

## Relatório Final

Estudo das Condições de Tempera e Revenido nas Propriedades Mecânicas de Aço

VND

Aluno: Luciano Antonio de Moraes

Orientadora: Prof<sup>ª</sup>. Dra. Luciana Sgarbi Rossino

Co – Orientador: Prof<sup>º</sup>. Msc. Marcos Dorigão Manfrinato

**Sumário**

<b>Resumo</b>	<b>2</b>
<b>Introdução</b>	<b>3</b>
<b>Justificativa</b>	<b>7</b>
<b>Revisão Bibliográfica</b>	<b>8</b>
<b>Objetivos</b>	<b>11</b>
<b>Materiais e Métodos</b>	<b>12</b>
<b>Resultados e Discussões</b>	<b>16</b>
<b>Cronograma</b>	<b>21</b>
<b>Conclusão</b>	<b>23</b>
<b>Referências</b>	<b>24</b>

## Resumo

Os aços, dentre as ligas ferrosas, são os materiais mais comumente submetidos a tratamentos térmicos. Na tempera o aquecimento do aço ocorre acima da zona crítica (zona crítica – fase austenítica), seguido de resfriamento rápido. A têmpera tende a tornar o aço excessivamente rígido (pouca elasticidade) e frágil (pouca resistência ao choque) e a criar tensões internas, o que é corrigido pelo revenido. A temperatura de revenido e o tempo de manutenção desta temperatura influem decisivamente nas propriedades finais obtidas no aço: quanto mais tempo e / ou maior temperatura, mais dúctil se torna o aço. Os elementos de liga contidos no aço também influem no revenido, mudando o comportamento do aço no processo (endurecimento secundário). A temperatura de revenido normalmente situa – se entre 150°C e 600°C, e o tempo de duração entre 1h e 3h. Todavia, quanto maior a temperatura empregada, mais o revenido tende a reduzir a dureza originalmente obtida na têmpera. Pretende – se estudar, com a realização deste trabalho, o efeito do tempo e temperatura de revenido nas propriedades mecânicas finais de aço tratado termicamente por têmpera.

## Introdução

As ligas ferro – carbono, antes de serem utilizadas na forma de peças são, na maioria dos casos, principalmente quando aplicadas em construção mecânica, submetidas a tratamentos térmicos, visando modificar as propriedades das ligas, sobretudo as mecânicas, ou aliviar as tensões e reestabelecer a estrutura cristalina normal. (Chiaverini, 1986)

Tratamento térmico é o conjunto de operações de aquecimento e resfriamento a que são submetidos os aços, sob condições controladas de temperatura, tempo, atmosfera e velocidade de resfriamento, com o objetivo de alterar as suas propriedades ou conferir – lhes características determinadas. As propriedades dos aços dependem, em princípio, da sua estrutura. Os tratamentos térmicos modificam, em maior ou menor escala, a estrutura dos aços, resultando, em consequência na alteração mais ou menos pronunciada, de suas propriedades. (Chiaverini, 2003)

Cada uma das estruturas obtidas apresentam seus característicos próprios, que se transferem ao aço, conforme a estrutura ou combinação de estrutura ou combinação de estruturas presentes. (Costa e Silva; Mei, 2010)

Pelo exposto, pode – se perfeitamente avaliar a importância dos tratamentos térmicos, sobretudo nos aços de alto carbono e nos que apresentam também elementos de liga. (Costa e Silva; Mei, 2010)

O objetivo fundamental da têmpera das ligas ferro – carbono é obter uma estrutura martensítica, o que exige resfriamento rápido, evitando a transformação da austenita em seus produtos normais. Levando em conta a Figura 1, aquece – se o aço a temperatura de 50°C acima de A1 para aços hipoeutetóides, e abaixo da linha Acm para

aços hipereutetóides (a cementita formada é dura), por um tempo necessário em função da seção da peça, seguido de resfriamento rápido em um meio como óleo, água salmoura ou mesmo ar. A velocidade de resfriamento, nessas condições, dependerá do tipo de aço, da forma e das dimensões da peça. Este tratamento tem o objetivo de elevar a dureza dos aços. (Chiaverini, 2003).

