

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE LORENA

JOÃO VITOR MUEZERIE COSTA

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE UMA MODIFICAÇÃO DO AÇO
AISI P20 APÓS TRATAMENTOS TÉRMICOS DISTINTOS DE TÊMPERA E
REVENIMENTO**

Lorena
2022

JOÃO VITOR MUEZERIE COSTA

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE UMA MODIFICAÇÃO DO AÇO
AISI P20 APÓS TRATAMENTOS TÉRMICOS DISTINTOS DE TÊMPERA E
REVENIMENTO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à Escola de Engenharia de Lorena - Universidade de São Paulo como requisito parcial para conclusão da Graduação do curso de Engenharia de Materiais.

Orientador: MSc. Danilo Alencar de Abreu

Lorena

2022

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, por sempre me incentivarem a buscar conhecimento e educação, por sempre fornecerem condições favoráveis a um contínuo estudo durante toda minha vida, por sempre me apoiarem e possibilitarem a oportunidade de me tornar quem hoje sou. Sempre estarei em débito com vocês por propiciarem uma casa que se traduz num mundo de amor e severidade, exemplo e educação. Um local onde as palavras carinhosas, as mãos lavadas, as roupas limpas e os bons costumes têm centro.

Ao meu irmão, por ter me ajudado a aprender e por ter compartilhado momentos de diversão e felicidade desde pequenos. Entre brincadeiras e brigas sei que posso contar com você para o resto da vida, conte comigo também. No fim, é como nossos pais sempre nos disseram: "Depois que nós nos formos, vocês só terão a vocês mesmos como família."

Aos amigos, por mostrarem um mundo onde as diferenças existem e o que nos torna mais próximos e iguais em alguns pontos.

Aos familiares, por todo o apoio em vida.

"Sempre é bom termos consciência de que dentro de nós há alguém que tudo sabe,
tudo quer e age melhor do que nós mesmos."

Hermann Hesse

RESUMO

Os aços da classe AISI P20 são dificilmente utilizados como substitutos para outros materiais, ou mesmo possuem seus ciclos de tratamento térmicos estudados, pois trata-se de um material utilizado para a confecção de moldes de injeção de plásticos em geral. O presente trabalho estuda as modificações de propriedades mecânicas para viabilizar a utilização do AISI P20 para outros setores como o automobilístico, óleo e gás, aeronáutico e/ou ferramentas. Esta ampliação de aplicação pode ser possível caso se obtenha um limite de resistência mínimo de 800 MPa consistentemente, mantendo a tenacidade do aço. Sabendo disso, um estudo inicial do comportamento mecânico após diferentes ciclos de tratamento térmico possibilita entender as variações de propriedades mecânicas alcançadas. Essas variações são amplas e partem desde a escolha do processo de tratamento térmico a ser utilizado, até a influência das características dimensionais do material a ser utilizado. O conhecimento da microestrutura do material e de suas propriedades mecânicas é de importância fundamental para a compreensão de suas possíveis aplicações. Buscando possibilitar a análise dessas alterações de resposta mecânica, os tratamentos térmicos de austenitização foram realizados a 800 °C e 850 °C seguidos de um ou dois revenimentos a 550 °C ou 600°C. Os ensaios mecânicos demonstraram um efetivo aumento da resistência mecânica tanto para as amostras tratadas a 800 °C quanto as tratadas a 850 °C.

ABSTRACT

AISI P20 steels are hardly used as substitutes for other materials, or even have their heat treatment cycles studied, as it is a material used for the manufacture of plastic injection molds in general. The present work studies the modifications of mechanical properties to enable the use of the AISI P20 for other sectors such as automotive, oil and gas, aeronautics and/or tooling. This application magnification may be possible if a minimum resistance limit of 800 MPa is consistently obtained, maintaining the tenacity of the steel. Knowing this, an initial study of mechanical behavior after different heat treatment cycles makes it possible to understand the variations in mechanical properties achieved. These variations are wide and start from the choice of the heat treatment process to be used, to the influence of the dimensional characteristics of the material to be used. Knowledge of the microstructure of the material and its mechanical properties is of fundamental importance for the understanding of its possible applications. Seeking to enable the analysis of these mechanical response alterations, the thermal treatments of austenitization were performed at 800 °C and 850 °C followed by one or two temperings at 550 °C or 600 °C. Mechanical tests demonstrated an effective increase in mechanical strength for both samples treated at 800 °C and treated samples at 850 °C.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Molde Plástico de aço AISI P20	7
Figura 2: Desenho esquemático do ciclo de têmpera e revenimento.....	10
Figura 3: Efeito da Temperatura de Revenimento nas Propriedades Mecânicas do aço 4340	11
Figura 4: Transformações do revenimento em aços carbono, aquecidos por uma hora.	12
Figura 5: Curva tensão-deformação	14
Figura 6: Corte esquemático de um material genérico a ser polido	16
Figura 7: Contraste após ataque químico	17
Figura 8 : Bloco laminado de 300 mm x 250 mm	18
Figura 9: Recorte da barra original.....	18
Figura 10: Geometria dos corpos de prova de ensaio de traçãoFonte: Reprodução da ASTM A370.....	20
Figura 11: Corpo de prova para ensaio Charpy	21
Figura 12: Instron Série LX para ensaios	23
Figura 13: Politriz / Lixadeira metalográfica Aropol VV-PU.	24
Figura 14: Microscopia Óptica das Amostras a) CPm1; b) CPm2; c) CPm3; d) CPm4; e) CPm5; f) CPm6; g) CPm7; h) CPm8.....	26
Figura 15: Gráfico e Tabela da relação entre Limite de Escoamento (MPa) e Redução de Área (%) das amostras CPt1, CPt2, CPt3, CPt4, CPt5, CPt6, CPt7 e CPt8.	29
Figura 16: Gráfico de comparação da Energia de Absorção Média (J).....	31

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Classificação dos Aços Ferramenta	4
Tabela 2: Classificação AISI P20.	5
Tabela 3: Atuação de elementos no AISI P20.....	6
Tabela 4: Composição química do aço P20 modificado (% em peso)	19
Tabela 5: Dimensões dos parâmetros da Figura 2.....	20
Tabela 6: Parâmetros de tratamento térmico	22
Tabela 7: Condições de Tratamento Térmico das Amostras confeccionadas para a Metalografia.....	25
Tabela 8: Resultados obtidos pelo ensaio de tração.....	28
Tabela 9: Valores de Absorção Média encontrados no Ensaio Charpy e parâmetros de tratamento térmico de cada trio de amostras	30

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
2	OBJETIVO.....	3
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
3.1	Aço Ferramenta.....	3
3.2	Aço Ferramenta para Trabalho a Frio e Molde Plástico.....	4
3.3	Aço Ferramenta AISI P20.....	5
3.4	Tratamento Térmico.....	7
3.4.1	Têmpera.....	8
3.4.2	Revenimento.....	9
3.5	Ensaio de Impacto Charpy.....	12
3.6	Ensaio de Tração.....	13
3.6.1	Curva Tensão-Deformação.....	13
3.7	Preparação Metalográfica.....	15
3.7.1	Lixamento.....	15
3.7.2	Polimento.....	15
3.7.3	Ataque químico.....	16
4	MATERIAL E MÉTODOS.....	17
4.1	Material.....	17
4.2	Métodos.....	19
4.2.1	Corpo de prova para ensaio de tração.....	19
4.2.2	Corpo de prova para ensaio de impacto.....	20
4.2.3	Tratamento Térmico.....	21
4.2.4	Ensaio de Impacto Charpy.....	22
4.2.5	Ensaio de Tração.....	22
4.2.6	Microscopia Óptica.....	23

5	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	24
5.1	Microscopia Óptica.....	25
5.2	Ensaio de Tração	27
5.3	Ensaio de Impacto Charpy	30
6	CONCLUSÕES.....	32
7	SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS	33
8	REFERÊNCIAS	34

1 INTRODUÇÃO

Com o advento da Segunda Guerra Mundial no século XX, surgiu-se a necessidade de gerar inúmeros produtos em larga escala e padronizados com a finalidade de manter um abastecimento contínuo e confiável aos soldados, sem deixar de lado a viabilidade econômica ao país. Um dos desenvolvimentos mais importantes que ocorreu durante esta época foi o início da produção de polímeros para substituir outros materiais com processos fabris complexos e custosos. Como exemplo, podem ser mencionadas as substituições de cantis de alumínio por cantis de polietileno tereftalato (PET, bem como a substituição de capacetes de metal por capacetes de plástico, proporcionando ergonomia e economia no transporte ao reduzir o peso total dos equipamentos.

Os plásticos podem ser produzidos (em muitos casos) a partir de um método de extrusão, no qual os polímeros na forma de grânulos são introduzidos em um equipamento denominado extrusora para que ocorra a formação de peças a quente denominado. O material do molde, onde o polímero é armazenado é feito normalmente de um metal de baixa rugosidade e alta resistência mecânica. estas características são desejadas para se obter um produto com bom acabamento e sem mudanças dimensionais ao longo da produção contínua. Cabe ressaltar que este processo ocorre em temperaturas no intervalo entre 180 °C e 230 °C (INNOVA, 2019).

Apesar de diversos estudos estarem voltados para a redução de custo, bem como também de processos que resultem em uma maior produtividade (KOPPE, 2012; RUBIN, 2016), em alguns casos a melhoria de propriedades dos materiais que são empregados para a fabricação destes produtos não acompanha esta evolução, podendo permanecer sem alteração por um longo período, como é o caso dos aços AISI com a classificação “P”, que são utilizados como moldes para injeção de plásticos.

Visando a expansão da compreensão do comportamento mecânico, o presente trabalho utilizou o aço AISI P20 modificado com teor de carbono de 0,26% em peso e outros elementos de liga como Níquel, Cromo e Molibdênio. Os diferentes ciclos de tratamento térmico possuem influência direta nas propriedades físicas e mecânicas do material, podendo levar tanto a melhora ou a piora das propriedades de resistência

mecânica, afetando conseqüentemente a qualidade do material para uma determinada aplicação (CALLISTER, 2003).

As etapas de tratamento térmico que envolvem aquecimento e resfriamento levam geralmente a modificações na microestrutura de um material. Desta forma, todo material precisa passar por um estudo de forma a identificar suas tolerâncias aos diferentes métodos e temperaturas de tratamento térmico (PORTER, 2022). Há duas principais modificações causadas por processos errôneos: a primeira modificação se caracteriza por uma redução ou aumento da dureza e limite de escoamento/resistência para patamares não coerentes com o projeto; a segunda pode ser visível devido a alteração de forma do corpo por empeno, ou até mesmo a presença de trincas no material devido a tensões térmicas induzidas durante o resfriamento (COLPAERT, 2008).

