

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

CELSO KOOJI ANEGAWA

**VERIFICAÇÃO DA CONFORMIDADE DE GRAMPOS DE FIXAÇÃO EM AÇO SAE
4140 REPROCESSADOS NO TRATAMENTO TÉRMICO**

LONDRINA

2023

CELSO KOOJI ANEGAWA

**VERIFICAÇÃO DA CONFORMIDADE DE GRAMPOS DE FIXAÇÃO EM AÇO SAE
4140 REPROCESSADOS NO TRATAMENTO TÉRMICO**

**Verification the conformity of steel SAE 4140 U-bolts reprocessed in heat
treatment**

Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentado como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia de Materiais da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).
Orientador(a): Prof. Dr. Odney Carlos Brondino

LONDRINA

2023



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Esta licença permite compartilhamento, remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

CELSO KOOJI ANEGAWA

**VERIFICAÇÃO DA CONFORMIDADE DE GRAMPOS DE FIXAÇÃO EM AÇO SAE
4140 REPROCESSADOS NO TRATAMENTO TÉRMICO**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
apresentado como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia de Materiais da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 30/novembro/2023

Prof. Dr. Odney Carlos Brondino
Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais
Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR

Prof. Dr. Márcio Andreato Batista Mendes
Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais
Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR

Prof^a: Dr^a. Joice Erica Motezuki
Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais
Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR

LONDRINA

2023

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, por todo apoio e carinho que me deram.

Aos meus irmãos que sempre estiveram ao meu lado.

Ao Prof. Dr. Odney Carlos Brondino por ter aceitado em ser meu orientador e pela ajuda em todo o trabalho.

Aos meus amigos que estiveram comigo durante todos esses anos de faculdade, nos momentos de estudos e dedicação

A todos os professores pelos ensinamentos e aprendizados dentro e fora da sala de aula.

Enfim, agradeço a todos que puderam contribuir durante minha graduação.

“A persistência é o caminho do êxito.”
(CHAPLIN, 1997).

RESUMO

Os tratamentos térmicos de têmpera e revenimento são de fundamental importância nas indústrias, desempenhando um papel essencial na melhoria das propriedades mecânicas dos materiais para suas aplicações específicas, porém, quando variáveis como temperatura, tempo e velocidade de resfriamento não são controlados, pode haver consequências significativas. Assim, o presente trabalho avaliou as propriedades mecânicas de grampos de fixação, que tiveram seu processo de têmpera ou revenimento interrompidos no primeiro ciclo e tiveram que ser reprocessados nos tratamentos térmicos de têmpera e revenimento. Os grampos de fixação são itens de segurança responsáveis pela fixação do feixe de molas até o eixo do veículo que devem possuir um rigoroso controle no tratamento térmico para atingir as propriedades mecânicas especificadas. Foram reprocessados 10 grampos que houve o tratamento térmico interrompido, nas mesmas condições que deveriam ter ocorrido o primeiro ciclo: temperatura de austenitização de 860°C, resfriamento em óleo com temperatura máxima de 100°C e temperatura de revenimento de 560 °C. Os grampos de fixação apresentaram valores dentro do especificado pela norma ISO 898-1/2013 e obteve a microestrutura esperada martensita revenida.

Palavras-chave: Tratamento térmico; Reprocessamento; Grampos de fixação

ABSTRACT

Quenching and tempering heat treatments have fundamental importance in industries, playing an essential role in improving the mechanical properties of materials for their specific applications. However when variables such as temperature, time and cooling speed are not controlled there can be undesirable consequences. The purpose of this study is to evaluate the mechanical properties of U-bolts which had their hardening or tempering process interrupted in the first cycle and had to be reprocessed in the hardening and tempering heat treatments. The U-bolts are safety items responsible for fixing the spring beam to the vehicle's axle. They must be rigorously heat treated in order to achieve the specified mechanical properties. Ten U-bolts were reprocessed which their heat treatment was interrupted, under the same conditions as the first cycle, austenitizing temperature of 860°C, cooling in oil with a maximum temperature of 100°C and tempering temperature of 560°C. The U-bolts showed values within those specified by the ISO 898-1/2013 standard and obtained the expected tempered martensite microstructure.

Keywords: Heat treatment; Reprocessing; U-bolts.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Representação do feixe de molas, grampo de fixação e olhete.	16
Figura 2: Feixe de molas e grampo de fixação em operação.	17
Figura 3: Diagrama de fases parcial do Fe-C.	22
Figura 4: Diagrama de transformação isotérmica (TTT) para uma liga Fe-C. A: austenita; B: bainita; M: martensita; P: perlita.	23
Figura 5: Aspecto da micrografia do aço SAE 4140 típica de uma estrutura martensítica após têmpera.	25
Figura 6: Curvas de temperabilidade para diferentes aços.	26
Figura 7: Aspecto de uma estrutura típica do aço SAE 4140 de martensita revenida após têmpera e revenimento.	27
Figura 8: Gráfico representando o limite de resistência à tração, limite de escoamento e redução na área em função da temperatura de revenimento.	28
Figura 9: Diagrama representativo da têmpera e revenimento em um diagrama TTT.	29
Figura 10: Fluxograma da execução da metodologia experimental.	32
Figura 11: Representação do ensaio de dureza no núcleo da peça.	33
Figura 12: Gráfico de comparação dos grampos antes e após o reprocessamento.	37
Figura 13: Micrografia dos grampos reprocessados.	39
Figura 14: Micrografia dos grampos reprocessados.	40

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Classificação dos aços conforme normas AISI e SAE	19
Tabela 2: Propriedades do aço SAE 4140, à 25°C.	20
Tabela 3: Composição química do SAE 4140.	20
Tabela 4: Propriedades mecânicas de grampos de fixação classe 10.9.	35
Tabela 5: Durezas dos grampos não revenidos.	35
Tabela 6: Durezas dos grampos após o reprocessamento de têmpera e revenimento	36
Tabela 7: Resultados do limite de escoamento e do limite de resistência no ensaio de tração.	37
Tabela 8: Resultados do alongamento e da redução de área no ensaio de tração.	38

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	American Society for Testing and Materials
HRC	Rockwell C
ISO	International Organization for Standardization
LE	Limite de escoamento
LRT	Limite de resistência à tração
MPa	Mega Pascal
SAE	Society of Automotive Engineer
TTT	Tempo – Temperatura - Transformação

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	OBJETIVOS	14
2.1	Objetivo geral.....	14
2.2	Objetivos específicos.....	14
3	JUSTIFICATIVA.....	15
4	REFERENCIAL TEÓRICO.....	16
4.1	Suspensão de veículos pesados	16
4.2	Aços especiais aplicados comercialmente	17
4.3	Tratamentos térmicos	21
4.3.1	Têmpera	24
4.3.2	Revenimento	26
4.4	Descarbonetação.....	30
4.5	Reprocessamento	30
5	MATERIAIS E MÉTODOS	32
5.1	Materiais	33
5.2	Métodos.....	33
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES	35
6.1	Dureza	35
6.2	Ensaio de tração.....	37
6.3	Metalografia	39
7	CONCLUSÃO	41
	REFERÊNCIAS.....	42

1 INTRODUÇÃO

O reprocessamento do tratamento térmico é uma técnica que não é desejável nas empresas, pois além dos custos adicionais, podem ter várias consequências indesejáveis, afetando a qualidade e as propriedades finais do material, porém, em alguns casos de paradas não programadas, há a possibilidade de as propriedades mecânicas do material não serem alcançadas, sendo esse método uma alternativa para reaproveitar os componentes que foram afetados.

No local onde este trabalho foi realizado, acreditava-se que o processo de tratamento térmico deveria ocorrer apenas uma vez nos grampos de fixação. Essa decisão era baseada na significativa responsabilidade que esse componente possui na sua aplicação pois é o único item que faz a ligação do feixe de molas com o eixo do veículo, onde qualquer parada não programada nos fornos de tratamento térmico poderia resultar na perda do grampo considerando-os como sucata, o que ressalta a importância crítica desse processo na garantia da qualidade e desempenho do componente.

No âmbito deste trabalho, foram realizados ensaios de dureza, tração e metalografia em uma amostragem retirada de um lote produtivo de grampos de fixação que passaram por reprocessamento para verificar se as propriedades mecânicas e a microestrutura atendem às especificações da norma ISO 898-1/2013.

Os resultados mostraram que as propriedades mecânicas dos grampos de fixação como a dureza, limite de escoamento (LE), limite de resistência à tração (LRT), alongamento e redução de área apresentaram resultados satisfatórios após o reprocessamento, onde alguns parâmetros obtiveram valores com margem acima do valor mínimo especificado, podendo ser uma alternativa para o reaproveitamento dos grampos de fixação que tiveram seu primeiro ciclo de tratamento térmico interrompido por alguma parada de emergência.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Avaliação das propriedades mecânicas dos grampos de fixação de aço SAE 4140 após o reprocessamento no tratamento térmico por meio de ensaios mecânicos e micrografias para verificar se as especificações técnicas foram atendidas.

2.2 Objetivos específicos

- Identificação de materiais não conformes através do ensaio de dureza;
- Determinação da dureza após o reprocessamento;
- Realização de ensaio de tração para determinar LE, LRT, alongamento e redução de área;
- Identificação da microestrutura através de metalografia;
- Discussão dos resultados dos ensaios realizados após o reprocessamento;
- Certificação das propriedades mecânicas conforme ISO 898 – 1/2013 foram atendidas.

3 JUSTIFICATIVA

Durante o processo produtivo podem ocorrer paradas de emergências como o interrompimento de energia elétrica não programada, manutenções corretivas, entre outras, que por consequência, afetam o primeiro ciclo do tratamento térmico de peças, podendo ocasionar alterações nas propriedades mecânicas, não atingindo a especificação adequada e resultando em peças não conformes destinadas para refugo não havendo o aproveitamento das mesmas.

O reprocessamento é uma alternativa que visa buscar uma solução para o atendimento das propriedades mecânicas dentro de suas faixas especificadas para aplicação, permitindo o reaproveitamento dos componentes de segurança que passaram por interrupções não programadas, especialmente peças que tiveram seus tratamentos térmicos parciais ou interrompidos.

