



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMIÁRIDO  
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO  
CENTRO DE ENGENHARIAS - CE  
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

EMILLY SILVA DA ROCHA COELHO

**ANÁLISE COMPARATIVA DA MICRODUREZA DE UM AÇO RÁPIDO  
TEMPERADO E REVENIDO EM TEMPERATURAS VARIADAS**

MOSSORÓ  
2019

EMILLY SILVA DA ROCHA COELHO

**ANÁLISE COMPARATIVA DA MICRODUREZA DE UM AÇO RÁPIDO  
TEMPERADO E REVENIDO EM TEMPERATURAS VARIADAS**

Monografia apresentada a Universidade Federal Rural do Semiárido como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Manoel Quirino da Silva Júnior

MOSSORÓ

2019

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

C672a COELHO, EMILLY SILVA DA ROCHA.  
ANÁLISE COMPARATIVA DA MICRODUREZA DE UM AÇO  
RÁPIDO TEMPERADO E REVENIDO EM TEMPERATURAS  
VARIADAS / EMILLY SILVA DA ROCHA COELHO. - 2019.  
55 f. : il.

Orientador: MANOEL QUIRINO DA SILVA JÚNIOR.  
Monografia (graduação) - Universidade Federal  
Rural do Semi-árido, Curso de --Selecione um  
Curso ou Programa--, 2019.

1. AÇOS FERRAMENTAS. 2. TÊMPERA. 3.  
REVENIMENTO. 4. MICRODUREZA. I. QUIRINO DA SILVA  
JÚNIOR, MANOEL, orient. II. Título.

EMILLY SILVA DA ROCHA COELHO

**ANÁLISE COMPARATIVA DA MICRODUREZA DE UM AÇO RÁPIDO  
TEMPERADO E REVENIDO EM TEMPERATURAS VARIADAS**

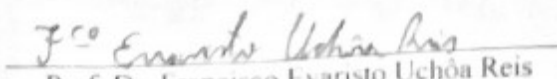
Monografia apresentada a Universidade  
Federal Rural do Semiárido como  
requisito para obtenção do título de  
Bacharel em Engenharia Mecânica.

Defendida em: 13/08/2019.

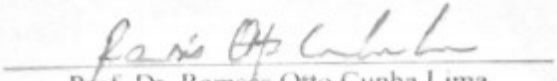
**BANCA EXAMINADORA**



Prof. Dr. Manoel Quirino da Silva Junior  
Orientador / Presidente da Banca Examinadora



Prof. Dr. Francisco Evaristo Uchoa Reis  
Membro da Banca Examinadora



Prof. Dr. Ramses Otto Cunha Lima  
Membro da Banca Examinadora

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus, a quem peço sabedoria e força todos os dias para enfrentar os obstáculos impostos sobre mim.

A minha fortaleza e maior inspiração, Erika Rocha, que sempre fez tudo por mim, me ensinou a sempre lutar pelos meus objetivos e que desistir não é uma opção. As minhas irmãs, Evellyn e Peróla, por quem eu sou capaz de fazer qualquer coisa.

Ao meu orientador e amigo, Dr. Manoel Quirino da Silva Júnior, por todo o conhecimento repassado e pela grande paciência e compreensão. Além de todos os professores da graduação, que de alguma forma contribuíram para a minha formação profissional e pessoal, em especial ao professor Zoroastro Torres Vilar, que sempre me deu apoio e atenção.

Agradeço também a meus familiares, que de alguma forma contribuíram e me deram apoio para continuar, em especial a minha tia, Edilza Queiroz.

Agradeço ao meu namorado, Cauê Coelho, que sempre esteve comigo em todos os momentos difíceis da graduação, me apoiando e me dando forças.

Aos meus amigos que sempre estão comigo, independente do momento, me dando força e tornando meus dias mais alegres, Victor, Nathalia, Mirella, Jeová, Audeir, Jairla, Lara, Fabiana, Franciely, Kainã, Kalyude, Luana, Duda, Ruthenio, Rute, Renara e muitos outros.

Agradeço à Equipe Cactus Baja SAE, que me mostrou que com trabalho em equipe tudo é possível.

A todos que de alguma forma me ajudaram ou torceram por mim. Sem vocês nada disto valeria a pena, obrigado.

## RESUMO

Os aços ferramentas são amplamente utilizados atualmente, como o próprio nome já diz, são os aços utilizados para fabricar as mais diversas ferramentas. Para esse tipo de aço é inviável classificá-lo apenas por sua composição, como geralmente é feito pela SAE/ABNT, devido a sua ampla variedade de composição química. Devido a isso, produtores e usuários de ferramentas chegaram a um consenso de classificar os aços ferramentas de acordo com sua composição, características de emprego e tipo de tratamento térmico. O objetivo deste trabalho consiste em realizar análise de microdureza em aços ferramentas temperados à 950°C, 1000°C, 1050°C, 1100°C e 1150°C, seguidos de revenimento nas temperaturas: 200°C, 300°C, 400°C, 500°C e 600°C. A partir dos tratamentos, são realizadas as análises das microestruturas e microdurezas das amostras. Os resultados obtidos identifica que acima quando o revenimento é realizado com temperaturas acima de 500 °C, o aço ferramenta passa a perder a sua principal característica que é dureza elevada, em função da resolução do carboneto  $M_2C$  e a solução final do carboneto  $M_3C$ , além de precipitação e aumento dos carbonetos de liga  $M_6C$  e  $M_{23}C_6$ .

**Palavras-chave:** aços ferramentas; têmpera; revenimento; microcurezza.

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                                           |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 - Efeito da temperatura de revenimento na dureza de um aço ferramenta -----                                      | 19 |
| Figura 2 - Etapas dos tratamentos térmicos para os aços ferramenta -----                                                  | 22 |
| Figura 3 - Gráfico da dureza de aços rápidos do tipo M40, T15, M2 e T1 em função da<br>temperatura de revenimento -----   | 24 |
| Figura 4 - Fases de um aço ferramenta do tipo D2 em função da temperatura -----                                           | 27 |
| Figura 5 - Sequência lógica das etapas do método utilizado -----                                                          | 30 |
| Figura 6 - Amostra das brocas cortadas -----                                                                              | 31 |
| Figura 7 - Representação do <i>box plot</i> -----                                                                         | 33 |
| Figura 8 - Fotomicrografia da amostra 3 (Temperada à 1050°C e revenida à 200°C) com<br>aumento de 1000x -----             | 34 |
| Figura 9 - Fotomicrografia da amostra 8 (Temperada à 1050°C e revenida à 300°C) com<br>aumento de 1000x -----             | 35 |
| Figura 10 - Fotomicrografia da amostra 13 (Temperada à 1050°C e revenida à 400°C) com<br>aumento de 1000x -----           | 35 |
| Figura 11 - Fotomicrografia da amostra 18 (Temperada à 1050°C e revenida à 500°C) com<br>aumento de 1000x -----           | 36 |
| Figura 12 - Fotomicrografia da amostra 23 (Temperada à 1050°C e revenida à 600°C) com<br>aumento de 1000x -----           | 36 |
| Figura 13 - Identificação de trinca na amostra 16 com aumento de 1000x -----                                              | 37 |
| Figura 14 - Identificação de trinca na amostra 12 com aumento de 1000x -----                                              | 37 |
| Figura 15 - Gráfico <i>box plot</i> da microdureza em função da temperatura de revenimento para<br>têmpera à 950°C -----  | 39 |
| Figura 16 - Gráfico <i>box plot</i> da microdureza em função da temperatura de revenimento para<br>têmpera à 1000°C ----- | 39 |
| Figura 17 - Gráfico <i>box plot</i> da microdureza em função da temperatura de revenimento para<br>têmpera à 1050°C ----- | 40 |
| Figura 18 - Gráfico <i>box plot</i> da microdureza em função da temperatura de revenimento para<br>têmpera à 1100°C ----- | 40 |

|                                                                                                                          |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 19 - Gráfico <i>box plot</i> da microdureza em função da temperatura de revenimento para<br>têmpera à 1150°C----- | 41 |
| Figura 20 - Gráfico da microdureza em função da temperatura de revenimento para têmpera à<br>950°C-----                  | 41 |
| Figura 21 - Gráfico da microdureza em função da temperatura de revenimento para têmpera à<br>1000°C-----                 | 42 |
| Figura 22 - Gráfico da microdureza em função da temperatura de revenimento para têmpera à<br>1050°C-----                 | 42 |
| Figura 23 - Gráfico da microdureza em função da temperatura de revenimento para têmpera à<br>1100°C-----                 | 43 |
| Figura 24 - Gráfico da microdureza em função da temperatura de revenimento para têmpera à<br>1150°C-----                 | 43 |
| Figura 25 - Gráfico da microdureza em função da temperatura de revenimento duplo para<br>têmpera à 1000°C-----           | 44 |
| Figura 26 - Gráfico da microdureza em função da temperatura de revenimento triplo para<br>têmpera à 1000°C-----          | 45 |
| Figura 27 - Comparação entre as curvas de revenimento simples, duplo e triplo para têmpera à<br>1000°C-----              | 45 |

## LISTA DE TABELAS

|                                                                                                            |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1 - Classificações dos aços ferramenta-----                                                         | 16 |
| Tabela 2 - Carbonetos principais dos aços ferramenta -----                                                 | 26 |
| Tabela 3 - Distribuição das temperaturas dos tratamentos térmicos nas amostras -----                       | 31 |
| Tabela 4 - Quantidade de medições para realizar a média do valor de microdureza em<br><i>Vickers</i> ----- | 38 |

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

|                   |                                          |
|-------------------|------------------------------------------|
| Ti                | Titânio                                  |
| HRC               | <i>Hardness Rockwell C</i>               |
| HV                | <i>Hardness Vickers</i>                  |
| M <sub>6</sub> C  | Carboneto de cromo                       |
| AISI              | <i>American Iron and Steel Institute</i> |
| Cr                | Cromo                                    |
| Mo                | Molibdênio                               |
| Fe $\alpha$       | Ferrita                                  |
| SAE               | Associação de Engenheiros Autônomos      |
| Fe <sub>3</sub> C | Cementita                                |
| V                 | Vanádio                                  |
| W                 | Tungstênio                               |
| CFC               | Cúbica de Corpo Centrado                 |

## LISTA DE SÍMBOLOS

|    |              |
|----|--------------|
| °C | Grau Celsius |
| %  | Porcentagem  |
| N  | Newton       |
| μ  | Mili         |
| mm | Milímetro    |
| m  | Metro        |
| cm | Centímetro   |
| Q  | Quartil      |
| Md | Mediana      |

## SUMÁRIO

|                                                                |           |
|----------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1. INTRODUÇÃO .....</b>                                     | <b>12</b> |
| <b>2. OBJETIVOS .....</b>                                      | <b>14</b> |
| <b>2.1. Objetivo Geral .....</b>                               | <b>14</b> |
| <b>2.2. Objetivos Específicos .....</b>                        | <b>14</b> |
| <b>3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>                          | <b>15</b> |
| <b>3.1. Aços Ferramentas .....</b>                             | <b>15</b> |
| <b>3.1.1 Classes dos aços ferramentas.....</b>                 | <b>16</b> |
| 3.1.1.1 Aço rápido .....                                       | 18        |
| 3.1.1.2 Efeitos dos elementos de liga nos aços rápidos .....   | 19        |
| <b>3.1.2 Endurecimento dos aços ferramentas.....</b>           | <b>21</b> |
| 3.1.2.1 Têmpera.....                                           | 23        |
| 3.1.2.2 Revenimento .....                                      | 23        |
| 3.1.2.3 Carbonetos .....                                       | 25        |
| <b>3.2. Aplicações .....</b>                                   | <b>28</b> |
| <b>3.2.1. Ferramenta de corte .....</b>                        | <b>29</b> |
| <b>4. MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>                             | <b>30</b> |
| <b>4.1 Amostras.....</b>                                       | <b>30</b> |
| <b>4.2 Tratamentos Térmicos .....</b>                          | <b>31</b> |
| <b>4.3 Metalografia .....</b>                                  | <b>32</b> |
| <b>4.4 Microscopia .....</b>                                   | <b>32</b> |
| <b>4.5 Ensaio de microdureza.....</b>                          | <b>32</b> |
| <b>4.6 Análise dos resultados .....</b>                        | <b>33</b> |
| <b>5. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>                         | <b>34</b> |
| <b>5.1 Análise da microestrutura dos aços ferramenta .....</b> | <b>34</b> |
| <b>5.2 Análise da microdureza.....</b>                         | <b>37</b> |
| <b>6. CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>                           | <b>47</b> |

|                                                 |           |
|-------------------------------------------------|-----------|
| <b>7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b> | <b>48</b> |
| <b>REFERÊNCIAS .....</b>                        | <b>49</b> |
| <b>ANEXOS .....</b>                             | <b>52</b> |

## 1. INTRODUÇÃO

Com o aumento da demanda da indústria por novos materiais, com elevado desempenho e vida útil estendida. O estudo de materiais com qualidades superiores e adequadas para aplicações específicas é crescente, com o intuito de encontrar novos materiais capazes de suprir essa necessidade, ou até mesmo de melhorar os componentes já utilizados (ARCEGO, 2015).

Os aços ferramenta constituem uma classe de ligas ferrosas, que são utilizadas em diferentes situações na indústria. E são materiais utilizados em moldes, matrizes, dispositivos e demais componentes mecânicos denominados no geral por “ferramentas”, empregados em processos de corte e/ou conformação de outros materiais. Apesar da aplicação no setor metal mecânico – em ferramentas de corte ou conformação de metais – esses aços também são empregados em outros setores, como a indústria de moldes para processamentos de polímeros (plásticos e borrachas) ou para conformação de pós-cerâmicos (MESQUITA, 2004 *apud* MOURA, 2004).

Esse grupo de aços é bastante utilizado na fabricação de ferramentas de corte, pois possui alta dureza quando temperado e revenido. Os aços rápidos recebem esse nome devido a sua capacidade de resistir a elevadas temperaturas sendo possível sua utilização em operações de usinagem em altas temperaturas, sem perder a sua principal característica, a dureza (GOBBI, 2009).

O tratamento térmico para esta classe de materiais é realizado com a finalidade de somar ao material às propriedades mecânicas necessárias para o bom desempenho da ferramenta. A alteração das propriedades mecânicas ocorre devido às transformações microestruturais ocorridas durante o processamento de tratamento térmico, portanto, variações nas condições e parâmetros de tratamento resulta em variações e oscilações nas propriedades mecânicas do material, estima-se que 70% de falhas prematuras nas ferramentas de usinagem são causadas por erros no procedimento do tratamento térmico.

As propriedades mecânicas de um material variam de acordo com a microestrutura do material, que por sua vez, variam em função das etapas de tratamento térmico, assim, as propriedades mecânicas de um aço rápido estão diretamente ligadas ao ciclo de tratamento térmico aplicado. A etapa de tratamento térmico pode ser dividida em dois processos: a têmpera e o revenimento (BLAU E AL-RUBAEI, 2012).