A seleção do tipo de material é um fator limitante de sua capacidade do aquecimento para alterar a estrutura cristalina, um exemplo é o aço inoxidável 410 que não alcançará uma dureza próxima do aço inoxidável 440 independentemente do processo de tratamento térmico (PORTER, 2022). Apesar das limitações intrínsecas dos materiais, o amplo conhecimento do comportamento mecânico de uma determinada liga quando submetida a processos de tratamento térmico diferentes pode apresentar tanto ganhos quanto perdas. O estudo presente analisa essas modificações sobre o aço AISI P20 ao comparar os benefícios da têmpera e revenimento (tratamentos térmicos) em diferentes faixas de temperatura e posterior resfriamento. Após os tratamentos as amostras passaram por ensaio de tração, ensaio de impacto e, também, estudo metalográfico para identificar qualitativamente as estruturas presentes em cada situação.

2 OBJETIVO

O objetivo do presente trabalho consistiu em investigar as alterações das propriedades mecânicas do aço AISI P20 modificado, quando submetido a diferentes tratamentos térmicos de têmpera e revenimento, de forma a ampliar as áreas de aplicação do material a outros setores industriais como o aeronáutico ou de óleo e gás. Duas diferentes temperaturas para austenitização e outras quatro condições de revenimento foram utilizadas para cada amostra austenitizada. Os posteriores ensaios de tração e de impacto Charpy foram utilizados para obter os valores do limite de escoamento e de energia absorvida, respectivamente.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Aço Ferramenta

O Aço Ferramenta é considerado um aço especial e é uma categoria composta por aços com propriedades mecânicas e físico-químicas capazes de resistir a abrasões e esforços mecânicos elevados, sem que ocorra deformações permanentes ou alteração de performance. As diferentes classificações são exibidas na Tabela 1. O aço ferramenta é geralmente aplicado na fabricação de produtos de segmentos industriais de usinagem, extrusão de alumínio, modelagem de plástico por injeção, estampagem, conformação de chapas e corte a frio ou quente. As designações destes aços devem ser selecionadas de acordo com sua aplicação específica e as exigências mecânicas durante o uso da ferramenta. Além disso, a vida útil da matriz e o custo são dois fatores primários para a seleção do material, pois estes fatores determinarão a viabilidade da fabricação de produtos em série, que contém em seu preço final o custo total dividido pelo número de peças a serem produzidas (COSTA E SILVA, 2011).

Para garantir elevada dureza destes aços, a temperabilidade deve ser levada em consideração, visto que dois processos de tratamentos térmicos consecutivos (sendo um de têmpera e outro de revenimento) ocorrem após a produção pelo processo de fundição em forno elétrico seguida por laminação dos lingotes. A temperatura da têmpera influencia diretamente na microestrutura a ser formada, e conseqüentemente, nas propriedades mecânicas da ferramenta. Segundo Bhadeshia (2001), a formação de microestruturas com características martensíticas ou bainíticas estão diretamente associadas às temperaturas e taxas de resfriamento. Atualmente o aço ferramenta pode ser dividido em sete classes de acordo com a sua utilização.

Tabela 1: Classificação dos Aços Ferramenta

Tipo	Classe	
	AISI	Característica Significante
1. Endurecimento na Água	W	
2. Trabalho a Frio	O	Endurecimento a Óleo
	A	Liga média com Endurecimento ao Ar
	D	Elevado Carbono e Cromo
3. Resistente a Choque	S	
4. Alta Velocidade	T	Liga de Tungstênio
	M	Liga de Molibdênio
5. Trabalho a Quente	H	H1-H19: Liga de Cromo
		H20-H39: Liga de Tungstênio
		H40-H59: Liga de Molibdênio
6. Moldes Plásticos	P	
7. Aplicação Especial	L	Baixa liga
	F	Carbono-tungstênio

Fonte: J. T. Black, Ronald A. Kohser (2019, p. 101)

3.2 Aço Ferramenta para Trabalho a Frio e Molde Plástico

O trabalho a frio pode ser descrito pela utilização de um material quando durante a sua aplicação, a temperatura da superfície da ferramenta está abaixo de 260°C (COSTA E SILVA, 2011). Como fenômenos de recuperação e recristalização não são termicamente ativados, o que poderia levar a redução da densidade de defeitos no material, é necessário que propriedades como resistência mecânica e ao desgaste/abrasão sejam elevadas a fim de evitar ou minimizar deformações plásticas. Esta classe de aço ferramenta pode ser subdividida em três tipos: aço endurecido com resfriamento ao ar, aço temperado em óleo com aditivos antioxidantes e aço de alto teor de cromo e carbono. Os aços que passam por têmpera a óleo (classe O e P) ou a ar (classe A e P) possuem uma menor tendência na geração de trincas em função do rápido resfriamento induzido pelo tratamento térmico, sendo possível manter uma tolerância dimensional final do produto mais próxima do esperado (BLACK e KOHSER, 2019).

3.3 Aço Ferramenta AISI P20

Um dos aços mais utilizados na indústria de plásticos é o AISI P20, especialmente para a confecção de moldes para injeção (CORAZZA, 2012). Suas propriedades mecânicas como boa usinabilidade e soldabilidade são obtidas por meio de tratamentos térmicos de têmpera e revenimento consecutivos por 2 horas (ASTM A681, 2015). Após estes processos este material apresenta uma dureza praticamente uniforme na faixa entre 28 a 32 HRC ao longo de sua extensão, mantendo-se uma excelente polibilidade (FAVORIT SPECIAL STEELS, 2018).

A classificação AISI para o aço P20 tem como especificação a ASTM A681 (Norma de Especificação para ligas de Aço Ferramenta) e sua composição química é mostrada na Tabela 2 apresentada na sequência:

Tabela 2: Classificação AISI P20.

Designação UNS		T51620	Tipo		P20
Composição Química em peso (%)					
C		Si		Mn	
mín	Máx	mín	máx	Mín	máx
0,28	0,4	0,2	0,8	0,6	1
P	S	Cr		Mo	
máx	Máx	mín	máx	mín	máx
0,03	0,03	1,4	2	0,3	0,55

Fonte: Adaptado de ASTM A681 (2015)

Os diferentes elementos químicos atuam de forma a garantir propriedades físico-químicas específicas aos aços de acordo com a Tabela 3.

Tabela 3: Atuação de elementos no AISI P20.

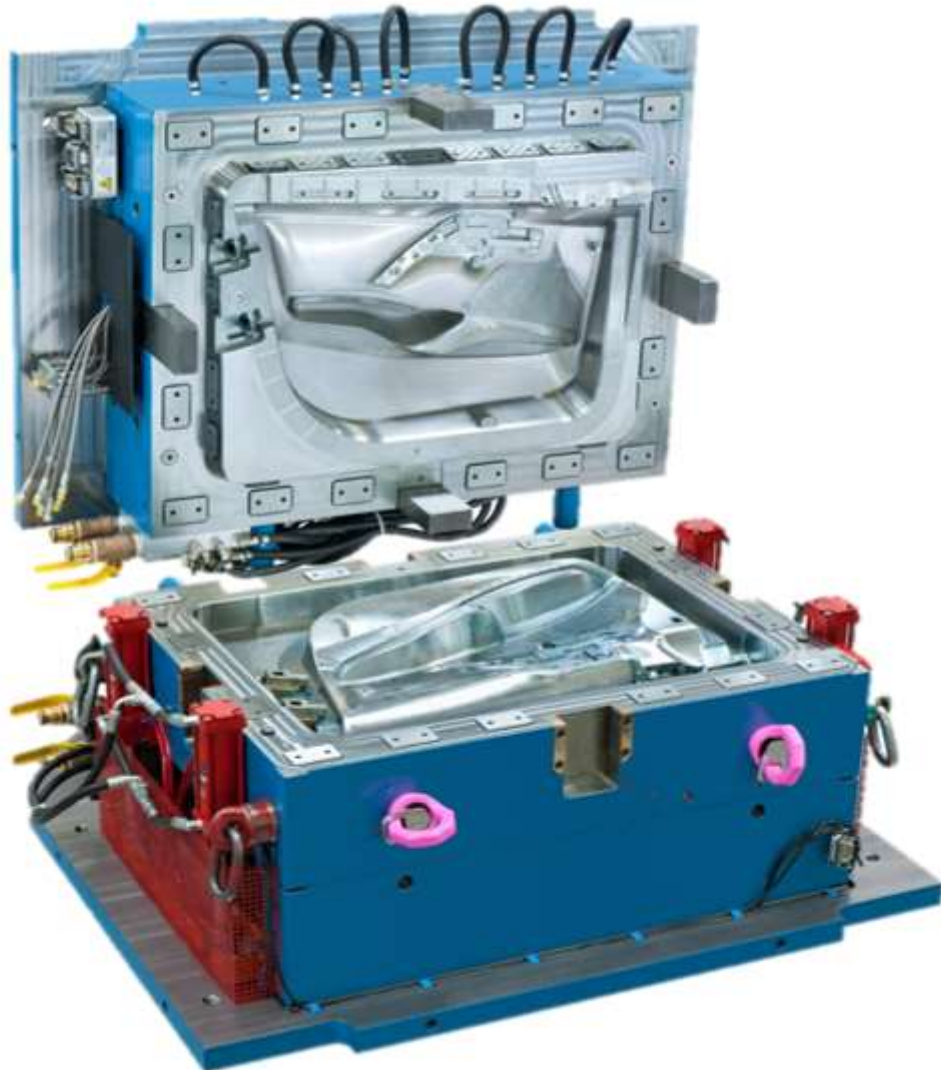
Elemento	Atuação
Cromo	Aumenta a resistência ao desgaste, calor e à corrosão. Adicionado em dobro em relação ao Níquel. É um elemento estabilizador de ferrita e portanto, reduz a estabilidade de austenita nos diagramas de transformação de fase (curvas TTT e CCT).
Manganês	É um importante dessulfurante e desoxidante durante a fundição. Aumenta a dureza e reduz a temperatura de início e fim da transformação da martensita, quando adicionado em teores de 11-14% aumenta a resistência ao desgaste. O Manganês atua como um elemento austenitizante, o que facilita a transformação martensítica e aumenta o volume de austenita retida quando adicionado em grandes quantidades.
Molibdênio	Aumenta a resistência à corrosão e abrasão. Atua como um refinador de grão e contrabalança a tendência da fragilidade de revenido. É um elemento estabilizador de ferrita.
Níquel	Aumenta a resistência ao impacto e à corrosão. Amplamente utilizado em componentes com espessuras maiores do que 400 mm. Quando adicionado em grande quantidade pode-se fabricar uma liga com coeficiente de expansão térmica muito próxima de zero. É um elemento que tende a estabilizar a fase austenita.