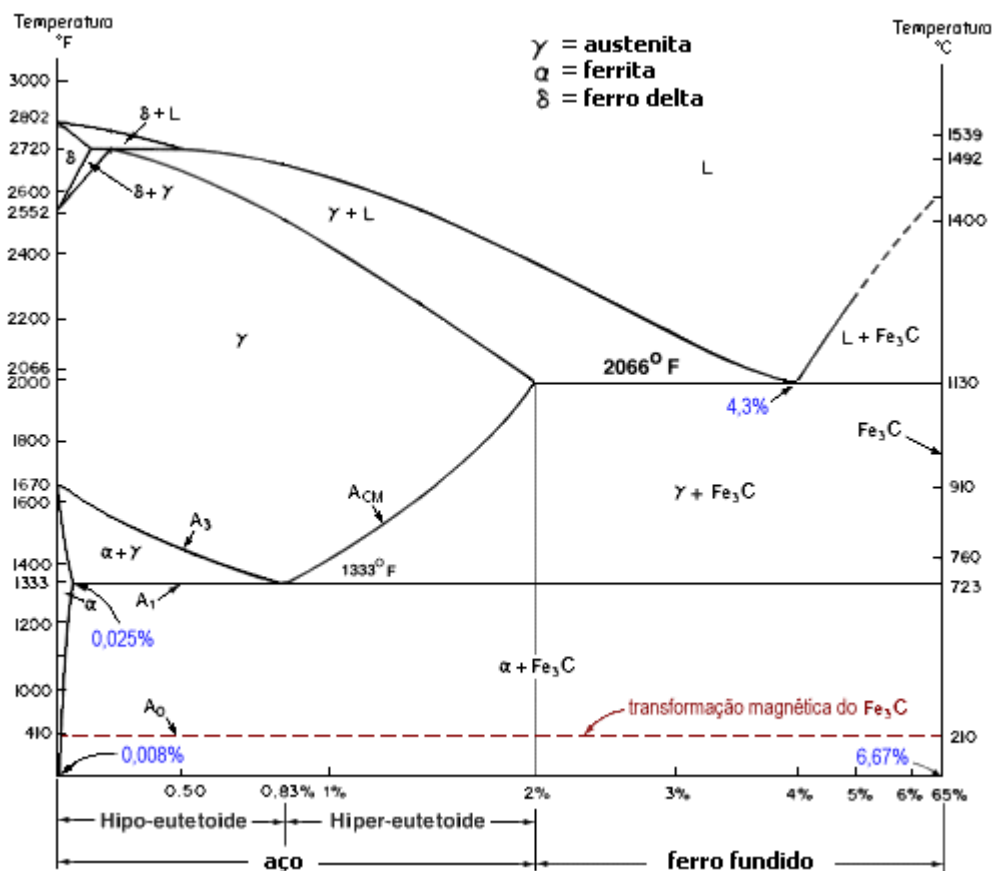


Figura 1 – Diagrama Fe – C

O estado de altas tensões, a distorção do reticulado e a dureza extremamente elevada da martensita promovem inconvenientes que devem ser atenuados ou corrigidos. Para isto, submete-se o aço temperado à operação de revenido, que visa aliviar ou eliminar totalmente as tensões e corrigir a excessiva dureza e consequente fragilização do material, propriedades estas oriundas do tratamento de têmpera, melhorando então a ductilidade e resistência ao choque dos aços. (Chiaverini, 2003).

A operação de revenido é realizada no aço temperado imediatamente após a têmpera, a temperaturas abaixo da zona crítica, desde poucas centenas de graus até as proximidades da linha A1. A temperatura será escolhida de acordo com os resultados finais desejados e também valores de dureza definidos (aliviar apenas as tensões ou eliminá-las completamente), a qual determinará as transformações estruturais de acordo com a faixa de aquecimento da martensita, as quais determinarão as propriedades finais do material. .(Chiaverini, 2003).

A Figura 2 ilustra as etapas do procedimento do tratamento térmico de têmpera e revenido a ser realizado em peças de aço.



Figura 2 – Diagrama tempo – temperatura – transformação com linhas indicativas das etapas de tratamento térmico de têmpera e revenido de aços. O resfriamento é a parte esquerda da curva, isto é, da temperatura pouco acima de A até pouco abaixo de M<sub>f</sub>.

A Figura 3 ilustra o efeito da temperatura de revenido sobre a dureza e resistência ao choque de um aço 1045 submetido ao tratamento térmico de têmpera e revenido a diferentes temperaturas. Assim como a temperatura de revenido influencia nas propriedades finais do material, o tempo de revenido também influencia de forma significativa a resistência mecânica do material tratado termicamente.

