



FERNANDA REZENDE LIMA

**AVALIAÇÃO DO ÓLEO DE GIRASSOL COMO
MEIO DE TÊMPERA PARA AÇOS AISI 8640**

LAVRAS - MG

2019

FERNANDA REZENDE LIMA

**AVALIAÇÃO DO ÓLEO DE GIRASSOL COMO
MEIO DE TÊMPERA PARA AÇOS AISI 8640**

Monografia apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Engenharia de Materiais, para a obtenção do título de Bacharel.

Prof. Dr. Leonardo Pratavieira Deo

Orientador

Lavras - MG

2019

FERNANDA REZENDE LIMA

**AVALIAÇÃO DO ÓLEO GIRASSOL COMO MEIO
DE TÊMPERA PARA AÇOS AISI 8640
EVALUATION OF SUNFLOWER OIL AS A
QUENCHING MEDIUM FOR STEELS AISI 8640**

Monografia apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Engenharia de Materiais, para a obtenção do título de Bacharel.

APROVADA em 22 de novembro de 2019.
Dr. Leonardo Pratavieira Deo UFLA
Dr. Alfredo Rodrigues de Sena Neto UFLA
Dr. Osmar de Sousa Santos UFLA

Prof. Dr. Leonardo Pratavieira Deo
Orientador

LAVRAS – MG

2019

RESUMO

A têmpera é um tratamento térmico aplicado em aços em que se utiliza um meio refrigerante para retirar o calor da peça austenitizada, alterando assim sua estrutura e microestrutura, resultando em melhora na resistência mecânica e dureza. Os meios refrigerantes mais utilizados são água, salmoura e óleos minerais. Apesar de conferir bons resultados finais, os óleos minerais são não renováveis, tóxicos e não biodegradáveis. Nesse contexto, foi estudada a utilização de óleos vegetais e, em particular, óleo de girassol, como meio de têmpera levando em conta suas características ambientalmente sustentáveis. Para avaliar a efetividade da têmpera do óleo de girassol, foi efetuada a têmpera de aços AISI 8640 de 19,15mm de diâmetro em óleo mineral convencional e óleo de girassol. Para avaliar a mudança nas propriedades mecânicas, foram realizados ensaios de dureza. Os resultados indicaram que o aço temperado em óleo mineral apresenta dureza de $57,0 \pm 0,4\text{HRC}$, enquanto o aço temperado em óleo de girassol apresenta dureza de $56,5 \pm 0,5\text{HRC}$. Para avaliar as mudanças microestruturais e corroborar o ensaio de dureza, foram feitas imagens em um microscópio eletrônico de varredura. Essas imagens mostram diferenças de relevo, na forma de pequenos degraus, que indicam a formação de martensita em ambos os aços temperados. Devido à proximidade no valor de dureza encontrado, bem como semelhança nas microestruturas analisadas, o óleo de girassol apresentou efetividade satisfatória como meio de têmpera para aços AISI 8640 de 19,15mm de diâmetro quando comparado com óleos minerais convencionais.

Palavras-chave: Têmpera. Óleos vegetais. Óleos minerais. Dureza.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 –	Diagrama do sistema binário Fe-C.....	10
Figura 2 –	Esquema ilustrativo da produção do aço.....	11
Figura 3 –	Células unitárias CFC adjacentes e célula TCC que originará o sistema tetragonal.....	15
Figura 4 –	Estrutura TCC da martensita e as posições dos átomos de carbono...	15
Figura 5 –	Os três estágios de resfriamento na têmpera.....	17
Figura 6 –	Produção de diferentes tipos de sementes oleaginosas em 2018.....	20
Figura 7 –	Principais ácidos graxos presentes nos óleos vegetais.....	21
Figura 8 –	Aços cortados.....	25
Figura 9 –	Imagem em microscópio eletrônico de varredura do aço 8640 recozido. A: micrografia realizada no centro da amostra e B: realizada na extremidade.....	28
Figura 10 –	Imagem em microscópio eletrônico de varredura do aço 8640 temperado em óleo mineral. A: micrografia realizada no centro da amostra e B: realizada na extremidade.....	30
Figura 11 –	Imagem em microscópio eletrônico de varredura do aço 8640 temperado em óleo de girassol. A: micrografia realizada no centro da amostra e B: realizada na extremidade.....	31

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Severidade de Têmpera de Alguns Meios.....	18
Tabela 2 –	Porcentagem de Diferentes Ácidos Graxos em Diferentes Óleos Vegetais.....	22
Tabela 3 –	Medidas de dureza dos aços realizados na região central, metade do raio e extremidade. Escala Rockwell C.....	33

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	9
2	REFERENCIAL TEÓRICO	10
2.1	Aço	10
2.1.1	Aço AISI 8640	12
2.2	Têmpera.....	13
2.2.1	O Procedimento.....	14
2.2.2	Microestrutura Resultante e Propriedades Mecânicas.....	14
2.2.3	Resfriamento e Meio de Têmpera.....	16
2.2.4	Severidade da Têmpera.....	18
2.2.5	Ensaio de Dureza	19
2.3	Óleos Vegetais	19
2.3.1	Óleos Vegetais como meio de Têmpera.....	20
2.3.2	Processo Físico-químico	23
3	MATERIAL E MÉTODOS	24
3.1	Material.....	24
3.2	Métodos.....	24
3.2.1	Preparação dos Corpos de Prova	24
3.2.2	Têmpera	25
3.2.3	Metalografia.....	26
3.2.4	Ensaio de Dureza	27
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	27
4.1	Microscopia Eletrônica de Varredura	27
4.2	Dureza	32
5	CONCLUSÃO	34
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	35
	REFERÊNCIAS	36

1 INTRODUÇÃO

Os aços são as ligas mais comuns, compostos por ferro e carbono bem como outros elementos de liga. Além do baixo custo e do domínio do conhecimento tecnológico acerca de sua produção, os aços possuem propriedades que permitem sua aplicação em diversas áreas – da engenharia civil, como peças estruturais e ferramentais até a medicina, como próteses. Para cada aplicação do aço existe um conjunto de propriedades mecânicas que podem ser alcançadas a partir de tratamentos térmicos ou termoquímicos. O tratamento térmico denominado têmpera é um dos mais comuns e tem como finalidade aumentar substancialmente a resistência mecânica e a dureza das peças metálicas (KRAUSS, 2005; CHIAVERINI, 2012).

O processo de têmpera em aços consiste em aquecer o material até a temperatura de austenitização e, então, resfriar rapidamente em algum meio capaz de extrair o calor da peça de maneira efetiva. A alta taxa de resfriamento impede fenômenos difusivos no metal e a estrutura cristalina é modificada majoritariamente por expansões volumétricas, bem como por deformação plástica, resultando em uma microestrutura fina e dura denominada martensita. O meio de resfriamento possui papel fundamental no processo da têmpera. Além de garantir uma alta taxa de resfriamento, o meio de têmpera não deve causar distorções significativas e, conseqüentemente, trincas na peça. Os meios mais comuns utilizados são água, salmoura e óleos minerais. Dentre os citados, os óleos minerais são os que conferem melhores resultados no processo de têmpera (KRAUSS, 2005).

Os óleos minerais como meio de têmpera são capazes de conferir aumento nas propriedades de resistência mecânica e dureza de maneira uniforme ao longo da peça além de garantir boa estabilidade dimensional. Apesar disso, os óleos minerais possuem diversas desvantagens. Dentre elas, é possível destacar: baixa biodegradabilidade, alta toxicidade, inflamabilidade e dificuldade no descarte correto (CANALE et al., 2013).

Nesse contexto, os óleos vegetais se tornaram alvo de estudos como potenciais substituintes dos óleos minerais no processo de têmpera. Os óleos vegetais são extraídos de fontes renováveis e possuem biodegradabilidade intrínseca. A característica ambientalmente favorável e as políticas ambientais são as maiores motivações para estudos do desempenho dos diversos tipos de óleos vegetais como meio de têmpera (CANALE et al., 2013).

Devido a estes fatos, o seguinte trabalho tem por objetivo avaliar o potencial

de utilização do óleo de girassol como meio de têmpera para aços do tipo AISI 8640, visando a substituição de óleos minerais convencionais. Nesse contexto, foi realizado o tratamento térmico de têmpera do aço 8640 em dois meios diferentes – óleo de girassol e óleo mineral. Análises microestruturais e ensaios de dureza foram realizados para comparar as propriedades finais dos aços submetidos ao tratamento.

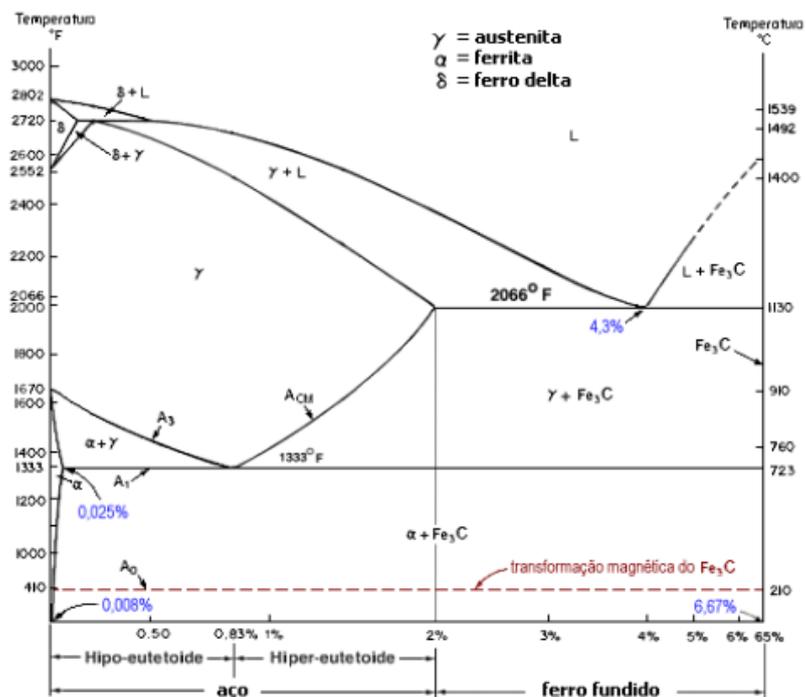
2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Aço

O aço é um tipo de liga composta principalmente por ferro e uma concentração em peso de carbono que pode alcançar até 2,14%. O limite superior de 2,14% representa a maior quantidade possível de carbono que é capaz de se dissolver no ferro austenítico, ocorrendo na temperatura de 1147°C (CHIAVERINI, 2012).

