

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

PEDRO MENEZES LEAL

**INFLUÊNCIA DO CICLO DE REVENIMENTO NA TENACIDADE DE UM AÇO
INOXIDÁVEL MARTENSÍTICO**

SÃO CARLOS
2021

PEDRO MENEZES LEAL

**INFLUÊNCIA DO CICLO DE REVENIMENTO NA TENACIDADE DE UM AÇO
INOXIDÁVEL MARTENSÍTICO**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Materiais e Manufatura, da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro de Materiais.

Orientadora: Prof.^a Dra. Luralice de Campos Franceschini Canale

São Carlos
2021

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes da
EESC/USP com os dados inseridos pelo(a) autor(a).

L433i Leal, Pedro Menezes
Influência do ciclo de revenimento na tenacidade
de um aço inoxidável martensítico / Pedro Menezes Leal;
orientadora Louralice de Campos Franceschini Canale.
São Carlos, 2021.

Monografia (Graduação em Engenharia de Materiais
e Manufatura) -- Escola de Engenharia de São Carlos da
Universidade de São Paulo, 2021.

1. Têmpera e revenimento. 2. Fragilidade do
revenido. 3. Aço inoxidável martensítico. I. Título.

Eduardo Graziosi Silva - CRB - 8/8907

FOLHA DE APROVAÇÃO

Candidato / Student: Pedro Menezes Leal
Título do TCC / Title: INFLUÊNCIA DO CICLO DE REVENIMENTO NA TENACIDADE DE UM AÇO INOXIDÁVEL MARTENSÍTICO
Data de defesa / Date: 01/12/2021

Comissão Julgadora / Examining committee	Resultado / Result
Professora Titular Louralice de Campos Franceschini Canale (orientador)	Aprovado
Instituição / Affiliation: EESC - SMM	
Doutor Fábio Edson Mariani	Aprovado
Instituição / Affiliation: EESC - SEP	
Doutor Ramon Roberto Mendonça	Aprovado
Instituição / Affiliation: IFSP	

Presidente da Banca / Chair of the Examining Committee



Professora Titular Louralice de Campos Franceschini Canale

Aos meus pais, Luiz e Angela, e irmã, Jasmime, com muito amor, carinho e pelo apoio incondicional em todos os momentos difíceis da minha trajetória acadêmica. Este trabalho é dedicado a eles.

AGRADECIMENTOS

A Deus por ter me dado força e saúde durante a execução deste trabalho e durante a pandemia.

Ao meu pai Luiz, minha mãe Angela e irmã Iasmine, que mesmo de longe sempre se fizeram presentes e pelo apoio incondicional durante toda a minha trajetória.

A minha namorada Lídia, por todo o suporte e sempre acreditar no meu potencial.

A professora Doutora Lauralice De Campos Franceschini Canale, pela dedicação e auxílio na orientação, sem a qual não teria conseguido concluir está difícil etapa.

A ISOFLAMA, por acreditar no meu trabalho e auxílio em toda a execução dos processos aqui descritos.

A MIB, por ter aberto as portas na execução dos ensaios dos corpos de prova.

Aos meus amigos e colegas da República Bola Fora, pelo incentivo e por me acolherem como uma segunda família.

Dedico esta monografia a todos os meus amigos de curso, grandes companheiros de jornada, pelo excepcional apoio e incentivo que me deram durante o meu percurso.

À Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, pela oportunidade de realização do curso de Engenharia de Materiais e Manufatura.

RESUMO

LEAL, P.M. Influência do ciclo de revenimento na tenacidade de um aço inoxidável martensítico; 49f. Monografia (Trabalho de conclusão de curso) – Departamento de Engenharia de Materiais, Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2021.

O revenido nos aços temperados tem a função de melhorar a tenacidade e promover valores de dureza compatíveis com os requisitos de aplicação. Este trabalho tem como objetivo estudar a influência da temperatura e tempo de revenimento, afim de se obter a melhor tenacidade em um aço inox martensítico, tendo como premissa a obtenção de dureza mínima de 50 HRC. Para isso corpos de prova do aço M310 (~AISI 420) foram confeccionados e inseridos em 3 rotas distintas tendo como ponto em comum a temperatura de austenitização de 1030°C. Após a etapa de austenitização, os corpos de provas foram divididos em 3 grupos com diferentes parâmetros para a etapa de revenimento, sendo eles duplo revenimento a 500°C por 2h, duplo revenimento a 250°C por 2h e revenimento único a 250°C por 6h. Foram realizados ensaios mecânicos de dureza e de impacto Charpy, em conjunto com metalografias para análise dos resultados. Por meio da realização de ensaios de dureza, foi possível verificar o fenômeno de endurecimento secundário na rota de duplo revenimento a 500°C por 2h. Ao se realizar os ensaios de impacto para verificação das tenacidades obtidas, nas 3 rotas distintas de revenimento, os mesmos mostraram a melhor tenacidade ao impacto ao realizar o processo a 250°C e possivelmente o fenômeno de fragilidade do revenido na rota de duplo revenimento a 500°C.

Palavras-chave: Têmpera e revenimento, fragilidade do revenido, aço inoxidável martensítico.

ABSTRACT

LEAL, P.M. Influence of tempering cycle on the tenacity of a martensitic stainless steel; 49p. Monograph (Final Course Thesis) - Department of Materials Engineering, School of Engineering of São Carlos, University of São Paulo, São Carlos, 2021.

Tempering in hardened steels has the function of improving tenacity and promoting hardness values compatible with the application requirements. This work aims to study the influence of tempering temperature and time, in order to obtain the best tenacity in a martensitic stainless steel, with the premise of obtaining a minimum hardness of 50 HRC. For this purpose specimens of steel M310 (~AISI 420) were made and inserted in 3 different routes having as a common point the austenitizing temperature of 1030°C. After the austenitizing step, the specimens were divided into 3 groups with different parameters for the tempering step, which were double tempering at 500°C for 2h, double tempering at 250°C for 2h, and single tempering at 250°C for 6h. Mechanical tests of hardness and Charpy impact were performed, along with metallographs for analysis of the results. By performing hardness tests, it was possible to verify the phenomenon of secondary hardening in the double tempering route at 500°C for 2h. When performing the impact tests to verify the tenacity obtained in the 3 different tempering routes, they showed the best impact tenacity when performing the process at 250°C and possibly tempered embrittlement phenomena in the double tempering route at 500°C.

