

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

**RODRIGO DE OLIVEIRA REZENDE**

**EFEITO DA REALIZAÇÃO DE DUPLO REVENIMENTO NA DUREZA E NA  
MICROESTRUTURA DE AMOSTRAS DO AÇO RÁPIDO AISI M2  
TEMPERADAS EM ÓLEO**

**BELO HORIZONTE**

**2017**

RODRIGO DE OLIVEIRA REZENDE

EFEITO DA REALIZAÇÃO DE DUPLO REVENIMENTO NA DUREZA E NA  
MICROESTRUTURA DE AMOSTRAS DO AÇO RÁPIDO AISI M2 TEMPERADAS  
EM ÓLEO

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

Orientadora: Profa. Dra. Elaine Carballo Siqueira Corrêa

Coorientador: Prof. Wellington Lopes

BELO HORIZONTE

2017

RODRIGO DE OLIVEIRA REZENDE

**EFEITO DA REALIZAÇÃO DE DUPLO REVENIMENTO NA DUREZA E NA  
MICROESTRUTURA DE AMOSTRAS DO AÇO RÁPIDO AISI M2  
TEMPERADAS EM ÓLEO**

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

**BANCA EXAMINADORA**

---

Profª. Dra. Elaine Carballo Siqueira Corrêa - Orientadora

---

Prof. Wellington Lopes – Coorientador

---

Prof. Ma. Aline Silva Magalhães

---

Prof. Ma. Suzanny Cristina Soares Martins

## **AGRADECIMENTOS**

Aos meus pais, agradeço pelo apoio, dedicação e conselhos durante toda minha trajetória.

Aos meus irmãos, que sempre estiveram ao meu lado com conselhos e apoio.

A minha namorada, Ana Luiza, pela paciência, amor e parceria.

À minha orientadora, Profa. Dra. Elaine Carballo Siqueira Corrêa, pelo carinho, dedicação e empenho, sempre me auxiliando e incentivando.

Ao João Paulo Eleutério, Rita Morais e Lucas Gomes pela contribuição na caracterização das amostras.

A todos do CEFET/MG que, em algum momento, me auxiliaram.

A todas as outras pessoas que direta ou indiretamente contribuíram para a execução deste trabalho.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Efeito do trabalho a quente sobre a distribuição de carbonetos em um aço rápido. ....	20
Figura 2 - Curva de revenimento do aço M2. Os parâmetros de austenitização têm grande influência sobre as propriedades no revenido. ....	25
Figura 3 - Martensita em aço baixa liga ASTM A533Cl.1 (20MnMoNi55) com C = 0,2%, Mn = 1,38%, Si = 0,25%, Ni = 0,83%, Mo = 0,49% resfriado continuamente a 50 °C/s Início da transformação: 415 °C. Ataque nital 2%. Cortesia B. Marini, CEA, França. ....	26
Figura 4 - Diagrama TTT (esquemático) de um aço-ferramenta, indicando-se a curva de resfriamento correspondente à velocidade crítica de resfriamento. ....	27
Figura 5 - Ciclo de têmpera + revenimento. ....	29
Figura 6 - Dureza e transformações do revenimento em aços carbono, aquecidos por uma hora entre 100 e 700 °C. ....	30
Figura 7 - Equipamento de Corte de Materiais Metálicos. ....	32
Figura 8 - Forno Elétrico ....	34
Figura 9 - Corpo de prova aço AISI M2. ....	34
Figura 10 - Durômetro ....	35
Figura 11 - Corpo de Prova Embutido ....	36
Figura 12 - Equipamento de Embutimento. ....	36
Figura 13 - Lixadeira e Politriz ....	37
Figura 14 - Microscópio ótico ....	38
Figura 15 - Microscópio Eletrônico de Varredura ....	38
Figura 16 - Capela de Exaustão de gases. ....	39
Figura 17 - Difrátômetro de Raio-X. ....	39
Figura 18 - Curva de dureza para o aço AISI M2 temperado a 1100°C e revenido em diversas temperaturas ....	40
Figura 19 - Curva de dureza para o aço AISI M2 temperado a 1100°C e revenido duplamente em diversas temperaturas ....	42
Figura 20 - Curvas de dureza para o aço AISI M2 temperado e revenido em diversas temperaturas e temperado e revenido duplamente em diversas temperaturas ....	43
Figura 21 - Imagem (MO) do aço rápido AISI M2 temperado em óleo a 1100°C. ....	44

<b>Figura 22 - Imagem (MEV) do aço rápido AISI M2 temperado em óleo a 1100°C</b> .....	<b>44</b>
<b>Figura 23 - Dureza de alguns carbonetos presentes nos aços ferramenta.</b> .....	<b>45</b>
<b>Figura 24 - Imagem (MO) do aço rápido AISI M2 temperado a 1100°C e revenido a 475°C</b> .....	<b>45</b>
<b>Figura 25 - Imagem (MEV) do aço rápido AISI M2 temperado a 1100°C e revenido a 475°C</b> .....	<b>46</b>
<b>Figura 26 - Imagem (MO) do aço rápido AISI M2 temperado a 1100°C e revenido a 500°C</b> .....	<b>47</b>
<b>Figura 27 - Imagem (MEV) do aço rápido AISI M2 temperado a 1100°C e revenido a 500°C</b> .....	<b>47</b>
<b>Figura 28 - Imagem (MO) do aço rápido AISI M2 temperado a 1100°C e revenido a 525°C</b> .....	<b>48</b>
<b>Figura 29 - Imagem (MEV) do aço rápido AISI M2 temperado a 1100°C e revenido a 525°C</b> .....	<b>48</b>
<b>Figura 30 - Imagem (MO) do aço rápido AISI M2 temperado a 1100°C e revenido a 550°C</b> .....	<b>49</b>
<b>Figura 31 - Imagem (MEV) do aço rápido AISI M2 temperado a 1100°C e revenido a 550°C</b> .....	<b>49</b>
<b>Figura 32 - Imagem (MO) do aço rápido AISI M2 temperado a 1100°C e revenido a 575°C</b> .....	<b>50</b>
<b>Figura 33 - Imagem (MEV) do aço rápido AISI M2 temperado a 1100°C e revenido a 575°C</b> .....	<b>50</b>
<b>Figura 34 - Imagem (MO) do aço rápido AISI M2 temperado a 1100°C e revenido a 600°C</b> .....	<b>51</b>
<b>Figura 35 - Imagem (MEV) do aço rápido AISI M2 temperado a 1100°C e revenido a 600°C</b> .....	<b>51</b>
<b>Figura 36 - Imagem (MO) do aço rápido M2 temperado em óleo a 1100°C e revenido duplamente a 475°C</b> .....	<b>52</b>
<b>Figura 37 - Imagem (MEV) do aço rápido M2 temperado em óleo a 1100°C e revenido duplamente a 475°C</b> .....	<b>52</b>
<b>Figura 38 - Imagem (MO) do aço rápido M2 temperado em óleo a 1100°C e revenido duplamente a 500°C</b> .....	<b>53</b>

<b>Figura 39 - Imagem (MEV) do aço rápido M2 temperado em óleo a 1100°C e revenido duplamente a 500°C .....</b>	<b>53</b>
<b>Figura 40 - Imagem (MO) do aço rápido M2 temperado em óleo a 1100°C e revenido duplamente a 525°C .....</b>	<b>54</b>
<b>Figura 41 - Imagem (MEV) do aço rápido M2 temperado em óleo a 1100°C e revenido duplamente a 525°C .....</b>	<b>54</b>
<b>Figura 42 - Imagem (MO) do aço rápido M2 temperado em óleo a 1100°C e revenido duplamente a 550°C .....</b>	<b>55</b>
<b>Figura 43 - Imagem (MEV) do aço rápido M2 temperado em óleo a 1100°C e revenido duplamente a 550°C .....</b>	<b>55</b>
<b>Figura 44 - Imagem (MO) do aço rápido M2 temperado em óleo a 1100°C e revenido duplamente a 575°C .....</b>	<b>56</b>
<b>Figura 45 - Imagem (MEV) do aço rápido M2 temperado em óleo a 1100°C e revenido duplamente a 575°C .....</b>	<b>56</b>
<b>Figura 46 - Imagem (MO) do aço rápido M2 temperado em óleo a 1100°C e revenido duplamente a 600°C .....</b>	<b>57</b>
<b>Figura 47 - Imagem (MEV) do aço rápido M2 temperado em óleo a 1100°C e revenido duplamente a 600°C .....</b>	<b>57</b>
<b>Figura 48 - Difratoograma do aço rápido M2 temperado em óleo a 1100°C e sem tratamento de revenimento .....</b>	<b>58</b>
<b>Figura 49 - Difratoograma do aço rápido M2 temperado em óleo a 1100°C e revenido uma vez em diversas temperaturas.....</b>	<b>59</b>
<b>Figura 50 - Difratoograma do aço rápido M2 temperado em óleo a 1100°C e revenido duas vezes em diversas temperaturas .....</b>	<b>60</b>

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação AISI para aços ferramenta.....	15
Tabela 2 - Principais efeitos dos elementos de liga nos aços ferramenta.....	17
Tabela 3 - Morfologia e localização de carbonetos nos aços rápidos.....	20
Tabela 4 - Composições químicas e principais aplicações dos aços rápidos à base de tungstênio (tipo T) .....	21
Tabela 5 - Composições químicas e principais aplicações dos aços rápidos à base de molibdênio (tipo M).....	22
Tabela 6 - Efeitos de elementos presentes nos aços rápidos em teores baixos ou residuais.....	23
Tabela 7 - Parâmetros indicativos das faixas usuais de processamento dos aços rápidos. O fabricante do aço deve ser consultado para definir os detalhes do tratamento. ....	23
Tabela 8 - Condições de têmpera e características gerais .....	28
Tabela 9 - Estágios do revenimento do aço rápido .....	31
Tabela 10 - Composição química do aço AISI M2 informada pelo fornecedor. ..	32
Tabela 11 - Parâmetros de Tratamento Empregado .....	33
Tabela 12 - Valores de dureza Rockwell C para os corpos de prova temperados a 1100°C e revenido em diversas temperaturas .....	40
Tabela 13 - Valores de dureza Rockwell C para os corpos de prova temperados a 1100°C e revenido duplamente em diversas temperaturas .....	42

## RESUMO

Os aços rápidos são amplamente utilizados em condições nas quais exigem elevada dureza. Neste trabalho foram avaliados os efeitos da temperatura de revenimento e o número de revenimento aplicado no aço AISI M2 para atingir elevada dureza. Para os tratamentos térmicos, todas as amostras foram temperadas a 1100°C e posteriormente em metade delas foram realizados revenimento em seis temperaturas distintas e na outra metade foram realizados duplo revenimento nas mesmas temperaturas escolhidas na condição anterior, de modo que diversas condições pudessem ser estudadas. A dureza foi obtida por ensaios de dureza Rockwell C. As transformações microestruturais após os tratamentos térmicos foram analisadas por meio de microscopia óptica, microscopia eletrônica de varredura e difratometria de raios-x. Os ensaios de dureza realizados indicaram que o aumento da temperatura de revenimento propiciou a ocorrência do fenômeno de endurecimento secundário em ambas as condições de tratamento, como era esperado para esse tipo de aço rápido. Nas fotomicrografias foi observada a presença de uma matriz martensítica e carbonetos, os quais puderam ser identificados utilizando-se padrões de picos característicos encontrados na literatura. Porém, as imagens obtidas não foram capazes de verificar a presença de austenita retida, no entanto, a difratometria de raios-x revelou a presença dessa.

Palavras-chave: Aço rápido AISI M2. Revenimento. Endurecimento Secundário.

## ABSTRACT

The high speed steels are broadly applied in condition, that they require high hardness. This study evaluated the effects of tempering temperature and the number of tempering realized on steel AISI M2 to reach high hardness. All samples were quenched by 1100°C and posteriorly half of them were tempering at six different temperatures and the other half of them were realized double tempering at the same temperatures choose before, so that various condition could be studied. The hardness was obtained by Rockwell C hardness tests. The microstructural transformations after heat treatment were analyzed through optical microscopy, scanning electron microscopy and X-ray diffraction. The performed hardness tests indicated that the temperature increasing of tempering afforded the occurrence of the secondary hardening phenomenon, in both heat treatment conditions, as expected for this type of high speed steel. In the photomicrographs were observed the presence of a martensitic matrix and carbides, which could be identified using patterns of characteristic peaks found in the literature. Although, the images obtained, it was not possible to verify the presence of retained austenite, however, the X-ray diffraction showed its presence.

Key words: High speed steel AISI M2. Tempering. Secondary Hardening.

## SUMÁRIO

<b>1.</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>12</b>
<b>2.</b>	<b>OBJETIVOS</b> .....	<b>14</b>
<b>2.1.</b>	<b>Objetivo geral</b> .....	<b>14</b>
<b>2.2.</b>	<b>Objetivos Específicos</b> .....	<b>14</b>
<b>3.</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>15</b>
<b>3.1.</b>	<b>Aços Ferramenta</b> .....	<b>15</b>
<b>3.2.</b>	<b>Aços Rápido</b> .....	<b>19</b>
<b>3.3.</b>	<b>Têmpera e Revenimento</b> .....	<b>25</b>
<b>4.</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>32</b>
<b>4.1.</b>	<b>Materiais</b> .....	<b>32</b>
<b>4.2.</b>	<b>Corpos de Prova</b> .....	<b>32</b>
<b>4.3.</b>	<b>Tratamentos Térmicos</b> .....	<b>32</b>
<b>4.4.</b>	<b>Ensaio Mecânicos</b> .....	<b>34</b>
<b>4.5.</b>	<b>Caracterização Microestrutural</b> .....	<b>35</b>
<b>5.</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>40</b>
<b>5.1.</b>	<b>Análise de Dureza do Aço AISI M2 após Tratamento Térmico</b> .....	<b>40</b>
<b>5.2.</b>	<b>Análise da Microestrutura do Aço AISI M2 após Tratamento Térmico</b> .....	<b>43</b>
<b>5.3.</b>	<b>Análise Qualitativa das Fases Presentes no Aço AISI M2 após Tratamento Térmico</b> ..	<b>57</b>
<b>6.</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	<b>61</b>
<b>7.</b>	<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>62</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Há cerca de 1200 a.C. produtos contendo ferro em sua composição já eram usados pelo homem. E nos últimos dois séculos ligas à base de ferro encontram-se em um lugar de destaque entre os materiais industriais. Essas ligas são divididas em duas famílias principais: o aço e o ferro fundido. Os aços são ligas à base de ferro e apresentam ampla aplicabilidade (COLPAERT, 2008).

De acordo com Silva e Mei (2010), os aços podem ser classificados de diferentes maneiras, sendo que as classificações mais usuais são baseadas nas características desse material, tais como propriedades mecânicas e composição química, e na utilização do mesmo, como aço para ferramenta ou construção mecânica.

“Os aços ferramenta são aplicados no trabalho e conformação de materiais básicos, como metais, plásticos e madeira para a obtenção de formas desejadas” (COUTINHO, 1992 p.235).

“Os aços para ferramenta e matrizes são classificados em diversos grupos, conforme suas características e aplicações. A maioria desses aços possui elementos de liga e exige cuidados especiais no seu tratamento térmico. As temperaturas empregadas nessas operações abrangem a mais larga faixa dentre todos os produtos metalúrgicos, desde temperaturas superiores a 1250°C, no aquecimento até, eventualmente, temperaturas abaixo de zero no resfriamento” (CHIAVERINI, 1987 p.175).

Neste presente trabalho será abordado um subgrupo de aço ferramenta, os aços rápidos. Assim como o nome diz, eles são os materiais ferrosos utilizados na confecção do ferramental que serve à indústria em fabricação manual ou em máquinas ferramentas. Tratam-se de aços nos quais são exigidas a mais alta qualidade, obtida geralmente em fornos elétricos, através de técnicas apuradas e sob rigoroso controle de qualidade (RAUTER, 1974).

Os aços rápidos pertencem ao grupo de aço ferramenta denominado assim devido à sua capacidade de usinar metais com velocidades de corte maiores do que as obtidas com aços ferramenta ao carbono ou de baixa e média liga. Eles são subdivididos em Classe M e T,

ambas são aços de alta liga contendo cobalto, cromo, molibdênio, tungstênio e vanádio (SARTORE, 2009).

O subgrupo M classificado de acordo com a classificação da *American Iron And Steel Institute* (AISI), normalmente é aplicado em ferramentas de corte, nas quais é necessário manter a dureza em elevadas temperaturas, resistência ao desgaste e abrasão, estabilidade dimensional e boa tenacidade (SILVA e MEI, 2010).

Neste trabalho, além de abordar tal grupo de aços ferramenta, faz-se ainda a relação dos tratamentos térmicos realizados nos mesmos com a microestrutura e sua dureza, a partir do ensaio de Dureza Rockwell C.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. Objetivo geral**

O objetivo do presente trabalho foi analisar o efeito da realização de duplo revenimento em amostras do aço rápido AISI M2 temperadas em óleo na dureza e na microestrutura.

### **2.2. Objetivos Específicos**

- a) Avaliar o efeito da temperatura de revenimento na microestrutura e na dureza do material previamente temperado;
  
- b) Investigar a influência da realização de revenimento em duas etapas seguidas na microestrutura e na dureza do material previamente temperado.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1. Aços Ferramenta

Aço ferramenta é o termo reservado para aços de qualidade especial destinados a operações de corte ou de conformação. Eles são aços carbono ou aços liga que podem ser temperados e revenidos (COUTINHO, 1992). “Estas são as operações de tratamento térmico mais importantes nos aços para ferramenta e matrizes” (CHIAVERINI, 1987, p.178). Tais operações serão detalhadas no capítulo 3.3 desse trabalho.

Conforme Coutinho (1992), o *American Iron And Steel Institute* (AISI) possui a classificação dos aços ferramenta mais utilizada, tendo como critérios para agrupamento dos aços as aplicações, as composições químicas, os meios de resfriamento para têmpera e ainda certas propriedades características. Com o uso desses critérios os aços foram agrupados em sete grandes grupos como indicado na tabela 1.

