

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS
CURSO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

SAMUEL MOTA SÁ

INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA DE REVENIMENTO NAS PROPRIEDADES
MECÂNICAS DO AÇO AISI 5150

BELO HORIZONTE

2015

SAMUEL MOTA SÁ

**INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA DE REVENIMENTO NAS PROPRIEDADES
MECÂNICAS DO AÇO AISI 5150**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no Curso de Graduação em Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientador: Ivan J. Santana

BELO HORIZONTE

2015

SAMUEL MOTA SÁ

**INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA DE REVENIMENTO NAS PROPRIEDADES
MECÂNICAS DO AÇO AISI 5150**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no
Curso de Graduação em Engenharia de Materiais do
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas
Gerais como requisito parcial para obtenção do título
de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Aprovado em: / /

BANCA EXAMINADORA

Prof. Ivan J. Santana – Orientador

Prof. Carlos Eduardo dos Santos

Prof. Aderci de Freitas Filho

Prof. João Bosco dos Santos

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador, Professor Ivan José Santana por me guiar por este trabalho.

Aos professores Carlos Eduardo do Santos e Aderci de Freitas Filho que me auxiliaram na realização da parte prática.

A equipe da PUC-MG, pela solicitude e disposição de me auxiliar ao longo do tempo em que realizei os ensaios de tração.

A Deus por permitir a oportunidade de cursar o curso de Engenharia de Materiais e chegar até este ponto.

Especialmente a minha mãe por todo o apoio e incentivo de sempre.

RESUMO

O presente trabalho teve como objetivo investigar a influência dos parâmetros de têmpera e revenimento sobre as propriedades mecânicas do aço AISI 5150. Em busca de um maior entendimento do impacto na alteração de temperatura de revenimento ou mesmo a ausência deste tratamento em uma amostra temperada, os corpos de prova foram tratados com diferentes temperaturas de revenimento. Posteriormente, testes de tração e ensaio de dureza, foram efetuados sobre as mesmas, afim de determinar a curva de revenimento.

Esta curva mostrou um aumento de dureza e tensão máxima resistida pelo material, na primeira faixa de temperatura (200°C), com posterior redução do valor de dureza devido ao processo de recuperação e recristalização da martensita, assim como havia sido indicado pela bibliografia pesquisada. Os valores de resistência a tração, sofreram aumento inicial, devido ao alívio de tensões residuais, reduzindo a possibilidade de formação de trinca e deformação frágil. As amostras também foram submetidas a ensaios de difração de raio x, que indicou, a presença de austenita retida na amostra temperada, decomposta já na temperatura de 200°C, além do esperado alto teor de martensita.

Palavras chaves: aço SAE AISI 5150, Têmpera, Revenimento.

ABSTRACT

This paper has as goal to investigate the influence of the parameters for the tempering heat treatment over the mechanical properties of the steel AISI 5150. Searching for a better understanding of the impact of the tempering temperature or even the absence of this treatment, for the samples that went through quenching, the samples were tempered with different temperatures. After the heat treatment, the samples were submitted to tensile and hardness tests, in order to obtain the tempering curve for this steel.

This curve has showed an increase in the hardness value e tensile resisted by the material in the first tempered temperature, with posterior reduction, due the process of recovering and recrystallization of the martensite, same as shown in the researched bibliography. The samples were also submitted to XRD analysis that indicated the presence of austenite, which were decomposed in the first tempering temperature, besides the expected high value for martensite.

Key Words: AISI 5150 steel. Quench. Temper.

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Designação e composição químico aço 5150 ABNT (% de volume dos elementos presentes no aço).....	22
Tabela 2 – Temperaturas dos Tratamentos Térmicos.....	28
Tabela 3 – Resultados do ensaio de dureza	34
Tabela 4 – Relação dos resultados obtidos no ensaio de tração	36

Lista de Figuras

Figura 3-1 – Diagrama de equilíbrio Fe-C.....	11
Figura 3-2 – cinética de formação da perlita.....	12
Figura 3-3 – Curvas TTT dos aços	13
Figura 3-4 – Comparação dos diagramas TRC (linha contínua) com o diagrama TTT (linha tracejada) para o aço 1080.	14
Figura 3-5 – Diagrama esquemático representativo das operações de têmpera e revenimento.....	15
Figura 3-6 – Variação da dureza em função da temperatura de revenimento. Fonte: Reed Hill (2009).....	16
Figura 3-7 – Estrutura cristalina tetragonal de corpo centrado da martensita ..	18
Figura 3-8 – Temperatura de início da transformação martensítica superpostas ao diagrama do equilíbrio de fase. A morfologia da martensita é citada.	19
Figura 3-9 – Microestrutura da martensita em ripa em um aço 4140 revenido a 150°C (MET).	19
Figura 3-10 – Microestrutura da martensita tipo placas em uma liga Fe – 1,86C	20
Figura 3-11 – Tipos mais usados de corpos de prova para ensaio de tração ...	23
Figura 3-12 – Máquina de Ensaio de tração esquemática	23
Figura 3-13 – Curva força versus alongamento esquemática	24
Figura 4-1 – Fluxograma das Atividades.....	26
Figura 4-2 – Centro de Usinagem Romi.....	27
Figura 4-3 – Dimensões do corpo de prova	27
Figura 4-4 – As 21 amostras usinadas no formato final	28
Figura 4-5 – Forno usado no aquecimento das amostras	29
Figura 4-6 – Amostras a 900°C.....	29
Figura 4-7 – Realização do ensaio de tração	30
Figura 4-8 – Amostras para dureza (A) e para DRX (B).....	31
Figura 4-9 – Durômetro IGV modelo RM401/A	31
Figura 5-1 – curva de revenimento do aço AISI 5150.....	33
Figura 5-2 – Curva de revenimento do aço AISI 5150	35
Figura 5-3 – Difratogramas das amostras	37

Sumário

1. INTRODUÇÃO	9
2. OBJETIVO	9
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	10
3.1. Tratamento Térmico.....	10
3.1.1. Curvas TTT e TRC	11
3.1.1. Têmpera e Revenimento	14
3.1.2. Influência do Revenimento na Dureza e Tenacidade	16
3.2. Transformações Estruturais	16
3.2.1. Martensita.....	17
3.2.2. Propriedades da Martensita.....	20
3.3. Temperabilidade	21
3.3.1. Fatores que Influenciam a Temperabilidade.....	21
3.4. Aço 5150	22
3.5. Ensaio de Tração	22
3.5.1. Parâmetros Obtidos no Ensaio de Tração.....	24
3.6. Difração de Raio X	24
4. METODOLOGIA E MATERIAIS.....	26
4.1. Descrição Geral do Trabalho Desenvolvido	26
4.2. Materiais.....	27
4.3. Tratamento Térmico.....	28
4.4. Ensaio de Tração e Dureza.....	29
4.5. DRX.....	32
5. RESULTADOS.....	33
5.1. Dureza.....	33
5.2. Tração.....	35
5.3. DRX.....	37
6. CONCLUSÃO	39
7. TRABALHOS FUTUROS	40

1. INTRODUÇÃO

O aço AISI 5150 é geralmente aplicado para molas que devem ter como característica, alto limite de elasticidade, elevada resistência e elevado limite de fadiga. Conformado a quente, o aço AISI 5150 é usualmente aplicado em molas helicoidais e semielípticas. Essas molas, devido a seus requerimentos mecânicos, são usualmente tratadas termicamente visando entre outras propriedades o alívio de tensões. Tendo em vista este contexto este trabalho visou estudar os efeitos do tratamento térmico, especificamente a têmpera e o revenimento sob a liga de aço AISI 5150.

Para realização do trabalho, foi feita uma revisão bibliográfica sobre os tratamentos térmicos aplicados no aço, e nas técnicas de caracterização, utilizada na mensuração dos resultados. A caracterização se deu com os ensaios de tração e dureza, para obtenção dos resultados mecânicos atingidos após os tratamentos. A Difração de raio x também foi aplicada para correlação das propriedades obtidas com a microestrutura apresentada pelo material.

É esperado que os resultados obtidos neste trabalho, propiciem um maior domínio sobre os processos que serão utilizados e pesquisados. Um ganho inerente no decorrer do processo, é o aprofundamento na aplicabilidade do aço 5150, com consequente obtenção de maior conhecimento sobre as ligas com teor de carbono semelhante e elementos de liga próximos ao deste aço.

2. OBJETIVO

O objetivo geral deste trabalho é verificar os efeitos de tratamento térmico nas propriedades mecânicas do aço AISI 5150 temperado e revenido. A partir dos resultados obtidos, relacionar os efeitos de alteração da temperatura de revenimento com as modificações verificadas nas propriedades do aço.

O trabalho focou, mais especificamente, na variação das propriedades de dureza e resistência a tração, estudadas pelos ensaios de dureza e tração respectivamente. difratografia de raio x foi usada para determinação e quantificação das fases presentes no aço, para correlação da modificação nas fases, com as propriedades observadas.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Tratamento Térmico

Para Colpaert (2008) tratamento térmico consiste na maneira mais usada para obtenção de novas propriedades físicas, mecânicas e algumas vezes químicas, em aços. Tratamentos térmicos comuns como; recozimento, normalização, têmpera e revenimento, partem do princípio de aquecimento e resfriamento das ligas. Cementação, nitretação e carbonitretação são exemplos de tratamentos, em que há alterações químicas nas superfícies das ligas tratadas. Ainda de acordo com Colpaert (2008) as “temperaturas críticas” são as temperaturas em que as transformações de fases entre ferrita, austenita e cementita, ocorrem. Tratamentos convencionais, se dão em um primeiro momento, com a passagem do aço da temperatura ambiente, para o campo austenítico, ficando assim, acima da zona “crítica”.

