

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO DE MECÂNICA
ENGENHARIA MECÂNICA

DAVID MILLÉO DA SILVA

**AVALIAÇÃO DO GANHO DE RESISTÊNCIA MECÂNICA VERSUS FRAGILIDADE
DO AÇO 1020 ENDURECIDO POR TÊMPERA E REVENIDO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PONTA GROSSA

2014

DAVID MILLÉO DA SILVA

**AVALIAÇÃO DO GANHO DE RESISTÊNCIA MECÂNICA VERSUS FRAGILIDADE
DO AÇO 1020 ENDURECIDO POR TÊMPERA E REVENIDO**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado como requisito parcial à
obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Mecânica, da Coordenação
de Engenharia Mecânica -COMEC- da
Universidade Tecnológica Federal do
Paraná, Campus Ponta Grossa

Orientadora: Prof^a. Ms. Sandra Mara
Kaminski Tramontin

PONTA GROSSA

2014



TERMO DE APROVAÇÃO

AVALIAÇÃO DO GANHO DE RESISTÊNCIA MECÂNICA VERSUS FRAGILIDADE DO AÇO 1020 ENDURECIDO POR TÊMPERA E REVENIDO

por

DAVID MILLÉO DA SILVA

Este Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) foi apresentado em 14 de agosto de 2014 como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Sandra Mara Kaminski Tramontin
Prof.(a) Orientador(a)

Alisson Kwiatkowski da Silva
Membro titular

Oscar Régis Júnior
Membro titular

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

Dedico este trabalho aos meus pais e minha família, em agradecimento pelo apoio e carinho durante toda a minha vida e principalmente durante o tempo de minha formação acadêmica.

AGRADECIMENTOS

A presente execução do trabalho deve-se muito ao esforço de minha orientadora e professora Sandra Mara Kaminski Tramontin e seus resultados foram alcançados devido aos seus ensinamentos, por isso cabe aqui, um agradecimento especial.

À minha namorada Glaucinéia Marconato pela força nos últimos momentos de conclusão do presente trabalho.

Também merecem um agradecimento especial, ao meu pai Nadir e minha mãe Maíra (*in memoriam*) por todo o apoio dedicado em minha formação acadêmica.

Aos meus amigos e colegas de formação Bruno Rafael Borsato, Ricardo Biscaia, Célio Roberto, André Bamberg e Henrique Holzmann, dentre muitos outros que contribuíram para a conclusão de mais essa etapa dos estudos. Sem sua ajuda teria sido muito mais difícil.

Enfim, a todas as pessoas que participaram do meu dia a dia de estudos e desenvolvimento deste trabalho. A todos o meu Muito Obrigado.

“No que diz respeito ao empenho,
ao compromisso, ao esforço, à
dedicação, não existe meio termo.
Ou você faz uma coisa bem feita ou
não faz.”
(AYRTON SENNA)

RESUMO

SILVA, David. **Avaliação do ganho de resistência mecânica versus fragilidade do aço 1020 endurecido por têmpera e revenido**. 2014. 61 f. Monografia (Engenharia Mecânica) – Programa de Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2014.

A necessidade de se estudar processos de tratamento térmico para aços comuns de baixa porcentagem carbono deve-se a baixa utilização da temperabilidade para esses determinados aços por apresentarem uma alta redução de tenacidade. Sendo que de algum tempo até o presente momento o estudo destes aços vêm crescendo amplamente, por possuírem propriedades muito chamativas como excelente trabalhabilidade, alta capacidade para usinagem, alta conformabilidade, alta soldabilidade e principalmente um baixo custo para a indústria. Na busca por propriedades que diferenciam os aços comuns de baixo carbono, esta pesquisa procurou incrementar o tratamento térmico de têmpera e revenimento diferentes e avaliar o desempenho do material em relação às propriedades finais obtidas. As amostras, depois de tratadas, foram avaliadas quanto a sua dureza, fragilidade e resistência mecânica, tão quanto suas microestruturas obtidas.

Palavras chave: têmpera e revenimento, dureza em aço 1020, fragilidade.

ABSTRACT

SILVA, David. **Evaluation of the increase in mechanical strength versus brittleness of 1020 steel hardened by quenching and tempering.** 2014. 61 f. Monograph (Mechanical Engineering) - Graduate Program in Mechanical Engineering, Federal Technology University - Parana. Ponta Grossa, 2014.

The need to study heat treatment processes for common steels of low carbon percentage is due to the low utilization for these certain hardenability steels because they have a high reduction of toughness. Since some time until the present time the study of these steels have been growing widely, because they have very striking properties such as excellent workability, high capacity machining, high formability, weldability and high primarily a low cost to the industry. In searching for properties that differentiate ordinary low carbon steels, this research sought to increase the heat treatment of quenching and tempering different and evaluate the performance of the material in relation to the obtained final properties. The samples, after treatment, were evaluated for their hardness, brittleness and strength, such as their microstructures obtained.

Keywords: quenching and tempering, hardness in 1020 steels, brittleness.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Diagrama de equilíbrio Fe-C	18
Figura 2 - Dureza de aços martensíticos em função do percentual de carbono	20
Figura 3 - Redução da fração volumétrica da ferrita com o aumento da taxa de resfriamento.	22
Figura 4 - Microscopia aço com 0,1% de carbono (160 x)	23
Figura 5 - Microscopia aço com 0,3% de carbono (150 x)	24
Figura 6 - Microscopia aço com 0,7% de carbono (150 x)	24
Figura 7 - Resistividade eléctrica como martensita Fe-C temperada, como uma função do teor de carbono mostrando efeito de carbono segregado em a inclinação da resistividade.	26
Figura 8 - Esboço da curva obtida no ensaio de tração (curva tensão-deformação convencional)	29
Figura 9 - Barra cilíndrica de seção transversal S_0 e representação esquemática. ...	30
Figura 10 - Esquemático do ensaio de impacto	31
Figura 11 - Esquemático do método de ensaio de dureza Rockwell	32
Figura 12 - Energia para ensaio de impacto no aço 1020 temperado	37
Figura 13 - Energia para ensaio de impacto no aço 1020 temperado e revenido a 250°C	38
Figura 14 - E Energia para ensaio de impacto no aço 1020 temperado e revenido a 350°C	39
Figura 15 - Médias das energias de impacto para os processos térmicos	40
Figura 16 - Região de ruptura para corpo de prova 1 no ensaio de tração para têmpera	42
Figura 17 - Região de ruptura para corpo de prova 2 no ensaio de tração para têmpera	42
Figura 18 - Região de ruptura para corpo de prova 1 no ensaio de tração para têmpera e revenimento a 250°C	43
Figura 19 - Região de ruptura para corpo de prova 2 no ensaio de tração para têmpera e revenimento a 250°C	44
Figura 20 - Região de ruptura para corpo de prova 3 no ensaio de tração para têmpera e revenimento a 250°C	44
Figura 21 - Região de ruptura para corpo de prova 1 no ensaio de tração para têmpera e revenimento a 350°C	45
Figura 22 - Região de ruptura para corpo de prova 2 no ensaio de tração para têmpera e revenimento a 350°C	46
Figura 23 - Região de ruptura para corpo de prova 3 no ensaio de tração para têmpera e revenimento a 350°C	46
Figura 24 - Médias da dureza longitudinal de superfície	51
Figura 25 - Medições enumeradas para ensaio de dureza radial	52
Figura 26 - Médias da dureza radial	55
Figura 27 - Microestrutura do processo de têmpera em 500X	56

Figura 28 - Microestrutura do processo de têmpera e revenimento a 250°C em 500X	57
Figura 29 - Microestrutura do processo de têmpera e revenimento a 350°C em 500X	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores para medições de energia de impacto no aço 1020 temperado..	37
Tabela 2 - Valores para medições de energia de impacto no aço 1020 temperado e revenido a 250°C.....	38
Tabela 3 - Valores para medições de energia de impacto no aço 1020 temperado e revenido a 350°C.....	39
Tabela 4 - Resultados para ensaio de tração na têmpera.....	41
Tabela 5 - Resultados para ensaio de tração na tempera e revenimento a 250°C ...	43
Tabela 6 - Resultados para ensaio de tração na tempera e revenimento a 350°C ...	45
Tabela 7 - Média dos resultados dos Processos térmicos	47
Tabela 8 - Medições para dureza Rockwell longitudinal de superfície para têmpera	48
Tabela 9 - Medições para dureza Rockwell longitudinal de superfície para têmpera	49
Tabela 10 - Medições para dureza Rockwell longitudinal de superfície para têmpera e revenimento a 250°C.....	49
Tabela 11 - Medições para dureza Rockwell longitudinal de superfície para têmpera e revenimento a 250°C.....	50
Tabela 12 - Medições para dureza Rockwell longitudinal de superfície para têmpera e revenimento a 350°C.....	50
Tabela 13 - Medições para dureza Rockwell longitudinal de superfície para têmpera e revenimento a 350°C.....	51
Tabela 14 - Medições para dureza Rockwell radial para têmpera.....	53
Tabela 15 - Medições para dureza Rockwell radial para tempera e revenimento a 250°C	53
Tabela 16 - Medições para dureza Rockwell radial para tempera e revenimento a 350°C	54

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
1.1 JUSTIFICATIVA	14
1.2 OBJETIVO GERAL	15
1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	15
2.1 EVOLUÇÃO DO AÇO	16
2.2 CLASSIFICAÇÕES DOS AÇOS	17
2.3 CARACTERÍSTICAS DOS AÇOS DE BAIXO TEOR DE CARBONO	18
2.4 TEMPERABILIDADE DOS AÇOS	20
2.4.1 Tratamentos térmicos	21
2.4.2 Têmpera em aços baixo carbono	25
2.4.3 Característica da martensita formada pela têmpera	26
3. ENSAIOS MECÂNICOS	27
3.1 ENSAIO DE TRAÇÃO	28
3.2 ENSAIO DE IMPACTO	30
3.3 ENSAIO DE DUREZA	32
4. METODOLOGIA	33
4.1 MATERIAIS UTILIZADOS	33
4.2 PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA PARA ENSAIO DE IMPACTO	33
4.3 PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA PARA ENSAIO DE TRAÇÃO	34
4.4 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS PARA ENSAIO METALOGRÁFICO	34
4.5 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS PARA ENSAIO DE DUREZA	35
4.6 TRATAMENTO TÉRMICO DOS CORPOS DE PROVA	35
4.6.1 Tratamento térmico para ensaio de impacto	35
4.6.2 Tratamento térmico para ensaio de tração	35
5 RESULTADOS OBTIDOS	36
5.1 ENSAIO DE IMPACTO	36
5.2 ENSAIO DE TRAÇÃO	40
5.2.1 Ensaio de tração para processo de têmpera	40
5.2.2 Ensaio de tração para processo de têmpera e revenimento a 250°C	41
5.2.3 Ensaio de tração para processo de têmpera e revenimento a 350°C	45
5.3 ENSAIO DE DUREZA ROCKWELL	47
5.3.1 ENSAIO DE DUREZA ROCKWELL LONGITUDINAL DE SUPERFÍCIE	48
5.3.2 ENSAIO DE DUREZA ROCKWELL RADIAL DE SUPERFÍCIE	52
5.4 ENSAIO METALOGRÁFICO DAS AMOSTRAS	55

5.4.1 Análise da microestrutura do processo de têmpera	55
5.4.2 Análise da microestrutura do processo de têmpera e revenimento a 250°C	56
5.4.3 Análise da microestrutura do processo de têmpera e revenimento a 350°C	58
6 CONCLUSÃO	58
REFERÊNCIAS.....	60

1. INTRODUÇÃO

Os tratamentos térmicos são de relevada importância no mundo da engenharia. Através deles podem-se melhorar muitas propriedades de materiais dependendo das suas aplicações dentro da indústria e também sua adequação para a entrada no mercado cada vez mais exigente e competitivo. A essência dos tratamentos térmicos envolve aquecimento e também resfriamento dos metais em diversos meios e diversas velocidades.

O presente trabalho descreve a utilização dos tratamentos de têmpera e revenimento para incrementar as propriedades mecânicas de dureza e resistência mecânica, à tração, de um aço baixo carbono, mais especificamente o aço SAE 1020.

O aço SAE 1020 possui excelente trabalhabilidade, como altas usinabilidade, conformabilidade e soldabilidade e principalmente um baixo custo de material prima. Em contrapartida possui baixa dureza, resistência mecânica e ao desgaste o que limita sua aplicação sob cargas mais elevadas, tanto de tração quanto de contato.

A têmpera consiste em resfriar um aço, após austenitização, a uma velocidade suficientemente rápida para evitar as transformações perlíticas e bainíticas na peça em questão (SILVA, 2006), gerando uma microestrutura mais refinada, com morfologia acicular, muito dura e resistente, mas com grande concentração de tensões e fragilidade: a martensita.

1.1 JUSTIFICATIVA

Até algum tempo atrás, a literatura técnica considerava praticamente nula as possibilidades de endurecimento por tratamento térmico de têmpera de aços carbono comum, com baixo teor de carbono. De algumas décadas até agora já se admite que esta técnica de processamento gera microestruturas de maior dureza e resistência mecânica em aços considerados de baixa temperabilidade, como os aços de baixo carbono, porém com o inconveniente destas microestruturas apresentarem uma alta fragilidade.

Com o presente trabalho busca-se avaliar este incremento de dureza versus fragilidade, para estes aços que apresentam excelente trabalhabilidade, como alta capacidade para usinagem, alta conformabilidade, alta soldabilidade e baixo custo, porém com baixas durezas e resistência mecânica quando comparados com outros aços de maior teor de carbono e temperabilidade.

1.2 OBJETIVO GERAL

Analisar as variações das propriedades mecânicas do aço SAE 1020 comercial depois de temperados e revenidos em relação ao acréscimo de propriedades mecânicas e aumento da fragilidade dos aços em questão.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Avaliar as mudanças micro estruturais dos aços SAE 1020 quando submetidos ao tratamento térmico de endurecimento por têmpera.
- Avaliar a o incremento de resistência mecânica versus a fragilidade resultantes dos tratamentos.
- Considerar a respeito da aplicação dos tratamentos térmicos de têmpera e revenido em aços comuns que apresentam baixo custo, alta usinabilidade, porém de baixa temperabilidade.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Na presente fundamentação teórica faz-se um estudo da evolução do aço até a revolução industrial que foi muito importante para o desenvolvimento dos estudos sobre todos os tipos de aços e a produção para a obtenção do aço em siderúrgicas. Uma classificação dos aços segundo seus constituintes e suas respectivas porcentagens de constituição.

Algumas características dos aços baixo carbono foram ressaltadas para uma posterior análise quanto ao estudo do resultado final encontrado no trabalho. Fatores

que afetam a temperabilidade de um aço e seu conceito para a avaliação do aço baixo carbono comum quanto à sua capacidade de endurecimento durante um resfriamento dentro do tratamento de têmpera.

Os tratamentos térmicos e sua importância para a obtenção das propriedades mecânicas desejadas em suas variadas aplicações, relatando a têmpera como um tratamento para a obtenção da martensita e suas formas de obtenção.

2.1 EVOLUÇÃO DO AÇO

Segundo Chiaverini (1996) “a indústria do ferro e do aço é uma das indústrias mais básicas. Os alemães diziam que “quem possui ferro é rei”, e sempre obtiveram uma indústria com alta tecnologia e uma base bem segura para a industrialização contínua”.