**Tabela 1 - Classificação AISI para aços ferramenta**

W – Aços temperáveis em água ( <i>Water</i> )
S – Aços resistentes ao choque ( <i>Shock</i> )
Aços para fins especiais
L – Tipo baixa liga ( <i>Low alloy</i> )
F – Tipo carbono- tungstênio
P – Aços para moldes
Aços para trabalho a frio
O – Aços temperáveis em óleo ( <i>Oil</i> )
A – Aços média liga, temperáveis ao ar
D – Aço alto carbono, alto cromo
Aços para Trabalho a quente ( <i>Hot working</i> )
H1 – H19 – Ao cromo
H20 – H39 – Ao tungstênio
Aços rápidos
T – Ao tungstênio
M – Ao molibdênio

Fonte: SILVA E MEI, 2010.

Segundo Silva e Mei (2010), esses aços devem possuir características gerais que possibilitem o uso mediante as mais rigorosas solicitações, que por sua vez podem afetar diretamente seu desempenho. As principais características são:

**Homogeneidade de composição química e microestrutura:** A composição química homogênea e microestrutura uniforme estão diretamente ligadas ao processo de fabricação empregado. A fim de evitar ou reduzir a segregação são aplicados os processos de refusão, o qual seria o controle da entrada e saída de calor, capaz de realizar a solidificação progressiva dos lingotes, ou conformação a quente, devido a temperatura aplicada favorecer a difusão, ou ainda o processo de fabricação por metalurgia do pó, garantindo assim a homogeneidade.

**Limpeza (ou limpidez) interna:** Na produção de aços por meios convencionais e até mesmo por metalurgia do pó, as inclusões não metálicas são inevitáveis. E essas são responsáveis por influenciar na alteração das propriedades do material como ductilidade, tenacidade, resistência a fadiga e também no acabamento superficial.

**Tratamento térmico:** Embora não seja comum, alguns aços são fornecidos já tratados termicamente. Na maioria dos casos o fabricante de aço é responsável pela composição química, homogeneidade e limpeza interna requerida, e o tratamento térmico seria a etapa essencial para melhorar as propriedades do material. O tratamento térmico incorreto pode ser responsável pela causa de falhas precoce na ferramenta. Nos aços ferramenta, o tratamento térmico é um processo crítico devido as variações pequenas de parâmetros resultarem em diferentes microestruturas e, conseqüentemente desempenho inadequado.

A seleção do aço deve ser feita com a análise dos requisitos exigidos pela ferramenta, peça ou componente a ser produzido. As propriedades apresentadas pelos materiais disponíveis devem ser compatíveis com as necessárias para a aplicação. Algumas dessas propriedades são a resistência ao amolecimento pelo calor, indeformabilidade na têmpera, resistência a choques mecânicos, resistência a choques térmicos, resistência à abrasão, maior ou menor profundidade de têmpera, usinabilidade, dentre outras (RAUTER, 1974).

De acordo com Coutinho (1992), alguns elementos de liga são adicionados com intuito de melhorar as propriedades dos aços, sendo os principais o manganês, cromo, silício,

tungstênio, vanádio, molibdênio e cobalto. Na tabela 2 pode ser observada a relação entre o elemento de liga e seus principais efeitos na constituição do aço.

**Tabela 2 - Principais efeitos dos elementos de liga nos aços ferramenta**

<b>Elemento</b>	<b>Efeitos</b>
Manganês	Forte aumento da temperabilidade Tende a causar fragilidade no revenimento
Cromo	Aumento da temperabilidade Tende a promover crescimento do grão austenítico
Silício	Pequeno aumento da temperabilidade Resistência à oxidação em altas temperaturas
Tungstênio	Limita o crescimento do grão austenítico Retenção da dureza a quente
Vanádio	Limita o crescimento do grão austenítico Forma carboneto estável a altas temperaturas Aumenta a resistência ao revenimento Causa endurecimento secundário
Molibdênio	Aumenta a resistência ao revenimento Causa intenso endurecimento secundário
Cobalto	Retenção da dureza a quente Diminui a temperabilidade

Fonte: COUTINHO, 1992.

“As aplicações dos aços ferramentas são extremamente variadas e da seleção correta do aço dependerá o desempenho da ferramenta” (SILVA e MEI, 2010, p.398).

Os tipos principais de aços ferramenta estão apresentados abaixo de acordo com suas aplicações.

Aços para trabalho a quente: Os aços da série H são utilizados em temperaturas elevadas, devido as suas características como resistência à deformação na temperatura de trabalho, resistência à choque mecânico e térmico, resistência ao desgaste sob elevada temperatura, resistência à formação de trinca e à deformação devido à tratamento térmico. Esses aços são usualmente aplicados em extrusão a quente, forjamento a quente e fundição sob

pressão. Para atingir tais propriedades essa série apresenta elementos de liga como Cromo, Tungstênio, Molibdênio em diferentes proporções de acordo com a aplicação. Eles ainda podem passar por processos como Forjamento, Normalização, Recozimento, Têmpera e Revenimento buscando a melhoria das características necessárias (COUTINHO, 1992).

Aços para fins especiais: São os aços da série L, os quais foram projetados a princípio para aplicação em machos e tarraxas, porém, também é aplicado em peças de máquinas que precisam de resistência ao desgaste, calibres e contracalibre. Essa classe apresenta elementos como Cromo, Manganês, Vanádio, Molibdênio ou Níquel, em baixo teor. Essas composições fornecem ao aço características como elevada tenacidade e boa resistência (RAUTER, 1974). Assim como a série L, os aços da série F também são considerados para fins especiais, pois são utilizados em aplicações como trefilas e ferramentas para usinagem de rolos, devido à sua alta resistência ao desgaste e a manutenção de gume cortante (SILVA e MEI, 2010).

Considerado por alguns autores como outro grupo de aplicação, pode-se analisar a série P (Aços para moldes) também como aços para fins especiais. Essa classe deve apresentar características como boa estabilidade química e dimensional em faixas de temperatura de 175°C- 200°C, resistir a pressões elevadas e a esforços abrasivos dos pós moldagem, além de apresentar superfície dura e núcleo tenaz, capazes de resistir a choques mecânicos ocasionados pelos ciclos de compressão. O alto grau de polimento também é levado em consideração na aplicação da série, que possui elementos como Cromo e Níquel, além do baixo teor de carbono, a fim de atingir as características desejadas (COUTINHO, 1992).

Aços para trabalho a frio: Esse grupo de aços também conhecido como aços indeformáveis, apresentam menor tendência a distorção e trinca na têmpera. Além disso, esses aços devem apresentar alta resistência ao desgaste e boa tenacidade, para atender suas aplicabilidades (COUTINHO, 1992).

Segundo Silva e Mei (2010), os aços para trabalho a frio são muito utilizadas em operações de corte, conformação (embutimento, estiramento) e rebarbação a temperaturas próximas à temperatura ambiente. Para essas funções é interessante obter aços com elevada dureza após têmpera e revenimento, sendo assim, eliminar ou reduzir a usinagem das ferramentas após esses tratamentos térmicos é considerado conveniente. Durante os processos, a

variação dimensional da microestrutura final é muito importante para definir as propriedades do aço, sendo realizado com cuidado.

Aços rápidos: Por se tratar do tema desse trabalho, esse grupo de aços é considerado de extrema importância, sendo o capítulo 3.2 exclusivo para o mesmo.

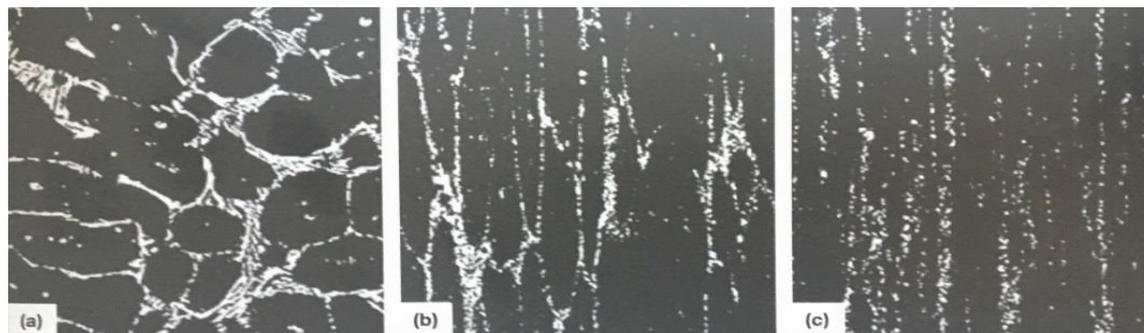
### **3.2. Aços Rápidos**

Essa subclasse dos aços ferramenta é aplicada praticamente na fabricação de ferramentas de corte, capazes de atuar em altas velocidades e avanços pesados. A propriedade que os difere de outras subclasses nessa aplicação é a capacidade de manter a elevada dureza a altas temperaturas, mesmo possuindo diversas composições químicas (SILVA e MEI, 2010; COUTINHO, 1992).

De acordo com Coutinho (1992), os primeiros aços rápidos foram desenvolvidos no final do século XIX. Eram ligas a base de tungstênio, as quais permaneceram como o padrão e mais usadas até a descoberta de depósitos de molibdênio no Colorado (EUA), quando iniciaram as pesquisas e desenvolvimento dos aços a base de molibdênio.

Ambas as ligas são amplamente usadas na fabricação de ferramentas de usinagem e conformação, como em fresadoras, brocas helicoidais, serras para corte rápido, machos, taraxas, punção, matrizes de estampagem a quente e matrizes de corte por cisalhamento (RAUTER, 1974). Para atingir boa funcionalidade, essas ferramentas devem conter além da alta dureza, estabilidade dimensional, resistência ao desgaste e abrasão, e boa tenacidade (SILVA e MEI, 2010). Essas principais propriedades são adquiridas devido à combinação dos carbonetos primários e secundários juntamente com a matriz martensítica presentes nesse grupo. A fim de tornar a distribuição dos carbonetos mais favorável ao aço é importante a função do trabalho a quente após o lingotamento (laminação a quente ou forjamento), como pode-se observar na Figura 1 (SILVA e MEI, 2010).

Os carbonetos  $MC$ ,  $M_2C$ ,  $M_6C$ ,  $M_7C_3$  e  $M_{23}C_6$  (M representa os elementos de liga), presentes no aço rápido podem ser observados quanto a sua morfologia, composição química e localização conforme a apresentação na tabela 3 (VITRY et al., 2012).

**Figura 1 - Efeito do trabalho a quente sobre a distribuição de carbonetos no aço rápido.**

(a) Material em fusão, com colônias de eutético contendo carbonetos. (b) Carbonetos fragmentados e distribuídos na matriz, após deformação a quente. (c) os carbonetos são melhor distribuídos com o aumento da deformação.

Fonte: COLPAERT, 2008, p.353.

**Tabela 3 - Morfologia e localização de carbonetos nos aços rápido**

Carboneto	Morfologia	Composição Química	Localização
MC		Globular; Espesso; Isolado ou associado;	Centro ou contornos de grãos (em associação com $M_7C_3$ );
$M_2C$		Acicular ou lamelar; Associado;	Áreas interdendríticas;
$M_6C$		Lamelas finas; Associado;	Áreas de forte resfriamento (primeiros 5 mm a partir da superfície);
$M_7C_3$		Lamelas grossas; Associado;	Áreas interdendríticas;
$M_{23}C_6$		Pequenos glóbulos; Isolados.	Homogeneamente e distribuídos na matriz.

Fonte: VITRY et al., 2012(adaptada).

O aço rápido é dividido em duas categorias, os aços T (à base de tungstênio) e os aços M (à base de molibdênio). Essas ligas se diferem pela composição e aplicações típicas, como apresentado nas tabelas 4 e 5.

**Tabela 4 - Composições químicas e principais aplicações dos aços rápidos à base de tungstênio (tipo T)**

Tipo AISI	Composição, %					Exemplos de Aplicações
	C	W	Cr	V	Outros	
T1	0,75	18,00	4,00	1,00	-	Brocas, tarraças, alargadores, ferramentas de torno, fresas, mandris, matrizes para brunir, para extrusão a frio, fresa de topo, cortadeiras, cossinetes;
T2	0,85	18,00	4,00	2,00	1,00 Mo <sup>α</sup>	Ferramentas de torno e de plaina, fresas, mandris, alargadores, cossinetes;
T4	0,75	18,00	4,00	1,00	5,0 Co 0,70 Mo	Ferramentas de torno e de plaina, brocas, ferramentas de perfurar, mandris fresas;
T5	0,80	18,00	4,50	2,00	8,0 Co 1,00 Mo	Ferramentas de torno e de plaina, ferramentas para corte com disco abrasivos;

<sup>α</sup> máximo

Fonte: COUTINHO, 1992.

A presença de diversos teores de elementos de liga tem impacto direto nas propriedades dos aços, justificando a utilização de cada aço em diversos tipos de ferramentas e funções. Até mesmo elementos em baixas concentrações tem efeito sobre as propriedades do material como pode ser observado na tabela 6.

Além dos elementos de liga, o processo de obtenção de ferramentas de aço rápido também influencia diretamente as propriedades do material, como exemplo, pode-se observar na tabela 7, os parâmetros indicados para os processos do aço rápido AISI M2 (SILVA E

MEI, 2010). O forjamento por exemplo deve ser realizado em temperaturas elevadas e controladas e o resfriamento deve ser lento e ao abrigo de correntes aéreas ou umidade, a fim de evitar trincas. Após o forjamento é obrigatório recozer o material (RAUTER, 1974).

**Tabela 5 - Composições químicas e principais aplicações dos aços rápidos à base de molibdênio (tipo M)**

Tipo AISI	Composição, %					Exemplos de Aplicações
	C	W	Cr	V	Outros	
M1	0,85	9,00	4,00	1,20	1,70 W	Brocas, tarraxas, fresas, alargadores, punções, ferramentas de torno e plaina, mandris, tupias, ferramentas para madeira;
M2	0,85-1,00	5,00	4,00	2,00	6,00 W	Brocas, tarraxas, fresas, alargadores, serras, ferramentas de torno e plaina, mandris, ferramentas para perfurar;
M4	1,30	5,50	4,00	4,00	6,00 W	Mandris, alargadores, fresas, ferramentas de torno e plaina, ferramentas para recortar, punções para materiais abrasivos, matrizes para forjamento rotatório;
M7	1,00	8,70	3,75	2,00	1,75 W	Brocas, tarraxas, fresas, alargadores, tupias, serras, ferramentas de torno e plaina, ferramentas para madeira, punções;
M10	0,85-1,00	8,00	4,00	2,00	-	Brocas, tarraxas, alargadores, fresas, ferramentas de torno e plaina, ferramentas para madeira, tupias, serras, punções;

Fonte: COUTINHO, 1992.

**Tabela 6 - Efeitos de elementos presentes nos aços rápidos em teores baixos ou residuais**

<b>Elemento</b>	<b>Efeitos</b>
Silício e Manganês	Teores em torno de 0,35%. Teores mais altos favorecem trincamento durante tratamento térmico.
Níquel	Limitado a 1% ou 2%. Acima de 2%, tende a estabilizar a austenita. Favorece a descarbonetação.
Alumínio	Adicionado até 1% para substituir W e Mo, mas há risco de formação de alumina.
Tântalo	Aumenta a dureza a quente. Acima de 6% torna o aço pouco temperável pela formação de carbonetos estáveis. Aumenta o endurecimento secundário e eleva para 650°C a temperatura do pico de dureza.
Nióbio	Aumenta o efeito de endurecimento secundário.
Titânio	Adicionado para refino de grão e melhoria da tenacidade.
Nitrogênio	Teor em torno de 0,035% para melhorar a dureza a quente e inibir o crescimento de grão austenítico.
Selênio	Adicionado para melhoria da usinabilidade.

Fonte: COUTINHO, 1992.

**Tabela 7 - Parâmetros indicativos das faixas usuais de processamento dos aços rápidos. O fabricante do aço deve ser consultado para definir os detalhes do tratamento.**

	Deformação a quente	Recozimento	Têmpera	Revenimento
M2	Início: 1120°C Final: 950°C mín	850/900°C Resfriamento lento	1180/1220°C Pré- aquecimento a 550°C e 850°C Resfriamento em óleo	550/600°C (dureza e tenacidade)

Fonte: SILVA; MEI, 2010.

Segundo Silva e Mei (2010), a usinagem é utilizada na fabricação de ferramentas convencionais de aço rápido e seguida de tratamento térmico, nesse caso a microestrutura presente na matriz é ferrítica, facilitando a remoção de material, oriunda do recozimento

anterior a usinagem. Já em caso de materiais temperado e revenido as ferramentas são usinadas por retífica.

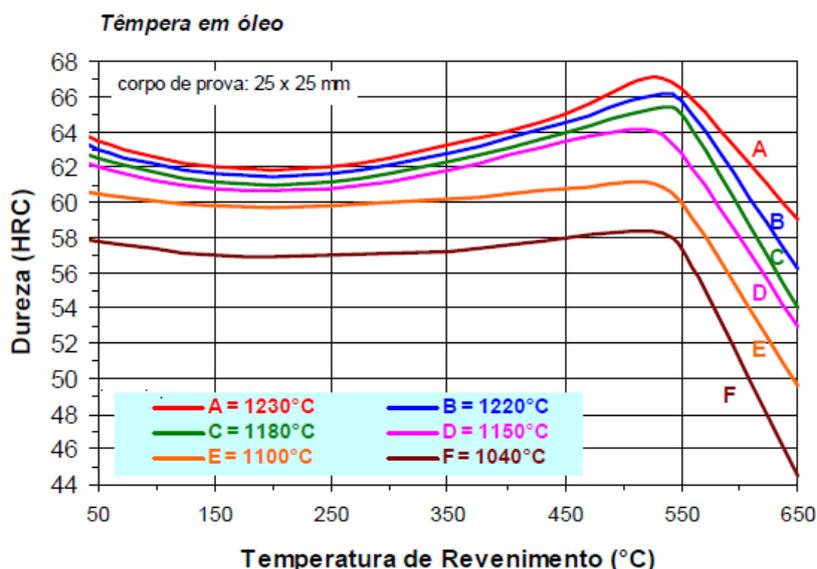
Nesse trabalho em específico foi utilizado um aço rápido ao molibdênio (AISI M2), usualmente aplicado em fresas, brochas, punções, ferramentas de torno, serras de fita e etc. O processo de fabricação das ferramentas de aço M2 é semelhante aos demais aços rápidos, se diferenciando pelo estado recozido antes do forjamento. O aquecimento para o forjamento é lento e uniforme até 820-870°C, e acelera até a temperatura de forjamento, entre 1070-1100°C. O resfriamento de peças pequenas é realizado por meio de imersão em material isolante em peças grandes é aconselhado o uso de um forno auxiliar. Essa classe de aço não pode ser normalizada (RAUTER, 1974).