O objetivo final deste trabalho é a obtenção de dados para análise do efeito de tratamentos térmicos na microdureza em aços ferramentas. Os tratamentos térmicos são têmpera e revenimento. Para a análise, serão utilizadas diferentes combinações de temperatura para esses dois tratamentos, com o intuito de comparar os resultados e avaliá-los quanto a eficiência para a obtenção de durezas elevadas e nas suas caracterizações, principalmente em termos de determinação de suas microestruturas.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. Objetivo Geral**

Comparar o comportamento da microdureza de um aço rápido em diferentes temperaturas de têmpera e revenimento.

### **2.2. Objetivos Específicos**

- Realizar têmperas com temperaturas de 950°C, 1000°C, 1050°C, 1100°C e 1150°C;
- Realizar revenimento em temperaturas de 200°C, 300°C, 400°C, 500°C e 600°C;
- Realizar análise de microdureza para todas as amostras temperadas e revenidas;
- Realizar análise da microestrutura através de microscopia óptica;
- Plotar as curvas de variação de dureza em função das temperaturas (200°C, 300°C, 400°C, 500°C e 600 °C) de revenimento.

### **3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

#### **3.1. Aços Ferramentas**

Com a Revolução Industrial e sua evolução ao longo do século XIX, houve a necessidade por ferramentas que pudessem ser usadas nas condições mais severas, por períodos mais longos e com bom desempenho. Uma ferramenta tem o desempenho definido pela qualidade do material utilizado na sua fabricação, dessa forma deu-se início a uma busca acelerada de materiais para ferramenta (SILVA e MEI, 2006).

Os aços ferramentas correspondem a um grande ramo da indústria siderúrgica, quando se refere à fabricação de aços especiais. Existem mais de 100 (cem) tipos de aços ferramentas, que foram desenvolvidos para atender as mais variadas aplicações e normalizados de forma intencional. Entretanto a indústria de ferramentaria utiliza uma quantidade bastante reduzida como por exemplo, AISI H13, AISI D2 e AISI M2 que apresentaram propriedades e desenvolvimento bem definidos ao longo do tempo (GABARDO, 2008). Os aços ferramentas com adição de tungstênio, como elemento de liga, foram descobertos em 1868 por Robert Mushet, e foi desenvolvida por Maunsed e White em 1898, através de estudos realizados. Recebeu essa denominação devido ao fato de ter sua aplicação principal a fabricação de ferramentas de desbaste e corte (SERNA, 2008). Outro tipo é o aço rápido com molibdênio que, devido a sua composição balanceada, tornou-se também o aço de grande uso para ferramentas de desbaste e acabamento, principalmente quando se requer boa tenacidade, além de boa retenção de corte (VILLARES, 2009).

São características dos aços ferramentas: elevada dureza, resistência à abrasão, boa tenacidade e a capacidade de manter suas propriedades de resistência, quando submetidos a elevadas temperaturas (em algumas ligas), permitindo a sua utilização em diversos segmentos. Essas características são alcançadas com a adição de alto teor de carbono e dos elementos de liga. A produção desse tipo de aço é feita, na maioria das vezes, através de forjamento, fundição de precisão ou metalurgia do pó (ANTONELLO, 2012).

O mesmo é produzido e processado para atingir um alto grau de qualidade, sendo assim, empregado na fabricação de matrizes, moldes, ferramentas de corte intermitente e contínuo, ferramentas para conformação de chapas, corte a frio e componentes de máquinas, abastecendo os segmentos de autopeças, automobilístico, eletroeletrônico e

extrusão de alumínio (VILLARES, 2009).

### 3.1.1 Classes dos aços ferramentas

Os aços ferramentas tem a sua classificação mais habitual de acordo com a sua composição (elemento de liga) e com a utilização, segundo a AISI (*American Iron and Steel Institute*), conforme a Tabela 1.

Tabela 1 - Classificações dos aços ferramenta

| <b>Classificações</b>              | <b>Características</b>                  |
|------------------------------------|-----------------------------------------|
| W                                  | Aços temperáveis em água                |
| S                                  | Aços resistentes ao choque              |
| <b>Aços para fins especiais</b>    |                                         |
| L                                  | Baixa liga                              |
| F                                  | Tipo carbono-tungstênio                 |
| P                                  | Aços para moldes                        |
| <b>Aços para trabalho a frio</b>   |                                         |
| O                                  | Aços temperáveis em óleo                |
| A                                  | Aços de média liga, temperáveis em óleo |
| D                                  | Aço alto carbono, alto cromo            |
| <b>Aços para trabalho a quente</b> |                                         |
| H1- H19                            | Ao cromo                                |
| H20 - H39                          | Ao tungstênio                           |
| H40 – H59                          | Ao molibdênio                           |
| <b>Aços rápidos</b>                |                                         |
| T                                  | Ao tungstênio                           |
| M                                  | Ao molibdênio                           |

**Fonte:** Adaptada de Silva e Mei (2006)

Classificação segundo a AISI (SILVA e MEI, 2006):

- Série W: são aços temperáveis em água, mais simples e servem como base para comparação e seleção. São empregados em matrizes e ferramentas. Geralmente,

menores teores de carbono dão mais resistência ao choque e maiores teores resultam em uma menor resistência a esforços repentinos e maior resistência ao desgaste. Um importante exemplo de sua utilização é em matrizes de conformar cabeças a frio, onde os aços W se destacam devido a combinação de superfície dura e núcleo tenaz.

- Série S: são resistentes ao choque e possuem alta resistência à fadiga. Elevada tenacidade e alta resistência é a combinação que faz com que eles sejam aplicados em estruturas.
- Série L: são aços de baixa liga, com alto teor de carbono e como elemento de liga principal o cromo. Para classificação, pode ser considerado como aços W com quantidades moderadas de cromo, vanádio, níquel ou molibdênio, que aumentam a sua temperabilidade. L2 e L6 são os tipos mais comuns dessa classificação. São utilizados em tesouras, brocas para rocha, ferramentas para madeira etc. em que são necessárias boa resistência e elevada tenacidade.
- Série F: são do tipo carbono-tungstênio e são usados geralmente quando alta resistência ao desgaste e a manutenção do gume cortante são necessárias. Naturalmente, somente alguns aços da série D e alguns aços rápidos atingem ou ultrapassam a resistência ao desgaste dos aços dessa série, mas possuem menores resistências a choques. Aplicações: trefilas e ferramentas para usinagem de rolos.
- Série P: aços para moldes, que estende-se também à fundição em moldes permanentes ou por injeção de chumbo, estanho e ligas de chumbo. Suas propriedades são: baixa dureza no estado recozido, resistência ao desgaste, ao impacto e também resistência no núcleo, além de polibidade (capacidade de receber polimento) e usinabilidade. P20 e P21 são utilizados temperados e revenidos, enquanto os P2 e P6 são aços para cementação.
- Série O: temperáveis em óleo, têm teor de carbono elevado e elementos de liga em quantidade que permite têmpera completa em óleo. São normalmente utilizados em tesouras pequenas, machos, punções, matrizes, moldes para plásticos etc.
- Série A: temperáveis ao ar. Contém elementos de liga em quantidade, que garantem têmpera completa em seções de 100 mm, quando resfriados ao ar. Nessa série o A2 é o mais utilizado. A tenacidade é uma propriedade desses aços e são utilizados para matrizes de corte, de estampagem e matrizes para embutimento.

- Série D: alto cromo e alto carbono. A alta indeformabilidade e resistência ao desgaste tornam esses aços extremamente úteis para serem utilizados em matrizes. Os tipos mais comuns são D2, D3, D4 e D6. Corretamente tratadas e desenhadas, ferramentas fabricadas com aço dessa série, podem cortar chapas a frio de até 12 mm.
- Série H: são aços para trabalho a quente. H11, H12 e H13 são ligados ao cromo e são mais usuais e comerciais. Esses aços foram inicialmente produzidos para fundição sob pressão de alumínio, por causa da resistência à erosão do metal líquido, resistência às trincas a quente e custo médio. Algumas aplicações são: moldes para fundição sob pressão de metais não ferrosos, matrizes e punções para trabalho a quente, peças estruturais para alta resistência e facas para corte a quente. Os aços dessa família, que possuem elevada resistência ao choque, são também empregados em trabalho a frio nas seguintes formas: matrizes para cunhagem, ferramentas pneumáticas e facas para corte pesado de espessuras grossas.
- Série T: aços rápidos ao tungstênio. Dessa série o aço mais usual é o T1 que combina boa resistência ao choque, dureza a quente e custo. O T15 é indicado para corte de metais duros, aços de alta resistência e austeníticos e ligas refratárias, devido ser o aço de maior resistência ao desgaste, no grupo.
- Série M: aços rápidos ao molibdênio. Os mais populares são os M1, M2 e M10, que representam cerca de 70% do consumo de aços rápidos. Quando adiciona molibdênio tem-se aproximadamente o dobro do volume de carbonetos se comparados com a mesma adição em tungstênio.

### **3.1.1.1 Aço rápido**

Os aços rápidos recebem esse nome por ter a capacidade de possuir resistência ao calor, garantindo que essa resistência permita o emprego de grandes velocidades nos procedimentos de usinagem. Os principais tipos de aço ferramenta, que são utilizados para ferramentas de corte, são os aços rápidos, devido a sua elevada dureza no estado temperado/revenido e, especialmente, por ser capaz de trabalhar em certas condições que aumentam bruscamente a temperatura da ferramenta. A operação de forma eficiente não é impedida nem quando a temperatura do gume atinge 550°C, por efeito do atrito ocasionado pelo trabalho (TIER, 1998).

Esse grupo tem duas principais divisões: “T” tipos predominantemente ao tungstênio e “M” tipos predominantemente ao molibdênio (CHIAVERINI, 2012).

Ainda segundo Chiaverini (2012), esses aços possuem propriedades importantes, já citadas anteriormente, como: capacidade de corte, dureza a temperatura ambiente e dureza a quente (capacidade do aço resistir ao amolecimento devido ao calor), isso porque, como pode ser identificado na Figura 1, a temperatura de revenido mais baixa a curva que corresponde ao aço rápido é semelhante a do aço comum e a temperaturas elevadas essa curva assemelha-se a curve de um aço endurecido por precipitação.

Figura 1 - Efeito da temperatura de revenimento na dureza de um aço ferramenta



Fonte: Araújo Filho (2006)

No caso da curva característica do aço carbono, o revenimento provoca a redução da dureza com a decomposição da martensita, mas no caso de um aço rápido com grandes quantidades de elementos de liga que formam carbonetos, ao efeito de decomposição da martensita evidencia-se o endurecimento causado pela precipitação dos carbonetos (ARAÚJO FILHO, 2006).

### 3.1.1.2 Efeitos dos elementos de liga nos aços rápidos

Segundo Nogueira (2004), as propriedades dos aços são afetadas pelos elementos de liga, e podem ser divididos em diferentes classes. Como a classe dos elementos que alargam a zona gama (ou gamágenos) e a classe dos que comprimem a zona gama (ou alfégenos). No grupo dos gamágenos os elementos presentes são: mangânes, níquel, cobalto e nitrogênio. E no grupo dos alfégenos são: alumínio, silício, fósforo, titânio, vanádio, cromo, molibdênio, tântalo e tungstênio. Abaixo, descrição dos efeitos dos principais elementos de liga sobre os aços rápidos.

- Carbono: deve estar presente em uma quantidade suficiente para a formação de carbonetos e uma quantidade a mais é necessária para dissolver-se na austenita durante a austenitização, sendo fundamental para o endurecimento da martensita. Assim, quantidades maiores de elementos de liga que formam carbonetos, exigem maior teor de carbono para evitar o surgimento de ferrita. Nos aços rápidos, o teor de carbono varia entre 0,7% e 1,6%. Esse teor influencia diretamente na dureza do estado temperado, ou seja, quanto menor o teor, menor a dureza, mas quanto maior for, maior será a quantidade de carbonetos complexos formados, aumentando a sua resistência ao desgaste. Por outro lado, também teremos uma quantidade maior de austenita retida na têmpera, sendo necessário maiores tempo e temperaturas para o revenimento. Um maior teor de carbono também favorece a descarbonetação (TIER, 1998).
- Tungstênio e Molibdênio: possuem a mesma função nos aços, melhorando as propriedades de dureza e corte. São mais utilizados nos aços rápidos, sendo responsáveis por formar uma grande parte dos carbonetos primários do tipo  $M_6C$ . São carbonetos parcialmente solúveis na matriz do aço e não contribuem no endurecimento secundário, mas contribuem bastante para a dureza a temperaturas elevadas. Nos aços com Molibdênio a austenita é menos estável, quando comparadas às dos aços com Tungstênio e melhora a sua temperabilidade, apesar de possuir maior tendência a descarbonetação (NOGUEIRA, 2004).
- Cromo: é o principal responsável pela alta temperabilidade, tornando viável o endurecimento de seções maiores. Resulta em menor oxidação durante tratamentos térmicos. Está presente com teores em torno de 4%. No aço recozido, está presente como  $Cr_{23}C_6$ , que em temperaturas de austenitização acima de 1090°C, se dissolvem completamente (TIER, 1998).

- Cobalto: carbonetos não são formados pelo cobalto, mas ele está presente dissolvido na matriz do ferro e aumenta o ponto de fusão da liga. Dessa forma, temperaturas mais elevadas de austenitização podem ser empregadas sem crescimento de grão, resultando em mais elementos de liga que aumenta a dureza a quente. Também restringe o crescimento dos carbonetos precipitados e aumenta a tendência a descarbonetação (TIER, 1998).
- Vanádio: seu efeito principal é a formação de carbonetos de dureza elevada, aumentando consideravelmente a resistência ao desgaste e um pouco a dureza a quente. Estes carbonetos possuem efeito de refinador de grão e diminuem a temperabilidade (NOGUEIRA, 2004).

### 3.1.2 Endurecimento dos aços ferramentas

Segundo Tier (1998), os aços rápidos são materiais de custo elevado e de tratamento térmico moderadamente suave. Sua vida útil pode ser diminuída consideravelmente se não passarem corretamente por têmpera e revenimento. Quando coalescidos, estes aços apresentam uma estrutura ferrítica e alguns carbonetos simples e complexos e tem composição química próxima à:  $Fe\alpha + M_6C + M_{23}C_6$ . Carbonetos, em seus diversos tipos, são responsáveis pela variação do bom desempenho de corte dos diferentes tipos de aços rápidos. Após serem convenientemente tratados apresentam uma estrutura martensítica, granulação fina e um grande quantidade de carbonetos. Para uma têmpera adequada e buscando atingir que a estrutura martensítica resultante apresente a resistência ao amolecimento pelo calor que caracteriza esses aços, é necessário que uma grande parte desses carbonetos seja dissolvida na matriz austenítica durante a austenitização. Então nota-se que é relevante o aquecimento durante o tratamento térmico, pois cada tipo de carboneto se dissolve em velocidades diferentes. Por exemplo, o  $Cr_{23}C_6$  (carboneto rico em cromo) dissolve-se rapidamente, mas o  $M_6C$  dissolve-se bem lentamente. Vale atentar-se que os aços rápidos também são muito susceptíveis a descarbonetação (redução do teor de carbono no material), principalmente os da classe M, sendo fundamental o uso de atmosferas neutras para os pré-aquecimentos e aquecimentos.