Keywords: Quenching and tempering, tempering embrittlement, martensitic stainless steel.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3-1 – Diagrama de Schaeffler.....	5
Figura 3-2 – Diagrama CCT para o aço M310.....	7
Figura 3-3 – Curvas de revenimento de uma aço baixa liga (SAE 4340) com queda contínua da dureza e de um aço ferramenta para trabalho a quente (AISI H13) apresentando o fenômeno do endurecimento secundário.	10
Figura 3-4 – Gráfico percentagem de austenita retida por porcentagem de carbono na austenita.....	11
Figura 4-1 – Corpos de prova usinados e cortados	12
Figura 4-2 – Especificações segundo a Norma E23-1, 2001.....	13
Figura 4-3 – Curva de revenimento para o aço M310.....	15
Figura 5-1: Microestrutura resultante do processo de revenimento único por 6h a 250°C. Presença de martensita revenida. Aumento de 100X.	18
Figura 5-2: Microestrutura resultante do processo de revenimento único por 6h a 250°C. Presença de martensita revenida. Aumento de 500X.	19
Figura 5-3: Microestrutura resultante do processo de duplo revenimento por 2h a 250°C. Presença de martensita revenida. Aumento de 100X.	19
Figura 5-4: Microestrutura resultante do processo de duplo revenimento por 2h a 250°C. Presença de martensita revenida. Aumento de 500X.	20
Figura 5-5: Microestrutura resultante do processo de duplo revenimento por 2h a 500°C. Presença de martensita revenida. Aumento de 100X.	20
Figura 5-6: Microestrutura resultante do processo de duplo revenimento por 2h a 500°C. Presença de martensita revenida. Aumento de 500X.	21
Figura 5-7 – Aspecto da fratura após ensaio Charpy, representativo de todas as condições de ensaio.	23

LISTA DE TABELAS

Tabela 3-1 - Classificação dos aços por fração de carbono e/ou elementos de liga.	3
Tabela 3-2 – Composição química do aço 420.....	5
Tabela 3-3 – Tabela contendo tipos de tratamentos térmicos e conceitos.	6
Tabela 4-1 – Composição química do aço M310.....	12
Tabela 4-2 – Relação temperatura x tempo em processo	14
Tabela 5-1 – Relação de corpos de prova por processo e seus respectivos resultados de dureza.....	17
Tabela 5-2 – Relação de corpos de prova por processo e seus respectivos resultados de energia de impacto. ...	22
Tabela 5-3 – Relação de corpos de prova por processo e seus respectivos resultados de energia de impacto. ..	24

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	1
2.	OBJETIVOS	2
3.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
3.1	Aço.....	3
3.2	Aços inoxidáveis	4
3.3	Tratamentos térmicos.....	6
3.3.1	Têmpera.....	7
3.3.2	Martensita.....	8
3.3.3	Martensita Revenida e o processo de Revenido.....	9
3.3.4	Fragilidade do Revenido	10
3.3.5	Duplo revenimento.....	11
4.	MATERIAIS E MÉTODOS	12
4.1	Composição química.....	12
4.2	Corpos de prova.....	12
4.3	Tratamentos térmicos.....	13
4.3.1	Têmpera.....	13
4.3.2	Revenimento	14
4.3.3	Ensaio de Dureza	15
4.3.4	Ensaio de impacto Charpy.....	15
4.3.5	Caracterização microestrutural	16
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	17
5.1	Ensaios de dureza	17
5.2	Metalografia	18
5.3	Ensaios de Impacto	21
6.	CONCLUSÃO	25
7.	TRABALHOS FUTUROS.....	26
8.	REFERÊNCIAS	27

1. INTRODUÇÃO

Os aços são mundialmente utilizados em diversos setores industriais se tornando um material praticamente vital para o avanço da humanidade. Tais componentes metálicos são principalmente fabricados com ligas a base de ferro, seja pela variedade de componentes que podem ser fabricados, aliado a um baixo custo, e também a grande possibilidade de adaptação dependendo dos pré-requisitos para aplicação *in-loco*. (SILVA, MEI, 2006).

Essa extensa gama de aplicações se explica pela possibilidade de se obter diferentes características com o uso de ciclos térmicos que modificam microestruturalmente o aço. Com a adição de elementos de liga, as possibilidades de se aliar diferentes propriedades mecânicas, químicas e físicas se ampliam, fornecendo então um material altamente modificável para as diferentes aplicações propostas. (SILVA, MEI, 2006).

Neste trabalho o aço escolhido foi um aço inoxidável martensítico, similar ao AISI 420. Ele é amplamente utilizado em componentes que necessitam de elevada resistência mecânica e corrosão, devido a sua grande amplitude de durezas que podem ser obtidas através do uso de tratamentos térmicos. Entre suas aplicações estão a área de energia, óleo & gás, válvulas, indústria química, cutelaria, biomateriais e mais especificamente o aço M310, deste estudo, na produção de moldes para injeção polimérica. (PINEDO, 2021).

2. OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo principal identificar e verificar a melhor rota de revenimento, tendo como pré-requisito uma dureza mínima de 50 HRC, para se obter a maior tenacidade ao impacto possível. Além disso, deseja-se também verificar a influência de um revenimento único, por maiores tempos em revenido.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Aço

Mundialmente, nas indústrias, devido a sua grande variedade e relativamente a baixo custo, o aço é introduzido nas mais variadas aplicações. Ainda que os avanços tecnológicos na obtenção de materiais alternativos tenham avançado, o fator econômico e os conhecimentos adquiridos ao longo de anos de estudos, na manipulação de sua composição e propriedades, reduzem tempo e trazem segurança para o uso continuo desse material.

“Aço é uma liga ferro-carbono contendo geralmente de 0,008% até aproximadamente 2,11% de carbono, além de certos elementos residuais, resultantes de processos de fabricação”. (CHIAVERINI, 2008).

Os aços podem ser classificados em função do teor de carbono e elementos de liga, conforme Tabela 3-1:

Tabela 3-1 - Classificação dos aços por fração de carbono e/ou elementos de liga.

Classificação		Fração (%)
Aço-carbono	Aços de baixo carbono	C < 0,19%
	Aços de médio carbono	0,2% < C < 0,49%
	Aços de alto carbono	C > 0,5%
Aço-liga	Aços de baixa-liga	Elemento de liga < 5,0%
	Aços de alta-liga	Elemento de liga > 5,0%

Contudo, a notação geralmente mais utilizada segue a classificação dadas pela “AISI – American Iron and Steel Institute” e/ou “SAE – Society of Automotive Engineers”, ambas levam em consideração a composição química do aço na classificação.

3.2 Aços inoxidáveis

Os aços de alta-liga enquadram os aços ferramenta e os aços inoxidáveis. Na família dos aços de alta liga, os que apresentam resistência a corrosão são classificados como aços inoxidáveis. Sua principal característica está interligada à sua resistência a corrosão atmosférica, conferida por elementos químicos metálicos, principalmente cromo (Cr) e níquel (Ni). A sua resistência a oxidação e corrosão está diretamente relacionada com a presença do cromo que tem como principal função a formação de uma fina película de óxido de cromo que protege o aço nos meios corrosivos usuais. (SILVA, MEI, 2006).

