e) e f) na extremidade da amostra, aquecida a 840°C e resfriada em óleo, AR – Austenita retida
Fonte: Autoria própria

De forma similar ao ocorrido com as amostras resfriadas em água, verifica-se a transformação martensítica em todos os 3 locais de análise, porém esta

transformação é mais homogênea, ou seja, entre o meio e o centro há pouca diferença de porcentagem de formação de martensita, evidenciadas pelos quadros a) e c).

Pela microscopia da amostra O3 resfriada em óleo, percebe-se uma grande quantidade de austenita retida e regiões ferríticas, Figura 20 quadro a) e b).

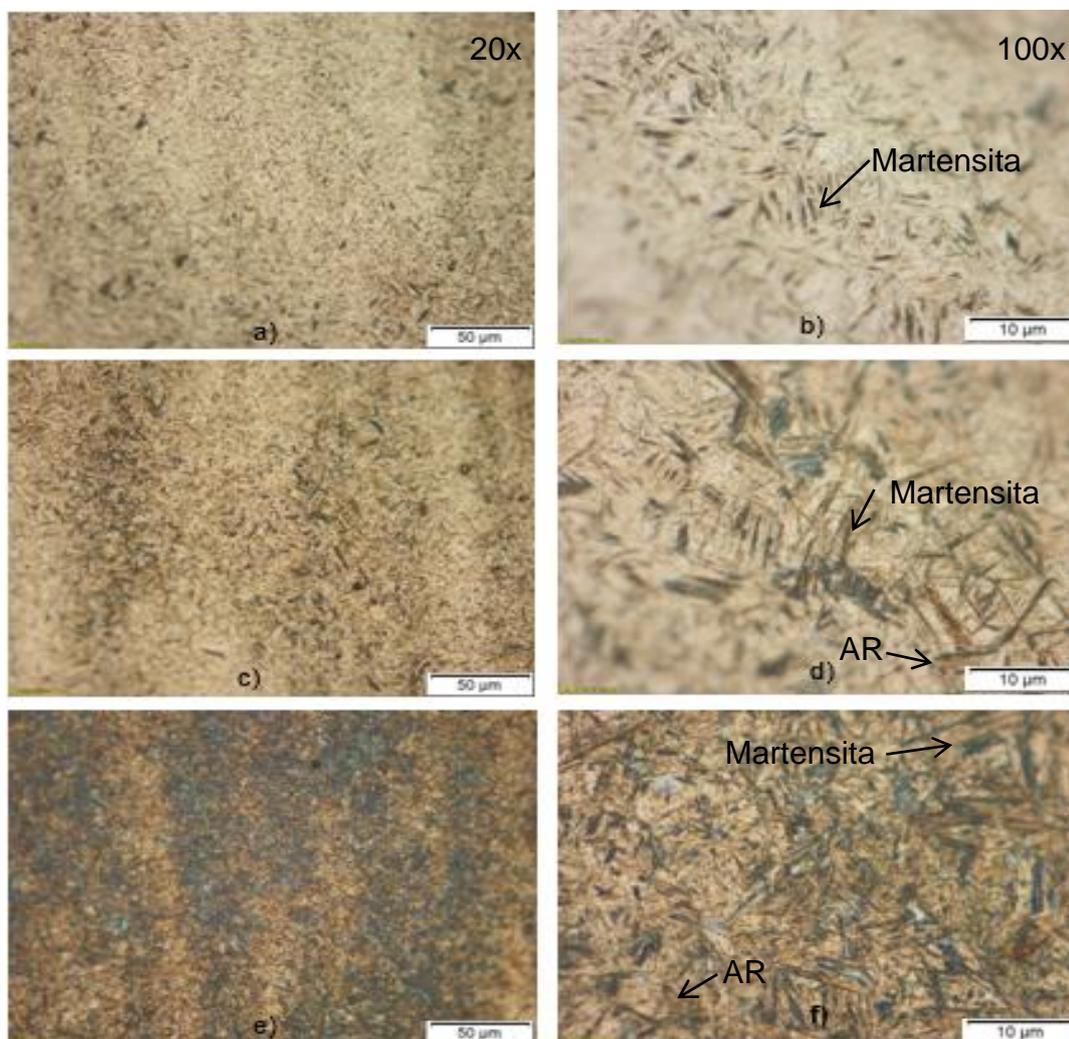


Figura 20 – Microscopia da amostra O3, com a) e b) sendo no centro; c) e d) no meio e e) e f) na extremidade da amostra, aquecida a 880°C e resfriada em óleo, AR – Austenita retida
Fonte: Autoria própria