Fonte: (VILLARES METALS, 2022); (COSTA, 2008); (DIETER, 1981)

Atualmente, o aço AISI P20 é o mais utilizado nas indústrias de fabricação de moldes plásticos no Brasil, correspondendo a mais de 80% das vendas (SANT'ANNA, 2009). Esse número expressivo se deve ao fato do material apresentar bons resultados em

relação às propriedades mecânicas e resistência ao impacto da peça fabricada, quando comparado às ligas de alumínio e aço concorrentes (SANT'ANNA, 2009). Um exemplo de um molde confeccionado com o aço AISI P20 pode ser visualizado na Figura 1.

Figura 1: Molde Plástico de aço AISI P20



Fonte: Villares Metals, 2022

3.4 Tratamento Térmico

O tratamento térmico realizado em metais pode ser compreendido como transformações estruturais devido a um conjunto de operações de aquecimento e resfriamento ao qual o material é submetido. Todos os parâmetros dessas opções são controlados a fim de obter uma fase desejável com características específicas para a sua aplicação. A temperatura e o tempo são parâmetros que influenciam diretamente

a cinética da transformação. Os outros dois parâmetros (atmosfera de tratamento e velocidade de resfriamento) influenciam principalmente nas fases a serem formadas. (CHIAVERINI, 2003; COSTA e SILVA, 2011).

De acordo com Chiaverini (2003) os tratamentos térmicos têm como finalidade melhorar determinadas propriedades mecânicas e/ou físico-químicas, sendo estas:

Melhora da resistência a corrosão;

Melhora da resistência ao desgaste;

Melhor usinabilidade;

Remoção de tensões internas;

Aumento da resistência mecânica;

Aumento ou diminuição da dureza.

3.4.1 Têmpera

Para formar a estrutura martensítica revenida dos aços AISI P20 são necessários dois processos térmicos consecutivos. Um destes tratamentos é a têmpera, sendo esta responsável pela transformação martensítica em aços carbono que apresentam um teor de Carbono maior do que 0,3% em peso. A martensita é uma fase tetragonal que se forma ou por deformação em uma direção preferencial ou por resfriamento rápido, a porcentagem mínima de carbono está relacionada com as distorções que este elemento causa ao ocupar sítios tetraédricos e octaédricos, a presença deste elemento resulta em um maior estado de tensão na rede cristalina favorecendo a transformação martensítica. Contudo, ela só pode ser obtida quando o aço é submetido a um resfriamento com uma velocidade rápida o suficiente para evitar a ocorrência de transformações perlíticas e bainíticas. (CALLISTER, 2003)

Podem ser utilizados diferentes meios de têmpera para realizar a troca de calor com uma taxa de resfriamento compatível com a necessária para a transformação martensítica, sendo os mais comuns: água com sal (salmoura), água pura ou com polímeros em solução, ar atmosférico, atmosferas de nitrogênio, hélio ou argônio puro. Geralmente a têmpera utilizando óleo é a mais utilizada. Ainda assim a martensita obtida após a têmpera dificilmente é utilizada, visto que encontra com elevada dureza e baixíssima tenacidade para aços com um certo teor de carbono. Por conta disso o

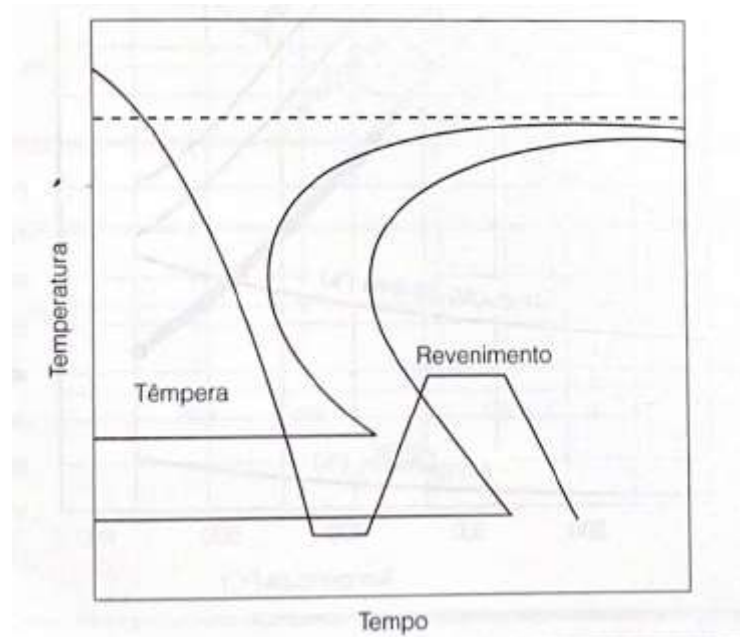
material ainda passa por outro tratamento térmico o qual é responsável por aumentar a tenacidade do aço temperado ao aliviar algumas das tensões internas, o aumento da ductilidade está associado a uma diminuição da dureza (FORTIS, 2009).

3.4.2 Revenimento

Este tratamento térmico consiste no aumento gradativo da temperatura com uma taxa de aquecimento constante, é de suma importância alcançar uma temperatura abaixo da temperatura crítica inferior de austenitização, a fim de evitar a transformação da martensita em austenita novamente, a faixa de temperatura mais utilizada é entre 150 e 700 °C. Após alcançar a temperatura de revenimento, se mantém nesta temperatura por minutos ou horas até se obter algum amolecimento, e em seguida se resfria o material até a temperatura ambiente (BELCHIOR, 2016). O ciclo de têmpera seguido de revenimento está demonstrado na Figura 2. A norma ASTM A681 para o aço AISI P20 especifica a necessidade do material ser revenido por um período de 2 h quando a temperatura do processo é de 552 °C ou 649 °C.

A diminuição da dureza é mais acentuada quanto maior for a temperatura e tempo de tratamento. Como comentado anteriormente, a martensita após a têmpera apresenta uma dureza elevada e com baixa tenacidade (frágil). A falta do processo de revenimento pode ocasionar a falha mecânica por conta do alto tensionamento interno natural da estrutura martensítica. Devido à baixa tenacidade da estrutura martensítica, a sua aplicação é impossibilitada sem uma posterior etapa de revenimento.

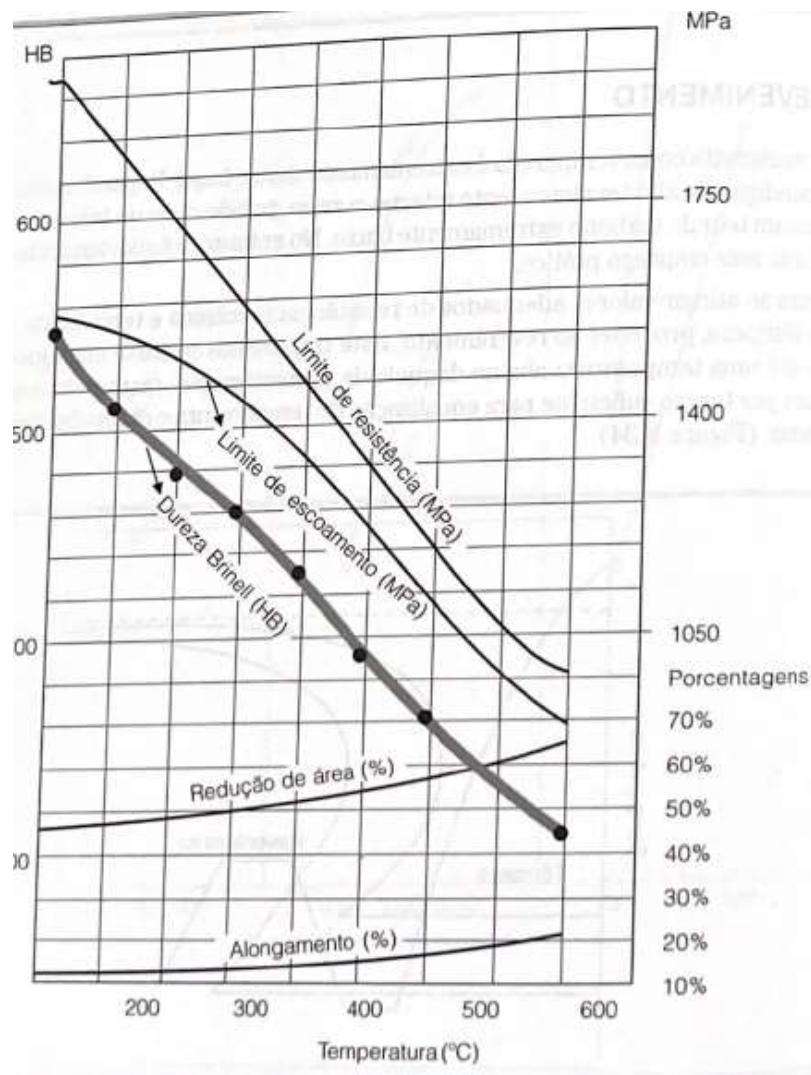
Figura 2: Desenho esquemático do ciclo de têmpera e revenimento.



Fonte: COSTA E SILVA (2011)

O efeito nas propriedades dos aços em função da temperatura pode ser observado na Figura 3, é notável a relação inversa de propriedades como resistência à tração, dureza e limite de escoamento com a redução de área do ensaio de impacto, alongamento e resistência ao impacto. Apesar da Figura 3 ser um estudo sobre o aço AISI 4340, este efeito da modificação das propriedades é uma característica reprodutível em quase todos os aços e suas ligas.