Com a revolução industrial o ferro e a produção de aço começaram a se tornar cada vez mais importantes para a fabricação de milhares de máquinas e peças que utilizavam do ferro como uma matéria prima. A partir deste momento segundo Chiaverini (1996) “o desenvolvimento e a pesquisa industrial do ferro e do aço progrediram com uma rapidez espantosa, sobretudo para aquele que gostaria de ser inteiramente competente no campo”.

Para Colpaert (1983):

“O ferro existe na natureza geralmente sob formas de óxidos, nos minérios de ferro, onde é extraído quase sempre por meio de um forte aquecimento em presença de coque ou carvão de madeira, em fornos próprios, formando uma liga de ferro e carbono, que em seguida é refinada e constitui a matéria prima para a produção de várias peças metálicas.”

O processo de produção passa por várias etapas como a produção do ferro-gusa, que é forma intermediária pela qual passa praticamente todo o ferro usado na produção primária do aço (exceção importante são os produtos de Redução Direta). (Silva, 2006)

Outras etapas relatadas por Silva (2006) são a refinaria, que consistem em aciarias, que podem ser alimentadas por oxigênio ou eletricamente, onde o carbono contido no ferro-gusa é retirado juntamente com as impurezas e com isso formam-se

os lingotes ou blocos por lingotamento contínuo. A partir desse processo os lingotes vão para as indústrias para serem processados e começam a fazer parte da produção de partes metálicas por algum processo a ser utilizado por cada indústria.

2.2 CLASSIFICAÇÕES DOS AÇOS

Os aços são constituídos, segundo define Chiaverini (1996 p.105) de ferro e carbono contendo na maioria deles 0,008% até aproximadamente 2,11% de carbono e também alguns elementos residuais que sobram de alguns processos industriais na fabricação. O limite inferior consiste na maior solubilidade de carbono no ferro e conseqüentemente o limite superior é a máxima quantidade de carbono que se dissolve no ferro. Alguns elementos de liga podem causar uma diferenciação nos valores das porcentagens de ferro e carbono presente no aço, dependendo também de seu processo de fabricação.

Para fins de estudo e metodologia adota-se a classificação de Chiaverini (1996) para as classes de aços definidas pela porcentagem de carbono presente:

- aços de baixo teor de carbono, com C inferior a 0,2%;
- aços de médio carbono, com C entre 0,2 e 0,5%;
- aços de alto teor de carbono, com C acima de 0,5%.

O diagrama de equilíbrio Fe-C mostrado na figura 1 segundo Chiaverini (1996) “mostra a liga binária Fe-C para teores de carbono até 6,7%, porque este elemento forma com o ferro Fe_3C que contém aproximadamente, 6,7% de carbono.” Acima dessa quantidade pouco se conhece na realidade, com a porcentagem de 4,0% a 4,5% para Chiaverini (1996) “as ligas apresentam pequena ou nenhuma importância comercial. Sendo assim o diagrama representa apenas a liga binária Fe-C, pois os aços comerciais apresentam outros elementos devido ao processo de fabricação como o fósforo, enxofre, silício e manganês”.

Para uma classificação específica de aço enquanto a sua dureza, um aço doce possui uma faixa entre 0,15% e 0,25% de carbono segundo Chiaverini (1996).

Após uma alta utilização do ferro um avanço significativo foi a produção, e posteriormente a fabricação em larga escala na idade do aço, dos aços com baixo teor de carbono e também em estado líquido. (PADILHA, 1997)

Seguindo uma definição de Provenza (1990), o ferro é o elemento mais importante na constituição do aço, seguido do carbono. Sendo assim quanto mais elevada a porcentagem de carbono no aço tanto maior será o limite de ruptura, o limite de escoamento e a dureza. Um elevado teor de carbono propicia a têmpera, ao passo que proporciona baixa soldabilidade e conformabilidade.

Os aços com baixo teor de carbono apresentam alta conformabilidade e são muito usados também na indústria automobilística em forma de chapas, folhas ou tiras segundo Silva (2006) na construção de painéis de carroceria para automóveis e na produção de embalagens de alimentos, bebidas, entre muitas outras aplicações.

Aços de baixo e médio teor de carbono estão sendo aplicados em estruturas, chapas para veículos, onde podem oferecer a possibilidade da redução de peso, mantendo ou aumentando a resistência dos componentes. (HUTCHINSON et al., 2011).

Como exemplo qualquer um deste grupo de aços de baixo carbono pode ser usado para forjamento; a escolha sendo orientada pelo tamanho da seção e pelas propriedades desejadas após o tratamento térmico. Sendo assim, os aços SAE 1030 e 1035 são empregados em garfos de câmbio e muitas outras peças forjadas pequenas onde propriedades moderadas são desejadas (OBERG, 2004).

A figura 2 mostra a dureza do aço em relação ao seu percentual de carbono na estrutura. Os tamanhos dos grãos austeníticos segundo Krauss (1999) afetam o tamanho dos cristais de martensita e o tamanho das dispersões paralelas de cristais de martensita, e assim influencia também na força das microestruturas endurecidas. A diferença na quantidade de austenita retida pode influenciar significativamente na dureza de um aço.

Além da austenita retida os carbonetos finos produzidos durante a têmpera de aço de baixo carbono em altas temperaturas podem influenciar na dureza de um aço.

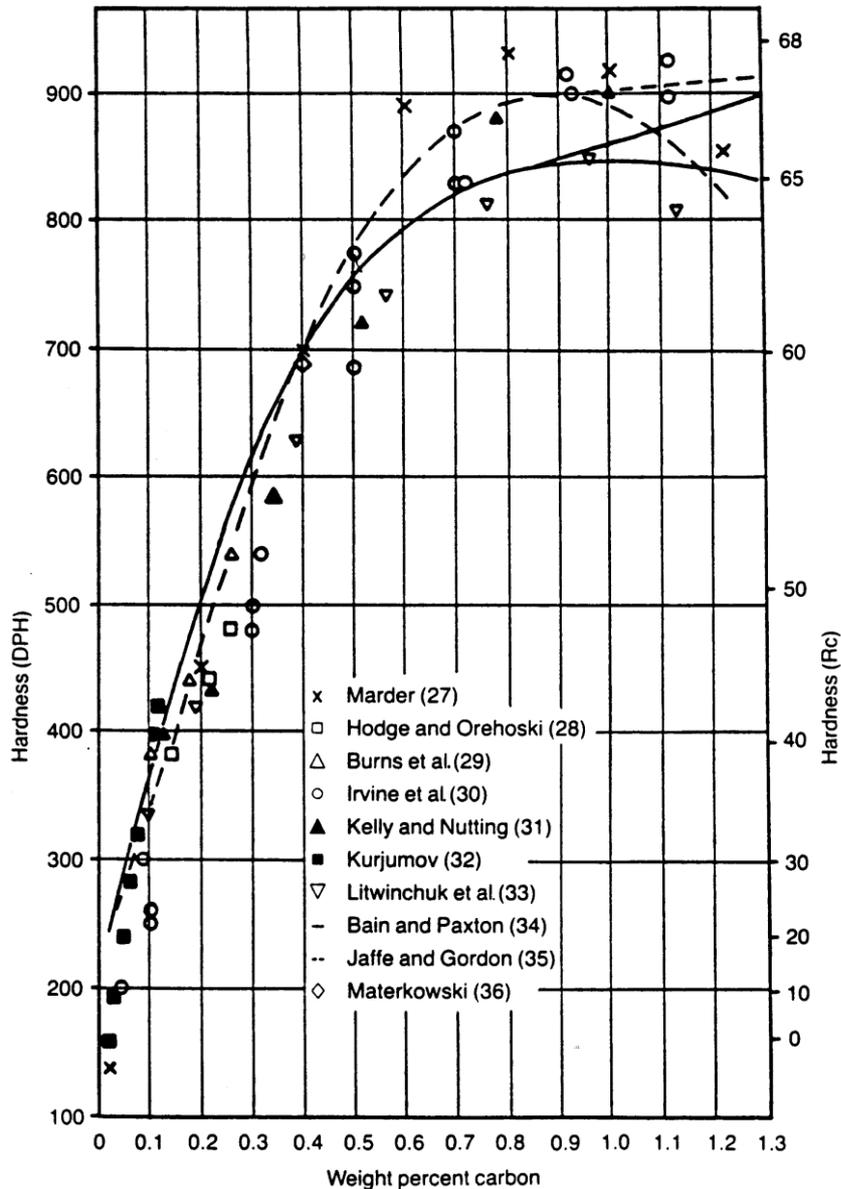


Figura 2 - Dureza de aços martensíticos em função do percentual de carbono
 Fonte: George Krauss, Martensite in steel: strength and structure (1999).

2.4 TEMPERABILIDADE DOS AÇOS

“A temperabilidade dos aços está associada à capacidade de endurecimento do aço durante o resfriamento rápido (têmpera), ou seja, sua capacidade de formar martensita a uma determinada profundidade em uma peça.” (SILVA, 2006).

Alguns métodos podem ser utilizados para determinação da temperabilidade como o método de Grossmann e o método de Jominy segundo Chiaverini (1996). Alguns outros autores relatam outros métodos de avaliação da temperabilidade que podem também não serem muito eficazes também pela quantidade pequena de gráficos CCT de aços, que precisam de equipamentos muito avançados e caros para a realização desses gráficos.

Os gráficos ou curvas CCT foram desenvolvidos segundo Silva (2006) porque as transformações dos aços nos processos industriais ocorrem na maioria das vezes por resfriamento contínuo e não isotermicamente. A construção dos gráficos é feita no dilatômetro, austenizando e fazendo o resfriamento com taxa de resfriamento constante, observando-se as inclinações na curva do comprimento da amostra.

Vários fatores podem afetar a temperabilidade de um aço segundo Silva (2006) como alguns elementos de liga dissolvidos na austenita, a granulação grosseira da austenita e também a homogeneização da mesma, com ausência de inclusões ou precipitados.

2.4.1 Tratamentos Térmicos

Os tratamentos térmicos são utilizados para obtenção de melhores propriedades dos materiais dependendo de suas aplicações como produto. Na obtenção de tais propriedades desses materiais o tratamento térmico para Chiaverini (1996) é o conjunto de operações de aquecimento a que são submetidos os aços, sob condições controladas de temperatura, tempo, atmosfera e velocidade de esfriamento.

Mas para que esse tratamento seja executado deve se executar o estudo da estrutura do material verificando quais propriedades pode adquirir com a realização do tratamento térmico e estudando o processo térmico das ligas metálicas que para Callister (2002) é essencial para a compreensão dos mecanismos, das dependências em relação ao tempo e à temperatura e da consequência desses tratamentos, com uma das razões que consiste no fato de que as propriedades mecânicas de uma liga que foi submetida previamente a um tratamento térmico

podem ser alteradas de maneira significativa se essa liga for posteriormente aquecida.

A velocidade de resfriamento para a avaliação do teor de carbono, em relação às áreas de ferrita e perlita só pode ser realizado no resfriamento lento como dentro de um forno, e com resfriamento rápido a perlita começa a se formar antes de finalizar a formação da ferrita, interrompendo o crescimento, conforme mostrado na figura 5. (SILVA, 2006)

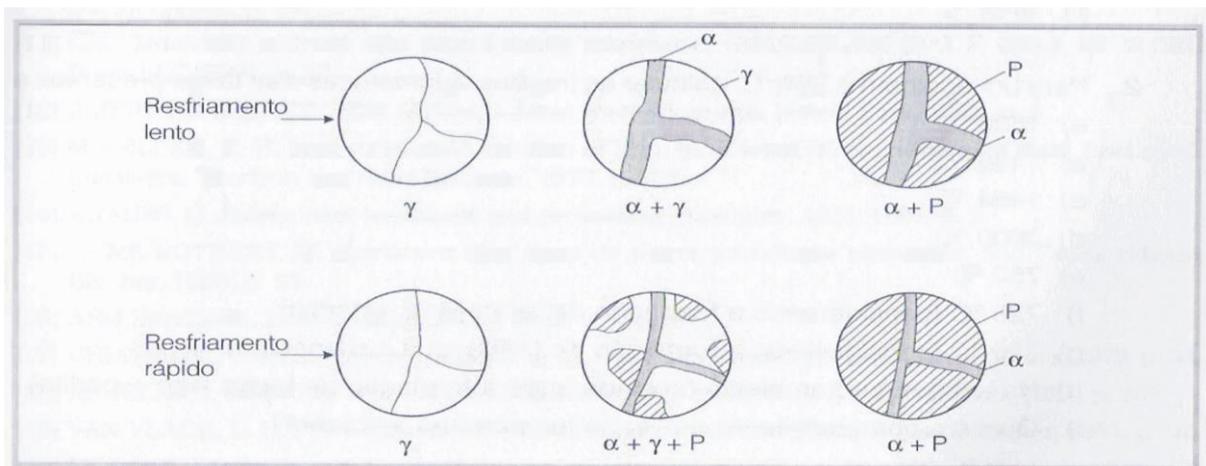


Figura 3 - Redução da fração volumétrica da ferrita com o aumento da taxa de resfriamento.

α= Ferrita, P= Perlita, γ= Austenita

Fonte: Silva, Aços e Ligas especiais (2006)

Segundo Silva (2006) um aço com 0,2% de carbono apresentará aproximadamente 25% de perlita e 75% de ferrita, determinados através de um resfriamento lento somente.

Alguns constituintes do aço possuem propriedades distintas que podem ser alcançadas pelos tratamentos térmicos. Segundo Chiaverini (1996):

A austenita nos aços-carbono comum, só é estável acima de 727°C e consiste de uma solução sólida de carbono no ferro gama e apresenta uma estrutura de grãos poligonais irregulares possuindo boa resistência mecânica e apreciável tenacidade, não sendo magnética.

A ferrita é ferro no estado alotrópico alfa, contendo em solução traços de carbono apresentando uma estrutura de grãos poligonais irregulares possuindo baixa dureza e baixa resistência à tração, mas excelente resistência ao choque e ao alongamento.

A cementita é o carboneto de ferro contendo 6,67% de carbono, muito dura, quebradiça e responsável pela elevada dureza e resistência dos aços de alto carbono, assim como sua ductilidade.

A perlita é a mistura mecânica de 88,5% de ferrita e 11,5% de cementita, na forma de lâminas finas dispostas aleatoriamente. As propriedades da perlita

são intermediárias entre as da ferrita e da cementita dependendo do tamanho das partículas de cementita.

Alguns constituintes podem ser observados em relação a sua porcentagem de carbono nas figuras 2,3 e 4.

Na figura 3 consiste em um aço com aproximadamente 0,1% de carbono esfriado lentamente com ataque pícrico. Os grãos escuros são de perlita e os grãos claros são de ferrita com inúmeras inclusões.