Assim, este trabalho tem grande relevância, pois avaliou as propriedades mecânicas de um conjunto de grampos de fixação após o reprocessamento que não tiveram suas propriedades mecânicas alcançadas pelos tratamentos térmicos durante seu primeiro ciclo.

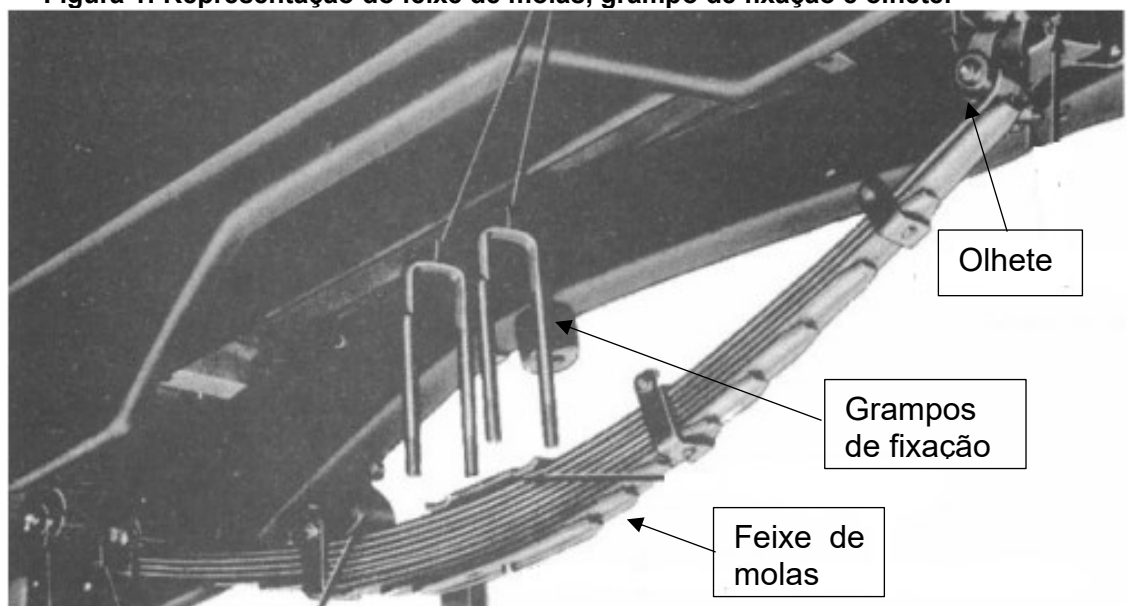
4 REFERENCIAL TEÓRICO

4.1 Suspensão de veículos pesados

A suspensão de veículos pesados é um sistema de grande importância pois proporciona conforto ao motorista e contribui para a estabilidade do veículo. Existem vários tipos de suspensões de veículos pesados onde seus principais componentes são o feixe de molas e o grampo de fixação. Devido às precárias condições das rodovias no Brasil, há uma grande demanda de manutenção dos veículos pesados, atraindo diversos fabricantes, sendo a suspensão um dos itens mais afetados (SILVA, 2014).

O feixe de molas é composto por uma ou mais lâminas de aço que trabalham em conjunto visando absorver as vibrações devido às irregularidades das rodovias, amenizando os impactos. Ele é mais utilizado em veículos pesados ou aqueles que transportam cargas como caminhões, ônibus e caminhonetes, em que necessitam de uma maior rigidez, oferecida pelo feixe de molas. Para a fixação desse componente ao veículo, utiliza-se um olhete em cada extremidade do feixe de molas que acopla ao chassi e um grampo de fixação próximo ao centro do feixe de molas que liga ao eixo do veículo como pode ser observado na Figura 1 (GUERRA, 2016).

Figura 1: Representação do feixe de molas, grampo de fixação e olhete.

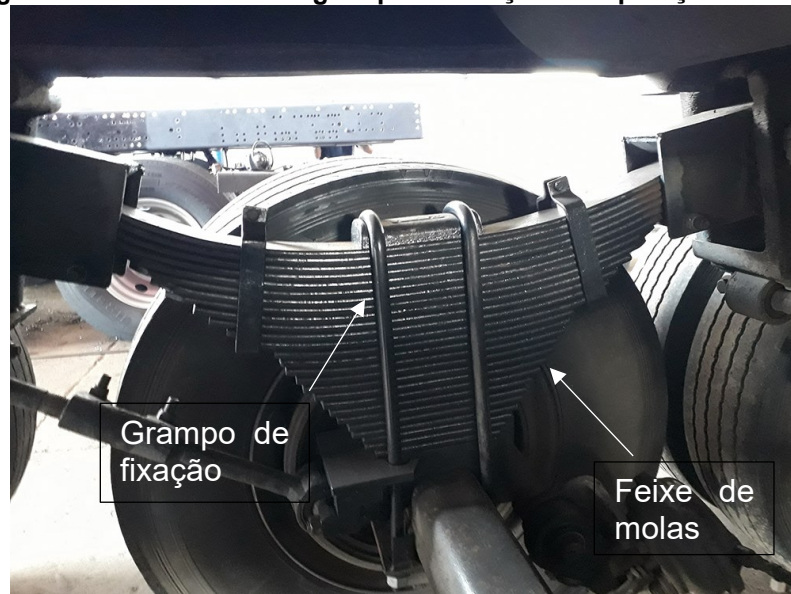


Fonte: Adaptado de Ventura (2006)

Os grampos de fixação geralmente possuem um formato em “U” utilizado para fazer a ligação do eixo do veículo com o feixe de molas (conforme demonstra a Figura

2), uma vez que é o único componente responsável por essa função, tornando-o um item de segurança devido sua grande importância. Esses grampos de fixação são fabricados de barras redondas e devem possuir propriedades mecânicas controladas, para não ocorrer nenhuma falha prematura nestes componentes, pois são responsáveis por absorverem altas tensões geradas pela suspensão em ciclos de trabalho (LÚCIO, 2013; VENTURA, 2006).

Figura 2: Feixe de molas e grampo de fixação em operação.



Fonte: Adaptado de El Shadai (2022)

As propriedades mecânicas especificadas para o grampo de fixação, são alcançadas por meio de tratamentos térmicos de têmpera e revenimento (VENTURA, 2006).

4.2 Aços especiais aplicados comercialmente

Os aços são ligas metálicas que possuem em sua composição química alguns elementos químicos, sendo os principais o ferro (Fe) e o carbono (C). Os ferros fundidos também possuem esses dois elementos, além do silício (Si), como principais, porém, apresentam diferentes propriedades mecânicas devido à quantidade de carbono presente nestas ligas serem distintas, enquanto no aço a porcentagem de carbono normalmente não excedem 2,14%, no ferro fundido pode possuir até 6% de carbono. Além desses dois elementos principais, os aços carbono comuns possuem mais quatro elementos, sendo eles, o fósforo (P), enxofre (S), silício (Si) e manganês

(Mn) inerente aos processos de fabricação, porém, outros elementos de liga podem ser adicionados intencionalmente em quantidades específicas nos aços para melhorar as propriedades desejadas, representando diferentes ligas ferrosas (CALLISTER, 2020).

Os aços mais comuns são classificados de acordo com a concentração de carbono, sendo, baixo, médio e alto teor de carbono. Aços com baixo teor de carbono contêm menos de 0,25% de carbono, não respondem a tratamentos térmicos realizados para formar martensita, apresentam relativamente baixa dureza e baixa resistência, porém, ductilidade e tenacidade excepcionais, além disso, são de boa usinabilidade e boa soldabilidade. Aços com médio teor de carbono apresentam concentrações de carbono entre 0,25 e 0,6%, assim, essas ligas podem ser tratadas termicamente, sendo utilizadas com maior frequência após a têmpera e revenimento, com microestrutura martensita revenida. Essas ligas, quando tratadas termicamente, são mais resistentes que os aços com baixo teor de carbono, porém com menores ductilidade e tenacidade. Aços com alto teor de carbono, normalmente apresentam teores de carbono entre 0,60% e 1,4%, são os mais duros e resistentes, porém são os menos dúcteis entre os aços-carbono. Na maioria das aplicações estão em uma condição endurecida e revenida para a resistência ao desgaste e abrasão, onde são muito utilizados em ferramentas de corte e matrizes para deformar e conformar outros materiais (CALLISTER, 2020).

Já os aços que possuem adições de elementos de liga podem ser classificados em aços de baixa liga, aços de alta liga ou aços ligados dependendo da porcentagem dos elementos de liga no material. Esses aços podem ser classificados e normalizados em famílias, onde através de sua numeração, podem ser identificados pelos elementos de liga dentro de um intervalo de quantidade especificado entre eles, mais a variação do teor de carbono, onde os dois primeiros números designam a família do aço que possuem características semelhantes e os dois últimos números representam o teor de carbono. Na Tabela 1, são mostradas algumas famílias de aços, padronizadas pelas normas Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) *American Society for Testing and Materials* (ASTM) e *Society Automotive Engineers* (SAE) (CALLISTER, 2020; COLPAERT, 2018).