Os aços inoxidáveis são classificados em austeníticos, ferríticos, martensíticos e os duplex (austeno-ferríticos). Essa divisão se dá em função das microestruturas obtidas na temperatura ambiente, conforme presença em sua composição de elementos gamagênicos, alfagênicos e dos ciclos térmicos a eles impostos.

Assim têm-se:

Aços Inoxidáveis Martensíticos: possuem uma menor resistência a corrosão comparado com as outras classes de aços inoxidáveis, porém oferecem uma alta resistência mecânica e ao desgaste.

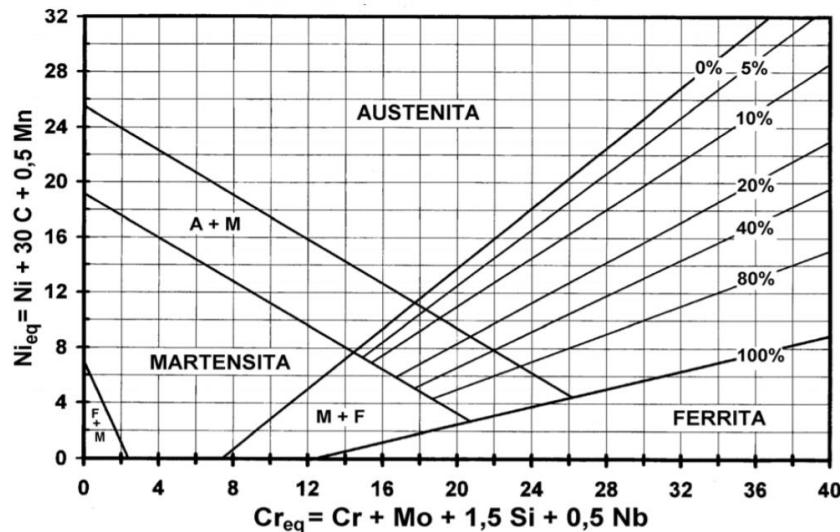
Aços Inoxidáveis Austeníticos: possuem uma elevada resistência a corrosão comparado a outras classes de aços inoxidáveis, sendo principalmente usados em aplicações que ocorrem soldas.

Aços Inoxidáveis Ferríticos: são formados basicamente de ligas Fe-Cr com baixo carbono. Possuem elevada resistência a corrosão e estampabilidade.

Para uma primeira avaliação do que se esperaria como microestrutura em função da composição química, normalmente se faz uso do diagrama de Schaeffler, Figura 3-1. O eixo x computa a influência dos elementos estabilizadores da ferrita, como cromo, molibdênio, silício e nióbio com seus respectivos pesos. Já o eixo y

congrega a influencia dos elementos de liga estabilizadores da austenita, como níquel, carbono e manganês.

Figura 3-1 – Diagrama de Schaeffler.



Fonte: LIPPOLD, KOTECKI (2005).

A classe de aço utilizado neste estudo centra-se em um aço inoxidável martensítico especial (M310) similar ao AISI 420. Sua principal diferenciação está principalmente no controle das quantidades e composição dos diferentes elementos químicos incluídos no aço, conferindo certa previsibilidade das propriedades a serem obtidas.

A Tabela 3-2 mostra a composição química deste aço 420.

Tabela 3-2 – Composição química do aço 420.

Designação	Elemento Químico	Quantidade (%)
AISI 420	Carbono (C)	min. 0,15
	Manganês (Mn)	máx. 1
	Fósforo (P)	máx. 0,040
	Enxofre (S)	máx. 0,030
	Silício (Si)	máx. 1
	Cromo (Cr)	entre 12-14
	Níquel (Ni)	máx. 0,75

No entanto, para que se tenha a formação da martensita é necessário que se submeta o aço ao tratamento térmico.

3.3 Tratamentos térmicos

Segundo (GABARDO, 2008) os tratamentos térmicos podem ser definidos como operações de aquecimento e resfriamento com o intuito de alterar as características de aços e ligas especiais, exemplo: dureza, tenacidade, resistência a tração, entre outros.

Para a obtenção dessas diferentes características, diversos tratamentos térmicos podem ser feitos com foco em sua aplicação.

Os processos mais utilizados são mostrados na Tabela 3-3:

Tabela 3-3 – Tabela contendo tipos de tratamentos térmicos e conceitos.

Tipo de Tratamento Térmico	Conceito
Recozimento	Aquecimento do aço a uma temperatura de austenitização seguida de um resfriamento lento. Tem como finalidade conferir uma menor dureza aliada a uma ductilidade alta. No caso do recozimento de recristalização, as temperaturas são bem mais baixas e o intuito é regenerar a estrutura encruada.
Normalização	Aquecimento do aço em temperatura acima da de recozimento seguida de um resfriamento lento, usualmente ao ar. Tem como objetivo principal obter uma estrutura que, normalmente, elimine estruturas de tratamentos realizados anteriormente, regenerando tamanho de grão.
Têmpera	Aquecimento do aço até região austenítica seguida de resfriamento rápido, gerando microestrutura que confere alta dureza e resistência mecânica ao aço.
Revenimento	Tratamento feito após a tempeira visando aliviar tensões e ajustar valores de dureza.

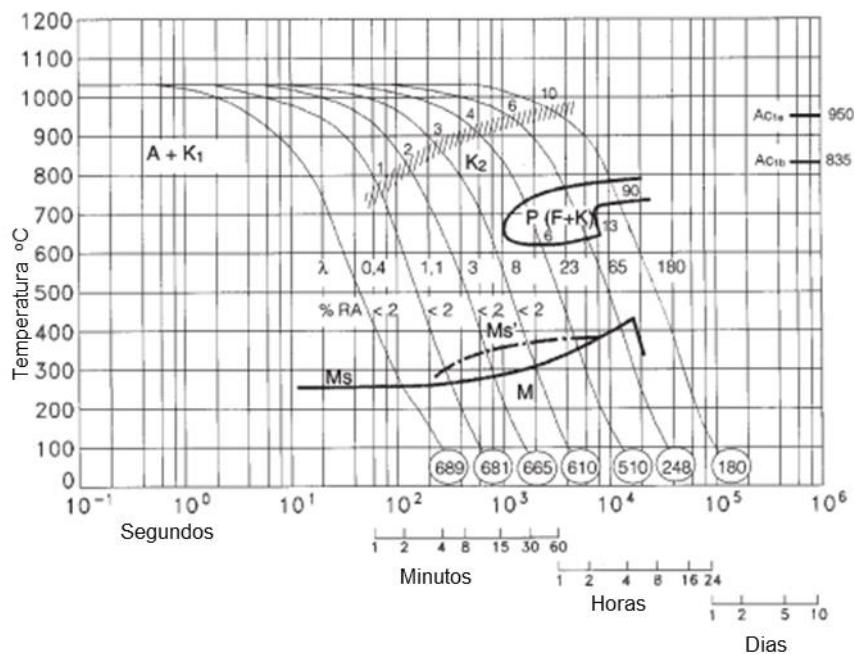
3.3.1 Têmpera

O tratamento térmico de têmpera é um processo que visa aumentar a dureza e resistência mecânica do aço. Consiste em basicamente três etapas: aquecimento do aço até a temperatura de austenitização, manutenção da temperatura para que o aço esteja uniformemente aquecido e um resfriamento brusco o suficiente para a formação da estrutura martensítica.

