



Dissertação de Mestrado

Leonardo Heluany Zeitune

**Efeito dos Parâmetros de Têmpera e Revenimento na
Microestrutura e na Dureza de um Aço Ferramenta
para Trabalho a Frio**

Belo Horizonte

Agosto de 2014



Leonardo Heluany Zeitune

**Efeito dos Parâmetros de Têmpera e Revenimento na
Microestrutura e na Dureza de um Aço Ferramenta
para Trabalho a Frio**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais do CEFETMG, como parte integrante dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Materiais.

Área de Concentração: Ciência e Desenvolvimento de Materiais

Linha de Pesquisa em Seleção, Processamento e Caracterização de Materiais

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Elaine Carballo Siqueira Corrêa

Co-orientador: Prof. Dr. Wellington Lopes

Belo Horizonte, agosto de 2014.



CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

***“EFEITO DOS PARÂMETROS DE TÊMPERA E
REVENIMENTO NA MICROESTRUTURA E NA
DUREZA DE UM AÇO FERRAMENTA PARA
TRABALHO A FRIO.”***

Autor: Leonardo Heluany Zeitune

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Elaine Carballo Siqueira Corrêa

A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Dissertação:

Prof^a. Dr^a. Elaine Carballo Siqueira Corrêa (ORIENTADORA)
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG

Prof^a. Dr^a. Maria Celeste Monteiro de Souza Costa
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG

Prof^a. Dr^a. Rachel Mary Osthues
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha esposa Andressa que sempre esteve ao meu lado e me apoiou fortemente em todos os momentos, do início ao fim, tornando-se essencial para a conclusão deste trabalho. Aos meus pais Kátia e Carmo e minha irmã Anna Carolina, que investiram em mim e acreditaram todo o tempo no meu sucesso. A minha “nova família” Elton, Vera, Danielle e Michelle, pelo apoio direto e indireto para me manter sempre animado e focado na conclusão deste curso.

AGRADECIMENTOS

Sou muito grato por sempre ter tido ao meu lado pessoas que me apoiaram, incentivaram e ajudaram sempre que necessário para que este sonho pudesse se tornar realidade. Primeiramente agradeço a Deus, por me conceder intelecto capaz e sabedoria para assimilar os ensinamentos que me foram ministrados.

Agradeço à minha orientadora, Professora Dra. Elaine Carballo Siqueira Corrêa pelo apoio, dedicação, inspiração, cuidado, correções e orientações extremamente assertivas, junto a sua imensa capacidade de ensinar.

Ao meu co-orientador, Prof. Dr. Wellington Lopes, que sempre esteve presente quando necessário para ajudar no bom desenvolvimento e qualidade deste projeto.

À Gerdau Ouro Branco, através dos gerentes Elton Queibson Moreira Maia e Ermelindo Divino Marques, que me apoiaram durante o curso, disponibilizando horários para que eu pudesse assistir às aulas, executar meus ensaios e escrever esta dissertação. Ao facilitador Eder Lúcio da Silva, do Laboratório Físico Químico, que disponibilizou o laboratório para que eu fizesse os ensaios de dureza, e toda sua equipe, que me ajudou com a preparação de amostras. Agradeço também a célula da Bateria de Coque 2, que seguiu as pontas na usina com segurança e qualidade total nos momentos nos quais eu estava dedicado ao mestrado.

Aos alunos do mestrado, Aline Silva Magalhães pelo apoio na realização dos ensaios, ensinamentos e disponibilidade, Suzanny Cristina Soares Martins pela ajuda na preparação de amostras e realização do MEV, e aos alunos da graduação Marcelo Fonseca Pinto e Anna Paula Ataíde Pimenta pela preparação de amostras.

Ao Prof. Dr. Augusto Cesar Bezerra, pela disponibilidade do equipamento para execução das análises em microscópio eletrônico de varredura.

Ao Prof. MSc. Joel Romano Brandão, pelo apoio na manutenção dos equipamentos realizados nos ensaios.

RESUMO

Os aços ferramenta para trabalho a frio são materiais caracterizados pela possibilidade de obtenção de uma elevada resistência ao desgaste aliada a uma boa tenacidade. Essa combinação atrativa de propriedades está associada à microestrutura desenvolvida no processamento, em geral composta de martensita revenida e carbonetos diversos. A natureza, a presença e a quantidade desses carbonetos dependem de sua composição química e das condições de processamento às quais o metal tenha sido submetido. Dentro deste contexto, neste trabalho foi avaliada a influência dos parâmetros de tratamento térmico na microestrutura e na dureza de um aço ferramenta para trabalho a frio. Os tratamentos térmicos empregados foram a têmpera, considerando três temperaturas de austenitização distintas, e o revenimento, utilizando também temperaturas diversas. A análise do material foi conduzida por meio de microscopias óptica e eletrônica de varredura, difração de raios-X e dureza. Os resultados mostraram a influencia tanto das temperaturas de têmpera como de revenimento na presença de carbonetos e de austenita retida no material, assim como nas suas propriedades finais. Foi realizada ainda uma análise quantitativa de alguns microconstituintes no aço ferramenta para trabalho a frio.

Palavras-chave: aço ferramenta para trabalho a frio, tratamentos térmicos, microestrutura, dureza.

ABSTRACT

Cold work tool steels are characterized by the possibility of obtaining high wear resistance and good toughness. This attractive combination of properties is associated with the microstructure developed during thermal processing, usually consisting of tempered martensite and carbides. The nature, the presence and the amount of these carbides depend on the chemical composition of the material and on the operation conditions. In this study, the influence of heat treatment parameters in the microstructure and the hardness of a cold work tool steel was evaluated. Quenching and tempering were conducted, considering three austenitizing temperatures and several tempering temperatures. The evaluation of the microstructure was carried out through optical and scanning electron microscopy, X-ray diffraction and hardness tests. The results showed the influence of the quenching and tempering temperatures in the presence of carbides and retained austenite in the material, as well as the final properties. A quantitative analysis of the microstructure in the cold work tool steel was also performed.

Keywords: cold work tool steel, heat treatment, microstructure, hardness.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1	Representação da formação da martensita.....	29
Figura 3.2	Representação esquemática das morfologias usuais das plaquetas de martensita em função do teor de carbono: em ripas e em agulhas.....	30
Figura 3.3	Exemplos de microestruturas contendo martensita com morfologias distintas.....	31
Figura 3.4	Efeito do teor de carbono na dureza do aço com desenvolvimento de estrutura martensítica e de estrutura perlítica.....	32
Figura 3.5	Tipos de curvas dureza x temperatura de revenimento obtidas para aços ferramenta nas quais podem ser observados comportamentos distintos.....	34
Figura 3.6	Efeito do elemento de liga na curva dureza Vickers x temperatura de revenimento (°C) – ocorrência de endurecimento secundário.....	35
Figura 3.7	Representação esquemática da morfologia de alguns carbonetos usualmente presentes nos aços ferramenta.....	34
Figura 3.8	Dureza de alguns carbonetos presentes nos aços ferramenta...	38
Figura 3.9	Influência do tratamento térmico e da tensão de tração na quantidade de austenita retida em um aço ferramenta para trabalho a frio (0,7%C; 2,15%Mn; 0,54%Si; 0,44%Mo; 0,16%V) temperado e temperado e revenido em diferentes temperaturas.....	46
Figura 3.10	Difratogramas do aço ferramenta AISI D2 temperado em diferentes meios de resfriamento.....	47
Figura 3.11	Difratogramas do aço ferramenta AISI D2 tratado termicamente em quatro grupos de operações.....	49
Figura 3.12	Imagens (microscopia óptica) do aço AISI D2 submetido a tratamentos térmicos distintos.....	50
Figura 3.13	Imagens (microscopia eletrônica de varredura) do aço AISI D2 submetido a tratamentos térmicos distintos.....	51