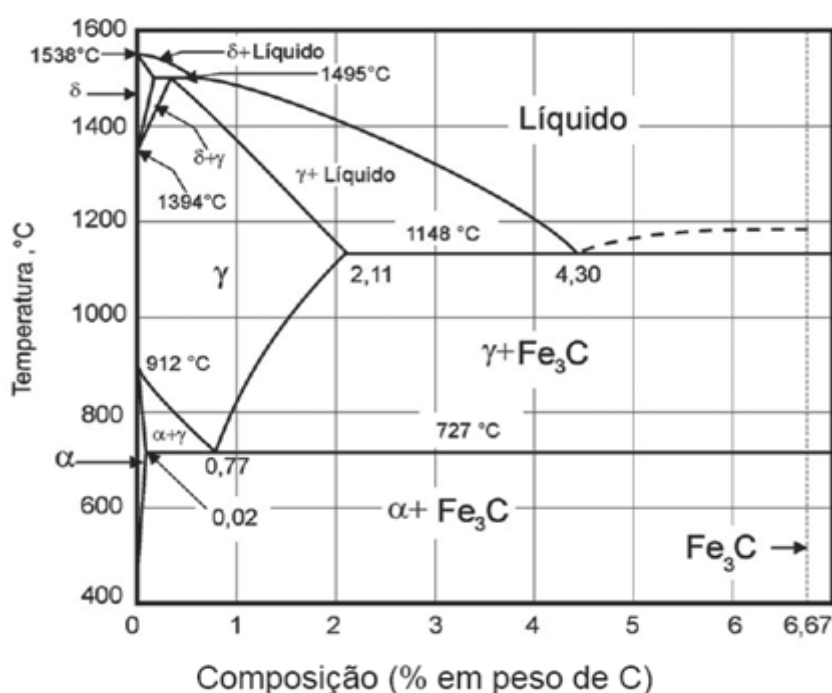
A aplicação de metais depende diretamente de suas propriedades e características. Em metais, as propriedades estão relacionadas as suas composições químicas, condições de fabricação e estrutura granular. Estruturas, obtidas com taxas de resfriamentos variáveis a partir de altas temperaturas, possuem modificadas propriedades mecânicas. Com essas propriedades em vista, o método mais usado e eficiente para se obter estruturas desejadas em materiais é o tratamento térmico (CHIAVERINI, 2003).

Os constituintes formados nos metais caracterizam as propriedades mecânicas conferidas pelo tratamento térmico. Os constituintes ferrita, perlita, martensita e bainita diferem estrutura cristalina e propriedades mecânicas. Sendo que o constituinte ferrita CCC (cubica de corpo centrado) apresenta baixa dureza, tem baixa resistência mecânica e é dúctil. A perlita, constituinte formado por uma matriz de ferrita com lamelas de cementita, tem maior dureza, resistência mais elevada e menor ductilidade, em relação a ferrita. A martensita, TCC (tetragonal de corpo centrado), apresenta alta dureza e elevada fragilidade. O constituinte bainita, que é basicamente classificado em superior ou inferior, chama a atenção pela elevada dureza e tenacidade (CALLISTER, 2002).

3.1.1. Curvas TTT e TRC

De grande utilidade na representação dos limites de composição das fases ou mistura de fases do sistema ferro carbono, o diagrama Fe-Fe₃C na figura 3.1, não fornece informações da transformação da austenita em condições diferentes do equilíbrio (resfriamento lento). O diagrama não considera a cinética das transformações, ou seja, os tempos necessários e a influência das taxas de resfriamento para se completarem as transformações de fase (CALLISTER, 2002; REED-HILL, 2009).

Figura 3-1 – Diagrama de equilíbrio Fe-C.



Fonte: Callister, 2002

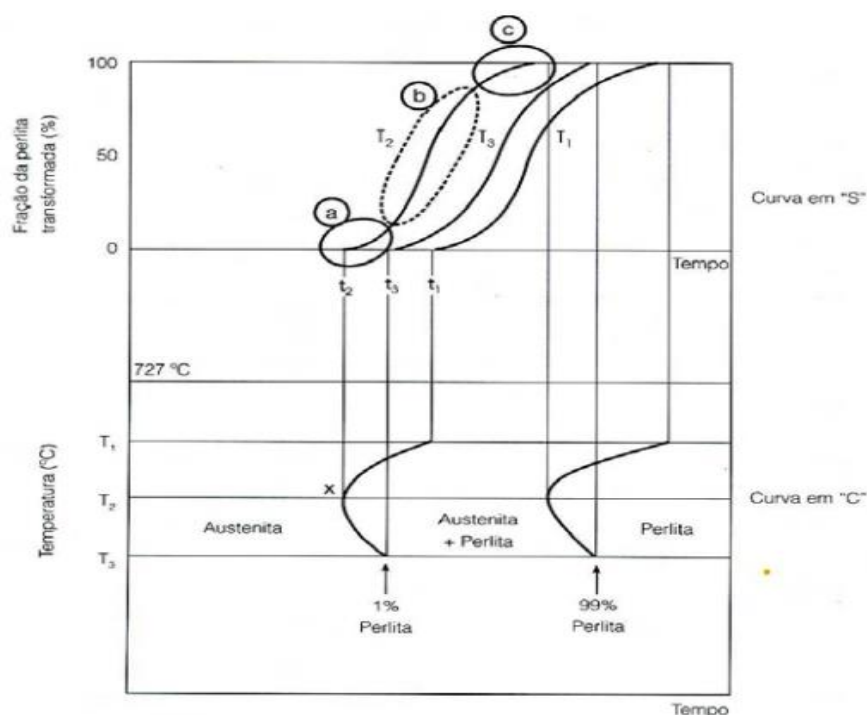
A evolução das transformações de fase que ocorrem no aço, são então descritas com auxílio das curvas de transformação TTT (tempo, temperatura e transformação) e TRC (transformação por resfriamento contínuo)

As curvas de transformação são normalmente obtidas, com a utilização do dilatômetro, um equipamento que medi as variações de comprimento que acontecem nas amostras, provocadas pelas transformações de fase ou pela mudança de temperatura. Quando ocorre transformação de fase, variações volumétricas ocorrem, devido as diferentes microestruturas da fase formada e da fase original. Estas variações volumétricas, são então detectadas pelo dilatômetro (CHIAVERINI, 2003).

Transformações difusionais, nas quais ocorrem nucleação e crescimento, como as da formação da perlita e da ferrita, não acontecem instantaneamente, elas demandam tempo para o rearranjo dos átomos e formação dos primeiros núcleos de perlita. A curva da figura 3.2 mostra os diferentes estágios de formação da perlita, quando há formação dos primeiros núcleos de perlita na região “a”, crescimento destes núcleos na área “b”. Na região “c” os nódulos de perlita sendo formados se tocam, o que faz com que a transformação seja mais lenta no seu final.

O resfriamento de uma amostra de aço eutetóide de 1000°C até uma temperatura abaixo de 727°C e mantida nesta, causa uma transformação de fase que irá gerar uma curva de fração volumétrica versus tempo. Isto ocorre para diferentes temperaturas, da união dos tempos de início das transformações se obtém uma curva de início da formação da perlita. O mesmo ocorre quando se une os tempos de fim da transformação. A curva obtida é a TTT, representada na figura 3.2. Para um aço hipereutetóide, há a formação de cementita antes da perlita e para um aço hipoeutetóide há a formação de ferrita antes da perlita (COLPAERT, 2008).

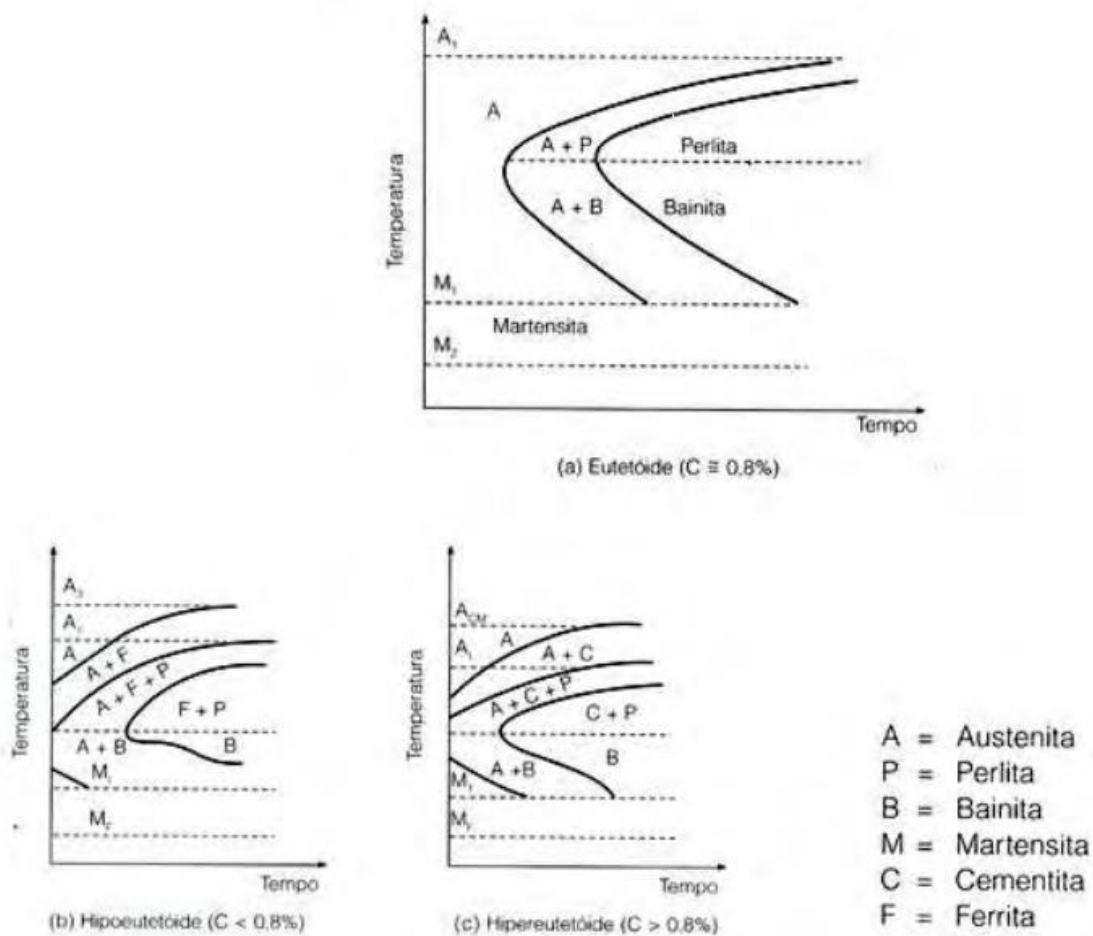
Figura 3-2 – cinética de formação da perlita



Fonte: Silva e Mei (2006)

A figura 3.3 contém curvas TTT, nas quais se observa constituintes não previstos pelo diagrama ferro carbono, a bainita e a martensita (SILVA e MEI, 2006; REED-HILL, 2009).