Os limites de solubilidade e as temperaturas correspondentes são mostrados no diagrama binário do sistema Fe-C, ilustrado pela figura 1:

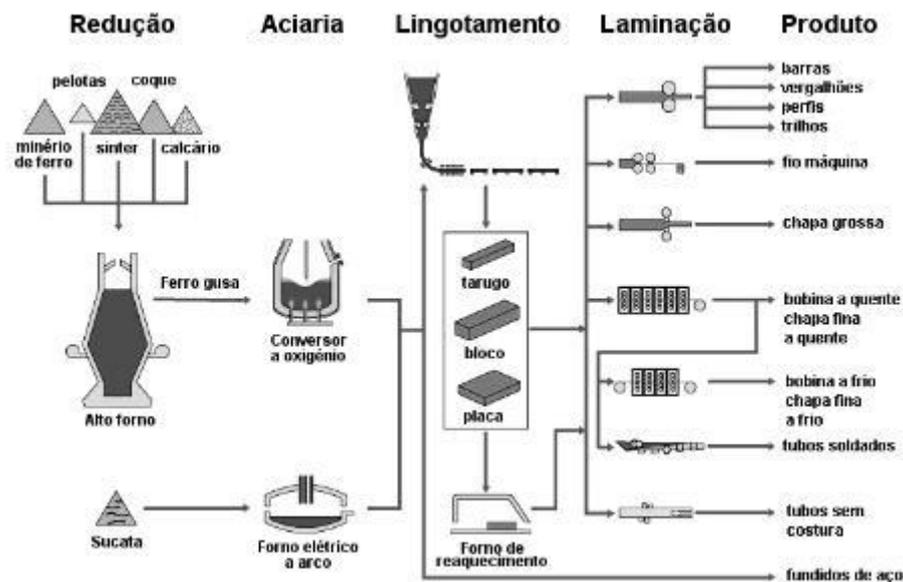
Figura 1 – Diagrama do sistema binário Fe-C.



Fonte: CIMM - Centro de Informação Metal Mecânica (2016).

A produção do aço nas siderúrgicas se dá pelo processo da redução do minério de ferro pelo carvão. O carvão, de origem mineral ou vegetal, é também a fonte de carbono para o aço. Em altas temperaturas, o carbono presente no carvão age como agente redutor do óxido de ferro. Diversas reações químicas ocorrem até a obtenção do ferro-gusa, que por sua vez dá origem aos aços através de processos de refino nas aciarias. Na mistura de matérias primas, pode-se acrescentar também a sucata, que consiste em subprodutos da fabricação do aço ou peças que foram descartadas. As três principais etapas da produção de lingotes de aço são: redução, refino e laminação (CHIAVERINI, 1996). A figura 2 ilustra o processo de produção do aço:

Figura 2 – Esquema ilustrativo da produção do aço.



Fonte: Introdução à Tecnologia dos Materiais (2010).

Além de ferro e carbono, outros elementos químicos são adicionados ao aço. Esses elementos são chamados de elementos de liga e sua presença pode alterar drasticamente os parâmetros como temperaturas de transformações de fases e limites de solubilidade quando comparados aos aços-carbono comuns. A presença de elementos de liga altera não só as condições de processamento como também as propriedades mecânicas e de resistência à corrosão dos aços. Alguns dos principais elementos de liga são: cromo, níquel, vanádio e molibdênio (PARDAL et al., 2013).

Os aços podem ser classificados de diversas maneiras e, usualmente, são divididos em aços de baixo (<0,25%pC), médio (0,25 ~ 0,60%pC) e alto teor de carbono (0,60 ~ 1,4%pC).

Os aços baixo carbono possuem microestrutura perlítica e ferrítica. Dessa forma, são metais que apresentam baixa resistência mecânica e dureza, porém alta ductilidade e tenacidade. São, portanto, facilmente usinados, soldados e conformados. Além disso, não respondem bem a tratamentos térmicos, sendo endurecidos por trabalho a frio. São fabricados para a utilização como chapas automobilísticas e como perfis e placas para fabricação de tubos (ABDALLA et al., 2003).

Os aços de médio teor de carbono possuem maior resistência e dureza em relação àqueles de baixo teor de carbono, porém sua tenacidade e ductilidade são inferiores. As aplicações são diversas, sendo utilizados em engrenagens e virabrequins. Esses aços respondem a tratamentos térmicos como têmpera e revenimento. A principal dificuldade do tratamento térmico de têmpera nestes aços está relacionada à necessidade de altas taxas de resfriamento, restringindo a espessura das seções da peça metálica. Adições de níquel, cromo e molibdênio facilitam o tratamento térmico e melhorar as propriedades finais obtidas (KRAUSS, 2005; TAVARES et al., 2017).

Com o aumento na quantidade de carbono, os aços de alto teor de carbono são os que apresentam maior dureza e resistência mecânica. Essas propriedades mecânicas entram em detrimento com a usinabilidade e soldabilidade desses aços. Com a adição de elementos de liga como Cr, V, W e Mo ocorre a formação de outros carbetos de alta dureza e resistência ao desgaste. A aplicação do aço de alto teor de carbono se dá, portanto, em ferramentas como martelos, facas, talhadeiras, entre outras (KRAUSS, 2005; HOSSAIN; PAHLEVAN; SAHAJWALLA, 2018).

O termo temperabilidade indica o quão facilmente uma liga pode ser endurecida pela formação de martensita. Uma liga de alta temperabilidade terá formação de martensita na superfície e no seu interior. A temperabilidade é uma função da porcentagem de carbono, bem como a presença de elementos de liga. Quanto maior a porcentagem de carbono, mais temperável a liga é. A presença de elementos de liga como manganês, cromo e molibdênio também aumentam a temperabilidade dos aços, pois são capazes de retardar as transformações por difusão, fazendo com que taxas de resfriamento menos abruptas possam ser aplicadas (CANALE et al., 2013).

2.1.1 Aço AISI 8640

O aço AISI 8640 é um tipo de aço de médio teor de carbono e baixa liga. É uma liga composta por 0,38 – 0,43%pC, 0,75 – 1,00%p Mn, 0,40 – 0,60%p Cr, 0,15 – 0,30%p Si, 0,40

– 0,70%p Ni e 0,15 – 0,25%p Mo, além de enxofre e fósforo em menores quantidades. Os principais elementos de liga desse aço são cromo, níquel e molibdênio (ASM International, 1995).

As principais características desse aço são: alta temperabilidade, boa usinabilidade e forjabilidade, resistência mecânica e resistência à fadiga. Os aços 8640 são tipicamente comercializados com dureza variando de 30 – 50 HRC, porém processos de têmpera superficial por chama ou indução podem elevar a dureza para valores superiores a 60HRC (SILVEIRA et al., 2018).

Usualmente, os aços 8640 passam por tratamentos térmicos para adequar os valores de dureza e resistência mecânica de acordo com a aplicação desejada. Os tratamentos térmicos mais comuns nesse aço envolvem recozimento, endurecimento, revenimento e possível esferoidização. Quando esse aço é temperado, o meio de têmpera mais comum é óleo devido a sua alta temperabilidade. Após os tratamentos, os aços 8640 adquirem um equilíbrio adequado entre ductilidade e resistência, possibilitando uma diversidade de aplicações (TOTTEN, 2006).

As aplicações dos aços 8640 são diversas, tanto devido ao seu conjunto de propriedades, bem como a boa durabilidade. São utilizados na produção de eixos, bielas, parafusos, além de virabrequins para a indústria automobilística. Outros produtos comuns feitos desse aço são: barras, hastes, tarugos, peças forjadas e fundidas. Os aços 8640 são comuns também na produção de peças para aeronaves como, por exemplo, trens de pouso e partes da fuselagem (TOTTEN, 2006).

2.2 Têmpera

Após o processo de produção do aço com a composição desejada, muitas vezes é necessário que a peça metálica seja submetida a alguns tipos de tratamentos térmicos ou termoquímicos. Esses tratamentos causam os mais diversos efeitos no material, tais como: a) mudança na microestrutura e/ou estrutura; b) alteração na composição química localizada pela formação de carbeto e outros compostos; c) modificação no perfil de tensões internas no material; entre outros. O tratamento térmico denominado têmpera é um dos mais utilizados na indústria siderúrgica e tem como finalidade elevar as propriedades de resistência mecânica e dureza da peça metálica (BARBOSA et al., 2016).

2.2.1 O Procedimento

Para o processo de têmpera, é necessário aquecer a liga metálica em temperaturas referentes ao campo austenítico indicado na Figura 1. A temperatura de austenitização pode variar de acordo com a presença de elementos de liga em cada aço. Alguns elementos químicos são estabilizadores da fase austenita e, portanto, diminuem a temperatura eutetóide do aço. Após o aquecimento, o aço é então bruscamente resfriado em água, óleo, salmoura ou no próprio ar. A alta taxa de resfriamento provoca mudanças estruturais que conferem alta resistência mecânica e dureza ao aço. É comum submeter o material ao processo de revenimento para aliviar as tensões internas causadas pelo processo de têmpera (CELESTINO; FELIPE; MACHADO, 2007).