O resfriamento é a etapa de maior importância pois dependendo de sua severidade o aço pode sofrer distorções e trincas devido as transformações da austenita na martensita. Assim existem os mais diversos meios de resfriamento, entre eles: água, óleo, soluções de polímero e até N² sobre alta pressão.

A escolha do meio de resfriamento mais adequado é baseada no diagrama CCT (Continuous-Cooling Transformation) do aço em questão. Ele apresenta informações da sua temperabilidade e dos parâmetros de resfriamento para a obtenção da martensita.

Figura 3-2 – Diagrama CCT para o aço M310.



Fonte: Catálogo do fabricante (BOHLER).

3.3.2 Martensita

A martensita é uma estrutura monofásica, que ocorre fora do equilíbrio, resultante de uma transformação adifusional da austenita. Tal microconstituinte é resultante das ligas ferro-carbono austenitizadas ao serem submetidas a resfriamentos rápidos, sendo que na temperatura ambiente pode se apresentar junto a outros microconstituintes.

A transformação martensítica se caracteriza por um deslocamento de átomos em relação aos seus vizinhos, de maneira que a austenita (CFC) sofre uma transformação polimórfica de sua célula unitária em (TCC). Ou seja, diferentemente de fases como ferrita, perlita e cementita que ocorrem através da difusão de carbono, a martensita é formada por cisalhamento resultante do rearranjo dos átomos. Este processo de cisalhamento é o responsável por conferir a martensita a sua alta resistência mecânica, pois vem associado à grande número de discordâncias.

Por se tratar de uma solução solida supersaturada de carbono, ou seja, os átomos de carbono se situam como impurezas intersticiais na martensita, quaisquer aquecimentos a temperaturas relevantes, rapidamente dão início a transformações em outras estruturas por meio de difusão, como ocorre no revenimento.

A formação da martensita aparece de diferentes formas quando olhadas através do microscópio ótico. A morfologia da martensita pode se apresentar na forma de ripas, placas ou mista. Em aços que a porcentagem de carbono é inferior a 0,6% observa-se a formação de ripas, já para porcentagens acima de 1% têm-se a formação de placas e entre 0,6% e 1% há formação de uma mistura entre elas. A martensita em ripas, quando observada, apresenta uma aparência difusa e sem muitas distinções. Já ao observar a martensita em placas é possível ver as placas claramente individualizadas devido a essa estrutura não ser 100% martensítica, apresentando uma porcentagem de austenita retida. (KRAUSS, 1997).

3.3.3 Martensita Revenida e o processo de Revenido

Quando temperado, o aço martensítico, apresenta-se muito duro e frágil, além de que tensões internas geradas pelo processo podem levar ao aparecimento de trincas. Tais características podem ser aprimoradas por meio da utilização do processo de revenimento posterior a têmpera.

O tratamento térmico de revenimento permite a formação da martensita revenida. Neste processo, a difusão desencadeada pelas temperaturas utilizadas, permite a saída do carbono da martensita supersaturada de carbono (TCC) e transforma na martensita revenida, que é composta pelas fases de ferrita e cementita.

O revenimento consiste em aquecer uniformemente o aço em temperatura subcrítica, para que ajustes microestruturais sejam feitos e promovam o balanceamento das propriedades desejadas. Geralmente o revenimento é realizado em temperaturas entre 250°C e 650°C, tendo também a influência do tempo de permanência na temperatura escolhida.

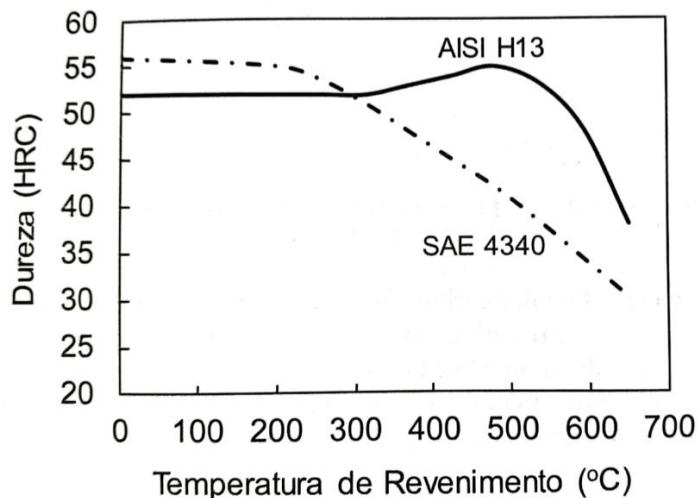
Neste espectro de temperaturas de revenimento, verificam-se as seguintes transformações/estágios (KRAUSS,1997):

- Para uma faixa de temperatura de revenimento entre 150°C a 200°C tem-se uma modesta melhora na tenacidade devido a modificações estruturais com o aparecimento de carbonetos épsilon e alívio de tensões residuais.
- Para uma faixa de temperatura de revenimento entre 250°C a 400°C, aparecimento de ferrita entre os limites da martensita de baixo carbono e os carbonetos- ϵ , além de uma progressiva transformação dos carbonetos em cementita.
- Para uma faixa de temperatura de revenimento acima de 400°C ocorre a completa separação da ferrita e cementita e para temperaturas superiores os carbonetos coalescem e a dureza cai mais acentuadamente.

Nas ligas contendo elementos de liga como titânio (Ti), cromo (Cr), molibdênio (Mo), vanádio (V), nióbio (Nb), ou tungstênio (W), há precipitação de carbonetos de liga (secundários) entre as temperaturas de 500°C a 600°C, fenômeno esse chamado de endurecimento secundário.

A Figura 3-3 ilustra o revenimento de aço comum e um que apresenta o endurecimento secundário.