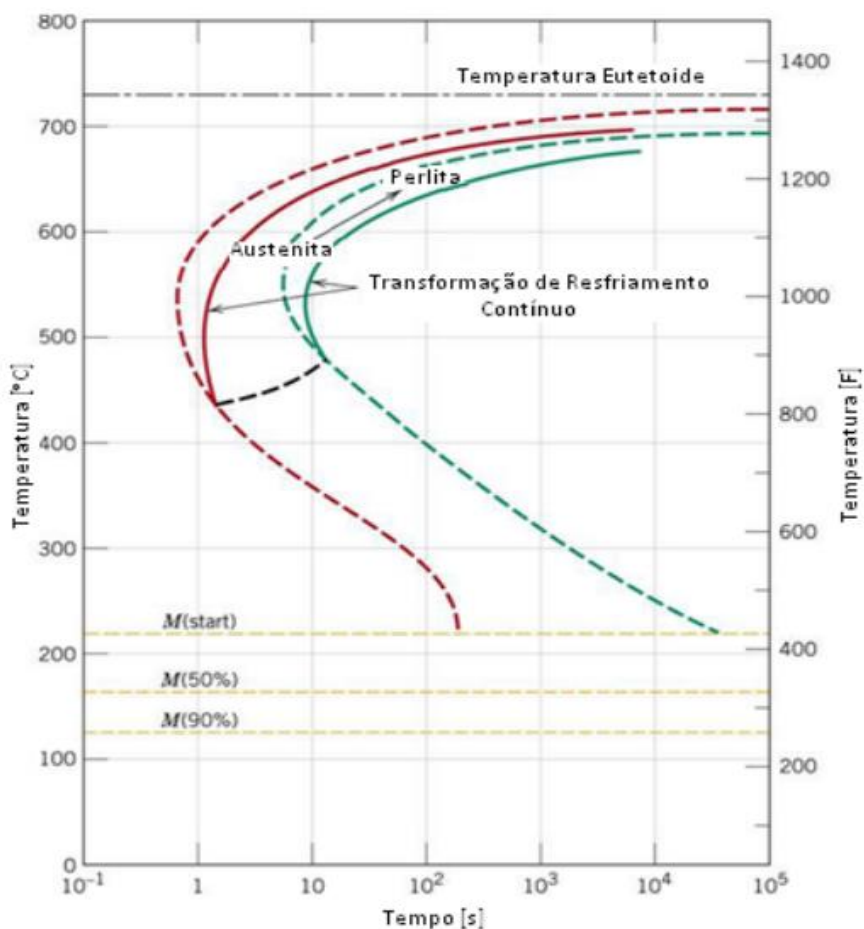
Figura 3-3 – Curvas TTT dos aços



Fonte: Silva e Mei (2006)

Para resfriamentos contínuos, mais comumente encontrados que os resfriamentos isotérmicos, foram desenvolvidos os diagramas TRC. Neste diagrama, ao contrário do TTT onde a estrutura obtida é mais uniforme, o material apresenta uma mistura de microestruturas. A figura 3.4 apresenta uma comparação dos diagramas TRC (linha contínua) com o diagrama TTT (linha tracejada) para o aço 1080 (ASKELAND & PUHLÉ, 2006).

Figura 3-4 – Comparação dos diagramas TRC (linha contínua) com o diagrama TTT (linha tracejada) para o aço 1080.



Fonte: Askeland & Puhlé (2006)

3.1.1. Têmpera e Revenimento

Têmpera consiste na obtenção de uma estrutura austenítica, através da manutenção da liga, em temperatura apropriada após o aquecimento, com posterior resfriamento, contínuo visando a transformação da austenita em martensita. A martensita confere maior dureza à peça, sendo este aumento de dureza, dependente de fatores como; meio em que se deu o resfriamento, complexidade da peça e “temperabilidade” do aço. (COLPAERT, 2008).

Revenimento consiste na eliminação de tensões residuais provocadas pelo tratamento de tempera, melhorando propriedades físicas. O processo se dá, com o

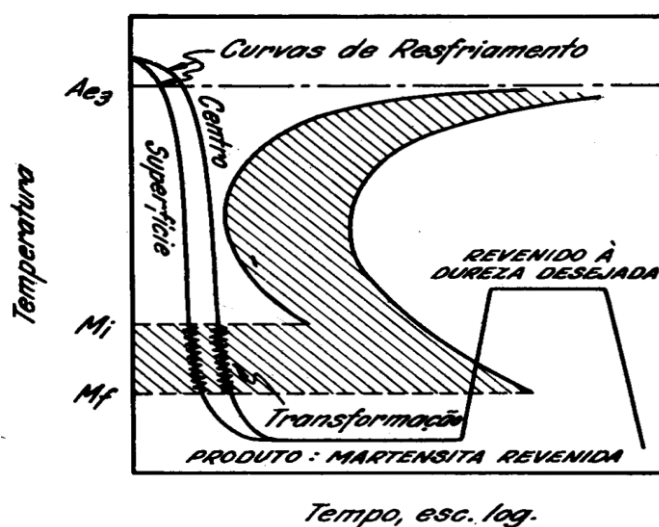
aquecimento da peça temperada, por um determinado tempo, a uma temperatura usualmente inferior a 650°C (CALLISTER, 2002).

De acordo com Reed Hill (2009), durante o revenimento, quatro principais reações acontecem:

- Segregação do carbono para os defeitos de rede; durante o revenimento a martensita se decompõe em duas fases, carbonetos intermediários ou martensita de baixo carbono.
- A segunda e a terceira reações são a transformação da austenita retida e precipitação da cementita: a precipitação de cementita pode ocorrer em aços de maior teor de carbono, já a austenita se decompõe na faixa de 200°C a 300°C, sendo a precipitação de carbonetos na austenita que reduz seu teor de carbono e viabiliza a formação de martensita.
- O quarto estágio se dá em ligas contendo elementos de liga formadores de carbonetos em temperaturas entre 500°C e 600°C podem ocorrer precipitação destes carbonetos como; V_4C_3 e Mo_2C . O que resulta em um aumento de dureza e resistência.

Colpaert (2008) ainda observa que acima de 300°C o processo de recuperação e recristalização da martensita começa havendo eliminação de discordâncias o que somado ao crescimento e esferoidização das partículas de cementita ocasionam numa queda de resistência mecânica e dureza. A figura 3.5 corresponde a um diagrama esquemático do tratamento de têmpera e revenimento:

Figura 3-5 – Diagrama esquemático representativo das operações de têmpera e revenimento.

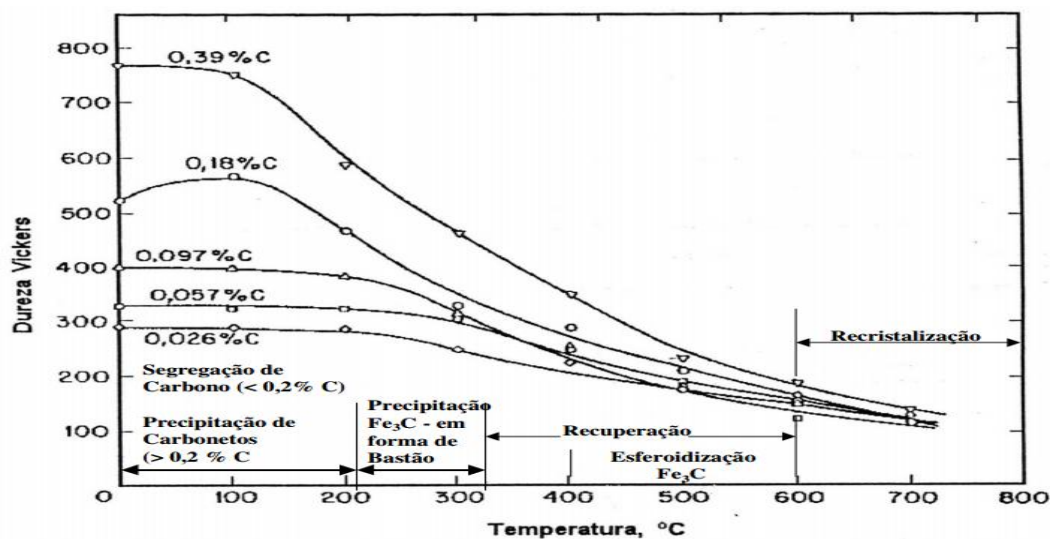


Fonte: Chiaverini (2003) (Adaptada pelo autor)

3.1.2. Influência do Revenimento na Dureza e Tenacidade

Mudanças microestruturais que ocorrem em função do tempo e da temperatura do revenimento, afetam diretamente as propriedades mecânicas dos aços. A figura 3.6 mostra a variação da dureza Vickers da martensita para ligas Fe-C em função da temperatura de revenimento e as reações que ocorrem.