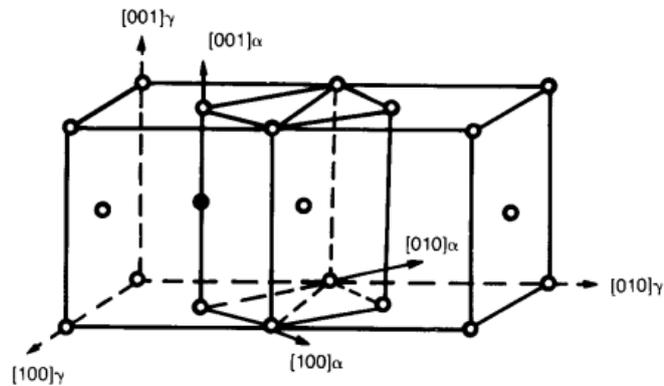
2.2.2 Microestrutura Resultante e Propriedades Mecânicas

A têmpera é um tratamento térmico que promove formação de uma microestrutura denominada martensita. O ponto de partida da formação da martensita é a fase austenítica do aço. A austenita (fase γ) possui uma estrutura cúbica de face centrada (CFC) composta por átomos de ferro e com átomos de carbono em solução sólida, ocupando as posições intersticiais octaédricas e tetraédricas (GRACIOSO, 2003).

O aço austenítico é submetido a altas taxas de resfriamento no processo de têmpera. Esse regime de resfriamento não permite processos difusivos entre os átomos. Os átomos de ferro e carbono, portanto, não se rearranjam nas microestruturas ferrita (fase α) e cementita (Fe_3C). Ao invés disso, os átomos de carbono permanecem nos sítios octaédricos da estrutura CFC. Por mecanismos de deformações plásticas, como escorregamento e maclação, a estrutura é reorganizada em um sistema tetragonal de corpo centrado, com os átomos de carbono aprisionados em determinadas posições octaédricas. Como consequência da alteração da estrutura cristalina ocorre um aumento do volume, sendo possível observar o aparecimento de relevos, como degraus, em superfícies polidas (KRAUSS, 2005).

A figura 3 esquematiza duas células CFC adjacentes e uma célula tetragonal de corpo centrado referente à martensita. Na imagem, apesar de ser possível observar a alteração do sistema cristalino, não é levada em conta a alteração volumétrica associada a esse processo.

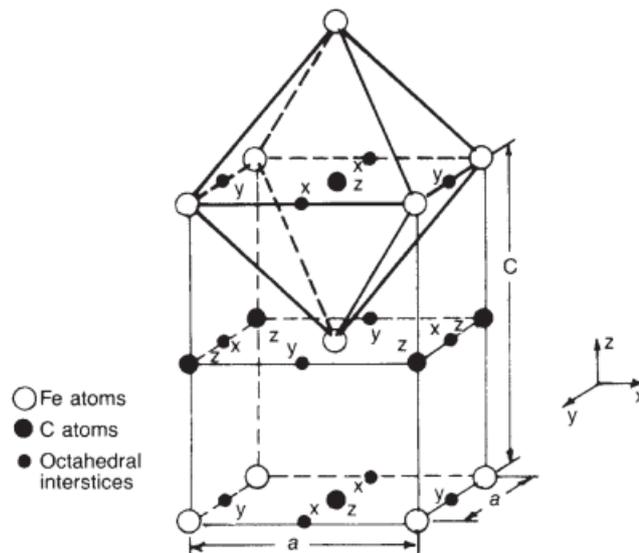
Figura 3 – Células unitárias CFC adjacentes que originarão o sistema tetragonal de corpo centrado.



Fonte: KRAUSS (1990).

A figura 4 representa a célula unitária tetragonal de corpo centrado da martensita bem como as posições dos átomos de carbono:

Figura 4 – Estrutura TCC da martensita e as posições dos átomos de carbono.



Fonte: KRAUSS (2005).

A martensita é formada sempre que uma determinada temperatura M_s é atingida, devendo estar sempre associada com uma alta taxa de resfriamento para evitar difusão atômica e, conseqüentemente, outras transformações estruturais. Nos diagramas TTT (tempo,

temperatura e transformação), as transformações martensíticas são representadas por linhas aproximadamente verticais. Também como consequência do mecanismo de transformação, a fração de martensita que será formada depende do resfriamento abaixo da temperatura M_s (KRAUSS, 2005; HIDALGO; SIETSMA; SANTOFIMIA, 2018).

A transformação martensítica também é acompanhada de deformações plásticas nos grãos adjacentes devido à expansão volumétrica da estrutura dos cristais. A austenita é uma fase com ductilidade suficiente para absorver a tensão associada a essa expansão. No entanto, em aços de alto teor carbono é possível haver a formação de trincas uma vez que o elevado teor de carbono aumenta a tetragonalidade da estrutura (CELADA-CASERO; SIETSMA; JESUS, 2019).

Existem dois tipos principais de morfologia martensítica: em ripas (concentrações inferiores a 0,6%pC) e em placas (concentrações superiores a 0,6%pC). É possível observar uma mistura dos dois tipos morfológicos em aços contendo de 0,6% a 1%pC. A martensita em ripas formam estruturas mais grosseiras e podem ser observadas em microscópios de luz. Por outro lado, a martensita em placas formam estruturas mais finas, sendo observadas por meio de microscópios eletrônicos (SCHULZ-BEENKEN, 1997).

A presença da martensita eleva as propriedades de resistência à tração e dureza do aço devido ao caráter fino dessa estrutura. O teor de carbono é um fator impactante na propriedade de dureza da martensita. Quanto maior a quantidade de carbono, mais dura e frágil é a estrutura formada. Outros fatores que afetam as propriedades mecânicas resultantes são: presença de elementos de liga, precipitação de compostos e tamanho de grão austenítico (ANAZAWA et al., 2006; GRACIOSO, 2003).

2.2.3 Resfriamento e Meio de Têmpera

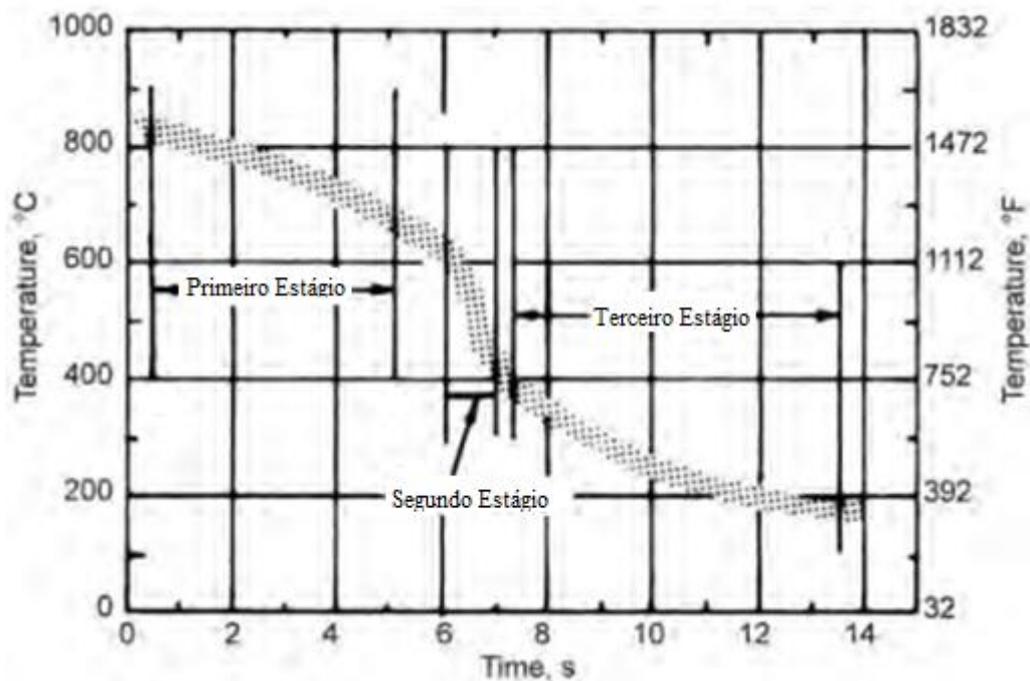
A taxa de resfriamento após o aquecimento da liga deve ser adequada para a composição de cada aço uma vez que o teor de carbono e a presença de elementos de liga alteram os parâmetros da austenitização. O resfriamento ideal depende diretamente da capacidade que o meio tem que extrair o calor da peça bem como a capacidade do material conduzir o calor em seu interior (FARAH, 2002; HIDALGO; SIETSMA; SANTOFIMIA, 2018).

A transferência de calor do aço para o meio de têmpera é dividido em três estágios. O primeiro estágio envolve a formação de uma camada de vapor na superfície do metal. O vapor

tem um efeito isolante e diminui a taxa de resfriamento. No segundo estágio, essa fina camada de vapor é rompida e permite o contato do meio com o aço. Geralmente, o meio é vaporizado e a convecção permite com que outras partes do fluido entrem em contato com o metal, aumentando drasticamente a taxa de resfriamento. A temperatura da superfície metálica decai progressivamente e, quando atinge temperaturas inferiores a vaporização do meio, a taxa de resfriamento passa a ser controlada por processos convectivos e condutivos na interface do metal e do meio. Essa última etapa consiste no terceiro estágio, caracterizado por taxas de resfriamento menores (KRAUSS, 2005).

A figura 5 ilustra os três estágios de resfriamento em função da temperatura da superfície e do tempo:

Figura 5 – Os três estágios de resfriamento na têmpera.



Fonte: Adaptado de Krauss (2005).

A água é o meio de têmpera mais barato e bastante empregado. Diferentes técnicas de têmpera em água são aplicadas. Imersão, misturas de água com sal e agitação são as principais variações. Além disso, aplicação de jatos e misturas de aditivos poliméricos podem também ser utilizados. Óleos minerais e vegetais também são utilizados para têmpera. A maioria dos óleos apresenta taxas de resfriamento inferiores à água ou a salmoura, porém o calor nesse meio é removido de maneira mais uniforme, diminuindo a ocorrência de distorções

dimensionais e trincas na peça temperada. Usualmente, adicionam-se aditivos aos óleos para aumentar a resistência à oxidação, poder de molhabilidade e estabilidade (SOARES et al., 2012; CHIAVERINI, 2012).