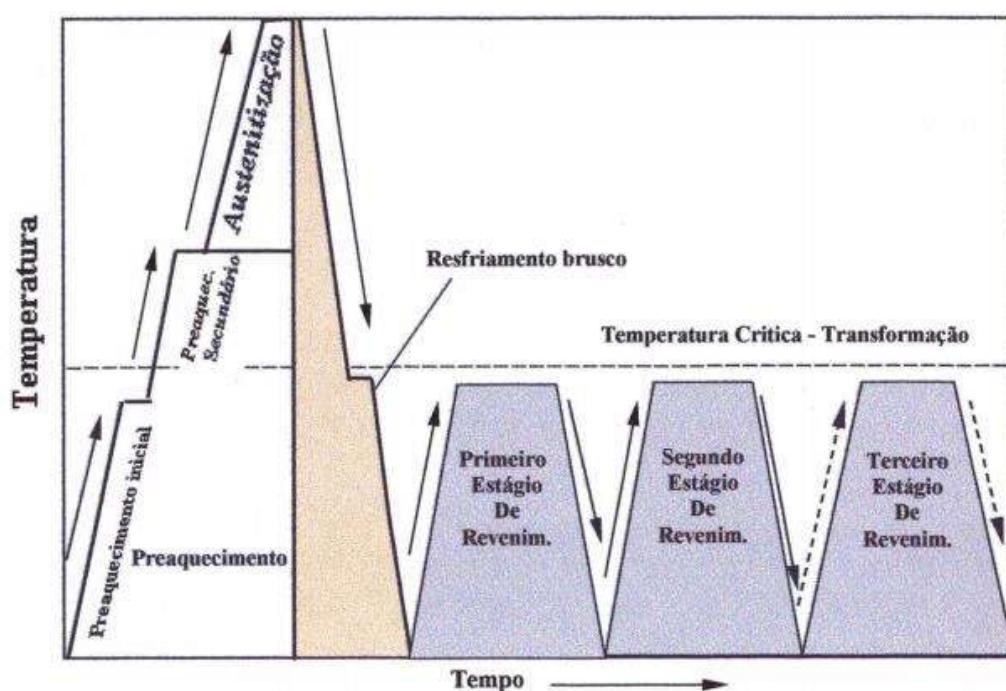
As condições de tratamento térmico dos aços ferramentas estão altamente relacionadas às propriedades finais do material. Seu desempenho será resultado das condições de temperatura, tempo, taxas de aquecimento e resfriamento bem como dos

equipamentos utilizados. Há uma grande variação nas condições térmicas de aço para aço, por isso deve-se respeitar as condições individuais de cada material, em termos de temperatura, tempo e valores de aquecimento e resfriamento, para que se consiga um desempenho satisfatório da ferramenta (GABARDO, 2008).

Os tratamentos térmicos a que são submetidos os aços rápidos são têmpera e revenido, com o objetivo de proporcionar ao material altos valores de dureza e resistência ao desgaste (NOGUEIRA, 2004).

As propriedades finais do material nos aços ferramentas revela as condições de tratamento térmico, que também influenciam significativamente na microestrutura e nas propriedades dos aços ferramenta, tendo forte intervenção na vida útil do molde ou da matriz. A Figura 2, mostra as etapas que o aço ferramenta deve passar durante os tratamentos térmicos. Inicialmente, a ferrita deve ser aquecida a uma temperatura elevada para tornar-se austenita. Então, a austenita deve ser resfriada moderadamente rápido para transformar-se em martensita. Assim, para ocorrer estas mudanças estruturais, quatro tratamentos a quente são realizados: pré-aquecimento, têmpera, resfriamento e revenimento (TARNEY, 1996 *apud* SANTOS, 1999).

Figura 2 - Etapas dos tratamentos térmicos para os aços ferramenta



Fonte: Bayer e Becherer (1997) *apud* Santos (1999)

### **3.1.2.1 Têmpera**

Tratamentos de austenitização nos aços rápidos a uma temperatura aproximadamente igual à da linha solidus, representaram grande salto na utilização desses materiais (*METALS HANDBOOK*, 1990). As temperaturas de têmpera utilizadas variam de acordo com a literatura, mas no geral são realizadas a partir de 1000°C.

Segundo Antonello (2012), o aço rápido tem baixa condutividade térmica devido a grande quantidade de carbonetos presente na sua estrutura e por isso para a realização da têmpera o ideal é fazer alguns pré-aquecimentos em temperaturas abaixo da temperatura de austenitização. Esse cuidado é para evitar um aquecimento rápido, que causaria distorções dimensionais, uma estrutura heterogênea e trincamentos. Em seguida, o material é levado a temperatura de austenitização por alguns minutos, proporcionando a precipitação dos carbonetos de forma adequada durante o revenimento. Estes materiais possuem alta temperabilidade e podem ser temperados no óleo e ao ar.

### **3.1.2.2 Revenimento**

Depois da têmpera o aço rápido é submetido ao revenimento. O aço na condição temperada é extremamente duro e a função do revenimento é corrigir isso com o alívio de tensões internas, da fragilidade e da instabilidade, sem comprometer a dureza adquirida no tratamento anterior. O revenimento é o aquecimento do aço temperado, uma ou mais vezes (JESUS, 2004). Grande parte dos aços rápidos possuem uma grande faixa aceitável para temperatura de revenimento. Um melhor alívio de tensões é promovido com a utilização da maior temperatura de revenimento, que proporcionará a dureza requerida (SANTOS, 1999).

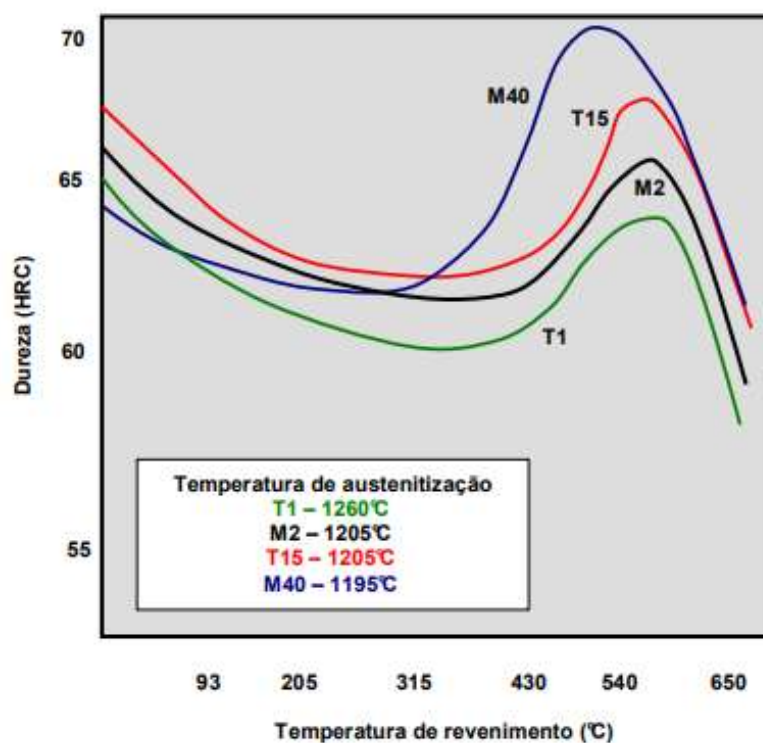
Segundo Jesus (2004), nos aços rápidos o revenido é dividido em quatro estágios, mas somente três são encontrados na prática.

O primeiro estágio, entre 270°C e 400°C, ocorre uma leve diminuição da dureza (2 a 6 pontos de HRC) da matriz e devido a isso a martensita se modifica de tetragonal para

cúbica, em resposta a rejeição do carbono na forma de carboneto  $\epsilon$  que equivale a uma fase de transição muito fina que deixa de existir com o aparecimento da cementita  $Fe_3C$ , entre 300°C e 400°C e nesse estágio, nada acontece com a austenita retida (HONEYCOMBE, 1982 e JESUS, 2004).

No segundo estágio, entre 400°C e 565°C há uma precipitação de uma parte da cementita. Nesse estágio há um endurecimento devido a precipitação dos MC e  $M_2C$  (carbonetos de liga) nos contornos de macla e na martensita revenida, chamado de endurecimento secundário, como pode ser observado nos picos de dureza da Figura 3 para os tipos de de aços ferramentas: M40, T15, M2 e T1 (SARTORI, 2009).

Figura 3 - Gráfico da dureza de aços rápidos do tipo M40, T15, M2 e T1 em função da temperatura de revenimento



Fonte: Villares (1986) *apud* Sartori (2009)

Segundo Jesus (2004), o estágio 3 é a transformação da austenita retida residual durante o resfriamento e uma precipitação de carbonetos de liga da austenita. No 4º estágio, com o crescimento dos carbonetos  $M_6C$  e  $M_{23}C_6$  e a solução dos carbonetos MC e

$M_2C$ , há uma grande redução na dureza e por esse motivo esse estágio não é comum na prática.

### 3.1.2.3 Carbonetos

Alguns pontos devem ser relacionados quando se trata de carbonetos (COLLINS, 1998):

- O tipo do carboneto formado no processo de revenimento só depende da quantidade de elementos de liga que o material possui e da temperatura de revenimento.
- Alguns carbonetos que estão presentes na microestrutura resultante, podem ser os carbonetos que não se dissolveram durante a austenitização, ou seja, são os carbonetos mais grosseiros (carbonetos eutéticos).
- O tamanho e a organização dos carbonetos precipitados na martensita durante o revenimento dependem da nucleação e do crescimento, que dependem basicamente do tempo.
- O endurecimento secundário que é causado pela precipitação de carbonetos finos (MC e  $M_2C$ ) coerentes com a matriz martensítica.

Segundo Soares Júnior (2006), os aços ferramenta são produzidos a partir de formadores de carbonetos, como Cr, Mo, W e V. Esses elementos geram alta dureza e elevada resistência ao desgaste, mas levam esses aços a apresentarem baixa ductilidade e tenacidade e difícil usinabilidade. Os carbonetos dos aços ferramentas começam a se formar durante a solidificação e continuam a se propagar durante tratamentos térmicos. A Tabela 2 apresenta uma lista descritiva dos carbonetos que podem estar presentes no aço ferramenta.

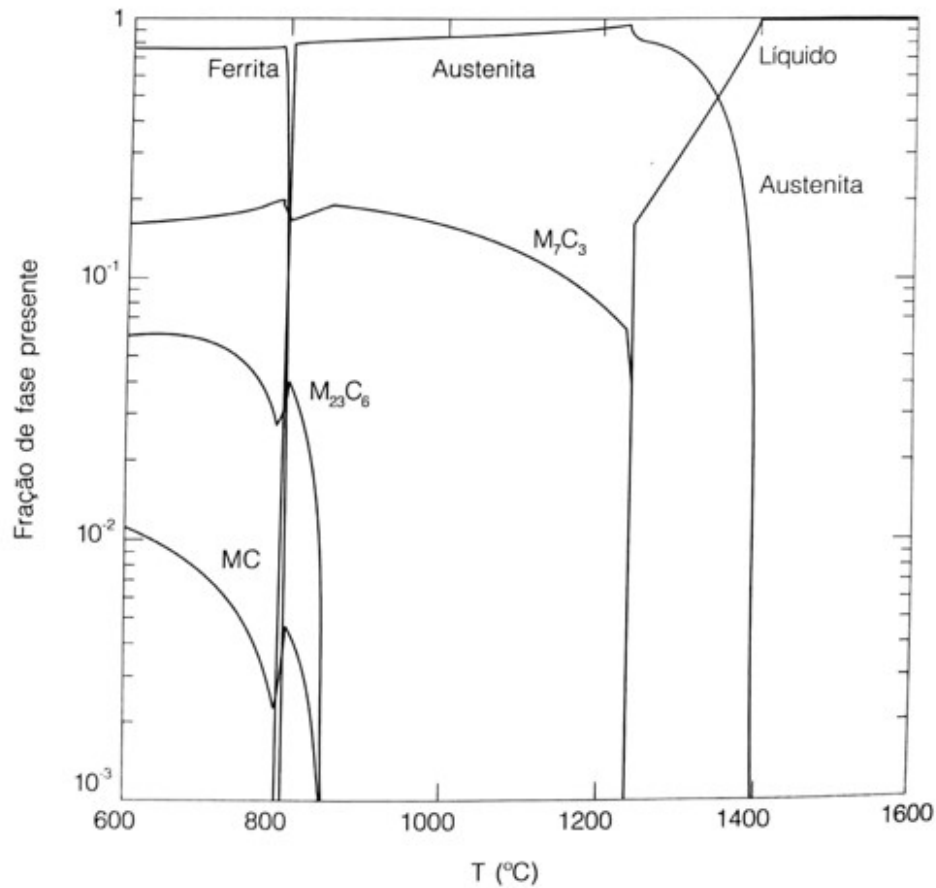
Tabela 2 - Carbonetos principais dos aços ferramenta

| <b>Tipo</b> | <b>Reticulado</b> | <b>Dureza (HV)</b> | <b>Características</b>                                                                                  |
|-------------|-------------------|--------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $M_3C$      | Ortorrômico       | 900                | Derivado da cementita; "M" pode representar Mn, Cr e menos frequente W, Mo, V.                          |
| $M_{23}C_6$ | CFC               | 1300               | Também presente com alta incidência nos aços ferramenta alto Cr. O Cr pode ser substituído por W ou Mo. |
| $M_7C_3$    | Hexagonal         | 1600               | Muito presente em aços-ferramenta alto Cr. Resistente à dissolução em altas temperaturas.               |
| $M_6C$      | CFC               | 1700               | Carboneto "M" tipicamente é W ou Mo. Pode conter moderados teores de Cr e V.                            |
| $M_2C$      | Hexagonal         | 2200               | Carboneto rico em W ou Mo, típico de revenido, dissolvendo também consideráveis teores de Cr.           |
| MC          | CFC               | 3000               | Carboneto rico em V. Exatamente estável e resistente ao desgaste.                                       |

**Fonte:** Adaptada de Junior (2006)

A Figura 4 apresenta a fração das fases presente em um aço ferramenta do tipo D2 em função da temperatura. Pode-se observar que a quantidade de carbonetos primários presentes na microestrutura da austenita aumenta para temperaturas menores (SILVA e MEI, 2006).