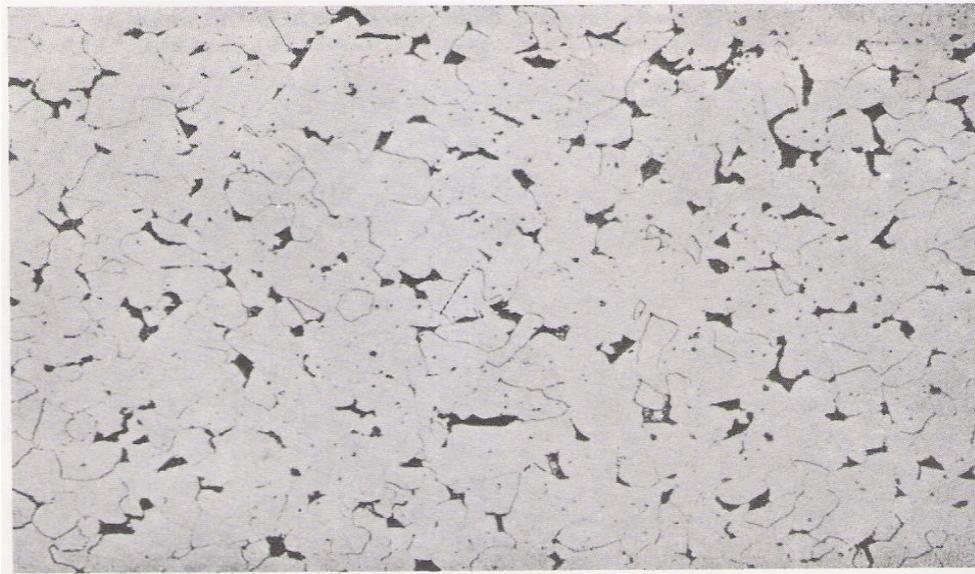


Figura 4 - Microscopia aço com 0,1% de carbono (160 x)

Fonte: Colpaert- Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns (1983)

Na figura 4 podemos observar a micrografia de um aço com 0,3% de carbono, classificado como aço de médio carbono com a perlita de grãos escuros e a ferrita com grãos claros, resfriados lentamente com ataque nítrico e aumento de 150 vezes.

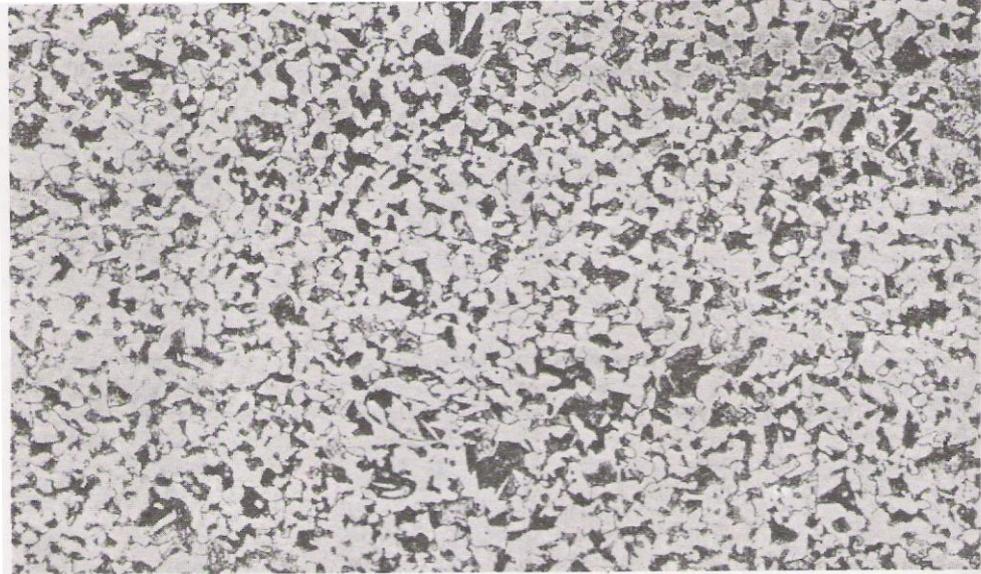


Figura 5 - Microscopia aço com 0,3% de carbono (150 x)
Fonte: Colpaert- Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns (1983)

Um aço com 0,7% de carbono é mostrado na figura 6 com grãos de perlita e poucos grãos de ferrita, com ataque nítrico e aumento de 150 vezes.

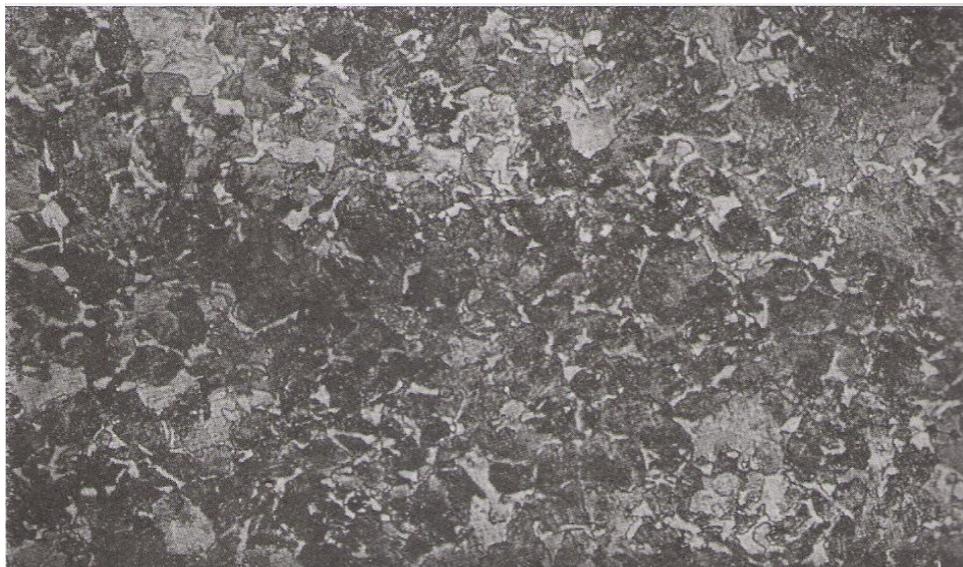


Figura 6 - Microscopia aço com 0,7% de carbono (150 x)
Fonte: Colpaert- Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns (1983)

2.4.2 Têmpera em Aços Baixo Carbono

A têmpera é caracterizada segundo Provenza (1990) pelo aquecimento do material a uma dada temperatura que ultrapasse a zona crítica, e posteriormente, ocorre o resfriamento do material em um fluido, podendo ser em água, óleo, ventilação forçada, entre os demais.

As características de formação da martensita em aços de baixo carbono dependem muito da velocidade do resfriamento e segundo Silva (2006) o nome dado transformação martensítica é aplicado às reações no estado sólido que ocorrem por cisalhamento sem mudança na composição química (difusão) e aparecem em vários sistemas, sendo o mais conhecido o ferro carbono.

A formação da martensita não produz mudanças locais de composição e se processa por um mecanismo de cisalhamento, com escorregamentos de planos cristalinos, ocorrendo através do grão de austenita com uma velocidade de ordem de 1000 m/s. (COLPAERT, 1983)

A austenita depois de um tratamento térmico de têmpera pode formar uma martensita que se apresenta em formas de ripas (lath) em aços de baixo carbono que tendem a formar “triângulos”. (SILVA, 2006)

Segundo Krauss (1999) além da austenita retida, outras fases podem estar presentes nas microestruturas de alta resistência de aços endurecidos podendo ser carbonetos finos produzidos durante têmpera de aço de baixo carbono, com temperaturas elevadas, ou seja, carbonetos produzidos por austêmpera, ou de transição os carbonetos produzidos por têmpera de baixa temperatura. Em uma escala de tamanho um pouco maior, carbonetos esféricos não dissolvidos durante a austenitização antes da têmpera, ou por causa de tempo suficiente para a dissolução dos carbonetos nas estruturas presentes antes da austenitização, ou por projeto na austenitização intercrítica de aços hipereutetóides, também pode ser um componente significativo de microestruturas endurecido.

O tratamento térmico segundo Bobrovnichii e Filgueira (2006) pode ser utilizado para melhora da resistência, diminuindo a quantidade de fragmentos na usinagem, e do desgaste do material policristalino utilizado, com isso pode ser comprovado realizando a usinagem da peça e fazendo uma breve análise do desgaste da ferramenta de corte.

Alguns fatores para Mariano et al. (2007) como a adição de Níquel na composição do aço podem afetar nos parâmetros dos tratamentos térmicos, como um efeito retardador no processo de difusão de carbono e, conseqüentemente, na precipitação de carbonetos, deslocando o início da curva TTT para tempos maiores.

2.4.3 Característica da Martensita Formada pela Têmpera

O termo martensita é amplamente utilizado para muitas composições de aços diferentes, mas existem variações substanciais em aços de alto e também de baixo carbono. A martensita da austêmpera é descrita segundo Hutchinson et al. (2011) como tendo uma estrutura tetragonal, mas isso só é verdade quando o teor de carbono no aço excede a 0,6%.

A fig.6 mostra algumas evidências indiretas para a segregação de ferro-carbono na martensita baseado nas medições de resistividade elétrica.

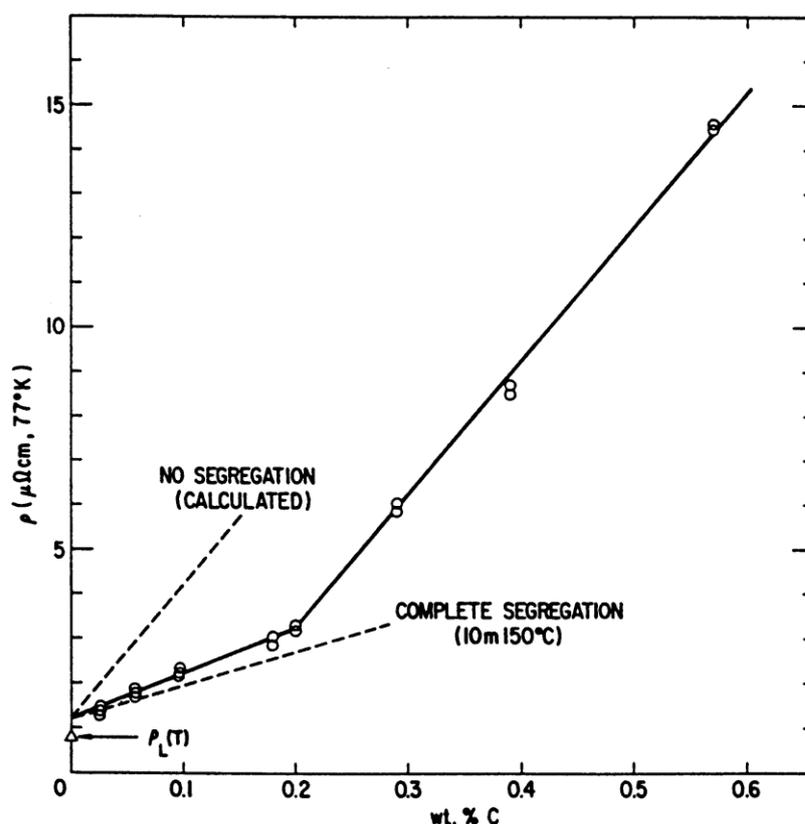


Figura 7 - Resistividade elétrica como martensita Fe-C temperada, como uma função do teor de carbono mostrando efeito de carbono segregado em a inclinação da resistividade.

Fonte: George Krauss, Martensite in steel: strength and structure (1999).

A conclusão de Krauss (1999) foi que a menor inclinação da curva de resistividade para estruturas martensítica que contêm menos que 0,2% de carbono correspondem a completar a segregação de carbono aos deslocamentos, deixando a ferrita livre da dispersão dos centros devido aos átomos de carbono aprisionados nos espaços intersticiais octaédricos. Supondo assim, aproximadamente 90% dos átomos de carbono em um aço com 0,18% de carbono da martensita são segregados para deslocamentos.

Para Hutchinson et al. (2011) as martensitas de baixo carbono consistem de ripas, separados por limites de baixa ou de alto ângulo mas também contendo altas densidades de deslocamentos dentro deles. As ripas que ocorrem frequentemente em pares de orientações que mutuamente acomodam as tensões de cisalhamento locais que estão envolvidos na transformação.

Segundo Henry e Monde (2008) estudos revelaram que os aços de duas fases contendo quantidades aproximadamente iguais de fases de ferrita e martensita (50 a 60%) apresentam as melhores combinações de alta resistência e ductilidade com resistência ao impacto.

A morfologia e, conseqüentemente, as propriedades mecânicas (resistência ao impacto e dureza) da ferrita e aços micro ligados de martensita são fortemente influenciadas pelos seus detalhes micro estruturais iniciais. A estrutura inicial da martensita encoraja a formação de glóbulos finos de martensita na matriz de ferrita. As estruturas globulares finas de martensita obtidos a partir do tratamento de têmpera intercríticos são uma consequência dos locais de nuclearização heterogêneos fornecidos pela fase de martensita para austenita durante a nucleação da fase de recozimento de dois estágios. (HENRY E MONDE, 2008)

Pode se concluir que, a dureza aumenta suavemente com o nível de carbono, aparentemente afetado pelas mudanças na microestrutura e cristalografia.

3. ENSAIOS MECÂNICOS

Para um melhor conhecimento de cada material a ser utilizado na produção de um novo projeto é necessário que conheçam suas propriedades, e para isso são realizados determinados ensaios, justamente para uma normalização de produtos a serem comercializados no mercado.

As características do material definem suas aplicações e segundo Garcia, Spim e Santos (2000) algumas características de processamento são: forjabilidade, usinabilidade e suscetibilidade a tratamentos. E para as características de aplicação: resistência mecânica, resistência ao desgaste e ductilidade.

Algumas propriedades como elasticidade, resistência, resiliência, tenacidade e plasticidade dos materiais podem ser analisadas através dos ensaios mecânicos. As vantagens de normalização dos ensaios por Garcia, Spim e Santos (2000) são tornar a qualidade do produto mais uniforme, reduzir a similaridade dos materiais, orientação do projetista na escolha do mesmo e reduzir desentendimentos entre produtor e consumidor.

Os ensaios podem ser caracterizados como destrutivos e não destrutivos. Alguns exemplos de ensaios destrutivos são ensaio de tração, fadiga, torção, entre outros. Os mesmos não permitem a reutilização do material ensaiado.

Ensaio não destrutivos são utilizados para que o material não perca sua utilidade e muitas das vezes é feito dentro de indústrias onde o processo não pode ser parado para a realização do mesmo. Os exemplos mais usuais de ensaios não destrutivos são: líquidos penetrantes, raios X e ultrassom, dentre outros.

Para Souza (1982) a escolha do ensaio mecânico mais interessante a ser realizado em um determinado material depende da finalidade a que ele vai ser submetido, tais como os esforços e as propriedades mecânicas que se deseja medir.

3.1 ENSAIO DE TRAÇÃO

A aplicação de uma força num corpo sólido promove uma deformação do material na direção do esforço e o ensaio de tração consiste em submeter um material a um esforço que tende a estica-lo ou alonga-lo. Geralmente, o ensaio é realizado num corpo de prova de formas e dimensões padronizadas, para que os resultados obtidos possam ser comparados ou, se necessário, reproduzidos. (SOUZA, 1982).

Segundo Garcia, Spim e Santos (2000) mede-se a variação no comprimento (l) como função da carga (P), conforme a figura 8. O ensaio de tração é bastante utilizado como teste para o controle das especificações da entrada da matéria prima. Os resultados fornecidos pelo ensaio de tração são fortemente influenciados pela

temperatura, pela velocidade de deformação, pela anisotropia do material, pelo tamanho do grão, pela porcentagem de impurezas, bem como pelas condições ambientais.

A figura 9 representa um esquemático do ensaio de tração, com representação das forças e também a deformação longitudinal do corpo de prova.