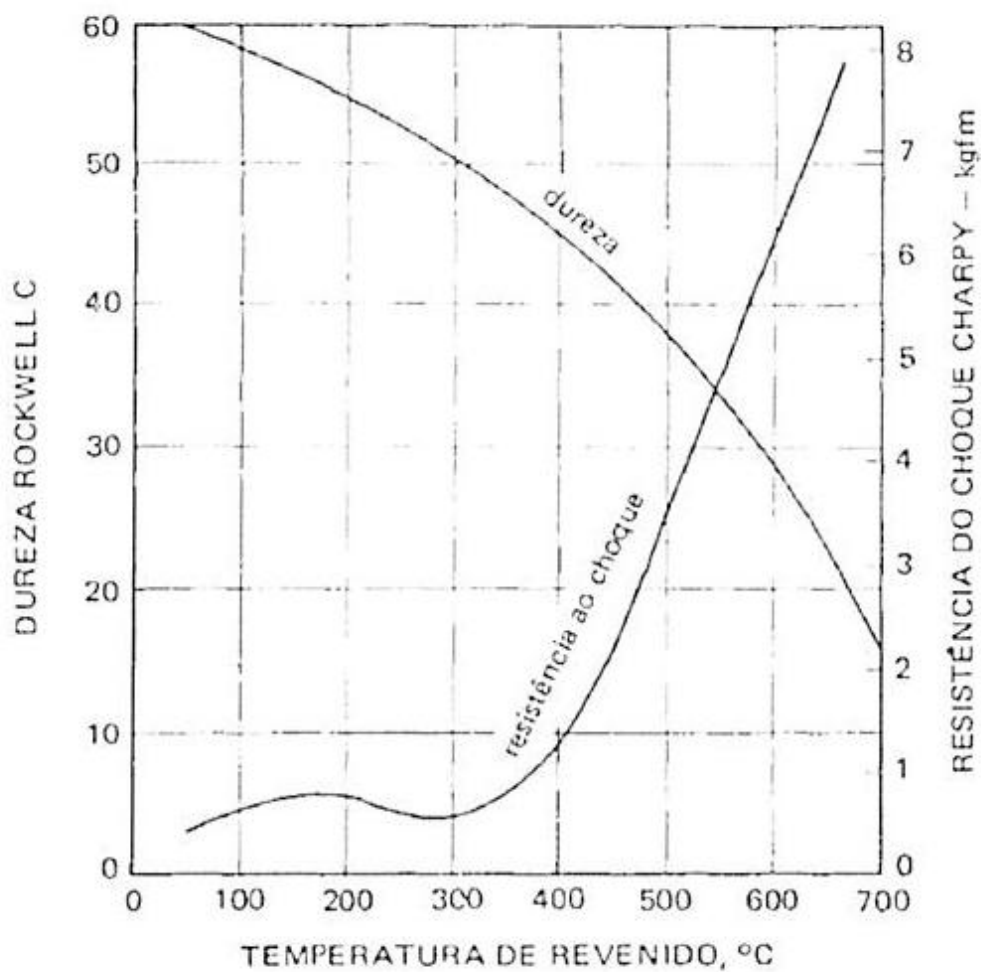


Figura 3 – Efeito da temperatura de revenido sobre a dureza e a resistência ao choque de um aço 1045 temperado.

## **Justificativa**

O desenvolvimento deste projeto auxiliará na formação do candidato em Tecnólogo em Processos Metalúrgicos, Fabricação Mecânica e Projetos Mecânicos, ampliando a experiência no desenvolvimento de trabalhos de pesquisa experimentais e teóricos, sempre com a finalidade de aplicação em estudos de casos industriais, facilitando a possibilidade do desenvolvimento de projetos de extensão. Os alunos do curso mencionado terão conhecimento teórico e prático dos ensaios mecânicos, comportamento dos materiais e influência de tratamentos térmicos na resistência mecânica de metais, auxiliando na complementação da sua formação tecnológica.

Será possível determinar com a realização deste trabalho as propriedades mecânicas do aço estudado após o tratamento de têmpera, e as propriedades mecânicas levando em conta o tempo e temperatura de revenido, o que auxiliará as diversas atividades essenciais à indústria do setor metal – mecânica de Sorocaba e região, e sobretudo aos diversos cursos existentes na Fatec – Sorocaba, a qual forma profissionais especializados para o setor industrial.



## Revisão Bibliográfica

A martensita é uma fase metaestável que aparece com o resfriamento brusco da austenita, como resfriando – se uma amostra austenitizada em água. O nome “transformação martensítica” é aplicado às reações no estado sólido que ocorrem por cisalhamento sem mudança na composição química (difusão) e que aparecem em vários sistemas, sendo o mais conhecido o ferro – carbono.

A martensita apresenta – se na forma de ripas (lath) em aços de menor teor de carbono ou de agulhas (thin plates) em aços com maiores teores de carbono. Uma característica interessante observada no microscópio óptico é que as ripas ou placas de martensita tendem a formar “triângulos”.

As figuras 4 e 5, têm o objetivo de demonstrar o formato da martensita em forma de “triângulo” e também a influência do teor de carbono no formato da martensita. (Costa e Silva; Mei, 2010).

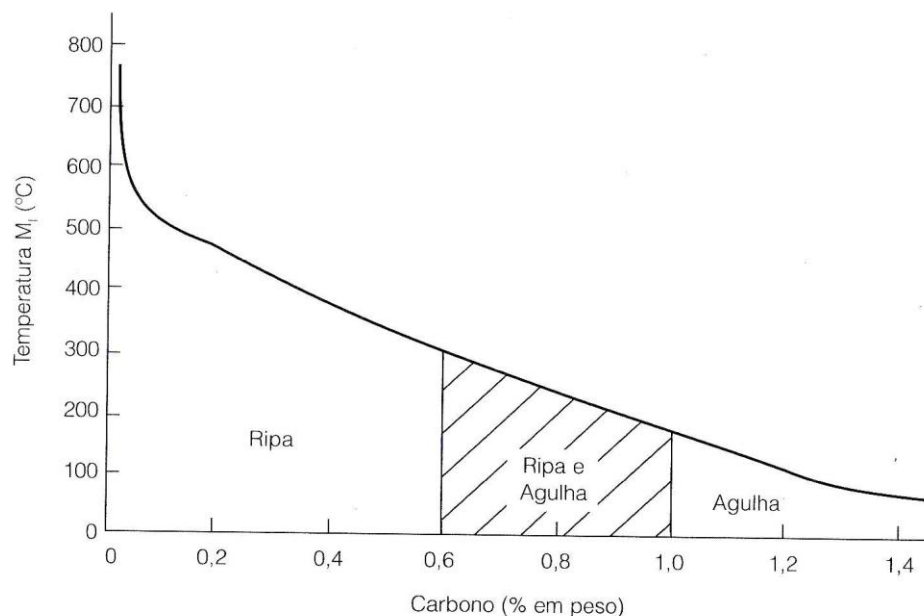


Figura 4 – Temperatura de início de formação da martensita e morfologia da mesma em função do teor de carbono.