Figura 3-6 – Variação da dureza em função da temperatura de revenimento. Fonte: Reed Hill (2009)



Fonte: Reed Hill (2009).

Na faixa de 200 a 400°C há uma queda acentuada na dureza, o que ocorre, devido à precipitação e crescimento da cementita. Este crescimento, diminui o número de barreiras às discordâncias, uma vez que diminui a quantidade de precipitados. A dureza e a resistência também caem com a recristalização e recuperação da matriz, ocorrendo aumento de ductilidade e tenacidade. Portanto, menor serão a dureza e a resistência dos aços, quanto maior a temperatura e tempo de revenimento, resultando em aumento da ductilidade e tenacidade (CHIAVERINI, 2003; REED-HILL, 2009).

3.2. Transformações Estruturais

Velocidade de resfriamento é um fator importante em mudanças estruturais. Algumas mudanças se dão em apenas frações de segundos enquanto outras são muito lentas. Mudanças estruturais ocorrem por dois mecanismos: difusivo e displaciva. Mudanças difusionais requerem a movimentação de átomos ou moléculas pelo material e mudanças displacivas por outro lado, envolvem apenas uma pequena “reordenação” de átomos ao redor de sua posição original. A maioria

das transformações se dá por mecanismos difusionais. Uma importante transformação, porém, ocorre por mecanismo displacivo; a formação da martensita via resfriamento instantâneo de aços carbono (ASHBY; JONES, 1999).

3.2.1. Martensita

De acordo com Colpaert (2008), quando a temperatura de um material capaz de sofrer transformação martensítica é reduzida, o material eventualmente passara por uma temperatura que separa a extensão de duas diferentes fases em equilíbrio. Abaixo desta temperatura, a energia livre do material é reduzida, se há a transformação da fase estável em altas temperaturas, para a fase estável em baixas temperaturas. Esta diferença em energia livre é a força primária para uma transformação martensítica.

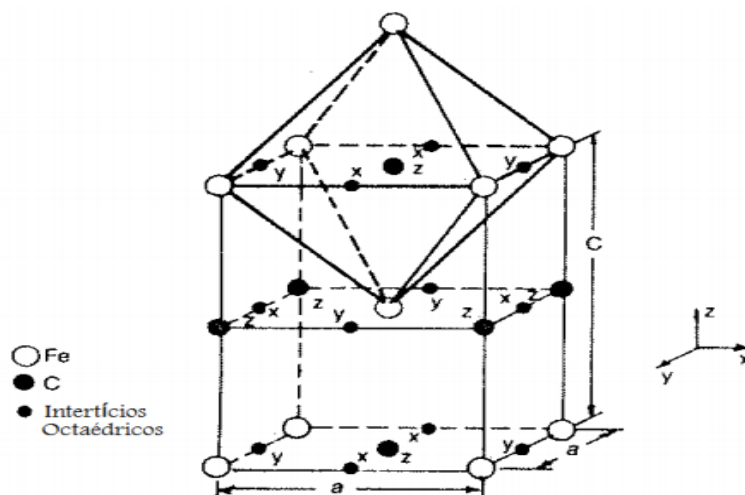
A formação de martensita se dá em uma transformação de fase na qual, ocorre movimentação da interface que separa a fase formadora do produto. Com o movimento desta interface, átomos movem da estrutura cristalina da fase matriz, para a estrutura cristalina da martensita. Sendo assim, difusão não é necessária para que a transformação em martensita ocorra. Esta transformação é denominada displaciva. A formação da martensita tem alguns aspectos gerais que devem ser salientados, por diferenciarem esta transformação das transformações por difusão e que são relevantes para a análise das microestruturas resultantes:

- A martensita tem mesma composição química, da austenita (matriz), que a originou.
- A quantidade de austenita transformada depende da temperatura atingida, sendo independente do tempo em que o material é mantido na temperatura, tal transformação é dita “atérmica”.
- Por se tratar de uma transformação adifusional e com alta variação de volume associada, a transformação acontece com elevado nível de tensão residual.

Como a difusão é reprimida, usualmente pelo resfriamento rápido, os átomos de carbono são aprisionados nos sítios octaédricos da estrutura cúbica de corpo centrado (CCC) martensita uma nova fase, é então formada. Na formação da martensita a solubilidade do carbono na estrutura CCC é excedida, a martensita então, assume uma nova estrutura, a Tetragonal de corpo centrado (TCC). Na

estrutura TCC o parâmetro c é maior que o parâmetro a , conforme mostrado na Figura 3.7. (REED-HILL, 2009)

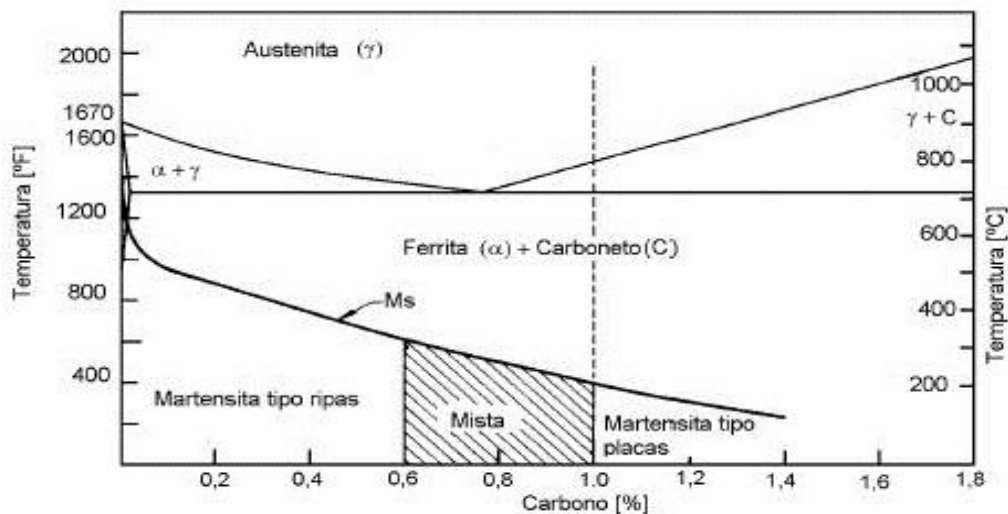
Figura 3-7 – Estrutura cristalina tetragonal de corpo centrado da martensita



Fonte: Callister (2002)

O aço com maior teor de carbono em sua composição terá maior distorção decorrente da formação de martensita. A transformação de austenita em martensita se dá, com a disponibilidade de energia livre, sendo assim à medida que há aumento no teor de carbono da austenita, há uma necessidade por mais superesfriamento para que haja formação da fase martensita metaestável. Esta fase é a última opção do sistema, já que não há mais a opção de formar fases mais estáveis através de processos difusionais. A figura 4 é um gráfico esquemático que representa a faixa de teor de carbono e temperatura, nos quais cada tipo de martensita é formada. (COLPAERT, 2002)

Figura 3-8 – Temperatura de início da transformação martensítica superpostas ao diagrama do equilíbrio de fase. A morfologia da martensita é citada.



Fonte: Colpaert (2008)

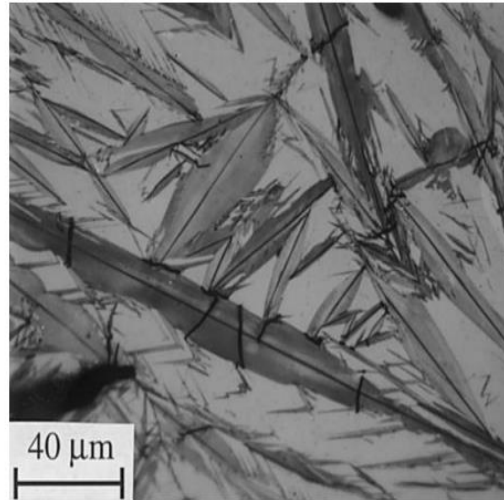
Conforme visto no gráfico da figura 3.8 a martensita apresenta duas morfologias possíveis: a martensita em forma de ripas e a martensita em forma de placas. A formação da martensita em forma de placas, é favorecida por uma temperatura de formação inicial (M_s) mais baixa. A temperatura de formação inicial normalmente é reduzida pelo aumento no teor de carbono, sendo assim os aços com alto teor de carbono tendem a ter alta concentração de martensita do tipo de placas. Aços de baixo teor de carbono, tendem a ter maior concentração de martensita do tipo de ripa. Exemplos de micrografias de ambas as formas da martensita, ripas e placas são mostradas por microscopia eletrônica de transmissão (MET) e ótica (MO) nas figuras 3.9 e 3.10 (KRAUSS, 1999).

Figura 3-9 – Microestrutura da martensita em ripa em um aço 4140 revenido a 150°C (MET).