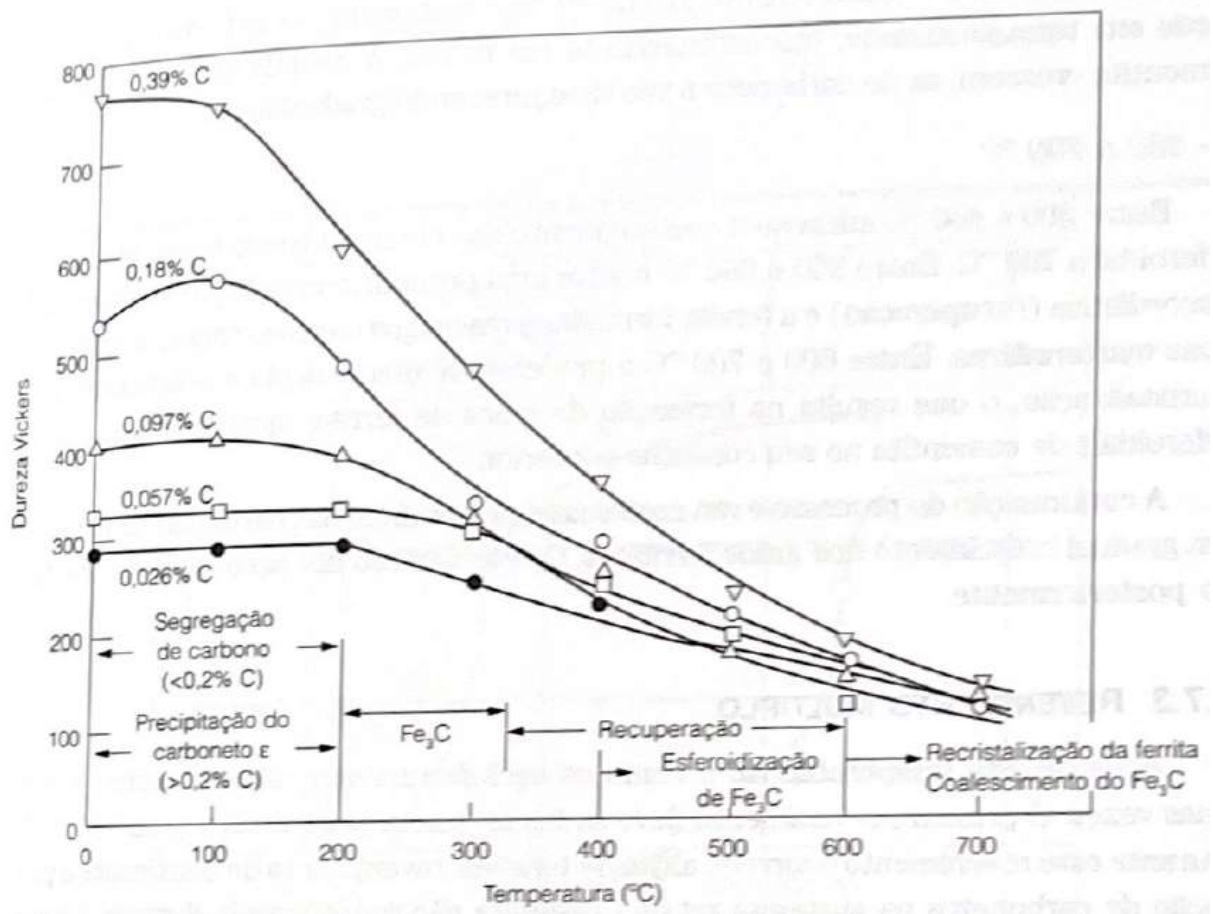
Figura 3: Efeito da Temperatura de Revenimento nas Propriedades Mecânicas do aço 4340



Fonte: COSTA E SILVA (2011)

O revenimento é responsável por fornecer para a martensita a energia necessária para que ocorra a difusão do carbono dos interstícios, ao sair da zona de supersaturação, ele se precipita na forma de carbonetos. Esta difusão e eventual precipitação é responsável pela modificação das propriedades do aço (Figura 4) (COSTA E SILVA, 2011).

Figura 4: Transformações do revenimento em aço carbono, aquecidos por uma hora.



Fonte: COSTA E SILVA (2011)

3.5 Ensaio de Impacto Charpy

Assim como outros ensaios o ensaio de Charpy tem suas vantagens e limitações. Algumas da vantagem são a fácil realização, obtenção de dados praticamente instantânea e previsão do comportamento do material quando solicitado dinamicamente, este último dado não pode ser obtido em ensaios de tração ou flexão que analisam o comportamento do corpo de prova quando solicitado com cargas estáticas. A limitação deste ensaio é a falta de dados do processo de fratura porque é medida apenas a energia total de ruptura do corpo de prova. (CALLISTER, 2003)

No ensaio de impacto Charpy o corpo de prova com formato paralelepípedo é entalhado em seu centro com um formato de V, o entalhe tem uma profundidade definida pela norma a ser seguida, sendo geralmente de 2mm como definido pela norma ASTM E23. Para a execução do ensaio é utilizado um pêndulo com comprimento da haste e massa do martelo conhecidos, ao acertar o corpo de prova

um sinalizador indica a energia absorvida durante o impacto. O resultado quantitativo é uma medição direta da energia necessária para causar a fratura do material (resiliência) e conseqüentemente pode ser utilizada para medir a resistência do material (CHAWLA, 1998).

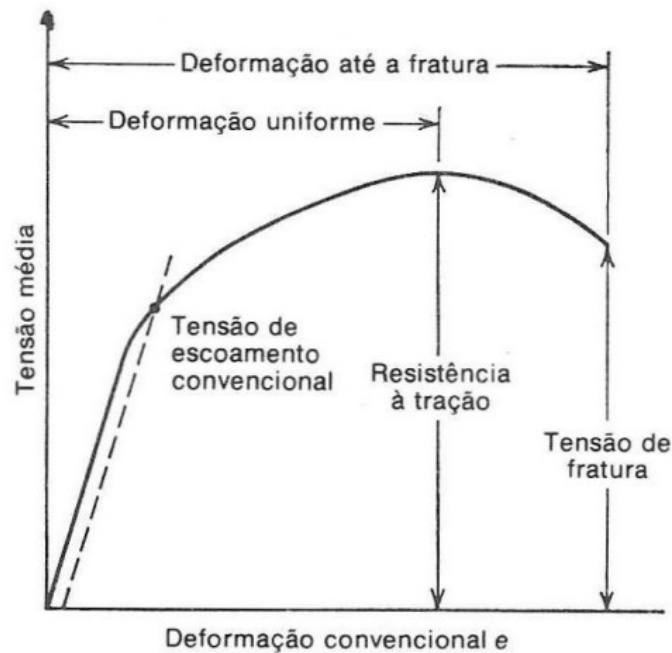
3.6 Ensaio de Tração

O ensaio de tração é realizado a partir da aplicação de uma carga crescente de tração axial que provoca uma tensão suficiente sobre o corpo de prova para deformá-lo elasticamente e plasticamente. A geometria do corpo de prova é pré-definida de acordo com as normas de ensaio de tração e, por conta desta padronização das dimensões, os resultados obtidos no ensaio se tornam confiáveis devido à alta reprodutibilidade. A partir da análise dos dados do ensaio, as propriedades mecânicas do material tornam-se conhecidas, possibilitando a seleção e dimensionamento de diversos materiais para uma determinada aplicação (COSTA E SILVA, 2011; CALLISTER, 2003).

3.6.1 Curva Tensão-Deformação

Todos os resultados do ensaio de tração são registrados automaticamente por um software integrado ao equipamento de ensaio na forma de carga ou força em função da deformação ou alongamento. Os dados registrados pelo equipamento são utilizados para gerar uma curva tensão-deformação como mostrada na Figura 5, onde também estão descritos os pontos mais importantes, como a tensão de escoamento convencional, a resistência à tração, a tensão de fratura e os eixos de tensão média e deformação convencional (DIETER, 1961).

Figura 5: Curva tensão-deformação



Fonte: Dieter (1961)

Os materiais metálicos, em sua maioria, apresentam um comportamento elástico caracterizado por uma deformação que é linearmente proporcional a tensão média, o valor de 0,005 é dito como uma média para este tipo de deformação elástica (não permanente quando a tensão é aliviada). Conforme o material continua sendo tracionado além deste ponto, a tensão deixa de ser proporcional à deformação e ocorre o que é definido como uma deformação plástica (permanente). A maioria dos metais exibem uma transição gradual do comportamento elástico para o plástico devido ao fenômeno do escoamento (CALLISTER, 2003).

A Tensão de escoamento convencional, também conhecida como limite de escoamento, é a tensão necessária para que o material seja deformado plasticamente até uma deformação especificada como de 0,002 e corresponde a uma interseção de uma linha paralela à linha retilínea correspondente ao comportamento elástico da curva (DIETER, 1961).

A Resistência a Tração é definido como a carga máxima dividida pela área inicial da seção perpendicular a carga aplicada. Este ponto é de importância para a engenharia porque até ele o comportamento mecânico é caracterizado por uma deformação uniforme ao longo de toda a região do CP de tração, após esta marca ocorre um fenômeno em materiais dúcteis de estiramento, é conhecido comumente

como empescoçamento e se caracteriza pela deformação ocorrer nesta região. A Tensão de Fratura corresponde a tensão aplicada no momento anterior a fratura (CALLISTER, 2003).

3.7 Preparação Metalográfica

A preparação metalográfica de amostras embutidas em baquelite envolve processos mecânicos por abrasão e processos químicos para que seja possível visualizar a microestrutura do material quando sob um microscópio óptico ou eletrônico de varredura. Neste trabalho será comentado o processo de lixamento, polimento e ataque químico para obtenção de micrografias por microscopia óptica.

3.7.1 Lixamento

Após o corte das amostras pode ocorrer a formação de defeitos visíveis ao olho nu como rebarbas, cantos vivos ou textura bruta com sulcos e/ou riscos. O processo de lixamento remove estes defeitos e reduz a profundidade dos mesmos para um patamar que é possível a completa remoção no processo seguinte de polimento da amostra.

Para a granulometria das lixas há a medida do tamanho de partícula conhecida como mesh, que designa a quantidade de partículas passantes por uma peneira com um determinado número de fios, ou seja, conforme maior é a numeração do mesh da lixa, menor é a granulometria da partícula passante (UFBA, 2022).

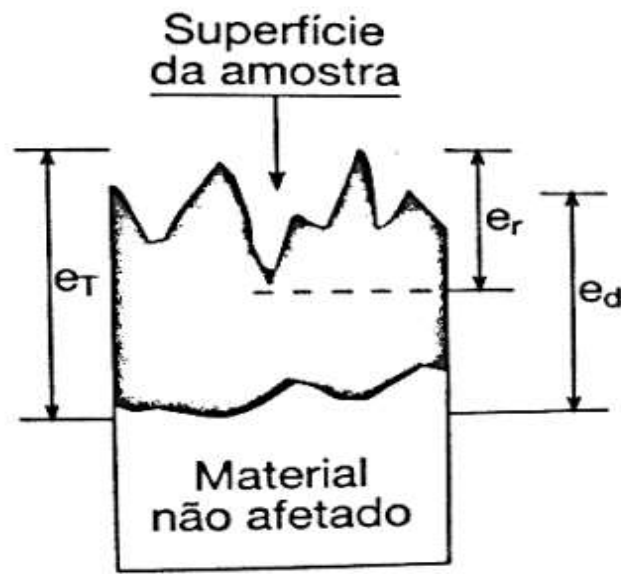
O lixamento é caracterizado pela utilização de lixas numa sequência que vai da mais abrasiva até a menos abrasiva, como por exemplo a rota: 100, 220, 320, 440, 500, 600, 800 e 1200 mesh. Os passes de lixa para lixa são realizados a fim de se reduzir gradativamente a profundidade dos riscos e sulcos até apresentarem uma dimensão igual à da granulometria da lixa 1200 da sequência apresentada. A preparação por lixamento tem como diretriz a norma internacional ASTM E3-11 (ASTM E 3 - 11, 2017)

3.7.2 Polimento

O polimento é um processo mais fino em relação ao lixamento para a preparação de amostras que serão analisadas por microscopia óptica ou eletrônica de varredura. A presença de partículas das lixas com granulometria grossa ou de outro material mais duro podem riscar a superfície a ser analisada da amostra durante o polimento, prejudicando a obtenção de micrografias representativas. O objetivo desta etapa é similar a anterior, porém visa remover completamente quaisquer riscos presentes na

amostra. A imagem apresentada na Figura 6 mostra um corte esquemático onde estão representadas as espessuras e_r (espessura rugosa), e_d (espessura deformada) e e_t (espessura polida). O intuito principal do polimento é se obter uma superfície lisa ao polir a parte rugosa e deformada (COLPAERT, 2008).