O recozimento é necessário para todos aços rápidos, mesmo para o aço M2, cuja resistência a descarbonetação é uma das maiores dentre a classe. As alternativas de recozimento seriam o recozimento pleno, com austenitização seguida de resfriamento lento (20°C/h) ou recozimento subcrítico ou isotérmico, entre 740 e 780°C, promovendo menor tamanho de grão austenítico, porém maior dureza (SILVA e MEI, 2010).

O aço M2 tem uma ampla faixa de têmpera devido a sua vasta variedade de aplicação, sendo o limite superior de temperatura a máxima dureza, e o limite inferior a máxima tenacidade. O resfriamento pode ser em óleo, ao ar ou por martêmpera. As variações de temperatura da têmpera e taxa de resfriamento são analisadas devido a diversas dimensões de peças e propriedades desejadas. Na figura 2 é exemplificado como as faixas de temperaturas de austenitização e revenimento influenciam na dureza do material (RAUTER, 1974; SILVA e MEI, 2010).

Logo após a têmpera, a peça já pode ser revenida, a fim de eliminar a austenita retida e intensificar o fenômeno de endurecimento secundário, em alguns casos é aconselhado realizar múltiplos revenimentos (COUTINHO, 1992).

**Figura 2 - Curva de revenimento do aço M2. Os parâmetros de austenitização têm grande influência sobre as propriedades no revenido.**



Fonte: Villares Metal, 2017.

No próximo capítulo será detalhado os conceitos de Têmpera e Revenimento, os quais foram utilizados para variar as propriedades e microestruturas do aço trabalhado.

### 3.3. Têmpera e Revenimento

Os tratamentos térmicos são operações de aquecimento e resfriamento controlados que buscam alterar as fases dos aços e ligas especiais, e assim, afetar as características dos mesmos. Tais tratamentos englobam amplas faixas de temperaturas, variando desde o tratamento subzero (temperaturas abaixo de 0°C) para estabilização, até a austenização, que para alguns tipos de aços rápidos pode atingir 1280°C. Outro fator determinante nos tratamentos térmicos são as diversas taxas de resfriamento aplicadas (SILVA E MEI, 2010). Dentre os tratamentos térmicos existentes, nesse trabalho foram executados os processamentos de têmpera e revenimento com parâmetros distintos a fim de obter diferentes valores de dureza no aço rápido.

#### Têmpera:

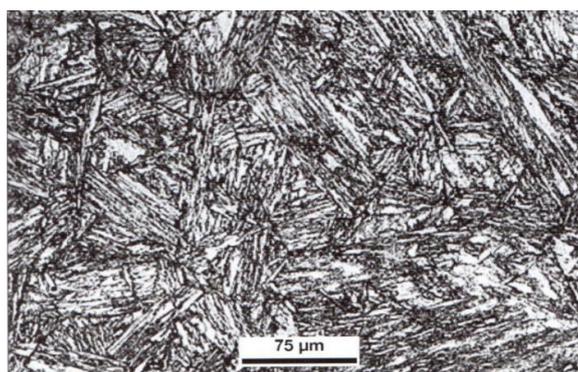
“Este é o tratamento térmico mais importante, porque é por intermédio dele, acompanhado pelo revenido, que se obtém as estruturas e as propriedades que permitem o emprego do aço em peças de maior responsabilidades e em

aplicações mais críticas, como as que se encontram na indústria mecânica, na indústria de transporte e em outros segmentos da indústria” (CHIAVERINI, 1987).

De acordo com Silva e Mei (2010), a têmpera consiste no aquecimento até a austenitização (parcial ou total) e então o resfriamento do aço a uma velocidade suficientemente rápida para evitar as transformações perlíticas e bainíticas, obtendo assim a estrutura metaestável martensítica, a qual é apresentada na figura 3.

“A martensita transfere sua elevada dureza e grande fragilidade ao aço temperado, cuja resistência à tração também aumenta consideravelmente” (CHIAVERINI, 1987).

**Figura 3 – Martensita em aço baixa liga ASTM A533Cl.1 (20MnMoNi55) com C = 0,2%, Mn = 1,38%, Si = 0,25%, Ni = 0,83%, Mo = 0,49% resfriado continuamente a 50 °C/s Início da transformação: 415 °C. Ataque nital 2%.**



Fonte: COLPAERT, 2008, p.193.

Segundo Rauter (1974), é recomendado o pré-aquecimento em casos nos quais a peça possua desenhos complexos, em que a temperatura de têmpera seja superior a 900°C e em casos nos quais ocorreu usinagem intensa ou deformação plástica a frio sem subsequente recozimento para alívio de tensões. Esse pré-aquecimento é utilizado para diminuir riscos de trincas e empenos ocorridos por um choque térmico, e reduzir também o tempo da peça em altas temperaturas de têmpera, diminuindo a oxidação excessiva, carbonetação indesejada, ou descarbonetação.

A temperatura de austenitização varia de acordo com o aço, sendo informadas com faixas de valores, delimitadas por um máximo que é utilizado em peças grandes e um mínimo para peças menores. A temperatura e o tempo, no qual a peça é aquecida devem ser bem

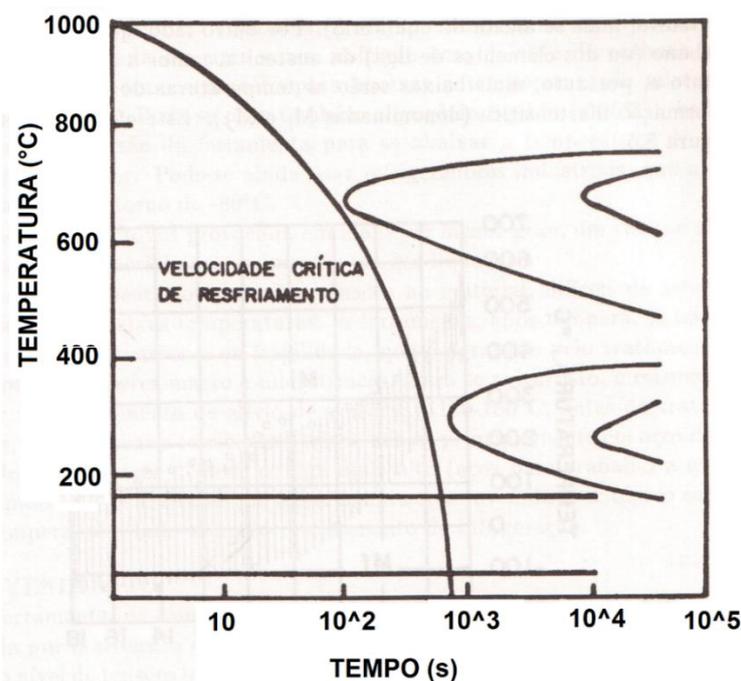
controlados, a fim de evitar crescimento exagerado dos grãos, decarbonetação, oxidação exagerada, trincas, empenos entre outros inconvenientes (RAUTER, 1974).

A taxa de resfriamento deve ser superior a taxa de resfriamento crítico, curva de resfriamento que tangencia o cotovelo ou joelho da curva de início de transformação da austenita em constituintes que dependem da difusão. Essa taxa de resfriamento pode ser observada no gráfico de curva TTT apresentado pela figura 4 (CHIAVERINI, 1987).

“Os meios de resfriamento comumente usados na têmpera dos aços ferramenta incluem água, salmora, óleos de tempera, sais fundidos, ar soprado e ar parado ou ambiente. Naturalmente a escolha do meio adequado a cada caso irá variar com a composição química do aço e com a geometria da peça, sendo a regra geral escolher-se sempre o meio de resfriamento menos drástico possível” (RAUTER, 1974).

Os três fatores principais para escolha do meio de resfriamento são dureza final desejada, forma e dimensões das peças e capacidade de endurecimento do aço (CHIAVERINI, 1987).

**Figura 4 - Diagrama TTT (esquemático) de um aço-ferramenta, indicando-se a curva de resfriamento correspondente à velocidade crítica de resfriamento.**



Fonte: COUTINHO, 1992, p.247.

Na tabela 8 são apresentadas as condições de têmpera recomendadas aos aços da classe M, de acordo com Chiaverini (1987).

**Tabela 8 - Condições de têmpera e características gerais**

Tipo		Têmpera	
Aço	Classificação AISI	Temperatura (°C)	Meio
Mo	M 1	1177 a 1218	Óleo, ar e banho de sal
	M 2	1204 a 1245	Óleo, ar e banho de sal
	M 3	1204 a 1245	Óleo, ar e banho de sal
	M 4	1204 a 1232	Óleo, ar e banho de sal
	M 10	1177 a 1218	Óleo, ar e banho de sal

Fonte: CHIAVERINI, 1987.

### **Revenimento:**

“O revenimento é o tratamento que se segue à têmpera, com a finalidade de provocar um melhor balanço entre dureza e resistência a esforços bruscos do material temperado, segundo as necessidades de cada caso” (RAUTER, 1974).

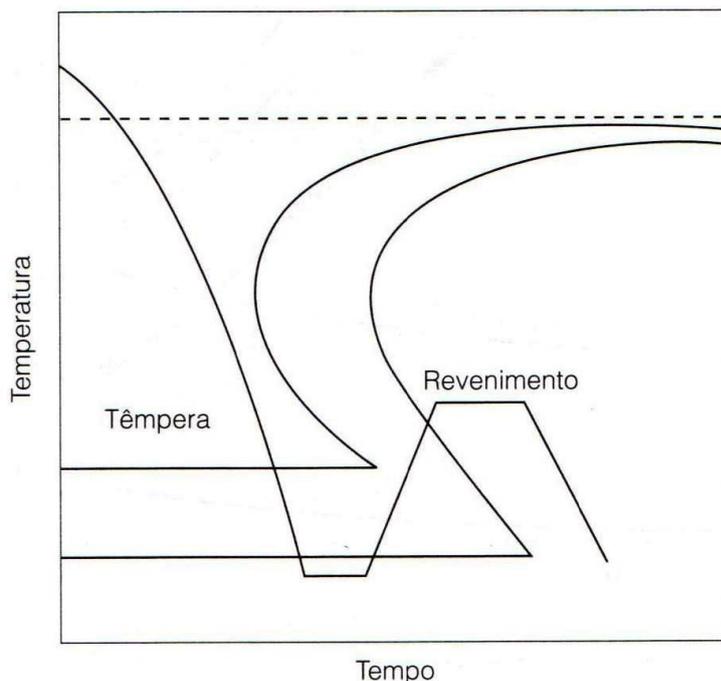
O ciclo ocorrido pelo aço durante a têmpera e o revenimento subsequente pode ser observado na figura 5.

A martensita gerada na têmpera é extremamente dura e frágil, assim peças nessas condições de alto tensionamento interno correm grande risco de trincar. Dessa forma, o revenimento trata-se de aquecer a peça abaixo da temperatura de austenitização (linha inferior de transformação A1 do diagrama de fases) por determinado tempo, a fim de obter as propriedades desejadas (SILVA E MEI, 2010). Essas propriedades são atingidas conforme ocorrem as transformações da martensita em outras estruturas, e essas transformações dependem diretamente da temperatura na qual o aço é revenido (CHIAVERINI, 1987).

Por se tratar de uma estrutura metaestável, a martensita, quando aquecida, busca o equilíbrio na transformação em outras fases. Assim a energia absorvida é responsável pela

difusão dos átomos, logo o carbono presente nos interstícios da austenita podem se precipitar como carbonetos e com isso tende a diminuir a dureza do material, como apresentado na figura 6. O revenimento também é responsável por realizar alívio de tensões (SILVA E MEI, 2010).

**Figura 5 - Ciclo de têmpera + revenimento**



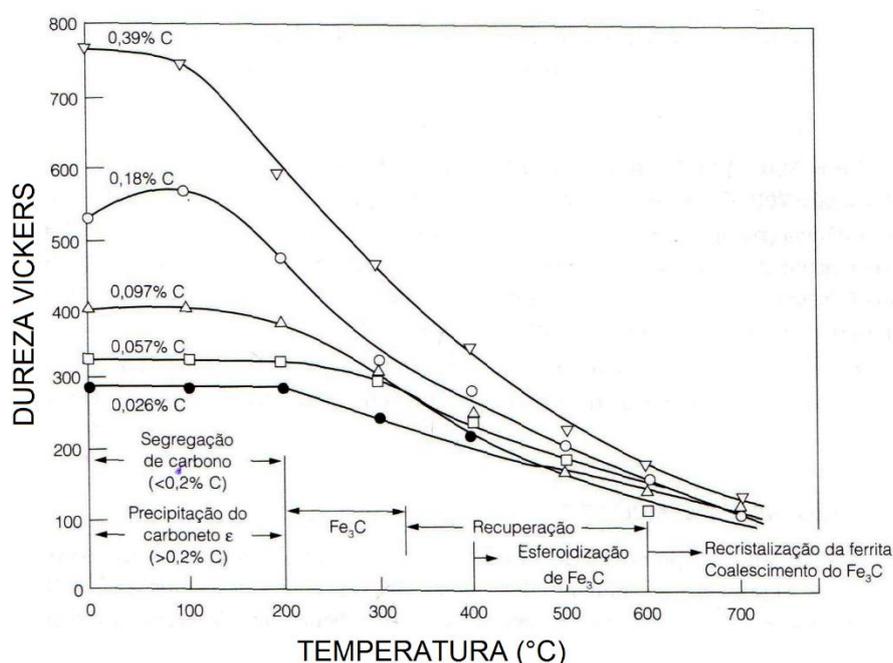
Fonte: SILVA E MEI, 2010, p. 121.

Conforme Chiaverini (1987), as modificações podem se separar em 4 faixas de temperaturas, sendo elas apresentadas abaixo:

- Entre 100° e 200°C – Não há modificações estruturais significativas, começa a ocorrer alívio de tensões e pode ocorrer precipitação do carboneto de ferro, conhecido como épsilon.
- Entre 200° e 260°C – Apesar de não apresentar modificações estruturais notáveis, a dureza do aço começa a diminuir.
- Entre 260° e 360°C – Início da precipitação de carbonetos finos e a dureza do aço continua a diminuir.

- Entre 360° e 730°C – A medida que se eleva a temperatura as partículas de cementitas precipitadas em uma matriz ferrítica se tornam mais grossas, fase conhecida como sorbita, e com isso a dureza diminui. Se a temperatura de revenimento chegar próxima a linha A1, as cementitas precipitadas tendem a assumir forma esferoidal, sendo essa fase conhecida como esferoidita, tendo baixo valor de dureza e melhor tenacidade, o que leva a uma boa característica de usinabilidade.

**Figura 6 – Dureza e transformações do revenimento em aços carbono, aquecidos por uma hora entre 100 e 700 °C.**



Fonte: SILVA; MEI, 2010, p. 125.

No caso dos aços ferramenta, a tendência é realizar mais de uma etapa de revenimento, devido à transformação da austenita retida em martensita durante o resfriamento no primeiro ciclo de revenimento. Essa transformação é responsável por aliviar a tensão da martensita, obtida na têmpera, presente no aço, a partir da precipitação de carbonetos. Após esse processo, deve ser realizado outro revenimento para aliviar as tensões da martensita gerada no primeiro revenimento e, se necessário, devem ser realizadas outras etapas de revenimento (SILVA; MEI, 2010).

Em específico para os aços rápido, o revenimento pode ser dividido em quatro estágios, conforme mostrado na tabela 9 (CHIAVERINI, 1987).

**Tabela 9 - Estágios do revenimento do aço rápido**

Estágio	Temperatura do revenido	Transformação microestrutural	Influência na dureza
1º	Até 400°C	Decomposição da martensita e aparecimento de cementite Fe <sub>3</sub> C.	Queda no valor de dureza.
2º	400°C – 565°C	Redissolução da cementita e precipitação de carbonetos de liga.	Acentuado endurecimento por precipitação.
3º	565°C – 650°C	Transformação da austenita retida e precipitação de carbonetos de liga.	-
4º	Acima de 650°C	Redissolução de carbonetos de liga e precipitação e coalescimento de outros carbonetos de liga.	Amaciamento do material, raramente encontrado comercialmente.

Fonte: CHIAVERINI, 1987 (adaptado).

## 4. MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1. Material

Nesse trabalho foi estudado o aço rápido AISI M2, adquirido no formato de barras com seção transversal quadrada com medidas de 15 x 15 mm. A composição química presente no aço foi informada pelo fabricante e está descrita na tabela 10.

**Tabela 10 - Composição química do aço AISI M2 informada pelo fornecedor.**

Carbono	Cromo	Molibdênio	Vanádio	Tungstênio
0,9%	4,1%	5,0%	1,9%	6,4%

Fonte: Próprio autor.

### 4.2. Corpos de Prova

A partir das barras adquiridas foram obtidos corpos de prova com medidas de 15 mm de largura, 15 mm de altura e 20 mm comprimento, antes do tratamento térmico. Os cortes foram realizados empregando a cortadora da marca AROTEC, modelo COR 80/2, disponível no Laboratório de Metalografia do Departamento de Engenharias de Materiais, conforme mostrado na Figura 7.

**Figura 7 - Equipamento de Corte.**



Fonte: Próprio autor.

### 4.3. Tratamentos Térmicos

Inicialmente, todos os corpos de prova foram temperados a 1100° C com 30min de

encharque e resfriados em óleo.

Foi separado um corpo de prova para ser analisado após a tempera e os doze restantes sofreram tratamento térmico de têmpera seguida de revenimento, sendo metade para o revenimento simples e a outra metade para o revenimento duplo, conforme os parâmetros definidos previamente e apresentados na tabela 11.

**Tabela 11 - Parâmetros de Tratamento Empregado**

Amostra	Tratamento		Tempo de	
	Térmico	Temperatura	Encharque	Resfriamento
A	Têmpera	1100°C	30 min	Óleo
B	Revenimento	475°C	1 hora	Ar
C	Revenimento	500°C	1 hora	Ar
D	Revenimento	525°C	1 hora	Ar
E	Revenimento	550°C	1 hora	Ar
F	Revenimento	575°C	1 hora	Ar
G	Revenimento	600°C	1 hora	Ar
H	Revenimento Duplo	475°C	1 hora	Ar
I	Revenimento Duplo	500°C	1 hora	Ar
J	Revenimento Duplo	525°C	1 hora	Ar
K	Revenimento Duplo	550°C	1 hora	Ar
L	Revenimento Duplo	575°C	1 hora	Ar
M	Revenimento Duplo	600°C	1 hora	Ar

Fonte: Próprio autor.