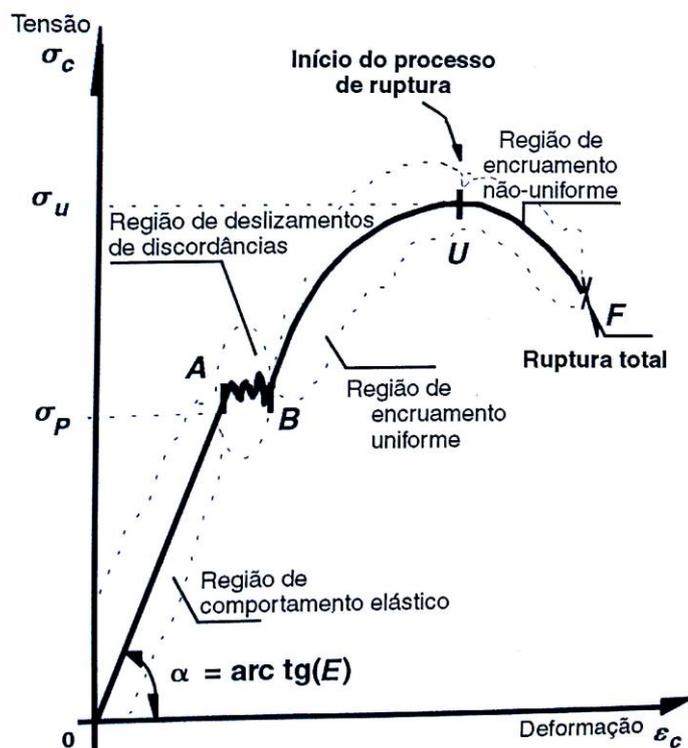
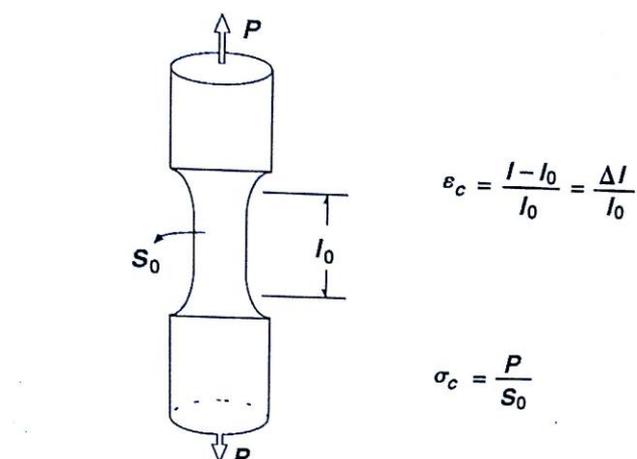


Figura 8 - Esboço da curva obtida no ensaio de tração (curva tensão-deformação convencional)

Fonte: Garcia, Spim e Santos (2000), Ensaios dos materiais.

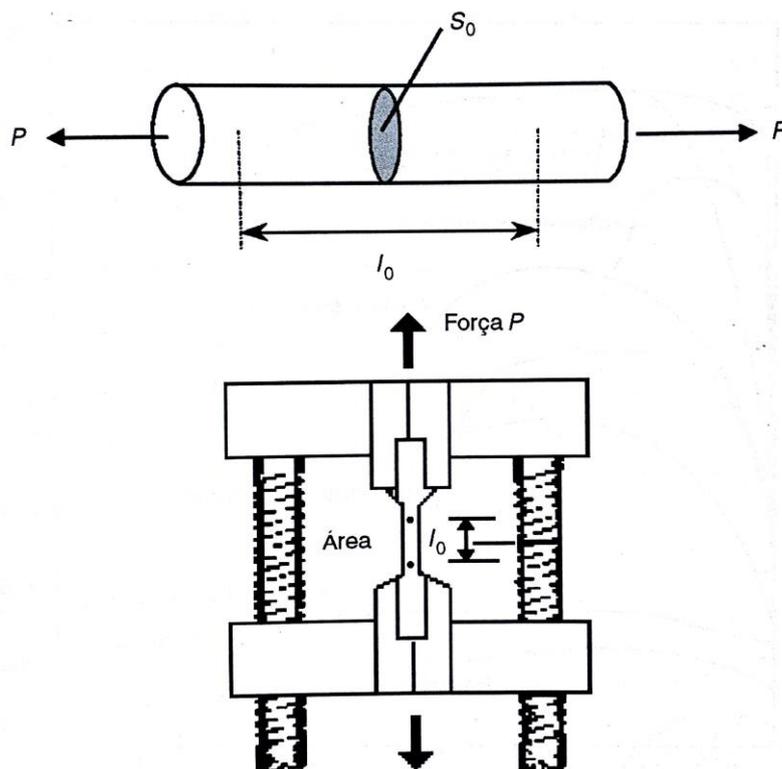


Figura 9 - Barra cilíndrica de seção transversal S_0 e representação esquemática.
 Fonte: Garcia, Spim e Santos (2000), Ensaios dos materiais.

3.2 ENSAIO DE IMPACTO

O ensaio de impacto é caracterizado por ser um ensaio destrutivo em que a peça entalhada sofre uma carga de impacto através de um martelo pendular. O martelo é solto a uma altura e posição padronizada segundo Souza (1982) o resultado é dado pela perda da energia potencial do pêndulo e o ensaio pode ser realizado em qualquer temperatura ambiente.

A diferença entre os ensaios de impacto Charpy e Izod segundo Garcia, Spim e Santos (2000) são as posições de fixação do corpo de prova, sendo que no ensaio de impacto Charpy o corpo de prova é fixado na horizontal e no Izod é fixado em sua posição vertical, respectivamente na figura 10 (b) e (c). Na figura 10 (a) é representado um esquemático do ensaio de impacto e as diferença entre as posições de fixação.

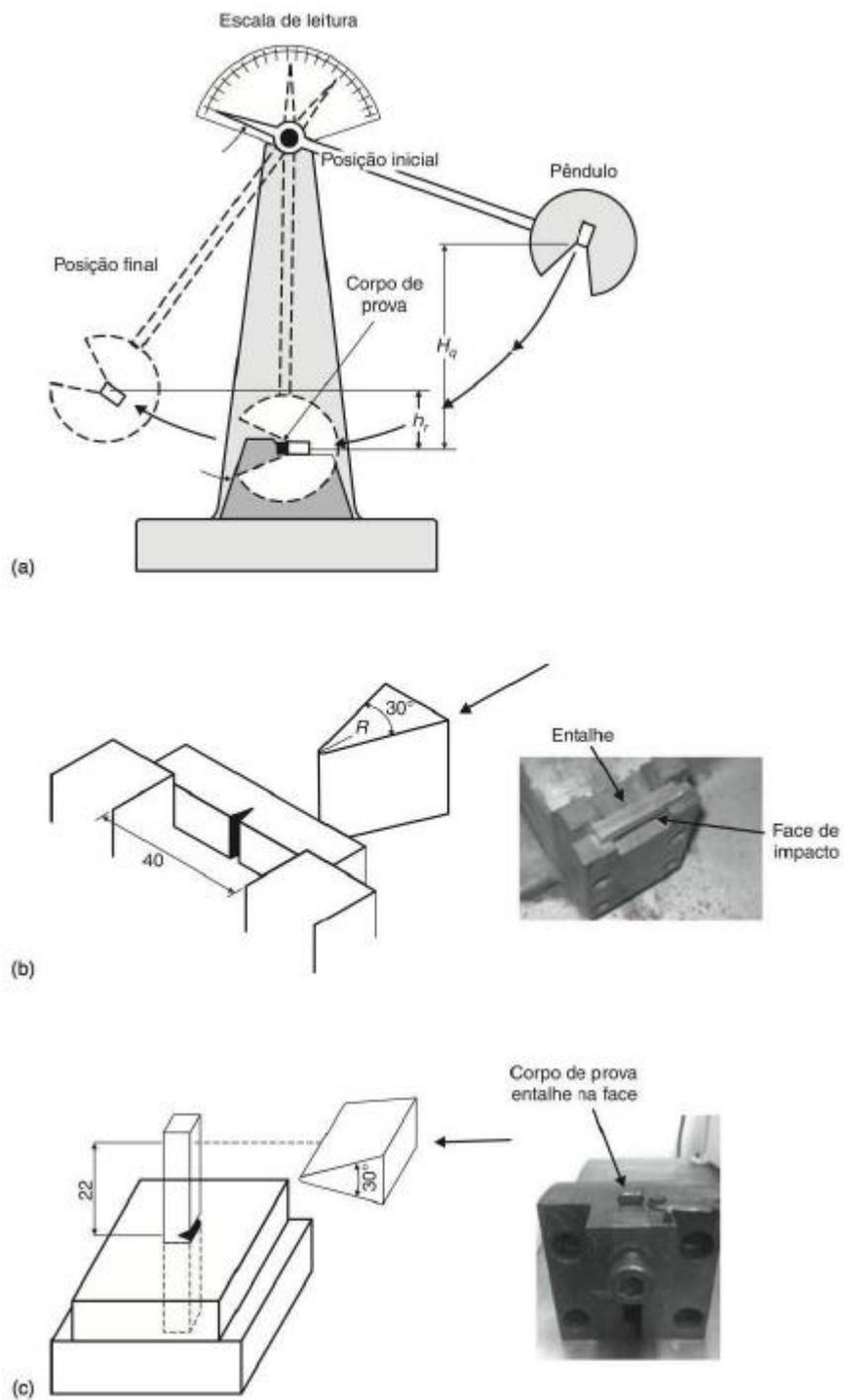


Figura 10 - Esquemático do ensaio de impacto
Fonte: Garcia, Spim e Santos (2000), Ensaio dos materiais.

3.3 ENSAIO DE DUREZA

O ensaio de dureza utilizado no trabalho foi o método mais utilizado no mundo todo, o ensaio de dureza Rockwell. O ensaio de dureza Rockwell para Garcia, Spim e Santos (2000) utiliza a profundidade da impressão causada por um penetrador que age sob a força de uma carga aplicada em dois estágios e sem medição de área como a dureza Brinell. A escala inicialmente foi utilizada em quilogramas-força e polegadas, sendo trocada ao longo do tempo para a escala do sistema internacional (SI), em Newtons e milímetros.

A dureza Rockwell é representada pela escala HR e diminui significativamente o tempo de ensaio, pois não é necessária uma medição da área de impressão, sendo assim a leitura é feita diretamente na máquina de ensaio. Existem algumas diferenças entre as cargas e tipos de penetradores para diferentes tipos de materiais e seus diversos tratamentos térmicos a que são submetidos.

A metodologia de ensaio consiste no posicionamento da amostra para a penetração. É aplicada uma pré-carga e em seguida uma carga suplementar que faz a penetração no material e a leitura é realizada. No esquemático da figura 11 pode-se observar o princípio do método Rockwell.

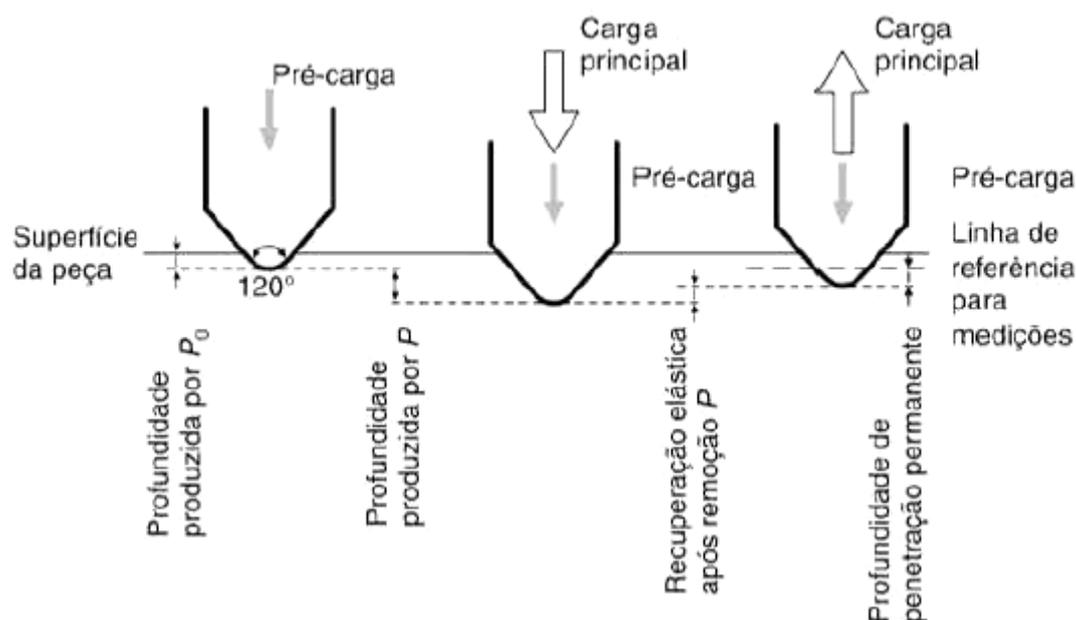


Figura 11 - Esquemático do método de ensaio de dureza Rockwell

Fonte: Garcia, Spim e Santos (2000), Ensaios dos materiais.

4. METODOLOGIA

4.1 MATERIAIS UTILIZADOS

- Tarugo de aço SAE 1020 recozido, para a preparação dos corpos de prova de impacto;

- Barra de aço SAE 1020 com diâmetro de 20mm;

- Cortadeira Metalográfica Metalotest, modelo Maxicut;

- Forno Jung tipo mufla, modelo 0612;

- Embutidora Metalográfica Metalotest, modelo Maxipress;

- Baquelite preto Arotec;

- Lixadeira Arotec, modelo *APL-4*;

- Politriz Arotec, modelo *APL-4*;

- Lixas d'água 320, 400, 600 e 1200 #;

- Alumina líquida *Fortel* 1001 com 1 μm e 0,3 μm ;

- Nital (HN03) 3% corrigido;

- Microscópio eletrônico *Olympus BX60*;

- Máquina para ensaio de tração *Emic DL10000*, com célula *Trd 28* e extensômetro *Trd 6*.

4.2 PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA PARA ENSAIO DE IMPACTO

As amostras para o ensaio de impacto foram retiradas de um tarugo de aço SAE 1020 através da cortadeira *Maxicut*, passando pelo processo de usinagem para a preparação do entalhe a ser ensaiado. Antes do ensaio as amostras passaram pelo processo de tratamento térmico de têmpera. Resultado do processo de usinagem foram utilizados 15 (quinze) corpos de prova e assim a distinção entre 3 tipos de processamentos térmicos relatados a seguir para tais amostras:

- 5 corpos de prova para têmpera com resfriamento em água;

- 5 corpos de prova para têmpera com resfriamento em água, seguido de revenimento a uma temperatura de 250° C.

- 5 corpos de prova para têmpera com resfriamento em água, seguido de revenimento a uma temperatura de 350° C.

4.3 PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA PARA ENSAIO DE TRAÇÃO

Para o ensaio de tração os corpos de prova foram retirados, em seu número de 9 (nove) corpos de prova, de uma barra de aço SAE 1020 e usinadas com o fim de serem ensaiadas na máquina de tração. O número de corpos de prova foi estabelecido seguido dos seus tratamentos térmicos a serem avaliados:

- 3 corpos de prova para têmpera com resfriamento em água;
- 3 corpos de prova para têmpera com resfriamento em água, posterior de revenimento a uma temperatura de 250° C;
- 3 corpos de prova para têmpera com resfriamento em água, posterior de revenimento a uma temperatura de 350° C;

4.4 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS PARA ENSAIO METALOGRÁFICO

Em seguida dos ensaios de tração foram retiradas uma parte da área útil de secção dos corpos de prova através da cortadeira metalográfica e após isso embutidos na embutidora metalográfica *Metalotest* modelo *Maxipress*, a uma pressão controlada de 150 kgf/cm² durante um tempo de 10 minutos. As amostras passaram pelo processo de preparação nas lixas d'água com granulometria de 320, 400, 600 e 1200.