Além da presença da austenita, nota-se maior presença de martensita na extremidade temperada, quadros e) e f) da Figura 20. Além do maior número de

“agulhas” de martensita, destaca-se também a forma, com “ripas” de martensita mais grosseira, ou seja, maiores aglomerados desta estrutura.

Já para a última amostra, de forma análoga, ocorreu a transformação martensítica desejada, como ilustra a Figura 20. Destaca-se a evolução da transformação martensítica, comparado os 3 lugares de análise.

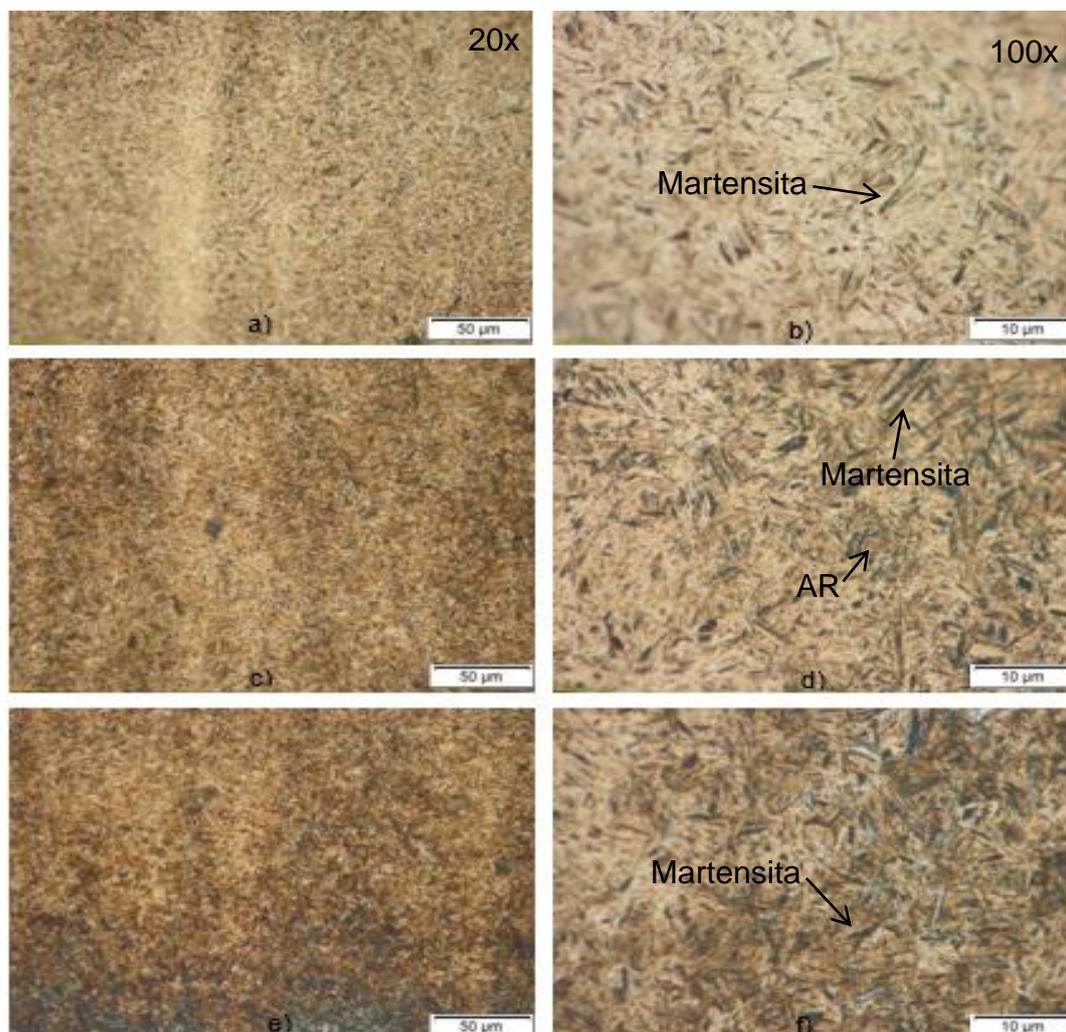


Figura 21 – Microscopia da amostra O5, com a) e b) sendo no centro; c) e d) no meio e e) e f) na extremidade da amostra, aquecida a 920°C e resfriada em óleo, AR – Austenita retida

Fonte: Autoria própria

Como esperado, a análise metalográfica ratificou a formação de martensita, com diferentes porcentagens ao longo da amostra, mostrando a mudança de velocidade de resfriamento que ocorre dentro da amostra. Além de mostrar a forma característica de outras formações microestruturais, de austenita retida não transformada e de regiões ferríticas em cores bem claras.

5 CONCLUSÃO E PROPOSTA DE TRABALHOS FUTUROS

Com base nas análises realizadas e nos resultados obtidos, pode-se concluir que:

O processo de têmpera aplicado no aço SAE 4140 atingiu os objetivos propostos, aumentando a dureza em todo o perfil das amostras, pode-se separar a análise do gradiente de dureza em dois parâmetros, meio de resfriamento e a faixa de aquecimento:

- Quanto ao meio de resfriamento, nota-se que quando comparado ponto a ponto do perfil de dureza tanto em água, quanto em óleo, os valores de dureza se assemelharam bastante, ao longo de todo o perfil da amostra.