Figura 4 - Fases de um aço ferramenta do tipo D2 em função da temperatura



Fonte: Silva e Mei (2006)

De acordo com Gracioso (2003), é complexa e dependente da sua estabilidade termodinâmica e cinética a dissolução de carbonetos. Termodinamicamente, para uma determinada temperatura de austenitização é possível a dissolução de um carboneto, dessa forma a dissolução será função somente da diferença entre a temperatura de solubilização do precipitado e a temperatura de austenitização que o material foi submetido ( $T_{\text{solub}} - T_{\text{aust}}$ ).

A solubilidade é geralmente descrita pela Equação 01:

$$\log[M] \cdot [C] = A - \frac{B}{T} \quad (01)$$

onde:

M é concentração de metal e C é concentração de carbono em solução à temperatura T e A e B são constantes, independentes de T.

Assim, pode-se perceber que com o aumento da temperatura, menor é o termo (B/T), então maior é a concentração de metal e de carbono em solução. É relevante notar que esta equação é deduzida em termos das estabilidades relativas do sistema carboneto/matriz, não sendo considerada a cinética da dissolução.

A dissolução dos carbonetos pode acontecer de acordo com a taxa de difusão dos elementos constituintes do carboneto na matriz pela Equação 02 diferencial parcial de Fick:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D \frac{\partial C}{\partial x} \right) \quad (02)$$

onde:

C = concentração (massa/volume, ex: Kg/m<sup>3</sup>);

t = tempo (unidade de tempo, ex: segundos);

x = posição (unidade de comprimento, ex: metros );

D = coeficiente de difusão (Área/tempo, ex: m<sup>2</sup>/s).

A equação, também conhecida como 2º lei de Fick, relaciona a variação de concentração com o tempo  $\frac{\partial C}{\partial t}$  com o fluxo de difusão  $\left( D \frac{\partial C}{\partial x} \right)$ , o qual é dependente da distância do carboneto ao ponto considerado da matriz  $\frac{\partial}{\partial x}$ . Desta forma, além do gradiente de concentração  $\frac{\partial C}{\partial x}$  carboneto/matriz, a difusividade (D) do material, também influencia na cinética de dissolução dos carbonetos. Quanto ao gradiente de concentração, este é a força motriz da reação, e quanto maior este gradiente, maior é a tendência de dissolução do carboneto (GRACIOSO, 2003).

### 3.2. Aplicações

Os aços rápidos são indicados para a fabricação de ferramentas de corte e suas principais aplicações são: brocas, fresas, machos e brochas e também, ferramentas para conformação a frio, como matrizes de estampagem, corte e repuxo, punções, calibradores e rolos laminadores de roscas (VILLARES, 2009).

### **3.2.1. Ferramenta de corte**

As ferramentas utilizadas na indústria em geral, e particularmente, na indústria mecânica, são indispensáveis na usinagem e conformação das peças metálicas ou não, fabricada pelos processos tradicionais de produção. Essas ferramentas devem apresentar requisitos que possibilitem realizar as operações a que foram destinadas com precisão e a um custo relativamente baixo. Além disso, não se deve escolher apenas o melhor material para confeccioná-las em função do trabalho exigido, mas igualmente projetá-las adequadamente e escolher máquinas operatrizes que apresentam as melhores condições de rigidez, velocidade de corte etc. (CHIAVERINI, 2012).

Segundo MACHADO (2009), as propriedades principalmente desejáveis para um material que será utilizado como ferramenta de corte, são:

- Alta dureza;
- Tenacidade suficiente para evitar falha por fratura;
- Alta resistência ao desgaste abrasivo;
- Alta resistência à compressão;
- Alta resistência ao cisalhamento;
- Boas propriedades mecânicas e térmicas em temperaturas elevadas;
- Alta resistência ao choque térmico;
- Alta resistência ao impacto;
- Ser inerte quimicamente.

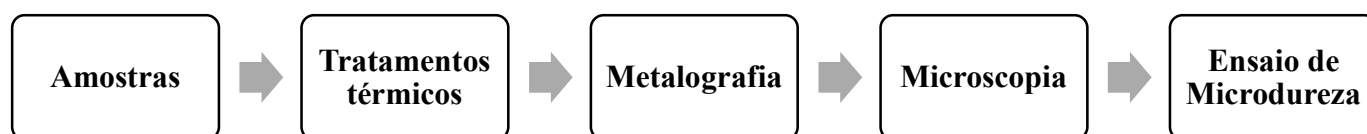
Essas características dificilmente se reunirão em um só material e dependendo da aplicação deve-se priorizar algumas delas, que possam ser reunidas. Outra alternativa é utilizar tratamentos para adquirir algumas propriedades desejadas aliadas ou que modificam as propriedades já existentes nos aços.

Segundo Abrão (2009), ainda que a ferramenta possua tenacidade suficiente para evitar uma avaria, estará sempre sujeita ao desgaste.

## 4. MATERIAIS E MÉTODOS

O processo de caracterização e análise das amostras foi realizado em cinco etapas: Corte, tratamentos térmicos, embutimento, lixamento, polimento, microscopia óptica e ensaio de microdureza, como é apresentado no fluxograma que detalha os processos na Figura 6. Todas as máquinas utilizadas no decorrer desse processo são dos laboratórios de Ensaios mecânicos e Soldagem da Universidade Federal Rural do Semiárido (UFERSA).

Figura 5 - Sequência lógica das etapas do método utilizado



**Fonte:** Autoria própria (2019)

### 4.1 Amostras

Para a realização deste trabalho, foram utilizadas brocas de diferentes diâmetros que foram cortadas igualmente com 80 mm de espessura, na cortadora metalográfica da marca Arotec, para alcançar a quantidade de amostras necessárias para realizar os tratamentos térmicos de têmpera e revenimento em uma combinação de temperaturas que totalizam 25 (vinte e cinco) amostras. A Figura 7 representa algumas dessas amostras cortadas nos tamanhos estabelecidos. As brocas eram utilizadas no laboratório do Instituto Federal do Rio Grande do Norte – Mossoró (IFRN) há algum tempo e não foi possível identificar a marca das mesmas.

Figura 6 - Amostra das brocas cortadas



Fonte: Autoria própria (2019)

## 4.2 Tratamentos Térmicos

Utilizando um forno elétrico do tipo mufla da marca GP, no laboratório de Soldagem, os tratamentos térmicos de têmpera e revenimento foram realizados nas amostras, como citado anteriormente. As temperaturas utilizadas em cada amostra estão representadas na Tabela 3.

Tabela 3 - Distribuição das temperaturas dos tratamentos térmicos nas amostras

|                            |       | Temperatura de têmpera |            |            |            |            |
|----------------------------|-------|------------------------|------------|------------|------------|------------|
|                            |       | 950°C                  | 1000°C     | 1050°C     | 1100°C     | 1150°C     |
| Temperatura de revenimento | 200°C | Amostra 1              | Amostra 2  | Amostra 3  | Amostra 4  | Amostra 5  |
|                            | 300°C | Amostra 6              | Amostra 7  | Amostra 8  | Amostra 9  | Amostra 10 |
|                            | 400°C | Amostra 11             | Amostra 12 | Amostra 13 | Amostra 14 | Amostra 15 |
|                            | 500°C | Amostra 16             | Amostra 17 | Amostra 18 | Amostra 19 | Amostra 20 |
|                            | 600°C | Amostra 21             | Amostra 22 | Amostra 23 | Amostra 24 | Amostra 25 |

Fonte: Autoria própria (2019)

Nesse sentido, para cada temperatura de têmpera foram realizados 5 revenimentos em temperaturas diferentes, totalizando um condição diferente para cada uma das 25 amostras, já que também foram utilizadas 5 temperaturas de têmpera. Em cada amostra, descrita acima, o tempo da têmpera foi 10 minutos, resfriamento em óleo seguido de um ou mais revenimentos de 1 hora e resfriamento em água.

### **4.3 Metalografia**

Após a etapa dos tratamentos térmicos, é necessário preparar as amostras para a microscopia óptica e o ensaio de microdureza. O primeiro passo foi realizar o embutimento a frio das amostras com resina poliéster nos moldes. Após a cura da resina, as amostras embutidas são lixadas e polidas na Lixadeira/Politriz Arapol 2V-PU da marca Arotec. No lixamento foram usadas lixas de diferentes granulometrias, conforme a sequência: 180, 220, 320, 400, 500, 600, 800, 1000 e 1200 e no polimento com alumina de 1µm.

### **4.4 Microscopia**

A microscopia pode ser realizada nas amostras após o polimentos e ataque químico, que consiste na imersão das amostras em uma solução com Nital 10% durante 5 (cinco) segundos. Utilizando o microscópio da marca OLYMPUS, modelo GX51, com a lente de aumento 200x.

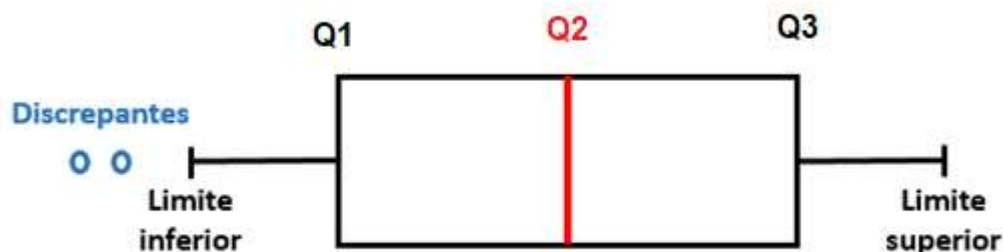
### **4.5 Ensaio de microdureza**

Os ensaios de microdureza foram realizados no microdurômetro da marca SHIMADZU e modelo M-1. Os valores de microdurezas foram obtidos nas escalas *Rockwell C* (*Hardness Rockwell C* – HRC) e *Vickers* (*Hardness Vickers* – HV) com uma carga constante de trabalho de 2.942 N e 0,03 HV. O objetivo do ensaio de microdureza foi o de determinar uma média da dureza nas amostras, e para isto, foram realizadas quinze medições em cada amostra, no qual os dados serão tratados estatisticamente para a plotagem dos resultados.

## 4.6 Análise dos resultados

O tratamento estatístico foi feito através da utilização de um gráfico *box plot* que é uma representação gráfica de dados que permite verificar rapidamente a dispersão dos mesmos, destacando os valores discrepantes, ou seja, os valores que ficaram fora do intervalo. Como mostra a Figura 8 este gráfico indica o primeiro, segundo e terceiro quartil, Q1, Q2 e Q3. O segundo quartil é a mediana, portanto  $Q2=Md$ . O gráfico também indica os limites inferior e superior do conjunto de dados, mas esses limites nem sempre indicam o maior e menor valor do intervalo, já que os valores discrepantes também são indicados na representação. A caixa principal é a diferença entre o terceiro e primeiro quartil ( $Q3-Q1$ ) e corresponde a 50% dos dados. As barras que representam os limites podem ser equivalentes até no máximo 1,5x do tamanho da caixa principal e os valores discrepantes são exatamente os valores que ultrapassam esses limites máximos.

Figura 7 - Representação do *box plot*



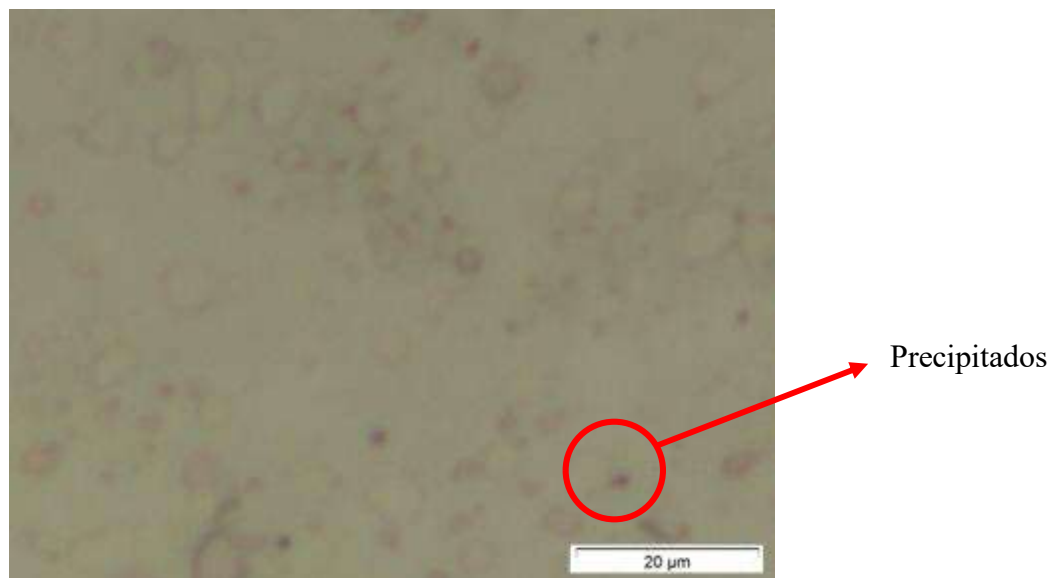
Fonte: Autoria própria (2019)

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Análise da microestrutura dos aços ferramenta

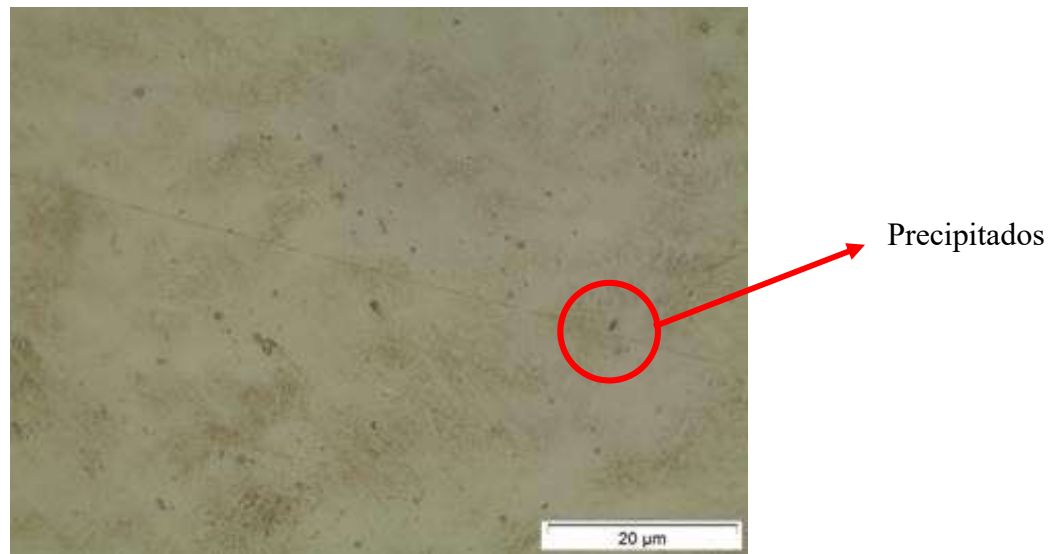
A identificação das microestruturas presentes nas fotomicrografias foi dificultada porque os aços ferramentas possuem uma microestrutura muito refinada. Por exemplo, as Figuras 9, 10, 11, 12 e 13, de acordo com a literatura, possuem principalmente martensita e carbonetos, que são precipitados de acordo com a temperatura e tempo em que são submetidos nos tratamentos térmicos. Nas fotomicrografias da Figuras 9, 10, 11, 12 e 13 os precipitados estão demarcados, mas não é possível identificar estas fases.