Fonte: Krauss (1999)

Figura 3-10 – Microestrutura da martensita tipo placas em uma liga Fe – 1,86C



Fonte: Krauss (1999)

3.2.2. Propriedades da Martensita

De acordo com Reed-Hill (2009) a máxima dureza que pode ser produzida em um dado aço carbono é a dureza associada a uma transformação 100% martensítica. Fatores que estão diretamente ligados a dureza da martensita são:

- O tamanho do grão austenítico afeta a resistência da martensita, pois quando estes são reduzidos, aumentos significativos de resistência acontecem.
- Teor de Carbono no estado temperado afeta a dureza da martensita até um certo valor. Para valores de um teor de carbono até 0,4%, o valor de dureza da martensita cresce quase que linearmente com o teor de carbono. Para faixas acima deste valor, há o surgimento de austenita retida, que influi negativamente na dureza.

Reed-Hill (2009) ainda salienta que a interação com a discordância é o motivo pelo qual o carbono eleva a dureza. O endurecimento pode acontecer por segregação das deslocações nas paredes de células e por solução sólida. A transformação martensítica pode ser vista como uma forma de aprisionar, uma atípica concentração de átomos de carbono em solução sólida aumentando assim, a dureza.

3.3. Temperabilidade

A característica que determina a variação da dureza de uma peça da superfície até o núcleo é a temperabilidade. Associada a capacidade do aço formar martensita, a temperabilidade sofre efeito de fatores como, o tamanho do grão austenítico e a homogeneidade da microestrutura inicial. Elementos de liga adicionados ao aço atrasam a decomposição difusional da austenita, aumentando sua temperabilidade. Como consequência, aços com maior teor de elementos de liga, apresentam menor velocidade crítica para a formação de martensita. O resfriamento em diferentes partes de uma peça na têmpera depende de dois fatores:

- Velocidade com que o calor é extraído da peça
- Transmissão por condução, de calor, dentro da peça

Por apresentar diferentes taxa de resfriamento no interior do aço, há variação na taxa de formação de martensita e variação da dureza (CHIAVERINI, 2003).

3.3.1. Fatores que Influenciam a Temperabilidade

De acordo com Chiaverini (2003), na têmpera convencional as variáveis que determinam a temperabilidade de um aço são:

- O tamanho dos grãos de austenita. O efeito do tamanho de grão, está ligado na forma heterogênea pela qual, a ferrita nucleia nos contornos de grãos austenítico. Uma austenita mais homogênea, resultado de uma temperatura de austenitização mais elevada, reduz os sítios de nucleação para transformação da austenita em ferrita + carboneto, o que aumenta a temperabilidade.
- Composição química da austenita; a composição química da austenita pode sofrer alterações aquela indicada pela análise química do aço, devido à presença de carbonetos não dissolvidos. Como consequência, nem o elemento de liga e nem o carbono destes carbonetos, contribuem de alguma forma à temperabilidade.
- Teor de carbono; o carbono, sendo o elemento químico mais importante na temperabilidade, retardada a formação da ferrita e perlita, aumentando a temperabilidade do aço. Elevados níveis de carbono reduzem a temperatura

de formação da martensita, desta forma, a transformação de austenita para martensita pode ser incompleta, o que leva a formação de austenita retida.

- Elementos de liga presentes no aço interferem na sua temperabilidade; os principais elementos substitucionais responsáveis por aumentar a temperabilidade, em solução sólida, são: Mn, Cr, Mo, Ti, Nb e V. Outros elementos como o B, N e C também são muito importantes para aumento da temperabilidade. O único elemento que reduz a temperabilidade é o cobalto que reduz tanto a velocidade de nucleação como a de crescimento da ferrita (CHIAVERINI, 2003; ASHBY; JONES, 1999).

3.4. Aço 5150

O aço 5150, aço-liga utilizado em chapas e tiras, é comumente usado em situações especiais, que demandam propriedades obtidas pelo uso de tratamento térmico. Esses aços apresentam elevado valor de resistência a tração e ductilidade, além de resistência a fadiga.

A tabela 1 contém a especificação química deste aço, conforme norma NBR NM 87 da ABNT.

Tabela 1 – Designação e composição químico aço 5150 ABNT (% de volume dos elementos presentes no aço)

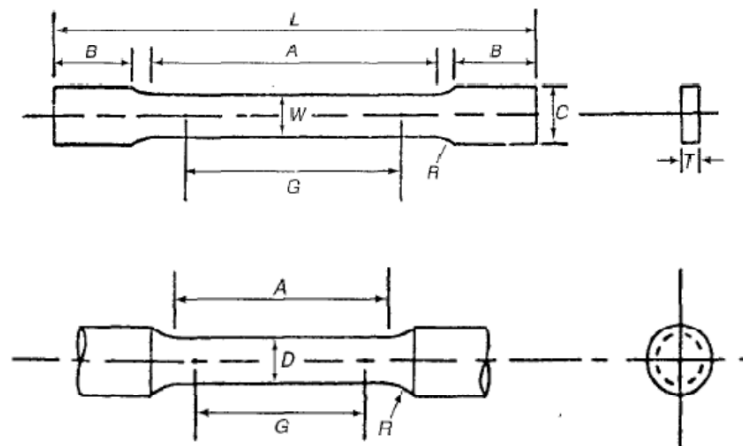
	Carbono	Manganês	Silício	Níquel	Cromo	Molibdênio
5150	0.48-0.53	0.70-0.90	0.15-0.35	-	0.70-0.90	-

Fonte: Produzido pelo autor

3.5. Ensaio de Tração

Os ensaios de tração avaliam diversas propriedades mecânicas dos materiais. O procedimento consiste na deformação de uma amostra, de um determinado material, até a sua fratura. A fratura ocorre devido à aplicação de tração, gradativamente crescente e uniaxialmente ao longo do eixo mais longo de um corpo de prova. De acordo com Holt (2000), as secções dos corpos de prova podem ser, retangular ou circular, conforme ilustrado na Figura 3.11.

Figura 3-11 – Tipos mais usados de corpos de prova para ensaio de tração

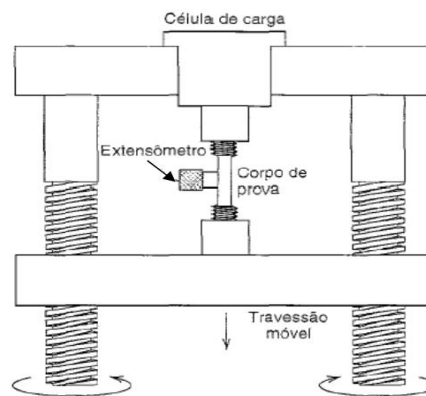


Fonte: Holt (2000)

As especificações do corpo de prova dependem do material e das condições sob as quais será realizado o ensaio.

A máquina que realiza o ensaio de tração, está representada esquematicamente na figura 3.12. Simultaneamente ao processo de alongar o corpo de prova, a máquina realiza uma medição da carga aplicada e dos alongamentos resultantes, com o uso de um extensômetro.

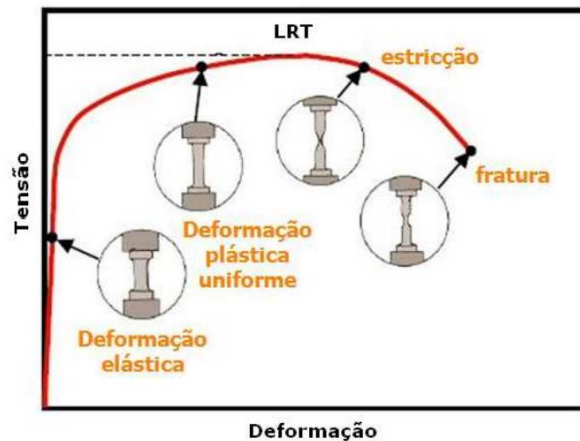
Figura 3-12 – Máquina de Ensaio de tração esquemática



Fonte: Callister (2002)

A deformação do corpo se concentra na região central durante o ensaio. Isso ocorre por ser uma secção reta uniforme mais estreita, o que pode ser observado na figura 3.13.

Figura 3-13 – Curva força versus alongamento esquemática



Fonte: Holt (2000)

A Figura 3.13 também apresenta, o comportamento da curva de tensão-deformação de engenharia até a fratura do material. O ponto máximo da tensão representa o limite de resistência a tração e as setas partindo dos esquemas circulares, representam: a deformação elástica, a deformação plástica uniforme, a estrição e a fratura que é o momento de rompimento do material (HOLT, 2000).

3.5.1. Parâmetros Obtidos no Ensaio de Tração

De acordo com Holt (2000) alguns importantes parâmetros obtidos por meio das curvas tensão-deformação, resultantes dos ensaios de tração são:

- Limite de escoamento: tensão máxima atingida no regime elástico, que separa o comportamento elástico do plástico.
- Limite de resistência: é a tensão correspondente ao ponto de máxima carga atingida durante o ensaio.
- Tensão de ruptura: última tensão suportada pelo material antes da fratura.
- Deformação uniforme: diferença entre o comprimento inicial e o comprimento do corpo de prova antes do início da estrição.
- Deformação total: diferença entre o comprimento inicial e o comprimento final do corpo de prova.

3.6 Difração de Raio X

Em sólidos cristalinos, os átomos se ordenam em planos que estão separados entre si, por distâncias da mesma ordem de grandeza dos comprimentos de onda

dos raios X. Sendo assim, quando há incidência de um feixe de raios X em um cristal, o mesmo interage com os átomos presentes, originando o fenômeno de difração. A difração de raios X ocorre segundo a Lei de Bragg, a qual estabelece a relação entre o ângulo de difração e a distância entre os planos que a originaram (GATES et al., 1999).