Na sequência o polimento com Alumina na politriz *Arotec* modelo *APL-4* com granulometria de 1 µm (um micrometro) e em seguida com Alumina de granulometria de 0,3 µm. Após polidas as amostras receberam um ataque de uma solução de Nital a 3% em torno de 3 segundos para a marcação dos contornos de grão da microestrutura do aço SAE 1020 e posteriormente serem analisadas no microscópio eletrônico Olympus BX60. Houve uma certa dificuldade para o ataque das amostras com Nital a 3%, portanto o tempo de ataque precisou de um ajuste durante o procedimento.

O número de amostras foi determinado em 1 (uma) para cada tipo de tratamento térmico realizado nos corpos de prova, resultando em 3 (três) amostras para análise da microestrutura gerada por cada processo de tratamento.

4.5 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS PARA ENSAIO DE DUREZA

Os corpos de prova para ensaio de dureza longitudinal não precisaram de uma longa preparação para tal, pelo fato de não existir uma necessidade do mesmo. Portanto utilizou-se um dos hemisférios resultantes do ensaio de tração.

Para o ensaio de dureza radial, os corpos de prova depois de ensaiados na máquina de tração foram cortados e obteve-se uma secção paralela para realizar o ensaio de dureza, realizando 1 (uma) amostra por corpo de prova tratado termicamente.

4.6 TRATAMENTO TÉRMICO DOS CORPOS DE PROVA

4.6.1 Tratamento Térmico para Ensaio de Impacto

Primeiramente os 15 (quinze) corpos de prova foram aquecidos a uma temperatura de 920°C por um tempo de 20 (vinte) minutos no forno do laboratório de materiais da UEPG (Universidade Estadual de Ponta Grossa) e em seguida resfriados em água a temperatura ambiente. Após a têmpera 5 (cinco) dos corpos de prova foram revenidos a uma temperatura de 250°C durante um tempo de 20 minutos, aguardando o resfriamento dentro da atmosfera do forno.

Outros 5 (cinco) corpos de prova foram revenidos realizando os mesmos parâmetros do processo anterior, porém mudando a temperatura de revenimento para 350°C.

4.6.2 Tratamento Térmico para Ensaio de Tração

Os corpos de provas depois de preparados pelo processo de usinagem foram em sua totalidade, ao número de 9 (nove), temperados a uma temperatura de

920°C durante um tempo de 20 minutos e resfriados em água a uma temperatura ambiente.

O revenimento foi realizado em 3 (três) corpos de prova a uma temperatura de 250°C e um tempo de 30 minutos e resfriamento na atmosfera do forno.

Em outros 3 (três) corpos de prova foi realizado o revenimento a uma temperatura de 350°C e um tempo de 30 minutos e resfriamento na atmosfera do forno. Aos outros 3 (três) corpos de prova restantes que foram temperados não se aplicou o tratamento térmico revenido.

5 RESULTADOS OBTIDOS

5.1 ENSAIO DE IMPACTO

Foram realizados os tratamentos térmicos nos corpos de prova de impacto, o ensaio de impacto foi realizado na máquina de impacto Charpy, com o corpo de prova preso na horizontal, do laboratório de materiais da UEPG (Universidade Estadual de Ponta Grossa).

Os resultados para o processo de somente de têmpera realizado nos corpos de prova são mostrados em forma de tabela 1 e gráfico na figura 12.

O número utilizado de 5 (cinco) amostras e a energia absorvida pelo corpo de prova até sua fratura, foi medida em Joule (J). Este valor em Joules relaciona-se com a tenacidade do material ensaiado.

O valor de resistência ao impacto (energia absorvida) referencial para o aço SAE 1020 recozido disponível comercialmente é de aproximadamente 24J, de acordo com Matweb (1996), variando com a temperatura.

Tabela 1 - Valores para medições de energia de impacto no aço 1020 temperado

TÊMPERA		
Corpo de prova	Energia (J)	Média
1	4	3,3
2	3	
3	4	
4	3	
5	2,5	

Fonte: Autoria própria

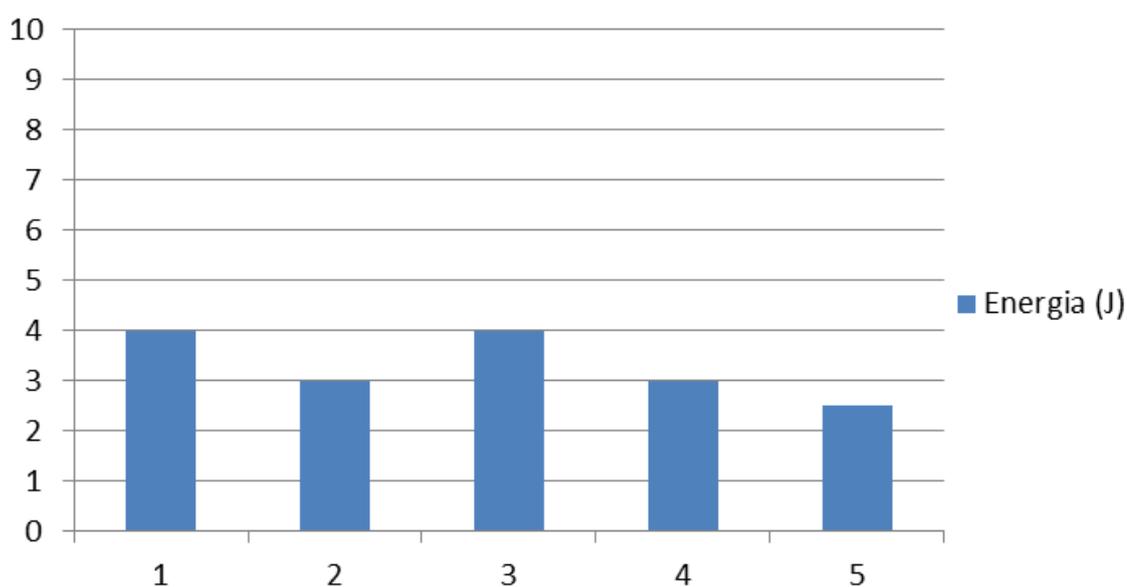


Figura 12 - Energia para ensaio de impacto no aço 1020 temperado

Fonte: Autoria própria

O processo de tratamento de têmpera e seguido de revenimento a uma temperatura de 250°C é representado na figura 13 e tabela 2.

Tabela 2 - Valores para medições de energia de impacto no aço 1020 temperado e revenido a 250°C

TÊMPERA E REVENIMENTO A 250°C		
Corpo de prova	Energia (J)	Média
1	6	
2	6,5	
3	8	6,6
4	7,5	
5	5	

Fonte: Autoria própria

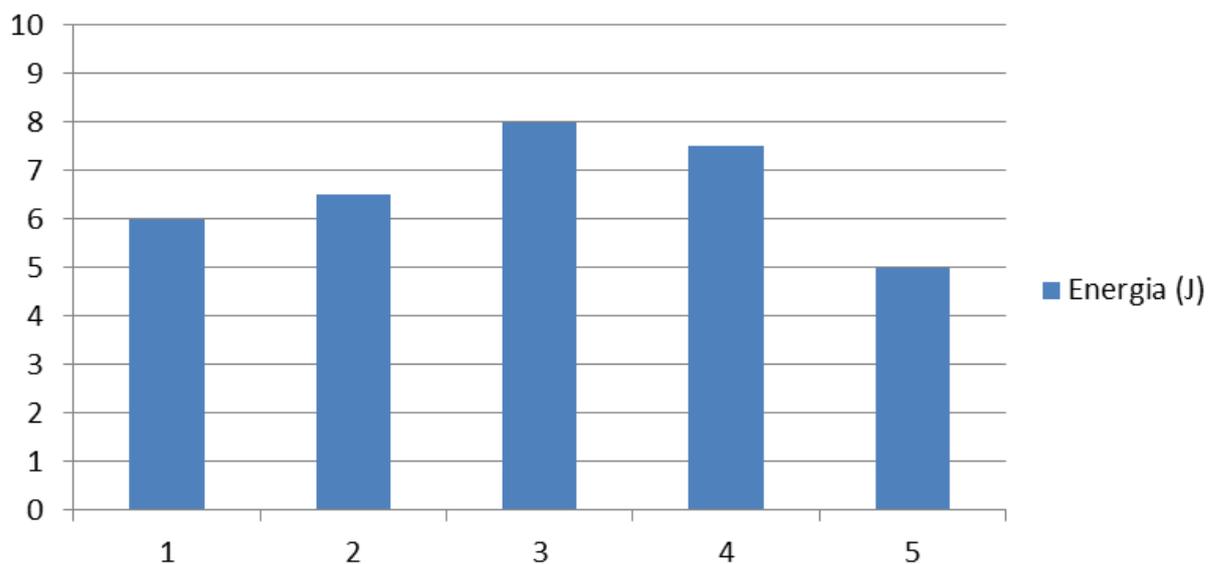


Figura 13 - Energia para ensaio de impacto no aço 1020 temperado e revenido a 250°C
Fonte: Autoria Própria

Sendo assim a figura 14 e tabela 3 mostram as energias de impacto para o processo de têmpera seguido de revenimento a 350°C.

Tabela 3 - Valores para medições de energia de impacto no aço 1020 temperado e revenido a 350°C

TÊMPERA E REVENIMENTO A 350°C		
Corpo de prova	Energia (J)	Média
1	7	4,4
2	5	
3	3	
4	4	
5	3	

Fonte: Autoria própria

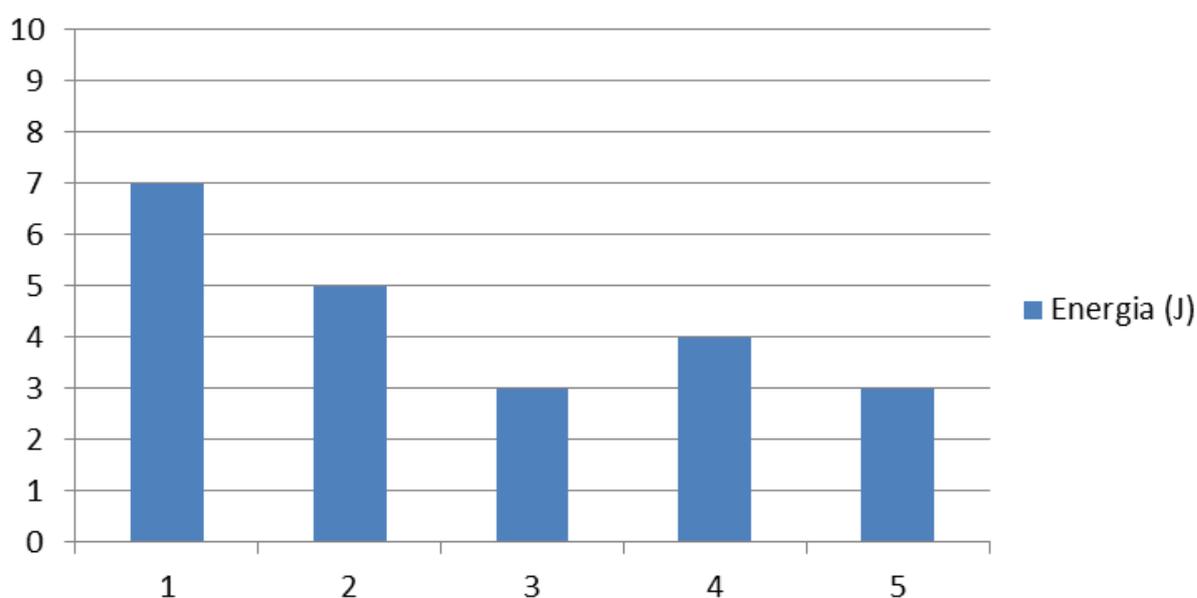


Figura 14 - E Energia para ensaio de impacto no aço 1020 temperado e revenido a 350°C
Fonte: Autoria Própria

Realizando uma média das energias de impacto podem-se comparar através de um quadro gráfico as diferenças entre os processos de tratamento térmico escolhido para o presente trabalho. Seguem na figura 15 as respectivas médias.

ENERGIA DE IMPACTO MÉDIA (J)

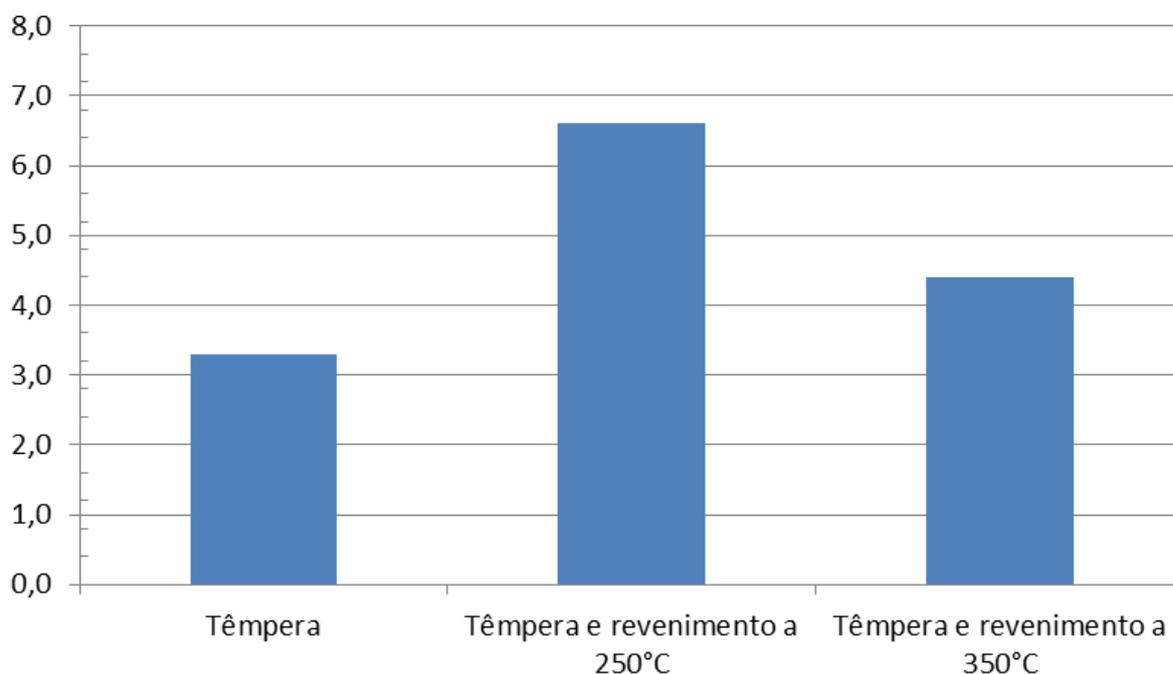


Figura 15 - Médias das energias de impacto para os processos térmicos
Fonte: Autoria Própria

Observando os resultados obtidos no ensaio de impacto, pode-se observar o decréscimo significativo da resistência ao impacto dos corpos de prova tratados termicamente, principalmente quando consideram-se os que não sofreram o tratamento de revenimento.

O tratamento somente de têmpera ocasionou fragilidade mais acentuada nos corpos de prova ensaiados, seguido do processo de têmpera e revenimento a 350°C.

O tratamento feito com têmpera e revenimento a 250°C apresentou em sua média maior de energia absorvida no ensaio, sendo assim, estas condições de tratamento térmico foram as que resultaram na menor fragilidade do aço tratado.