Figura 6: Corte esquemático de um material genérico a ser polido

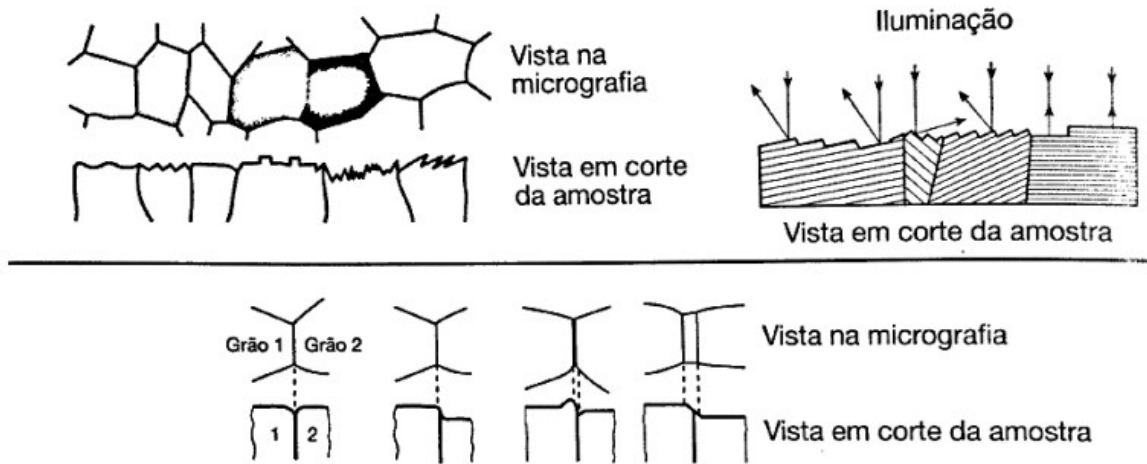


Fonte: Colpaert, 2008

3.7.3 Ataque químico

O ataque químico é um processo em que um dos objetivos é corroer a superfície polida para se criar um contraste entre fases tornando possível a visualização da estrutura presente no material. Após o polimento a superfície se encontra numa condição em que a luz será refletida quase por completo, sendo um dos principais motivos para este efeito o preenchimento dos contornos das estruturas com o próprio material durante o polimento. Este contraste permite a revelação da microestrutura presente na amostra analisada por meio da reflexão da luz em diferentes direções por diferença de nível entre fases (corrosão mais acentuada numa determinada fase) ou pela orientação da estrutura cristalina, ambos os casos estão demonstrados na Figura 7. (COLPAERT, 2008)

Figura 7: Contraste após ataque químico



Fonte: Colpaert, 2008

4 MATERIAL E MÉTODOS

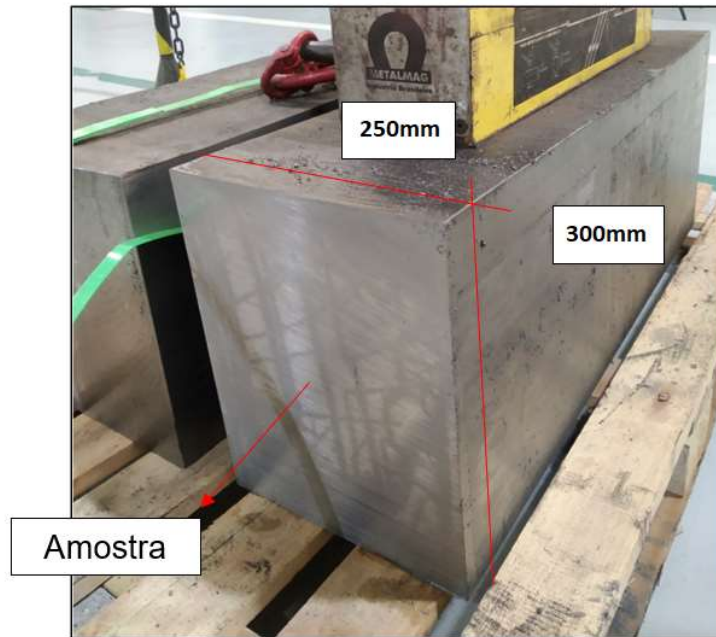
4.1 Material

O presente trabalho teve duas placas retiradas de um lingote laminados a quente de aço AISI P20 modificado produzido pela Villares Metals. Os blocos retangulares de 300 mm de altura por 250 mm de largura (Figura 8) são comercializados para a aplicação como moldes plásticos, onde de acordo com a norma SAE é demandado um limite de resistência entre 540 MPa e 1050 MPa para realizar a injeção de plásticos.

O aço temperado e revenido com recorte de espessura de 10 mm pode ser visualizado na Figura 9, e sua composição química encontra-se na Tabela 4.

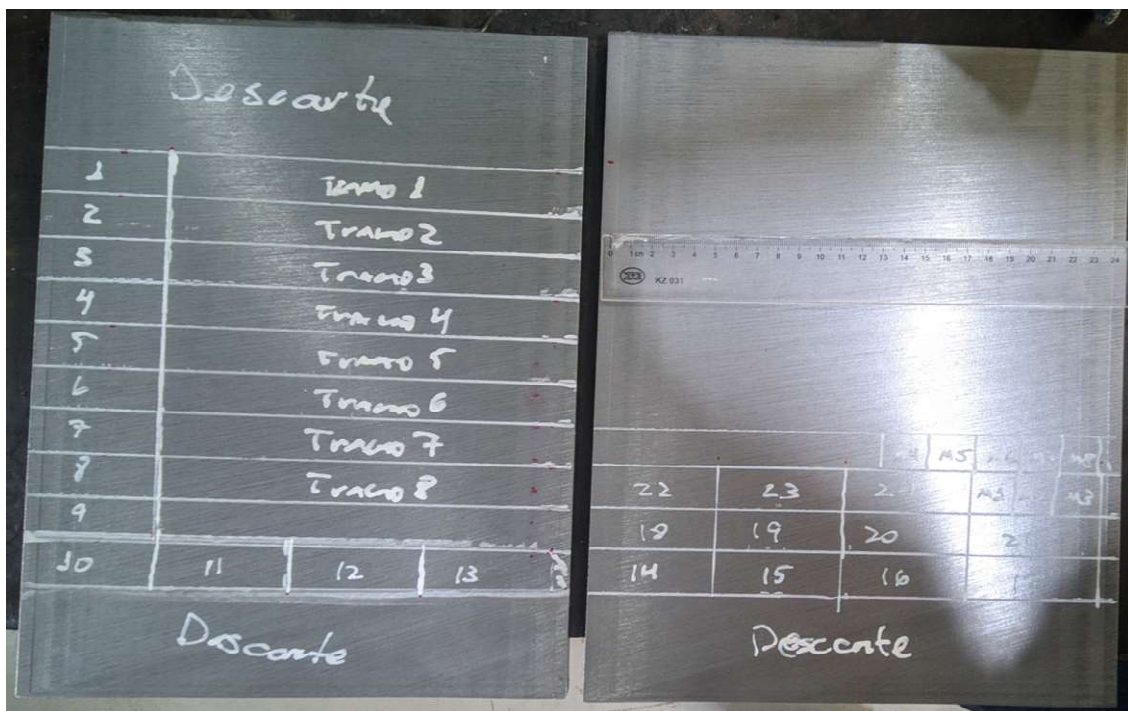
Posteriormente, as amostras passaram por diferentes processos de tratamento térmico, visando estudar as modificações de propriedades mecânicas.

Figura 8 : Bloco laminado de 300 mm x 250 mm



Fonte: Autor

Figura 9: Recorte da barra original



Fonte: Autor

Tabela 4: Composição química do aço P20 modificado (% em peso)

Elemento	Carbono	Silício	Manganês	Fósforo	Enxofre
Valor Nominal	0,23-0,30	0,19- 0,35	1,50 - 1,75	0,00 - 0,02	0,01 - 0,02
Valor Obtido	0,26	0,25	1,60	0,00	0,01

Elemento	Cobalto	Cromo	Molibdênio	Níquel	Vanádio
Valor Nominal	0,00 - 0,40	1,70 - 2,10	0,60 - 0,85	0,50 - 0,85	0,05 - 0,15
Valor Obtido	0,10	1,80	0,70	0,60	0,08

Fonte: Villares Metals

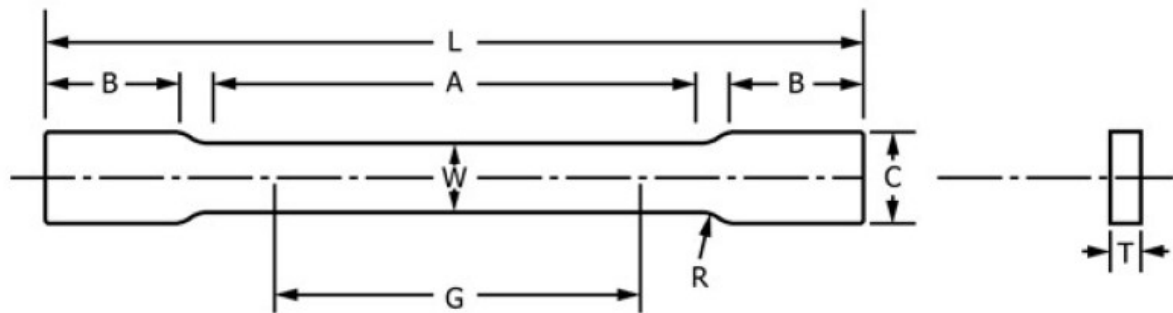
4.2 Métodos

4.2.1 Corpo de prova para ensaio de tração

A partir da placa retangular foram confeccionados 8 corpos de prova para o ensaio de tração.