400X



1.000X

Figura 5 – Aço 1095 temperado em água. Agulhas de martensita em matriz de austenita retida. Nital.

A martensita é uma fase frágil. Na verdade ela é tão frágil que um produto composto por 100% martensita seria inútil, semelhante a um martelo de vidro. Uma técnica comum para ajustar as propriedades mecânicas de uma aço, consiste em produzir primeiro um material completamente martensítico pelo resfriamento rápido. Então esse aço pode ser transformado em algo menos frágil com um cuidadoso reaquecimento até uma temperatura onde é possível a transformação para as fases de equilíbrio  $\alpha$  e  $Fe_3C$ . Com o reaquecimento por um curto período de tempo em uma temperatura moderada, obtém-se produtos de alta dureza e baixa ductilidade. O reaquecimento por tempos maiores resulta em maior ductilidade. (devido a menor quantidade de martensita). (Shackelford, 2008).

A mais importante transformação martensítica é que acontece em aços carbono. Se você comprar um pedaço de aço carbono 0,8% disponível no comércio e medir suas propriedades mecânicas, encontrará determinados valores de dureza, resistência à tração e ductilidade.

Mas se você testar um pedaço que foi aquecido ao vermelho – rubro e depois temperado por imersão em água fria, encontrará um drástico aumento na dureza (quatro vezes ou mais) e uma grande redução na ductilidade (praticamente zero).

As propriedades mecânicas das duas amostras apresentam tamanha divergência porque suas estruturas são radicalmente diferentes: a estrutura do aço comprado no comércio é obtida por uma transformação difusiva, mas a estrutura do aço temperado por imersão em água é obtida por uma mudança martensítica. (Ashby , 2007) .

## **Objetivos**

Como o tempo em que a peça fica sujeita à temperatura de revenimento e a própria temperatura de revenimento determinará o percentual de recuperação das propriedades de ductilidade da peça, o objetivo deste trabalho é a determinação do efeito do tratamento térmico de têmpera e revenido nas propriedades mecânicas de aço.

De forma geral, pretende – se obter, com este trabalho:

- o entendimento do mecanismo de realização de tratamento térmico de têmpera e revenido em aços;
- uma metodologia para se obter a propriedade mecânica adequada de peças submetidas a estes tipos de tratamento térmico, a fim de relacionar ensaios realizados em laboratório com a prática, buscando a redução de tempo e custos na prática de tratamentos térmicos em serviço, melhor desempenho de peças aplicadas em serviço e desenvolvimento de processos mais confiáveis e de melhor qualidade no que diz respeito a desempenho de equipamentos em serviço;
- a caracterização das propriedades dos materiais submetidos a tratamentos térmicos;
- o estudo e entendimento dos efeitos da temperatura e tempo de revenido nas propriedades mecânicas finais do material em estudo;

## **Materiais e Métodos**

O aço VND objeto deste estudo, pertencente aos aços de alto teor de carbono indicados para trabalho à frio. São utilizados para a fabricação de ferramentas de cortes. Especialmente machos, cossinetes, brochas, punções, facas para corte de papel, ferramentas para trabalho em madeira, pinos de guia, rolos laminadores de roscas, estampos e matrizes em geral, calibres, padrões, réguas, etc. O material foi fornecido na forma de barra redonda trefilada. Primeiramente o material foi usinado, obtendo – se após a usinagem corpo de prova de  $\varnothing$  12,7 mm x 18mm.

Sabendo-se que o material neste estado não possui a estrutura martensita revenida, que é a responsável por conferir mais resistência e dureza ao mesmo, houve a necessidade de tratá-lo termicamente.

O material passou pelo processo de têmpera e revenimento para modificar as propriedades e verificar o efeito destes tratamentos no material. Quando se trata termicamente um aço, é possível alterar suas propriedades químicas, físicas e mecânicas.

Para a análise química, foi utilizada uma amostra de  $\varnothing$  12,7 mm x 18 mm de aço VND, analisado quimicamente em um espectômetro de emissão óptica MAXxLMM05, utilizando especificações conforme norma AISI O1.

Elementos	C	Si	Mn	P
<b>Especificado</b>	0,90-1,10	0,20-0,40	1,05-1,35	< 0,030
<b>Encontrado</b>	0,92	0,28	1,12	0,007
Elementos	V	W	S	Cr
<b>Especificado</b>	0,05-0,15	0,40-0,65	<0,025	0,40-0,60
<b>Encontrado</b>	0,13	0,58	0,004	0,497

Tabela 1 – Aço VND – Composição química (% peso)

Após usinagem dos corpos de prova seguindo especificações pré – determinadas ( $\varnothing$  12,5 mm x 18mm), as amostras foram marcadas com o auxílio de tipos, para posterior identificação.