5.2 ENSAIO DE TRAÇÃO

5.2.1 Ensaio de Tração para Processo de Têmpera

O ensaio de tração foi realizado primeiramente para os corpos de prova que foram tratados termicamente somente por têmpera, sem o processo de revenimento. O resultado para o processo é destacado na tabela 4. As principais propriedades avaliadas no ensaio foram: tensão de escoamento do material ensaiado, tensão máxima e alongamento do corpo de prova até a sua ruptura.

Os valores típicos de referência para o mesmo aço (SAE 1020) quando em estado recozido são de acordo com Matweb (1996):

Tensão de Escoamento: 294 MPa;

Tensão Máxima: 394 MPa;

Alongamento à ruptura: 36%.

Tabela 4 - Resultados para ensaio de tração na têmpera

TÊMPERA			
Corpo de prova	Tensão de Escoamento (MPa)	Tensão Máxima (MPa)	Alongamento Ruptura (%)
1	222,7	230,9	11,74
2	272	286,3	12,56
3	32,5	41,9	*

Fonte: Autoria Própria

O corpo de prova de número 2 apresentou melhores resultados quanto a sua resistência mecânica em relação aos outros corpos de prova.

Para o corpo de prova 3 os valores não chegaram a um resultado satisfatório, pois a garra da máquina de tração sofreu uma leve falta de aderência, alterando os resultados.

A região de ruptura dos corpos de prova 1 e 2 é representada em macro nas figura 16 e 17 respectivamente.

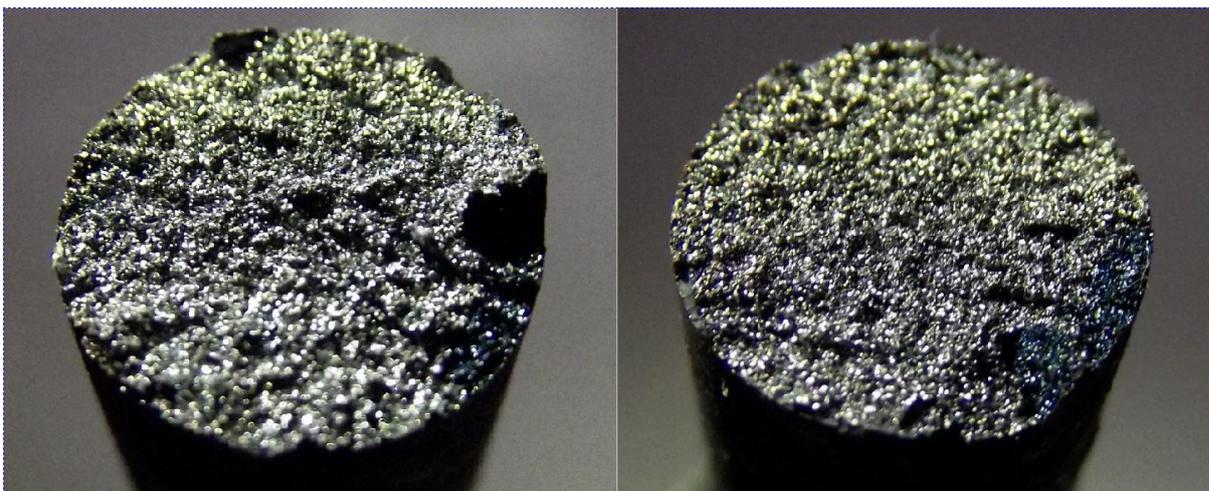


Figura 16 - Região de ruptura para corpo de prova 1 no ensaio de tração para têmpera
Fonte: Autoria própria

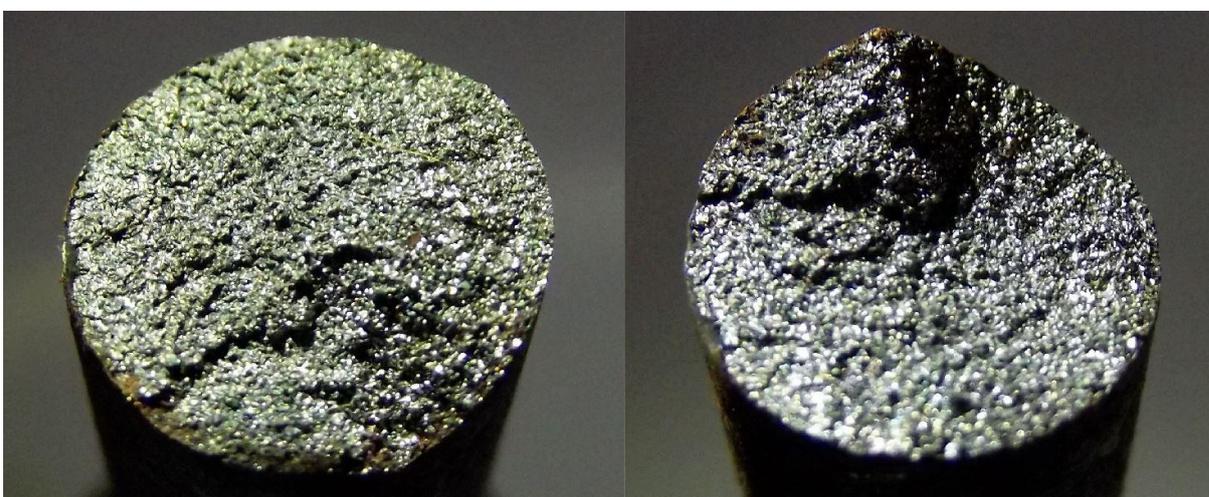


Figura 17 - Região de ruptura para corpo de prova 2 no ensaio de tração para têmpera
Fonte: Autoria própria

Pode-se observar, através nas macrografias, o comportamento de fratura frágil apresentada pelos corpos de prova tracionados. A ruptura dá-se de forma brusca, lisa e plana. O corpo de prova 2 rompeu-se em uma região de trinca, provavelmente originada por tensões residuais do processo de têmpera e acentuadas pela ausência do revenimento posterior.

5.2.2 Ensaio de Tração para Processo de Têmpera e Revenimento a 250°C

O processo de têmpera seguido de revenimento a uma temperatura de 250°C foi avaliado no ensaio de tração e segue na tabela 5 os resultados. Todos os

corpos de provas foram avaliados sem nenhum imprevisto como ao processo anterior.

Tabela 5 - Resultados para ensaio de tração na tempera e revenimento a 250°C

Corpo de prova	Tensão de Escoamento (MPa)	Tensão Máxima (MPa)	Alongamento Ruptura (%)
1	453,1	472,3	13,2
2	817,8	839,3	16,65
3	1016,7	1041,4	18

Fonte: Autoria Própria

Foram retiradas as macro fotografias da região de ruptura dos corpos de provas para uma breve demonstração. As figuras 18,19 e 20 representam respectivamente os corpos de prova de números 1, 2 e 3.

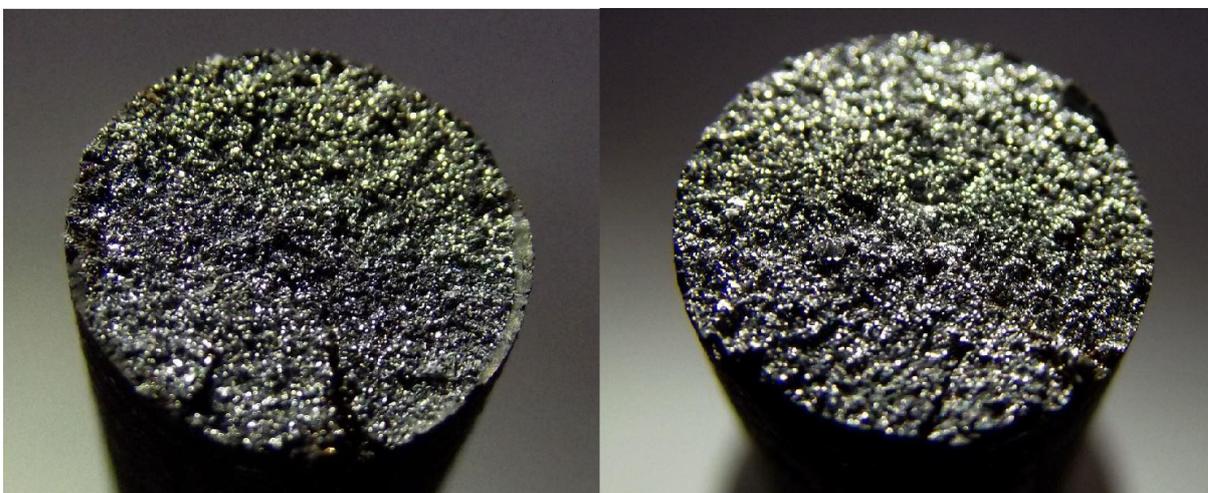


Figura 18 - Região de ruptura para corpo de prova 1 no ensaio de tração para têmpera e revenimento a 250°C
Fonte: Autoria Própria

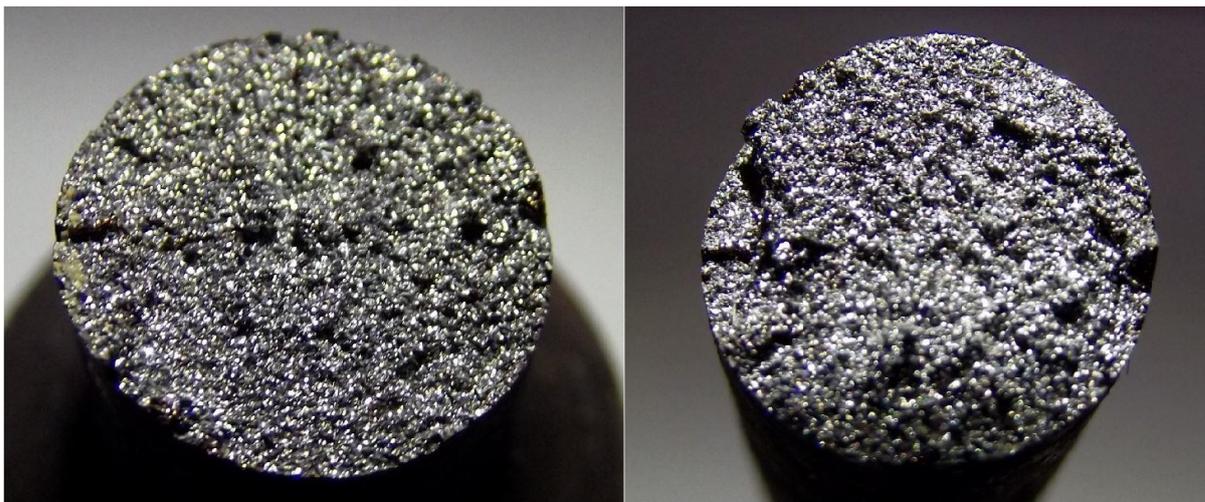


Figura 19 - Região de ruptura para corpo de prova 2 no ensaio de tração para têmpera e revenimento a 250°C
Fonte: Autorial Própria



Figura 20 - Região de ruptura para corpo de prova 3 no ensaio de tração para têmpera e revenimento a 250°C
Fonte: Autorial Própria

Novamente as rupturas possuem aparência cristalina típica das fraturas em materiais frágeis.

5.2.3 Ensaio de Tração para Processo de Têmpera e Revenimento a 350°C

Os últimos corpos de prova foram ensaiados retratando o último processo térmico a ser avaliado para o ensaio de tração e suas propriedades mecânicas. Na tabela 6 os resultados obtidos são apresentados.

Tabela 6 - Resultados para ensaio de tração na tempera e revenimento a 350°C

Corpo de prova	Tensão de Escoamento (MPa)	Tensão Máxima (MPa)	Alongamento Ruptura (%)
1	893,6	915,3	16,88
2	965,1	987	17,05
3	569,8	593,6	13,68

Fonte: Autoria Própria

Para uma comparação aos processos anteriores segue as figuras 21,22 e 23 das fotografias macro das regiões de ruptura dos corpos de prova.

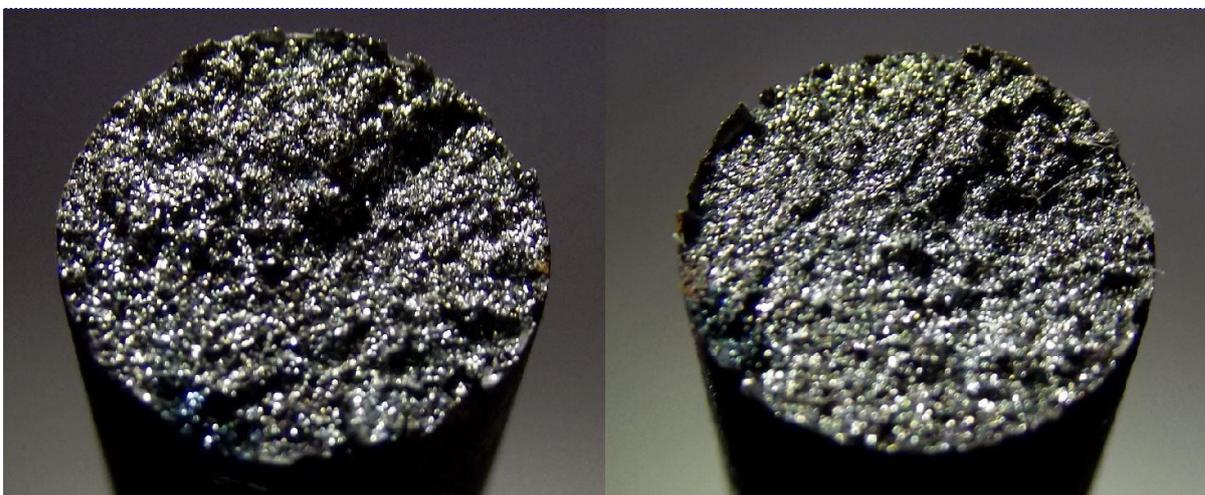


Figura 21 - Região de ruptura para corpo de prova 1 no ensaio de tração para têmpera e revenimento a 350°C
Fonte: Autoria Própria

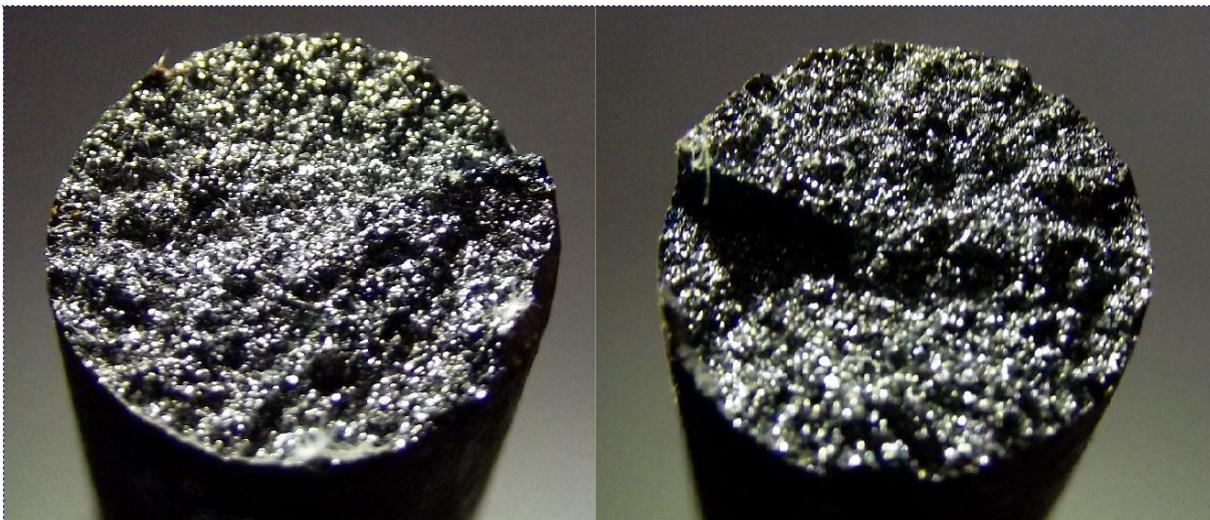


Figura 22 - Região de ruptura para corpo de prova 2 no ensaio de tração para têmpera e revenimento a 350°C
Fonte: Autoria Própria