Tabela 1: Classificação dos aços conforme normas AISI e SAE

Aços carbonos	10xx	Aços carbonos
	11xx	Aços carbonos de fácil usinagem com alto enxofre
	12xx	Aços carbonos de fácil usinagem com alto enxofre e fósforo
Aços de baixa liga	13xx	Mn 1,75%
	23xx	Ni 3,5%
	25xx	Ni 5,0%
	31xx	Ni 1,25%, Cr 0,65%
	33xx	Ni 3,5%, Cr 1,55%
	40xx	Mo 0,25%
	41xx	Cr 0,50% ou 0,95%, Mo 1,12% ou 0,20%
	43xx	Ni 1,80%, Cr 0,50% ou 0,80%, Mo 0,25%
	46xx	Ni 1,55% ou 1,80%, Mo 0,20% ou 0,25%
	47xx	Ni 1,05%, Cr 0,45%, Mo 0,20%
	48xx	Ni 3,50%, Mo 0,25%
	50xx	Cr 0,80% ou 0,40%
	51xx	Cr 0,80% até 1,05%
	5xxxx	Cr 0,50% ou 1,00% ou 1,45%, C 1,00%
	61xx	Cr 0,80% ou 0,95%, V 0,10% ou 0,15% mínimo
	86xx	Ni 0,55%, Cr 0,50% ou 0,65%, Mo 0,20%
	87xx	Ni 0,55%, Cr 0,50%, Mo 0,25%
	92xx	Mn 0,85%, Si 2,00%
	93xx	Ni 3,25%, Cr 1,20%, Mo 0,12%
	98xx	Ni 1,00%, Cr 0,80%, Mo 0,25%

Fonte: Adaptado de Colpaert (2018)

Os aços possuem um grande emprego nas indústrias automotivas, como, por exemplo, a classe SAE 41XX que possui como elementos de ligas principais o Cromo (Cr) e o Molibdênio (Mo), sendo que os principais aços da classe são o SAE 4130, SAE 4140 e SAE 4145. As principais aplicações desse aço são eixos, anéis, porcas, parafusos, engrenagens, grampos de fixação, entre outros. A razão da utilização dessa classe para a indústria são suas ótimas propriedades mecânicas que podem ser alcançadas por tratamentos térmicos, como podemos observar na Tabela 2 de propriedades do SAE 4140 (RASMA, 2015).

Tabela 2: Propriedades do aço SAE 4140, à 25°C.

Propriedades		Tratamento
Densidade	7,7 - 8,03	
Coeficiente de Poisson	0,27 - 0,3	
Módulo de Young (GPa)	190 - 210	
Resistência à tração (MPa)	655	
Tensão de escoamento (MPa)	417,1	Normalização a 870 °C
Alongamento (%)	25,7	
Redução de área (%)	56,9	
Tensão de escoamento (MPa)	965	Têmpera e revenimento
Resistência à tração (MPa)	1650	

Fonte: Adaptado de Rasma (2015)

O aço 4140 é normalmente utilizado em peças que requerem um equilíbrio de dureza, tenacidade e resistência mecânica, possuindo uma vasta gama de aplicações em diversos setores. No estado temperado e revenido, esse aço pode alcançar limite de escoamento (LE) de 965 MPa, com um limite de resistência à tração (LRT) podendo chegar em 1650 MPa. Essa liga SAE 4140, possui características como boa temperabilidade, má soldabilidade e razoável usinabilidade devido à sua composição química demonstrado na Tabela 3 (RASMA, 2015).

Tabela 3: Composição química do SAE 4140.

Composição SAE 4140					
%C	%Mn	%Si	%Cr	%Mo	%Ni
0,380 - 0,430	0,750 - 0,900	0,150 - 0,300	0,900 - 1,100	0,150 - 0,250	Máx. 0,080

Fonte: Adaptado de Arcelor Mittal (2019)

As propriedades mecânicas dos aços, sofrem uma grande influência do tamanho dos grãos, principalmente o limite de escoamento e a dureza. Assim, quanto menor o tamanho do grão, maior serão os contornos de grão, onde esses agem como barreiras ao movimento das discordâncias, aumentando o LRT e o LE. Porém, com o aumento da temperatura e/ou reaquecimento nos processos de fabricação, os grãos tendem a ter um crescimento resultando em menores contornos de grãos, reduzindo

o LRT e o LE havendo a possibilidade de fragilizar o material por possuir menos contornos de grãos como barreira dos movimentos das discordâncias (SILVA, 2007).

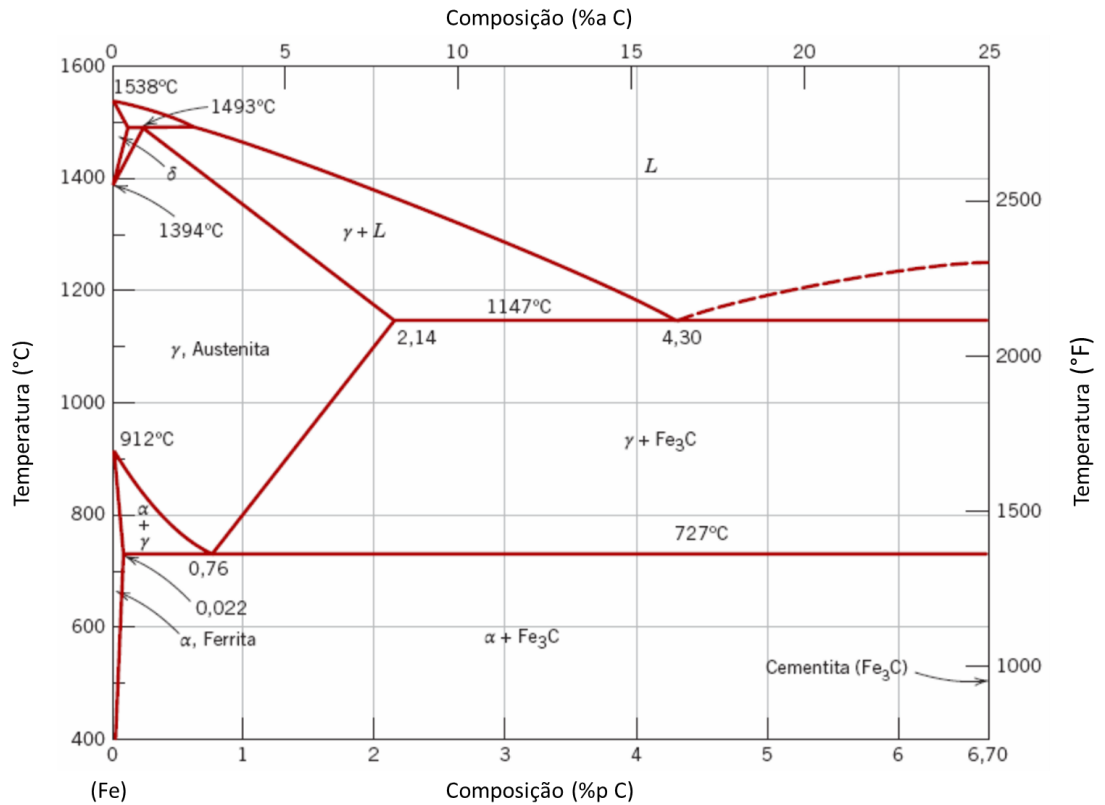
4.3 Tratamentos térmicos

Os tratamentos térmicos são procedimentos que visam aprimorar primordialmente as características das ligas metálicas. Seu princípio consiste em aquecer a peça em uma taxa controlada, manter a temperatura apropriada acima da temperatura de austenitização – conhecido como período de encharque – e depois aplicar um resfriamento controlado, que pode ocorrer de maneira abrupta ou gradual (CANDIDO, 2021).

Todos os processos de aquecimento do aço até a faixa de temperaturas onde ocorre a transformação austenítica apresentam, como sua principal mudança de fase no decorrer do procedimento, a formação da austenita. Muitas vezes, essa transformação não recebe a devida consideração, seja durante a análise do tratamento térmico ou em sua implementação. Subestimar o estágio de aquecimento e a subsequente formação da austenita pode acarretar consequências sérias e resultar em desempenho insatisfatório no tratamento térmico (COLPAERT, 2018).

Os tratamentos térmicos são normalmente baseados no diagrama de fases em equilíbrio da liga metálica que está sendo tratada. A Figura 3 apresenta o diagrama do Fe-C, que demonstra as fases existentes e as mudanças microestruturais que podem ocorrer em várias temperaturas e diferentes proporções químicas entre o Fe e o C. As fases que compõem o diagrama incluem a ferrita (α), que é uma solução sólida de carbono no ferro (CCC), a austenita (γ), que é uma solução sólida de carbono no ferro (CFC), a cementita (Fe_3C), um carboneto de ferro extremamente duro, e a perlita ($\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$), que é uma mistura de ferrita com cementita (CALLISTER, 2020).

Figura 3: Diagrama de fases parcial do Fe-C.



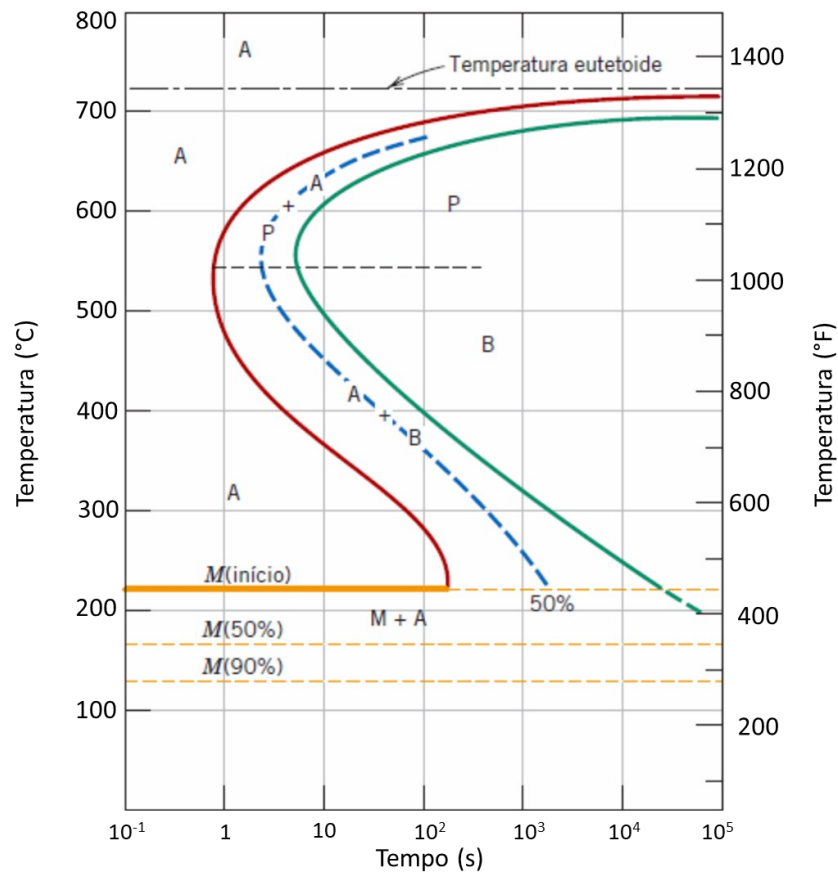
Fonte: Callister (2020)

O diagrama de fases Fe-C (equilíbrio termodinâmico) é de extrema importância quando se deseja analisar a microestrutura em determinada temperatura e determinado teor de carbono, sendo essencial para prever o microconstituente resultante quando o aço-carbono é submetido a variações de temperatura e composição química. Cada região do diagrama representa uma microestrutura (austenita, ferrita, cementita e perlita), sendo que a microestrutura é determinada pelo número de fases presentes, por suas proporções e pela maneira pela qual estão arranjadas, sendo estas delimitadas pelas linhas que quando passam pelas interfaces através do teor de carbono ou pela temperatura, ocorrem mudanças de fases, podendo formar uma combinação de fases ou somente uma fase (CALLISTER, 2020; VELLING, 2020).