Figura 3-3 – Curvas de revenimento de uma aço baixa liga (SAE 4340) com queda contínua da dureza e de um aço ferramenta para trabalho a quente (AISI H13) apresentando o fenômeno do endurecimento secundário.



Fonte: Adaptado de PINEDO (2021).

3.3.4 Fragilidade do Revenido

Apesar do ganho de dureza através da precipitação de carbonetos secundários no aço, alguns aços apresentam uma tenacidade reduzida ao testar através do ensaio de impacto Charpy.

Isso ocorre devido a um fenômeno chamado de fragilidade do revenido, no qual aços com elementos de liga como Cr (Cromo), Ni (Níquel) e Mn (Manganês), e impurezas como P (Fósforo), Sn (Estanho), Sb (Antimônio), e As (Arsênio), entre

375°C e 575°C, tem esses elementos segregando na região de contorno de grão ocasionando uma possível fratura intergranular.(CHIAVERINI,2008).

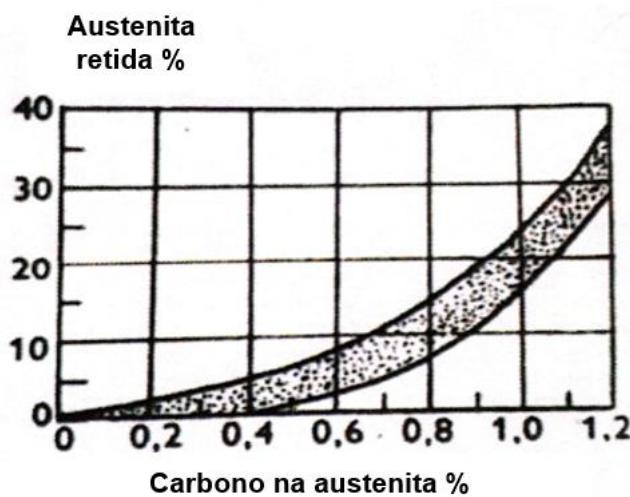
Este fenômeno também é conhecido como fragilidade de dois estágios (*two-step embrittlement*), já que este é reversível e pode ser evitado através do aquecimento do aço a temperaturas superiores a 600°C e resfriada rapidamente.

3.3.5 Duplo revenimento

O duplo revenimento é amplamente utilizado na indústria metalúrgica, principalmente nos aços ferramenta para evitar a consolidação de austenita retida. A quantidade de austenita retida presente é função principalmente do teor de carbono do aço, sendo que em aproximadamente 0,6%C ela começa a aparecer, ver Figura 3-4. Normalmente o primeiro revenimento promove o alivio de tensões, revenimento da martensita e precipitação dos carbonetos na austenita retida. Já o segundo revenimento tem o papel de revertir a martensita originária da austenita retida.

O uso do duplo revenimento além do mencionado é muito utilizado para garantir estabilização dimensional de ferramentas.

Figura 3-4 – Gráfico percentagem de austenita retida por porcentagem de carbono na austenita.



Fonte: Adaptado de BARREIRO, 1949.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Composição química

Neste trabalho foi utilizado o aço inoxidável M310, com a seguinte composição química fornecida pelo fabricante, conforme mostrado na Tabela 4-1.

Tabela 4-1 – Composição química do aço M310.

Composição Química (%) aço M310 (~AISI 420)				
C	Si	Mn	Cr	V
0,38	0,70	0,45	14,30	0,20

4.2 Corpos de prova

Os corpos de prova foram confeccionados a partir de um bloco 195mm x 203mm x 20mm. Com base nisso foram usinados por fresagem e cortados por eletroerosão, pela empresa SGS¹, 30 corpos de prova idênticos, 10,5 mm x 10,5 mm x 55 mm, respeitando a Norma ASTM E23-1 (Tipo A) e em seguida retificados para atender as especificações de tolerância, Figuras 4-1 e 4-2.

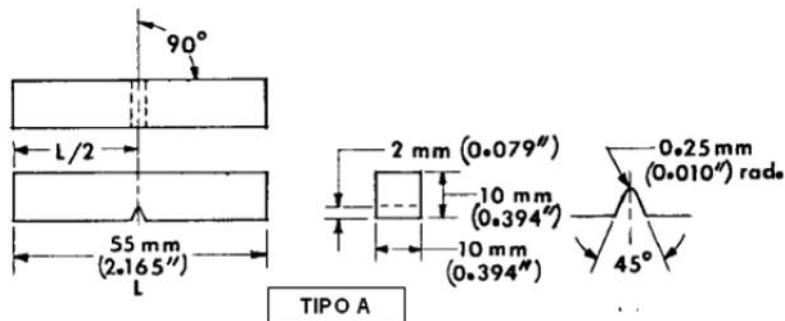
Figura 4-1 – Corpos de prova usinados e cortados



Fonte: Próprio autor

¹ SGS - Société Générale de Surveillance, Barueri, São Paulo.

Figura 4-2 – Especificações segundo a Norma E23-1, 2001.



Fonte: Norma ASTM E23-1, 2001.

Os corpos de prova foram divididos em 3 grupos e submetidos aos tratamentos térmicos de têmpera, duplo revenimento e um destes grupos ao revenimento prolongado.

4.3 Tratamentos térmicos

4.3.1 Têmpera

Para efetuar a têmpera usou-se um forno TAV do modelo TPF 70/70/105 HP, a vácuo, de propriedade da empresa ISOFLAMA².

Segundo o catálogo do fabricante a temperatura de austenitização recomendada está na faixa entre 1000°C e 1050°C, sendo escolhido então a temperatura de 1030°C. O resfriamento foi feito com cargas de nitrogênio, com pressão de 5 bar, até a temperatura ambiente.

As amostras foram colocadas em “redes” de aço para agrupar os 3 grupos de amostras a serem austenitizadas. Imediatamente após o resfriamento, foram revenidas em seus respectivos parâmetros. Para atingir a temperatura de austenitização o forno foi configurado para o aquecimento a uma taxa de 40 °C por

² ISOFLAMA – Isoflama Processos Térmicos, Indaiatuba, São Paulo.

minuto com 2 patamares para garantia que todo o volume das peças da carga atingisse a temperatura desejada. O tempo de encharque foi de 40 minutos.

Na montagem de carga eles foram posicionados paralelamente ao fluxo de gás de resfriamento do forno, afim de garantir um resfriamento homogêneo. Após o resfriamento total as amostras foram separadas para realização das respectivas etapas de revenimento objetivadas do estudo.