2.2.4 Severidade da Têmpera

Um meio de têmpera eficiente é caracterizado por uma alta capacidade de retirar calor da peça metálica. A efetividade dos diferentes meios de têmpera é medida por um parâmetro denominado severidade da têmpera de Grossmann, representado pela letra H. O parâmetro H é obtido experimentalmente ao submeter à têmpera uma série de barras com seções transversais circulares e com diâmetros variados de um determinado aço, avaliando então a dureza obtida ao longo da profundidade do corpo de prova (BORN; MATTOS, 2018).

A tabela 1 mostra a severidade da têmpera de alguns meios mais comuns. Quanto maior o parâmetro H, maior é severidade de têmpera do referente meio. É possível notar que a agitação ou a circulação aumenta a capacidade de têmpera do meio (KRAUSS, 2005).

Tabela 1: Severidade de têmpera de alguns meios

	Ar	Óleo Mineral	Água	Salmoura
Sem agitação ou circulação	0,02	0,25 a 0,30	0,9 a 1,0	2
Agitação ou circulação moderada	-	0,3 a 0,40	1,0 a 1,3	2 a 2,2
Boa agitação	-	0,4 a 0,5	1,4 a 1,5	-
Agitação forte	0,05	0,5 a 0,8	1,6 a 2,0	-
Agitação violenta	-	0,8 a 1,1	4	5

Fonte: Adaptado de Krauss (2005)

Estudos demonstram que a severidade da têmpera dos óleos vegetais se aproxima dos valores apresentados para alguns óleos comerciais não acelerados e na condição sem agitação. Os óleos de mamona (H = 0,199) e soja (H = 2,000) apresentaram índice de severidade de têmpera de Grossmann relativamente próximo aos óleos convencionais utilizados (OTERO; CANALE; TOTTEN, 2019).

2.2.5 Ensaio de Dureza

Uma das técnicas mais simples para avaliar a dureza de uma peça metálica consiste em um ensaio de penetração, realizado em um durômetro. Nessa técnica, é avaliada a resistência de uma determinada liga à penetração de um material de alta dureza, introduzida no material de ensaio com uma carga conhecida. Além do baixo custo e da facilidade de ensaio, essa técnica permite avaliar o grau de endurecimento fornecido por tratamentos térmicos (CHIAVERINI, 2012).

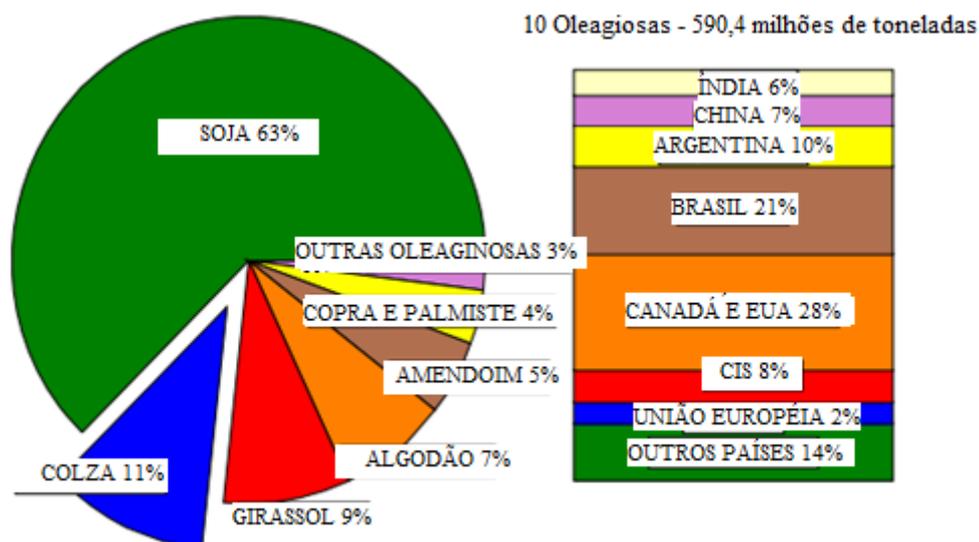
2.3 Óleos Vegetais

Os óleos vegetais na indústria já são bem explorados. Aplicações como combustíveis e fluidos hidráulicos são comuns. No entanto, a utilização de óleos vegetais em tratamentos térmicos na siderurgia é recente devido a, principalmente, questões ambientais. As principais vantagens dos óleos vegetais frente aos óleos minerais são: i. fonte renovável; ii. biodegradabilidade; iii. baixa toxicidade; iv. alto ponto de fulgor e ebulição (OTERO; CANALE; TOTTEN, 2019; FARAH, 2002).

Os óleos vegetais são gorduras extraídas principalmente da semente de plantas. No entanto, é possível que a extração do óleo seja a partir da polpa, caules, raízes e folhas. Os óleos vegetais, depois de extraídos, são redirecionados às indústrias alimentícias, de cosméticos e à produção de combustível, dependendo de suas propriedades. Atualmente, o mercado mundial de óleos vegetais gira em torno de quatro principais oleaginosas – palma, soja, canola e girassol. No Brasil, a maior produção de óleo vegetal ocorre a partir da soja. Outras fontes de óleo vegetal como o caroço de algodão, girassol, mamona e palma também fazem parte da produção interna (CANALE et al., 2013).

A figura 6 mostra a produção mundial das principais sementes oleaginosas no ano de 2018:

Figura 6 – Produção de diferentes tipos de sementes oleaginosas em 2018.



Fonte: Adaptado de OilWorld (2018).

Uma vez que a produção de óleo de soja representa, no Brasil, 95% do mercado e, aliado às características ambientalmente favoráveis, há interesse cada vez maior na sua utilização como meio refrigerante e meio de têmpera. De fato, óleo de soja é amplamente utilizado em diversas aplicações como na indústria alimentícia, farmacêutica, produção de ração animal, produção de vernizes e tintas, entre outros. No entanto, estudos mostram que baixa resistência à oxidação e a baixa faixa de viscosidade limitam a utilização do óleo de soja como meio de têmpera. Apesar de representar uma menor porção da produção nacional de óleos vegetais, estudos mostraram que os óleos de palma, mamona, amendoim e girassol apresentam características interessantes no processo de resfriamento da têmpera (CANALE et al., 2013; OTERO et al., 2019).

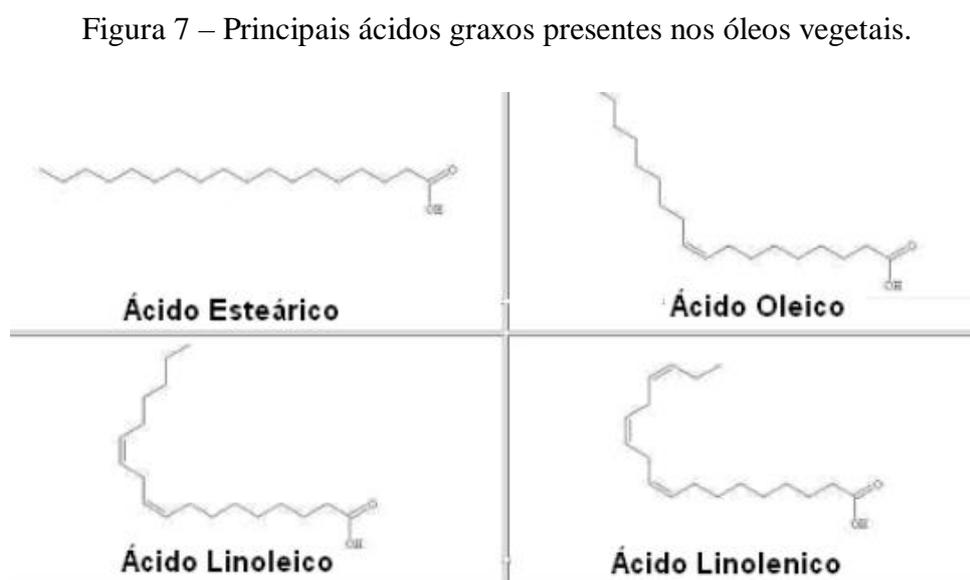
2.3.1 Óleos Vegetais como meio de Têmpera

Os óleos vegetais são compostos principalmente por triglicérides, que são formados por reações de esterificação entre o glicerol e ácido graxos. A estrutura é composta por fragmentos de ácidos graxos ligados ao glicerol em longas cadeias. Em óleos vegetais brutos, os triglicérides representam cerca de 95% da composição total enquanto que óleos vegetais refinados, essa porção chega a 99% (CHENDYNSKI et al., 2016).

Outros componentes presentes nos óleos vegetais incluem: fosfolipídios (máximo de 8%), glicolipídeos (máximo de 5%), mono ou diglicerídeos e ácidos graxos livres (cerca de 2%), ceras e hidrocarbonetos (cerca de 1%) além de pigmentos, compostos causadores de odores e outros constituintes. Os pigmentos e alguns compostos podem ser removidos durante o processamento (CHENDYNSKI et al., 2016).

As propriedades dos óleos vegetais estão diretamente relacionadas com as características dos fragmentos de ácidos graxos. A composição dos ácidos graxos, por sua vez, pode variar de vegetal para vegetal. Em geral, esses ácidos são cadeias carbônicas contendo de 4 a 24 átomos de carbono e são classificadas de acordo com a quantidade de insaturações presentes em sua estrutura: saturados (ausência de ligações duplas e triplas entre carbonos), monoinsaturados (apresentam uma ligação dupla entre os átomos de carbono) e poliinsaturados (presença de duas ou mais ligações duplas entre carbonos) (OTERO; CANALE; TOTTEN, 2019).

A baixa resistência à oxidação é uma característica inerente dos óleos vegetais, pois deriva de sua composição química. Do ponto de vista de estabilidade e resistência à oxidação, os óleos vegetais com ácidos graxos saturados ou monossaturados apresentam melhores propriedades. Também, ácidos graxos com cadeias carbônicas maiores apresentam maior temperatura de fusão, sendo essa uma característica favorável ao processo de têmpera (FARAH, 2002). A figura 7 mostra a estrutura dos ácidos graxos mais presentes nos óleos vegetais:



Fonte: BELINATO (2010).