Antes de ser dado início ao processo de tratamento térmico, foram realizados ensaios de dureza Rockwell (HRC), nas amostras na forma bruta, para se fazer análises comparativas entre as durezas no material bruto, temperado e temperado e revenido.

Tal procedimento foi realizado no durômetro digital Mitutoyo HR-300, do laboratório de materiais da FATEC Sorocaba, utilizando-se penetrador com ponta de diamante, pré-carga de 10Kgf e carga total de 150 Kgf.

Todas as amostras foram temperadas a 860°C, ou seja, acima da zona crítica, conforme diagrama Fe-C da Figura 1 e, por se tratar de diâmetro de ½”, permaneceram por um período de 30 minutos, já que austenitiza-se durante 1 hora cada polegada de diâmetro. Foram utilizados fornos do tipo mufla EDGCON 1P e EDGCON 3P para este procedimento e, posteriormente as amostras foram resfriadas em água. Novamente foram submetidas ao ensaio de dureza Rockwell (HRC) no durômetro digital Mitutoyo

HR-300, como realizado anteriormente. Todos os equipamentos utilizados são do laboratório de materiais da FATEC Sorocaba.

Todas as amostras, exceto as de número 16 e 17, que foram destinadas a uma análise comparativa de dureza e micrografia entre os itens sem tratamento e os itens temperados e revenidos, foram, imediatamente após a têmpera, revenidas em forno também tipo mufla EDGCON 1P e EDGCON 3P, com faixas de tempo entre 10 e 20 minutos e com temperaturas de 200, 350, 500 e 700°C, conforme ilustra a Tabela 2. O método de resfriamento empregado foi em água a temperatura ambiente.

Como das outras vezes, também foram verificadas as durezas após revenimento, com o mesmo método Rockwell C descrito anteriormente.

Têmpera 860° C / 30 min (Resfriamento em água)	Tempo de Revenimento (minutos)	Temperatura de Revenimento			
		200°C	350°C	500°C	700°C
Todas as amostras foram emperadas e revenidas, exceto as amostras AM 16 e AM 17	10	AM 01	AM 03	AM 05	AM 08
	20	AM 02	AM 04	AM 07	AM 09
	20	AM 11	AM 12	AM 13	AM 10
	20				AM 14
	20				AM 15

Tabela 2 – Têmpera e revenimento do aço

Será realizada a técnica de microscopia óptica para a análise metalográfica das amostras, considerada a mais comum para a observação de microestrutura de aços.

O processo constitui de aplicação de luz visível que incide sobre a amostra em análise e é refletida para o observador.

Todas as etapas práticas realizadas neste trabalho estão ilustradas na figura 6.