Figura 3.14	Análise quantitativa dos carbonetos (e outros constituintes) do aço AISI D2 submetido a tratamentos térmicos distintos.....	52
Figura 3.15	Varição da dureza com o tempo de permanência a -196°C no tratamento criogênico do aço 80 Cr Mo12 5.....	53
Figura 4.1	Fluxograma geral do trabalho experimental realizado.....	55
Figura 4.2	Fluxograma detalhado do trabalho a cerca do material tratado termicamente.....	56
Figura 4.3	Representação e imagem, como exemplo, do corpo de prova utilizado nos tratamentos térmicos de têmpera e revenimento...	57
Figura 4.4	Representação e imagem, como exemplo, da amostra de aço ferramenta levada á caracterização mecânica e microestrutural	58
Figura 4.5	Imagens do forno utilizado e de corpos de prova, como exemplos, ainda envolvidos com o arame após o resfriamento em óleo.....	59
Figura 4.6	Imagens, como exemplos, de amostras do aço ferramenta temperado após preparação metalográfica completa, evidenciando a ocorrência de descarbonetação superficial associada ao tratamento térmico.....	61
Figura 4.7	Imagens do microscópio óptico utilizado para caracterização microestrutural das amostras.....	62
Figura 4.8	Imagens de um dos microscópios eletrônicos de varredura utilizados para caracterização microestrutural das amostras.....	63
Figura 4.9	Imagens do microscópio eletrônico de varredura utilizado para caracterização microestrutural das amostras – análise química.	63
Figura 4.10	Rede empregada para determinação da fração % dos constituintes no aço ferramenta para trabalho a frio superposta em uma imagem de microestrutura (MO) como exemplo.....	65
Figura 4.11	Rede empregada para determinação da fração % dos constituintes no aço ferramenta para trabalho a frio superposta em uma imagem de microestrutura (MEV) como exemplo.....	66
Figura 4.12	Imagens do difratômetro de raios-X utilizado para caracterização microestrutural das amostras.....	67
Figura 4.13	Imagens do durômetro utilizado para caracterização mecânica	

	das amostras.....	68
Figura 5.1	Fotomicrografias (MO e MEV) do aço ferramenta no estado inicial.....	70
Figura 5.2	Mapas de composição química do aço ferramenta como adquirido.....	71
Figura 5.3	Elementos presentes no material como adquirido.....	72
Figura 5.4	Difratograma do aço ferramenta no estado inicial, como adquirido.....	72
Figura 5.5	Difratogramas do aço ferramenta AISI D2 temperado e revenido.....	73
Figura 5.6	Difratogramas de um aço ferramenta para trabalho (1,4%C; 4,7%Cr; 3,5%Mo;3,7%V) submetido a distintos tratamentos térmicos.....	73
Figura 5.7	Dureza do aço ferramenta temperado em óleo em função da temperatura de austenitização.....	75
Figura 5.8	Fotomicrografias (MO e MEV) do aço ferramenta temperado em óleo com temperatura de austenitização de 900°C.....	76
Figura 5.9	Fotomicrografias (MO e MEV) do aço ferramenta temperado em óleo com temperatura de austenitização de 1000°C.....	77
Figura 5.10	Fotomicrografias (MO e MEV) do aço ferramenta temperado em óleo com temperatura de austenitização de 1100°C.....	78
Figura 5.11	Mapas de composição química do aço ferramenta temperado em óleo com temperatura de austenitização de 900°C.....	80
Figura 5.12	Elementos presentes no aço ferramenta temperado em óleo com temperatura de austenitização de 900°C.....	80
Figura 5.13	Mapas de composição química do aço ferramenta temperado em óleo com temperatura de austenitização de 1100°C.....	81
Figura 5.14	Elementos presentes no aço ferramenta temperado em óleo com temperatura de austenitização de 1100°C.....	81
Figura 5.15	Difratogramas do aço ferramenta temperado com diferentes temperaturas de austenitização.....	82
Figura 5.16	Análise quantitativa dos carbonetos no aço no estado inicial e temperado empregando diferentes temperaturas de	

	austenitização.....	84
Figura 5.17	Dureza do aço ferramenta temperado em óleo com temperatura de austenitização de 900°C e revenido em diferentes temperaturas.....	86
Figura 5.18	Dureza do aço ferramenta temperado em óleo com temperatura de austenitização de 1000°C e revenido em diferentes temperaturas.....	86
Figura 5.19	Dureza do aço ferramenta temperado em óleo com temperatura de austenitização de 1100°C e revenido em diferentes temperaturas.....	87
Figura 5.20	Comparação da dureza do aço ferramenta temperado com distintas temperaturas de austenitização e revenido em temperaturas diversas.....	88
Figura 5.21	Curvas dureza – temperatura de revenimento para o aço AISI D2.....	90
Figura 5.22	Curvas dureza – temperatura de revenimento para o aço AISI D2 temperado de forma convencional e submetido a tratamento subzero.....	90
Figura 5.23	Fotomicrografias (MO e MEV) do aço ferramenta temperado com temperaturas de austenitização de 900°C e revenido a 200°C e a 400°C.....	91
Figura 5.24	Fotomicrografias (MO e MEV) do aço ferramenta temperado com temperaturas de austenitização de 900°C e revenido a 450°C e a 475°C.....	92
Figura 5.25	Fotomicrografias (MO e MEV) do aço ferramenta temperado com temperaturas de austenitização de 900°C e revenido a 500°C e a 525°C.....	93
Figura 5.26	Fotomicrografias (MO e MEV) do aço ferramenta temperado com temperaturas de austenitização de 900°C e revenido a 550°C e a 575°C.....	94
Figura 5.27	Fotomicrografias (MO e MEV) do aço ferramenta temperado com temperaturas de austenitização de 900°C e revenido a 600°C.....	95

Figura 5.28	Fotomicrografias (MO e MEV) do aço ferramenta temperado com temperaturas de austenitização de 1000°C e revenido a 200°C e a 400°C.....	96
Figura 5.29	Fotomicrografias (MO e MEV) do aço ferramenta temperado com temperaturas de austenitização de 1000°C e revenido a 450°C e a 475°C.....	97
Figura 5.30	Fotomicrografias (MO e MEV) do aço ferramenta temperado com temperaturas de austenitização de 1000°C e revenido a 500°C e a 525°C.....	98
Figura 5.31	Fotomicrografias (MO e MEV) do aço ferramenta temperado com temperaturas de austenitização de 1000°C e revenido a 550°C e a 575°C.....	99
Figura 5.32	Fotomicrografias (MO e MEV) do aço ferramenta temperado com temperaturas de austenitização de 1000°C e revenido a 600°C.....	100
Figura 5.33	Fotomicrografias (MO e MEV) do aço ferramenta temperado com temperaturas de austenitização de 1100°C e revenido a 200°C e a 400°C.....	101
Figura 5.34	Fotomicrografias (MO e MEV) do aço ferramenta temperado com temperaturas de austenitização de 1100°C e revenido a 450°C e a 475°C.....	102
Figura 5.35	Fotomicrografias (MO e MEV) do aço ferramenta temperado com temperaturas de austenitização de 1100°C e revenido a 500°C e a 525°C.....	103
Figura 5.36	Fotomicrografias (MO e MEV) do aço ferramenta temperado com temperaturas de austenitização de 1100°C e revenido a 550°C e a 575°C.....	104
Figura 5.37	Fotomicrografias (MO e MEV) do aço ferramenta temperado com temperaturas de austenitização de 1100°C e revenido a 600°C.....	105
Figura 5.38	Mapas de composição química do aço ferramenta temperado a 900°C e revenido a 525°C.....	106
Figura 5.39	Elementos presentes no aço ferramenta temperado a 900°C e	