A geometria dos corpos de prova (Figura 10) para o ensaio de tração é de acordo com a norma técnica ASTM A370. Já as dimensões dos parâmetros utilizados podem ser visualizadas na Tabela 5.

Figura 10: Geometria dos corpos de prova de ensaio de tração



Fonte: Reprodução da ASTM A370

Tabela 5: Dimensões dos parâmetros da Figura 2

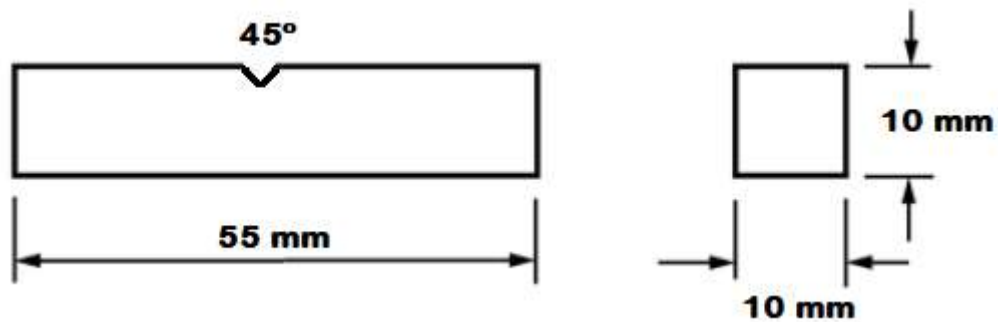
Parâmetro	Valor (mm)
G - Calibre	50
W - Largura	40
T - Espessura	Espessura do material
R - Raio do fillet	13
L - Comprimento geral	200
A - Comprimento da seção reduzida	60
B - Comprimento da seção de agarre	50
C - Largura da seção de agarre	50

Fonte: Reprodução da ASTM A370

4.2.2 Corpo de prova para ensaio de impacto

Para o ensaio de impacto (Charpy) foram cortados 24 paralelepípedos a partir da barra original, a fim de se utilizar 3 corpos de prova para cada condição de tratamento térmico. A norma ASTM E 23-01 (2001) determina a geometria utilizada, de acordo com este padrão para ensaio, as amostras necessitam possuir um formato retangular com dimensões de 10 x 10 x 55 mm e um entalhe no centro da face com a maior dimensão, conforme exibido na Figura 11.

Figura 11: Corpo de prova para ensaio Charpy



Fonte: Autor

4.2.3 Tratamento Térmico

As amostras passaram por diferentes processos de tratamento térmico de têmpera e de revenimento, as condições dos tratamentos (Tabela 6) foram alteradas visando modificar as propriedades mecânicas dos corpos de prova a fim de se compreender o comportamento mecânico para cada situação.

Conforme indicado na Tabela 6, a austenitização durante uma hora seguida de têmpera em óleo foi realizada em duas temperaturas distintas (800°C e 850°C) em 4 amostras cada. Já para o revenimento foram utilizadas 4 condições diferentes de tratamento, sendo que cada uma dessas condições foi replicada para as amostras austenitizadas em temperatura de 800 °C e 850 °C. É importante salientar que os resfriamentos das amostras revenidas foram realizados ao ar, externamente ao forno. Todos os tratamentos térmicos foram realizados pela Villares Metals.

Tabela 6: Parâmetros de tratamento térmico

Condição	Austenitização	Revenimento
1	800°C/1h Têmpera em óleo	550°C por 2h + Resfriamento ao ar
2		550°C por 2h + Resfriamento ao ar + 550°C por 2h + Resfriamento ao ar
3		600°C/2h + Resfriamento ao ar
4		600°C/2h + Resfriamento ao ar + 600°C/2h + Resfriamento ao ar
5	850°C/1h Têmpera em óleo	550°C/2h + Resfriamento ao ar
6		550°C/2h + Resfriamento ao ar + 550°C/2h + Resfriamento ao ar
7		600°C/2h + Resfriamento ao ar
8		600°C/2h + Resfriamento ao ar + 600°C/2h + Resfriamento ao ar

Fonte: Autor

4.2.4 Ensaio de Impacto Charpy

Para o ensaio de impacto Charpy, utilizou-se a norma ASTM E23-01 em conformidade com os métodos de teste de impacto para barras entalhadas dos materiais metálicos. O equipamento Equilam EQIM-PNE-450 foi utilizado para realizar os testes com um pêndulo capaz de entregar uma energia de impacto de 450J. A temperatura do ensaio foi de -18 °C.

Para cada condição de tratamento foram ensaiadas 3 amostras com o intuito de se obter uma média com desvios representativos do valor da energia absorvida.

4.2.5 Ensaio de Tração

Para a realização do ensaio de tração foram utilizados corpos de prova com as dimensões especificadas pela norma ASTM A370 (método de ensaio B), vale ressaltar que as amostras foram previamente tratadas de acordo com cada condição de tratamento térmico definidas para este estudo.

O equipamento onde os ensaios foram realizados foi uma máquina para ensaio de tração INSTRON 300LXU2315 (Figura 12). O ensaio foi realizado na posição longitudinal.

Nos ensaios foram analisados os Limites de Resistência, Limites de escoamento e a Redução de Área percentual dos corpos de prova.

Figura 12: Instron Série LX para ensaios



Fonte: INSTRON, 2022

4.2.6 Microscopia Óptica

Uma amostra para cada condição de tratamento térmico de têmpera e revenimento foram recebidas para a realização da preparação metalográfica, de acordo com as seguintes etapas:

Na primeira etapa foi realizado o embutimento das amostras em baquelite. Na segunda etapa, foi executado o lixamento da face redonda com lixas de 180, 300, 600

e 1200 mesh na lixadeira e politriz modelo Aropol VV da Arotec (Figura 13). Na terceira etapa, foi realizado o polimento manual com panos de polimento Arotec com alumina de 3 μ m.

Com o intuito de se obter um contraste entre as fases a fim de revelar a microestrutura, foi utilizado o reagente Vilella (ácido hidrocloreídrico (5mL) + ácido pícrico (2g) + Álcool (100mL)) com um tempo de imersão na solução por cerca de 30 segundos.

Figura 13: Politriz / Lixadeira metalográfica Aropol VV-PU.



Fonte: Site de Descrição de Produto da Arotec (AROTEC, 2022)

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após as amostras serem submetidas aos diferentes tratamentos térmicos de têmpera em óleo e resfriamento ao ar conforme a Tabela 7, elas foram caracterizadas por microscopia óptica e testadas mecanicamente de acordo com os seguintes ensaios:

- Microscopia óptica para caracterizar a microestrutura;
- Ensaio de Tração de acordo com a norma ASTM A370;
- Ensaio de Impacto Charpy de acordo com a norma ASTM E23-01.

Tabela 7: Condições de Tratamento Térmico das Amostras confeccionadas para a Metalografia

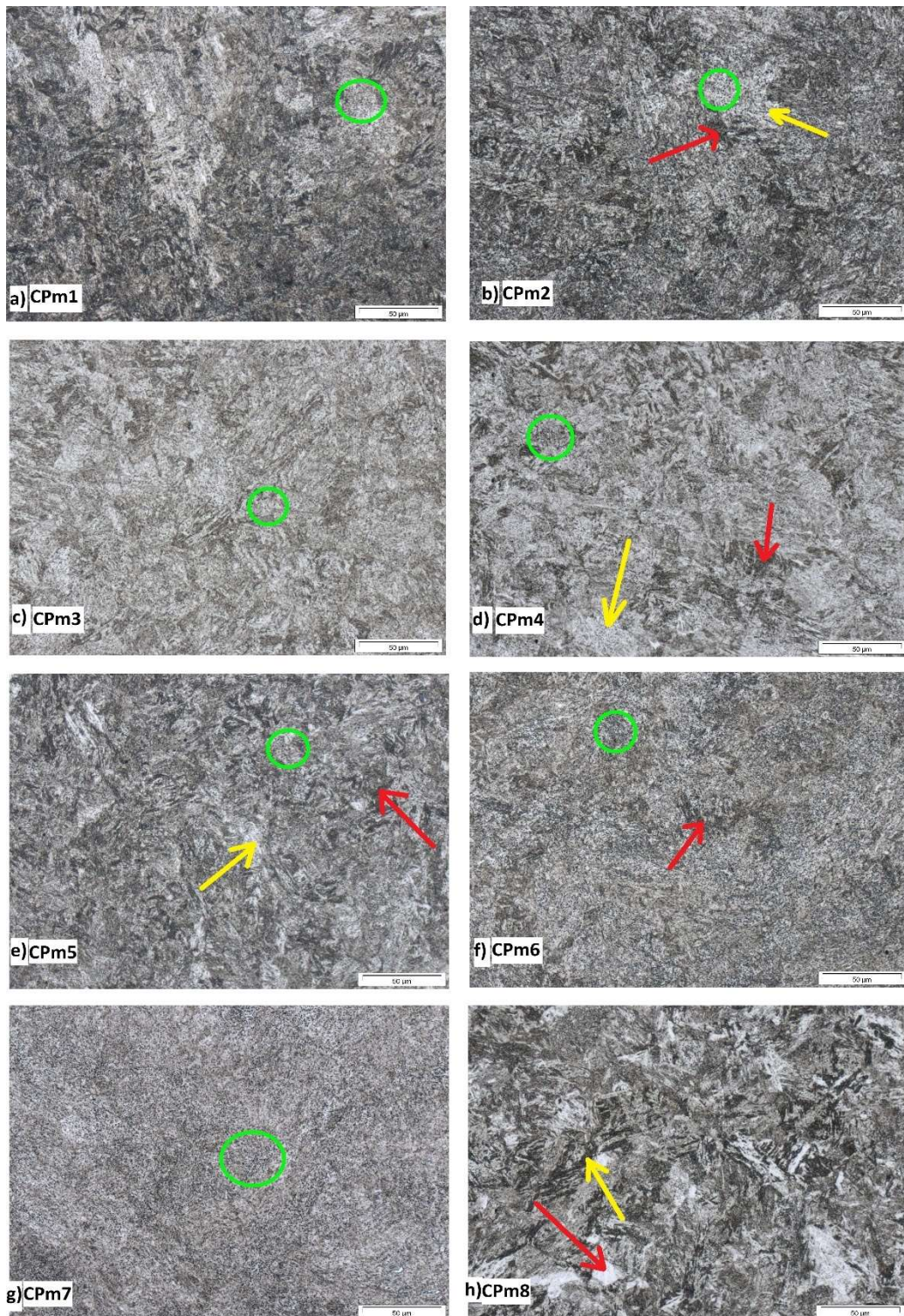
Amostra	Temperatura de Austenitização (°C)	Temperatura de Revenimento (°C)	Duplo Revenimento
CPm1	800	550	Não
CPm2	800	600	Não
CPm3	800	550	Sim
CPm4	800	600	Sim
CPm5	850	550	Não
CPm6	850	600	Não
CPm7	850	550	Sim
CPm8	850	600	Sim

Fonte: Autor

5.1 Microscopia Óptica

A Figura 14 apresenta as figuras obtidas pelo microscópio óptico.