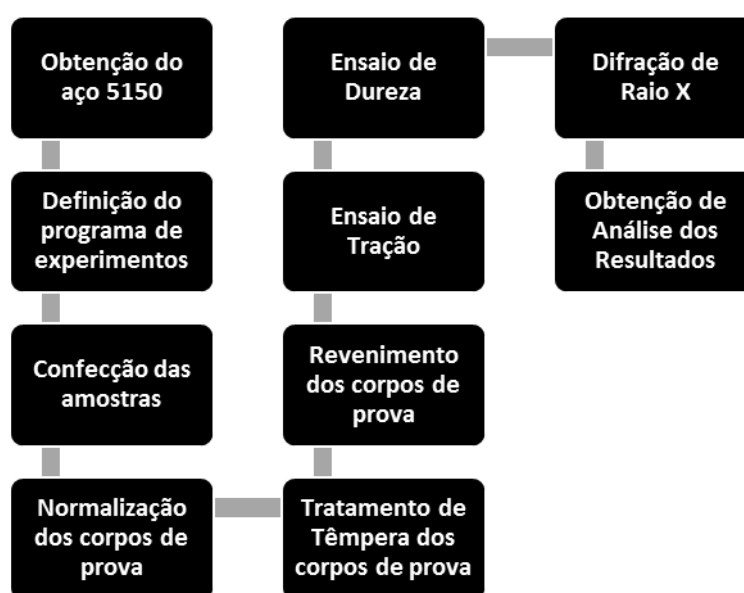
A difração do raio X, é consequência da sua interação com estes átomos. Quando um feixe de raios X incide em um cristal sob diferentes ângulos, provocando espalhamento, um detector de raios X pode medir o feixe difratado, gerando um gráfico denominado difratograma. Este gráfico relaciona a intensidade de radiação medida pelo detector com o ângulo de espalhamento 2θ , que é o ângulo entre o feixe incidente e o feixe espalhado (GATES et al., 1999).

4. METODOLOGIA E MATERIAIS

4.1. Descrição Geral do Trabalho Desenvolvido

O foco deste trabalho, foi verificar os efeitos dos parâmetros de tratamento térmico nas propriedades mecânicas do aço AISI 5150, mais especificamente dureza e resistência a tração. As etapas de desenvolvimento do trabalho, são mostradas no fluxograma da figura 4.1.

Figura 4-1 – Fluxograma das Atividades



Fonte: Produzido pelo autor

A definição dos programas de experimentos se deu a partir da necessidade de análise das propriedades mecânica, sendo que para construção da curva de revenimento, se fazem necessarios os dados de dureza e tensão máxima suportado pelo material.

A análise subsequente ao tratamento térmico, se deu com difração de raio x, para determinação das fases presentes. Dessa forma foi possível relacionar como as variações de parâmetros influenciaram a microestrutura do aço e conseqüentemente sua dureza e resistência a tração.

A análise dos dados, assim como a consolidação dos mesmos em gráficos se deu com o softwre Origin.

4.2. Materiais

Amostras do aço AISI 5150 foram preparadas para serem submetidas a posterior tratamento térmico e ensaio de tração. As amostras foram obtidas de barras longas de secção circular, no total foram cortados 21 corpos de prova, para serem submetidas a usinagem. A usinagem foi feita num torno CNC Romi, figura 4.2.

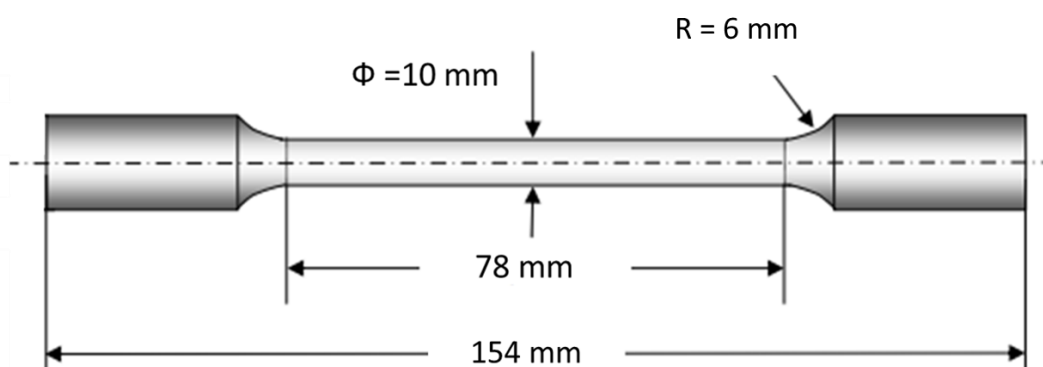
Figura 4-2 – Centro de Usinagem Romi



Fonte: Produzido pelo autor

As amostras foram usinadas para adquirirem a geometria final de uma de um corpo de prova para ensaio de tração, de acordo com a norma NBR ISO 6892:2002. Para correta identificação dos corpos de prova no decorrer dos experimentos, foi usado o gravador elétrico Struers para gravação do número do corpo de prova. A figura 4.3 mostra as dimensões finais dos corpos de prova.

Figura 4-3 – Dimensões do corpo de prova



Fonte: Produzido pelo autor

Figura 4-4 – As 21 amostras usinadas no formato final



Fonte: Produzido pelo autor

4.3. Tratamento Térmico

Os corpos de prova foram submetidos ao tratamento de têmpera e revenimento. Os corpos de prova foram normalizados por 40 minutos a 900°C, junto aos corpos de prova foi colocado carvão, para evitar a decarbonetação e oxidação dos mesmos. A relação das temperaturas está descrita na tabela 2.

Tabela 2 – Temperaturas dos Tratamentos Térmicos

CORPO DE PROVA	TEMPERATURA DA TÊMPERA (°C)	MEIO DE RESFRIAMENTO	TEMPERATURA DE REVENIMENTO (°C)	TEMPO DE ENCHARQUE (MIN)
1 - 3	900	Em óleo	200	40
4 - 6	900	Em óleo	250	40
7 - 9	900	Em óleo	300	40
10 - 12	900	Em óleo	350	40
13 - 14	900	Em óleo	400	40
15 - 18	900	Em óleo	450	40
19 - 21	900	Em óleo	-	40

Fonte: Produzido pelo autor

Para a têmpera, os corpos de prova ficaram no forno por 40 minutos e foram resfriados em óleo. No revenimento, os corpos de prova foram submetidos, de três a três, a 7 temperaturas de revenimento diferentes, mostradas na tabela 2. A figura 4.4 e 4.5 mostram o forno usado para os tratamentos e o recipiente no qual as amostras foram colocadas, a presença dos arames se explica pela necessidade de auxílio na movimentação das amostras, do forno para o óleo, na têmpera. Neste tratamento, as

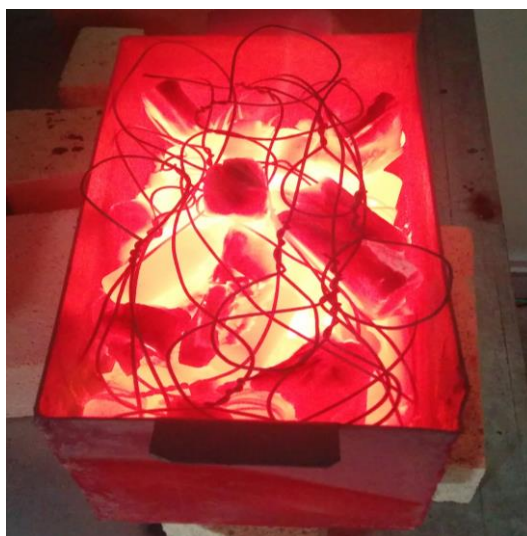
amostras foram resfriadas individualmente com o auxílio citado de arames, que foram entrelaçados nos corpos de prova, para que fosse possível a retirada individual de cada corpo de prova com usando a tenaz. Na figura 4.5 é possível ver os arames dispersos no recipiente em que as amostras foram colocadas para o aquecimento. Cada vez que uma amostra era retirada, era dado o devido tempo para reaquecimentos das demais.

Figura 4-5 – Forno usado no aquecimento das amostras



Fonte: Produzido pelo autor

Figura 4-6 – Amostras a 900°C



Fonte: Produzido pelo autor

4.4. Ensaio de Tração e Dureza

Com os corpos de prova tratados termicamente, foram realizados ensaios de tração dos mesmos. Os ensaios foram conduzidos no laboratório de construção

mecânica da PUC-MG, em uma máquina universal de resistência, com o intuito de obter dados, para a construção da curva de revenimento. A velocidade de deformação usada no ensaio foi de 0,45 mm/min.

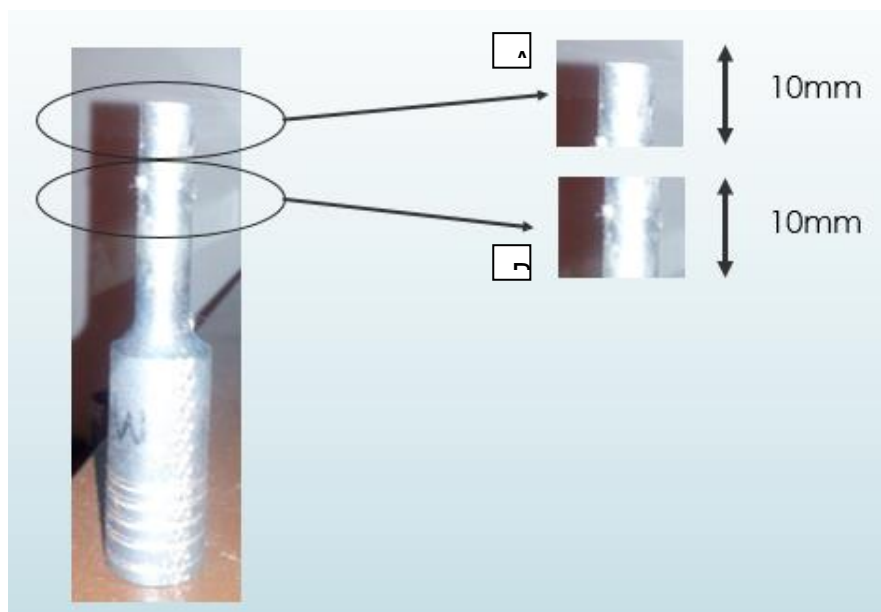
Figura 4-7 – Realização do ensaio de tração



Fonte: Produzido pelo autor

Os ensaios de dureza Rockwell C foram conduzidos em amostras obtidas da seção da área útil dos corpos de tração, aonde ocorreu a fratura no teste de tração. Foram cortadas duas amostras de 10mm cada, como mostrado na figura 4.8, para realização das difrações de raio x (DRX) e do ensaio de dureza respectivamente. Foram cortadas um total de 7 amostras, de sete corpos de prova diferentes, para ensaio de dureza e 7 amostras para DRX, uma para cada temperatura de revenimento.