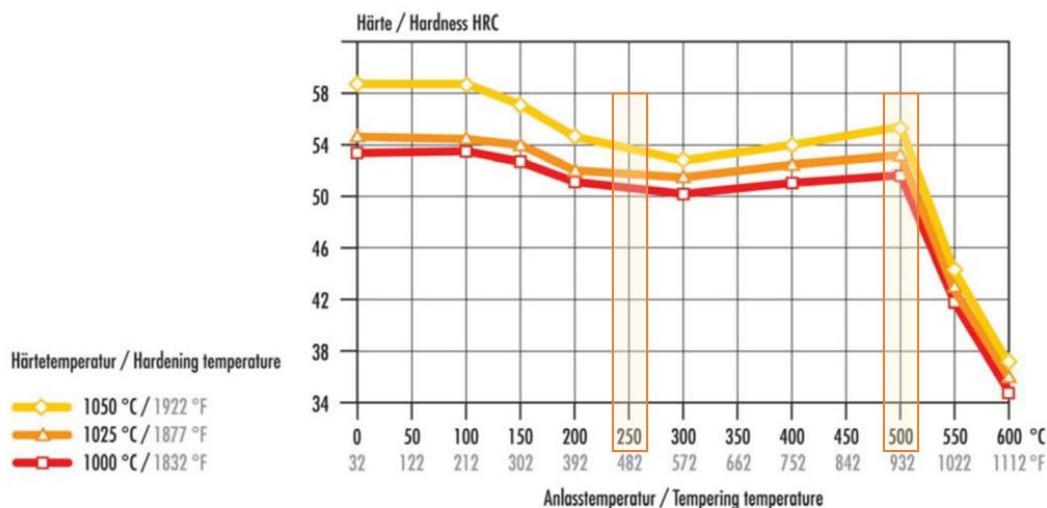
4.3.2 Revenimento

A etapa de revenimento foi efetuada nos fornos da marca INDUSTRIAL HEATING, modelo TEMPER R40. Os corpos de prova foram divididos em 3 grupos, de 10 amostras, com temperaturas e tempos distintos, Tabela 4-2, afim de investigar a influência destes parâmetros na tenacidade do aço. Tais temperaturas foram definidas pela curva de revenimento fornecido para o fabricante (Figura 4-3), tendo como pré-requisito a dureza mínima de 50 HRC.

Tabela 4-2 – Relação temperatura x tempo em processo

Processo	Temperatura de revenimento	Tempo em processo
1	250°C	6H
2	250 °C	2 x 2H
3	500 °C	2 x 2H

Figura 4-3 – Curva de revenimento para o aço M310



Fonte: Catálogo do fabricante (BOHLER).

4.3.3 Ensaio de Dureza

Para realização do ensaio foi utilizado um durômetro de bancada na ISOFLAMA da marca Mitutoyo modelo HR-300.

Anteriormente ao ensaio, os corpos de prova foram lixados superficialmente para retirada de possíveis óxidos formados durante o processo de tratamento térmico. Assim feito, em cada amostra, de cada grupo, foram realizadas 3 indentações em 5 corpos de prova, de cada grupo afim de conferir com maior precisão os valores reais de dureza obtidos.

4.3.4 Ensaio de impacto Charpy

O ensaio de impacto Charpy foi realizado para inspeção das tenacidades conferidas nos diferentes grupos. Para o estudo, os ensaios foram realizados em duas

localidades diferentes, na empresa MIB³ os ensaios com entalhe e na empresa SGS sem entalhe, seguindo recomendações da ASTM E23-1.

Na empresa MIB o equipamento utilizado foi uma máquina de ensaio Charpy modelo JB-300B da marca TIME.

No caso da SGS, que realizou o ensaio de impacto sem entalhe, as informações do equipamento utilizado não foram disponibilizadas.

4.3.5 Caracterização microestrutural

A verificação das microestruturas obtidas foi através da utilização de um microscópio da marca Zeiss modelo AXIOVERT 40 MAT. As amostras foram embutidas em baquelite, lixadas, polidas com pasta de diamante e atacadas com reagente Vilella para melhor visualização dos microconstituintes resultantes do processo térmico feito.

³ MIB – Materials Institute of Brazil, São Carlos, São Paulo.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Ensaios de dureza

Com a realização dos processos previamente descritos, primeiramente houve a medição das durezas obtidas nos corpos de prova das 3 diferentes rotas realizadas, como descritas na Tabela 5-1 abaixo.

Tabela 5-1 – Relação de corpos de prova por processo e seus respectivos resultados de dureza.

Processo	No Corpo de Prova	Média	Dureza Média (HRC)	Desvio Padrão
250°C x 6h	CP1	51,8	51,5	0,256
	CP2	51,1		
	CP3	51,3		
	CP4	51,6		
	CP5	51,8		
250°C por 2 x 2h	CP1	52,0	51,7	0,272
	CP2	51,7		
	CP3	51,0		
	CP4	51,7		
	CP5	52,0		
500°C por 2 x 2h	CP1	53,0	52,8	0,16
	CP2	52,9		
	CP3	52,9		
	CP4	52,8		
	CP5	52,4		

Ao observar os valores obtidos com o ensaio de dureza verifica-se que todos os corpos de prova se apresentaram na premissa de dureza mínima de 50 HRC. Analisando os valores apresentados é evidente que houve um leve aumento nas durezas obtidas através do duplo revenimento a 500°C por 2h. Isso se explica, pois, esta temperatura propicia o fenômeno de endurecimento secundário que acontece por meio da precipitação de carbonetos secundários, elevando a dureza do metal.

Se levar em conta o desvio padrão, a variação de dureza é realmente pequena. No entanto, ao se observar a Figura 4-3 do revenimento do aço M310 observa-se que, para a temperatura de austenitização de 1025°C (a mais próxima das

condições usadas neste trabalho) verifica-se que a diferença de dureza entre o revenimento a 250°C e o revenimento a 500°C (onde ocorre o endurecimento secundário) é de aproximadamente 1 HRC, o que também se observou neste trabalho.

É interessante observar nesta Figura 4-3 que mesmo para temperatura de austenitização maior (1050°C), onde ocorreria uma maior dissolução de elementos de liga, disponibilizando-os para a precipitação dos carbonetos no endurecimento secundário, o aumento de dureza a 500°C também não se mostra expressivo, dado o baixo teor de carbono desta liga.

5.2 Metalografia

Como descrito no item de materiais e métodos, uma amostra de cada processo estudado foi embutida em baquelite, lixada, polida com pasta de diamante e atacadas com reagente Vilella. Como resultados temos as imagens a seguir.

Figura 5-1: Microestrutura resultante do processo de revenimento único por 6h a 250°C. Presença de martensita revenida. Aumento de 100X.



Figura 5-2: Microestrutura resultante do processo de revenimento único por 6h a 250°C. Presença de martensita revenida. Aumento de 500X.