As mudanças de fases de ligas metálicas podem ser realizadas por variação na temperatura, na composição química e na pressão externa. No entanto, dentre esses fatores, a alteração da temperatura por meio de tratamentos térmicos é o método mais amplamente empregado e conveniente para induzir essas transformações de fases (CALLISTER, 2020).

Nesse diagrama de fases, aparecem somente as fases estáveis do Fe-C, porém, nos tratamentos térmicos que possuem alta taxa de resfriamento, a difusão é extremamente baixa ou desprezível resultando em microestruturas metaestáveis como a martensita e a bainita que não podem ser visualizadas no diagrama Fe-C, mas que podem ser vistas no diagrama TTT, ilustrado na Figura 4 que representa tempo, temperatura e transformação conforme a taxa de resfriamento imposta na peça (RASMA, 2015).

Figura 4: Diagrama de transformação isotérmica (TTT) para uma liga Fe-C. A: austenita; B: bainita; M: martensita; P: perlita.



Fonte: Adaptado de Callister (2020)

A presença de elementos de liga, além do carbono, podem causar alterações significativas nas posições e formatos das curvas dos diagramas de transformações isotérmicas, podendo facilitar a transformação da austenita em outras fases como a perlita, martensita e bainita, dependendo dos elementos de liga do material (CALLISTER, 2020).

A martensita é uma solução sólida extremamente enriquecida de carbono no ferro. Ela é formada no tratamento térmico de têmpera por meio de uma mudança estrutural por cisalhamento direto, sem envolver a difusão, a partir da austenita, que possui uma estrutura cúbica de face centrada (CFC), para uma estrutura cristalina tetragonal de corpo centrado (TCC). Esse processo resulta em uma notável elevação nas propriedades mecânicas do material. É importante destacar que essa transformação não implica em alterações na composição química da substância, mas sim em uma modificação exclusiva na sua estrutura cristalina. Na Figura 4, podemos observar que o ponto de partida desse processo de transformação é representado por uma linha horizontal denominada M(início). Outras duas linhas horizontais tracejadas, identificadas como M(50%) e M(90%), delimitam os percentuais da conversão de austenita em martensita. As temperaturas nas quais essas linhas estão posicionadas variam conforme a composição química da liga (ASM, 1991; CALLISTER, 2020).

A bainita é outra microestrutura que pode ser formada em ligas de aço durante o processo de transformação isotérmica, sua formação ocorre por meio de um processo difusional e, é composta por uma mistura de duas fases microestruturais distintas, a ferrita e a cementita. Seu aspecto pode ser de agulhas ou placas (COLPAERT, 2018).

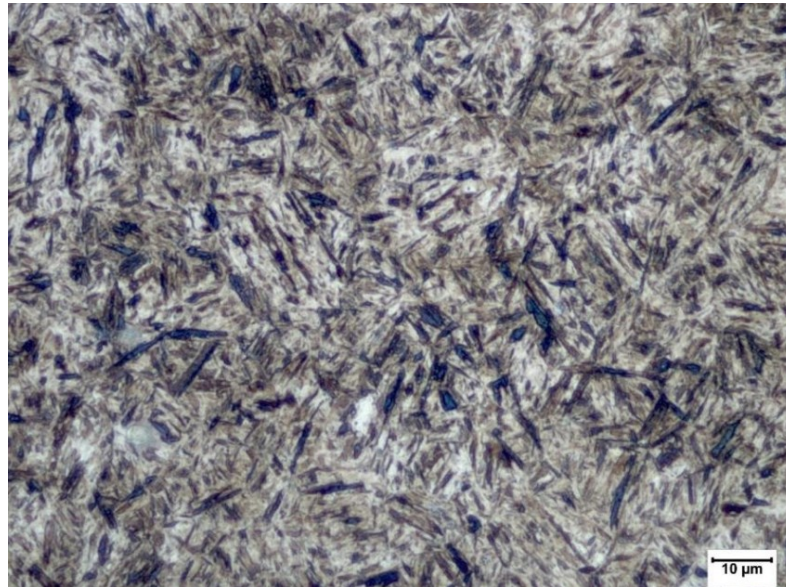
4.3.1 Têmpera

A têmpera é um dos tratamentos térmicos mais importantes dentre todos, pelo fato que a partir deste tratamento, acompanhado do revenimento, permite o emprego de peças de maior responsabilidade e/ou item de segurança que possuem aplicações críticas dentro das indústrias (CHIAVERINI, 2008).

O processo de têmpera consiste no aquecimento acima da temperatura de austenitização do material, permanecendo nessa temperatura por 1 hora a cada polegada de espessura do material, denominado também de tempo de encharque, seguido de um resfriamento brusco em um meio de têmpera, sendo os mais empregados: água, salmoura, óleo, ar forçado e soluções poliméricas. O resfriamento deve ter uma velocidade adequada para atingir uma temperatura abaixo de M_s (temperatura de formação da martensita) e não atingir o “joelho” (extremidade esquerda da curva TTT) evitando a transformação da austenita em perlita ou bainita, pois esse processo visa a obtenção da microestrutura metaestável martensita assumindo uma aparência de placas ou agulhas, representado pela Figura 5. Porém,

fatores como a composição química do material, o meio de têmpera e a espessura do material influenciam diretamente para que toda a microestrutura austenita se transforme em martensita (CHIAVERINI, 2008; RASMA, 2015).

Figura 5: Aspecto da micrografia do aço SAE 4140 típica de uma estrutura martensítica após têmpera.

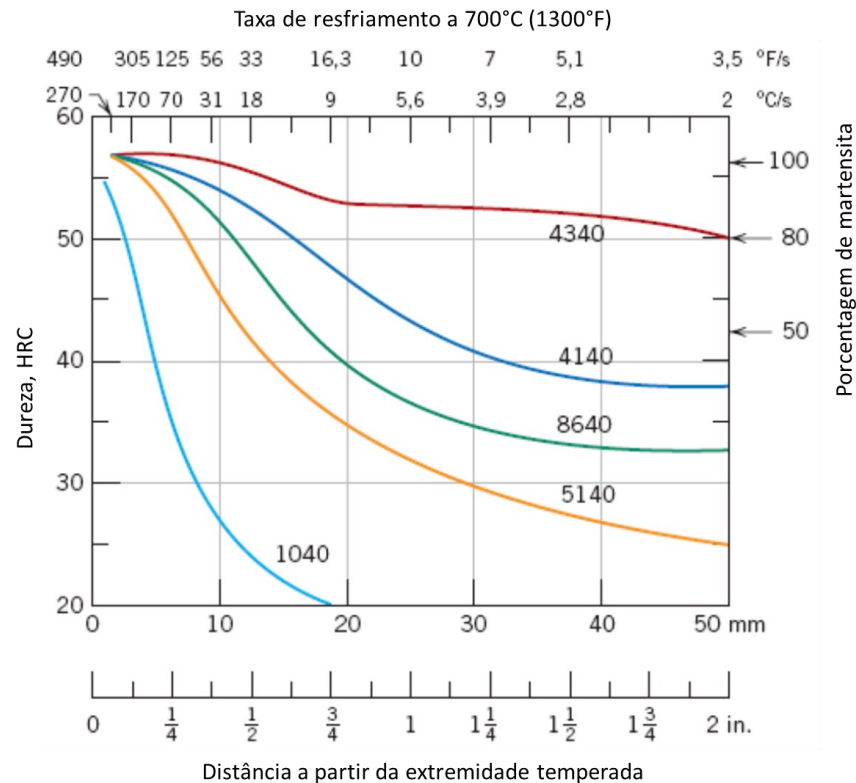


Fonte: Adaptado Mayrhofer (2019)

A espessura do material exerce uma influência direta sobre a têmpera, dado que a velocidade de resfriamento será mais baixa na região central da peça. Por isso, é essencial avaliar a capacidade do metal em ser temperado até uma determinada profundidade, tornando de extrema importância estudar a temperabilidade do material relacionando a composição química, porcentagem de martensita formada e profundidade temperada, conforme a Figura 6 representa (CALLISTER, 2020).

Assim como a espessura do material e a composição química, o meio de têmpera influencia diretamente a taxa de resfriamento, no qual tem a função de remover calor do material. Entre os meios de têmpera mais comuns, a salmoura produz o resfriamento mais severo, seguida da água, solução polimérica, óleo e ar forçado. A severidade da têmpera é um termo utilizado para indicar a taxa de resfriamento, sendo que quanto mais rápido é o resfriamento, mais severa é a têmpera. O grau de agitação de cada meio é um fator que também influencia a taxa de remoção de calor, pois a agitação remove as bolhas da superfície da peça e aumenta a taxa de resfriamento (CALLISTER, 2020).

Figura 6: Curvas de temperabilidade para diferentes aços.



Fonte: Callister (2020)

Com a formação da microestrutura martensítica pelo processo de têmpera, há um aumento significativo na dureza do material, na resistência mecânica, resistência ao desgaste, porém há uma diminuição na tenacidade e ductilidade do material proveniente do resfriamento brusco, gerando um estado de altas tensões na microestrutura. Esse estado de altas tensões causa uma fragilidade no componente que não pode ser empregada na maioria das aplicações, sendo necessário o tratamento térmico de revenimento (CALLISTER, 2020; RASMA, 2015).