	revenido a 525°C.....	106
Figura 5.40	Mapas de composição química do aço ferramenta temperado a 1100°C e revenido a 525°C.....	107
Figura 5.41	Elementos presentes no aço ferramenta temperado a 1100°C e revenido a 525°C.....	107
Figura 5.42	Análise quantitativa dos carbonetos no aço temperado com temperatura de austenitização de 900°C e revenido em temperaturas diversas.....	111
Figura 5.43	Análise quantitativa dos carbonetos no aço temperado com temperatura de austenitização de 1000°C e revenido em temperaturas diversas.....	112
Figura 5.44	Análise quantitativa dos carbonetos no aço temperado com temperatura de austenitização de 1100°C e revenido em temperaturas diversas.....	113
Figura 5.45	Difratogramas do aço ferramenta temperado com temperatura de austenitização de 900°C e revenido a 200°C e 400°C.....	114
Figura 5.46	Difratogramas do aço ferramenta temperado com temperatura de austenitização de 900°C e revenido a 450°C e 475°C.....	114
Figura 5.47	Difratogramas do aço ferramenta temperado com temperatura de austenitização de 900°C e revenido a 500°C e 525°C.....	115
Figura 5.48	Difratogramas do aço ferramenta temperado com temperatura de austenitização de 900°C e revenido a 550°C e 575°C.....	115
Figura 5.49	Difratogramas do aço ferramenta temperado com temperatura de austenitização de 900°C e revenido a 600°C.....	116
Figura 5.50	togramas do aço ferramenta temperado com temperatura de austenitização de 1100°C e revenido a 200°C e 400°C.....	116
Figura 5.51	Difratogramas do aço ferramenta temperado com temperatura de austenitização de 1100°C e revenido a 450°C e 475°C.....	117
Figura 5.52	Difratogramas do aço ferramenta temperado com temperatura de austenitização de 1100°C e revenido a 500°C e 525°C.....	117
Figura 5.53	Difratogramas do aço ferramenta temperado com temperatura de austenitização de 1100°C e revenido a 550°C e 575°C.....	118
Figura 5.54	Difratogramas do aço ferramenta temperado com temperatura	

de austenitização de 1100°C e revenido a 600°C..... 118

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1	Habilidade dos elementos de liga de conferir determinadas características aos aços ferramentas.....	24
Tabela 3.2	Classificação AISI dos aços ferramenta.....	24
Tabela 3.3	Composições químicas e principais aplicações dos aços ferramentas para trabalho a frio temperáveis em óleo.....	41
Tabela 3.4	Composições químicas e principais aplicações dos aços ferramentas para trabalho a frio de média liga e temperáveis ao ar.....	43
Tabela 3.5	Composições químicas e principais aplicações dos aços ferramentas para trabalho a frio de alto carbono e alto cromo...	44
Tabela 3.6	Fração volumétrica de carbonetos e quantidade de austenita retida no aço AISI D2 temperado em diferentes condições.....	48
Tabela 3.7	Resultados de tratamentos com resfriamento convencional e criogênicos em diferentes condições para o aço 80 Cr Mo12 5.	53
Tabela 4.1	Composição química do aço ferramenta para trabalho a frio empregado.....	54
Tabela 4.2	Temperaturas de austenitização e tempo de encharque utilizados nos tratamentos térmicos de têmpera.....	59
Tabela 4.3	Temperaturas e tempo de permanência utilizados nos tratamentos térmicos de revenimento.....	60
Tabela 4.4	Condições nas quais foi realizada a caracterização microestrutural (MO, MEV e DRX) do aço ferramenta.....	60
Tabela 4.5	Composição do reagente utilizado.....	62
Tabela 5.1	Dureza do aço ferramenta no estado inicial, como adquirido.....	69
Tabela 5.2	Análise quantitativa dos constituintes no aço ferramenta no estado inicial.....	74
Tabela 5.3	Dureza do aço ferramenta temperado em óleo austenitizado em diferentes temperaturas.....	74
Tabela 5.4	Análise quantitativa dos carbonetos no aço temperado empregando diferentes temperaturas de austenitização.....	83

Tabela 5.5	Dureza do aço ferramenta temperado em óleo com diferentes temperaturas de austenitização e revenido em temperaturas distintas.....	85
Tabela 5.6	Análise quantitativa dos carbonetos no aço temperado em óleo com temperatura de austenitização de 900°C e revenido.....	108
Tabela 5.7	Análise quantitativa dos carbonetos no aço temperado em óleo com temperatura de austenitização de 1000°C e revenido.....	108
Tabela 5.8	Análise quantitativa dos carbonetos no aço temperado em óleo com temperatura de austenitização de 1100°C e revenido Análise quantitativa dos carbonetos no aço temperado em óleo com temperatura de austenitização de 1100°C e revenido.....	108

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	18
2. OBJETIVOS	20
2.1. Objetivo Geral	20
2.2. Objetivos Específicos	20
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
3.1. Características Gerais dos Aços Ferramenta	21
3.2. Microestrutura dos Aços Ferramenta	28
3.3. Aços Ferramenta para Trabalho a Frio	38
3.3.1. Classes de aços ferramenta para trabalho a frio	40
3.3.2. Tratamentos térmicos nos aços ferramenta para trabalho a frio	44
4. MATERIAL E MÉTODOS	54
4.1. Material	54
4.2. Descrição Geral do Trabalho Realizado	54
4.3. Corpos de Prova	57
4.4. Tratamentos Térmicos	58
4.5. Caracterização Microestrutural do Material	60
4.6. Caracterização Mecânica do Material	67
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	69
5.1. Caracterização do Aço Ferramenta no Estado Inicial	69
5.2. Caracterização Mecânica e Microestrutural do Aço Ferramenta Temperado	74
5.3. Caracterização Mecânica e Microestrutural do Aço Ferramenta Temperado e Revenido	85
6. CONCLUSÕES	118
REFERÊNCIAS	120

1. INTRODUÇÃO

Os aços ferramenta são um grupo de materiais metálicos desenvolvidos para confecção de matrizes, moldes, ferramentas de corte, dentre outros componentes, a serem empregados em operações de fabricação conduzidas em peças de características diversas, como usinagem, estampagem e forjamento. De maneira geral, independente da aplicação, entre as principais propriedades requeridas a esses materiais podem ser citadas elevada dureza, boa tenacidade e resistência ao desgaste. De acordo com o subgrupo específico, outras propriedades podem ser ainda demandadas, como, por exemplo, resistência mecânica a altas temperaturas, usinabilidade e bom acabamento superficial.

Essa combinação atrativa de propriedades está associada à microestrutura desenvolvida no processamento. Neste caso, o termo processamento envolve todas as etapas relativas à sua fabricação, desde a fundição, passando pelas operações de transformação mecânica para obter a forma desejada do produto e chegando ao tratamento térmico final. A microestrutura é, portanto, composta de martensita revenida e carbonetos diversos, cujos detalhes se dão de acordo com a composição química, com as condições de operação anteriores e com os parâmetros dos tratamentos térmicos de têmpera e revenimento posteriormente conduzidos. Especificamente em relação aos carbonetos, podem ser verificados diversos tipos, diferenciados não só pela composição química, mas também pela morfologia, pela forma de distribuição e pelas propriedades, essas últimas de maneira individual e como um todo, no componente de aço ferramenta.

Os aços ferramenta para trabalho a frio são ligas utilizadas principalmente em operações de conformação mecânica, a temperaturas próximas da temperatura ambiente, cujas condições requerem alta resistência ao desgaste e boa tenacidade. São materiais caracterizados por uma menor tendência a distorções e trincas no tratamento de têmpera sendo, por isso, eventualmente denominados aços indeformáveis. Incluem três classes gerais, sendo que a diferença básica entre essas são os teores e os tipos dos elementos de liga, que afetam a temperabilidade do material e a distribuição dos carbonetos incorporados na microestrutura do material endurecido.

Dentro deste contexto, neste trabalho foram avaliados os efeitos dos parâmetros de temperatura dos tratamentos térmicos de têmpera e de revenimento na microestrutura e nas propriedades mecânicas de um aço ferramenta para trabalho a frio de alto teor de carbono apresentando como elementos de liga cromo, molibdênio e vanádio.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

Analisar os efeitos das temperaturas de têmpera e de revenimento na microestrutura e na dureza de um aço ferramenta para trabalho a frio com cromo, molibdênio e vanádio.

2.2. Objetivos Específicos

Os objetivos específicos do trabalho desenvolvido são listados a seguir.