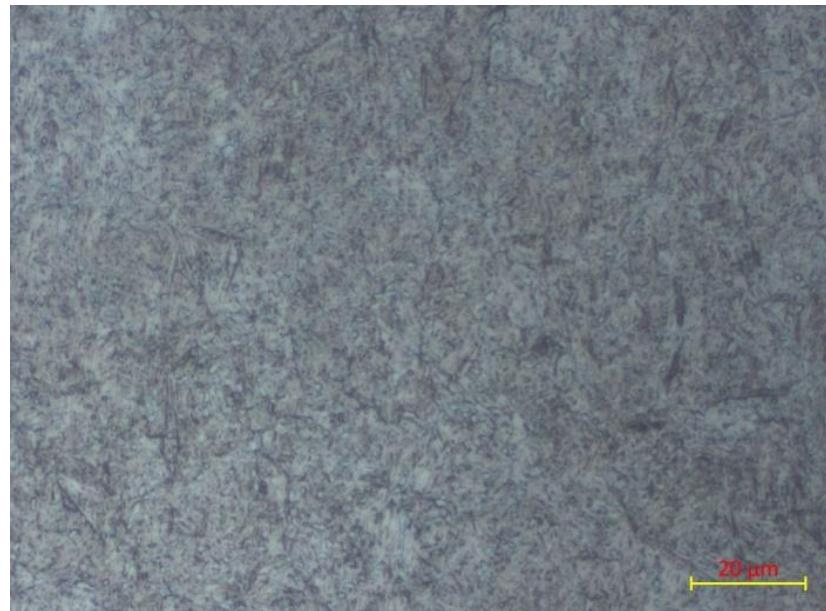
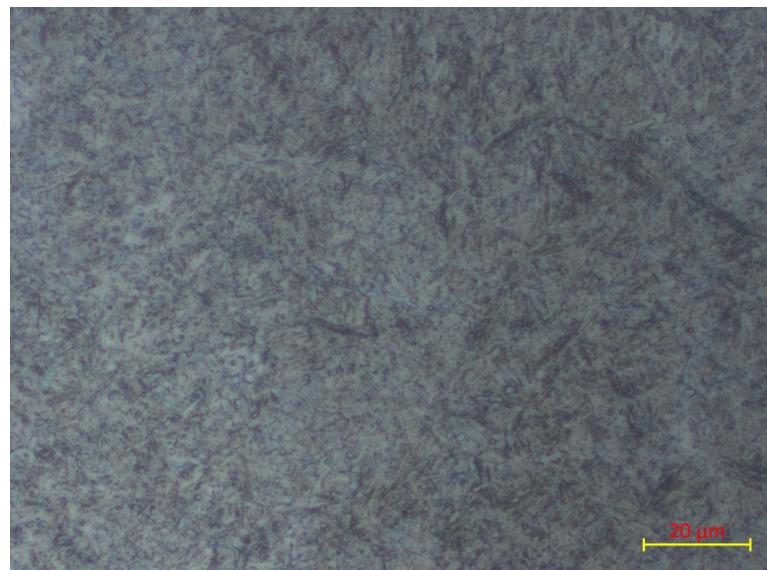


Figura 5-3: Microestrutura resultante do processo de duplo revenimento por 2h a 250°C. Presença de martensita revenida. Aumento de 100X.



Figura 5-4: Microestrutura resultante do processo de duplo revenimento por 2h a 250°C. Presença de martensita revenida. Aumento de 500X.



Verifica-se que praticamente não há diferenças microestruturais entre as duas condições de revenimento, mostrando aspecto microestrutural de martensita revenida, muito semelhantes entre si.

Figura 5-5: Microestrutura resultante do processo de duplo revenimento por 2h a 500°C. Presença de martensita revenida. Aumento de 100X.

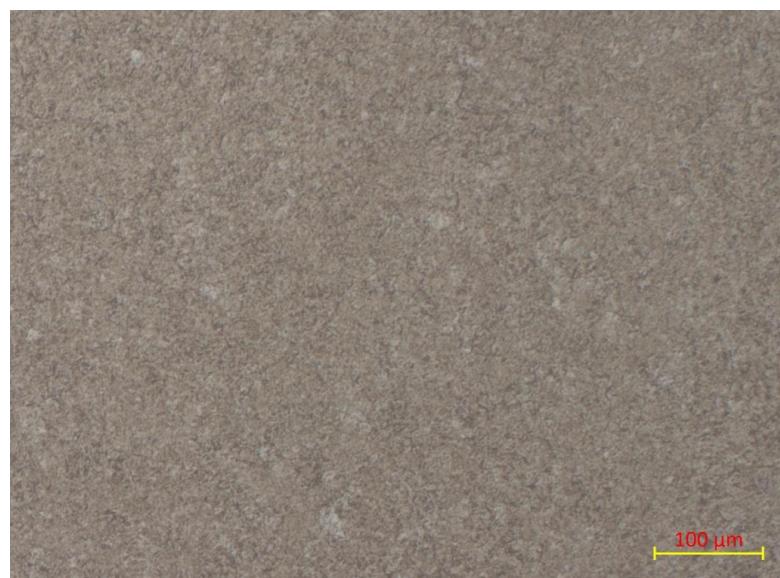
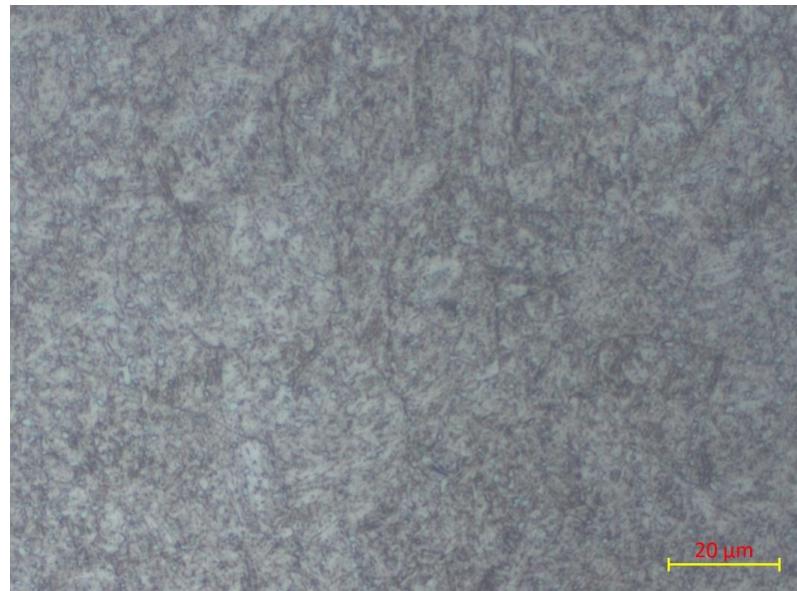


Figura 5-6: Microestrutura resultante do processo de duplo revenimento por 2h a 500°C. Presença de martensita revenida. Aumento de 500X.