Os tratamentos térmicos citados ocorreram no Laboratório de Tratamento Térmico do Departamento de Engenharia de Materiais do CEFET-MG, e foi utilizado o forno elétrico com sistema de controle de temperaturas digital da marca Magnus, como mostrado na figura 8.

Após os tratamentos térmicos, as amostras foram cortadas ao meio com o auxílio da cortadora. As medidas de 15 x 15 x 10 mm, conforme mencionado acima, a fim de analisar o material sem a influência da decarbonetação presente na superfície das amostras, conforme apresentado na figura 9. Dessa forma, obteve-se duas amostras em cada

condição, utilizando uma para o ensaio mecânico e outra para caracterização microestrutural.

**Figura 8 – Forno Elétrico**



Fonte: Próprio autor.

**Figura 9 – Corpo de prova aço AISI M2**



Fonte: Próprio autor.

#### **4.4. Ensaio Mecânicos**

Nesse trabalho, a dureza foi o parâmetro utilizado para analisar o comportamento mecânico das amostras tratadas sob condições diversas. Dessa forma foi realizado o ensaio Rockwell C em todos os diferentes tipos de amostras obtidas, com uso do Durômetro da marca IGV, modelo RM401/A, localizado no Laboratório de Tratamentos Térmicos do Departamento de Engenharia de Materiais do CEFET-MG, mostrado na Figura 10.

Nesse ensaio foi aplicada uma pré-carga de 10 kgf e uma carga de 150 kgf durante a medição das amostras e o penetrador usado foi o cônico de diamante com um ângulo de 120°. Essa carga foi aplicada por 15 segundos e após esse tempo foi feita a leitura do valor da dureza por meio do relógio comparador acoplado ao equipamento. Cada condição de tratamento térmico foi analisada e foram conduzidas seis medidas de dureza com o intuito de obter um valor de dureza média.

**Figura 10 – Durômetro**

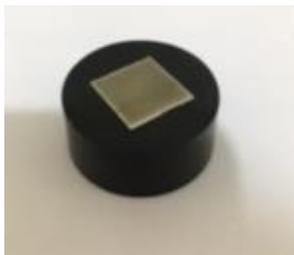


Fonte: Próprio autor.

#### **4.5. Caracterização Microestrutural**

Os corpos de prova cortados após tratamento térmico, conforme explicado acima, foram embutidos a quente em resina fenólica preta, conforme figura 11, empregando da Embutidora PRE-30Mi marca Arotec presente no Laboratório de Metalografia do Departamento de Engenharias de Materiais do CEFET-MG, como mostrado na figura 12.

Após o embutimento, a preparação metalográfica das amostras foi feita por meio do lixamento, polimento e ataque com reagente químico.

**Figura 11 – Corpo de Prova Embutido**

Fonte: Próprio autor.

**Figura 12 – Equipamento de Embutimento.**

Fonte: Próprio autor.

O lixamento das amostras ocorreu em lixadeiras da marca Arotec modelo Aropol 2V, utilizando lixas de granulometria #120, #240, #320, #400 e #600, nesta sequência, com água como fluido refrigerante e de limpeza entre as etapas. Posteriormente, as amostras foram polidas em politrizes da marca Panambra / Struers modelo DP-10, utilizando-se pasta de diamante de 9 $\mu$ m e 3 $\mu$ m como material abrasivo e álcool etílico para lubrificação. Na figura 13 são apresentados os equipamentos utilizados e presentes no Laboratório de Metalografia do Departamento de Engenharias de Materiais do CEFET-MG.

As amostras foram atacadas com o reagente Nital 5% (5 ml de ácido nítrico e 95 ml de álcool etílico), com objetivo de revelar as microestruturas no microscópio óptico e no microscópio eletrônico de varredura.

Foram adquiridas imagens de duas regiões de cada corpo de prova com ampliação de 200 e 400 vezes por meio de microscopia óptica realizada em um aparelho de marca Fortel com sistema de digitalização de dados Kontrol, modelo IM713, localizado no Laboratório de Metalografia do Departamento de Engenharia de Materiais do CEFET-MG, mostrado na figura 14.

**Figura 13 – Lixadeira e Politriz**



(a), (b) Politriz e (c) Lixadeira

Fonte: Próprio autor.

Para obter ampliações maiores foi utilizado o microscópio eletrônico de varredura, da marca Shimadzu modelo SSX-550, situado no Laboratório de Caracterização do Departamento de Engenharia de Materiais do CEFET-MG, mostrado na figura 15. Nesse caso também foram obtidas imagens de duas regiões de cada amostra com ampliações de 2000 e 4000 vezes, com uso de elétrons secundários.

Após obter as imagens, foi utilizada a técnica de difração de raios-x nos corpos de prova para determinar as fases presentes em cada amostra, a fim de analisar as fases nos diferentes parâmetros de tratamento térmico utilizado. Para realizar esse processo, os corpos de prova foram primeiramente decapados em ácido clorídrico concentrado por duas horas, na Capela de Exaustão de Gases BZ 150 situada no Laboratório de Metalografia do Departamento de Engenharia de Materiais do CEFET-MG, apresentada na figura 16. Esse procedimento foi realizado para retirar os efeitos de corte e/ou lixamento que poderiam

levar à transformação da austenita retida presente no material em martensita por deformação plástica.

**Figura 14 - Microscópio óptico**



Fonte: Próprio autor.

**Figura 15 – Microscópio Eletrônico de Varredura**



Fonte: Próprio autor.

Para identificação das fases presentes nos corpos de prova foi utilizado o difratômetro de raios-x, da marca Shimadzu, modelo XRD-7000, que encontra-se no Laboratório de Caracterização, no Departamento de Engenharia de Materiais do CEFET-MG, como mostrado na figura 17. O programa utilizado para gerar os difratogramas foi o OriginPRO 2016.

**Figura 16 – Capela de Exaustão de gases**



Fonte: Próprio autor.

**Figura 17 – Difratorômetro de raios-x**



Fonte: Próprio autor.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1. Análise de Dureza do Aço AISI M2 após Tratamento Térmico

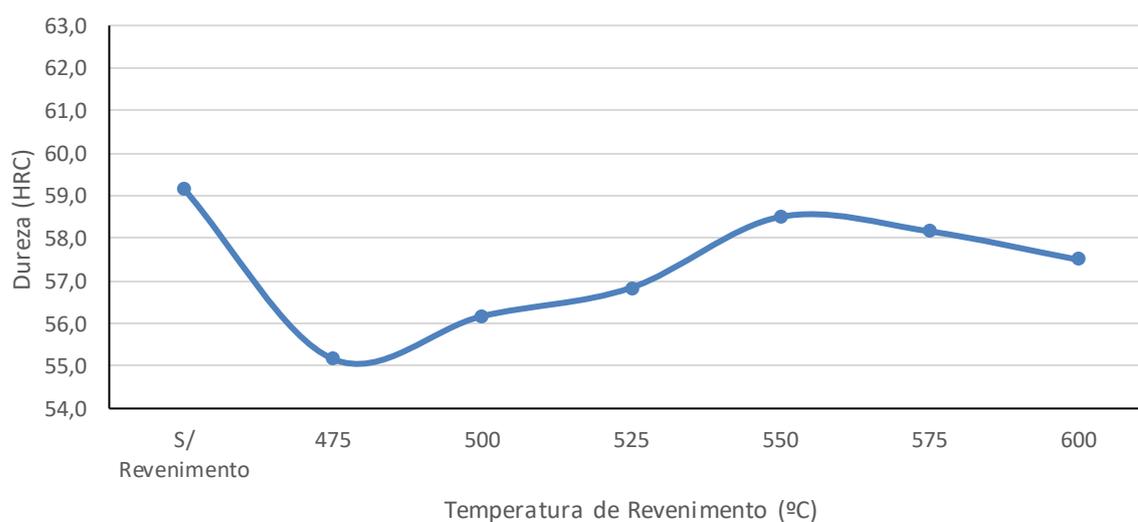
Os resultados da dureza Rockwell C para as amostras do aço AISI M2 temperado em óleo a 1100°C e revenido em diversas temperaturas são apresentados na tabela 12 e na figura 18 é apresentada a curva obtida através da dureza média encontrada na tabela 12.

**Tabela 12 – Valores de dureza Rockwell C para os corpos de prova temperados a 1100°C e revenido em diversas temperaturas**

Temperatura de Revenimento (°C)	Dureza Média (HRC)	Desvio-Padrão ( $\sigma$ )
S/ Revenimento	59,2	1,3
475°C	55,2	1,2
500°C	56,2	1,0
525°C	56,8	0,4
550°C	58,5	0,5
575°C	58,2	0,4
600°C	57,5	0,8

Fonte: Próprio autor.

**Figura 18 – Curva de dureza para o aço AISI M2 temperado a 1100°C e revenido em diversas temperaturas**



Fonte: Próprio autor.

Inicialmente observa-se que o valor de dureza obtido para o aço somente temperado é compatível com esperado quando comparado com aço alto carbono. Nesse caso, apesar da temperatura de aquecimento escolhida ter sido inferior à recomendada (fato relacionado às limitações do forno de tratamentos térmicos utilizado), essa parece ter sido capaz de promover dissolução dos carbonetos primários de forma a levar à ocorrência de austenita com elevado teor de carbono e, com o resfriamento, dar origem a uma elevada quantidade de martensita, de alto teor de carbono, responsável pela elevada dureza nessa condição (COUTINHO, 2010; CALLISTER, 2008).

A partir dessa observação e com auxílio da figura 18, observa-se uma queda significativa na dureza quando a amostra foi revenida à temperatura de 475°C e o aumento da dureza com o aumento da temperatura de revenimento até aproximadamente 550°C. A partir desse ponto percebe-se uma tendência de redução na dureza das amostras. A queda nos valores de dureza está relacionada à transformação da martensita em martensita revenida, com estrutura ainda tetragonal de corpo centrado porém de menor teor de carbono, com carbonetos precipitados. Em seguida, percebe-se uma elevação da dureza até atingir um valor máximo, à temperatura de 550°C, e depois queda. Essa elevação da dureza pode ser relacionada a dois fatores. O primeiro seria a precipitação de carbonetos de cromo, molibdênio, vanádio e tungstênio, de dimensões reduzidas e dispersos, elevando a dureza do material. Com a precipitação desses carbonetos também na austenita retida (não apenas na martensita), o teor de carbono da austenita retida seria reduzido e, com isso a temperatura de fim da transformação martensítica seria elevada. Dessa forma, a segunda razão estaria relacionada à transformação da austenita retida em martensita no resfriamento. Todo o fenômeno, em geral, é mencionado como endurecimento secundário. Por fim, a redução na dureza observada após a temperatura de revenimento de 550°C pode estar relacionada à energia ser suficiente para iniciar o coalescimento dos carbonetos (COUTINHO, 1992; CHIAVERINI, 1987).

Os resultados da dureza Rockwell C para as amostras do aço AISI M2 temperado em óleo a 1100°C e revenido duplamente em diversas temperaturas são apresentados na tabela 13 e na figura 19 é apresentada a curva obtida através da dureza média encontrada na tabela 13.

Já para o material revenido duplamente observa-se uma elevação no valor da dureza mesmo quando revenido a baixa temperatura e percebe-se uma queda na dureza a partir do

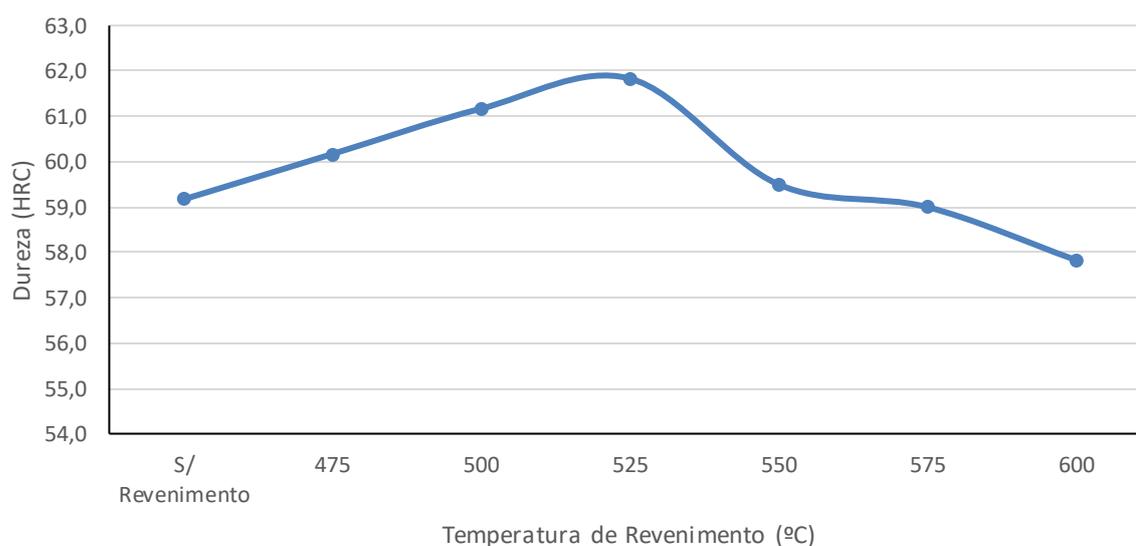
revenimento em 525°C. Tal efeito pode ser associado novamente ao endurecimento secundário que, no entanto, nesse momento se deu a temperaturas inferiores. A redução da dureza, dessa forma, se inicia antes, pois como o material se encontra com proporção maior de carbonetos, a energia absorvida é utilizada no coalescimento dos mesmos (COUTINHO, 1992; CHIAVERINI, 1987).

**Tabela 13 – Valores de dureza Rockwell C para os corpos de prova temperados a 1100°C e revenido duplamente em diversas temperaturas**

Temperatura de Revenimento (°C)	Dureza Média (HRC)	Desvio-Padrão ( $\sigma$ )
S/ Revenimento	59,2	1,3
475°C	60,2	1,2
500°C	61,2	1,0
525°C	61,8	0,4
550°C	59,5	0,5
575°C	59,0	0,6
600°C	57,8	0,8

Fonte: Próprio autor.

**Figura 19 – Curva de dureza para o aço AISI M2 temperado a 1100°C e revenido duplamente em diversas temperaturas**

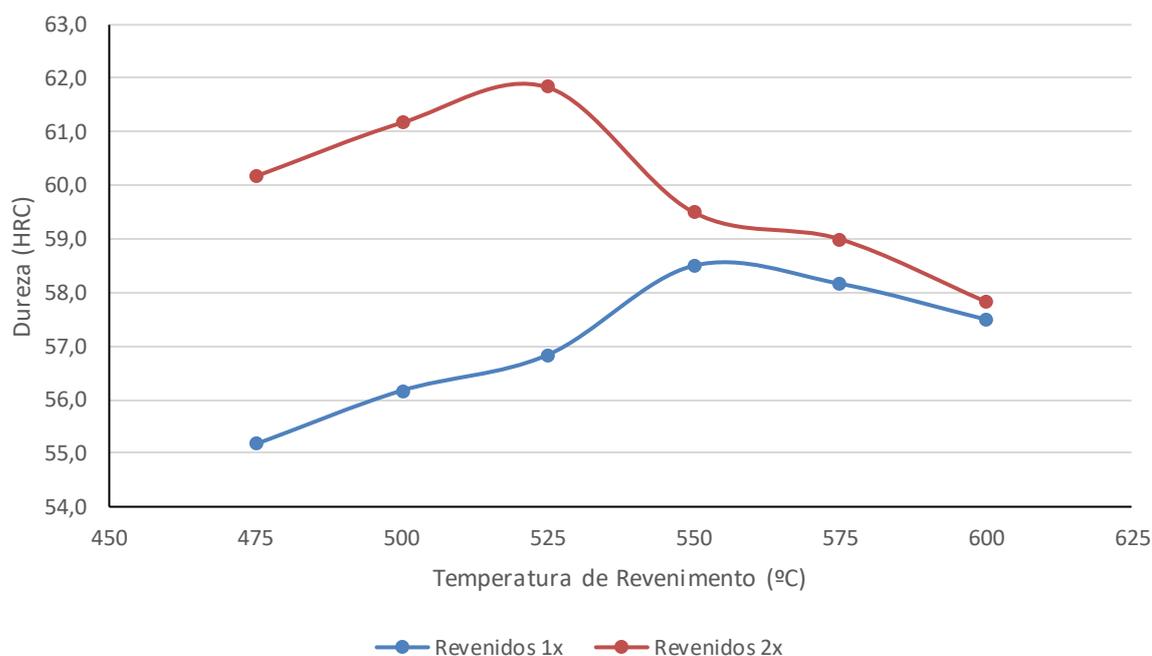


Fonte: Próprio autor.

Na figura 20 são mostradas as curvas de dureza para as amostras temperadas e revenidas só uma vez e duplamente. A partir da comparação entre as curvas obtidas, nota-se a elevação de dureza com o aumento do número de etapas de revenimento.

Acredita-se que tal efeito ocorre devido à transformação da austenita retida em martensita propiciar, no segundo revenimento, a possibilidade da transformação da martensita em carbonetos. Esse processo deve ser realizado em etapas distintas e não com o aumento do tempo de encharque, a fim de evitar o crescimento excessivo do tamanho de grão e com isso a redução da dureza do material.