Figura 8 - Fotomicrografia da amostra 3 (Temperada à 1050°C e revenida à 200°C) com aumento de 1000x



**Fonte:** Autoria própria (2019)

Figura 9 - Fotomicrografia da amostra 8 (Temperada à 1050°C e revenida à 300°C) com aumento de 1000x



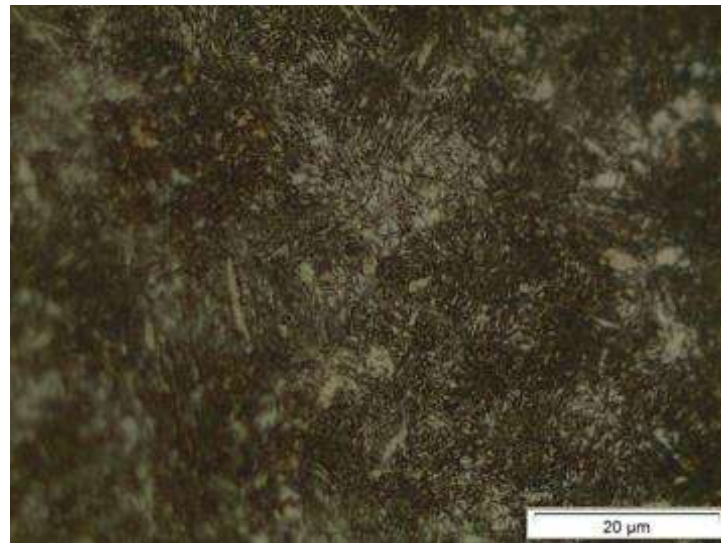
**Fonte:** Autoria própria (2019)

Figura 10 - Fotomicrografia da amostra 13 (Temperada à 1050°C e revenida à 400°C) com aumento de 1000x



**Fonte:** Autoria própria (2019)

Figura 11 - Fotomicrografia da amostra 18 (Temperada à 1050°C e revenida à 500°C) com aumento de 1000x



**Fonte:** Autoria própria (2019)

Figura 12 - Fotomicrografia da amostra 23 (Temperada à 1050°C e revenida à 600°C) com aumento de 1000x

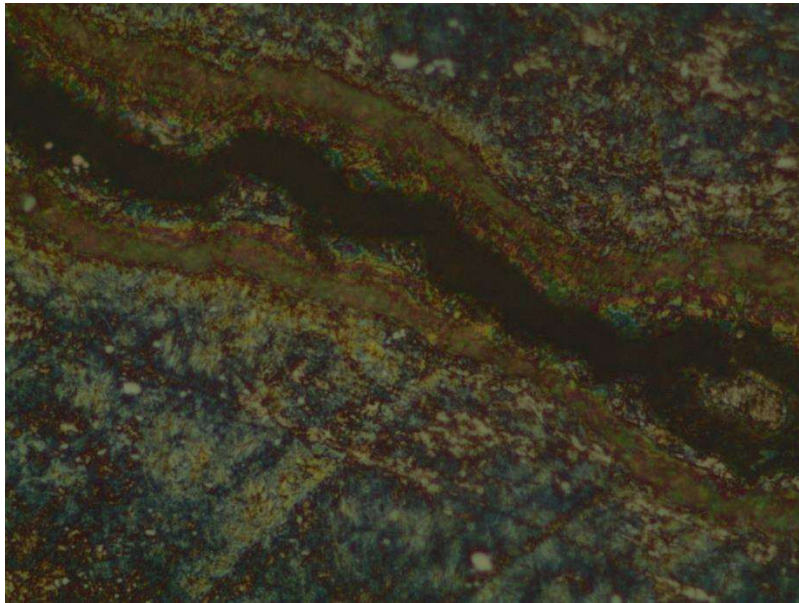


Precipitados

**Fonte:** Autoria própria (2019)

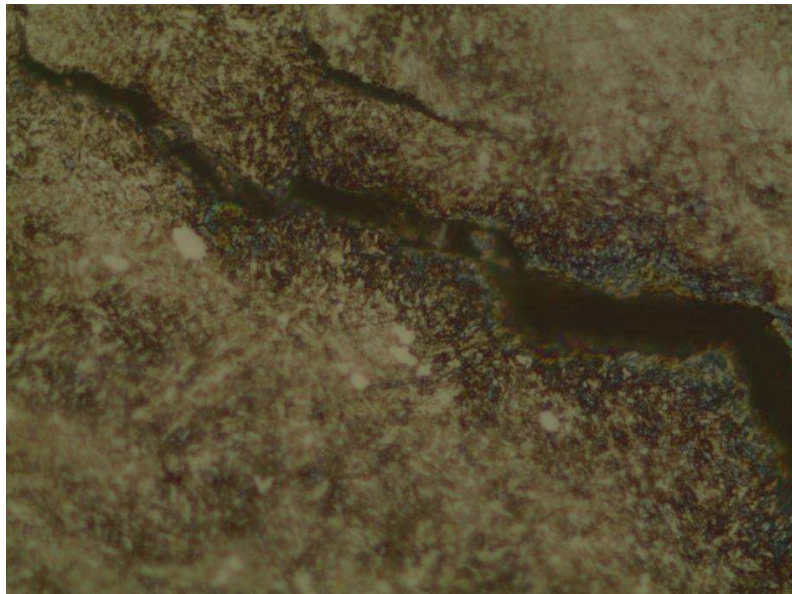
As Figuras 14 e 15 mostram as trincas, que foram causadas pela não realização dos pré-aquecimentos antes da têmpera.

Figura 13 - Identificação de trinca na amostra 16 com aumento de 1000x



**Fonte:** Autoria própria (2019)

Figura 14 - Identificação de trinca na amostra 12 com aumento de 1000x



**Fonte:** Autoria própria (2019)

## 5.2 Análise da microdureza

Primeiramente analisou-se os dados obtidos e calculou-se as médias dos valores em *Vickers* das medições de microdureza da amostragem, que totalizam 375 valores, como mostra Tabela 4.

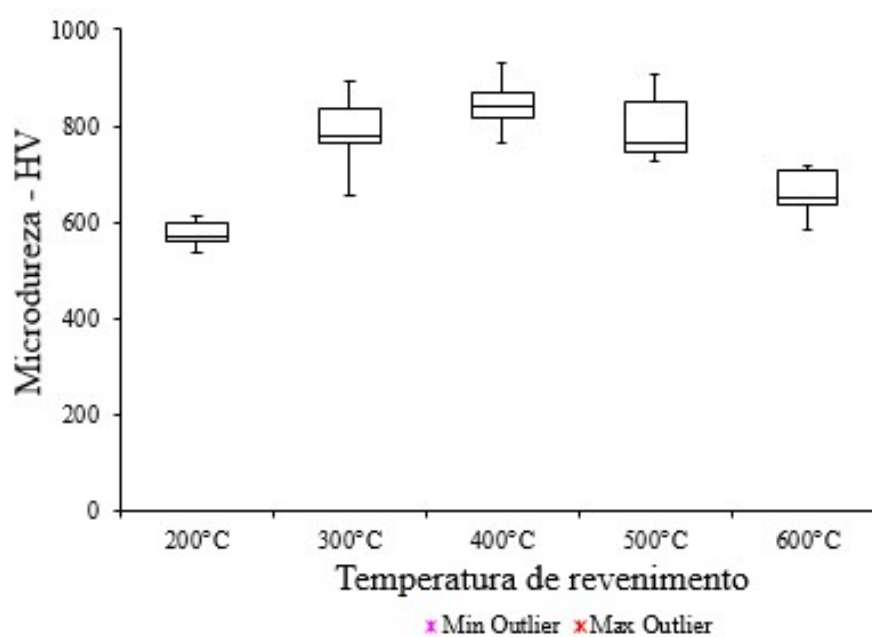
Tabela 4 - Quantidade de medições para realizar a média do valor de microdureza em  
*Vickers*

| Identificação | Temperatura de revenimento - °C | Quantidade de medições | Microdureza média – HV |
|---------------|---------------------------------|------------------------|------------------------|
| Amostra 1     | 200                             | 15                     | 576,8                  |
| Amostra 2     |                                 | 15                     | 549,4                  |
| Amostra 3     |                                 | 15                     | 702,1                  |
| Amostra 4     |                                 | 15                     | 703,7                  |
| Amostra 5     |                                 | 15                     | 832,3                  |
| Amostra 6     | 300                             | 15                     | 793,8                  |
| Amostra 7     |                                 | 15                     | 538                    |
| Amostra 8     |                                 | 15                     | 815,5                  |
| Amostra 9     |                                 | 15                     | 788,4                  |
| Amostra 10    |                                 | 15                     | 755,9                  |
| Amostra 11    | 400                             | 15                     | 845,7                  |
| Amostra 12    |                                 | 15                     | 847,7                  |
| Amostra 13    |                                 | 15                     | 738,3                  |
| Amostra 14    |                                 | 15                     | 845,7                  |
| Amostra 15    |                                 | 15                     | 649,7                  |
| Amostra 16    | 500                             | 15                     | 795                    |
| Amostra 17    |                                 | 15                     | 747,8                  |
| Amostra 18    |                                 | 15                     | 815,5                  |
| Amostra 19    |                                 | 15                     | 823,5                  |
| Amostra 20    |                                 | 15                     | 793                    |
| Amostra 21    | 600                             | 15                     | 666,4                  |
| Amostra 22    |                                 | 15                     | 672,3                  |
| Amostra 23    |                                 | 15                     | 770,1                  |
| Amostra 24    |                                 | 15                     | 588,4                  |
| Amostra 25    |                                 | 15                     | 755,1                  |
| <b>TOTAL</b>  |                                 | <b>375</b>             |                        |

Fonte: Autoria própria (2019)

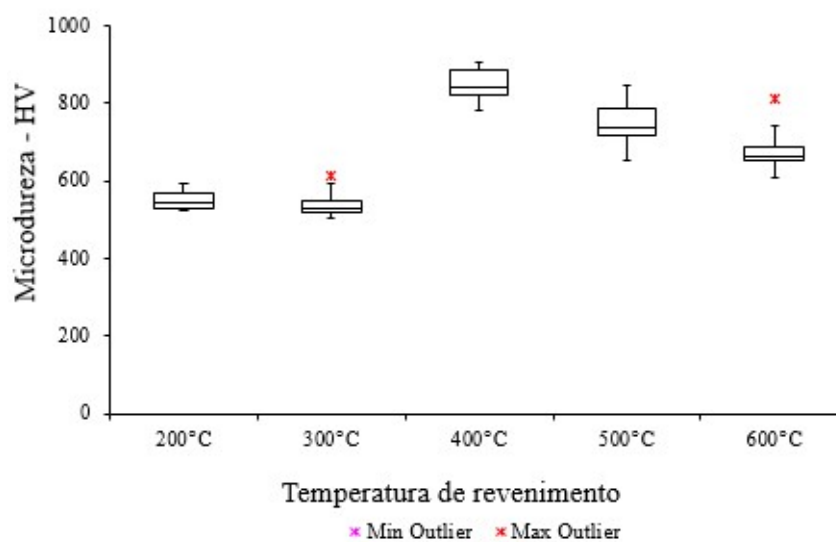
Também construiu-se um gráfico *box plot* para cada temperatura de têmpera, com o intuito de verificar a dispersão dos resultados dos ensaios de microdureza, como mostram as Figuras 16, 17, 18, 19 e 20.

Figura 15 - Gráfico *box plot* da microdureza em função da temperatura de revenimento para têmpera à 950°C



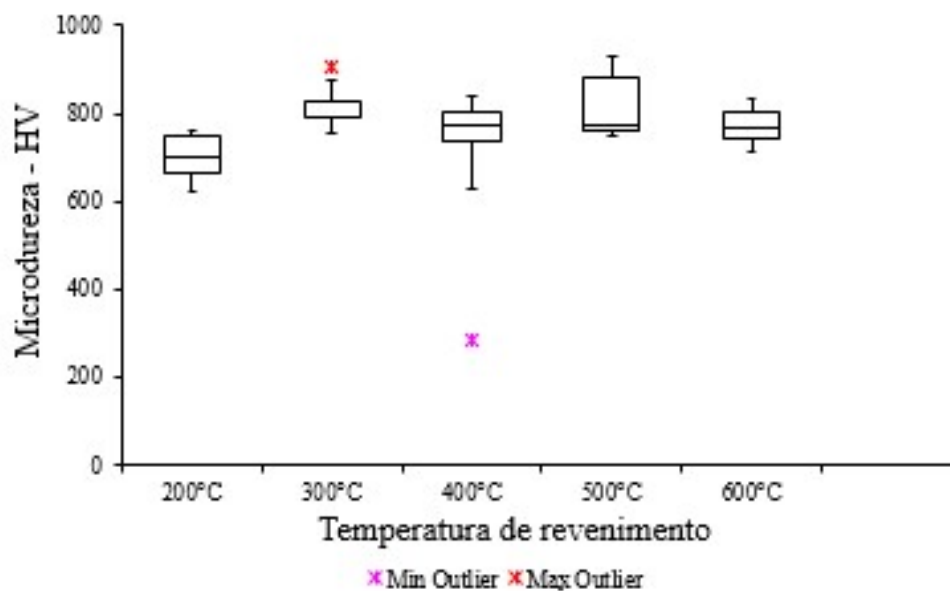
Fonte: Autoria própria (2009)

Figura 16 - Gráfico *box plot* da microdureza em função da temperatura de revenimento para têmpera à 1000°C



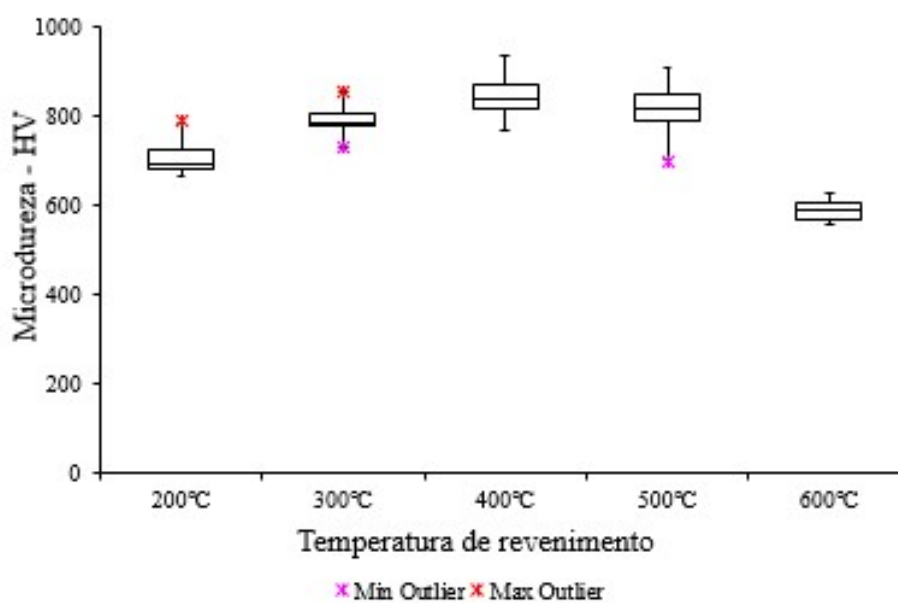
Fonte: Autoria própria (2009)