A microestrutura observada é caracterizada por uma martensita “esboroada” resultado de um revenimento mais intenso sofrido por estas amostras nesta condição quando comparado à condição microestrutural observada a 250°C. Não é possível observar os carbonetos secundários (imperceptíveis através da microscopia ótica).

5.3 Ensaios de Impacto

Após a realização dos ensaios de dureza foram realizados ensaios de impacto Charpy, com e sem entalhe, para identificar as tenacidades a fratura resultante de cada uma das rotas descritas anteriormente.

Inicialmente, para os resultados dos ensaios de impacto Charpy com entalhe, realizados na empresa MIB, temos a seguir a Tabela 5-2.

Tabela 5-2 – Relação de corpos de prova por processo e seus respectivos resultados de energia de impacto.

Processo	No Corpo de Prova	Energia de Impacto (J)	Média	Desvio Padrão
250°C x 6h	CP1	6	4,8	0,96
	CP2	4		
	CP3	4		
	CP4	4		
	CP5	6		
250°C por 2 x 2h	CP1	4	4,8	0,96
	CP2	6		
	CP3	4		
	CP4	4		
	CP5	6		
500°C por 2 x 2h	CP1	2	2,8	0,96
	CP2	2		
	CP3	4		
	CP4	4		
	CP5	2		

Tendo em vista os valores obtidos no ensaio de impacto com entalhe, nota-se que os resultados foram extremamente baixos. Isso aconteceu, principalmente, porque a presença do entalhe nos corpos de prova coloca-os em estado frágil, fato esse identificado pela Figura 5-7 que mostra a superfície de fratura totalmente frágil, dificultando um estudo comparativo entre as diferentes condições testadas. Apesar dos resultados mais próximos, já é possível perceber que a energia de impacto é aumentada com a redução da temperatura de revenimento para 250°C, onde os valores de dureza são ligeiramente menores.

Figura 5-7 – Aspecto da fratura após ensaio Charpy, representativo de todas as condições de ensaio.



Fonte: Próprio autor.

O aspecto da fratura é claro e praticamente sem deformação plástica, indicativo do comportamento frágil. O estado tri-axial de tensões na ponta do entalhe provoca esse comportamento, que para materiais mais dúcteis permite que o ensaio possa ocorrer com a fratura do corpo de prova.

Foram realizados então, na empresa SGS, ensaios de impacto Charpy sem entalhe, afim de conferir se seria possível obter resultados mais consistentes. Tem-se então, os resultados obtidos nesta condição na Tabela 5-3.

Tabela 5-3 – Relação de corpos de prova por processo e seus respectivos resultados de energia de impacto.

Processo	No. Corpo de Prova *	Energia de Impacto (J)	Média	Desvio Padrão
250°C x 6h	CP1	232	164	45,33
	CP2	128		
	CP3	132		
250°C por 2 x 2h	CP1	132	131,33	2,22
	CP2	108		
	CP3	134		
	CP4	150		
	CP5	128		
500°C por 2 x 2h	CP1	74	79	0,67
	CP2	78		
	CP3	80		
	CP4	82		
	CP5	79		

* Alguns corpos de prova não foram inseridos na lista por problemas decorrentes do ensaio.

Embora com maiores desvios padrão, os resultados mostram que as melhores tenacidades se situam no revenimento feito a 250°C. Como comentado anteriormente, durante o revenido em determinadas faixas de temperatura pode-se observar o fenômeno de fragilidade do revenido.

Ainda que as amostras, no caso do revenimento a 500°C, tenham tido um ligeiro aumento na dureza, a perda em tenacidade foi muito pronunciada, aproximadamente 40%, o que sugere que o revenimento possa ter sido feito em uma faixa de fragilidade. No entanto, estudos mais aprofundados são necessários para averiguar o real motivo desse comportamento.

6. CONCLUSÃO

Para as condições experimentais utilizadas neste trabalho, pode-se concluir que:

O revenimento feito na temperatura de 250°C apresenta melhores resultados, cerca de 40% superior nos valores de tenacidade a fratura se comparado com a rota de 500°C, tendo em vista o pré-requisito mínimo de dureza de 50 HRC.

Ao se comparar as rotas de revenimento realizadas a 250°C, duplo revenimento por 2h e o revenimento único prolongado por 6h, verificou-se que os valores de tenacidade são muito próximos, bem como, apresentam microestruturas de grande similaridade, sendo, portanto, os dois processos propícios de serem executados com o ganho de tenacidade.

7. TRABALHOS FUTUROS

- Efetuar novos testes para verificar se no ciclo de duplo revenimento por 2h a 500°C ocorre o fenômeno da fragilidade do revenido.
- Verificar se há queda na resistência a corrosão entre os processos citados neste trabalho.

8. REFERÊNCIAS

ASTM E23 - American Society for Testing and Materials. **Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials.** Philadelfia, USA, 2016.

ASM METALS HANDBOOK. **Heat treater's Guide: Practices and Procedures for Irons and Steels.** ASM International, v. 2, 1994.

BARREIRO, Jose Apraiz. **Tratamientos Termicos de los Aceros.** Madrid: [s. n.], 1949. 463 p.

BROOKS, C. R. **Principles of the Heat Treatment of Plain Carbon and Low-Alloy Steels.** Materials Park: ASM international, 1996.

CALLISTER, W. D. **Fundamentos da Ciência e Engenharia de Materiais:** Uma Abordagem Integrada. 2^a Ed. Rio de Janeiro: LTC, 2006.

CHIAVERINI, V. **Aços e Ferros Fundidos.** 7^a Ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2008.

COLPAERT, H. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns.** 4^a Ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2008

GABARDO, J. F. **Estudo da tenacidade do aço ferramenta H13.** 2008. 71 f. Dissertação (Mestrado) – Engenharia Mecânica. Universidade Federal do Paraná, UFPR, Paraná, 2008.

KRAUSS, G. **STEELS: Heat Treatment and Processing Principles.** Materials Park: ASM international, 1997.

LIPPOLD, J. C., KOTECKI, D. J. **Welding metallurgy and weldability of stainless steels.** New Jersey, USA: JohnWiley & Sons, 2005.

MARCOMINI, J. B. **Fragilização da martensita revenida no aço SAE 5160H.** Campinas: Universidade Estadual de Campinas, 2009.

SILVA, A. L. V. C; MEI, P. R. **Aços e Ligas Especiais.** 2^a Ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2006.

PINEDO, C. E. **Tratamento Térmicos e Superficiais dos Aços.** [S. l.]: Blucher, 2021.
326 p.