**Figura 20 – Curvas de dureza para o aço AISI M2 temperado e revenido em diversas temperaturas e temperado e revenido duplamente em diversas temperaturas**



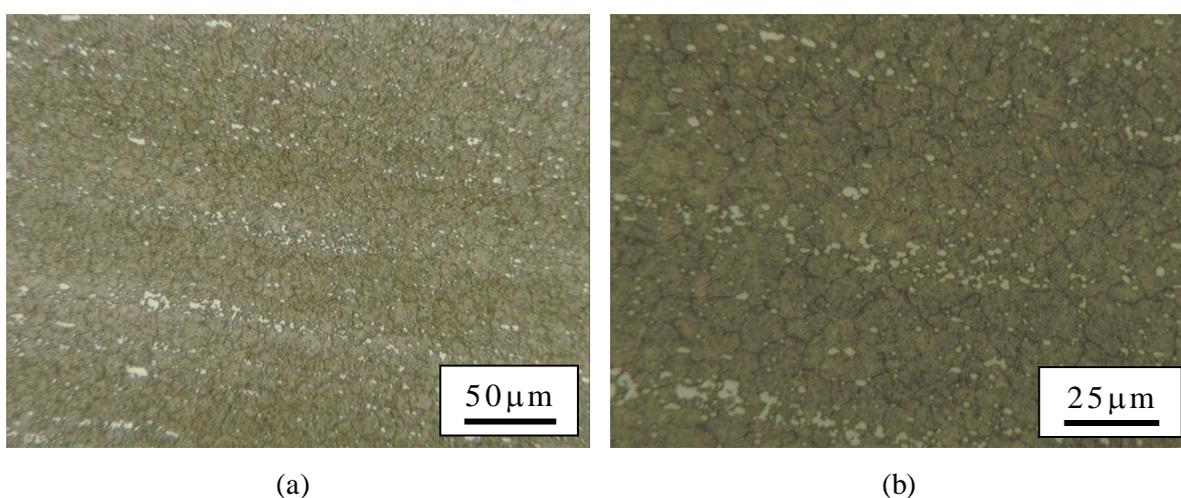
Fonte: Próprio autor.

## 5.2. Análise da Microestrutura do Aço AISI M2 após Tratamento Térmico

As fotomicrografias do aço rápido AISI M2 temperado em óleo a 1100°C por 30min obtidas por microscopia óptica e microscopia eletrônica de varredura são apresentadas nas figuras 21 e 22. Na figura 21 são indicados possíveis carbonetos presentes no material, identificados a partir da morfologia e dispersão, conforme a literatura (VITRY et al., 2012).

A partir da análise das imagens é possível observar que a estrutura formada a partir da têmpera é constituída de uma matriz martensítica e carbonetos. Percebe-se ainda, por MEV, para o material temperado, os contornos de grãos austeníticos da estrutura anterior ao resfriamento brusco. Observando as imagens é possível que os carbonetos identificados representem os tipos MC e os tipos  $M_{23}C_6$ , como previsto na literatura (VITRY et al., 2012; SARTORI, 2009; ZHOU et al., 2010).

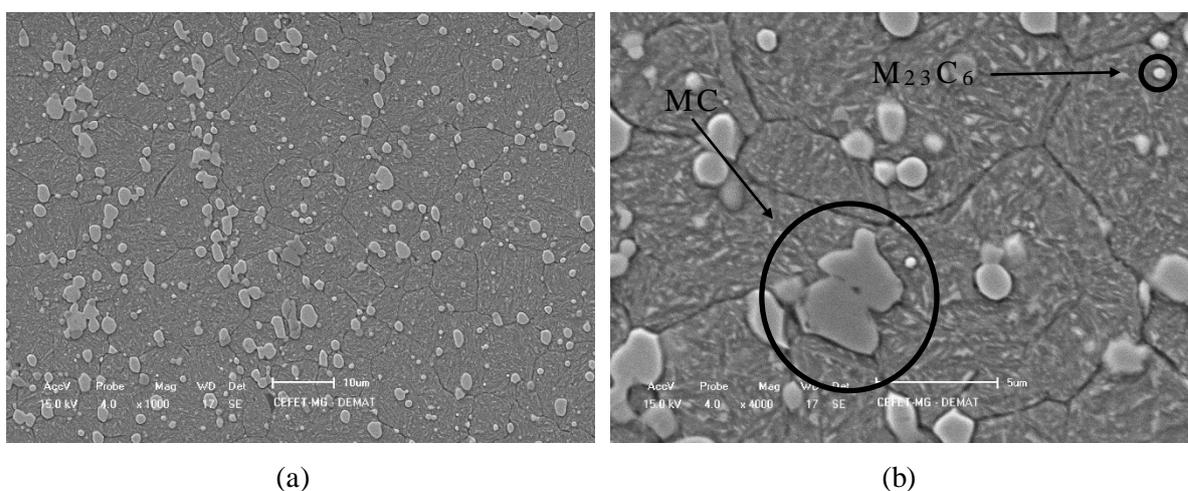
**Figura 21 – Imagem (MO) do aço rápido AISI M2 temperado em óleo a 1100°C**



(a) e (b) ampliações distintas.

Fonte: Próprio autor.

**Figura 22 – Imagem (MEV) do aço rápido AISI M2 temperado em óleo a 1100°C**

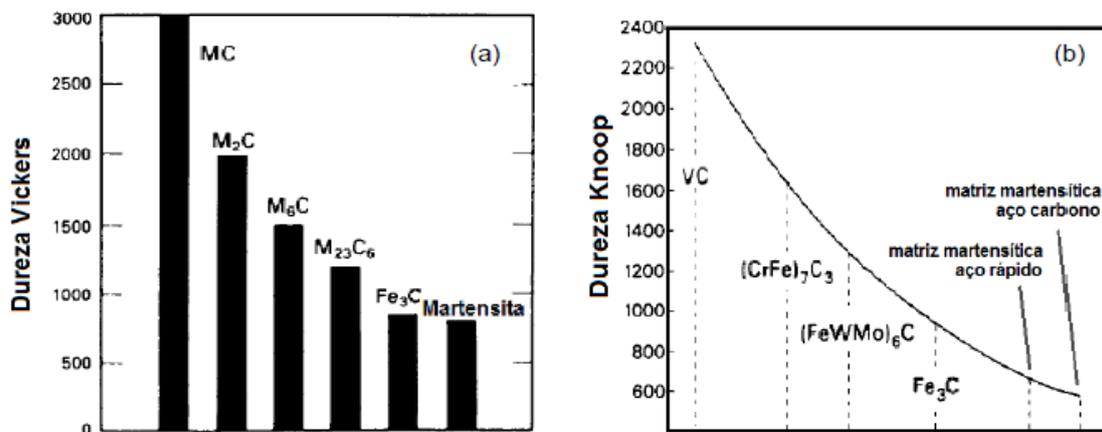


(a) e (b) ampliações distintas.

Fonte: Próprio autor.

Na figura 23 são mostrados os valores de dureza de alguns carbonetos que são observados nas imagens obtidas pelo MO e MEV (KRAUSS, 1990).

**Figura 23 - Dureza de alguns carbonetos presentes nos aços ferramenta.**

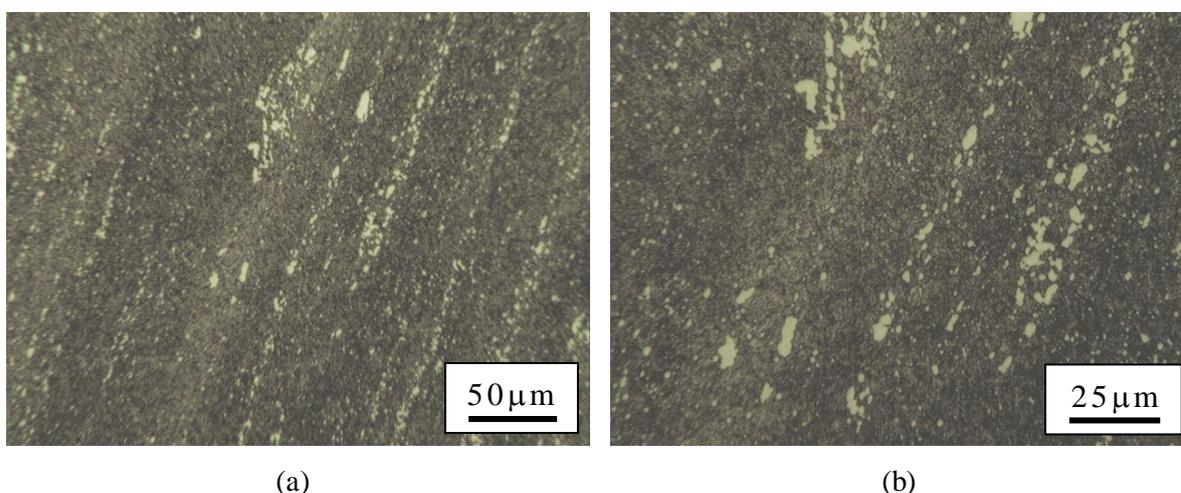


(a) tipos de carbonetos e martensita em geral (b) carbonetos específicos e martensita formada em aços rápidos e aços carbono.

Fonte: KRAUSS, 1990 (Traduzida).

Nas figuras 24 a 35 serão apresentadas as imagens das microestruturas obtidas para o aço AISI M2 temperado em óleo a 1100°C e revenido em diversas temperaturas. Novamente, as fotomicrografias foram obtidas por meio do microscópio óptico e microscópio eletrônico de varredura. Nas micrografias obtidas por MEV para todas as condições, pode-se observar exemplos de carbonetos do tipo MC e M<sub>23</sub>C<sub>6</sub>, presentes no aço AISI M2.

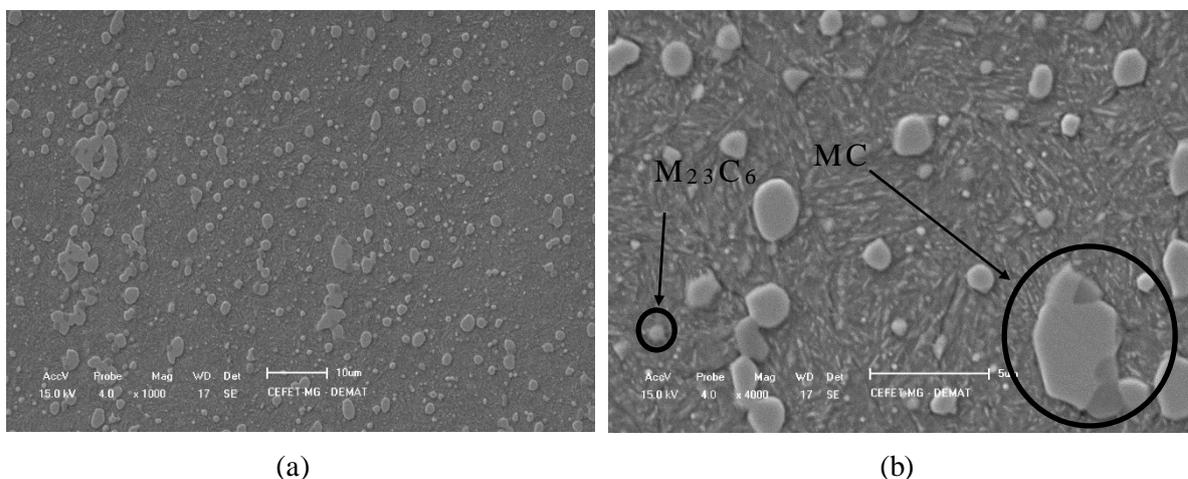
**Figura 24 – Imagem (MO) do aço rápido AISI M2 temperado a 1100°C e revenido a 475°C**



(a) e (b) ampliações distintas.

Fonte: Próprio autor.

**Figura 25 – Imagem (MEV) do aço rápido AISI M2 temperado a 1100°C e revenido a 475°C**



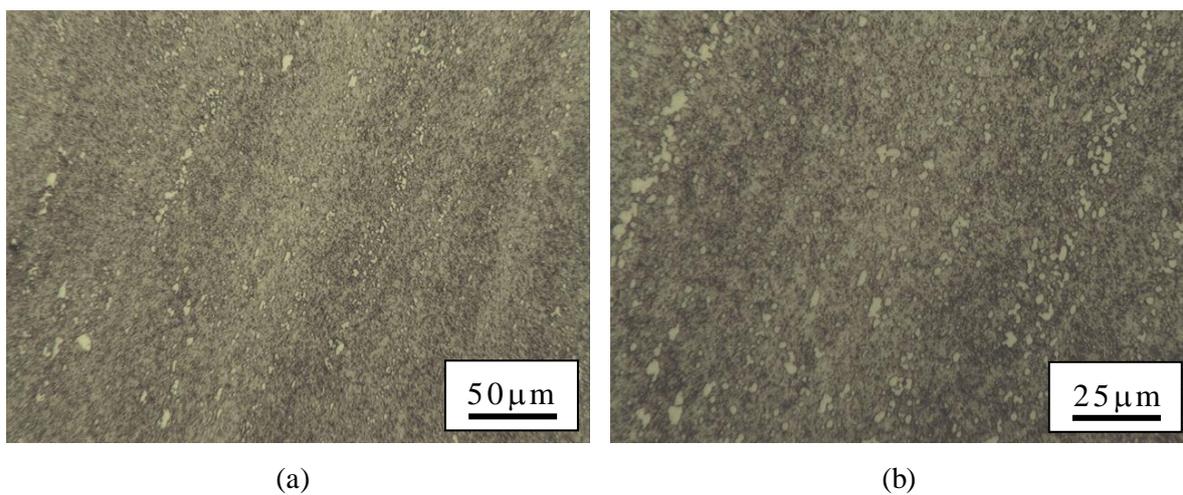
(a) e (b) ampliações distintas.

Fonte: Próprio autor.

A partir das imagens obtidas por MEV e MO, juntamente com a influência do tipo de carboneto presente no material, considerando a queda da dureza no material revenido, quando revenido a 475°C, observa-se na figura 25 a aparente diminuição de carbonetos precipitados, devido a redissolução da cementita nessa faixa de temperatura. Porém, com a elevação da temperatura, verifica-se nas figuras 27, 29 e 31 o aumento de carbonetos do tipo MC e  $M_{23}C_6$ , os quais podem ser responsáveis pelo aumento da dureza do material (CHIAVERINI, 1987; ZEITUNE, 2014).

Na figura 31, percebe-se os carbonetos mais dispersos e com tamanho inferior aos presentes na figura 27 e 29, o que leva ao pico de endurecimento nessa faixa de temperatura. Já as figuras 33 e 35 são observados, aparentemente, carbonetos maiores, obtidos pelo coalescimento, efeito responsável pela queda da dureza do material (CHIAVERINI, 1987; ZEITUNE, 2014).

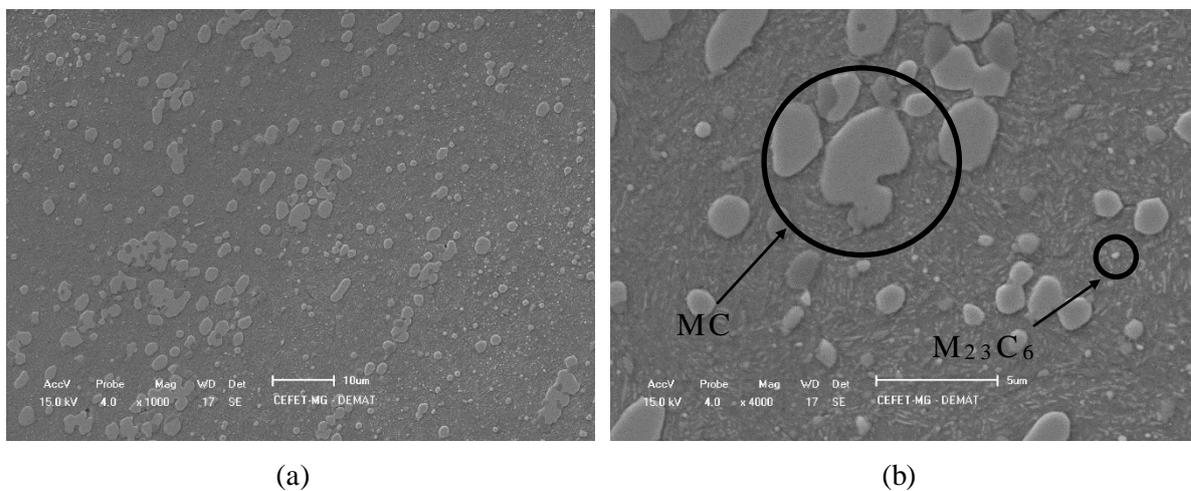
**Figura 26 – Imagem (MO) do aço rápido AISI M2 temperado a 1100°C e revenido a 500°C**



(a) e (b) ampliações distintas.

Fonte: Próprio autor.

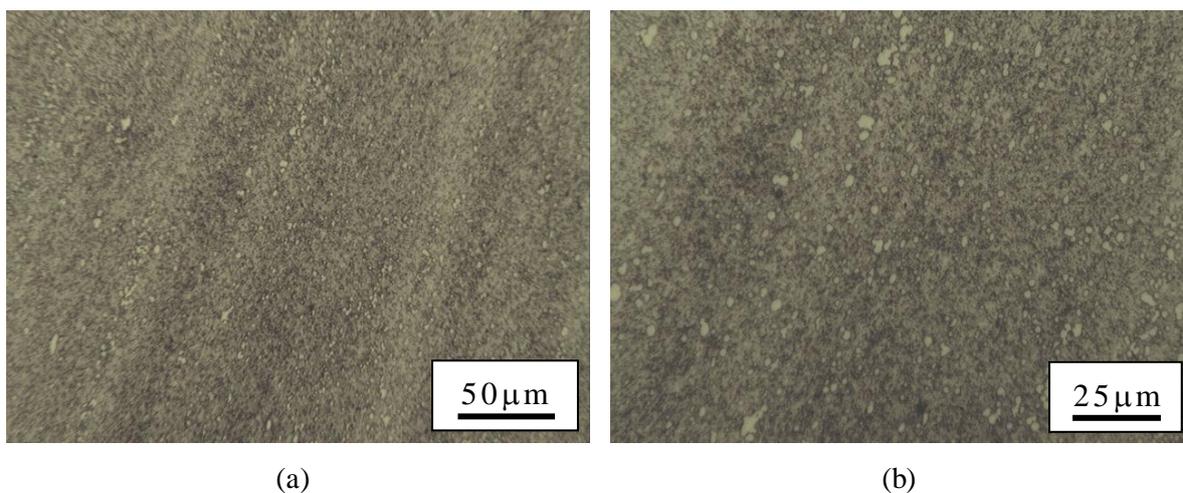
**Figura 27 - – Imagem (MEV) do aço rápido AISI M2 temperado a 1100°C e revenido a 500°C**



(a) e (b) ampliações distintas.

Fonte: Próprio autor.