Figura 4-8 – Amostras para dureza (A) e para DRX (B).



Fonte: Produzido pelo autor

A execução do ensaio ocorreu no durômetro da figura 4.9 localizado no Laboratório de Tratamentos Térmicos do Departamento de Engenharia de Materiais. No ensaio de dureza HRC, uma pré-carga de 10 kgf e uma carga de 150 kgf foram aplicados. O penetrador usado foi o cônico de diamante com um ângulo de 120° . O tempo de aplicação da carga foi de 15 segundos.

Figura 4-9 – Durômetro IGV modelo RM401/A



Fonte: Produzido pelo autor

4.5. DRX

As análises dos difratogramas de raios-x foram realizadas no Laboratório de Caracterização do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG) com o objetivo de investigar as fases cristalinas presentes nas amostras. O equipamento utilizado foi o difratômetro marca Shimadzu modelo XRD 7000, com tubo de cobre, corrente de excitação de 30 mA e tensão 20 KV, com velocidade de varredura do goniômetro de $0,5^\circ$ por minuto, e com ângulo (2θ) entre 10 e 100 graus.

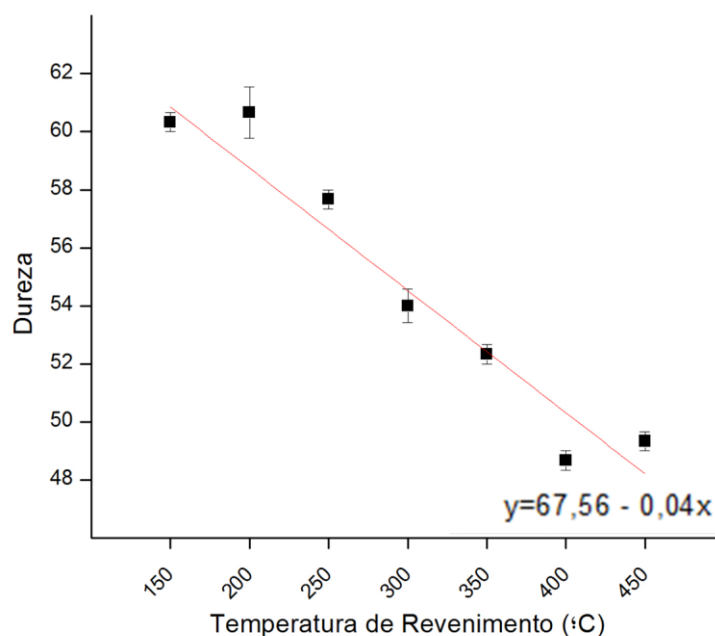
Os dados obtidos foram consolidados no programa origin 8.0, para obtenção dos gráficos e análise dos picos e cálculo das frações presentes. Para quantificação das fases, primeiramente foi plotado o gráfico dos dados obtidos. Em seguida foi inserida uma linha de base para subtração dos ruídos e desníveis indesejados, que não representavam picos característicos. Para aproximação da área dos picos desejados foi usada uma função de distribuição de Lorentz. Com o uso desta função o software fornece uma tabela com os valores da área de cada pico, que permite a identificação de cada fase.

5. RESULTADOS

5.1. Dureza

Os resultados encontrados para o ensaio de dureza, podem ser verificados na figura 5.1 a qual mostra também, o valor de erro para as medições, a linha de tendência, assim como sua equação característica.

Figura 5-1 – curva de revenimento do aço AISI 5150



Fonte: Produzido pelo autor

Os resultados do ensaio, são detalhados na tabela 3, um aumento de dureza é observado logo na primeira temperatura de revenimento, assim como o valor do erro. Essa variação acentuada da incerteza pode ser o indicativo deste aumento de dureza, ou de fato, algum precipitado na superfície da amostra, aonde foram feitas as indentações, provocaram este aumento.

Tabela 3 – Resultados do ensaio de dureza

Nº Amostra	Temperatura de Revenimento (°C)	Valor 1 (HRC)	Valor 2 (HRC)	Valor 3 (HRC)	Média (HRC)	Erro (σ/\sqrt{n})
2	Temperado	61	60	60	60,33	0,33
2	200	59	62	61	60,67	0,88
3	250	58	58	57	57,67	0,33
1	300	54	55	53	54,00	0,58
2	350	53	53	52	52,33	0,33
2	400	48	49	49	48,67	0,33
1	450	49	50	49	49,33	0,33

Fonte: Produzido pelo autor

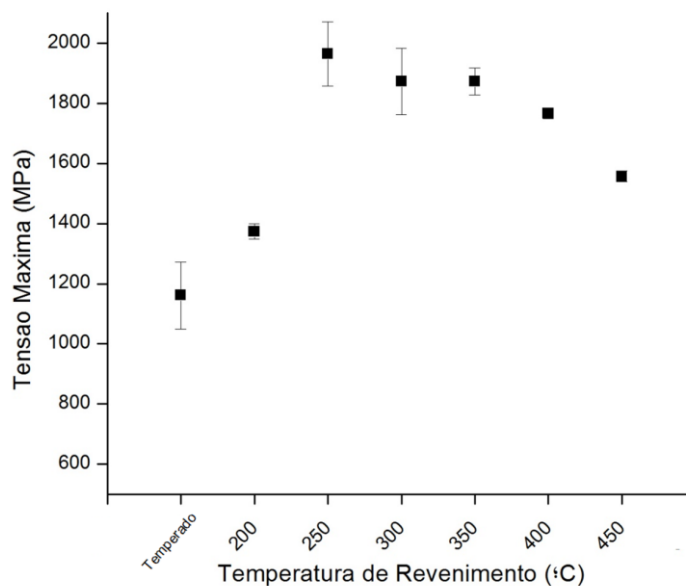
Na faixa de 250 a 400°C há uma queda acentuada na dureza, o que ocorre, devido à precipitação e crescimento da cementita. Este crescimento, diminui o número de barreiras às discordâncias, uma vez que diminui a quantidade de precipitados. A dureza também cai com a recristalização e recuperação da matriz.

A equação da curva de tendência dos dados, é uma equação de primeiro grau. O uso da mesma para cálculo dos valores de dureza, deve levar em consideração, domínio (valores de x), dentro do intervalo praticado nesses ensaios, para levantamento de seu comportamento físico.

5.2. Tração

Os resultados encontrados para no teste de tração são descritos na tabela 4 e a curva de revenimento mostrada no gráfico da figura 5.2.

Figura 5-2 – Curva de revenimento do aço AISI 5150



Fonte: Produzido pelo autor

A curva de revenimento do aço obtida a partir do ensaio de tração, mostra um baixo valor na resistência a tração do corpo de prova temperado o que se deve ao elevado nível de tensão residual que torna provável a formação de trincas e deformação frágil. O revenimento a 200° ameniza muito pouco esses valores.

A partir da temperatura de revenimento de 250°C, é possível observar aumento na resistência a tração, conseqüente do alívio das tensões residuais apontado por Colpaert (2008). Até 400° há uma tendência quase linear, de queda, do valor da resistência. A partir do revenimento de 450°C é possível observar queda na resistência devido à redução na fração volumétrica de martensita presente.