Um óleo vegetal pode conter diferentes tipos de ácidos graxos em sua composição como mostra a tabela 2:

Tabela 2: Porcentagem de diferentes ácidos graxos em diferentes óleos vegetais

Ácidos Graxos (%)						
Óleos	Saturados		Monoinsaturados		Poliinsaturados	
	Palmítico	Estearico	Oléico	Linoléico	Linolênico	Outros
Canola	3	-	60	30	7	<1
Colza	2-4	1-2	60-65	20	8	-
Girassol	4-19	3-6	14-35	50-75	0,1-4	<1
Linhaça	6-7	3-5	20-26	14-20	51-54	-
Mamona	1-3	1	3-4	4-4,2	0-0,3	89-89,5
Milho	9-19	1-3	26-47	40-55	1-4	-
Oliva	7-16	1-3	60,7-86	4-15	0,5-1	5,5
Soja	7-16	3-5	18,9-35	42,3-55	5,5-11	0-2,4
Dendê	35-47	3-7	36-47	6,5-15	<0,5	0,5-5

Fonte: Adaptado de BELINATO, 2010

Outro parâmetro de suma importância no processo de têmpera é a taxa máxima de resfriamento. Estudos mostraram que os óleos vegetais de canola, soja e girassol demonstraram taxas máximas de resfriamento próximas aos valores de óleos de têmpera convencionais. Além disso, uma grande vantagem dos óleos vegetais sobre os óleos minerais é a inexistência da formação da camada de vapor na interface metal-meio. Essa característica dos óleos vegetais faz com que a transferência de calor entre o metal e o óleo se inicie a partir do segundo estágio, uma vez que a ausência da camada de vapor permite taxas de resfriamentos mais elevadas (vide figura 5). Esse fato contribui com a maior molhabilidade do óleo, impactando diretamente na taxa de resfriamento e na menor chance de trincas e distorções ocorrerem na peça. Dessa forma, a taxa de resfriamento adequada e a ausência da formação da camada de vapor indicam que os óleos vegetais são capazes de melhorar as

resistência mecânica e a dureza dos aços tratados termicamente por têmpera (CIVERA; OTERO; TOTTEN, 2014).

Frente a essas características, diversos óleos vegetais estudados são potenciais substitutos dos óleos minerais convencionais para meios de têmpera. Apesar da baixa resistência à oxidação, é possível melhorar essa propriedade com adição de antioxidantes ou através de alterações genéticas nas sementes do vegetal, alterando as quantidades de insaturações nos ácidos graxos. Dessa forma, os óleos vegetais podem ser os meios de têmpera que conferem melhora nas propriedades mecânicas dos aços além de serem produtos sustentáveis devido a sua biodegradabilidade e por serem derivados de fontes de energia renováveis (CANALE et al., 2013; OTERO et al., 2019).

2.3.2 Processo Físico-químico

Os óleos utilizados como meio de têmpera estão sempre suscetíveis à degradação devido aos ciclos de aquecimento e resfriamento. Para minimizar alguns efeitos de degradação e envelhecimento, aditivos antioxidantes e anticorrosivos são aplicados em alguns óleos. No entanto, por se tratar de substâncias orgânicas, a degradação térmica desse material é inerente ao processo da têmpera (REDA, 2017).

A oxidação dos óleos vegetais ocorre pela formação de radicais livres nas regiões de maior temperatura. Esses radicais livres são formados pela decomposição de hidróxidos e peróxidos nos ácidos e nos aldeídos de menor massa molar. Os radicais livres são capazes de atacar outras cadeias carbônicas, causando a cisão das macromoléculas. Devido ao aquecimento do óleo durante a têmpera, pode ocorrer uma recombinação das moléculas que foram quebradas, causando aumento no teor de ligações insaturadas. Do ponto de vista prático, esses processos de cisão e recombinação das cadeias de triglicerídeos são refletidas com o aumento da viscosidade do óleo, bem como alteração de cor (PAITER; GALVÃO, 2015).

As mudanças na estrutura química dos óleos podem ser acompanhadas pela técnica de espectroscopia no infravermelho. Analisando o óleo vegetal antes e após a utilização, é possível comparar os espectros e identificar os compostos formados devido o processo de termo-oxidação. Com essa informação, aliado às mudanças na reologia, é possível julgar a capacidade da reutilização de um óleo vegetal no processo de têmpera (GOMEZ et al., 2011).

O óleo de girassol é essencialmente rico em ácido linoleico. Existem diferenças na composição devido à variedade nas sementes, bem como as condições climáticas durante o cultivo. A extração do óleo das sementes de girassol apresenta rendimento de até 50% e seu óleo apresenta aspecto límpido amarelado (CORREIA, 2010).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Material

O aço AISI 8640 utilizado no presente estudo foi doado pelo professor Doutor Diogo Tubertini Maciel, do departamento de engenharia da Universidade Federal de Lavras. O material recebido possui diâmetro de 19,15mm e comprimento de 155mm.

O óleo de girassol foi obtido comercialmente, enquanto o óleo mineral utilizado, denominado All tempera 32, do fabricante “All Indústria de Lubrificantes LTDA”, foi doado pelo mesmo fabricante.

O processo obtenção dos corpos de prova para o tratamento térmico de têmpera e para as micrografias foi feito em uma máquina de corte com refrigeração a água com aditivo hidrossolúvel, localizada no laboratório de processos de materiais, do departamento de engenharia agrícola da Universidade Federal de Lavras.

Os tratamentos de recozimento pleno e têmpera foram realizados no forno de tratamentos térmicos JUNG, localizado no laboratório de processos da Universidade Federal de Lavras. Neste laboratório também foram realizados o embutimento, lixamento e polimento dos corpos de prova para as micrografias.

As imagens de microscopia eletrônica foram realizadas no microscópio LEO EVO 40XVP, presente no Laboratório Multiusuário de Microscopia Eletrônica e Análise Ultraestrutural da Universidade Federal de Lavras.

O ensaio de dureza foi realizado na Companhia Ciclope Automotiva, com máquina de ensaios Durotec na escala Rockwell C, utilizando um penetrador cônico de diamante 120° e carga pré-estabelecida de 150kgf.

3.2 Métodos

3.2.1 Preparação dos Corpos de Prova

Devido à condição microestrutural desconhecida na qual o aço foi recebido, foi realizado um tratamento de recozimento pleno para minimizar a dureza e possibilitar o corte

dos corpos de prova para uma geometria adequada. A temperatura de recozimento escolhida para o aço AISI 8640 foi de 830°C, de acordo com a norma ASM International (1995).

A taxa de aquecimento utilizada foi de 18,0°C/min, com um patamar de 30 minutos ao atingir a temperatura de 830°C. Os aços foram resfriados no interior do forno, permitindo a formação de microestruturas perlíticas grosseiras e, como consequência, baixa dureza relativa.

Após esse tratamento térmico, o aço foi cortado em três partes: duas partes de maior comprimento (aproximadamente 50mm), destinados à têmpera, e um cilindro de menor comprimento (aproximadamente 10mm), destinado ao embutimento para posterior metalografia do aço na condição recozida. A figura 8 representa os cortes feitos:

Figura 8 – Aços cortados.



Fonte: Autora (2019).

3.2.2 Têmpera

A têmpera dos aços foi realizada no forno de tratamentos térmicos. A temperatura de austenitização utilizada para o aço AISI 8640 foi de 850°C de acordo com a norma ASTM A255 – 10 (2018). A temperatura escolhida, cerca de 50°C acima da temperatura crítica, garante que o aço seja austenitizado para posterior resfriamento em óleo.

Para a austenitização, a taxa de aquecimento utilizada foi de 18,0°C/min, com um patamar de 30 minutos ao atingir a temperatura indicada. Em um recipiente foram vertidos cerca de 2L de *All Tempera 32* e, em outro recipiente, 2L de óleo de girassol. Dessa forma, após a completa austenitização dos aços e término do tempo do patamar de aquecimento, cada

corpo de prova foi retirado do forno e temperado em um dos meios diferentes, mantendo uma agitação manual com auxílio de uma pinça delgada pelos primeiros 10 segundos.

Em seguida, os aços foram devidamente identificados e direcionados a um novo processo de corte. De cada parte, foi cortado um novo cilindro de menor comprimento para a realização de análises metalográficas das partes temperadas, com a finalidade de investigar a microestrutura formada e comparar o resultado entre os aços.

3.2.3 Metalografia

Foram realizados ensaios metalográficos do aço em três condições diferentes:

- i. Condição recozida e de menor dureza;
- ii. Após a têmpera em óleo mineral;
- iii. Após a têmpera em óleo vegetal.

A preparação dos corpos de prova para a metalografia foi iniciada com o embutimento das peças metálicas em baquelite. O procedimento foi realizado em uma embutidora, posicionando a amostra no centro e preenchendo a cavidade com baquelite em pó. Foi efetuada uma rampa de aquecimento de 20°C a 160°C em um intervalo de 15 minutos e mantendo a pressão na cavidade próxima de 2000 libras (11,8 – 15,7 MPa). Por fim, o corpo de prova embutido foi resfriado com água corrente.

Em seguida, foi feito o lixamento, utilizando lixas de carbeto de silício na sequência das seguintes malhas: 100, 150, 220, 320, 400, 600, 800 e 1200. A cada mudança de lixa, a amostra foi rotacionada em 90° e lixada até que os riscos do processo anterior fossem removidos da superfície do metal. O processo foi realizado sobre uma placa delgada de vidro para garantir que a superfície a ser analisada permanecesse plana.

Após o lixamento iniciou-se o processo de polimento, partindo de uma lixa de carbeto de silício de malha 2000 e seguindo para as pastas de diamante com granulometrias de 6µm e 1µm. O polimento foi realizado em uma politriz a baixa rotação por cerca de 5 – 10 minutos para cada diferente granulometria. Após o processo, as amostras foram inspecionadas no microscópio ótico para avaliar o processo de polimento.