Figura 17 - Gráfico *box plot* da microdureza em função da temperatura de revenimento para têmpera à 1050°C



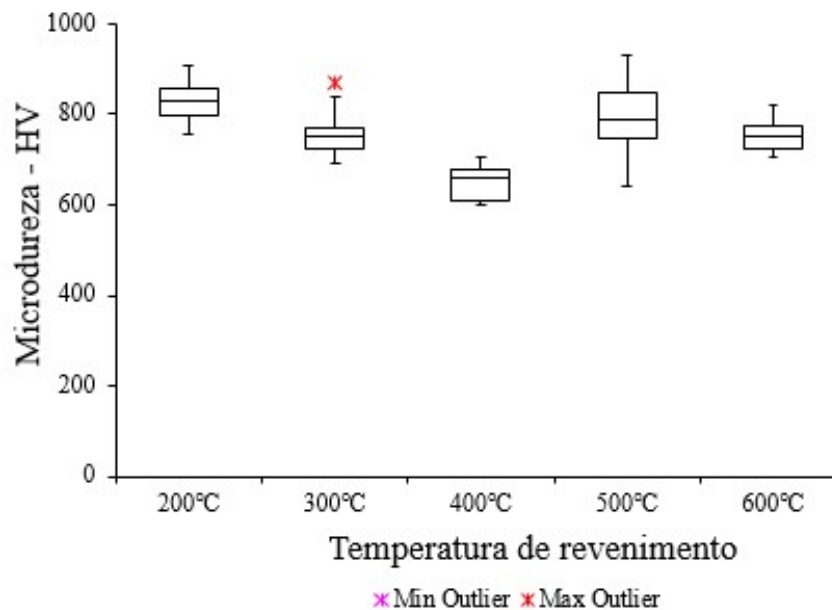
Fonte: Autoria própria (2009)

Figura 18 - Gráfico *box plot* da microdureza em função da temperatura de revenimento para têmpera à 1100°C



Fonte: Autoria própria (2009)

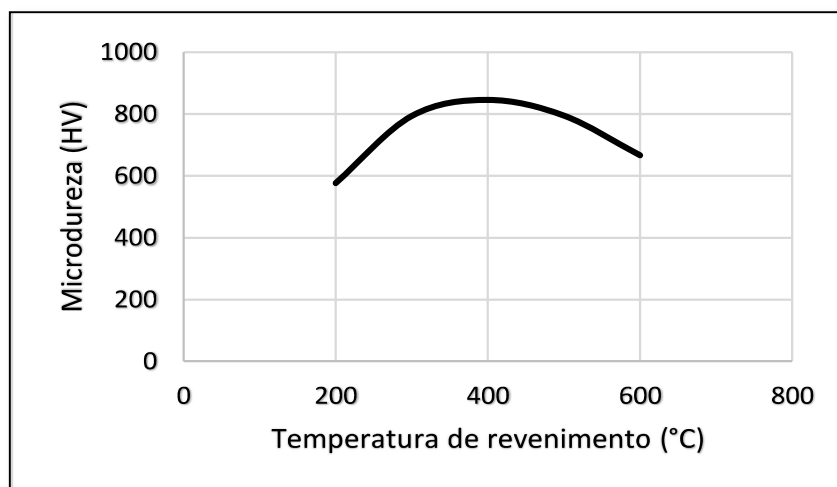
Figura 19 - Gráfico *box plot* da microdureza em função da temperatura de revenimento para têmpera à 1150°C



Fonte: Autoria própria (2019)

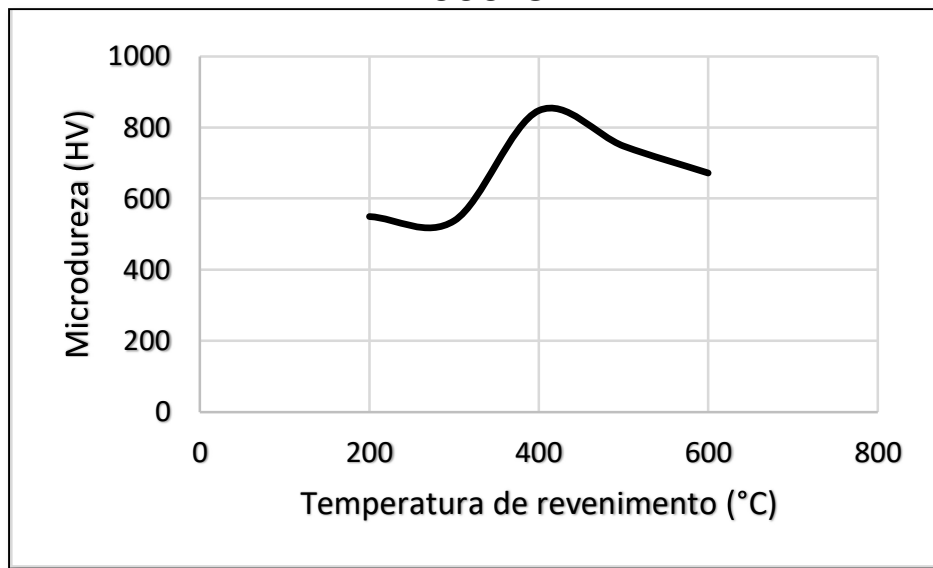
Com base nos gráficos *box plot* obtidos, eliminou-se os valores discrepantes para que os resultados se tornassem mais confiáveis e logo em seguida elaborou-se um gráfico que indica a microdureza nas 5 (cinco) temperaturas de revenimento, para uma única temperatura de têmpera, como mostram as Figuras 21, 22, 23, 24 e 25.

Figura 20 - Gráfico da microdureza em função da temperatura de revenimento para têmpera à 950°C



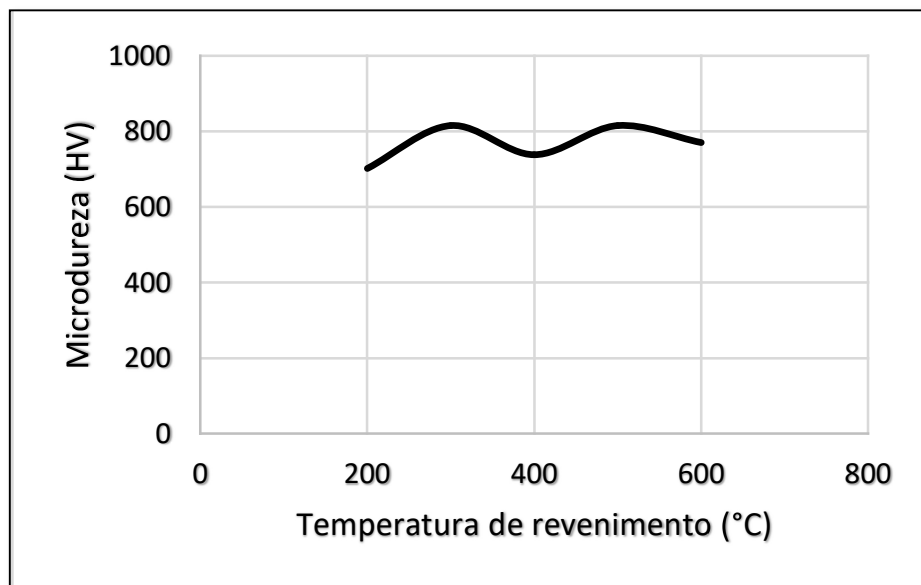
Fonte: Autoria própria (2019)

Figura 21 - Gráfico da microdureza em função da temperatura de revenimento para  
têmpera à 1000°C  
**1000 C**



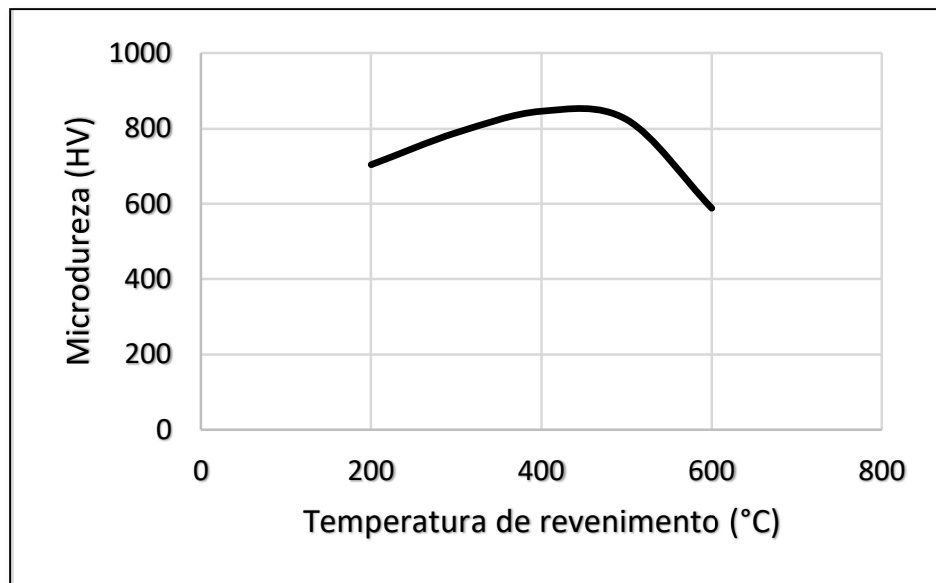
**Fonte:** Autoria própria (2019)

Figura 22 - Gráfico da microdureza em função da temperatura de revenimento para  
têmpera à 1050°C  
**1050 C**



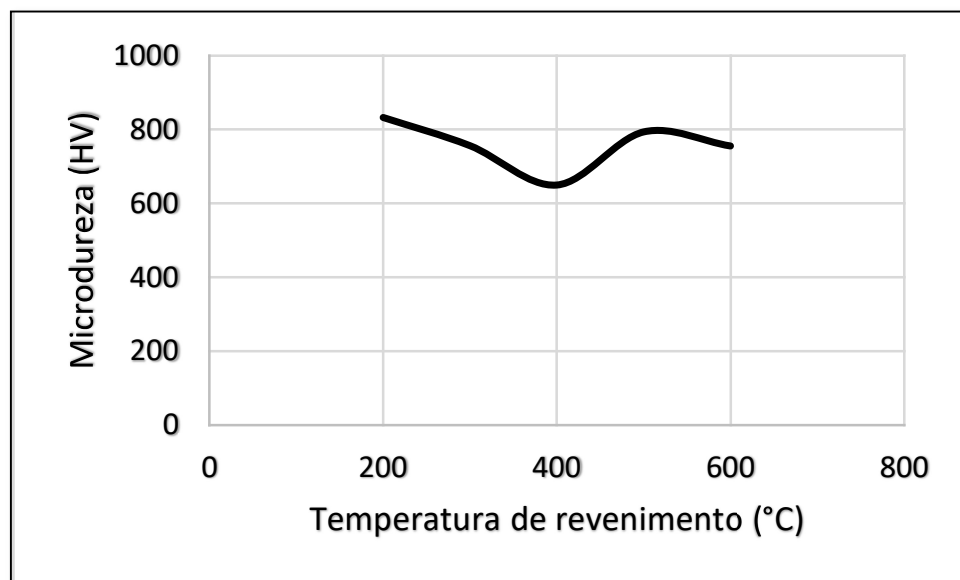
**Fonte:** Autoria própria (2019)

Figura 23 - Gráfico da microdureza em função da temperatura de revenimento para têmpera à 1100°C



Fonte: Autoria própria (2019)

Figura 24 - Gráfico da microdureza em função da temperatura de revenimento para têmpera à 1150°C

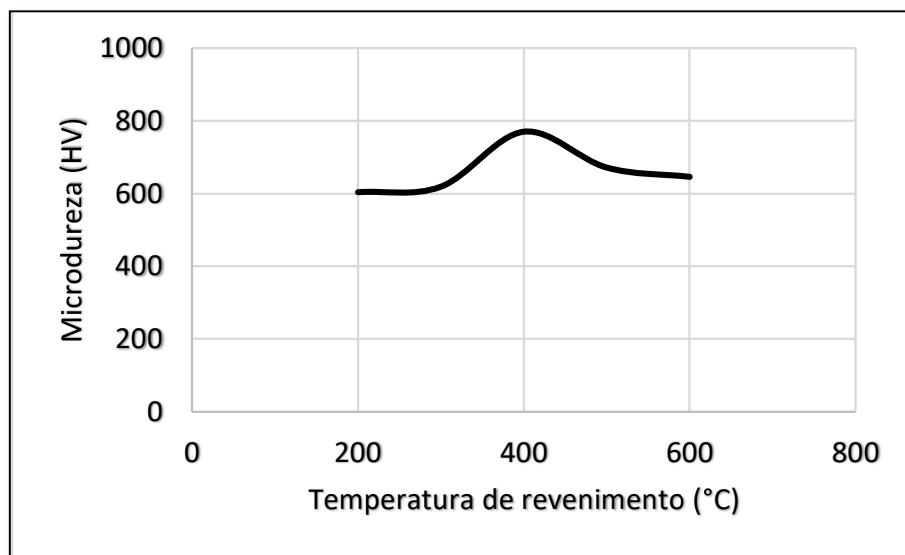


Fonte: Autoria própria (2019)

Como pode ser observado, os gráficos das Figuras 21, 22, 23, 24 e 25 apresentam um pico de dureza entre 400°C e 500°C, o qual pode ser resultado do endurecimento secundário que é uma característica de aço ferramenta. Esse endurecimento secundário é um fenômeno típico de muitos aços altamente ligados e é mais acentuado em aços rápidos. Ocorre devido aos processos de transformação da austenita retida em martensita (durante o resfriamento do revenimento) e de precipitação de uma dispersão extremamente fina de carbonetos de elementos de liga que contém vanádio, tungstênio e molibdênio.

Em posse dos gráficos das Figuras 21, 22, 23, 24 e 25 mencionadas no parágrafo anterior, constatou-se que a curva mais próxima às curvas presente na literatura é a da Figura 22. A curva assemelhou-se bastante a curva de dureza em função da temperatura de revenimento de um aço rápido. Dessa forma foi de suma importância realizar um segundo revenimento de 1 (uma) hora nesse grupo de amostras, já que o recomendado é a realização de revenimentos duplos. Obteve-se como resultado uma suavização da curva, como mostra o gráfico representado na Figura 26.