- Analisar a influência da temperatura de austenitização empregada na têmpera na microestrutura e na dureza do aço ferramenta.
- Avaliar os efeitos da temperatura de revenimento na microestrutura e na dureza do aço ferramenta previamente temperado.
- Verificar a influência da temperatura de austenitização na têmpera no comportamento do material no revenimento subsequente.
- Realizar uma análise semiquantitativa dos constituintes do material após as condições de tratamentos térmicos empregadas.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Características Gerais dos Aços Ferramenta

Os aços ferramenta podem ser definidos como um grupo de ligas ferrosas relativamente complexas desenvolvidas para a fabricação de componentes utilizados em operações diversas, como usinagem, injeção, estampagem e forjamento, dentre outras.

Historicamente, apesar da primeira ferramenta fabricada com ferro datar de mais de seis mil anos e de que o tratamento térmico de aquecimento e resfriamento brusco em água, ou seja, a têmpera, ser empregado em ferramentas de ligas ferrosas para elevar a dureza há cerca de três mil anos (TOTTEN, 2007), o desenvolvimento de aços para ferramentas foi completamente empírico até o final da primeira metade do século XX (SILVA; MEI, 2010). A seleção, o projeto e o processamento, portanto, o desenvolvimento de forma científica desse grupo de materiais metálicos se deu a partir da evolução no conhecimento das relações entre as características e o desempenho dos mesmos, especialmente acerca do efeito dos elementos de liga na microestrutura e nas propriedades.

Os aços ferramenta apresentam, em geral, elevado teor de carbono e outros elementos de liga, como, por exemplo, o cromo, o molibdênio, o vanádio e o tungstênio, que se combinam com o carbono formando uma série de precipitados com características diversas (CALLISTER; 2008). Por outro lado, a presença desses elementos, em teores médios ou elevados, exige um controle cuidadoso do processamento do metal, conduzindo as ligas a um custo relativamente alto (COUTINHO, 1992). Neste caso, entende-se por processamento todas as etapas relativas à sua fabricação, desde a fundição, passando pela transformação mecânica para obter a forma desejada do produto e chegando ao tratamento térmico final (CHIAVERINI, 2005).

Estando entre as ligas ferrosas sujeitas às mais rigorosas solicitações entre todas as aplicações (SILVA; MEI, 2010), uma série de características são consideradas fundamentais para os aços ferramenta: dureza a temperatura ambiente, resistência

ao desgaste, temperabilidade, tenacidade, resistência mecânica, dureza a quente e controle do tamanho de grão (CHIAVERINI, 2005).

Em relação à dureza, ressalta-se que a mesma à temperatura ambiente deve ser superior à da peça sobre a qual o aço ferramenta exercerá a ação de corte, de conformação mecânica etc. Sabe-se que a dureza depende essencialmente da composição química da liga e dos tratamentos térmicos realizados. De acordo com a aplicação do componente, o processamento é conduzido de tal forma que o aço ferramenta atinge o máximo valor possível de dureza ou não, de acordo com a necessidade de utilização e com as outras propriedades requeridas.

A resistência ao desgaste do aço ferramenta pode ser afetada por vários fatores, como a composição química e o processamento realizado, a suscetibilidade do material de endurecer por encruamento afetando a superfície da ferramenta e fatores considerados a parte do aço, como a presença e o tipo de lubrificante em serviço, o tipo de operação à qual a ferramenta será empregada, o calor gerado, dentre outros.

A temperabilidade é apontada como um requisito indispensável, considerando o fato de que, como mencionado, com poucas exceções, os aços ferramenta devem ser tratados termicamente. Neste caso, uma maior penetração de dureza pode garantir maior uniformidade de propriedades mecânicas nas secções do material, fenômeno favorecido pelo aumento do teor de carbono e a presença da maioria dos elementos de liga.

A tenacidade é, geralmente, uma característica desejável em qualquer ferramenta, mas muitas vezes difícil de ser relacionada a uma condição de elevada dureza. Os fatores que interferem na tenacidade do aço ferramenta são ocorrência de tensões residuais internas, que podem ser produzidas na têmpera, no reaquecimento rápido após a mesma ou durante uma operação de retificação inadequada; encruamento; granulação grosseira; segregação anormal, dentre outros.

Uma elevada resistência mecânica é considerada indispensável, visto que os aços para ferramentas devem apresentar a capacidade de suportar esforços sem o aparecimento de falhas ou mesmo de deformação permanente.

A dureza a quente é uma característica importante para aquelas situações nas quais é observado um aumento na temperatura durante a utilização do componente fabricado em aço ferramenta ou quando as condições de serviço são a temperaturas elevadas. Nessas situações, além de dureza a quente, espera-se alta resistência ao desgaste e capacidade de manutenção de forma e dimensões do material da ferramenta. A composição química do aço é o fator determinante para a dureza a quente, especialmente os elementos de liga: tungstênio em primeiro lugar, o molibdênio a seguir e depois, cobalto, cromo e vanádio.

A exibição de um tamanho de grão de dimensões reduzidas é uma característica desejável aos aços ferramenta, uma vez que uma estrutura com granulação refinada é considerada com propriedades mecânicas superiores.

Como mencionado em algumas situações, para que as condições ou propriedades descritas anteriormente sejam atingidas, dois fatores são decisivos: a composição química, envolvendo tanto o teor de carbono como a presença e teor dos elementos de liga, e os tratamentos térmicos. Em relação à composição química, o carbono é considerado elemento essencial, enquanto os demais se associam a características específicas (CHIAVERINI, 2005), conforme os exemplos da Tabela 3.1. Em relação aos tratamentos térmicos, as operações de têmpera e revenimento são as mais importantes, uma vez que levam às microestruturas finais desejadas. Maiores detalhes são apresentados na seção 3.2.

Existem diversos sistemas para classificar os aços ferramenta, sendo o mais usual aquele desenvolvido pelo *American Iron and Steel Institute* (AISI), no qual essas ligas são organizadas em grupos baseados em composição química, aplicação final ou tratamento térmico (TOTTEN, 2007). Os principais grupos são os aços temperáveis em água, os aços resistentes ao choque, os aços para trabalho a frio, os aços para trabalho a quente, os aços rápidos, os aços para moldes e os aços para fins especiais, conforme a Tabela 3.2 (COUTINHO, 1992).

Tabela 3.1 – Habilidade dos elementos de liga de conferir determinadas características aos aços ferramentas.

Características	Elementos de Liga
resistência ao desgaste	W, Mo, Co, V, Cr, Mn
dureza a quente	V, W, Mo, Cr, Mn
profundidade de endurecimento	Mn, Mo, Cr, Si, Ni, V
empenamento mínimo	Mo, Cr, Mn
tenacidade pelo refino de grão	V, W, Mo, Mn, Cr

Fonte: CHIAVERINI, 2005.

Tabela 3.2. Classificação AISI dos aços ferramenta.

Grupo	Símbolo (e Tipo)
aços temperáveis em água	W
aços resistentes ao choque	S
aços para trabalho a frio	O – temperáveis em óleo A – de média liga, temperáveis ao ar D – de alto carbono e alto cromo
aços para trabalho a quente	H (H1 – H19), à base de cromo; H (H20 – H39), à base de tungstênio; H (H40 – H59), à base de molibdênio
aços rápidos	T – à base de tungstênio M – à base de molibdênio
aços para moldes	P (P1 – P19), de baixo carbono P (P20 – P39), outros tipos
aços para fins especiais	L – de baixa liga F – carbono-tungstênio

Fonte: COUTINHO, 1992.