Por fim, uma solução 3% v/v de ácido nítrico em etanol foi preparada com a finalidade de atacar a superfície do aço e gerar contraste para a obtenção das imagens. Para o aço na condição recozida, a solução foi aplicada com o auxílio de um algodão embebido na solução.

Em seguida, a superfície foi lavada com álcool 70% e seca. Para os aços temperados, o ataque químico foi realizado por imersão durante 15s, seguida da lavagem e secagem da superfície.

Para a microscopia eletrônica de varredura, as imagens foram obtidas pelo software SmartSEM, utilizando magnificações de 1000x, 3000x e 5000x.

3.2.4 Ensaio de Dureza

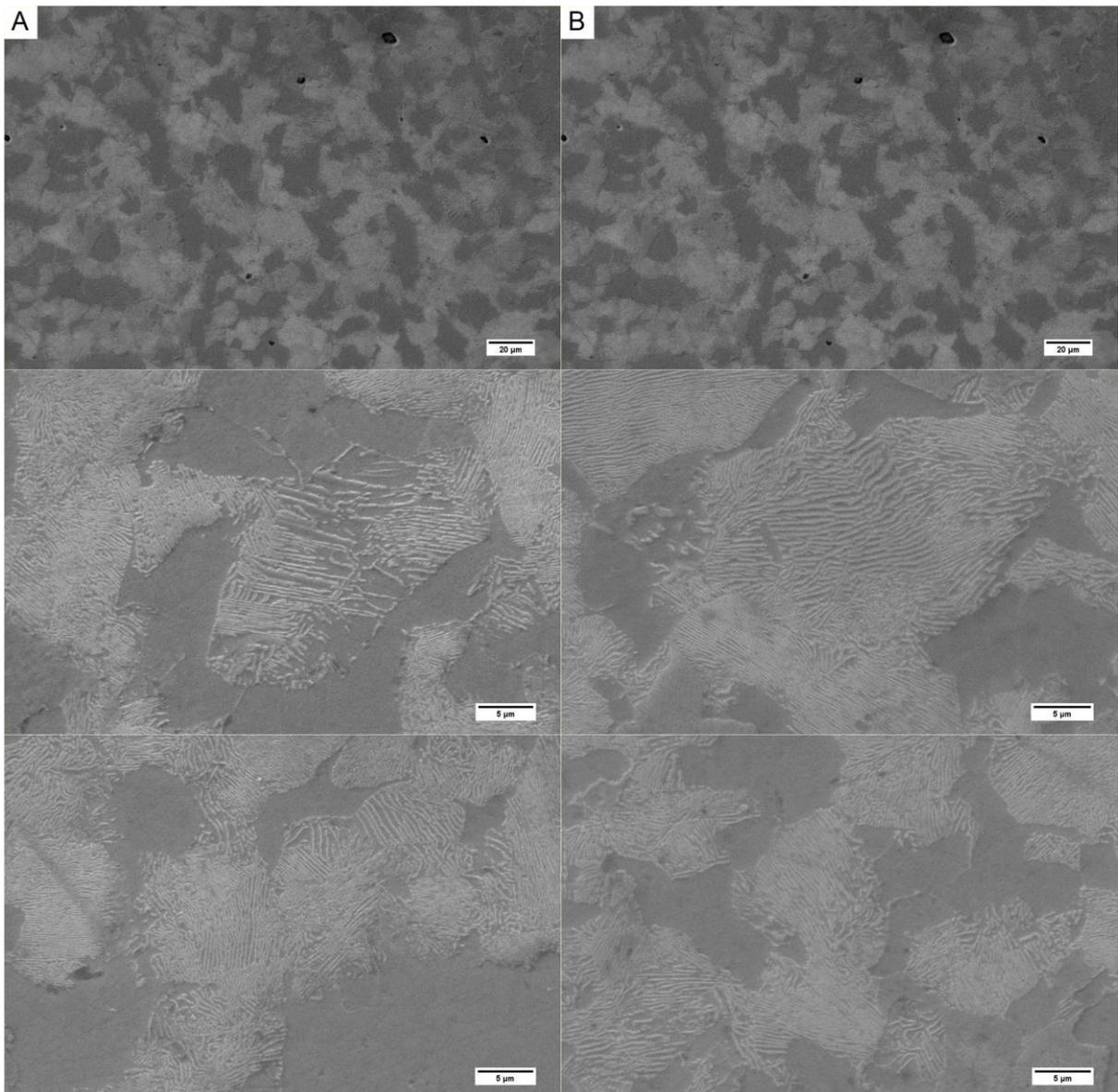
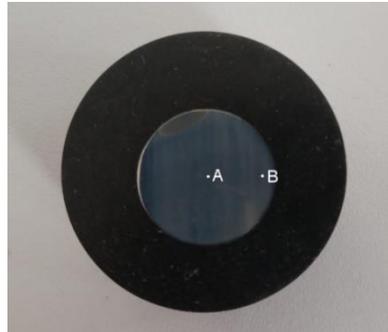
Foram realizados ensaios de dureza nos aços recozido, temperado em óleo mineral e temperado em óleo de girassol. Valores foram registrados em triplicata, considerando regiões do centro, da metade do raio e superfície da amostra.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Microscopia Eletrônica de Varredura

Foram realizadas imagens de microscopia eletrônica de varredura dos aços AISI 8640 nas condições recozida, temperado em óleo mineral e temperado em óleo de girassol. Foram realizadas análises nas regiões centrais e nas extremidades com a finalidade de avaliar a profundidade de têmpera. A figura 9 apresenta as imagens realizadas nas diferentes regiões da amostra:

Figura 9 – Imagem em microscópio eletrônico de varredura do aço 8640 recozido. A: micrografia realizada no centro da amostra (escala: 20 μ m, 5 μ m e 5 μ m, respectivamente) e B: realizada na extremidade (escala: 20 μ m, 5 μ m e 5 μ m, respectivamente).



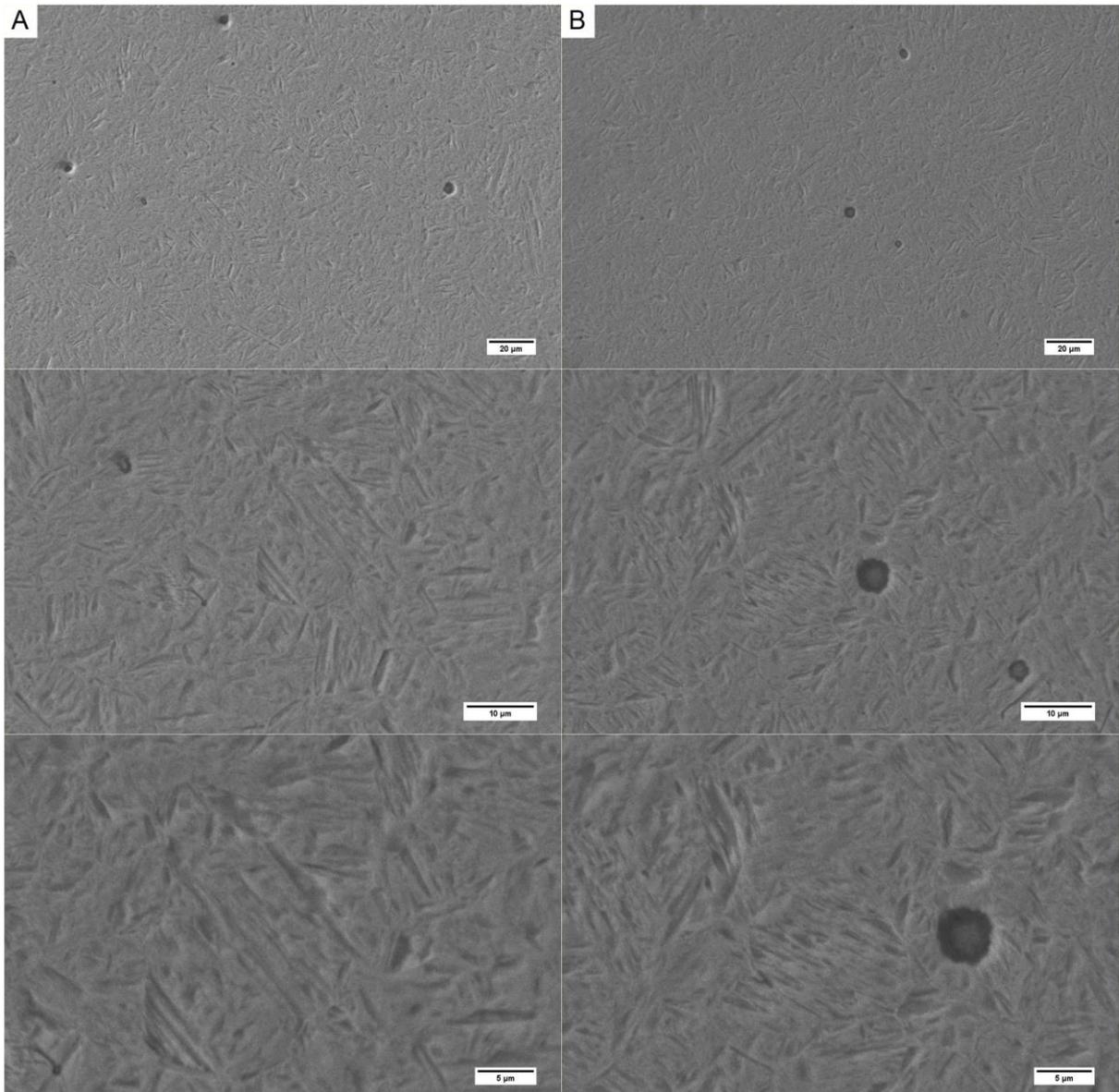
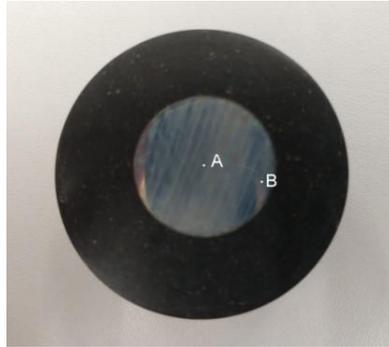
Fonte: Autora (2019)

Pela micrografia obtida para o aço 8640 recozido, é possível notar uma microestrutura composta por grãos de perlita (grãos claros) e ferrita (grãos escuros). Além disso, em aumentos maiores, é possível distinguir as lamelas de ferrita e cementita dos grãos perlíticos. Essa microestrutura é esperada para um aço hipoeutetóide que foi resfriado lentamente, em que seus componentes se rearranjaram para alcançar condições de menor energia. A condição de resfriamento lento também permite o crescimento dos grãos, como observado nas imagens.