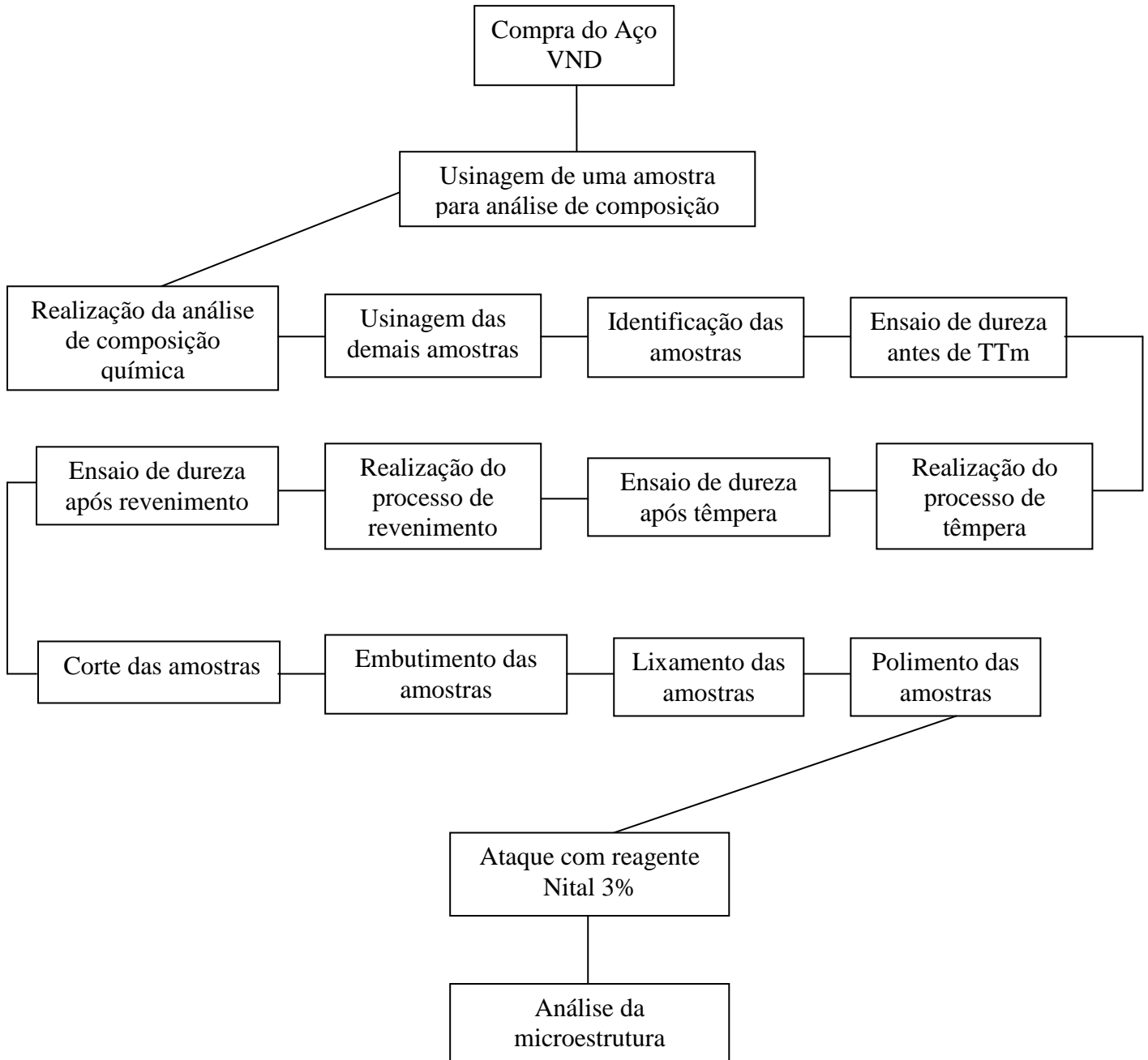


Figura 6 – Representação esquemática dos procedimentos experimentais realizados no desenvolvimento deste trabalho.



## **Resultados e discussões**

### **Análise metalográfica**

Microestruturas encontradas para o Fe-C:

Ferrita  $\alpha$ : Solução sólida de carbono no ferro CCC, ocorre até temperatura de 912°C, (solubilidade muito baixa, máxima de 0,020% a 723°C). (Callister Jr, 2006)

Austenita  $\gamma$ : Solução sólida de carbono em ferro CFC, ocorre entre temperaturas de 727 e 1495°C, (solubilidade máxima 2,11% em massa a 1148°C). (Callister Jr, 2006)

Cementita: É um carboneto de ferro com estrutura ortorrômbica e de alta dureza. Dá origem a um eutetóide de extrema importância, a perlita. É uma liga apenas metaestável, isto é, à temperatura ambiente, ela permanecerá indefinida como um composto. No entanto, se ela for aquecida entre 650 e 700°C durante vários anos, irá gradualmente se transformar em ferro  $\alpha$  e carbono, na forma de grafita, os quais irão permanecer após um resfriamento subsequente até a temperatura ambiente. (Callister Jr, 2006)

Perlita: Intermediária entre a ferrita (mole e dúctil) e cementita (dura e frágil), em forma de lamela. Com o resfriamento, a austenita, que possui uma concentração de carbono intermediária, se transforma em uma fase ferrita, que possui um teor de carbono muito mais baixo, e também em cementita, com uma concentração de carbono muito mais elevada. A temperatura desempenha um papel importante na taxa de transformação da austenita em perlita. (Callister Jr, 2006)

Martensita: Solução sólida supersaturada de carbono (não se forma por difusão), tem forma acicular de agulhas, é dura, frágil, com estrutura tetragonal cúbica (fase metaestável, por isso não aparece no diagrama). (Callister Jr, 2006).

Martensita revenida: Obtida pelo reaquecimento da martensita (fase alfa + cementita), com diminuição da dureza, precipitação dos carbonetos, apresenta forma de agulhas. (Callister Jr, 2006).

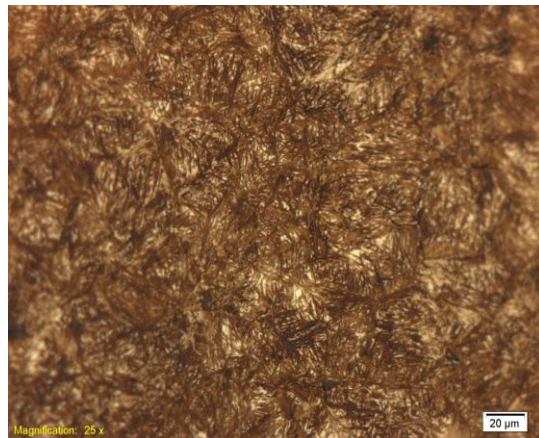


Figura 7 (Aço VND) – Martensita em forma de agulhas

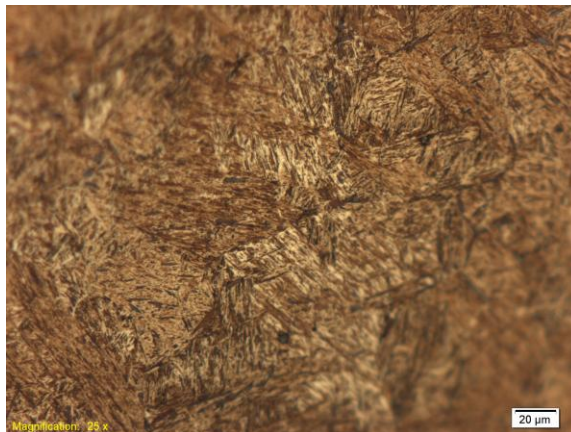


Figura 8 (Aço 1045) – Martensita em forma de ripas

A morfologia assume a aparência ripas ou de agulha (também conhecida como placas) em função da concentração de carbono (C). Para aços com 0,2 – 0,6% de carbono a martensita estará na forma de ripas, de 1,0 – 1,4% na forma de placas, entre 0,6 – 1,0% há uma mistura entre ripas e placas. (Vales, Sandra dos Santos, 2011)