Figura 14: Microscopia Óptica das Amostras a) CPm1; b) CPm2; c) CPm3; d) CPm4; e) CPm5; f) CPm6; g) CPm7; h) CPm8.



Microscopia Óptica das Amostras: a) CPm1; b) CPm2; c) CPm3; d) CPm4; e) CPm5; f) CPm6; g) CPm7; h) CPm8

- Cementita
- Carbonetos precipitados
- Ferrita

Fonte: Autor

De acordo com Toledo (2019) as fases identificadas para o aço AISI P20 podem ser associadas a quantidade de luz refletida tornando possível uma análise qualitativa de caracterização. A fase ferrítica é representada pelas regiões brancas/acinzentadas indicadas pelas setas em amarelo nos itens b), d), e) e h), a perlita é representada pela região de mistura entre tonalidades de cinza e preto e as fases com maior teor de carbono são as regiões pretas das micrografias indicadas pelas setas em vermelho nos itens b), d), e), f) e h).

Considerando esta análise, as amostras CPm4 e CPm8, que foram tratadas com revenimento duplo à 600 °C, demonstraram um tamanho médio de grão aparentemente maior, indiciado pela menor densidade de contornos em função do tratamento térmico, sendo mais evidente na amostra CPm8 onde o número total de precipitados se apresentam diminuídos junto ao maior crescimento de fases observado dentre todas as amostras.

Para todos os corpos de prova, quando realizado o duplo revenimento, a quantidade de precipitados de carbonetos aumentou (pontos pretos circulados na cor verde nos itens (a) até o (g)).

É possível observar um aumento aparente da matriz martensítica revenida entre as amostras CPm1 e CPm2 e entre as amostras CPm3 e Cpm4 duplamente revenidas, a matriz é composta pelas fases indicadas pelas setas vermelhas e amarelas na Figura 14. Este aumento resulta em um menor volume total de contornos de grão dentro da rede cristalina do material.

Os resultados observados estão coerentes com a faixa de temperatura escolhida para os tratamentos de revenimento, pois ocorre ativação térmica suficiente para os átomos de carbono supersaturados da martensita se difundirem e precipitarem como carbonetos. Podem ocorrer também o coalescimento e esferoidização da cementita e carbonetos junto a recuperação e recristalização da ferrita (COSTA E SILVA, 2011).

5.2 Ensaio de Tração

As 8 amostras tratadas termicamente e divididas em dois conjuntos foram submetidas ao ensaio de tração, denominados como Grupo 1 e Grupo 2, sendo diferenciados pela temperatura de austenitização a 800 °C e 850 °C respectivamente. Os resultados obtidos podem ser observados na Tabela 8 abaixo.

Tabela 8: Resultados obtidos pelo ensaio de tração

Grupo	Amostra	Limite de Resistência (MPa)	Limite de Escoamento 0,2% (Mpa)	Alongamento (%)	Redução de Área (%)	Temperatura de Revenimento (°C)	Duplo Revenimento
1	CPt1	1274	1167	12,3	41,1	550	Não
1	CPt2	1183	1070	13,8	45,2	600	Não
1	CPt3	1319	1182	13,1	43,9	550	Sim
1	CPt4	1031	936	15,7	54,3	600	Sim
2	CPt5	1323	1183	13,9	47,1	550	Não
2	CPt6	1115	1029	14	51,2	600	Não
2	CPt7	1264	1157	12,7	45,2	550	Sim
2	CPt8	1155	1045	15	54	600	Sim

Fonte: Autor

Nota-se que, de uma maneira geral, o aumento da temperatura de revenimento resulta numa diminuição evidente tanto do Limite de Resistência (LR) quanto do Limite de Escoamento (LE), independente do corpo ensaiado ter passado pelo processo de duplo revenimento ou não.

As amostras com tratamento térmico a 600 °C (amostras com número de identificação par) apresentaram LR médio de 1121 ± 57 MPa e LE médio de 1020 ± 26 MPa, já as amostras com tratamento térmico à 550 °C (número de identificação ímpar) apresentaram LR médio de 1295 ± 51 Mpa e LE médio de 1172 ± 11 MPa, um aumento de 50 °C no processo de revenimento reflete em um efeito de redução do LR de -16% e do LE de -15%. A média entre todos os pares onde a temperatura de revenimento foi aumentada em relação a amostra anterior, CPt1 e CPt2 por exemplo, foi de 13% tanto para o LE quanto para o LR.

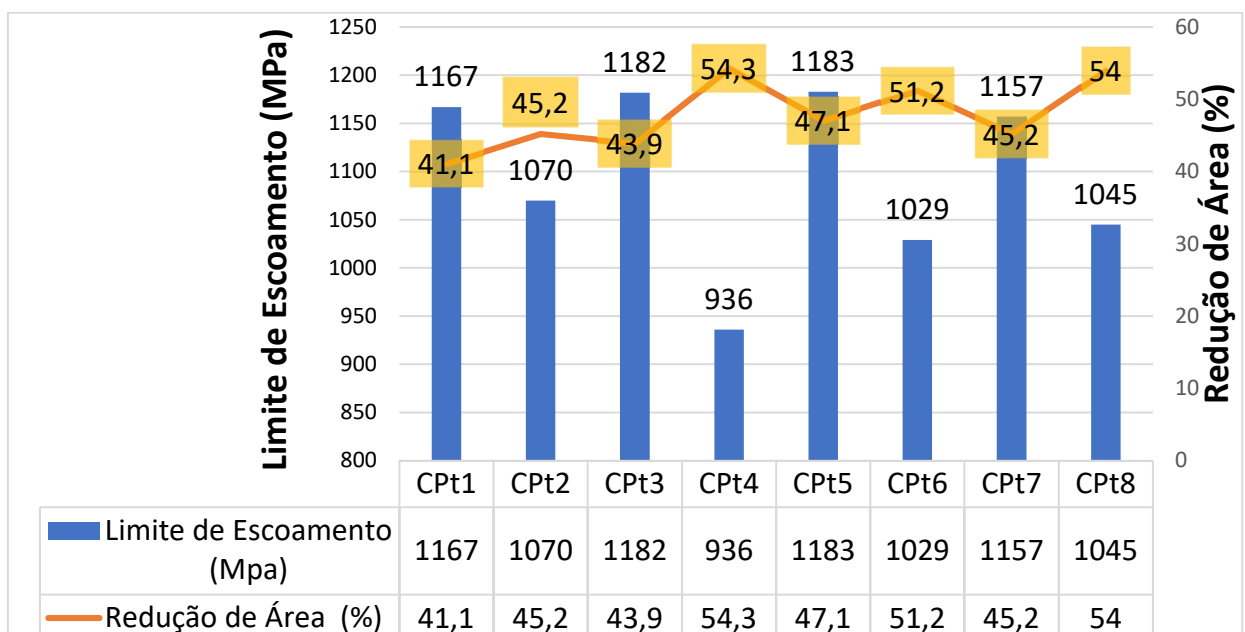
O aumento da matriz martensítica observado nas micrografias evidenciaram um crescimento da matriz martensítica dos pares de amostras CPt1+CPt2, CPt3+CPt4, CPt5+CPt6 e CPt7+CPt8, o crescimento da matriz resultou em um menor volume de contornos de grão que atuam como barreiras ao deslocamento das discordâncias, isto é, ocorre a redução do Limite de Resistência e Limite de Escoamento devido ao fenômeno de encruamento (COSTA e SILVA, 2011; DIETER, 1961).

Ao se comparar as amostras do CPt1 (Grupo 1) e CPt5 (Grupo 2), é possível observar um aumento de 3,7% do Limite de Resistência da amostra CPt5 em relação a CPt1,

conforme mencionado anteriormente, o único parâmetro alterado entre elas foi a temperatura de austenitização. Há uma correlação desta temperatura com a temperabilidade do aço quando se efetua a têmpera, a temperabilidade de um aço afeta a espessura do material que sofre uma transformação martensítica por completo, com isso, o revenimento na temperatura de 550 °C pode não ter sido capaz de fornecer energia térmica suficiente para os átomos de carbono e se difundirem pela microestrutura a fim de aliviar as tensões decorrente da têmpera por conta da maior presença desses elementos intersticiais na estrutura martensítica, outro motivo para esta discrepância de comportamento pode ser devido aos elementos de liga do aço que apresentam uma influência direta no revenimento por serem capazes de causar um endurecimento secundário no material. (CHIAVERINI, 2008; COSTA E SILVA, 2011; FORTIS, 2009). A mesma comparação entre outras duplas de amostras com temperatura de alívio de tensões a 600 °C ou duplo revenimento não demonstram um comportamento parecido sempre sendo observado um decréscimo dos valores dos limites de escoamento e resistência.

Na Figura 15 é possível se observar graficamente a correlação negativa entre o Limite de Escoamento e a Redução de Área para todas as amostras, pois quando se aumenta a temperatura de revenimento das amostras, independentemente se a amostra foi duplamente revenida ou não.

Figura 15: Gráfico e Tabela da relação entre Limite de Escoamento (MPa) e Redução de Área (%) das amostras CPt1, CPt2, CPt3, CPt4, CPt5, CPt6, CPt7 e CPt8.



Fonte: Autor

Os duplos revenimentos se mostraram eficientes para aliviar as tensões internas do material e aumentar a ductilidade das amostras, o material duplamente revenido é preferível quando se trata de aços ferramenta, em geral para garantir a tenacidade e sua estabilidade dimensional ao remover austenita retida presente na peça, é desejável a completa remoção desta estrutura metaestável retida na matriz martensítica pois, por se tratar de uma fase instável, ela pode se transformar em martensita quando o material é submetido a esforços mecânicos capazes de causar deformação plástica. A austenita e a martensita apresentam estruturas cristalinas diferentes e, dessa forma, há um aumento de volume quando a fase retida se transforma em martensita. Caso não seja realizado o revenimento, a transformação acarreta um aumento da magnitude das tensões internas, podendo formar e propagar trincas que comprometem a integridade estrutural do aço (SILVA, 1997).

5.3 Ensaio de Impacto Charpy

Para o ensaio de impacto, na Tabela 9 se encontra os valores da média e o desvio padrão da energia absorvida para cada tratamento térmico.