Neste caso, observa-se que os aços ferramenta são designados por letras (seguidas de números), típicas de cada um dos grupos (KRAUSS, 1990). A seguir são descritas as principais características de cada um deles, com exceção dos aços ferramenta para trabalho a frio, que serão apresentados em uma seção à parte.

a) Aços temperáveis em água - W

Esses aços são caracterizados por apresentarem médio e alto teores de carbono com pequenas quantidades de cromo e/ou vanádio (COUTINHO, 1992), sendo que o primeiro elemento aparece para elevar a temperabilidade e a resistência ao desgaste e o segundo elemento para promover a obtenção de grão mais fino, que contribui para o aumento da tenacidade do material (RAUTER, 1974). Dentre os materiais ferrosos para ferramentas, os aços temperáveis em água são aqueles que exibem a menor quantidade de elementos de liga (KRAUSS, 1990), sendo, portanto, apontados como os de menor custo em relação aos demais e aplicados a situações nas quais não são exigidos maiores valores de resistência ao desgaste, de dureza, de tenacidade e de temperabilidade (CHIAVERINI, 2005). Dessa forma, exemplos de utilização comuns são alargadores, brocas, serras de fita, mandris, dentre outros. Um aço ferramenta temperável em água típico é o aço AISI W2, que exibe teor de carbono entre 0,6% e 1,40% e 0,25% de vanádio (KRAUSS, 1990).

b) Aços resistentes ao choque - S

Os aços resistentes ao choque são ligas que apresentam teor de carbono relativamente baixo em comparação com outros tipos de aços ferramenta, em torno de 0,5%, e quantidade de elementos de liga ligeiramente superior aos aços temperáveis em água (KRAUSS, 1990). Os principais elementos são o silício, o cromo, o molibdênio e, em algumas situações, o tungstênio e o manganês (COUTINHO, 1992). A principal propriedade final neste caso, de acordo com sua própria denominação, é a tenacidade, possibilitando seu emprego para fabricação de talhadeiras, lâminas de tesouras, matrizes para forjamento rotativo e outros (CHIAVERINI, 2005). Apresentam ainda temperabilidade moderada e alta resistência à fadiga (RAUTER, 1974, SILVA; MEI, 2010). Um exemplo de aço ferramenta resistente ao choque é o aço AISI S1, com 0,5% de carbono, 1,50% de cromo e 2,50% de tungstênio (KRAUSS, 1998).

c) Aços rápidos – T ou M

Os aços rápidos, considerados como os principais materiais utilizados em ferramentas, apresentam em sua maioria alto teor de carbono, assim como tungstênio, molibdênio, vanádio e cobalto em quantidades elevadas (PIPPEL et al., 1999), podendo chegar a 20%, 9%, 5% e 12%, respectivamente (CHIAVERINI,

2005). Esse elevado percentual de elementos de liga presentes na composição desses aços confere a estes a capacidade de formar estruturas complexas adquirindo uma dureza superior a 63 HRC mediante tratamento térmico (KRAUSS, 1998). Sua característica principal é a capacidade de ser empregado em ferramentas de usinagem sob velocidades de operação e outras condições que podem elevar a temperatura da região cortante a cerca de 500°C a 600°C sem prejudicar suas propriedades mecânicas, apresentando a chamada dureza a quente (CHIAVERINI, 2005; COUTINHO, 1992, REED-HILL, 1982). Além da capacidade de manter a dureza em elevadas temperaturas, os aços rápidos exibem em geral resistência ao desgaste, boa tenacidade e estabilidade dimensional (SILVA; MEI, 2010; MOON et al., 2008). São divididos em dois subgrupos, de acordo com o elemento de liga principal: tungstênio ou molibdênio. Em relação ao grupo associado ao tungstênio, o aço AISI T1 é o mais usual, exibindo 0,75% de carbono, 4% de cromo, 1% de vanádio e 18% de molibdênio (KRAUSS, 1990). Já para os aços rápidos ao molibdênio, que nas últimas décadas vem apresentando maior aceitação comercial que o anterior, o aço AISI M2 é o mais popular, com teor de carbono entre 0,85% a 1% de carbono, 4% de cromo, 2% de vanádio, 6% de tungstênio e 5% de molibdênio (SILVA; MEI, 2010, KRAUSS, 1990). São empregados na fabricação de ferramentas para operações de usinagem, além de cilindros de laminação.

d) Aços para trabalho a quente - H

Aços desenvolvidos para aplicações em componentes que trabalhem em contato com materiais a temperaturas elevadas, que podem chegar a 1100°C ou mais, como, por exemplo, processos de extrusão e forjamento a quente e fundição sob pressão (RAUTER, 1974). A combinação de médio teor de carbono e relativamente alto teor de elementos de liga leva este material a apresentar alta dureza, resistência ao impacto, resistência ao desgaste, resistência ao amaciamento durante a exposição longa e repetida a operações em elevadas temperaturas e resistência à formação de trincas devidas aos ciclos de temperatura aplicados ou seja, resistência à fadiga térmica (KRAUSS, 1990; COUTINHO, 1992; DOBRZANSKI et al., 2001; MEDVEDEVA et al., 2009). São subdivididos em três subgrupos: aços à base de cromo, aços à base de tungstênio e aços à base de molibdênio (CHIAVERINI, 2005). Os primeiros exibem teores de cromo entre 3,25% e 4%, apresentando alta temperabilidade; os segundos teores de tungstênio e cromo entre 9% e 12% e entre

2% e 12%, respectivamente, o que leva a uma alta retenção de dureza à quente; e os terceiros, com 5% a 8% de molibdênio, mostram grande resistência à formação de trincas (COUTINHO, 1992). Por fim, esses aços ferramenta são empregados na fabricação de matrizes para forjamento e extrusão a quente, punções, mandris, matrizes para fundição (COUTINHO, 1992).

e) Aços para moldes - P

Esses aços ferramenta são principalmente empregados na fabricação de moldes utilizados na manufatura de materiais poliméricos, possuindo capacidade de suportar níveis de pressão elevados em temperaturas intermediárias, na faixa de 175°C a 200°C (COUTINHO, 1992). O cromo e o níquel são os principais elementos de liga desses materiais, caracterizados também por um baixo teor de carbono, normalmente entre 0,07% e 0,1% (RAUTER, 1974). Dentre as características mais importantes desses aços podem ser destacadas a usinabilidade, a dureza superficial e resistência ao desgaste (neste caso, quando submetidos ao tratamento de cementação), baixa distorção nos tratamentos térmicos e termomecânicos e bom acabamento superficial (COUTINHO, 1992; CHIAVERINI, 1995; KRAUSS, 1990).

e) Aços para fins especiais – L e F

Os aços para fins especiais compreendem dois grupos, sendo o primeiro caracterizado por apresentar boa resistência mecânica e elevada tenacidade (SILVA; MEI, 2010), exibindo uma quantidade relativamente baixa de elementos de liga, apresentando principalmente cromo, podendo conter em algumas situações teores reduzidos de vanádio, molibdênio ou níquel (RAUTER, 1974). Neste caso, a quantidade de carbono se situa em torno de 1%. Como aplicações usuais, pode-se citar tesouras, brocas para rochas, ferramentas para marcenaria, dentre outros (SILVA; MEI, 2010). Já o segundo grupo de aços ferramenta para fins especiais, denominado carbono-tungstênio, exibe teores dos elementos que o classificam entre 1% e 1,25% e entre 1,25% e 3%, respectivamente (RAUTER, 1974). Esses aços apresentam como características principais alta resistência ao desgaste, manutenção de gume cortante e baixa resistência ao amaciamento por efeito da temperatura, tendo como emprego típico fiação de fios e tubos de dimensões reduzidas e ferramentas de usinagem de rolo (CHIAVERINI, 2005; SILVA; MEI, 2010; RAUTER, 1974).

3.2. Microestrutura dos Aços Ferramenta

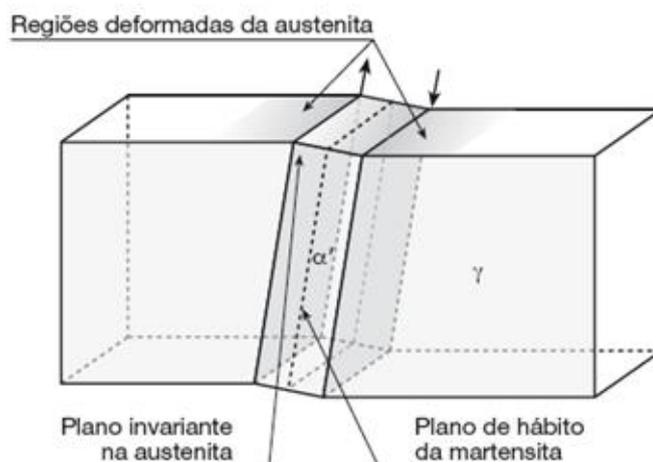
A microestrutura final pretendida para os aços ferramenta é, em geral, constituída basicamente por uma matriz de martensita revenida, dura e relativamente tenaz, obtida nos tratamentos térmicos de têmpera e revenimento, e carbonetos (KHEIRANDISH et al., 2010), também duros e estáveis, desenvolvidos em operações anteriores (carbonetos retidos ou primários) e durante o processo de revenimento subsequente à têmpera (carbonetos secundários).