Durante o tratamento de têmpera, o aço tem sua dureza elevada devido à não ocorrência do fenômeno de difusão, ou seja, o carbono fica retido na martensita, o que aumenta a dureza do material. (Callister Jr, 2006)

Com o revenimento é possível corrigir as durezas, pois neste tratamento térmico ocorre a difusão, ou seja, o carbono é difundido para o material, não ficando retido apenas na martensita, o que permite que a dureza diminua. (Callister Jr, 2006)

Os resultados obtidos no ensaio de dureza Rockwell após revenimento das amostras estão descritos na tabela 3.

Número da Amostra	Temperatura de revenimento (°C)	Tempo (min)	Dureza (HRC)	Desvio Padrão
1	200	10	59,0	0,4
2	200	20	56,4	0,7
3	350	10	50,6	0,3
4	350	20	47,5	1,7
5	500	10	41,9	0,6
7	500	20	40,0	0,4
8	700	10	28,6	0,7
9	700	20	26,4	0,3

Tabela 3 - Resultados do Ensaio de dureza Rockwell após revenimento (HRC):

Pode-se considerar analisando os dados da tabela 3, que a dureza mostrou-se dependente da temperatura de revenimento e que, maiores temperaturas de revenimento favorecem a precipitação de carbonetos mais grosseiros na martensita, o que reduz sua dureza.

Os resultados do ensaio de dureza Rockwell obtidos após o revenimento estão apresentados na Figura 7.

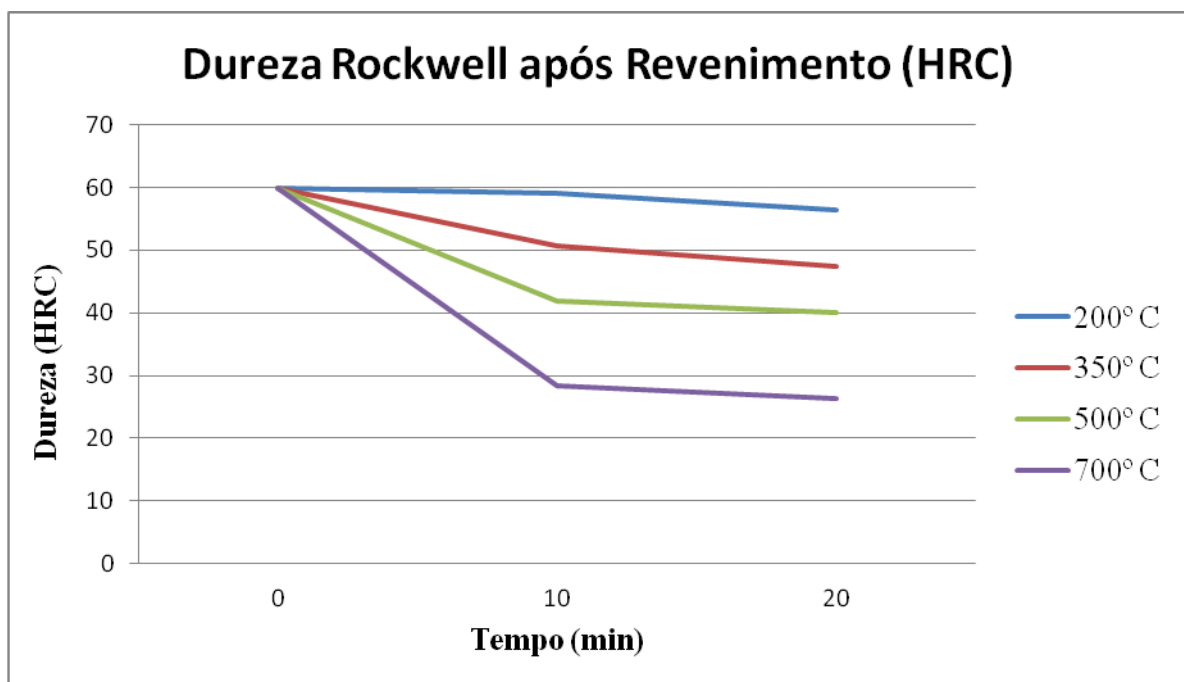


Figura 7. Resultados do Ensaio de dureza Rockwell após revenimento (HRC):