Tabela 9: Valores de Absorção Média encontrados no Ensaio Charpy e parâmetros de tratamento térmico de cada trio de amostras

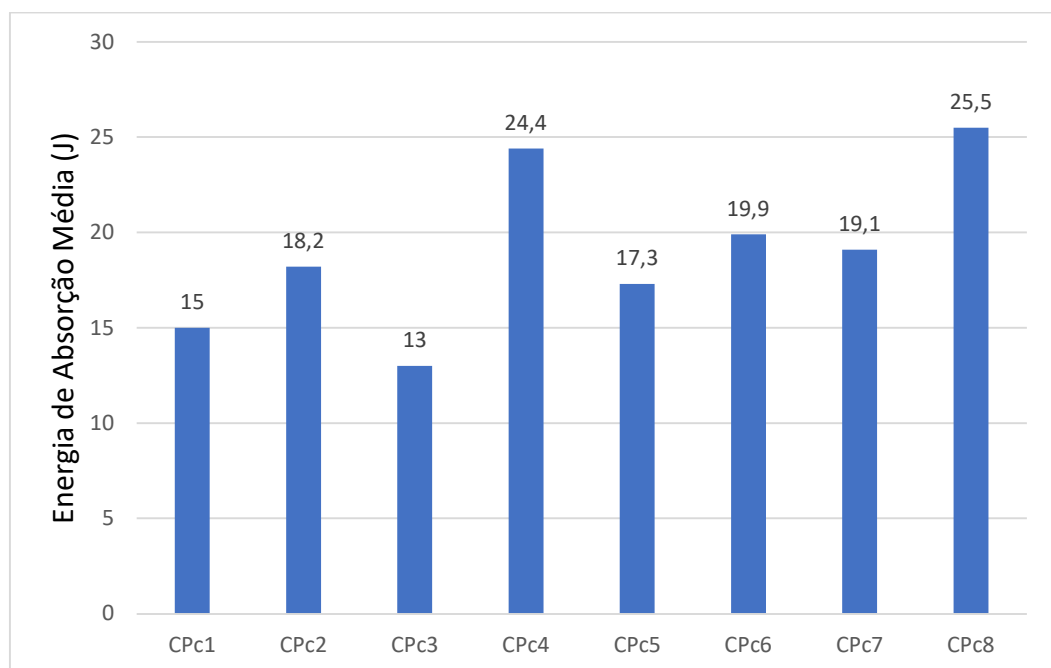
Amostra	Energia de Absorção Média (J)	Desvio padrão (J)	Temperatura de Austenitização (°C)	Temperatura de Revenimento (°C)	Duplo Revenimento
CPc1	15	1,4	800	550	Não
CPc2	18,2	0,5	800	600	Não
CPc3	13	4,4	800	550	Sim
CPc4	24,4	0,6	800	600	Sim
CPc5	17,3	4,4	850	550	Não
CPc6	19,9	3,3	850	600	Não
CPc7	19,1	0,5	850	550	Sim
CPc8	25,5	2,1	850	600	Sim

Fonte: Autor

Pela Tabela 9 apresentada se nota que, as amostras com temperatura de austenitização a 850 °C apresentaram um aumento significativo na absorção média representando um ganho de tenacidade. Na Figura 16 o ganho de absorção para os pares CPc1 e CPc2, CPc3 e CPc4, CPc5 e CPc6, CPc7 e CPc8 fica evidente sendo

que para essas duplas a diferença entre elas é o aumento da temperatura do revenimento, o aumento médio entre os pares mencionados foi de 39%. Para as amostras que foram tratadas numa temperatura de austenitização de 850 °C observou-se uma maior energia de absorção, isso é evidenciado principalmente nas entre as amostras CPc1 com a CPc5, com uma diferença de +15% da energia para o CPc5, e também entre as amostras CPc3 e CPc7 onde esta diferença foi de +47% para a amostra CPC7.

Figura 16: Gráfico de comparação da Energia de Absorção Média (J)



Fonte: Autor

De acordo com Callister (2003), a temperatura de austenitização afeta de modo significativo a tenacidade ao impacto e que o duplo revenimento contribui para esse ganho. Com essa alteração, a energia para causar uma fratura diminui, indicando uma influência do crescimento dos grãos da matriz à medida em que se eleva a temperatura de austenitização.

6 CONCLUSÕES

Os resultados experimentais obtidos das análises metalográficas demonstraram estruturas mais grosseiras do aço AISI P20 modificado conforme se eleva a temperatura de austenitização e a temperatura de revenimento.

Para os ensaios de tração foram indicados aumentos de ductilidade correlacionado negativamente com os Limites de escoamento e com os Limites de Resistência, observa-se uma diminuição média de 13% desses limites quando se eleva em 50 °C a temperatura de revenimento.

O comportamento térmico de aumento da ductilidade mostra-se mais acentuado para as amostras tratadas a uma temperatura de revenimento maior, onde a partir dos ensaios de impacto se verifica um efetivo ganho de tenacidade, pelos resultados obtidos o aumento da temperatura de 550 para 600 °C demonstra um aumento médio de 39% da absorção média de energia (J), também verifica-se que essa influência direta da temperatura com a tenacidade é válida tanto para o caso de revenimento único quanto para o caso de revenimento duplo, o que mostra uma estabilidade da tenacidade quanto a uma possível fragilização do revenido nesta faixa de temperatura.

As amostras que passaram por austenitização a 850 °C demonstram resultados da absorção média de energia superiores quando comparados a temperatura de 800 °C, a diferença entre as amostras com um único revenimento é de +15% e para as amostras com duplo revenimento esta diferença é de +47%.

Os objetivos deste trabalho foram cumpridos, uma vez que, o AISI P20 modificado e tratado com tratamentos térmicos distintos de têmpera e revenimento apresenta um bom ganho de resistência mecânica ao mesmo tempo em que a sua tenacidade não é prejudicada, mas sim incrementada.

7 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Com base nos resultados e discussões desse trabalho, uma proposta de trabalho futuro seria:

- Verificar por meio da espectroscopia de energia dispersiva de raios-X (EDS) no microscópio eletrônico de varredura (MEV) a composição química das fases encontradas após os tratamentos térmicos;
- Verificar o comportamento do material para outras faixas de temperatura de tratamento térmico;
- Verificar a dureza do material para todas as faixas de temperatura.

8 REFERÊNCIAS

- ASTM. A370 - 20. **American Standard for Testing Materials. Standard Test Method and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products.**, EUA: ASTM, 2020
- ASTM A681 - 08. **Standard Specification for Tool Steels Alloy**
- ASTM. E 23 - 01. **American Standard for Testing Materials. Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials.** EUA: ASTM, 2001
- ASTM. E 3 - 11. **American Standard for Testing Materials. Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens.** EUA: ASTM, 2017
- AROTEC, 2022. **Aropol-VV - Arotec Indústria e Comércio.** Disponível em: <<http://www.arotec.com.br/mnu-lado-metalografia/mnu-lado-preparamostras/mnu-lado-lixadeiras/mnu-lado-aropolvv>>. Acesso em: 13/10/2022
- BELCHIOR, Carlos Marcelo. **Desenvolvimento de Aço Baixa Liga para Componentes do Sistema de Choque e Tração em Vagões Ferroviários.** Lorena, 2016.
- BHADESHIA, H. K. D. H. **Bainite in Steels - 2nd Edition;** Acta Metallurgica, 2001
- BLACK, J. T.; Kohser, Ronald A. **DeGarmo's Materials and Processes in Manufacturing** (em inglês). [S.I.]: John Wiley & Sons, ul. 2020.
- CALLISTER, Willian D., **Ciência e Engenharia de Materiais**, Sexta Edição 2003.
- CHIAVERINI, V. **Aços e Ferros Fundidos: características gerais, tratamentos térmicos, principais tipos.** 7 ed. ampl. rev. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2008.
- COLPAERT, H. 2008. **Metalografia dos Produtos Siderúrgicos Comuns.** São Paulo: Blucher, 2008.
- COSTA, E. M. **Classificação de Aços.** Departamento de Engenharia Mecânica. Pontifica Universidade Católica do Rio Grande do Sul, 2008.
- COSTA E SILVA, A. L. V., P. R. **Aços e ligas especiais.** 3 ed., São Paulo: Blucher, 2011
- DIETER, George Elwood. **Metalurgia Mecânica.** 2. ed. Rio de Janeiro, RJ: Editora Guanabara Koogan S.A, 1961. 650 p.

FORTIS, C.; KISS, F.J. **Metalografia e Tratamentos Térmicos de Aços e Ferros Fundidos**. 1 a. Ed. 2009.

INNOVA, 2019. Manual de injeção. Disponível em: <https://innova.com.br/wp-content/uploads/2019/06/manual-de-injecao.pdf>. Acesso em 11/11/2022

INSTRON, 2022. **Instron Industrial Series LX Models - Instron**. Disponível em: <<https://www.instron.com/en/products/testing-systems/universal-testing-systems/high-force-universal-testing-systems/static-hydraulic/lx>>. Acesso em: 05/10/2022

MEYERS, Marc A e CHAWLA, Krishan Kumar. **Mechanical Behaviors of Materials**. 1998

PORTER, Dylan, 2022. **Wrong Material = Wrong Heat Treatment | 2016-11-03 | Industrial Heating**. Disponível em: <<https://www.industrialheating.com/articles/93145-wrong-material-wrong-heat-treatment>>. Acesso em: 13 out. 2022.

RUBIN, L. L.. **ESTUDO DE VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA DE SUBSTITUIÇÃO DE PROCESSOS DE INJEÇÃO PLÁSTICA**. 5pFEPI - Itajubá, 2016.

SANT'ANNA, J. P. **Aços Especiais**. Revista Plástico Moderno. São Paulo, n. 414, mar. 2009.

SILVA, V. F. Influência da Austenita retida no crescimento de trincas curtas superficiais por fadiga em camada cementada de aço SAE 8620. 1997. 3p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Universidade de São Paulo, SP, 1997.

UFBA, 2022. **Tabela Conversão Mesh**. Disponível em: <http://www.transportedegraneis.ufba.br/arquivos/Tabela_Mesh.PDF>. Acesso em: 05/10/2022

VILLARES METALS. 2022 **Aços ferramenta para moldes plásticos**. Disponível em: <<http://www.villaresmetals.com.br/pt/Produtos/Acos-Ferramenta/Moldes-Plasticos/VP20ISO>>. Acesso em: 20/06/2022

KOPPE, R. F. **OS CUSTOS DE FABRICAÇÃO DE UMA INDÚSTRIA DO SETOR DE PLÁSTICOS**. Curitiba, 2012. 39p