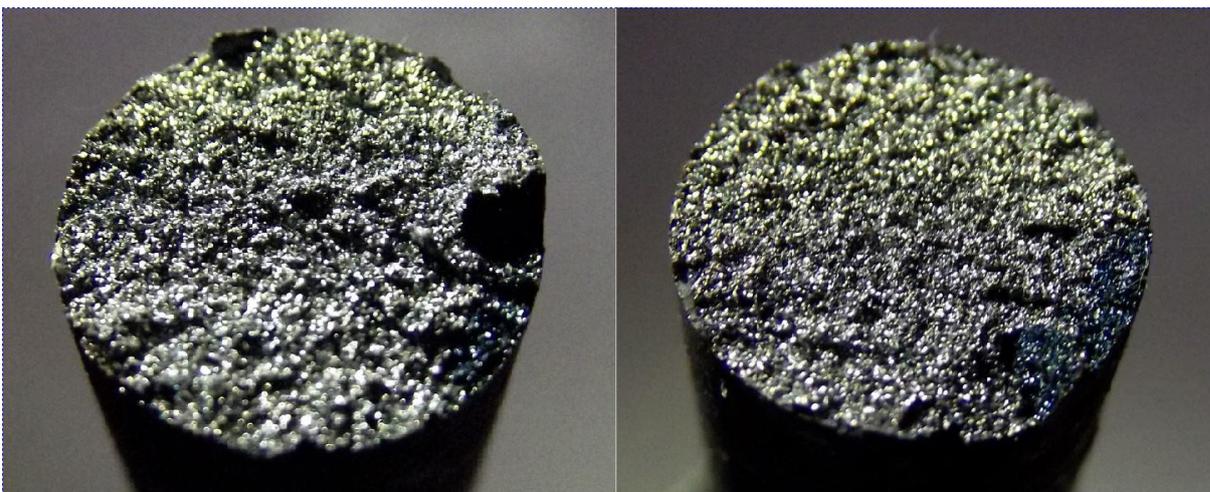


Figura 23 - Região de ruptura para corpo de prova 3 no ensaio de tração para têmpera e revenimento a 350°C
Fonte: Autoria Própria

Na tabela 7 estão dispostas as médias dos valores de resistência à tração para cada tipo de tratamento realizado e os valores utilizados como referência para o SAE 1020 recozido.

Tabela 7 - Média dos resultados dos Processos térmicos

Processo	Tensão de Escoamento (MPa)	Tensão Máxima (MPa)	Alongamento Ruptura (%)
TÊMPERA	247,4	258,6	12,2
TÊMPERA E REVENIMENTO A 250°C	762,5	655,8	16,0
TÊMPERA E REVENIMENTO A 350°C	809,5	832,0	15,9
REFERENCIAL TEÓRICO (MATWEB, 1996)	294	394MPa	36

Fonte: Autoria Própria

Os resultados médios obtidos quando comparados com os valores de referência, pode-se observar um acréscimo significativo das tensões de escoamento e máxima para os corpos de prova temperados e revenidos. O mesmo comportamento, porém não ocorre para os corpos de prova somente temperados, estes apresentaram queda em sua resistência mecânica.

A queda do alongamento à ruptura para todos os corpos de prova que sofreram o tratamento de têmpera, seguida de revenido ou não, indica uma grande redução da ductilidade do material.

Observa-se também que os corpos de prova revenidos a temperatura mais elevada (350°C) apresentou maiores resultados de tensão, provavelmente devido a esta temperatura promover maior formação de martensita a partir da austenita residual.

5.3 ENSAIO DE DUREZA ROCKWELL

O ensaio de dureza Rockwell foi separado em dois processos de leitura para os corpos de prova de tração após serem ensaiados. Foram realizadas leituras de dureza radial e a dureza longitudinal na superfície dos corpos de prova, a fim de

mensurar a homogeneidade da dureza e a eficiência do tratamento em toda a seção da peça.

Foi utilizada a técnica de dureza Rockwell, com carga de 150 kgf e indentador cone de diamante, escala de dureza C, indicada para a realização de medições em aços temperados e de alta dureza.

5.3.1 Ensaio de Dureza Rockwell Longitudinal na Superfície

As medições nos corpos de prova para a dureza longitudinal foram realizadas aleatoriamente ao longo do corpo de prova, em um total de 10 identificações. O referencial teórico de dureza para o aço SAE 1020 recozido é de aproximadamente 64HRB segundo Matweb (1996), não possuindo dureza suficiente para a utilização da escala Rockwell C.

Para todos os corpos de prova temperados houve aumento significativo da dureza do aço tratado, fato este que está demonstrado nas tabelas de resultados exibidas a seguir.

Na tabela 8 são demonstradas todas as medições para os corpos de prova e também as suas respectivas médias para o processo de tratamento térmico de têmpera.

Tabela 8 - Medições para dureza Rockwell longitudinal de superfície para têmpera (continua)

Dureza longitudinal de superfície para têmpera			
Amostras	Medições	Dureza Rockwell (HRC)	Dureza Média (HRC)
1	1 ^a	49	54
	2 ^a	59	
	3 ^a	59	
	4 ^a	59	
	5 ^a	56	
	6 ^a	58	
	7 ^a	52	
	8 ^a	56	
	9 ^a	47	
	10 ^a	49	

Tabela 9 - Medições para dureza Rockwell longitudinal de superfície para têmpera

(conclusão)

2	1 ^a	44	36
	2 ^a	46	
	3 ^a	42	
	4 ^a	23	
	5 ^a	29	
	6 ^a	25	
	7 ^a	29	
	8 ^a	50	
	9 ^a	44	
	10 ^a	32	

Fonte: Autoria Própria

Para o processo de tratamento térmico de têmpera seguido de revenimento a 250°C é representado na tabela 9.

Tabela 10 - Medições para dureza Rockwell longitudinal de superfície para têmpera e revenimento a 250°C

(continua)

Dureza longitudinal de superfície para têmpera e revenimento a 250°C			
Amostras	Medições	Dureza Rockwell (HRC)	Dureza Média (HRC)
1	1 ^a	44	43
	2 ^a	40	
	3 ^a	46	
	4 ^a	32	
	5 ^a	45	
	6 ^a	49	
	7 ^a	27	
	8 ^a	50	
	9 ^a	46	
	10 ^a	47	
2	1 ^a	40	44
	2 ^a	48	
	3 ^a	44	
	4 ^a	46	
	5 ^a	46	
	6 ^a	44	
	7 ^a	49	
	8 ^a	50	
	9 ^a	29	
	10 ^a	45	

Tabela 11 - Medições para dureza Rockwell longitudinal de superfície para têmpera e revenimento a 250°C

(conclusão)

3	1 ^a	45	48
	2 ^a	57	
	3 ^a	45	
	4 ^a	47	
	5 ^a	51	
	6 ^a	48	
	7 ^a	47	
	8 ^a	46	
	9 ^a	49	
	10 ^a	48	

Fonte: Autoria Própria

Finalizando o ensaio para dureza longitudinal de superfície as medições nos corpos de prova para o processo de têmpera e revenimento a 350°C. Na tabela 10 são demonstrados os valores das respectivas medições.

Tabela 12 - Medições para dureza Rockwell longitudinal de superfície para têmpera e revenimento a 350°C

(continua)

Dureza longitudinal de superfície para têmpera e revenimento a 350°C			
Amostras	Medições	Dureza Rockwell (HRC)	Dureza Média (HRC)
1	1 ^a	38	41
	2 ^a	48	
	3 ^a	35	
	4 ^a	38	
	5 ^a	36	
	6 ^a	42	
	7 ^a	40	
	8 ^a	40	
	9 ^a	45	
	10 ^a	43	
2	1 ^a	33	41
	2 ^a	38	
	3 ^a	48	
	4 ^a	38	
	5 ^a	44	
	6 ^a	46	
	7 ^a	42	
	8 ^a	41	
	9 ^a	40	
	10 ^a	44	

Tabela 13 - Medições para dureza Rockwell longitudinal de superfície para têmpera e revenimento a 350°C

		(conclusão)	
3	1 ^a	40	
	2 ^a	35	
	3 ^a	37	
	4 ^a	38	
	5 ^a	41	38
	6 ^a	37	
	7 ^a	39	
	8 ^a	28	
	9 ^a	41	
	10 ^a	39	

Fonte: Autoria Própria

A dureza longitudinal de superfície não apresentou uniformidade, provavelmente devido à formação de pontos de menor dureza por descarbonetação superficial, pois não houve qualquer controle da atmosfera de aquecimento do forno de tratamento térmico que pudesse diminuir ou evitar este fenômeno.

Um gráfico de comparação para as médias é representado na figura 24.

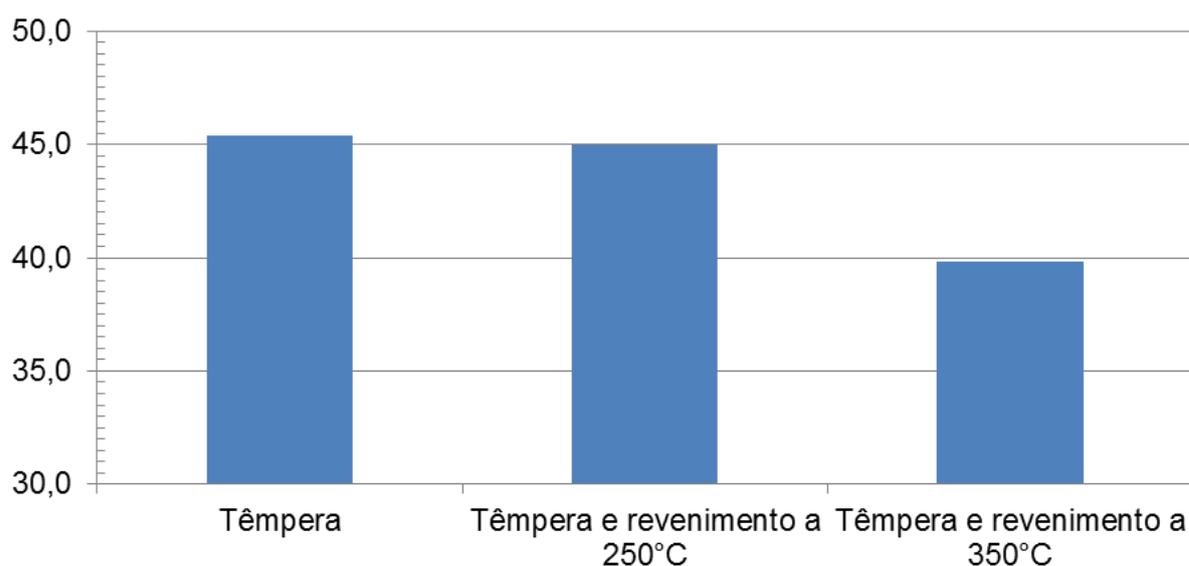


Figura 24 - Médias da dureza longitudinal de superfície
Fonte: Autoria Própria

A dureza foi sofrendo um decréscimo ao longo dos tratamentos térmicos de revenimento para o material ensaiado. O tratamento térmico de têmpera e

revenimento a 250°C não sofreu uma diferença muito grande na perda de dureza na superfície em relação ao processo de somente têmpera, com a diferença das médias sendo de apenas 0,4 HRC, sendo assim apresenta um baixo decréscimo nos resultados de dureza para o processo realizado.

5.3.2 Ensaio de Dureza Rockwell Radial

A dureza radial foi realizada em pontos iniciando da borda até o centro da peça e até a borda novamente, como demonstra a figura 25 de uma amostra após o ensaio. As medidas estão enumeradas em sua sequência de ensaio.

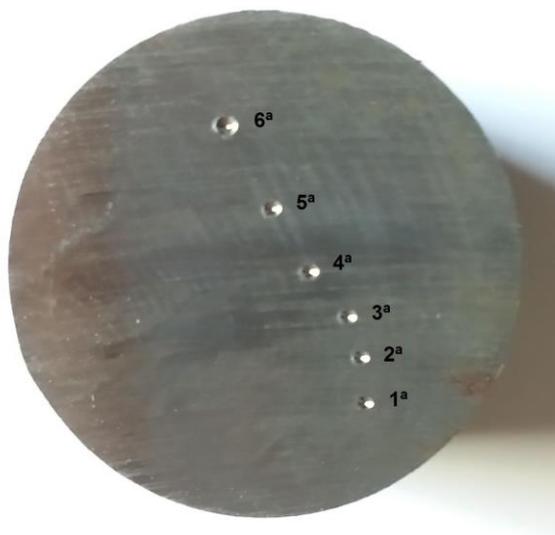


Figura 25 - Medições enumeradas para ensaio de dureza radial
Fonte: Autoria Própria

As medições para o processo de têmpera são representadas na tabela 14.

Tabela 14 - Medições para dureza Rockwell radial para têmpera

Dureza radial para têmpera			
Amostras	Medições	Dureza Rockwell (HRC)	Dureza Média (HRC)
1	1 ^a	49	43
	2 ^a	50	
	3 ^a	49	
	4 ^a	43	
	5 ^a	30	
	6 ^a	35	
2	1 ^a	48	46
	2 ^a	51	
	3 ^a	48	
	4 ^a	44	
	5 ^a	43	
	6 ^a	43	

Fonte: Autoria Própria

Na tabela 12 as medições para a dureza Rockwell radial de superfície para o processo de têmpera e revenimento a 250°C são representadas, bem com as suas médias.

Tabela 15 - Medições para dureza Rockwell radial para tempera e revenimento a 250°C

Dureza radial para têmpera e revenimento a 250°C			
Amostra	Medições	Dureza Rockwell (HRC)	Dureza Média (HRC)
1	1 ^a	48	49
	2 ^a	48	
	3 ^a	50	
	4 ^a	49	
	5 ^a	50	
	6 ^a	50	
2	1 ^a	47	50
	2 ^a	51	
	3 ^a	53	
	4 ^a	51	
	5 ^a	52	
	6 ^a	54	
3	1 ^a	45	48
	2 ^a	45	
	3 ^a	49	
	4 ^a	50	

5 ^a	50
6 ^a	51

Fonte: Autoria Própria

O processo térmico de têmpera e revenimento a 350°C foi também ensaiado e a tabela 13 demonstra os valores.