4.2.2 Revenimento

Para aliviar as tensões impostas no processo de têmpera, é normalmente feito o tratamento térmico de revenimento, que consiste no aquecimento da peça temperada abaixo da temperatura de austenitização para haver um alívio de tensões e adequação das propriedades, como aumento na tenacidade e redução na dureza (COLPAERT, 2008).

No revenimento, a microestrutura martensítica perde o excesso de carbono em solução e seu reticulado cristalino se torna mais próximo da estrutura cristalina cúbica, denominada de martensita revenida, sem haver distorções e nem acúmulo de tensões, como pode ser observado na Figura 7, mostrando ser mais refinada (menores agulhas) quando comparada com à Figura 5 (AÇOS GERDAU, 2019).

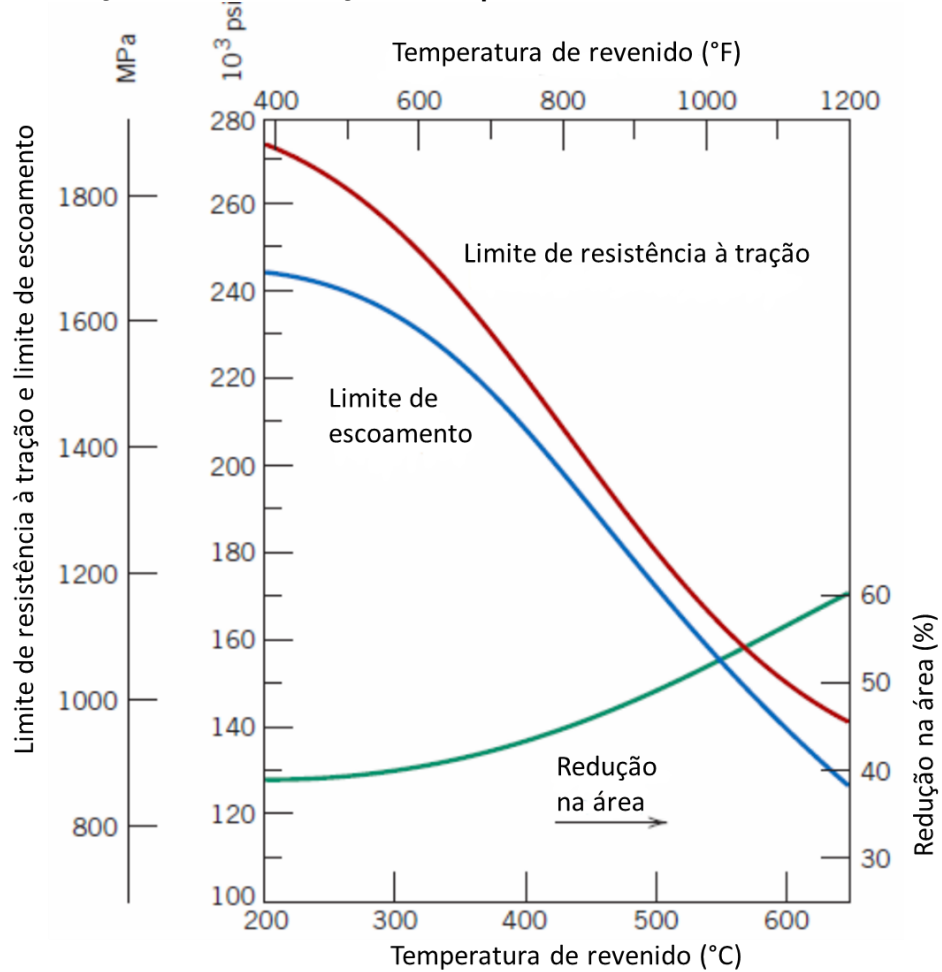
Figura 7: Aspecto de uma estrutura típica do aço SAE 4140 de martensita revenida após têmpera e revenimento.



Fonte: Mayrhofer (2019)

Esse tratamento é geralmente feito na temperatura entre 100°C e 720°C, sendo que a temperatura de revenimento é diretamente ligada às propriedades mecânicas que deseja obter, onde, quanto maior a temperatura de revenimento, maior é o aumento na tenacidade, menor a dureza, limite de resistência à tração e limite de escoamento como apresentado na Figura 8, porém, ao elevar a temperatura acima da temperatura de austenitização do material, pode-se perder todo o processo de têmpera realizado (CHIAVERINI, 2008).

Figura 8: Gráfico representando o limite de resistência à tração, limite de escoamento e redução na área em função da temperatura de revenimento.



Fonte: Callister (2020)

As temperaturas aplicadas durante o processo podem ser categorizadas em intervalos de temperatura. Durante o tratamento de revenimento realizado até cerca de 100°C, ocorre uma redistribuição dos átomos de carbono. No intervalo entre 150 e 230°C, ocorre a formação de carbonetos na estrutura, resultando na obtenção de martensita revenida com uma dureza aproximada de 60 HRC. Acima de 300°C, inicia-se o processo de recuperação e recristalização da martensita, combinado com o crescimento e esferoidização das partículas de cementita. Entre 400 e 500°C, os carbonetos que se formaram começam a crescer e se tornam visíveis sob o microscópio. A estrutura formada nesse intervalo de temperatura é conhecida como sorbita, apresentando uma faixa de dureza entre 20 e 45 HRC. Já para os materiais submetidos ao tratamento de revenimento na faixa de temperatura de 650 a 738°C,

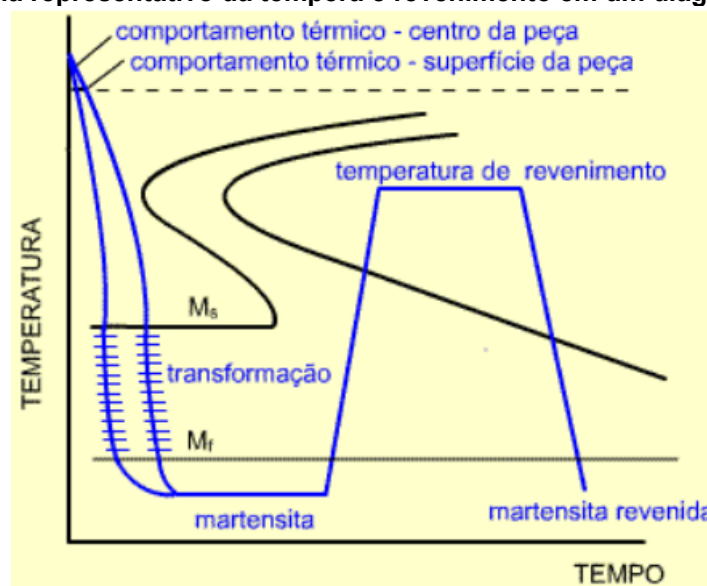
os carbonetos assumem uma forma esferoidal, sendo denominada esferoidita, com dureza inferior a 20 HRC (CALLISTER, 2020; COLPAERT, 2008).

Porém, no processo de revenimento é possível que em aços ligas ocorra uma fragilização do material, conhecido como fragilização ao revenido ou fragilidade ao revenimento. Esse fenômeno envolve a perda progressiva da tenacidade dos materiais quando expostos a condições de aquecimento isotérmico ou resfriamento lento dentro da faixa de temperatura entre 270 e 550°C (ADACHI, 2011).

Esse problema não é comum em aços carbono, mas sim em aços ligados, que contêm outros elementos de ligas. A fragilização ao revenido é influenciada pelos elementos de liga presentes no material e pode variar conforme a composição específica da liga, pois ocorre devido a mudanças microestruturais do material durante o aquecimento prolongado ou o resfriamento lento dentro dessa faixa de temperatura crítica. Essas mudanças podem incluir a formação de precipitados de elementos de liga e/ou segregação de carbonetos. Essa fragilização pode resultar em uma redução significativa da tenacidade e da resistência aos impactos dos materiais, tornando-os mais suscetíveis a fraturas em condições de serviço (ADACHI, 2011).

A Figura 9, representa um esquema do diagrama TTT para formação da martensita revenida, onde há um resfriamento abrupto obtendo a martensita e depois um revenimento abaixo da temperatura de austenitização do material para aliviar as tensões ocasionadas pela têmpera, resultando na martensita revenida.

Figura 9: Diagrama representativo da têmpera e revenimento em um diagrama TTT.



Fonte: CIMM (2023)

4.4 Descarbonetação

A descarbonetação é um fenômeno que pode ocorrer durante o tratamento térmico de aços. Esse processo envolve a perda de carbono na superfície do material, e está diretamente relacionado à microestrutura do material, afetando, conseqüentemente, suas propriedades. Uma das principais conseqüências da descarbonetação é a perda de dureza superficial no material (PIMENTA, 2012).

A descarbonetação pode ocorrer devido a diversas situações, sendo influenciada por características específicas do tratamento térmico. A perda de carbono na superfície do material está associada a fatores como a temperatura, tempo de tratamento, a atmosfera do forno, o teor de carbono e a presença de elementos de liga no aço (PIMENTA, 2012).

4.5 Reprocessamento

Por ser o tratamento térmico uma etapa crítica, onde os materiais são aquecidos e resfriados em condições controladas para melhorar suas propriedades mecânicas, o reprocessamento pode levar a diversos problemas como:

- **Variações nas propriedades mecânicas:** O retrabalho pode levar a variações nas propriedades mecânicas dos materiais, resultando em peças que não atendem as especificações, podendo comprometer seu desempenho no uso da peça
- **Deformações e distorções:** Como os processos de tratamento térmico envolvem aquecimento e resfriamento, os materiais podem sofrer mudanças dimensionais devido à expansão e contração térmica, podendo ser crítico em aplicações onde a precisão dimensional é essencial.
- **Custos adicionais:** O retrabalho aumenta os custos de produção devido à necessidade de tempo e recursos extras, podendo atrasar os prazos de produção e afetar o cronograma de produção de outros materiais que poderiam estar sendo processados e afetar a entrega para o cliente.