A microestrutura grosseira do aço na condição recozida é um indicativo de uma baixa dureza relativa. Além disso, a semelhança das imagens do centro e da superfície da amostra demonstra que a taxa de resfriamento foi lenta o suficiente para não causar alterações microestruturas ao longo do diâmetro da peça.

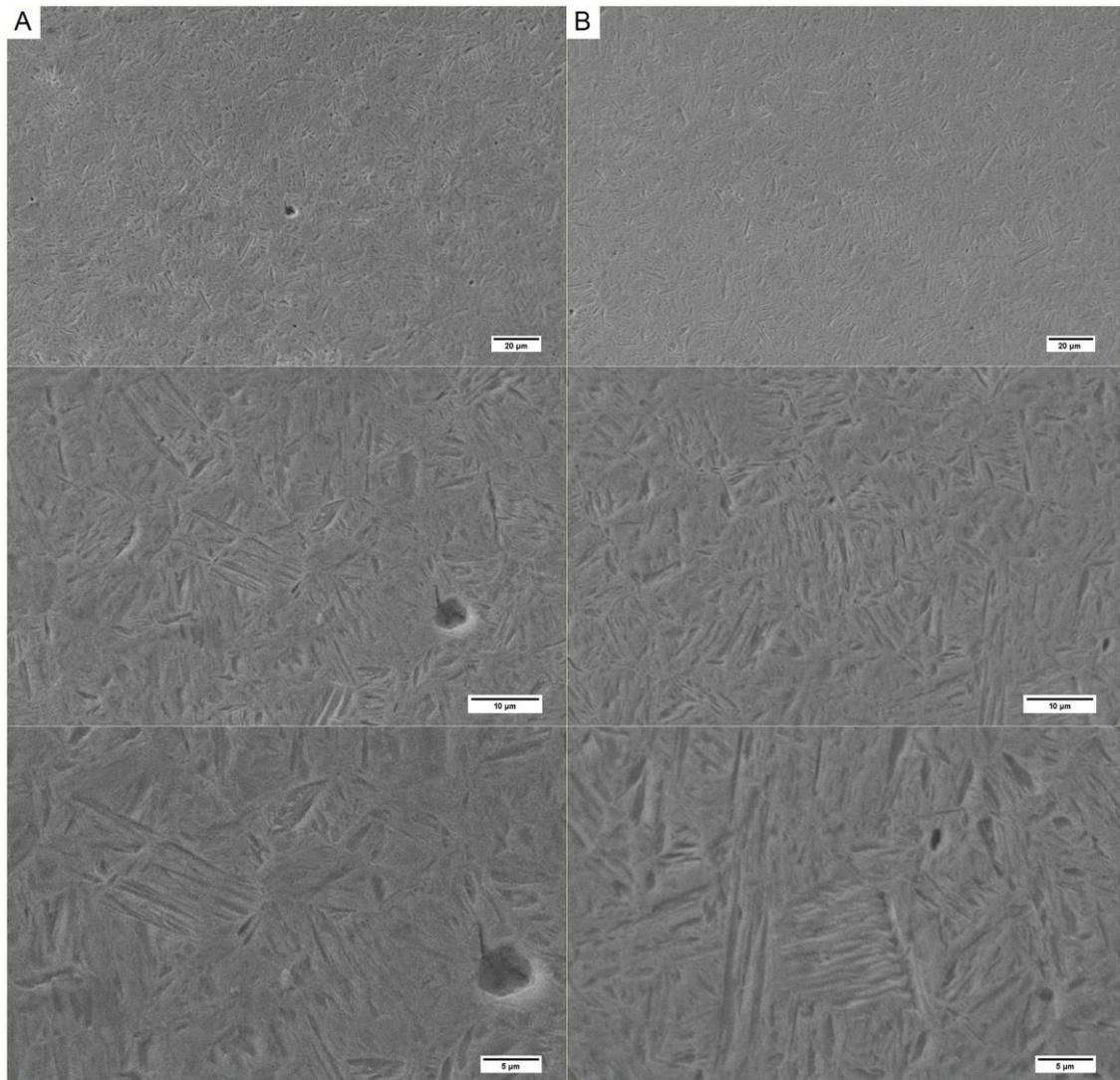
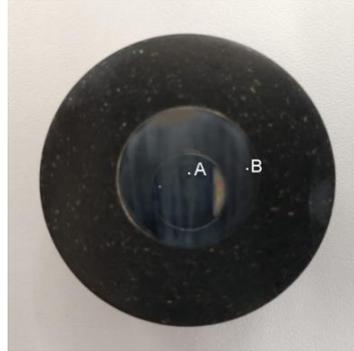
De maneira similar, imagens foram feitas para os aços temperados em óleo mineral e óleo vegetal. As figuras 10 e 11 apresentam as imagens realizadas nas diferentes regiões da amostra:

Figura 10 – Imagem em microscópio eletrônico de varredura do aço 8640 temperado em óleo mineral. A: micrografia realizada no centro da amostra (escala: 20 μ m, 10 μ m e 5 μ m, respectivamente) e B: realizada na extremidade (escala: 20 μ m, 10 μ m e 5 μ m respectivamente).



Fonte: Autora (2019)

Figura 11 – Imagem em microscópio eletrônico de varredura do aço 8640 temperado em óleo vegetal (óleo de girassol). A: micrografia realizada no centro da amostra (escala: 20 μ m, 10 μ m e 5 μ m, respectivamente) e B: realizada na extremidade (escala: 20 μ m, 10 μ m e 5 μ m respectivamente).



Fonte: Autora (2019)

Comparando as micrografias do aço recozido (Figura 10) com os aços temperados (Figuras 10 e 11), é possível observar profunda alteração entre as microestruturas. No primeiro caso, é possível distinguir os grãos, enquanto que, para ambos os aços temperados, não é possível perceber a presença dos mesmos. A ausência dos grãos nos aços temperados indica que a taxa de resfriamento possibilitada pelos óleos utilizados foi capaz de tornar a microestrutura mais fina e, conseqüentemente, de maior dureza.

Em relação aos aços temperados, é evidente a semelhança nas imagens obtidas do aço temperado em óleo mineral e do aço temperado em óleo de girassol. Na superfície de ambos, é possível observar diversos relevos superficiais de 1 a 7 μ m de comprimento. Esses riscos são diferenças no relevo que surgem devido à expansão volumétrica associada à transformação da estrutura austenítica (CFC) em martensítica (TCC). A estrutura martensítica, devido ao seu caráter fino associado à sua cristalografia TCC, confere aumento de dureza nos aços temperados.

Em se tratando da profundidade de têmpera, a diferença entre as imagens da região A (central) e da região B (extremidade) é imperceptível para o caso de ambos os aços temperados. Isso indica que, para o diâmetro de 19,25mm do corpo de prova, a têmpera foi capaz de penetrar todo o seu interior. Isso indica que o óleo de girassol obteve comportamento semelhante ao óleo mineral no que se diz respeito à profundidade de têmpera para seções de aço AISI 8640 com diâmetros de até aproximadamente 20mm.

As microestruturas reveladas pelas imagens de microscopia eletrônica indicam que os resfriamentos em óleo mineral e em óleo de girassol foram capazes de transformar de maneira equivalente o aço AISI 8640. Houve também indícios de formação de martensita devido às características observadas no relevo do material.

4.2 Dureza

A tabela 3 mostra os valores médios de dureza para os aços recozido e temperados. Foram realizadas três medidas na região central, na metade do raio e na extremidade.

Tabela 3: Medidas de dureza dos aços realizados na região central, metade do raio e extremidade. Escala Rockwell C.

	Aço Recozido	Aço Temperado em Óleo Mineral	Aço Recozido em Óleo Vegetal
Centro	35,3 ± 0,6	56,3 ± 0,6	56,0
Metade do Raio	35,3 ± 0,6	57,0	56,6 ± 0,6
Extremidade	35,6 ± 0,6	57,6 ± 0,6	57 ± 1

Fonte: Autora (2019)

A dureza média encontrada para o aço recozido foi de 35,4 HRC, com baixa variação em relação ao diâmetro da amostra. Esse resultado é compatível com as metalografias realizadas para esse aço, que mostraram uma microestrutura mais grosseira e, portanto, mais dúctil. As análises em microscopia eletrônica de varredura e dureza obtiveram resultados esperados conforme as mudanças microestruturais provocadas pelo tratamento de recozimento pleno.

Para o aço temperado em óleo mineral, a dureza média foi de 57,0 HRC e para o aço temperado de óleo vegetal, a dureza média foi de 56,5 HRC. Esses valores, em comparação com a dureza encontrada para o aço recozido, indicam aumento significativo de dureza. Para ambos os aços, não houve diferença significativa na dureza em regiões mais próximas do centro, onde a têmpera pode ser menos efetiva. Os valores próximos de dureza encontrados para ambos os aços temperados corroboram as micrografias realizadas, que apresentaram alta semelhança entre o aço temperado em óleo mineral e temperado em óleo vegetal.