A martensita (α') é uma fase metaestável, e também um constituinte, com morfologia de plaquetas e estrutura cristalina tetragonal de corpo centrado, produto da transformação da austenita a velocidades de resfriamento consideradas elevadas no tratamento térmico de têmpera, podendo ser ainda desenvolvida na martêmpera. Seu mecanismo de transformação é adifusional, ou seja, a martensita apresenta ao final de sua formação a mesma composição química da austenita que a originou, essa última denominada fase parente (COLPAERT, 2008; KRAUSS, 1990).

A transformação martensítica, classificada como displaciva (BHADESHIA; HONEYCOMBE, 2006), se dá através de cisalhamento, caracterizado pela movimentação cooperativa dos átomos na estrutura, em contraste com a movimentação atômica individual típica das transformações associadas ao fenômeno de difusão, classificadas como reconstitutivas (KRAUSS, 1990; BHADESHIA; HONEYCOMBE, 2006). Na Figura 3.1 é mostrada uma representação desse processo de cisalhamento e distorção superficial com o desenvolvimento de uma plaqueta de martensita (COLPAERT, 2008). Ressalta-se que os modelos usuais de deformação/distorção observada na estrutura do material durante a transformação martensítica envolvem tanto o mecanismo de escorregamento de planos atômicos como o mecanismo de maclação. Por fim, menciona-se que a mudança de fase nessa transformação ocorre pela movimentação da interface que separa a fase austenítica da fase martensítica, sendo que a natureza dos movimentos atômicos individuais que ocorrem na região que constitui essa interface não é conhecida (REED-HILL, 1982). Ainda em relação à formação da martensita nos aços, a transformação é atérmica, ocorrendo abaixo de uma dada temperatura, denominada temperatura de início da transformação M_i . A extensão

dessatransformação é proporcional ao resfriamento, ou seja, ao decréscimo de temperatura, não dependendo do tempo, até que a temperatura de fim da transformação M_f seja atingida (TOTTEN, 2007).

Figura 3.1 – Representação da formação da martensita.

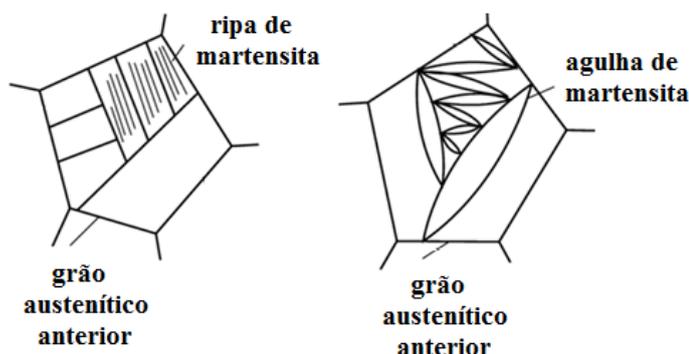


Fonte: COLPAERT, 2008.

O teor de carbono influencia tanto as características estruturais da martensita, cujo aumento leva a uma maior tetragonalidade da mesma, como através da alteração das temperaturas de início e fim de sua transformação, que tendem a diminuir com a quantidade do elemento mencionado (SILVA e MEI, 2010). Neste caso, para aços com teor de carbono a partir de cerca de 0,3%, a temperatura de fim da transformação pode se situar em valores inferiores à temperatura ambiente (KRAUSS, 1990). Dessa forma, especialmente para aços com alto teor de carbono, porções significantes de austenita podem permanecer após o término do tratamento térmico, denominada austenita retida ou residual.

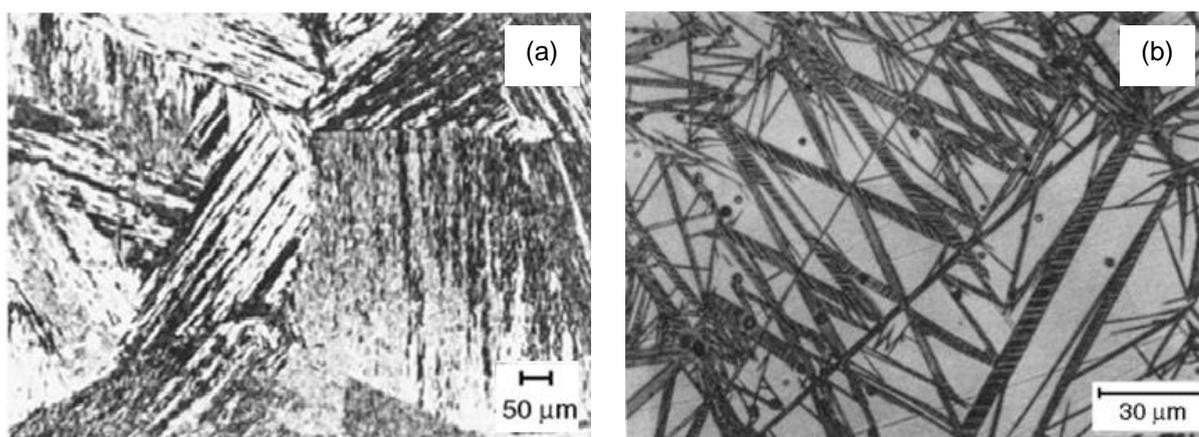
Em termos de morfologia, o teor de carbono implica no constituinte apresentando forma de ripas ou agulhas (ASM HANDBOOK, 2004), cuja representação esquemática é exibida na Figura 3.2. Na Figura 3.3 são mostrados exemplos de microestrutura de aços temperados contendo martensita com morfologia de ripas e com morfologia de agulhas (KRAUSS, 1990; ASM HANDBOOK, 2004).

Figura 3.2 – Representação esquemática das morfologias usuais das plaquetas de martensita em função do teor de carbono: em ripas e em agulhas.



Fonte: ASM HANDBOOK, 2004 (traduzida).

Figura 3.3 – Exemplos de microestruturas contendo martensita com morfologias distintas.



(a) martensita em ripas, desenvolvida no aço com 0,2%C e (b) martensita em agulhas, formada no aço com 1,2%C e 2,0%Ni.

Fonte: KRAUSS, 1990; ASM HANDBOOK, 2004 (adaptada).

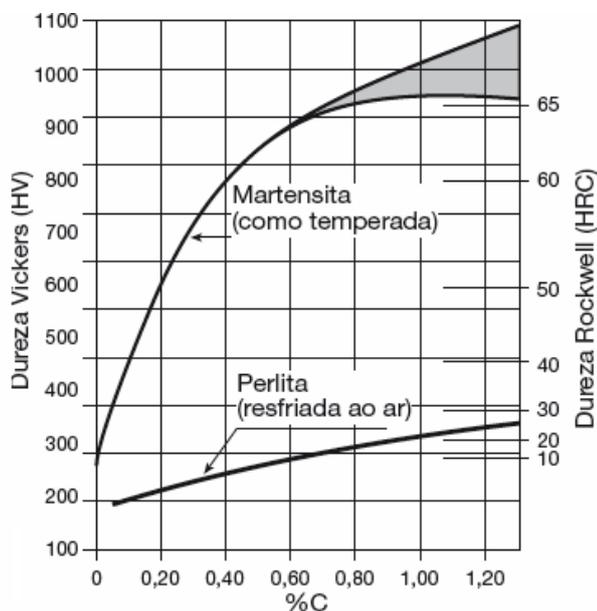
A presença de elementos de liga nos aços, similarmente ao teor de carbono, também afeta a temperatura de início e fim da transformação martensítica, cujos efeitos têm sido considerados através de equações relacionando a temperatura (principalmente de início de formação) e os elementos e suas quantidades. Dentre as diversas equações apresentadas na literatura, destacam-se as chamadas equações de Andrews, que envolvem classicamente a presença de carbono, manganês, cromo, níquel e molibdênio e posteriormente o teor de silício e cobalto na liga (KRAUSS, 1990). Considerando o fenômeno de diminuição da temperatura de

fim da transformação até níveis abaixo da temperatura ambiente, os elementos de liga gamagêneos tendem a elevar a quantidade de austenita retida no aço, independente do teor de carbono. Por fim, em geral, com algumas exceções como o cobalto e o alumínio, a presença de elementos de liga tende a retardar o início e o fim a transformação da austenita em perlita, resultando em uma maior “facilidade” de obter durante o resfriamento a estrutura martensítica (CHIAVERINI, 1995).