- **Impacto ambiental:** Como o retrabalho necessita de mais energia e recursos para realizar o processamento, há um impacto negativo no meio ambiente, aliado com o elevado consumo de energia pelas altas temperaturas exigidas pelos tratamentos térmicos.

De acordo com XIONG *et al.* (2012), realizando a têmpera e revenimento duas vezes, o tamanho dos grãos tendem a crescer utilizando a mesma temperatura para os dois processamentos, podendo resultar em valores médios de precipitados maiores do que em um material temperado e revenido somente uma vez. Com esse crescimento dos grãos, os ensaios de tração realizados por XIONG *et al.* (2012), causaram diminuição no limite de escoamento e no limite de resistência à tração, mas o alongamento e a redução de área foram similares quando comparados ao material que foi processado somente uma vez.

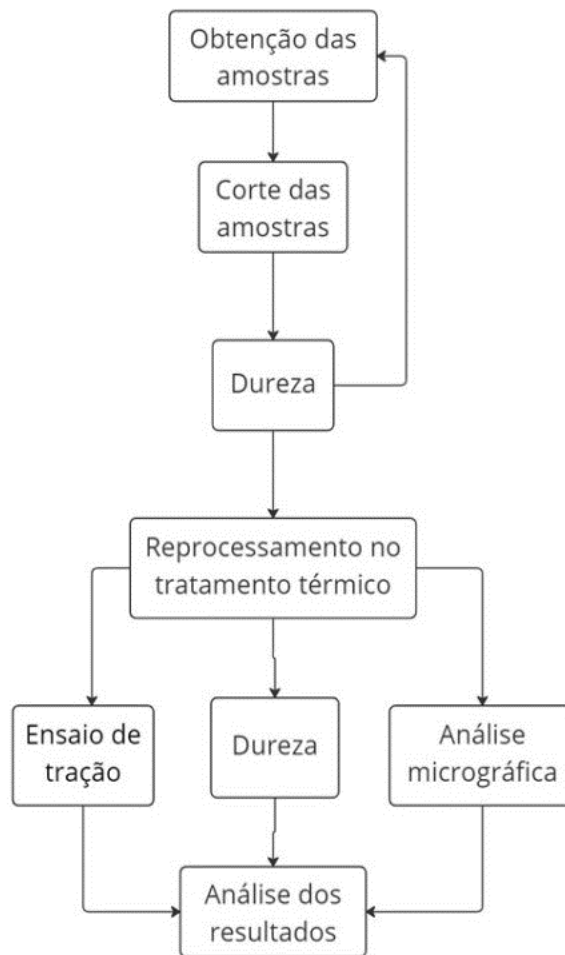
Para que os resultados do presente trabalho (amostras reprocessadas) possam ser considerados bem-sucedidos, há a necessidade das amostras reprocessadas no tratamento térmico estejam dentro do intervalo das propriedades de dureza e de resistência mecânica conforme ISO 898 – 1/2013 que estão na Tabela 4.

Além das propriedades mecânicas, é necessário que após o reprocessamento do material, a análise micrográfica revele uma microestrutura de martensita revenida semelhante à microestrutura da Figura 7.

5 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia utilizada para o presente trabalho foi realizada conforme o fluxograma apresentado na Figura 10.

Figura 10: Fluxograma da execução da metodologia experimental



Fonte: Autoria própria (2023)

5.1 Materiais

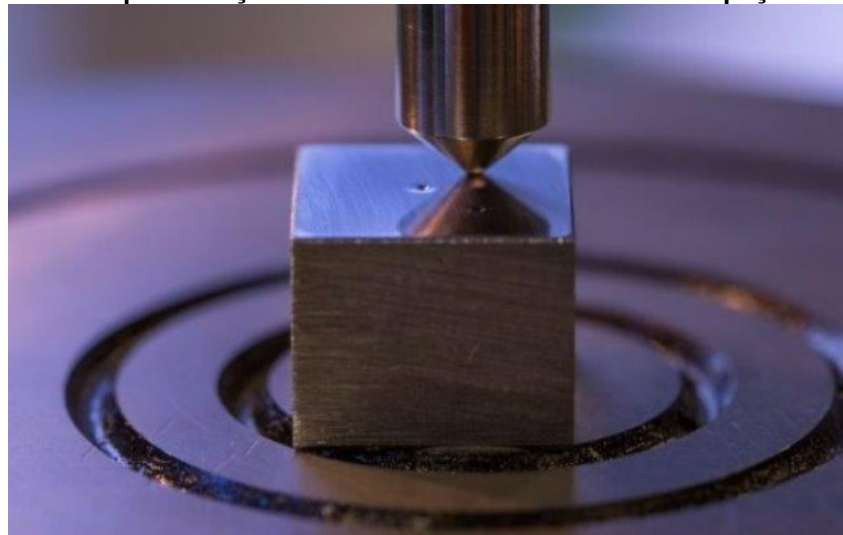
Os materiais utilizados nesse presente trabalho foram grampos de fixação para feixe de molas em formato “U” de material SAE 4140 com espessura de 22,13 mm.

5.2 Métodos

Para a execução do reprocessamento, foram selecionadas algumas peças supostamente não conformes por não terem alcançadas as propriedades mecânicas especificadas do tratamento térmico e realizado um ensaio de dureza para comprovar se realmente as peças atingiram ou não as propriedades mecânicas especificadas.

Assim, para a execução do trabalho, foram selecionados 10 grampos de fixação supostamente não conformes, onde todos foram cortados na seção transversal em uma cortadora de metais da fabricante Teclago com objetivo de retirar uma amostra da peça para fazer o ensaio de dureza no durômetro Rockwell modelo NR da série 79/607. O ensaio de dureza foi realizado na superfície e no núcleo, sendo que no núcleo a amostra foi colocado com a seção transversal perpendicular ao indentador do durômetro, conforme a Figura 11 ilustra.

Figura 11: Representação do ensaio de dureza no núcleo da peça.



Fonte: Labteste (2023)

As amostras que não ficaram dentro do intervalo especificado no ensaio de dureza, foram identificadas e segregadas para realização de um novo ciclo de tratamento térmico

Esse novo ciclo de tratamento térmico, denominado de reprocessamento, foi realizado nas mesmas condições em que deveria ter ocorrido o primeiro ciclo. As condições foram: temperatura de austenitização de 860 °C com tolerância de $\pm 10^\circ\text{C}$ em forno contínuo de esteira fabricado pela BRASIMET com tempo de aquecimento entre 50 – 60 minutos, seguido de resfriamento em óleo com temperatura máxima de 100 °C. Para o forno de revenimento a temperatura foi de 560 °C com tolerância de $\pm 10^\circ\text{C}$, mantido no forno entre 50 - 60 minutos seguido de resfriamento lento e contínuo.

Após esse reprocessamento no material, os grampos foram cortados na cortadora de metais e nestas amostras foram realizados ensaios de dureza próximo do local feito o primeiro ensaio de dureza, com distâncias superiores a 5 vezes o diâmetro da indentação, de acordo com a norma ABNT NBR ISO 6508 - 1.

Em 5 destas amostras em que foram realizados os ensaios de dureza, também foram preparados corpos de prova para avaliação metalográfica da microestrutura das amostras. As preparações metalográficas foram realizadas empregando-se lixas d'água com granulometria crescentes: 120, 220, 320, 400, 800, 1200 e 2000 em uma politriz da fabricante Teclago. O polimento final foi feito com solução de alumina com granulometria de 1 μm e 0,3 μm . Na sequência foi realizado o ataque químico por imersão em reagente químico com uma solução de nital 3% por aproximadamente 7 segundos para melhor revelação da microestrutura que foi observada utilizando um microscópio óptico da marca Olympus modelo BX51M.

Para realizar o ensaio de tração, foram selecionadas 5 amostras dentre as 10 reprocessadas e realizado em laboratório externo com acreditação reconhecida pelo INMETRO, visando obter resultados do LE, LRT, alongamento e redução de área. Os corpos de provas foram preparados conforme a norma DIN EN ISO 6892-1:2020, com um diâmetro inicial de 10 mm e o comprimento da seção útil inicial de 50 mm.

Por fim, os resultados de todos os ensaios foram analisados para certificar se o reprocessamento realizado nos grampos de fixação foi satisfatório para atingir o intervalo exigido para este tipo de peça.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1 Dureza

Para os ensaios de dureza, foram segregados e analisados 10 grampos de fixação do lote de produção que estavam supostamente não revenidos, fora do intervalo especificado devido a problemas na esteira do forno. A Tabela 4 especifica as propriedades mecânicas que os grampos de fixação devem possuir conforme ISO 898-1/2013 e os resultados obtidos foram listados na Tabela 5, onde apresentam valores de dureza mínima e máxima encontrada no núcleo e na superfície na escala Rockwell C (HRC) de dureza.

Tabela 4: Propriedades mecânicas de grampos de fixação classe 10.9.

Propriedades mecânicas	Dureza (HRC)	Limite de escoamento (MPa)	Limite de resistência à tração (MPa)	Alongamento (%)	Redução de área (%)
Especificação	32 - 39	Mínimo 940	Mínimo 1040	Mínimo 9	Mínimo 48

Fonte: Adaptado de ISO 898-1 (2013).

Tabela 5: Durezas dos grampos não revenidos.

Amostra	Núcleo mínimo (HRC)	Núcleo máximo (HRC)	Superfície mínimo (HRC)	Superfície máximo (HRC)
1	54	55	50	51
2	53	55	51	53
3	53	54	51	51
4	53	54	50	52
5	53	54	51	52
6	54	54	53	53
7	53	54	52	52
8	54	55	51	52
9	53	55	51	52
10	53	53	50	51

Fonte: Autoria própria (2023)

Comparando a Tabela 5 dos valores obtidos nos ensaios de dureza com a Tabela 4, observou-se que a dureza obtida ultrapassou o limite especificado pela norma ISO 898-1/2013, sendo necessário o reprocessamento.