Tabela 16 - Medições para dureza Rockwell radial para tempera e revenimento a 350°C
(continua)

Dureza radial para têmpera e revenimento a 350°C			
Amostras	Medições	Dureza Rockwell (HRC)	Dureza Média (HRC)
1	1 ^a	45	45
	2 ^a	46	
	3 ^a	44	
	4 ^a	46	
	5 ^a	46	
	6 ^a	45	
2	1 ^a	41	45
	2 ^a	53	
	3 ^a	44	
	4 ^a	43	
	5 ^a	45	
	6 ^a		

Tabela 10 - Medições para dureza Rockwell radial para tempera e revenimento a 350°C

(conclusão)

Dureza radial para têmpera e revenimento a 350°C			
Amostras	Medições	Dureza Rockwell (HRC)	Dureza Média (HRC)
3	1 ^a	40	45
	2 ^a	44	
	3 ^a	45	
	4 ^a	49	
	5 ^a	46	
	6 ^a	47	

Fonte: Autoria Própria

Uma comparação em forma de gráfico é pertinente para uma breve avaliação da dureza radial em todos os processos de tratamento realizados. Portanto na figura 26 as durezas radiais médias para cada processo são representadas.

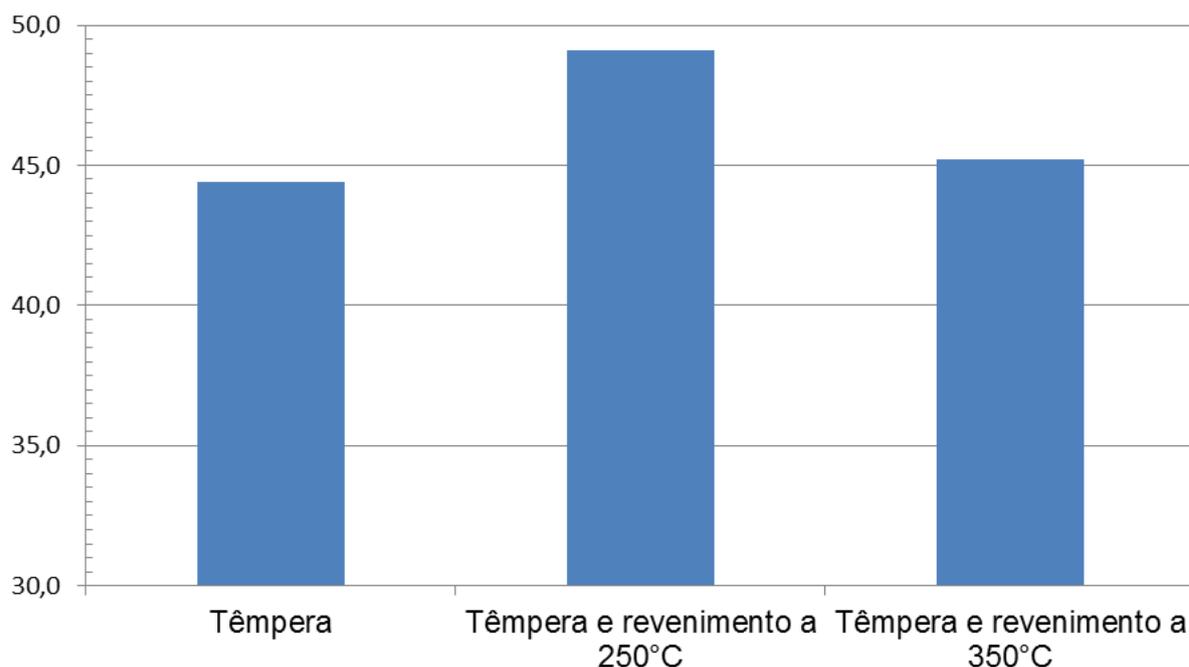


Figura 26 - Médias da dureza radial
Fonte: Autoria Própria

A dureza radial mostrou-se mais uniforme que a dureza superficial, inclusive apresentaram homogeneidade de valores até o núcleo. O processo de têmpera e revenimento a 250°C apresentou maiores valores se comparada aos outros processos.

Pode-se observar novamente que o material temperado e temperado e revenido apresentou ganho significativo de dureza, quando comparado com os valores de referência (64HRB).

5.4 ENSAIO METALOGRÁFICO DAS AMOSTRAS

5.4.1 Análise da Microestrutura do Processo de têmpera

Após a revelação por Nital 3% das amostras preparadas para o ensaio metalográfico, as imagens foram analisadas no microscópio eletrônico *Olympus BX60*. Para o processo de têmpera a imagem é retratada pela figuras 27 com aumento de 500 vezes.

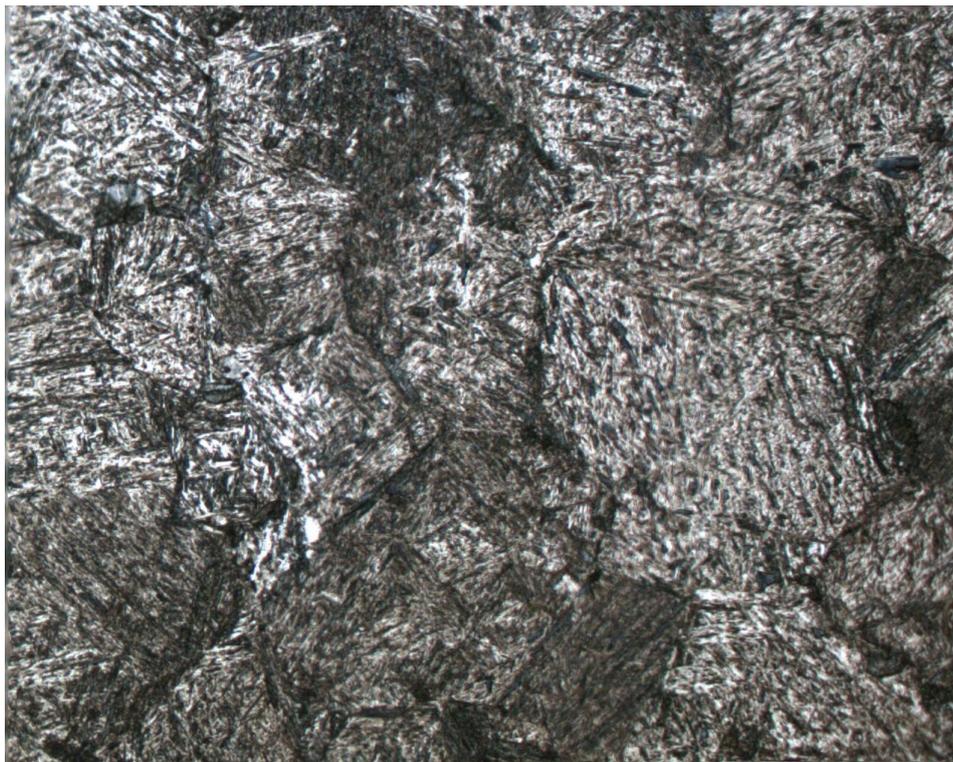


Figura 27 - Microestrutura do processo de têmpera em 500X
Fonte: Autoria Própria

Na figura 27, observa-se a existência de grãos muito refinados, com morfologia acicular (agulhas), com núcleos aciculares claros, de aparência grosseira e distribuídos de forma irregular. Também encontram-se presentes fases aciculares escuras, aparentemente mais grosseiras que as de coloração clara. Provavelmente, sendo martensita grosseira (fase clara) e martensita grosseira revenida (fase escura).

5.4.2 Análise da microestrutura do processo de têmpera e revenimento a 250°C

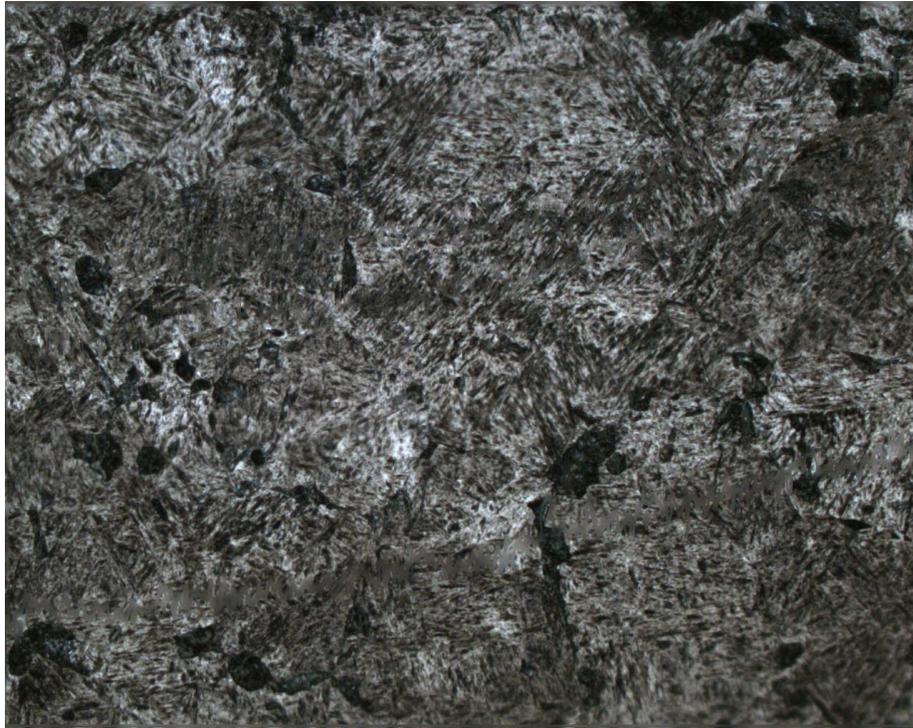


Figura 28 - Microestrutura do processo de têmpera e revenimento a 250°C em 500X
Fonte: Autoria Própria

Os núcleos de granulometria refinada de coloração clara repetem-se nos corpos de prova temperados e revenidos, com o aparecimento, porém de fases arredondadas, provavelmente sorbita ou troostita.

5.4.3 Análise da Microestrutura do Processo de têmpera e revenimento a 350°C

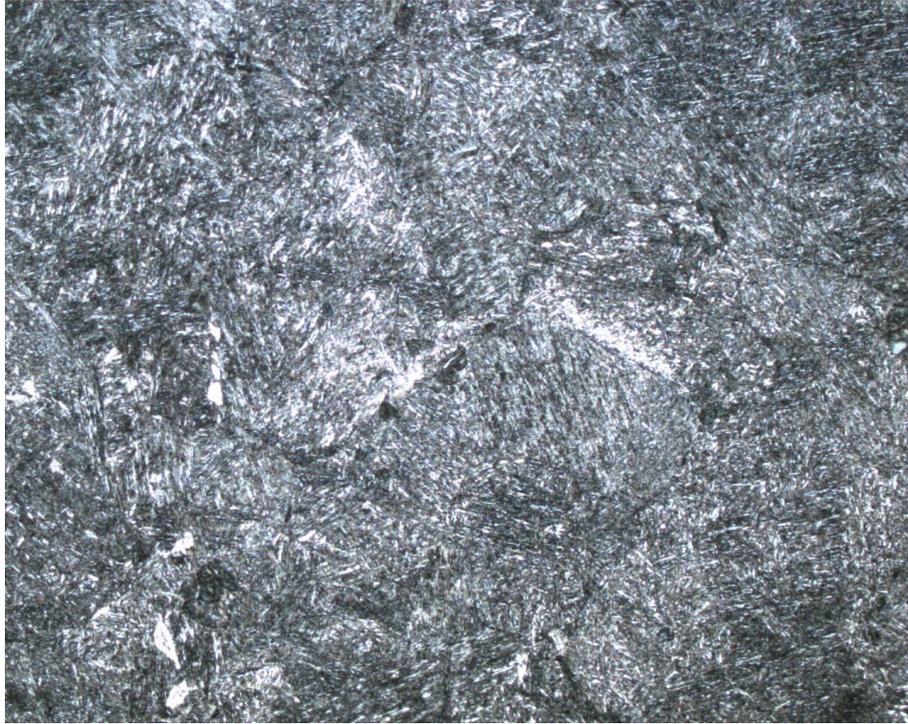


Figura 29 - Microestrutura do processo de têmpera e revenimento a 350°C em 500X
Fonte: Aatoria Própria

Para este tratamento, observa-se também a formação dos grãos aciculares claros e também aciculares de coloração escura distribuídos de maneira mais uniforme que no tratamento anterior, reduzindo-se também a quantidade de fases precipitadas arredondadas.

6 CONCLUSÃO

O aço SAE1020 respondeu ao tratamento de têmpera e revenimento de forma positiva, pois apresentou grande ganho de dureza quando comparado ao aço sem tratamento. Característica importante, principalmente para aplicações onde as cargas aplicadas ao material ficam restritas ao âmbito do desgaste superficial.

Ocorre também, aos aços temperados e revenidos, um acréscimo significativo da sua resistência mecânica, representadas pela tensão de escoamento e tensão máxima suportada pelo material.

Deve-se, entretanto considerar a grande limitação da aplicação deste aço tratado, que é a sua excessiva fragilidade sob efeito de cargas dinâmicas (impacto).

As microestruturas observadas correspondem e justificam a mudança das propriedades finais do aço tratado, pois mostram grande refinamento dos grãos após a têmpera.

O tratamento de revenimento posterior à têmpera provou ser necessário e indispensável para menor fragilidade do material a ser aplicado.

REFERÊNCIAS

- BOBROVNITCHII, Guerold; FILGUEIRA, Marcello. A Influência de Tratamento Térmico Complementar sobre a Resistência ao Desgaste de Pastilha de Nitreto Cúbico de Boro. **Revista Matéria**, Campo Dos Goytacazes, v. 11, n. , p.238-242, 13 jun. 2006. Disponível em: <<http://www.materia.coppe.ufrj.br/sarra/artigos/artigo10807>>. Acesso em: 27 jun. 2013.
- CALLISTER JUNIOR, W. D.. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma introdução**. 5. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2002.
- CHIAVERINI, V. **Aços e ferros fundidos**. 7. ed. São Paulo: Abm, 1996.
- COLPAERT, H. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**. 3. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1983.
- GARCIA, Amauri; SPIM, Jaime Alvares; SANTOS, Carlos Alexandre dos. **Ensaios dos Materiais**. Rio de Janeiro: Ltc, 2000. 247 p.
- HENRY, O.; MONDE, K. C.. Evaluation of the Transformation Mechanisms and Mechanical Properties of Ferrite: Martensite Microalloyed Steels. **Materials Research**, Ogwashi-uku, v. 11, n. 1, p.97-101, 03 mar. 2008.
- HUTCHINSON, Bevis et al. Microstructures and hardness of as-quenched martensites (0.1–0.5%C). **Elsevier: Acta Materialia**, Stockholm, Sweden, n. , p.5845-5858, 30 maio 2011.
- KRAUSS, George. Martensite in steel: strength and structure. **Materials Science And Engineering**, Golden, Usa, n. , p.40-57, 1999.
- MARIANO, Neide Aparecida et al. Caracterização da temperabilidade e das curvas de transformação de fases de aços inoxidáveis martensíticos do tipo FeCrNi. **Esc. Minas**, Ouro Preto, n. , p.163-167, 01 jan. 2007.
- MATWEB. **SAE 1020**. 1996. Disponível em: <<http://matweb.com>>. Acesso em: 10 jul. 2014.
- OBBERG, E.; JONES, F. D. **Machinery's Handbook**. Nova Iorque: Editora Industrial Press Inc., 2004.
- PADILHA, A , **Materiais de Engenharia-Microestrutura e Propriedades**, São Paulo : Hemus, 1997.
- PROVENZA, Francesco; Escola Pro-Tec. **Materiais para construções mecânicas**. São Paulo: F. Provenza, 1990.

SILVA, A. L. V. da Costa e; MEI, Paulo Roberto. **Aços e Ligas especiais**. 2. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2006.

SOUZA, Sérgio Augusto de. **Ensaio mecânico de materiais metálicos**: Fundamentos teóricos e práticos. 5. ed. São Paulo: Blucher, 1982. 286 p.