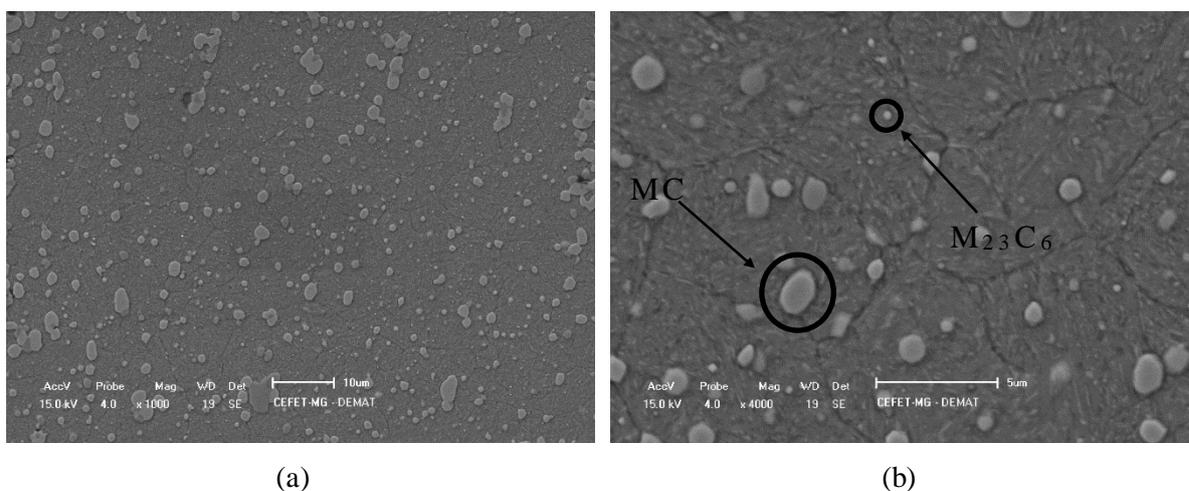
**Figura 28 – Imagem (MO) do aço rápido AISI M2 temperado a 1100°C e revenido a 525°C**



(a) e (b) ampliações distintas.

Fonte: Próprio autor.

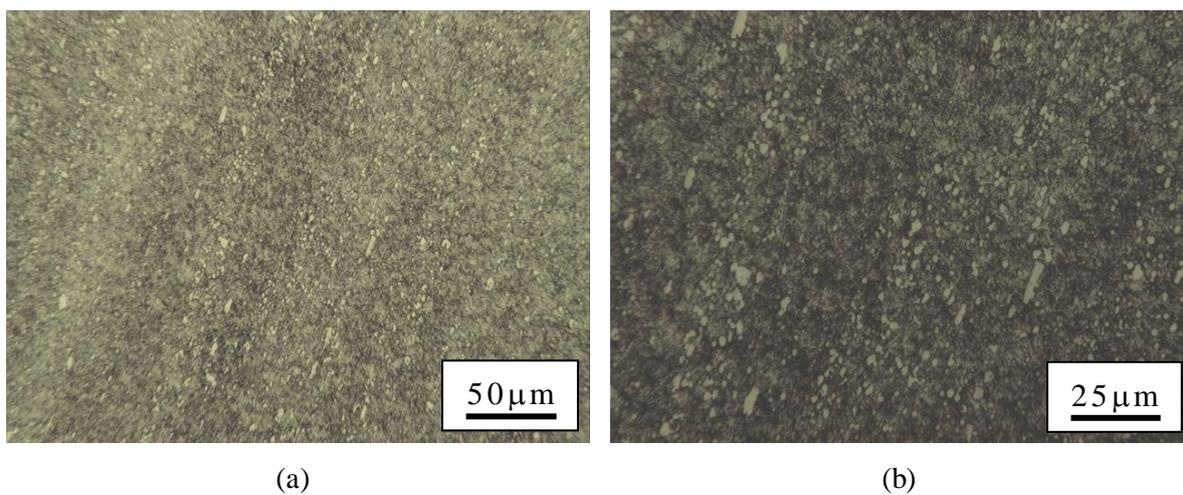
**Figura 29 – Imagem (MEV) do aço rápido AISI M2 temperado a 1100°C e revenido a 525°C**



(a) e (b) ampliações distintas.

Fonte: Próprio autor.

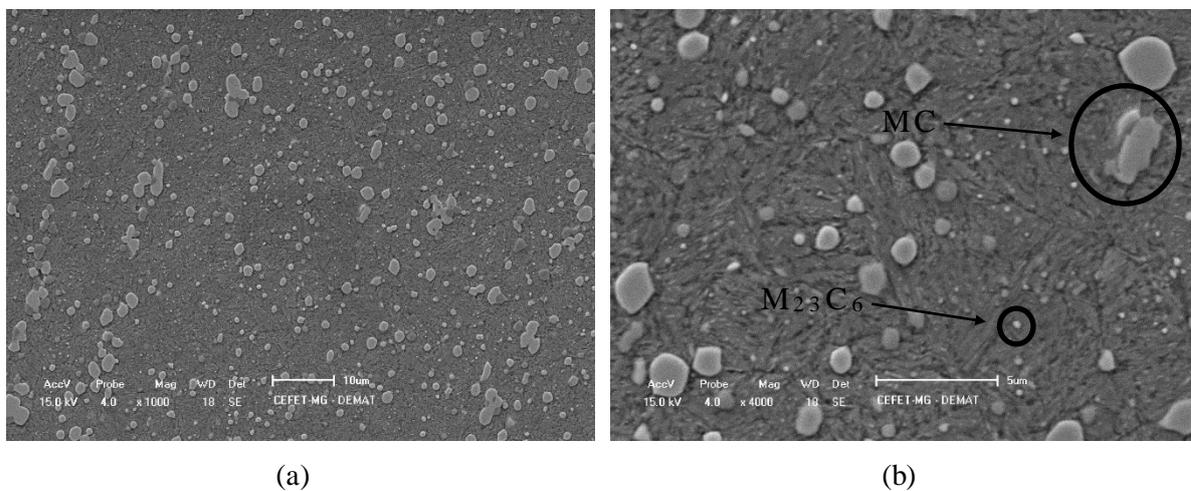
**Figura 30 – Imagem (MO) do aço rápido AISI M2 temperado a 1100°C e revenido a 550°C**



(a) e (b) ampliações distintas.

Fonte: Próprio autor.

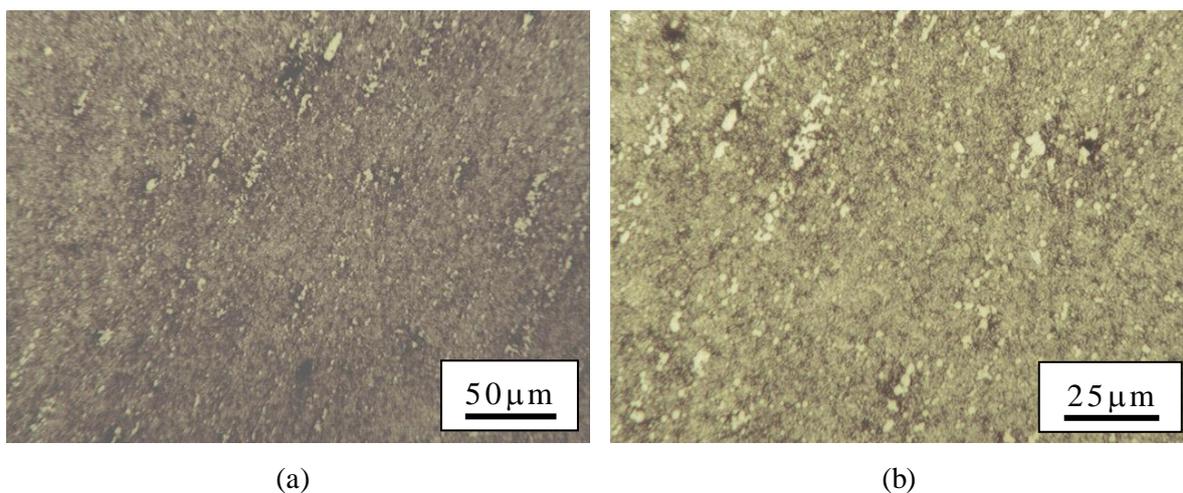
**Figura 31 – Imagem (MEV) do aço rápido AISI M2 temperado a 1100°C e revenido a 550°C**



(a) e (b) ampliações distintas.

Fonte: Próprio autor.

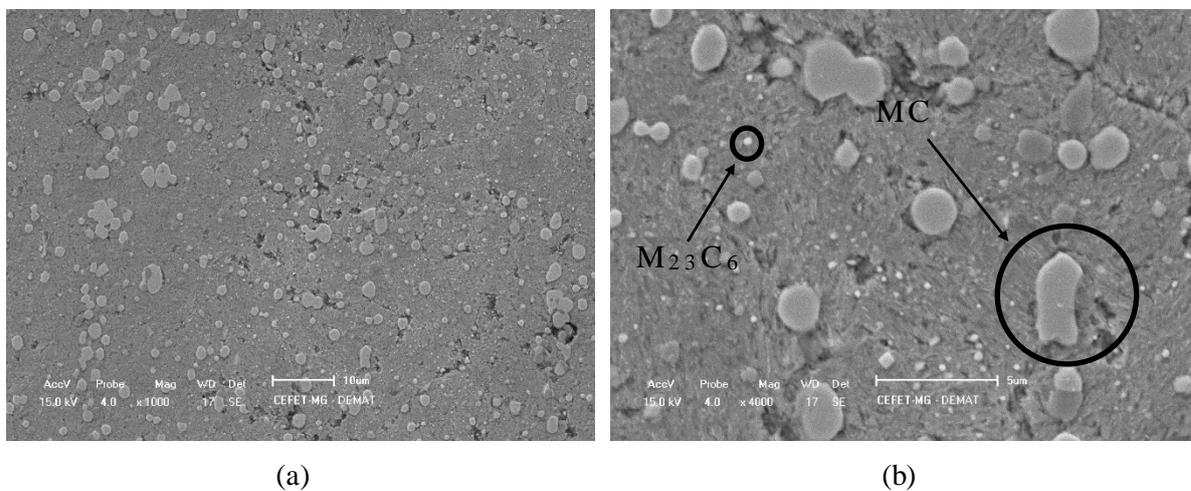
**Figura 32 – Imagem (MO) do aço rápido AISI M2 temperado a 1100°C e revenido a 575°C**



(a) e (b) ampliações distintas.

Fonte: Próprio autor.

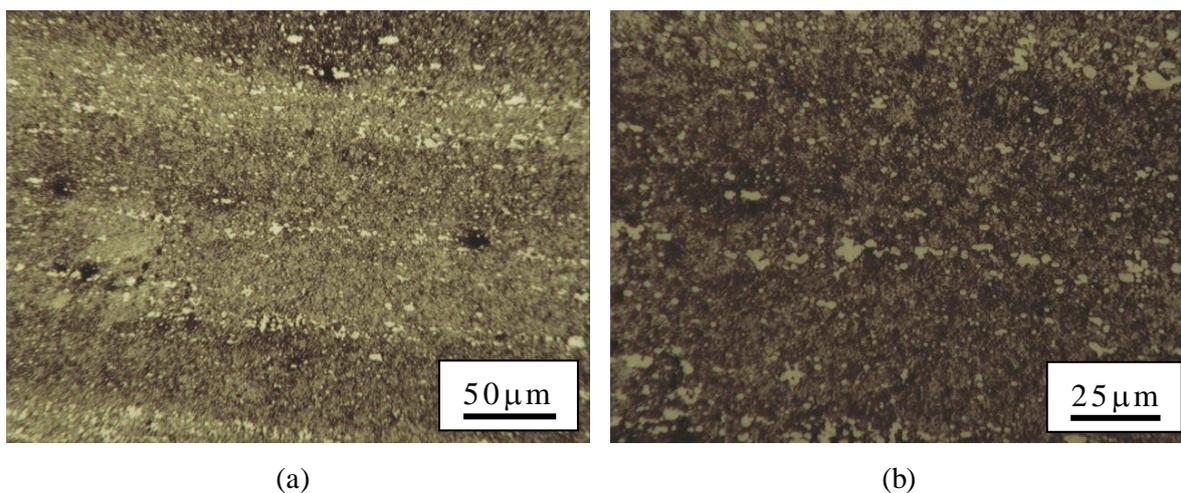
**Figura 33 – Imagem (MEV) do aço rápido AISI M2 temperado a 1100°C e revenido a 575°C**



(a) e (b) ampliações distintas.

Fonte: Próprio autor.

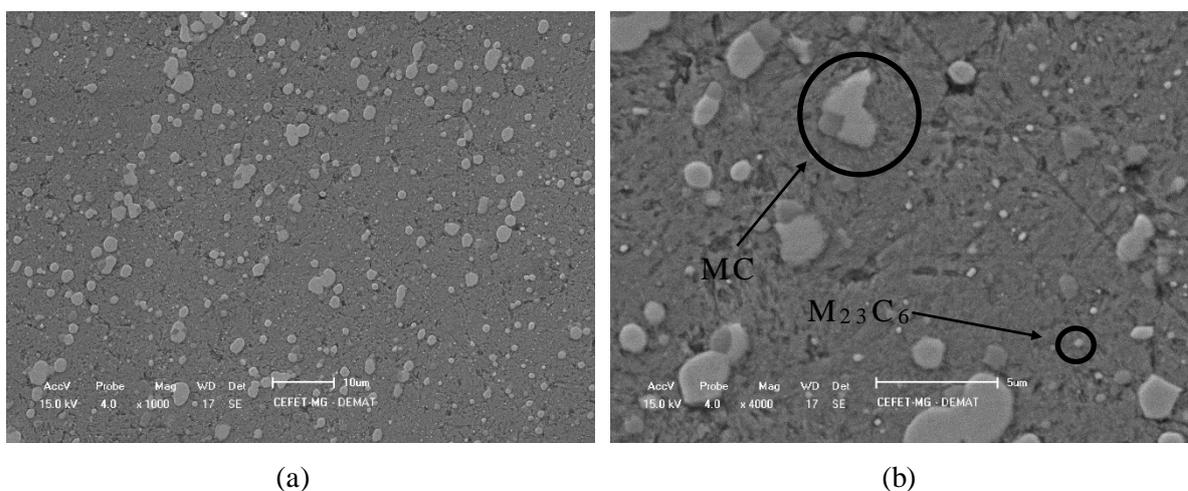
**Figura 34 – Imagem (MO) do aço rápido AISI M2 temperado a 1100°C e revenido a 600°C**



(a) e (b) ampliações distintas.

Fonte: Próprio autor.

**Figura 35 – Imagem (MEV) do aço rápido AISI M2 temperado a 1100°C e revenido a 600°C**

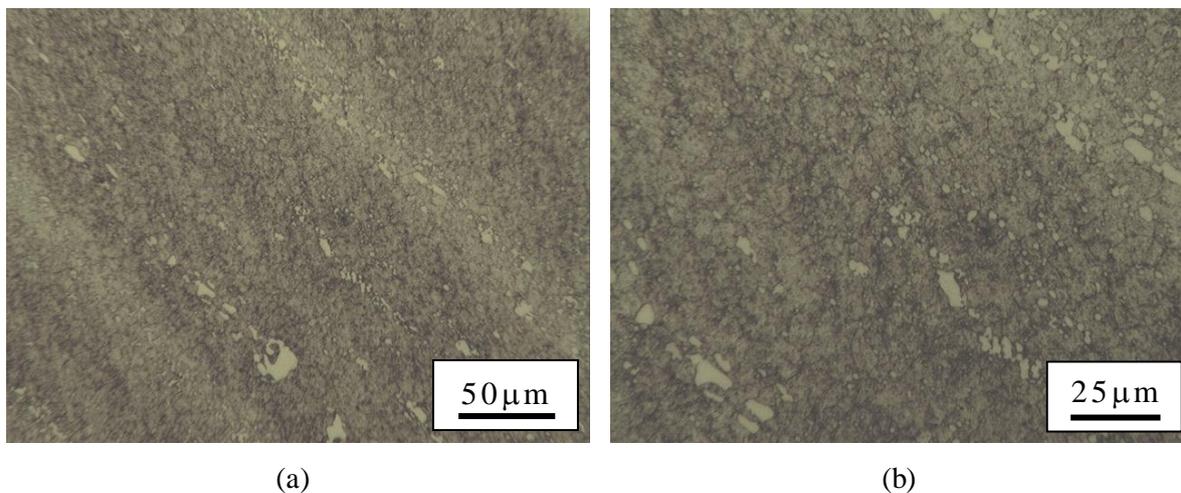


(a) e (b) ampliações distintas.

Fonte: Próprio autor.

Nas figuras 36 a 47 serão apresentadas as imagens das microestruturas obtidas para o aço AISI M2 temperado em óleo a 1100°C e revenido duplamente em diversas temperaturas. Essas imagens também foram obtidas por meio do microscópio óptico e microscópio eletrônico de varredura.

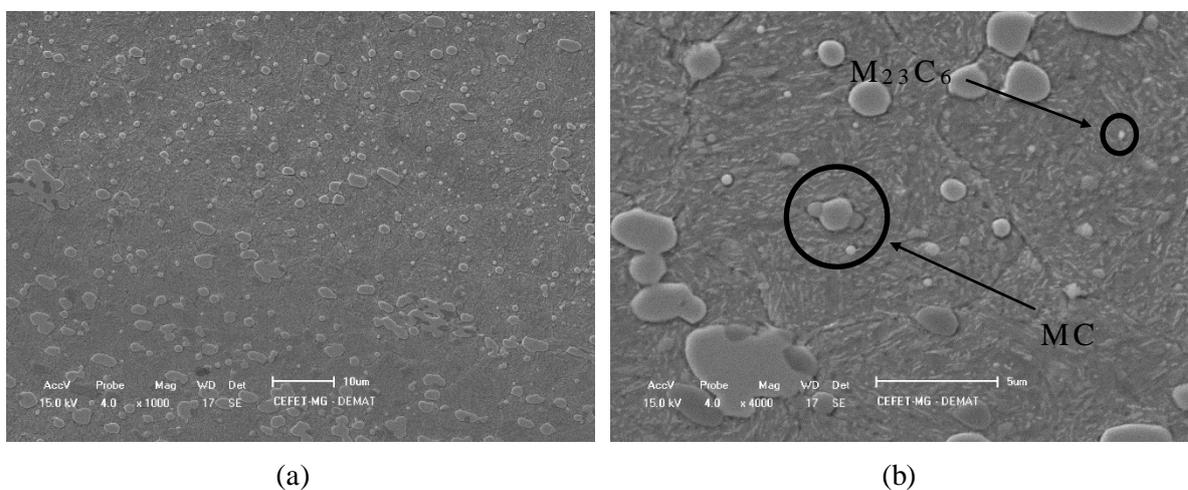
**Figura 36 – Imagem (MO) do aço rápido M2 temperado em óleo a 1100°C e revenido duplamente a 475°C**



(a) e (b) ampliações distintas.