O tratamento térmico de revenido permite, através de processos de difusão, a formação da martensita revenida, de acordo com a reação: martensita (TCC, monofásica) => martensita revenida (fases  $\alpha$  + Fe<sub>3</sub>C), onde a martensita encontra-se supersaturada de carbono, se transforma em martensita revenida, composta pelas fases estáveis ferrita e cementita. Sua microestrutura consiste em partículas de cementita extremamente pequenas e uniformemente dispersas, encerradas no interior de uma

matriz contínua de ferrita. Pode ser quase tão dura e resistente quanto a martensita, porém com uma ductilidade e uma tenacidade substancialmente melhoradas. O tamanho das partículas de cementita influencia o comportamento mecânico da martensita revenida; o aumento no tamanho das partículas diminui a área de contornos entre as fases ferrita e cementita e, conseqüentemente, resulta em um material mais mole e fraco, porém ainda assim um material mais tenaz e mais dúctil. Além do mais, o revenido determina o tamanho das partículas de cementita. Com o aumento do tempo de revenido a dureza diminui, o que corresponde ao crescimento da cementita. Em temperaturas que se aproximam da eutetóide (700°C) e após várias horas, a microestrutura terá se tornado cementita globulizada. A martensita com excesso de revenido é relativamente mole e dúctil. (Vales, Sandra dos Santos, 2011)

A temperatura de revenido e o tempo de manutenção desta temperatura influem decisivamente nas propriedades finais obtidas no aço: quanto mais tempo e/ou maior temperatura, mais dúctil se torna o aço. Os elementos de liga contidos no aço também influem no revenido, mudando o comportamento do aço no processo (endurecimento secundário). (CALLISTER, 2006).

## **Cronograma**

Foi elaborado um cronograma que possibilita a disposição gráfica do tempo que será gasto para a realização do trabalho ou projeto, de acordo com as atividades a serem cumpridas. Este cronograma serve para auxiliar no gerenciamento e controle deste trabalho, permitindo de forma rápida a visualização de seu andamento.

Em linha gerais, o cronograma refere-se à discriminação das etapas do trabalho com seus respectivos prazos. As etapas principais necessárias à construção do trabalho, foram enumeradas e distribuídas ao longo do tempo disponível, levando, necessariamente em conta, os momentos não disponíveis. Esta importante ferramenta não se trata somente de uma formalidade, pois ajudará o aluno a disciplinar – se quanto ao tempo e os prazos, de maneira a priorizar as atividades previstas no cronograma, o que poderá resultar num ganho de escala em termos reais.

O cronograma é importante e deve servir de guia ao longo da realização do projeto bem como durante a realização do trabalho final.

Dentre as diversas etapas para a realização deste trabalho, algumas já foram concluídas, e outras se encontram em andamento.

Das etapas que já foram concluídas, pode – se citar a realização do estudo metalográfico, a fabricação dos corpos de prova, a realização do tratamento térmico de têmpera, a realização do tratamento térmico de revenimento e a confecção do relatório parcial.

Das etapas que se encontram em andamento, temos a revisão bibliográfica, a realização dos ensaios mecânicos de dureza e metalografia e a confecção do relatório final.

Conforme estas informações, o cronograma elaborado esta sendo seguido, ou seja, os prazos estipulados estão sendo cumpridos.

Atividades	Mês											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Revisão Bibliográfica	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Estudo metalográfico do aço	x	x	x	x								
Fabricação dos corpos de prova			x	x								
Realização do tratamento térmico de têmpera				x	x	x	x					
Realização do tratamento térmico de revenimento				x	x	x	x					
Realização dos ensaios mecânicos de dureza e metalografia					x	x	x	x	x	x		
Confecção do Relatório Parcial						x	x	x				
Confecção do Relatório Final						x	x	x	x	x	x	x

Tabela 4 – Cronograma para realização do projeto

## **Conclusão**

A dureza mostrou-se dependente da temperatura de revenimento e, maiores temperaturas de revenimento favorecem a precipitação de carbonetos mais grosseiros na martensita, o que reduz sua dureza.

Durante o tratamento de têmpera, o aço tem sua dureza elevada devido à não ocorrência do fenômeno de difusão, ou seja, o carbono fica retido na martensita, o que aumenta a dureza do material. Com o revenimento é possível corrigir as durezas, diminuindo-as, pois neste tratamento térmico há a ocorrência de difusão, ou seja, o carbono é difundido para o material, não ficando retido apenas na martensita, o que permite que a dureza diminua.



## Referências

Ashby, M.F. ; D. R. H Engenharia de materiais. 3. Ed. Vol I. Rio de Janeiro; Elsevier, 2007

Chiaverini, V. Tecnologia Mecânica: processos de fabricação e tratamento. 2. Ed. Vol. II. São Paulo: MacGraw – Hill, 1986

Chiaverini, V. Tratamentos térmicos das ligas metálicas. São Paulo: ABM, 2003

Callister Jr., William D. Fundamentos da ciência da engenharia de materiais. 2. ed. São Paulo: LTC, 2006.

Souza, S. A. Ensaio mecânico de materiais metálicos. 5. Ed. São Paulo: Edgard Blucher,1995.

Shackelford, James F. Ciência dos Materiais. 6. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008.

Costa e Silva, A. L. da; MEI, P. R. Aços e Ligas Especiais. 3. ed. São Paulo: Edgard Blucher,2010.

Vales, Sandra dos Santos. Estudo da Influência do Tratamento Criogênico no Aço AISI H13. Universidade de São Paulo, 2011.