Apesar da dureza apresentar valores de material temperado e não revenidos, (como mostra a Figura 6) foi realizado o reprocessamento na têmpera e revenimento para verificar qual o impacto nas propriedades mecânicas dos grampos de fixação.

Após o reprocessamento integral (têmpera e revenimento), foi realizado ensaio de dureza próximo do local feito anteriormente e apresentados na Tabela 6, onde mostram valores de dureza mínima e máxima encontrada no núcleo e na superfície.

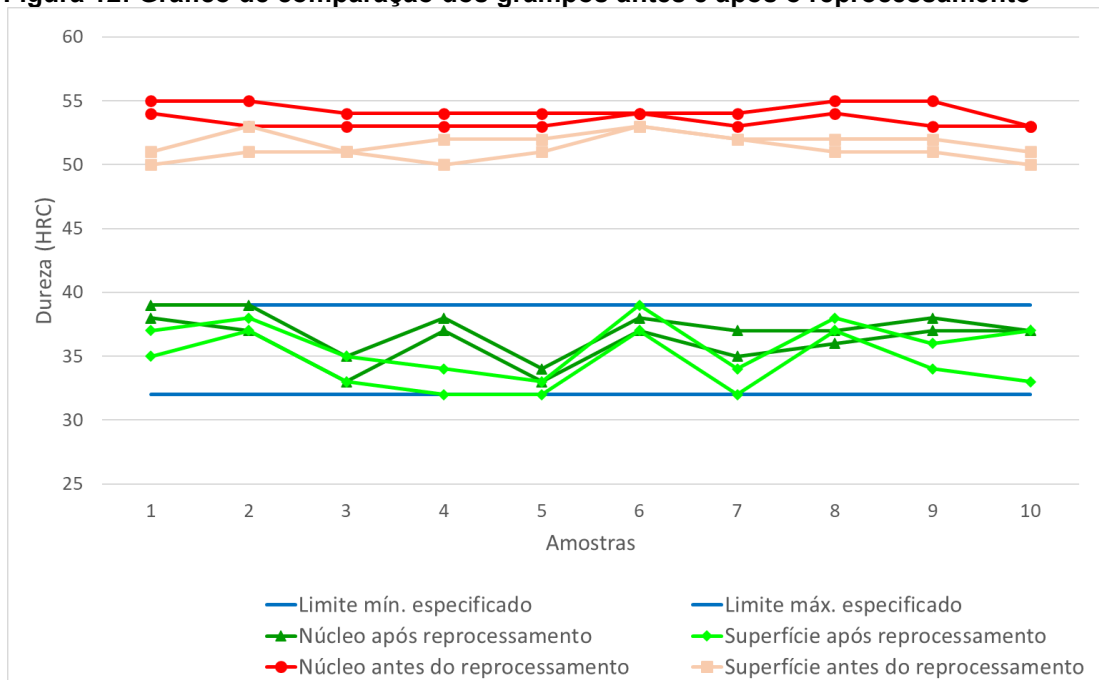
Tabela 6: Durezas dos grampos após o reprocessamento de têmpera e revenimento

Amostra	Núcleo mínimo (HRC)	Núcleo máximo (HRC)	Superfície mínimo (HRC)	Superfície máximo (HRC)
1	38	39	35	37
2	37	39	37	38
3	33	35	33	35
4	37	38	32	34
5	33	34	32	33
6	37	38	37	39
7	35	37	32	34
8	36	37	37	38
9	37	38	34	36
10	37	37	33	37

Fonte: Autoria própria (2023)

Os resultados dos ensaios de dureza após o reprocessamento do tratamento térmico foram satisfatórios e apresentaram valores dentro do intervalo de especificação exigidos pela norma ISO 898 – 1/2013 onde a Figura 12 demonstra, em que a classe 10.9 deve ter uma dureza tanto superficial como no núcleo entre 32 e 39 HRC. Apesar das amostras 4, 5 e 7 apresentarem dureza no limite mínimo na superfície e as amostras 1 e 2 apresentarem dureza no limite máximo no núcleo, estão dentro da especificação exigida.

Figura 12: Gráfico de comparação dos grampos antes e após o reprocessamento



Fonte: Autoria própria (2023)

Nesse lote de peças segregadas, foram separadas 10 amostras para realizar o ensaio de dureza, onde o lote total era de aproximadamente 50 peças, representando cerca de 20% dos grampos ensaiados afim de obter uma maior garantia dos resultados apresentados.

6.2 Ensaio de tração

O ensaio de tração foi realizado em 5 peças reprocessadas escolhidas aleatoriamente e dentro do especificado entre 32 e 39 HRC, conforme ISO 898 - 1/2013. Neste ensaio, foi avaliado o LE, LRT, alongamento e a redução de área nas 5 amostras selecionadas, onde os resultados estão dispostos na Tabela 7 e 8.

Tabela 7: Resultados do LE e do LRT no ensaio de tração.

	Limite de escoamento (MPa) (mín 940 MPa)	Limite de resistência (MPa) (mín 1040 MPa)	Aprovado	Reprovado
Amostra 2	1118	1196	X	
Amostra 5	1145	1220	X	
Amostra 7	1131	1212	X	
Amostra 8	1137	1221	X	
Amostra 10	1133	1218	X	

Fonte: Autoria própria (2023)

Tabela 8: Resultados do alongamento e da redução de área no ensaio de tração.

	Alongamento (%) (mín 9%)	Redução de área (%) (mín 48%)	Aprovado	Reprovado
Amostra 2	14,6	60,3	X	
Amostra 5	13,4	59	X	
Amostra 7	14,4	61,6	X	
Amostra 8	13,8	60,3	X	
Amostra 10	14	57,8	X	

Fonte: Autoria própria (2023)

As amostras selecionadas foram: 2, 5, 7, 8 e 10 para a realização do ensaio de tração e os resultados foram satisfatórios onde nenhuma amostra apresentou valores fora do especificado pela norma ISO 898-1/2013 para a classe mecânica 10.9.

Os valores apresentaram estabilidade entre eles, não havendo diferenças significativas nos resultados entre os parâmetros analisados, podendo afirmar que os parâmetros dos tratamentos térmicos como tempo, temperatura e velocidade de resfriamento foram controlados durante o reprocessamento

Apesar do reprocessamento envolver um novo aquecimento no material, havendo a possibilidade de aumentar seus grãos e diminuir os contornos dos grãos, a amostra que apresentou o menor LE obteve uma margem de aproximadamente 19% do valor mínimo requerido e no LRT um valor de aproximadamente 15% do valor mínimo requerido, sendo possível afirmar que as propriedades mecânicas não foram significativamente influenciadas pelo possível aumento de grão causado pelo aquecimento dos grampos de fixação reprocessados.

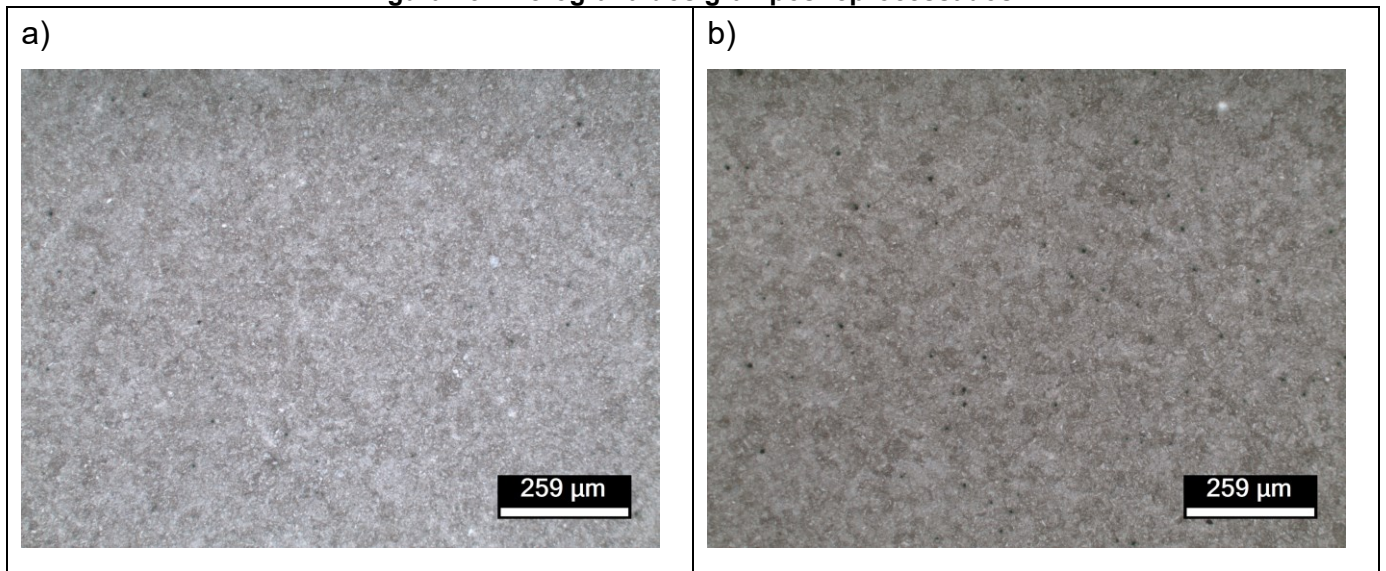
No alongamento mostrado na Tabela 8, a amostra que obteve o menor valor foi a amostra 5 com um comprimento final de 56,7 mm e o maior valor foi a amostra 2 com comprimento final de 57,3 mm, podendo notar que os valores dentre as 5 amostras ficaram bem próximos com diferença do valor mínimo para o valor máximo de comprimento final de apenas 0,6 mm.

Na redução de área observado na Tabela 8, a amostra com menor valor foi a amostra 10 com diâmetro final de 6,5 mm, e o maior valor de redução de área foi da amostra 7 porém, com um valor de diâmetro de 6,2 mm, verificando que os valores de diâmetro final resultaram em valores próximos entre as amostras ensaiadas, havendo uma estabilidade entre as amostras analisadas no alongamento e na redução de área.