Fonte: Próprio autor.

**Figura 37 – Imagem (MEV) do aço rápido M2 temperado em óleo a 1100°C e revenido duplamente a 475°C**



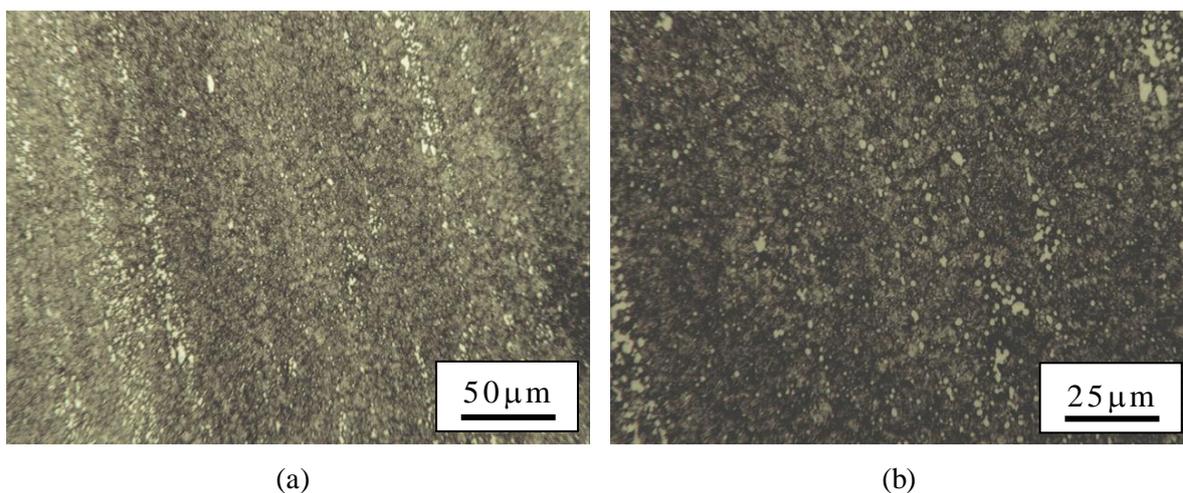
(a) e (b) ampliações distintas.

Fonte: Próprio autor.

Por meio das figuras obtidas pelo MO e MEV, observa-se o aparente aumento da matriz martensítica do material revenido duplamente a 475°C, quando comparado com o mesmo material revenido só uma vez a 475°C. Tal efeito ocorre devido à transformação da austenita retida em martensita durante o revenimento, o que leva ao aumento da dureza do material em comparação com aquele revenido apenas em um ciclo. Já com o aumento da temperatura de revenimento nessas condições verifica-se elevação na presença de

carbonetos tipo MC, o que leva o material a ter dureza superior ao revenido uma vez. Observa-se também na figura 43, 45 e 47 o aumento no tamanho dos carbonetos, proveniente do coalescimento, o que provoca a queda na dureza do aço.

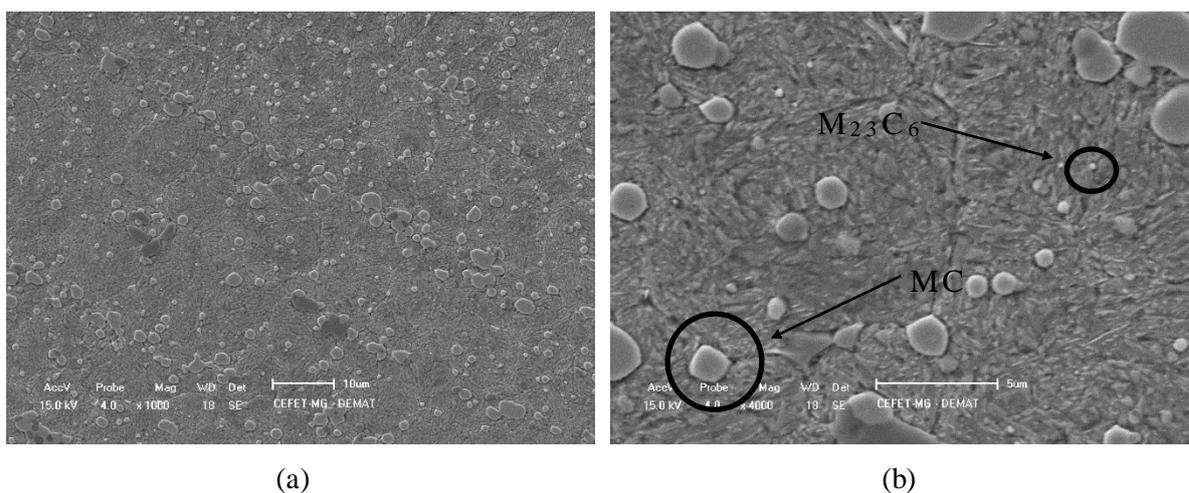
**Figura 38 – Imagem (MO) do aço rápido M2 temperado em óleo a 1100°C e revenido duplamente a 500°C**



(a) e (b) ampliações distintas.

Fonte: Próprio autor.

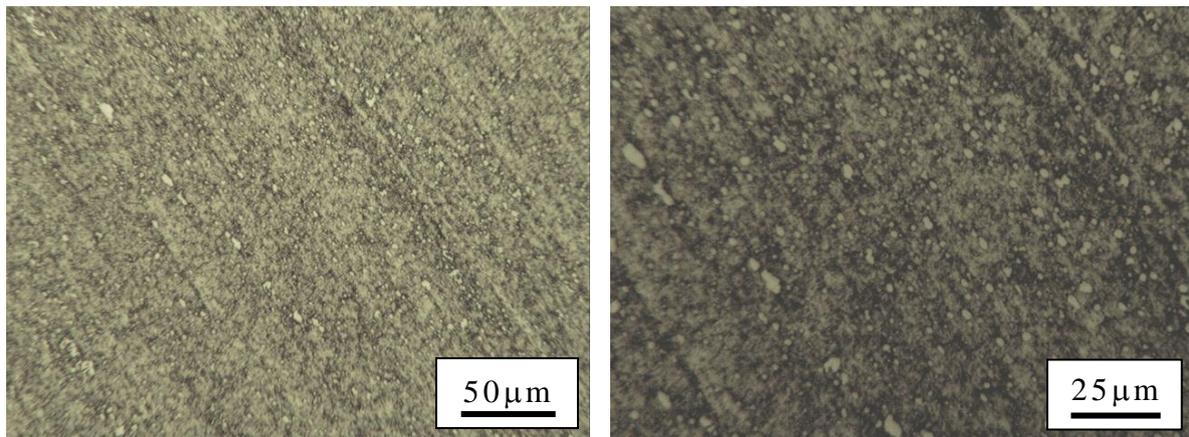
**Figura 39 – Imagem (MEV) do aço rápido M2 temperado em óleo a 1100°C e revenido duplamente a 500°C**



(a) e (b) ampliações distintas.

Fonte: Próprio autor.

**Figura 40 – Imagem (MO) do aço rápido M2 temperado em óleo a 1100°C e revenido duplamente a 525°C**



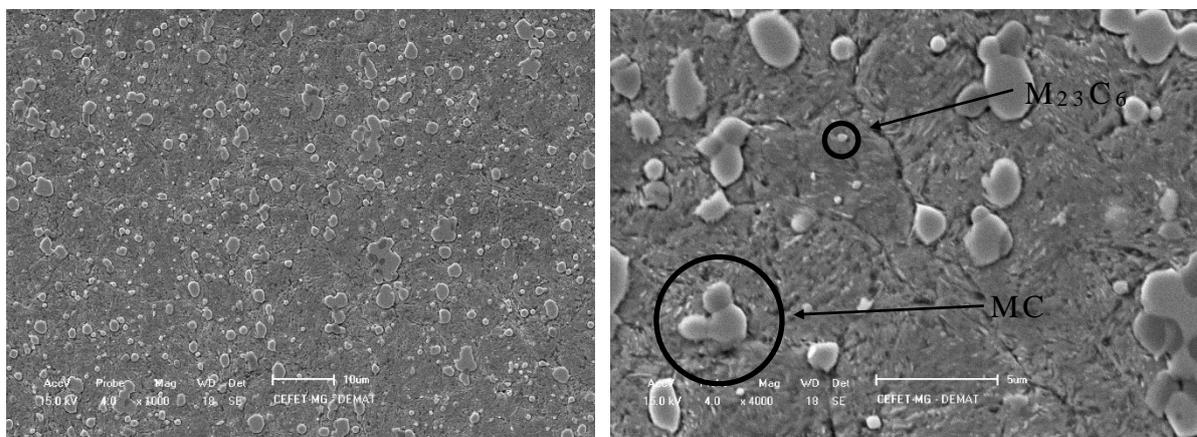
(a)

(b)

(a) e (b) ampliações distintas.

Fonte: Próprio autor.

**Figura 41 – Imagem (MEV) do aço rápido M2 temperado em óleo a 1100°C e revenido duplamente a 525°C**



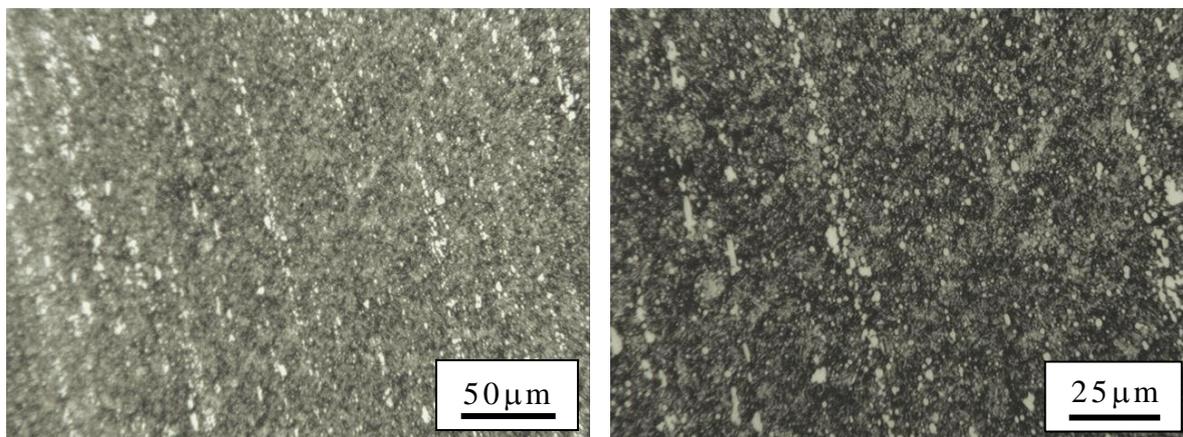
(a)

(b)

(a) e (b) ampliações distintas.

Fonte: Próprio autor.

**Figura 42 – Imagem (MO) do aço rápido M2 temperado em óleo a 1100°C e revenido duplamente a 550°C**



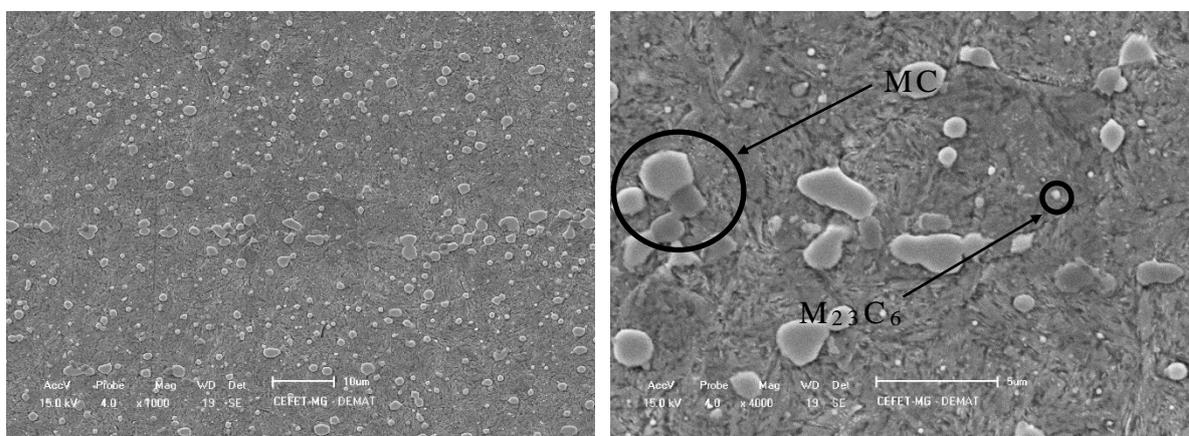
(a)

(b)

(a) e (b) ampliações distintas.

Fonte: Próprio autor.

**Figura 43 – Imagem (MEV) do aço rápido M2 temperado em óleo a 1100°C e revenido duplamente a 550°C**



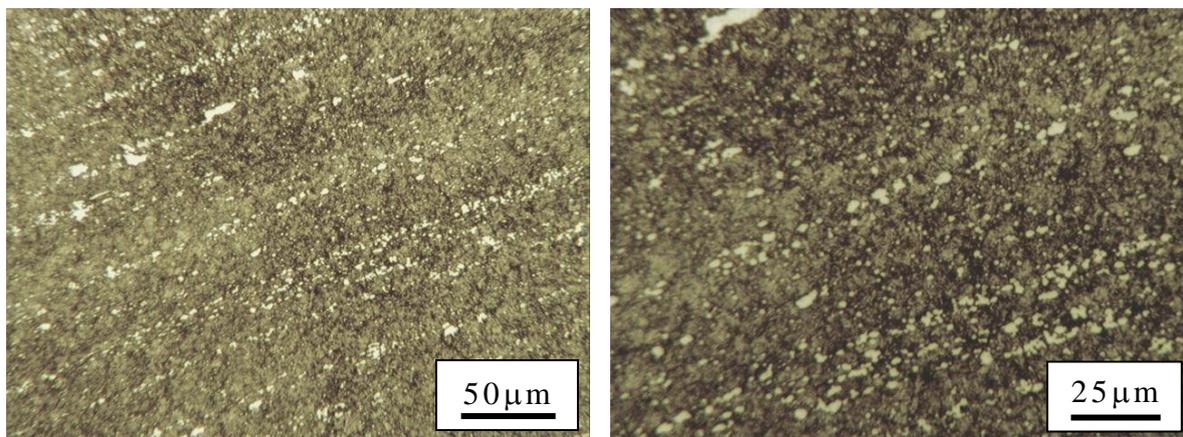
(a)

(b)

(a) e (b) ampliações distintas.

Fonte: Próprio autor.

**Figura 44 – Imagem (MO) do aço rápido M2 temperado em óleo a 1100°C e revenido duplamente a 575°C**



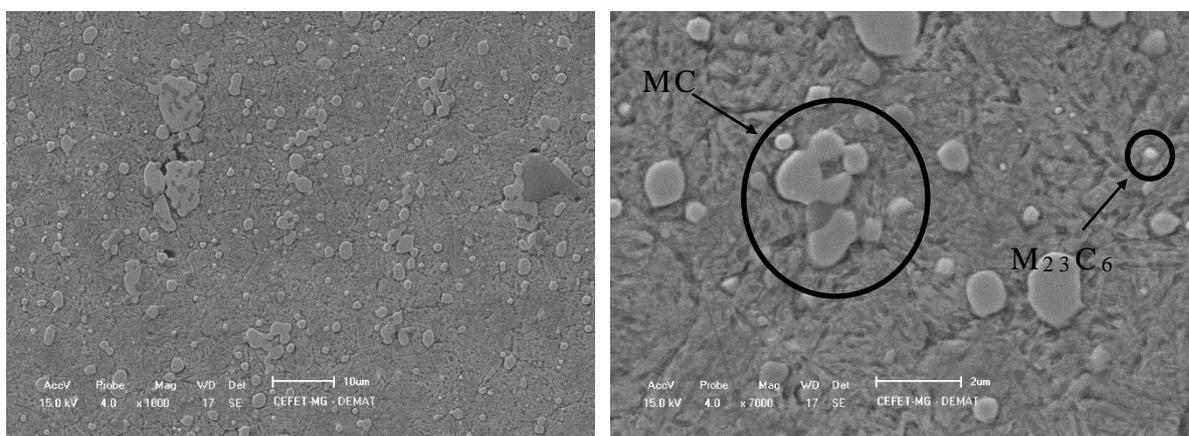
(a)

(b)

(a) e (b) ampliações distintas.

Fonte: Próprio autor.

**Figura 45 – Imagem (MEV) do aço rápido M2 temperado em óleo a 1100°C e revenido duplamente a 575°C**



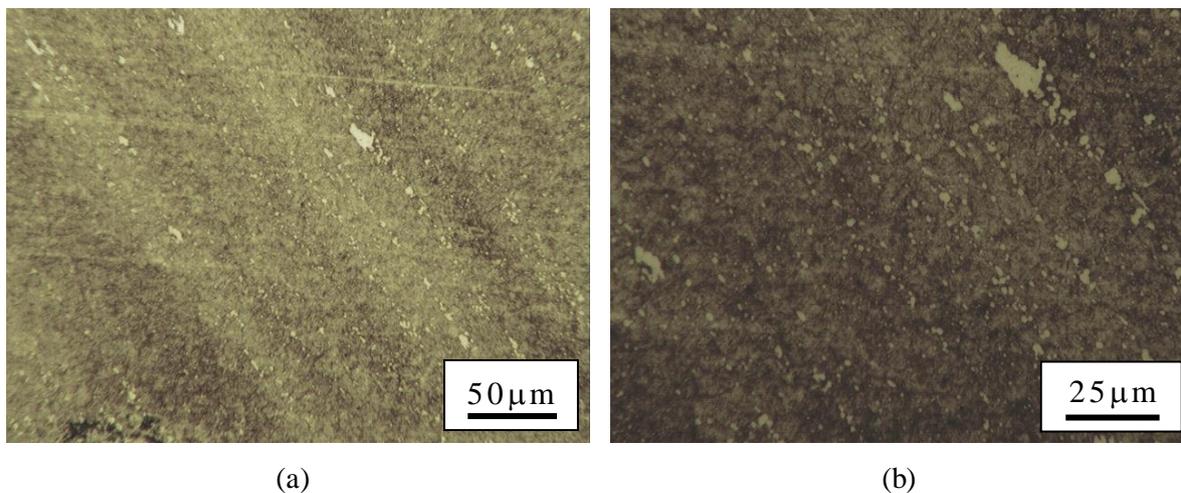
(a)

(b)

(a) e (b) ampliações distintas.