- No resfriamento em água ocorreram trincas de têmpera em 4 amostras, muito prejudiciais para a peça, condenando assim seu uso posterior. No resfriamento em óleo, atingiu-se valores de dureza satisfatórios, sem o revés das trincas. Das seis amostras, apenas duas apresentaram as trincas, estas que estavam na faixa de temperatura de aquecimento a 920°C.

Portanto, pode-se afirmar pelos resultados obtidos que o meio de resfriamento mais eficaz para o processo de têmpera no aço SAE 4140 é em óleo, pela constância nos valores de dureza, sem a ocorrência de trincas.

Quanto as faixas de temperaturas de aquecimento, foram utilizados três valores:

- Para as temperaturas de 840°C e 880°C, foi obtido o aumento de dureza desejado, sem que ocorresse trincas nas amostras resfriadas em óleo, já para a temperatura de 920°C, as duas amostras O5 e O6 apresentaram trincas.

- Para as amostras resfriadas em água, ocorreu trincas nas faixas de aquecimento à 880°C e 920°C, ou seja, a faixa de temperatura de 920°C foi a menos eficaz, pois nesta faixa que se deu trinca em todas as quatro amostras.

- Sendo assim, para o resfriamento em óleo, pode-se escolher entre a temperatura de 840°C e 880°C, pois ambas foram eficientes em aumentar a dureza, sem a ocorrência de trincas.

Com a análise metalográficas das amostras, pode-se concluir que, através da têmpera houve a transformação martensítica em todos os pontos de análise, tanto em

água, quanto em óleo. Com presença de martensita, austenita retida e regiões ferríticas.

Sugestões para trabalhos futuros:

- Modificar o grau de agitação dos meios de resfriamento, como meio parado; média agitação e alta agitação;
- Adicionar o meio de resfriamento mais severo, como salmora;
- Após têmpera, utilizar o processo de revenimento, variando as temperaturas de revenimento, com objetivo de aliviar as tensões internas e a formação da martensita revenida. Avaliando novamente o gradiente de dureza e sua microestrutura.

REFERÊNCIAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 136 – **Tratamentos Térmicos de Aço – Terminologias e Definições**. 1997;

ALTAWELL, Ali; TOLOUEI-RAD, Majid. **Effect of Quenching media, specimen size and shape on the hardenability of AISI 4140 steel**. Artigo apresentado para jornal de Engenharia em Emirados Árabes. Cowan University. Austrália, 2014;

ALBANO, Luigi. L. M. **Estudo Comparativo das Propriedades Mecânicas de Aço AISI 5160 submetidos à Têmpera Convencional e Têmpera intensiva**. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Materiais. Escola de Engenharia de São Carlos, 2012;

ASM, Metals Handbook. **Introduction of Heat Treating of Tool Steels**, vol 4, 1991;

ASM, Metals Handbook. **Metallography and Microstructures**, vol 9, 1991;

BARREIRO, J. A. **Tratamientos Térmicos de Los Aceros**. 8 ed. Madri. Espanha: Editorial Dossat, 1985;

BERRAHMOUNE, M. R. **Transformation martensitique et rupture différée dans l'acier austénitique instable 301LN**. Tese de Doutorado – Doctorat Mécanique et Matériaux, ENSAM, École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, 2006;

BORTOLETO, Eleir. M. **Modelamento Numérico Computacional das Transformações de fase nos Tratamentos Térmicos de Aços**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2010;

CALLISTER, Willian. D. RETHWISCH, D. G. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012;

CALLISTER, Willian. D. **Fundamentos da Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Abordagem Integrada**. 4. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2015;

COLPAERT, Hubertus. **Metalografia dos Produtos Siderúrgicos comuns**. 4. ed. Revista e atualizada. São Paulo: Editora Blucher, 2008;

CHIAVERINI, Vicente. **Aços e Ferros fundidos**, 7. ed. Revista e atualizada. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2008;

CHIAVERINI, Vicente. **Tratamento Térmico das Ligas Metálicas**. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2008;

DE SOUSA, Ester. C. **Estudo da Oxidação do Óleo de Soja com diferentes concentrações de Aditivos Antioxidantes, para uso em Tratamentos Térmicos de Têmpera**. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Materiais. Escola de Engenharia de São Carlos, 2007;

ECHEVERRI, Edwan. A; TSCHIPTSCHIN, André. P. **Análise numérica e experimental das tensões residuais geradas na têmpera de um cilindro de aço AISI 4140**. Artigo apresentado em congresso. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – USP. São Paulo, 2012;

FUNATANI, Kiyoshi. **Heat treatment of automotive components: Current status and future trends**. Artigo. Transactions of The Indian Institute of Metals. Nagoya, 2004;

INSTITUTO AÇO BRASIL. **Dados de Mercado**, 2015. Disponível em: <<http://www.acobrasil.org.br/site2015/dados.asp> > Acesso em: 20 de abr. 2017;

MACEDO, Marciano Q. **Efeito dos Parâmetros de Austenitização sobre a Microestrutura e as Propriedades do Aço SAE 4140 submetido a Tratamentos Térmicos por Indução Eletromagnética**. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Materiais. Universidade Federal de Ouro Preto. Rede Temática, 2007;

RASMA, Eline. Tourinho. **Caracterização Estrutural e Mecânica do Aço AISI/SAE 4140 Tratado Sob Diferentes Tratamentos Térmicos**. 2015, 128 pág. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Ciência dos Materiais. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, 2015;

SEVALE, Lucas. G. **Estudo da Influência de Tratamentos Térmicos nas variações Microestruturais do Aço SAE 4340**. Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica. Universidade de Brasília. Brasília, 2014;

TSCHIPTSCHIN, André. P. **TRATAMENTOS TÉRMICO DE AÇOS**. Disponível em: <<http://www.pmt.usp.br/pmt2402/TRATAMENTO%20T%C3%89RMICO%20DE%20A%C3%87OS.pdf>> Acesso em: 21 de set. 2016;

Valor Econômico, **Dados da Produção industrial no Brasil em 2016**. Disponível em: <<http://www.valor.com.br/brasil/4854880/producao-industrial-encerra-2016-com-queda-de-66>> Acesso em: 29 de jul. 2017;

ZUPPO, Ricardo M. **Análise Comparativa do Efeito de Têmpera e Revenimento e da Austêmpera seguida ou não de conformação a frio na Microestrutura e nas Propriedades do Aço SAE 4140H**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica. Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2011.