Considerando as propriedades mecânicas, uma das características mais importantes da estrutura martensítica é sua elevada dureza, que pode atingir de 65HRC a 67HRC, de acordo com a composição química da liga e os parâmetros do tratamento de têmpera(CHIAVERINI, 2005). A dureza da martensita é usualmente justificada por meio de uma série de fatores: ocorrência de distorção do reticulado cristalino; morfologia das plaquetas, cuja estrutura fina proporciona barreiras ao mecanismo de deformação plástica de deslizamento; presença de tensões internas; elevada densidade de discordâncias, geradas para acomodar as plaquetas do constituinte; e precipitação e retenção de partículas submicroscópicas de carboneto de ferro, que impediriam o escorregamento de planos atômicos, interagindo com as discordâncias e reduzindo sua mobilidade (CHIAVERINI, 1995; KRAUSS, 1990; DIETER, 1988). Na Figura 3.4 pode ser visualizada uma comparação dos resultados de dureza obtidos para amostras de aço carbono com diferentes teores de carbono tratadas de forma que seja desenvolvida perlita ou martensita no aço (COLPAERT, 2008). Em adição à elevada dureza, a martensita é apontada como uma estrutura frágil e de baixa ductilidade (SILVA; MEI, 2010).

Em função das propriedades da estrutura martensítica, especialmente a tenacidade reduzida, as peças temperadas costumam ser submetidas a um tratamento térmico subsequente, denominado revenimento. Esse tratamento consiste no aquecimento do material até uma dada temperatura, cuja escolha se dá de acordo com as propriedades finais desejadas e, portanto, com a microestrutura requerida. Uma vez que a martensita é um constituinte metaestável, com o aquecimento, várias transformações podem ser observadas, com tendência a aproximar o material do seria a condição de equilíbrio, podendo inclusive levar à ocorrência de ferrita, cementita e, se for o caso, outros carbonetos compostos por elementos de liga (COLPAERT, 2008).

Figura 3.4 – Efeito do teor de carbono na dureza do aço com desenvolvimento de estrutura martensítica e de estrutura perlítica.



Fonte: COLPAERT, 2008.

Em termos de transformações microestruturais, três estágios básicos podem ser identificados no revenimento em geral dos aços (KRAUSS, 1990). O primeiro envolve a formação de carboneto de transição (carboneto épsilon) e consequente redução no teor de carbono da martensita desenvolvida anteriormente. O segundo compreende a transformação da austenita retida em ferrita e cementita. Por fim, o terceiro está associado à substituição do carboneto épsilon e da martensita de baixo teor de carbono por cementita e ferrita. Para o caso de aços com a presença de elementos de liga, especialmente aqueles contendo titânio, cromo, molibdênio, tungstênio, vanádio e/ou nióbio, pode ser observada ainda a ocorrência de precipitação de carbonetos desses elementos em uma faixa de temperaturas relativamente elevada, fenômeno denominado endurecimento secundário (CHIAVERINI, 2005). A presença de certos elementos de liga contribui ainda para retardar a diminuição da dureza do material com a elevação da temperatura de tratamento térmico durante o revenimento.

Dentro deste contexto, um dos principais produtos do revenimento é a chamada martensita revenida, desenvolvida a partir da precipitação de carbonetos durante o reaquecimento do aço. Trata-se de um constituinte composto por uma matriz

martensítica de mais baixo teor de carbono e carbonetos diversos dispersos, cujos detalhes irão depender tanto da composição química da liga como da temperatura de tratamento escolhida para o revenimento.

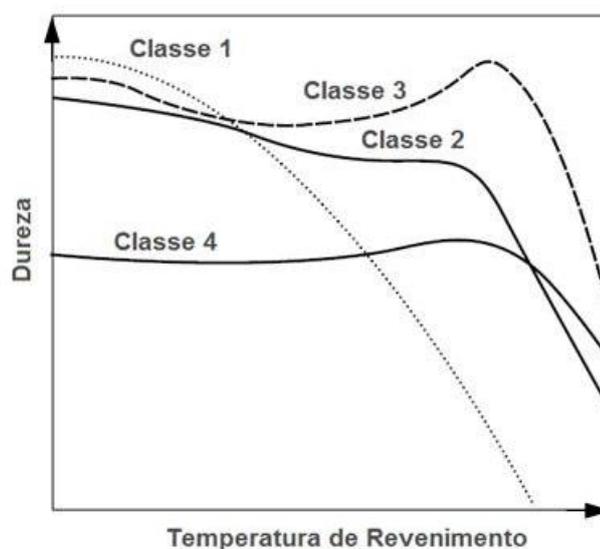
Conforme mencionado anteriormente, os aços ferramenta são ligas cujas propriedades são baseadas na formação de carbonetos de elementos de transição, como o cromo, o molibdênio, o tungstênio e o vanádio (KRAUSS, 1990). Durante a solidificação, o trabalho a quente ou o recozimento, esses elementos aparecem tanto em solução sólida na matriz austenítica, como combinados como carbonetos. No tratamento térmico de têmpera, os elementos dissolvidos na austenita ficam retidos e essa é transformada em martensita. Durante o revenimento subsequente, a formação dos carbonetos se dá a partir da precipitação tanto na porção de austenita retida como na matriz martensítica. O tipo de carboneto, a morfologia e a quantidade irá depender do teor de carbono do aço ferramenta, de quais e da quantidade dos elementos de liga presentes e das características dos tratamentos térmicos realizados no material (DURAND-CHARRE, 2004).

No caso das propriedades mecânicas dos aços ferramenta ao final do processamento, ou seja, após a têmpera e o revenimento, quatro tipos de básicos de comportamento em termos da influência da temperatura de revenimento na dureza da liga podem ser observados, descritos como classe 1, classe 2, classe 3 e classe 4, conforme a Figura 3.5 (TOTTEN, 2007; HETZNER; GEERTRUYDEN, 2008).

O comportamento denominado de classe 1 é típico de aços ferramenta ao carbono ou de baixa liga, no qual o decréscimo gradual da dureza com a temperatura escolhida para o revenimento é verificado, sendo microestruturalmente associado à precipitação e coalescência da cementita na operação. O comportamento do tipo classe 2, observado para os aços ferramenta de média a alta liga, é aquele no qual a presença dos elementos de liga retarda a precipitação dos carbonetos e o decréscimo da dureza. Já os comportamentos denominados de classe 3 e de classe 4 são aqueles nos quais, além da presença dos elementos de liga retardarem o decréscimo de dureza, o endurecimento secundário é observado, sendo que a diferença entre os dois está relacionada basicamente ao teor de carbono que, para

materiais cuja curva seria da classe 4, é menor. Ressalta-se que, no caso dos aços ferramenta, o endurecimento secundário é resultado não somente da precipitação de carbonetos, mas também da transformação da austenita retida em martensita no resfriamento.

Figura 3.5 – Tipos de curvas dureza x temperatura de revenimento obtidas para aços ferramentanas quais podem ser observados comportamentos distintos.