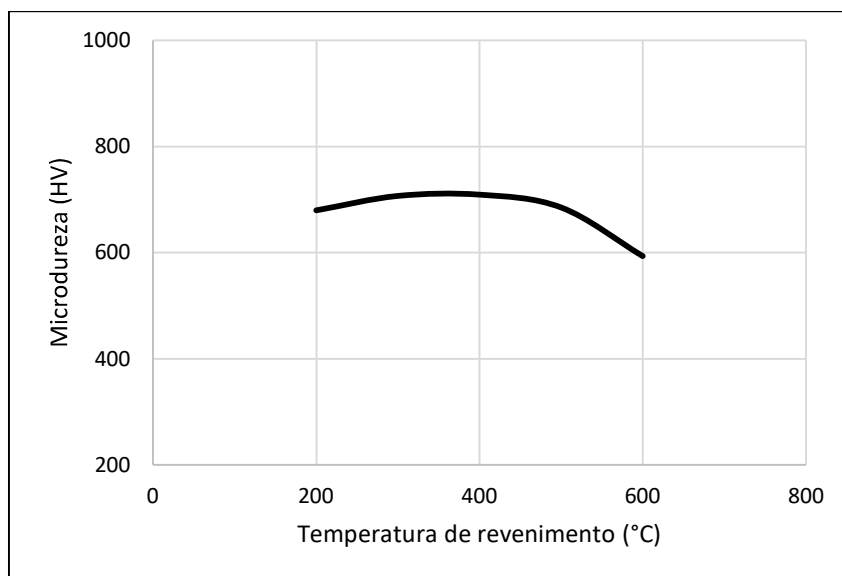
Figura 25 - Gráfico da microdureza em função da temperatura de revenimento duplo para têmpera à 1000°C



Fonte: Autoria própria (2019)

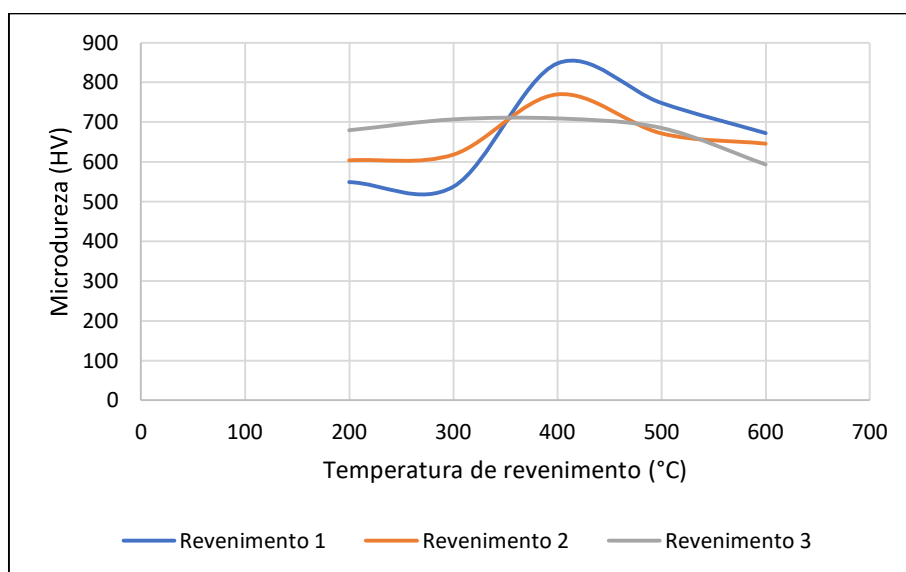
Devido a forma como a curva se comportou, optou-se por fazer um triplo revenimento, para comparação com as outras curvas (Figura 28) e plotagem do gráfico, com o revenimento individual que pode ser analisado na Figura 27, para análise do comportamento da dureza.

Figura 26 - Gráfico da microdureza em função da temperatura de revenimento triplo para têmpera à 1000°C



Fonte: Autoria própria (2019)

Figura 27 - Comparação entre as curvas de revenimento simples, duplo e triplo para têmpera à 1000°C



Fonte: Autoria própria (2019)

O que se espera para a curva que representa o terceiro revenimento é que não haja mais o pico de dureza, já que supõe-se que não haja mais carbonetos a serem precipitados e austenita retida para se transformar em martensita. É normal que o aço apresente valores inferiores de dureza, pois suas tensões foram aliviadas com o revenimento triplo. Como

pode-se observar na Figura 28 a curva, para o terceiro revenido, inicia com valores maiores.

A avaliação do resultado de dureza para o triplo revenimento é relevante pois a literatura sugere que sejam feitos um ou mais revenimentos com a intenção de aumentar a tenacidade, mas não avalia o comportamento da dureza, que como podemos identificar em comparação com as curvas da Figura 28, se manteve constante e com valores altos.

Temperaturas próximas da transformação austenítica não são suficientes para solubilizar o carbono na quantidade suficiente para a precipitação secundária durante o revenimento. Entretanto, entre 900°C e 1100 °C todos os carbonetos  $M_{23}C_6$  são dissolvidos e a partir de 1160 °C o carboneto  $M_6C$  começa a se dissolver, mas só sendo completamente consumido acima da temperatura solidus. O carboneto MC praticamente não se dissolve, de forma que após a têmpera, o aço M2 (por exemplo) é constituído por uma matriz martensítica e dispersão dos carbonetos MC e  $M_6C$  primários. No estado temperado, os aços rápidos apresentam uma estrutura de carbonetos MC e  $M_6C$  primários grosseiros dispersos numa matriz martensítica.

## 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com o presente trabalho pode-se obter as seguintes conclusões:

- Nas fotomicrografia as amostras apresentaram precipitados que são os carbonetos responsáveis pelo endurecimento dos aços ferramentas. Além dos carbonetos, é esperado que as amostras contenham uma estrutura martensítica, entretanto não foi possível identificá-la de forma nítida, possivelmente pela resolução do microscópio.
- A partir dos gráficos obtidos através das microdurezas analisadas nas amostras, foi possível observar o endurecimento secundário que é característico dos aços ferramenta.
- Na realização do triplo revenimento identificou-se uma linearização da curva representada pelos valores de dureza, que se mantiveram elevados com uma média de 700 HV. A não apresentação do pico de dureza deve-se ao fato de que não há carbonetos a serem precipitados.

## **7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

A partir dos resultados obtidos nesse trabalho, das considerações finais e sobre a literatura, algumas sugestões para trabalhos futuros devem ser consideradas:

- Realizar análise de composição química dos aços utilizados ou solicitar certificado de garantia da instituição cedente do material, para que haja confirmação de que todas as amostras possuem a mesma composição.
- Para as fotomicrografias utilizar um microscópio eletrônico, para que possa ser realizada uma melhor caracterização das microestruturas presentes.

## REFERÊNCIAS

ASM Handbook. (1990) Properties and selection: Irons, Steel and High-Performance Alloys. 10ª ed. USA: ASM International.

CALLISTER, Jr., William D. – **Ciência e Engenharia de Materiais: uma Introdução**. 7ed. trad. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

CALLISTER, Jr., William D. – **Ciência e Engenharia de Materiais: uma Introdução**. Ed trad. Rio de Janeiro: LTC, 1999.

CHIAVERINI, Vicente. **Aços e Ferros Fundidos**. São Paulo, SP. Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 7ª ed. 2012.

MACHADO, Álisson Rocha., ABRÃO, Alexandre Mendes., COELHO, Reginaldo Texeira, SILVA., Márcio Bacci da. – **Teoria da Usinagem dos Materiais**. São Paulo, Edgard Blücher, 2009.

SILVA, André L. da Costa; MEI, Paulo Roberto. **Aços e ligas especiais**. Eletrometal S.A. Metais Especiais. 2ª ed. Sumaré, 1988.

SILVA, André Luiz V. Da Costa; MEI, Paulo Roberto. **Aços e Ligas Especiais**. São Paulo, SP. Editora Edgard Blücher, 3ª ed. 2010.

STEMMER, C.E. **Ferramentas de Corte**. 2.ed. Florianópolis: Ed. da UFSC, 1989.

SERNA, Marilene Morelli. **Quantificação e identificação de carbonetos no aço ferramenta AISI/SAE M2**. 2008. 108f. Tese de Doutorado – Instituto de Pesquisas energéticas e nucleares, São Paulo, 2008.

TIER, Marco Antônio Durlo. **Avaliação da resistência ao desgaste do aço AISI M2 nitretado a plasma**. 1998. 156f. Tese de Doutorado – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

SANTOS, Romário Silva. **Ferramentas de torneamento de aço rápido sinterizado e aços rápidos convencionais: análise de propriedades**. 1999. 168f. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1999.

JESUS, Edilson Rosa Barbosa de. **Ferramentas de usinagem em aço rápido AISI M2 obtido por conformação por “spray”**. 2004. 207f. Tese de Doutorado - Instituto de Pesquisas energéticas e nucleares, São Paulo, 2004.

SARTORI, Carlos Humberto. **Influência dos tratamentos térmicos e tratamentos criogênicos na tenacidade do aço rápido AISI M2**. 2009. 142f. Dissertação de Mestrado – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

ARAÚJO FILHO, Oscar Olimpio de. **Estudo comparativo de aços rápidos AISI M3:2 produzidos por diferentes processos de fabricação**. 2006. 174f. Tese de Doutorado - Instituto de Pesquisas energéticas e nucleares, São Paulo, 2006.

HONEYCOMBE, R.W.K. – **Aços: Microestruturas e Propriedades**. Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa, 1982.

ANTONELLO, Rodrigo Tecchio. **Preparação de aços rápidos ao molibdênio com adição de carboneto de nióbio através de técnicas de metalurgia do pó**. 2012. 105f. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2012.

ARCEGO, Matheus Leal. **Resistência à ruptura transversal de aços rápidos AISI M2 produzidos por metalurgia do pó e sujeitos a diferentes condições de tratamentos**. 2015. 123f. Dissertação de Mestrado – Universidade do Estado de Santa Catarina. Programa de Pós-graduação e Ciência e Engenharia de Materiais, Joinville, 2015.

RICARDO BLAU E KASSIM S. AL-RUBAIE. [www.metallum.com.br/20cbecimat/resumos/trabalhos\\_completos/317-062.doc](http://www.metallum.com.br/20cbecimat/resumos/trabalhos_completos/317-062.doc) (04/11/2012).

GOBBI, V. J. **Influência da nitretação a plasma na resistência ao desgaste microabrasivo do aço ferramenta AISI D2**. 2009. 111f. Dissertação de Mestrado em Ciência Mecânica. Departamento de Engenharia Mecânica – Universidade de Brasília, Brasília, Distrito Federal.

MOURA, Y. J. L. **Deposição de Nitreto de Titânio (TiN) com Gaiola Catódica em aço ferramenta AISI D2 e aço SINTER 30**. 2016. (Dissertação de Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia dos Materiais, INSTITUTO FEDERAL DO PIAUÍ, Teresina, 2016.

METALS, Villares. **Aços rápidos**. Disponível em: <http://www.villaresmetals.com.br/villares/pt/Produtos/Acos-Rapidos>. Acesso em: 05 ago. 2019.

SOARES JUNIOR, Edmo. **Efeito do tratamento térmico na microestrutura e propriedades mecânicas de aços-ferramenta para trabalho a frio**. 2006. 84 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Ciências na área de Tecnologia Nuclear, Instituto de Energias Energéticas e Nucleares, São Paulo, 2006.

GABARDO, João Fredolim. **Estudo da tenacidade do aço ferramenta H13**. 2008. 70 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2008.

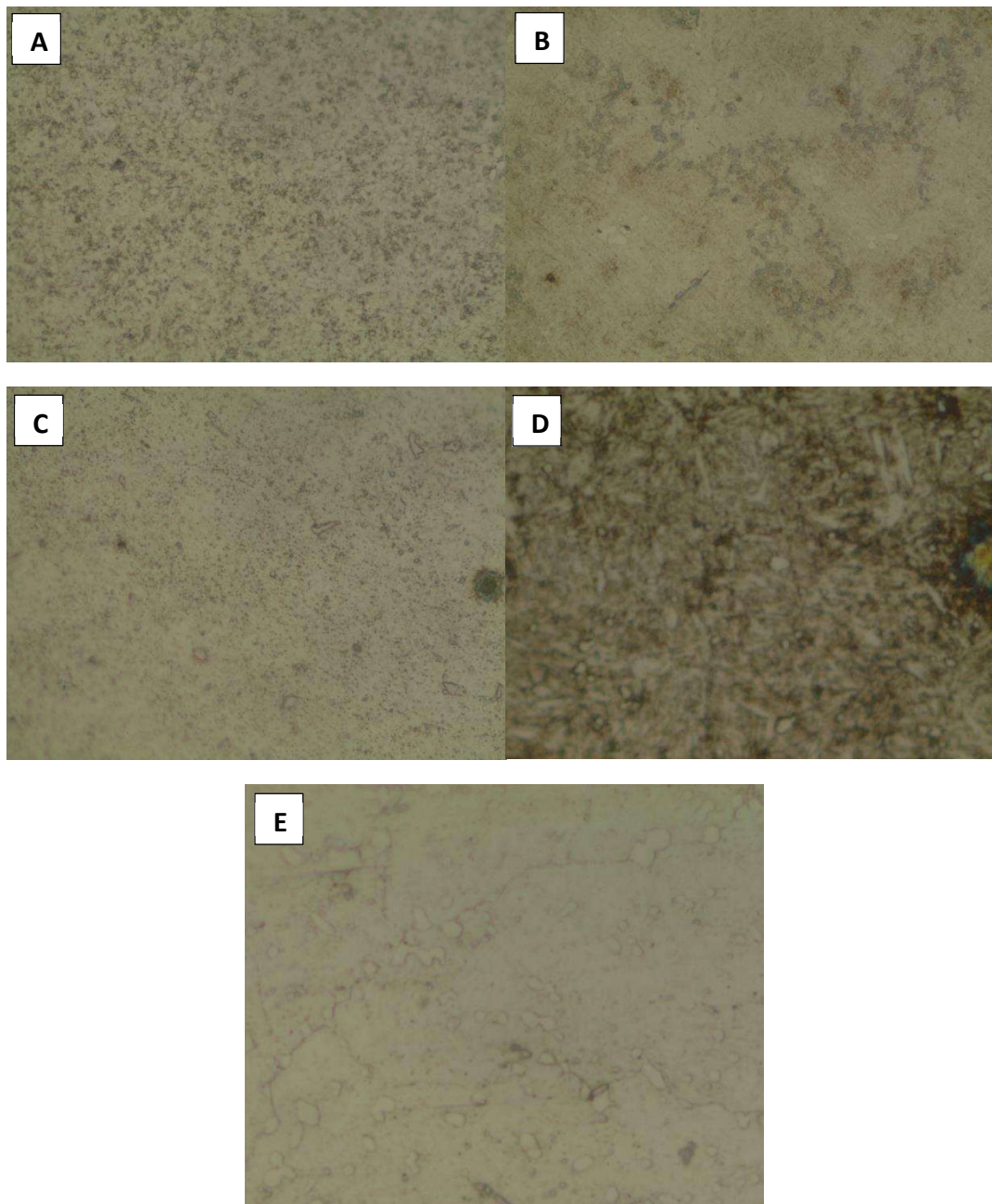
NOGUEIRA, Romário Mauricio Urbanetto. **OBTENÇÃO E ESTUDO DE INSERTOS SINTERIZADOS DE AÇOS RÁPIDOS AISI M2, M3/2 E T15**. 2004. 31 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville, 2004.