Tabela 4 – Relação dos resultados obtidos no ensaio de tração

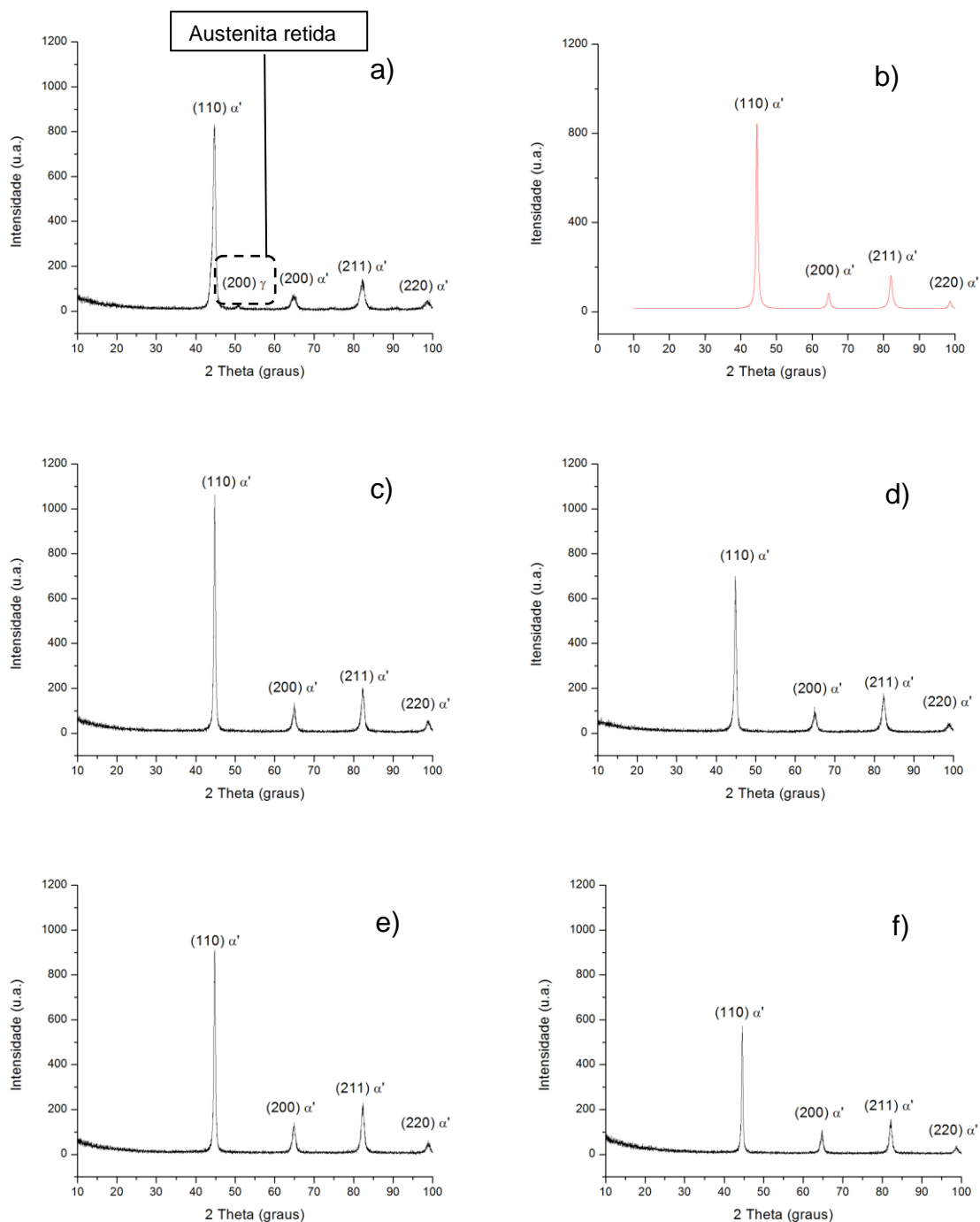
Temp. de Revenimento	Amostra	Tensão Máxima		Alongamento	
		(Mpa)	Lo (mm)	Lf (mm)	(%)
Temperado	1	1373,81	78,00	78,00	0,00
	2	1120,27	78,00	78,00	0,00
	3	996,4	78,00	78,00	0,00
	Média	1163,49	78,00	78,00	0,00
	Desv. Pad.	111,07	0,00	0,00	0,00
200	1	1405,88	78,00	78,00	0,00
	2	1342,24	78,00	78,00	0,00
	3	1375,85	78,00	78,00	0,00
	Média	1374,66	78,00	78,00	0,00
	Desv. Pad.	31,84	0,00	0,00	0,00
250	1	1776,18	78,00	78,55	0,70
	2	2146,18	78,00	78,00	0,00
	3	1969,96	78,00	78,30	0,38
	Média	1964,11	78,00	78,28	0,36
	Desv. Pad.	185,07	0,00	0,28	0,35
300	1	1817,47	78,00	78,60	0,76
	2	2085,58	78,00	81,30	4,06
	3	1714,76	78,00	78,00	0,00
	Média	1872,60	78,00	79,30	1,61
	Desv. Pad.	191,46	0,00	1,76	2,16
350	1	1857,78	78,00	78,00	0,00
	2	1927,20	78,00	78,00	0,00
	3	1817,66	78,00	78,55	0,70
	Média	1867,55	78,00	78,18	0,23
	Desv. Pad.	55,42	0,00	0,32	0,40
400	1	1755,89	78,00	80,00	2,50
	2	1774,61	78,00	81,55	4,35
	3	1734,40	78,00	81,00	3,70
	Média	1754,97	78,00	80,85	3,52
	Desv. Pad.	20,12	0,00	0,79	0,94
450	1	1561,51	78,00	81,00	3,70
	2	1585,93	78,00	80,20	2,74
	3	1542,54	78,00	82,55	5,51
	Média	1563,33	78,00	81,25	3,98
	Desv. Pad.	21,75	0,00	1,19	1,41

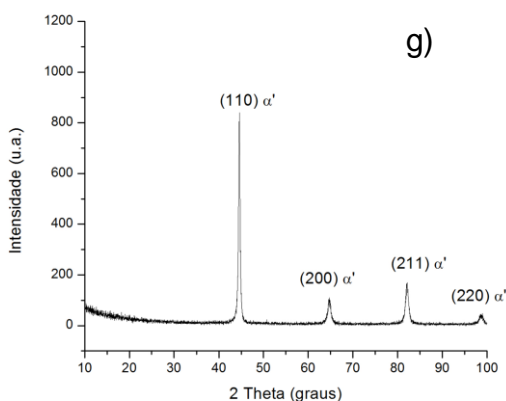
Fonte: Produzido pelo autor

5.3. DRX

As figuras 5-3 a 5-9, mostram os difratogramas obtidos nas difrações, para as diferentes temperaturas de revenimento.

Figura 5-3 – Difratogramas das amostras





- (a) Temperado, (b) Temperado e revenido à 200 °C, (c) Temperado e revenido à 250 °C, (d) Temperado e revenido à 300 °C, (e) Temperado e revenido à 350 °C, (f) Temperado e revenido à 400 °C, (g) Temperado e revenido à 450 °C

Fonte: Produzido pelo autor

A partir da identificação das fases presentes, é possível inferir que;

- Há presença de austenita retida (γ), no corpo de prova temperado (fig. 5.3 (a)). A austenita retida é diluída, conforme foi encontrado na bibliografia levantada (COLPAERT, 2008), já na faixa de temperatura, entre 200°C e 300°C.
- Como os parâmetros de rede da ferrita (CCC) e martensita (TCC) são os mesmos, os picos se sobrepõe tornando inviável o cálculo da fração volumétrica dessas fases, a partir desta técnica. É possível, porém, inferir que há uma redução da fração de martensita, com consequente aumento no teor de ferrita, a partir das análises mecânicas feitas no material, que indica uma queda de dureza, como aumento da temperatura de revenimento.
- A martensita forma também cementita, mas como está fase apresenta alto teor de carbono, a fração volumétrica desta fase é muito baixa para ser diferenciada de ruídos nesta técnica.
- A presença de carbonetos precipitados não foi detectada por esta técnica, uma vez que não se formaram picos adicionais aos observados. A incerteza associada a este método é considerável. Na literatura pesquisada foi encontrado que, para valores indicados de em torno de 10%, os valores reais podem estar na faixa de 9 a 11%, enquanto para

pequenos valores, abaixo de 1%, a incerteza da medida aumenta rapidamente.

6. CONCLUSÃO

- A temperatura de revenimento de 200°C não é suficiente para alívio significativo das tensões residuais oriundas do processo de têmpera.
- A austenita retida está presente em amostras temperadas, sendo diluída na faixa de 200°C e 300°C, no caso deste trabalho, já no revenimento a 200°C.
- A análise quanto ao avanço do teor de martensita foi inconclusivo, devido aos picos de ferrita e martensita coincidirem nos difratogramas de DRX.
- O valor da dureza, de acordo com os resultados obtidos, reduz com aumento da temperatura de revenimento.
- A resistência a tração é beneficiada pelo revenimento, já que de acordo com Colpaert (2008), há um alívio de tensões residuais, decorrentes da têmpera. A redução no teor de martensita, porém, resulta em uma redução na resistência.

7. TRABALHOS FUTUROS

Os resultados deste trabalho reforçam, a necessidade de entendimento completo dos parâmetros associados a este tipo de processo. Para futuros trabalhos, outras análises poderiam ser feitas para esses parâmetros, como estudo de outras propriedades, assim como outros ensaios, por exemplo resistência ao impacto e o uso de microscopia ótica para identificação de fases.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6451: **Materials Metálicos-Ensaio de tração à temperatura ambiente**. Rio de Janeiro, 2002.

ASKELAND, D. R., & PUEHLÉ, PP. **The science engineering of materials**. 5ª ed. 2006.

ASHBY, Michael F.; JONES, David R.h. **Engineering Materials 2: An Introduction to Microstructures, Processing and Design**. 2ª ed. Oxford: Butterworth Heineman, 1999.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 87: **Aço carbono e ligados para construção mecânica - Designação e composição química**. Rio de Janeiro, 2000.

CALLISTER, William D. **Ciência e Engenharia de Materiais: uma introdução**. Livros Técnicos e Científicos Editora S.A. Rio de Janeiro – RJ, 2002.

CHIAVERINI, Vicente. **Tratamentos Térmicos das ligas Metálicas**. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia E Materiais, 2003.

CLARKE, K. D., C. J. VAN TYNE, C. J. VIGIL, and R. E. HACKENBERG. **Induction hardening 5150 steel: effects of initial microstructure and heating rate**. *Journal of materials engineering and performance* 20, no. 2 (2011): 161-168.

COLPAERT, Hubertus. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**. 4ª ed. São Paulo: Blucher, 2008.

HOLT, J. M, Uniaxial Tension Testing. In: **American Society for Material, ASM Handbook**, Mechanical Testing and Evaluation, Ohio, ASM International, vol.08, 2000.

KRAUSS, G. **Martensite in steel: strength and structure**. Materials Science and Engineering A. 1999.

REED-HILL. R. E.; **Princípios de Metalurgia Física**, 2ª ed. São Paulo, Blucher 2000.

SILVA, A.L.V.C., MEI, P.R. **Aços e Ligas especiais**. 1ª ed. São Paulo, Blucher, 2006.