5 CONCLUSÃO

Neste trabalho foram realizados tratamentos térmicos de têmpera de aços AISI 8640, considerando dois meios de têmpera diferentes – óleo mineral convencional e óleo de girassol. Para avaliar e comparar os efeitos da têmpera nos aços, foram realizadas imagens em microscópio eletrônico de varredura, bem como ensaios de dureza.

As micrografias obtidas indicaram a formação de martensita nos aços temperados devido ao aparecimento de degraus na superfície. Esses degraus são consequência da expansão volumétrica associada à formação da martensita. O surgimento dessa estrutura é responsável pelo aumento significativo da dureza em aços temperados.

O ensaio de dureza, por sua vez, indicou um aumento significativo de dureza dos aços temperados em relação ao mesmo aço em condição recozida. Além disso, a dureza do aço temperado em óleo de girassol, de 56,5 HRC, se mostrou extremamente próxima à dureza do aço temperado em óleo mineral, medida como 57,0HRC. Em se tratando da profundidade de têmpera, não houve mudança significativa de dureza ao longo do diâmetro da peça, indicando que para seções de aproximadamente 20mm, a têmpera em óleo de girassol é capaz de penetrar todo o material.

Diante do exposto, o comportamento do óleo de girassol como meio têmpera se mostrou tão eficiente quanto o óleo mineral no que se diz respeito ao aumento de dureza, bem como à profundidade de tempera. O óleo de girassol, bem como o óleo mineral, foram capazes de induzir transformações martensíticas no aço, e, como indicado pelos ensaios mecânicos de dureza, aumentar a dureza destes.

Dessa forma, o óleo de girassol se mostra um potencial substituinte dos óleos minerais convencionais como meio de têmpera. No entanto, para confirmar a verdadeira viabilidade dessa proposta, torna-se necessário avaliar outros aspectos do óleo de girassol tais como: biodegradabilidade, curvas de resfriamento e durabilidade.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Para julgar de forma mais criteriosa a potencialidade do óleo de girassol como substituinte dos óleos minerais, torna-se necessário avaliar o processo de têmpera em óleo de girassol de aços com composições diferentes. Dessa forma, novas análises de micrografias e ensaios de dureza de outros aços trariam informações úteis da versatilidade ou limitações do óleo de girassol como meio de têmpera.

Além disso, é de suma importância acompanhar as alterações das propriedades físicas e estruturais do óleo de girassol durante os ciclos de tratamentos térmicos. Uma vez que as mudanças nas propriedades dos óleos afetam seu potencial como meio de têmpera, avaliar o comportamento do óleo de girassol nos ciclos de aquecimento e resfriamento fornece informações importantes que impactarão na sua viabilidade de aplicação industrial.

Por fim, outras análises que complementariam os estudos do óleo de girassol como meio de têmpera envolvem a sua biodegradabilidade e seu comportamento no meio ambiente após o descarte. Apesar de biodegradável e originário de fontes renováveis, ainda assim é de grande importância conhecer o impacto e as consequências que o descarte desse material pode acarretar ao meio ambiente.

REFERÊNCIAS

ABDALLA, A.J. et al. **Otimização das Propriedades Mecânicas Por Meio de Modificações Microestruturais em Aços de Baixo Carbono**, Anais do 58º Congresso da ABM, Rio de Janeiro, p.2801-2809, 2003.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, **Metals Test Methods and Analytical Procedures: ASTM E-112-96**, Annual Book ASTM Standards, v. 03.01, 2000.

ANAZAWA, R. M. et al. **Efeito dos Tratamentos Intercrítico e Isotérmico sobre as Propriedades Mecânicas e a Microestrutura no Aço 300M**. Materials and Design, p. 93–97, 2006.

ASM International. Heat Treater's Guide: Practices and Procedures for Irons and Steels. 1995.

BARBOSA, L. et al. **Análise Comparativa entre os Tratamentos Térmicos Realizados em Aço 8640**. Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia, p. 1–6, 2016.

BORN, R. M.; MATTOS, C. F. **Comportamento do processo de têmpera no aço SAE 1045 através do resfriamento em óleo com viscosidades distintas**. Revista Dissertar, 1(30). p. 207–220, 2018.

CANALE, L. C. F. et al. **Comparison of Oxidation Stability and Quenchant Cooling Curve Performance of Soybean Oil and Palm Oil**. Journal of Materials Engineering and Performance. v. 22, n. July, p. 1929–1936, 2013.

CELADA-CASERO, C.; SIETSMA, J.; JESUS, M. **The role of the austenite grain size in the martensitic transformation in low carbon steels**. Materials and Design. v. 167, 2019.

CELESTINO, P. A. P.; FELIPE, R. C. T. S.; MACHADO, T. G. **Análise Comparativa entre o Tratamento Térmico (Têmpera) e o Tratamento Termoquímico (Cementação) Realizado em Aço 1040**. Holos, v. 3, p. 223–232, 2007.

CHIAVERINI, V. **Aços e Ferros Fundidos**. 6ª edição, Associação Brasileira de Metais (ABM), São Paulo, 2012.

CHIAVERINI, V. **Tecnologia Mecânica: Materiais de Construção Mecânica**. Volume III. 2ª edição. São Paulo: Pearson - Makron Books, 1996.

CORREIA, IARA MICHELLE & SOUZA, M & SOUSA, E. **EXTRAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DO ÓLEO DE GIRASSOL (*Helianthus annuus* L.) UTILIZANDO O MÉTODO DE Prensagem a Frio e Extração por Solventes**. XVIII Congresso Brasileiro de Engenharia Química, 2010

FARAH, A. F. **Caracterização de Óleos Vegetais como Alternativa para Meios de resfriamento Utilizado no Tratamento Térmico de Têmpera**. Universidade de São Paulo, 2002.

GOMEZ, N. A. et al. **Chemical and Spectroscopic Characterization of a Vegetable Oil used as Dielectric Coolant in Distribution Transformers**. Journal of the Brazilian Chemical Society. v. 22, n. 12, p. 2292–2303, 2011.

GRACIOSO, J. F. F. **Efeito das Condições de Têmpera na Microestrutura e Propriedades Mecânicas de um Aço Inoxidável Martensítico Fundido CA6NM**. Universidade Federal de Santa Catarina, 2003.

HIDALGO, J.; SIETSMA, J.; SANTOFIMIA, M. J. **A Influence of the prior athermal martensite on the mechanical response of advanced bainitic steel**. Materials Science & Engineering v. 735, n. July, p. 343–353, 2018.

HOSSAIN, R.; PAHLEVAN, F.; SAHAJWALLA, V. **Evolution of Microstructure and Hardness of High Carbon Steel under Different Compressive**. Metals, v. 8. 580. 2018.

KEDDAM, M. et al. **Boriding kinetics and mechanical behaviour of AISI Boriding kinetics and mechanical behaviour of AISI O1 steel**. Surface Engineering. v. 31, p. 588 - 597, 2015.

KRAUSS, G. **Steels Processing, Structure, and Performance**. ASM International. 2. ed., 2005.

MARUDA, R. W. et al. **Structural and Microhardness Changes After Turning of the AISI 1045 Steel for Minimum Quantity Cooling Lubrication**. Journal of Materials Engineering and Performance, v. 26, n. 1, p. 431–438, 2017.

OTERO, R. L. S. et al. **Quenchant Cooling Curves , Rewetting , and Surface Heat Flux Properties of Vegetable Oils**. Journal of Materials Engineering and Performance, v. 8, p. 143–169, 2019.

OTERO, R. L. S.; CANALE, L. C. F.; TOTTEN, G. E. **Vegetable Oils as Metal Quenchants : A Comprehensive Review Vegetable Oils as Metal Quenchants**. Materials Performance and Characterization. v. 6, n. 1, 2019.

PAITER, L.; GALVÃO, J. R. **Estudo empírico da degradação de óleo de soja correlacionado com a sua constante dielétrica utilizando um sensor capacitivo**. Matéria (Rio de Janeiro), v. 20, p. 392–398, 2015.

PARDAL, J. M. et al. **Uma Revisão da Resistência à Corrosão em Aços Inoxidáveis Duplex e Superduplex**. Virtual Química, v. 5, n. 4, p. 658–677, 2013.

PARDAL, J. M. et al. **Influence of Austenitizing on the Mechanical Properties of Maraging 300 and Sae 4340 Steels – Comparative Study**. Materials Research. v. 20, p. 1–9, 2017.

PAPAZOGLU, E. L.; MARKOPOULOS, A. P.; MANOLAKOS, D. E. **Experimental research on EDM of AISI O1 tool steel and study of the surface white layer formation**. Procedia Structural Integrity, Procedia Structural Integrity. v. 10, p. 235–242, 2018.

REDA, S. Y. **Evaluation of antioxidants stability by thermal analysis and its protective effect in heated edible vegetable oil**. Food Science and Technology v. 31, n. 2, p. 475–480, 2017.

SANTOS, L. H. et al. **Estudo da Influência dos Tratamentos Térmicos de Recozimento Pleno e Esferoidização nas Curvas de Escoamento a Frio do Aço ABNT 1045**. Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração, v. 15, p. 75–79, 2018.

SILVEIRA, F. et al. **Tratamento Térmico de Têmpera em Aço ABNT 8640: Análise das Propriedades Mecânicas**. Holos, v. 02, n. July, p. 49–59, 2018.

SOARES, E. J. F. et al. **Estudo comparativo da vantagem de uma têmpera em óleo de palma sobre a têmpera tradicional em aços.** VI Conferência Brasileira sobre Temas de Tratamento Térmico n. 1, p. 81–90, 2012.

SCHULZ-BEENKEN, A. **Martensite in Steels: its Significance, Recent Developments and Trends.** Journal de Physique IV Colloque. p.C5-359-C5-366, 1997.

TOTTEN, G. E. **Steel Heat Treatment: Metallurgy and Technologies.** 1ª edição. Boca Raton: CRC Express, 2006.

VATAVUK, J. et al. **Comparative Impact Behavior of High-C Steel After Conventional Quenching , Tempering , and Austempering.** Materials Performance and Characterization v. 5, n. 1, 2019.