COLLINS, D.N. **Cryogenic Treatment of Tool Steels**. Advanced Materials & Processes, 1998.

GRACIOSO, José Francisco Fadel. **Efeito das condições de têmpera na microestrutura e propriedades mecânicas de um aço inoxidável martensítico fundido CA6NM**. 2003. 115 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade do Estado de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.

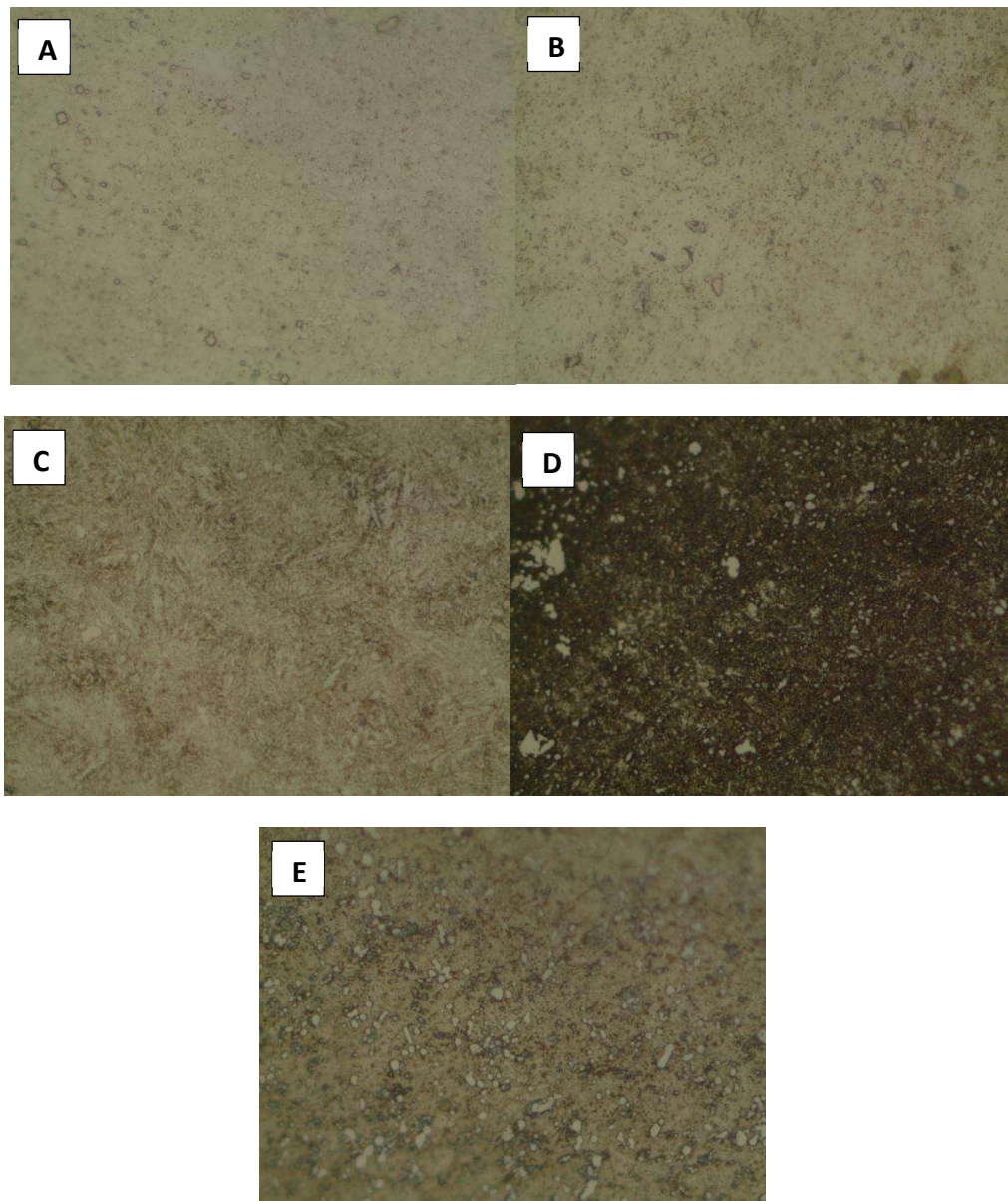
## ANEXOS

Figura A1 – Fotomicrografias das amostras temperadas à 950°C e revenidas à (a) 200°C (b) 300°C (c) 400°C (d) 500°C e (e) 600°C.



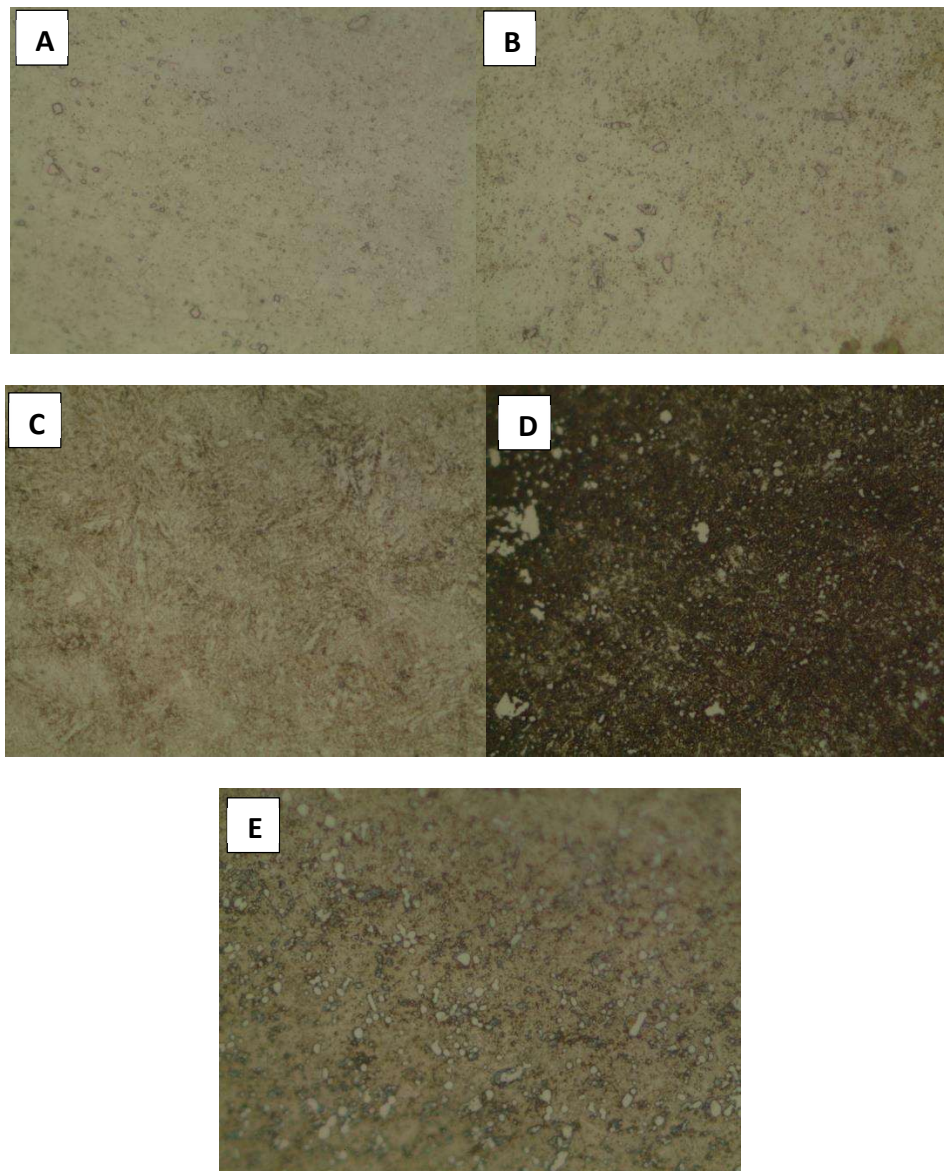
**Fonte:** Autoria própria (2019)

Figura A2 – Fotomicrografias das amostras temperadas à 1000°C e revenidas à (a) 200°C (b) 300°C (c) 400°C (d) 500°C e (e) 600°C.



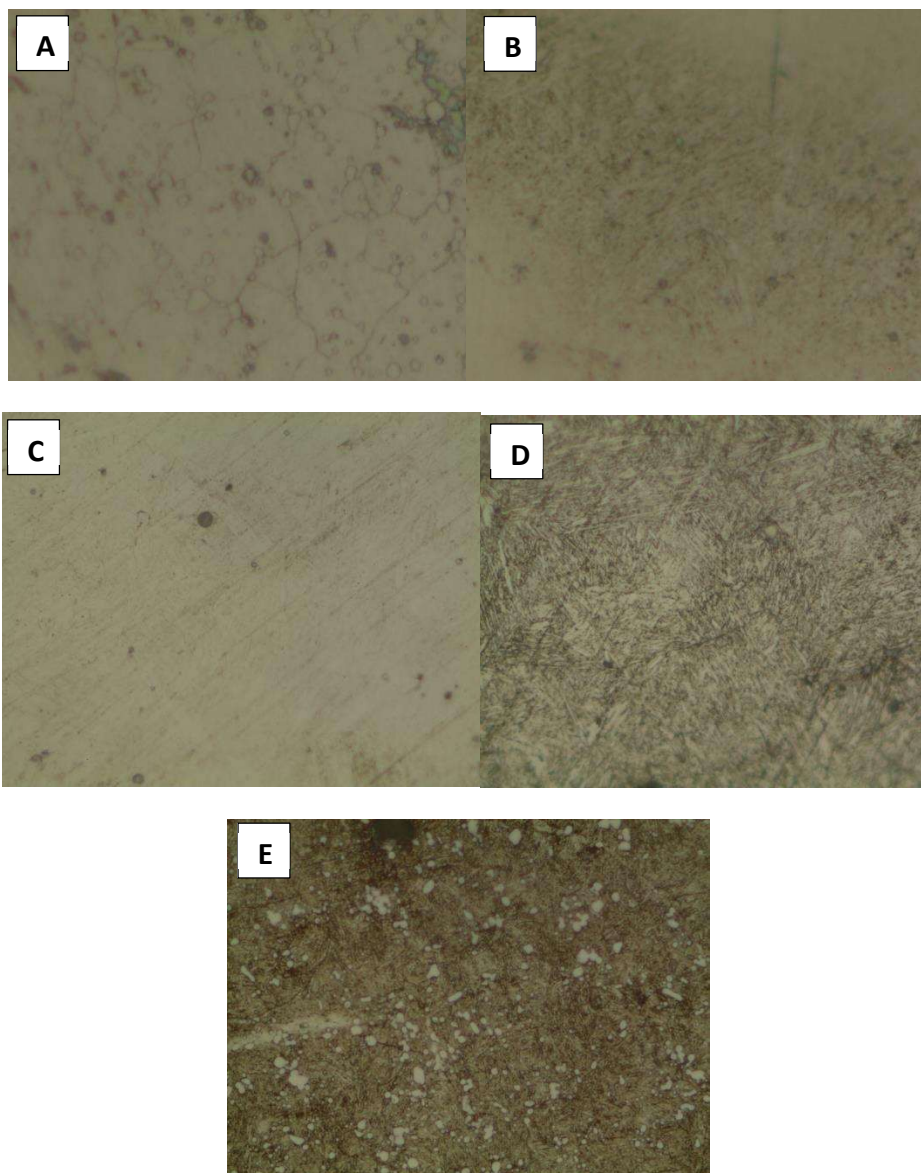
**Fonte:** Autoria própria (2019)

Figura A3 – Fotomicrografias das amostras temperadas à 1100°C e revenidas à (a) 200°C (b) 300°C (c) 400°C (d) 500°C e (e) 600°C.



**Fonte:** Autoria própria (2019)

Figura A3 – Fotomicrografias das amostras temperadas à 1150°C e revenidas à (a) 200°C (b) 300°C (c) 400°C (d) 500°C e (e) 600°C.

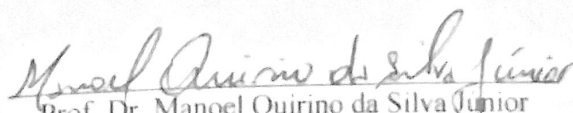


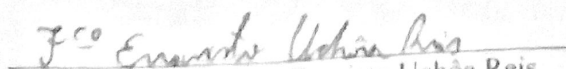
**Fonte:** Autoria própria (2019)

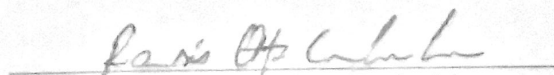
**ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

Às 10:30 horas do dia **13 de agosto de 2019**, no auditório do Centro de Engenharias, Campus Leste, reuniu-se a Banca Examinadora do Trabalho de Conclusão de Curso da aluna **EMILLY SILVA DA ROCHA COÊLHO**, aluna do curso de Engenharia Mecânica desta instituição, com o título "**Análise comparativa de microdureza entre um aço rápido temperado e revenido em temperaturas variadas**". A Banca Examinadora foi constituída pelos professores: Dr. Manoel Quirino da Silva Júnior, Dr. Francisco Evaristo Uchôa Reis e Dr. Ramsés Otto Cunha Lima. Foram registradas as seguintes ocorrências: O trabalho foi apresentado pela discente e, em seguida, houve arguição por parte dos membros da Banca Examinadora. A defesa foi pública, houve a presença de outras pessoas. As sugestões de alterações textuais foram entregues a aluna, que se comprometeu em fazê-las na sua totalidade. Concluída a defesa, procedeu-se o julgamento pelos membros da Banca Examinadora, tendo a aluna obtido as seguintes notas: **9,0; 8,5; 8,5**. Apuradas as notas verificou-se que a **aluna foi aprovada com média geral 8,7; cumprindo as exigências para aprovação e integralização da atividade de Projeto de Conclusão do Curso II do Bacharelado em Engenharia Mecânica**. E para constar, eu, Manoel Quirino da Silva Júnior, presidente da Banca Examinadora e Orientador da aluna, lavrei a presente ata que, após lida e considerada conforme, segue assinada pelos professores membros da Banca Examinadora.

Mossoró, 13 de agosto de 2019

  
Prof. Dr. Manoel Quirino da Silva Júnior  
Orientador / Presidente da Banca Examinadora

  
Prof. Dr. Francisco Evaristo Uchôa Reis  
Membro da Banca Examinadora

  
Prof. Dr. Ramsés Otto Cunha Lima  
Membro da Banca Examinadora