6.3 Metalografia

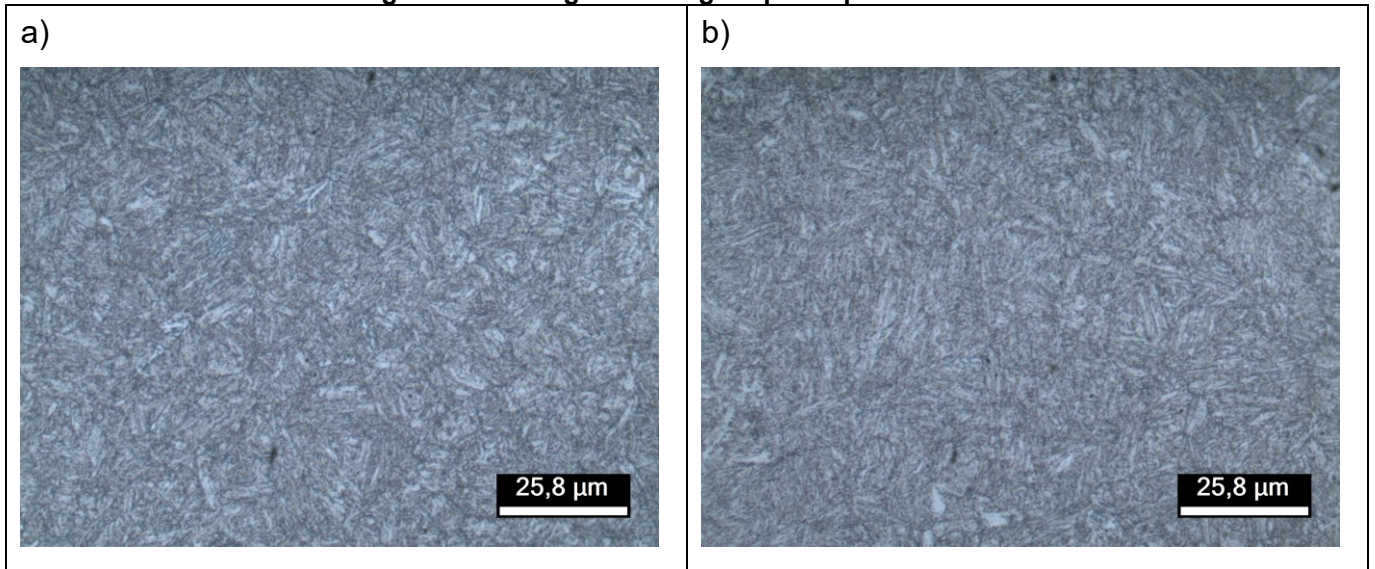
Foram realizadas análises micrográficas nas amostras após os ensaios de durezas, com o objetivo de revelar a microestrutura e verificar se houve a formação de martensita revenida durante o tratamento térmico. Essas amostras foram analisadas com lente de aumento de 100x, 500x e 1000x em um microscópio óptico, porém observou-se maior aproveitamento nas imagens obtidas com as lentes de aumento de 100x e 1000x onde as imagens obtidas estão dispostas nas Figura 13 e 14 conforme mostradas a seguir.

Figura 13: Micrografia dos grampos reprocessados.



Fonte: Autoria própria (2023)

Na Figura 13, com aumento de 100x, pode-se observar que a microestrutura formada possui uma homogeneidade, não havendo diferenças significativas nas amostras analisadas, podendo afirmar que os grampos de fixação possuíram controle nos parâmetros durante o tratamento térmico

Figura 14: Micrografia dos grampos reprocessados.

Fonte: Autoria própria (2023)

Na Figura 14, com aumento de 1000x, é possível verificar a formação de martensita revenida representada pela tonalidade mais escura com uma morfologia acicular semelhante a agulhas com uma microestrutura refinada, sendo uma característica obtida após o tratamento térmico de têmpera e revenimento.

Analisando as micrografias obtidas das Figuras 13 e 14 com aumento de 100x e 1000x, foi possível observar que após o reprocessamento de têmpera e revenimento, foi formado a microestrutura desejada, martensita revenida com a morfologia de agulhas, havendo uma homogeneidade em todas imagens analisadas e uniformidade nos grãos, não havendo indícios de transformações indesejadas para a microestrutura de perlita ou bainita, onde há uma grande semelhança com a microestrutura da Figura 7.

7 CONCLUSÃO

A partir dos objetivos delineados e dos resultados dos ensaios realizados, é possível apresentar as seguintes conclusões para o presente trabalho:

- As propriedades mecânicas dos grampos de fixação, como dureza, limite de escoamento, limite de resistência à tração, alongamento e redução de área mostraram-se satisfatórias. Esses parâmetros atenderam ou excederam os valores mínimos especificados pela norma ISO 898-1/2013.

- A microestrutura obtida após o reprocessamento foi satisfatória, alcançando a martensita revenida, atendendo o tratamento térmico de têmpera e revenimento.

- A análise demonstra que o reprocessamento dos grampos de fixação é uma alternativa de reaproveitamento especialmente para aqueles que tiveram seu primeiro ciclo de tratamento térmico interrompido por situações não programadas.

- A reutilização dos grampos após reprocessamento pode representar uma possibilidade de redução de custos em comparação com a fabricação de novos grampos, desde que mantidas as propriedades mecânicas especificadas.

REFERÊNCIAS

ADACHI, C. Estudo da Fragilização ao Revenido do Aço 2,25Cr-1Mo através do Ensaio de Indentação Instrumentada. 2011. 62 f. Trabalho de Graduação (Graduação em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2011.

ARCELOR MITTAL. **Guia do aço**. 2019. Disponível em: <https://brasil.arcelormittal.com/pdf/produtos-solucoes/catalogos/catalogo-guia-aco.pdf?asCatalogo=pdf>. Acesso em: 15 de set 2022.

ASM International. The Materials Information Company (1991). **Metals Handbook, Volume 04 – Heat Treating**.

CALLISTER, William D. **Ciência e Engenharia de Materiais - Uma Introdução**. Rio de Janeiro - RJ: Grupo GEN, 2020.

CANDIDO, M.G. **Estudo comparativo da temperabilidade entre os aços AISI: 1045, 4340, H13 e D6**. Trabalho de conclusão de curso em Engenharia de Materiais - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Londrina, PR, 2021.

CHAPLIN, Charles. **Vida e Pensamentos**. Editora Martin Claret. 1997.

CHIAVERINI, V. **Tratamento térmico de ligas metálicas**. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais - ABM, 2008.

CIMM. Princípios: Tratamento de Têmpera e suas variações – Têmpera, austêmpera, martêmpera. Disponível em: https://www.cimm.com.br/portal/material_didatico/6443-principios-tratamento-de-tempera-e-suas-variacoes-tempera-austempera-martempera. Acesso em 03 de out 2023.

COLPAERT, H. **Metallography of Steels**. Materials Park: ASM International, 2018.

GERDAU. **Tratamento térmico**. 2019. Disponível em: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/3975596/mod_resource/content/3/Aula%20-%20Tratamentos%20T%C3%A9rmicos.pdf. Acesso em 04 de set 2022.

GUERRA, M.V.R. **Desenvolvimento e Análise de um Projeto de Feixe de Molas**. Trabalho de conclusão de curso em Engenharia Automotiva – Universidade de Brasília. Brasília, DF, 2016.

ISO, International Organization for Standardization. 898-1. **Mechanical properties of fasteners made of carbon steel and alloy steel**. 2013.

ISO, International Organization for Standardization. 6892-1. **Metallic Materials: Tensile Testing**. 2020.

LABTESTE Laboratório Metalúrgico. Ensaio de dureza Rockwell. Disponível em: <https://www.labteste.com.br/ensaio-dureza-rockwell>. Acesso em: 01 de dez 2023.

LÚCIO, J. G. **Estudo do processo de dobramento a frio de grampo para feixe de mola**. 176p. Dissertação de Mestrado – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.

MAYRHOFER, A. **Comportamento tribológico do aço SAE 4140 temperado e revenido**. Dissertação de mestrado em engenharia mecânica – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, RS. 2019.

MOLAS EL SHADAI. Posto de molas. Disponível em: <https://www.molaselshadai.com.br/86-servico-posto-de-molas-parauapebas-pa>. Acesso em: 10 de out 2022.

PIMENTA, C. D.; SILVA, M. B.; RIBEIRO, R. B.; CLARO, F. A. E. Método Taguchi aplicado na identificação dos fatores causadores da descarbonetação do arame de aço SAE 51B35, durante tratamento térmico de esferoidização. **GEPROS. Gestão da Produção, Operações e Sistemas**. 2012. p. 97-108.

RASMA, Eline T. **Caracterização estrutural e mecânica do aço AISI/AE 4140 tratado sob diferentes tratamentos térmicos**. Tese. 2015. UENF. Campos dos Goytacazes. 2015.

SILVA, A.M.M. **Análise virtual comparativa entre suspensão mecânica e pneumática utilizada em semirreboque**. Trabalho de conclusão de curso em Engenharia Mecânica – Universidade de Caxias do Sul. Caxias do Sul, RS. 2014.

SILVA, H.R. da. **EFEITO DO TAMANHO DE GRÃO ULTRAFINO NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DO AÇO Nb-Ti LAMINADO A MORNO SEGUIDO DE RECOZIMENTO INTERCRÍTICO E SUBCRÍTICO**. Dissertação de mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 2007.

SILVA, W.S. **Transporte rodoviário**. 2014. Disponível em: <https://www.infoescola.com/geografia/transporte-rodoviario/>. Acesso em: 20 de set 2022.

VELLING, A. **What is Heat Treatment? Methods & Benefits**. Fractory, 2020. Disponível em: <https://fractory.com/heat-treatment-methods/>. Acesso em: 14 de out 2022.

VENTURA, J.M. **Desenvolvimento de aços para conformação a frio de elemento de fixação do feixe de molas**. Dissertação de mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, Brasil. São Carlos, 2006.

XIONG, X et al. Effect of twice quenching and tempering on the mechanical properties and microstructures of SCRAM steel for fusion application. **Journal of Nuclear Materials**. 430, p.114 – 118. 2012. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0022311512003571>. Acesso em: 25 de out 2022.