Fonte: Próprio autor.

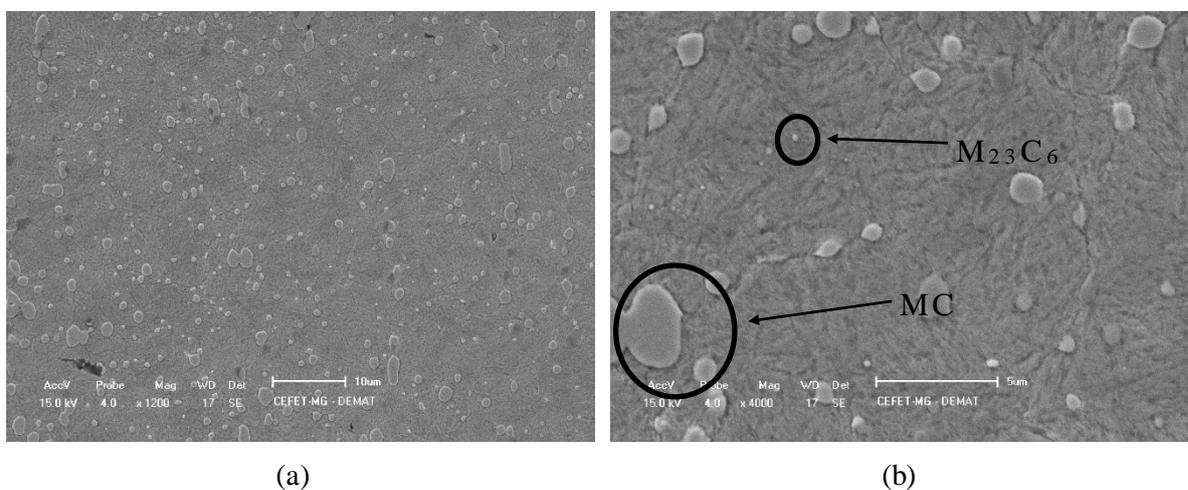
**Figura 46 – Imagem (MO) do aço rápido M2 temperado em óleo a 1100°C e revenido duplamente a 600°C**



(a) e (b) ampliações distintas.

Fonte: Próprio autor.

**Figura 47 – Imagem (MEV) do aço rápido M2 temperado em óleo a 1100°C e revenido duplamente a 600°C**



(a) e (b) ampliações distintas.

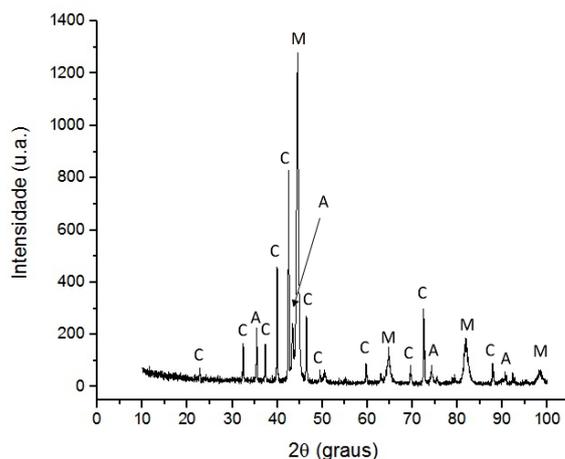
Fonte: Próprio autor.

### 5.3. Análise Qualitativa das Fases Presentes no Aço AISI M2 após Tratamento Térmico

Na figura 48 é apresentado o difratograma de raios-x para a amostra do aço AISI M2 temperado em óleo a 1100°C e sem o tratamento de revenimento. No gráfico, A representa a austenita retida, M representa a martensita e C, os carbonetos. Os picos foram

identificados a partir da comparação dos resultados com os trabalhos de Zhou, Fang e Jiang (2010), Dobrzanski et al. (2004), Moon, Lee e Kwon (2008), Akbari et al. (2010), Serna (2008) e dos padrões das fases martensita e austenita.

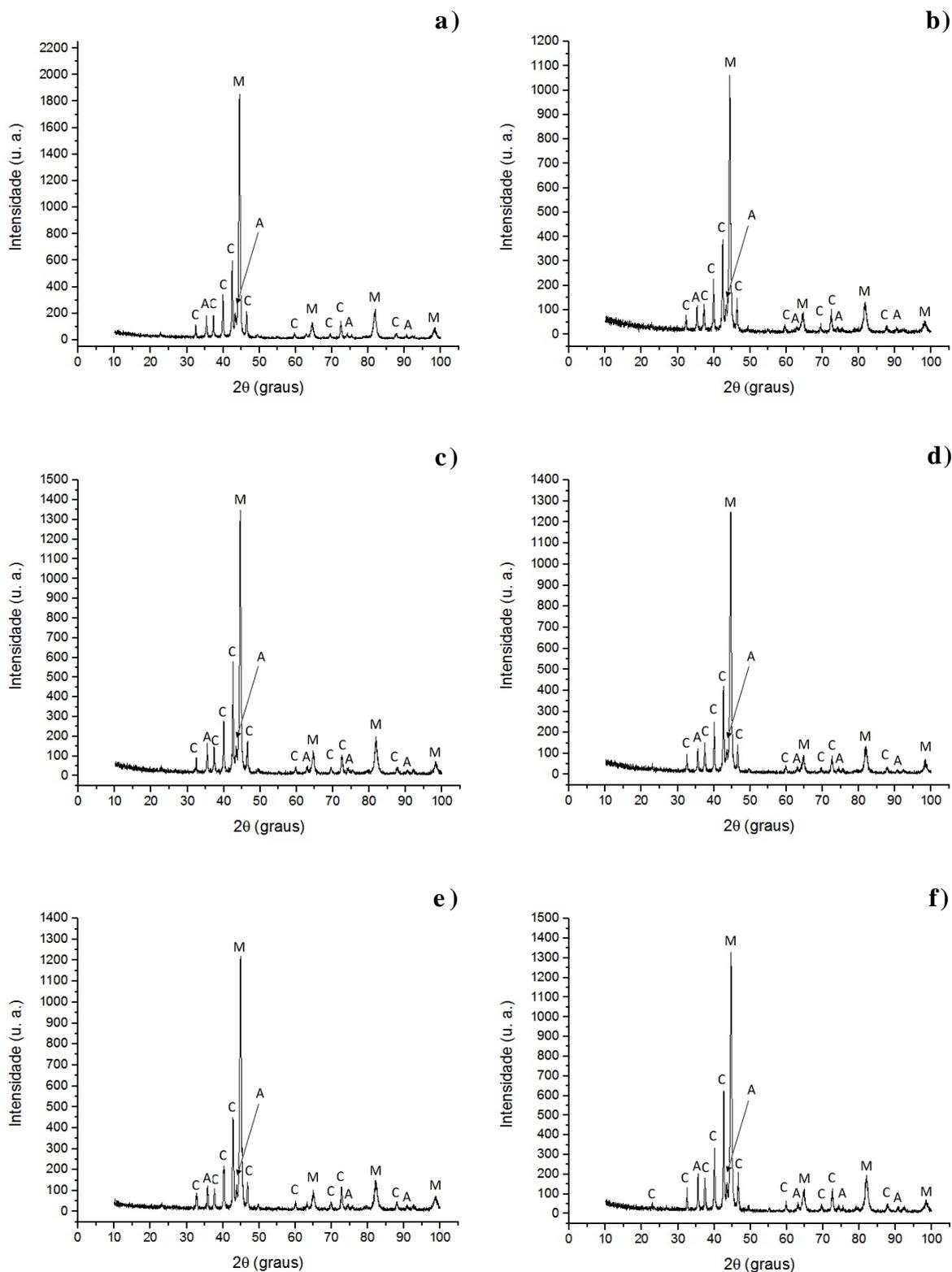
**Figura 48 – Difratoograma do aço rápido M2 temperado em óleo a 1100°C e sem tratamento de revenimento**



Fonte: Próprio autor.

Por meio do gráfico obtido, pode-se analisar qualitativamente a influência do tratamento de revenimento em relação às fases presentes no material, comparando-o com os difratogramas das amostras revenidas em diversas temperaturas, apresentados nas figuras 49 e 50. Na figura 49 estão representadas as amostras revenidas uma única vez e na figura 50 as amostras revenidas duplamente. Com a realização dos revenimentos, os picos relacionados à austenita retida parecem ser reduzidos em comparação com o material temperado, corroborando a suposição de transformação da austenita retida em martensita durante o resfriamento do revenimento.

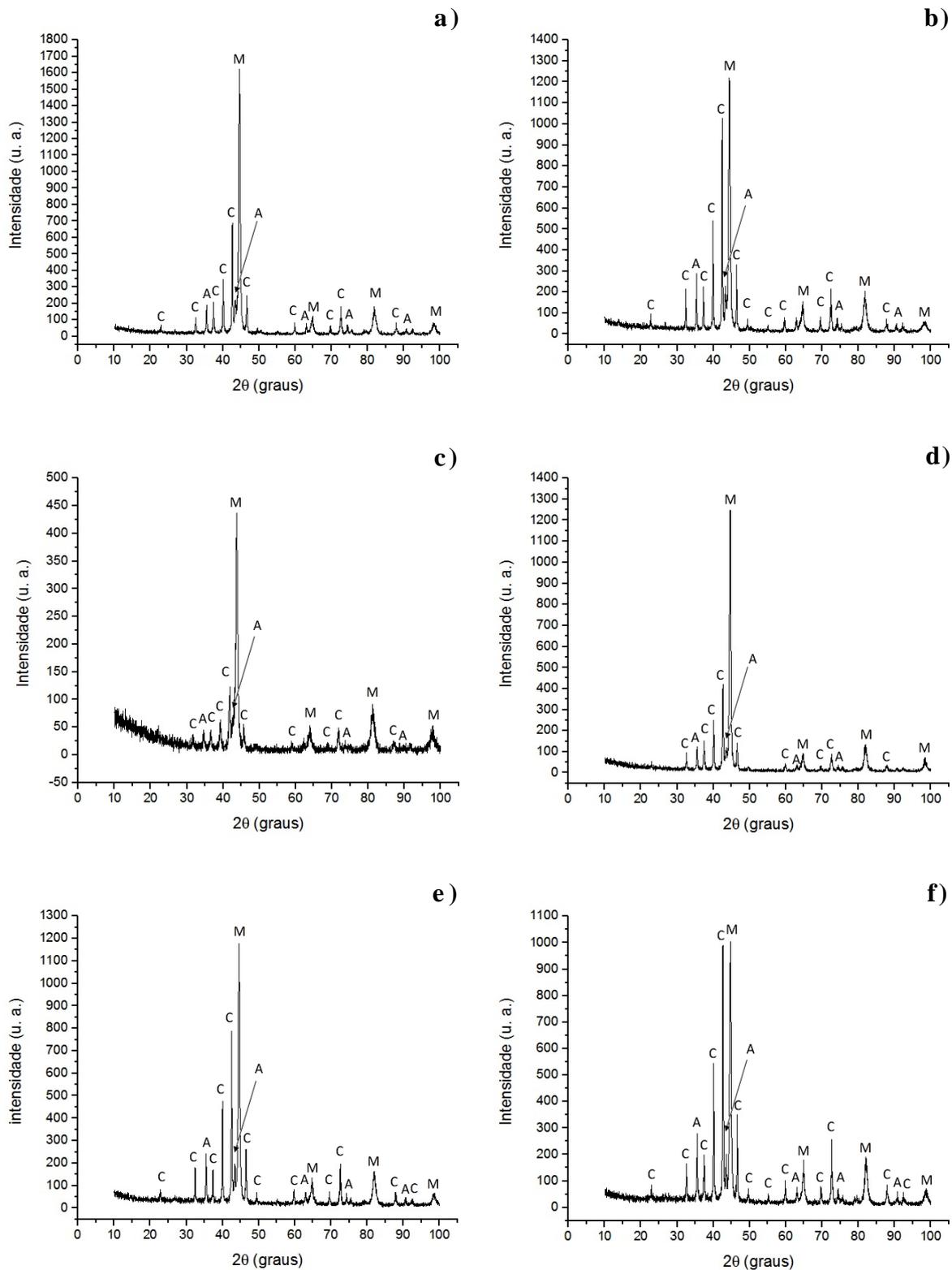
**Figura 49 – Difratoograma do aço rápido M2 temperado em óleo a 1100°C e revenido uma vez em diversas temperaturas**



a) Revenido a 475°C, b) Revenido a 500°C, c) Revenido a 525°C, d) Revenido a 550°C, e) Revenido a 575°C e f) Revenido a 600°C

Fonte: Próprio autor.

**Figura 50 – Difratoograma do aço rápido M2 temperado em óleo a 1100°C e revenido duas vezes em diversas temperaturas**



a) Revenido a 475°C, b) Revenido a 500°C, c) Revenido a 525°C, d) Revenido a 550°C, e) Revenido a 575°C e f) Revenido a 600°C

Fonte: Próprio autor.

## 6. CONCLUSÃO

- Em termos de dureza, o aço AISI M2 apenas temperado apresentou valores compatíveis com o que era esperado de uma estrutura martensítica.
- As amostras temperadas a 1100°C e revenidas uma vez apresentaram dureza inferiores às amostras temperadas a 1100°C e revenidas duplamente.
- O aumento das temperaturas de revenimento surtiram efeito, causando endurecimento secundário nas amostras temperadas à 1100°C e revenidas uma e duas vezes, em que o pico de endurecimento foi observado à temperatura de 550°C e 525°C, respectivamente.
- Em relação à microestrutura, as transformações de fase decorrentes do revenimento foram as esperadas para as duas condições: formação de uma matriz martensítica com presença de carbonetos. Nesse caso, foi observado que o material revenido duplamente apresentou maior quantidade de carbonetos em todas as faixas de temperaturas.
- Os tipos de carbonetos que foram observados na microestrutura a partir das fotomicrografias são MC e  $M_{23}C_6$ .
- Apesar de não ter sido possível identificar austenita retida a partir da análise de imagens da microestrutura, foi possível observar a partir dos difratogramas de raios-x a presença desta fase.
- Nos difratogramas de raios-x foi observada a presença de martensita, austenita retida, como já dito, e carbonetos dos tipos MC e  $M_{23}C_6$ . Ainda foi observada, de forma qualitativa, queda na quantidade de austenita retida com a realização do revenimento.

## 7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AKBARI, A.; MOHAMMADZADEH, R; TEMPLIER, C.; RIVIERE, J. P. Effect of the initial microstructure on the plasma nitriding behavior of AISI M2 high speed steel. **Surface and Coatings Technology**. [s.l.], v. 204, n. 24, p. 4114- 4120, 2010. Elsevier BV. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2010.05.042.

CHIAVERINI, V. **Tratamentos Térmicos das Ligas Ferrosas**. 2 ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais - ABM, 1987. 232p.

COLPAERT, Hubertus. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**. 4. ed. São Paulo:Blucher, 2008. 652 p. Edição revista e atualizada por André Luiz V. da Costa e Silva.

COUTINHO, Carlos Bottrel. **Materiais metálicos para engenharia**. Belo Horizonte: UFMG: Fundação Christiano Ottoni, 1992. 405p.

DOBZANSKI, L. A.; MATULA, G.; VÁREZ, A.; LEVENFELD, B.; TORRALBA, J. M. Fabrication methods and heat treatment conditions effect on tribological properties of high speed steels. **Journal of Materials Processing Technology**. [s.l.], v. 157-158, p. 324-330. Dez. 2004. Elsevier BV. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2004.09.051.

KRAUSS, G. **Steel: heat treating and processing principles**. Ohio: American Society for Metals – ASM International, 1990.

MOON, H.K.; LEE, K. B.; KWON, H. Influences of Co addition and austenitizing temperature on secondary hardening and impact fracture behavior in P/M high speed steels of W–Mo–Cr–V(–Co) system. **Materials Science and Engineering**. [s.l.], v. 474, p. 328-334. 2008. Elsevier BV. DOI: 10.1016/j.msea.2007.04.014.

MORELLI SERNA, MARILENE. **Quantificação e identificação de carbonetos no aço ferramenta AISI/SAE M2**. 2008. 108 p. Tese (Doutorado em Ciências na Área de

Tecnologia Nuclear – Materiais.) - INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES, São Paulo, 2008.

RAUTER, Raul Oscar. **Aços Ferramentas**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1974. 254p.

SARTORI, Carlos Humberto. **Influência dos tratamentos térmicos e tratamentos criogênicos na tenacidade do aço rápido AISI M2**. 2009. 142 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

SILVA, A. L. V. C.; MEI, P. R. **Aços e ligas especiais**. 3 ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2010. 648p.

VILLARES METALS S.A. (Sumaré). **Aços rápidos VWM2**. Disponível em:<[http://www.villaresmetals.com.br/portuguese/files/FT\\_11\\_VWM2.pdf](http://www.villaresmetals.com.br/portuguese/files/FT_11_VWM2.pdf)>. Acesso em: 14 fev. 2017.

VITRY, V; NARDONE, S.; BREYER, J. P.; SINNAEVE, M.; DELAUNOIS, F. Microstructure of two centrifugal cast high speed steels for hot strip mills applications. **Materials & Design**, [s.l.], v. 34, p. 372-378, fev. 2011. Elsevier BV. DOI: 10.1016/j.matdes.2011.07.041. Disponível em:<<http://api.elsevier.com/content/article/PII:S026130691100519X?httpAccept=text/xml>>. Acesso em: 15 mar. 2017.

ZEITUNE, L. H. **Efeito dos Parâmetros de Têmpera e Revenimento na Microestrutura e na Dureza de um Aço Ferramenta para Trabalho a Frio**. 2014. 123 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) - CEFET-MG, Belo Horizonte, 2014.

ZHOU, X. F; FANG, F.; LI, F.; JIANG, J. Q. Morphology and microstructure of M2C carbide formed at different cooling rates in AISI M2 high speed steel. **J Mater Sci**, [s.l.],

v. 46, n. 5, p.1196-1202, 16 set. 2010. Springer Science + Business Media. DOI:  
10.1007/s10853-010-4895-4.