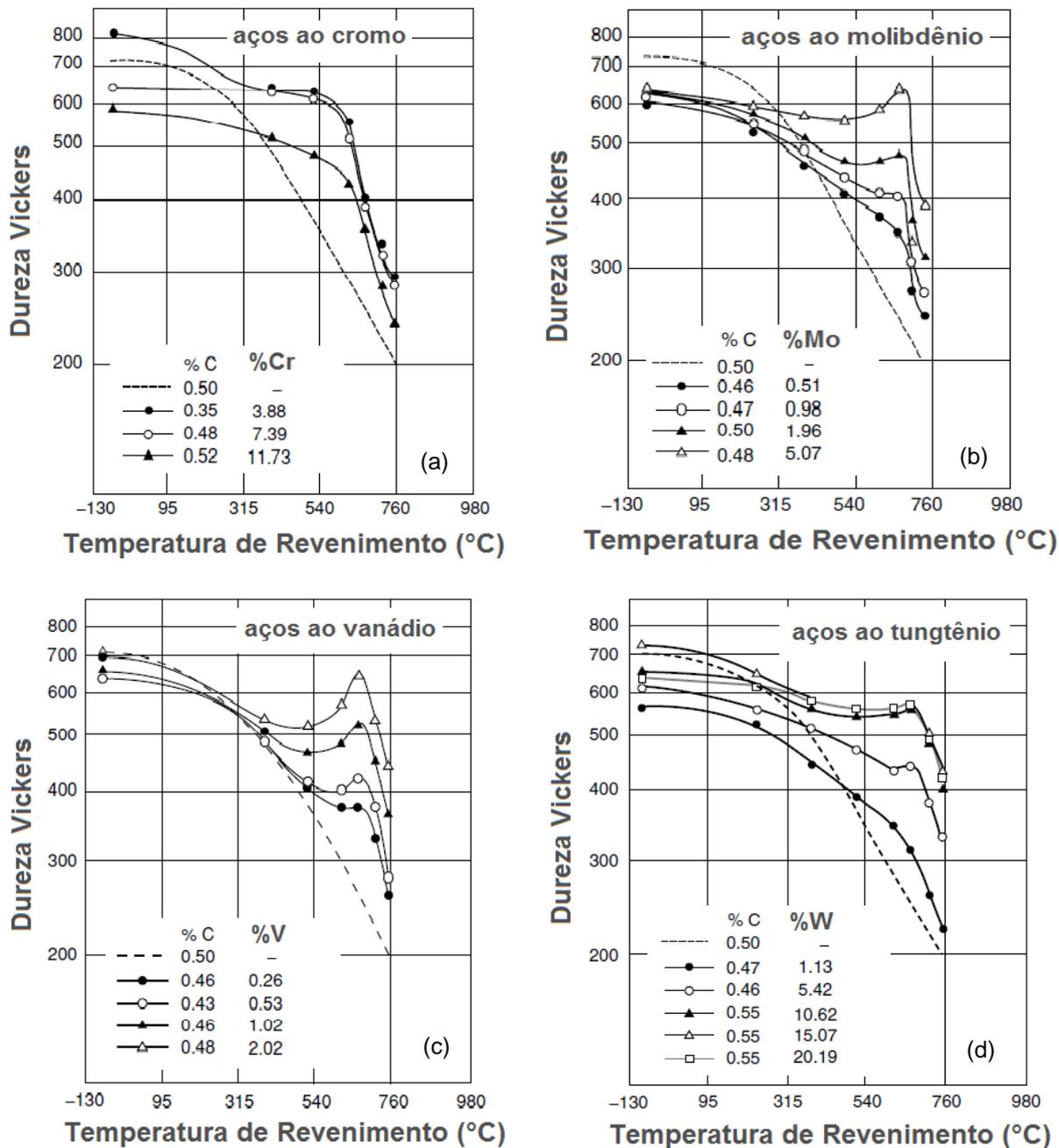


Fonte: TOTTEN, 2007 (traduzida).

Na Figura 3.6 são apresentadas curvas dureza Vickers x temperatura de revenimento nas quais podem ser verificados os efeitos da presença de elementos de liga como cromo, molibdênio, vanádio e tungstênio, envolvendo situações nas quais a queda de dureza é retardada e a ocorrência do fenômeno de endurecimento secundário (TOTTEN, 2007).

Os principais tipos de carbonetos desenvolvidos nos aços ferramenta são mencionados a seguir, acompanhados de suas características fundamentais, como estrutura cristalina, composição química e morfologia, entre outras (KRAUSS, 1990; TOTTEN, 2007; VITRY et al., 2012). A nomenclatura empregada considera a letra M para designar os elementos de transição que compõem o precipitado, como vanádio, cromo, tungstênio e molibdênio, podendo tanto ser um único elemento químico como um grupo de elementos, por exemplo os carbonetos VC, $Cr_{23}C_6$ e $(CrFe)_7C_3$ (KRAUSS, 1990).

Figura 3.6 – Efeito do elemento de liga na curva dureza Vickers x temperatura de revenimento (°C) – ocorrência de endurecimento secundário.



(a) aço ao cromo, (b) aço ao molibdênio, (c) aço ao vanádio e (d) aço ao tungstênio

Fonte: TOTTEN, 2007 (adaptada).

a) Carboneto do tipo MC

Precipitado que apresenta estrutura cristalina cúbica de faces centradas, com morfologia globular e espessa, aparecendo tanto de forma associada como isolada,

no interior ou nos contornos de grão. O principal elemento químico presente é o vanádio, podendo conter ainda molibdênio, tungstênio e cromo. Além de ser resistente à dissolução, a porção que entra em solução sólida precipita novamente durante o endurecimento secundário no revenimento. É considerado um dos carbonetos de dureza mais elevada.

b) Carboneto do tipo M_2C

Este tipo de carboneto exibe estrutura cristalina hexagonal e morfologia acicular ou lamelar, surgindo associado/em grupo, em regiões interdendríticas. Trata-se de um composto rico em tungstênio ou molibdênio, podendo apresentar ainda cromo, ferro e vanádio, que geralmente surge no revenimento. Em termos de dissolução, dentre os elementos mencionados, o cromo é o que aparentemente entra em solução sólida durante o processamento.

c) Carboneto do tipo M_3C

Precipitado com estrutura ortorrômbica, grupo do qual faz parte a cementita. Em geral, os demais elementos químicos que podem constituir o mesmo, além do ferro, são o manganês, o cromo e, de forma menos usual, em menor proporção, tungstênio, molibdênio e vanádio. Este tipo de carboneto é verificado em aços ferramenta considerados de baixa liga para trabalho a frio e de alta liga para trabalho a quente.

d) Carboneto do tipo M_6C

Carboneto com estrutura cristalina cúbica de faces centradas, presente na configuração de lamelas finas, como uma espécie de “espinha de peixe”, aparecendo associado/em grupos nas regiões nas quais o resfriamento é mais brusco, ou seja, próximo à superfície dos componentes. É formado principalmente por molibdênio e tungstênio, podendo ainda exibir quantidades moderadas de cromo, ferro, cobalto e vanádio. Aparece nos aços rápidos e é extremamente resistente à abrasão.

e) Carboneto do tipo M_7C_3

Composto com estrutura cristalina hexagonal e, similarmente aos carbonetos M_6C , surge de maneira associada com morfologia análoga a uma “espinha de peixe”, porém com as lamelas mais grossas. Os principais elementos formadores deste tipo

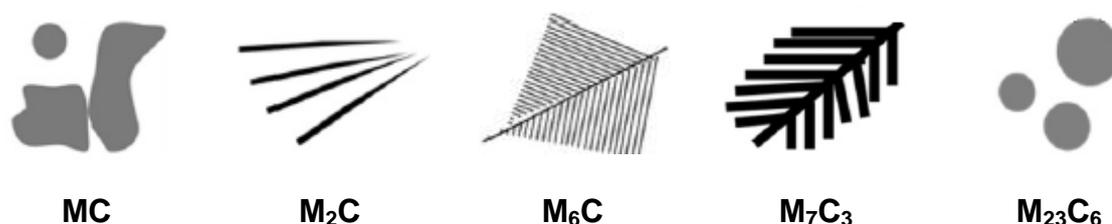
de carboneto são o ferro e o cromo, podendo ainda conter de maneira discreta molibdênio, vanádio e tungstênio. Trata-se de um precipitado de alta dureza e resistente à abrasão, de difícil dissolução a altas temperaturas, observado em aços com alto teor de cromo, como os aços rápidos, especialmente após o tratamento de revenimento.

e) Carboneto do tipo $M_{23}C_6$

Carboneto com estrutura cristalina cúbica de faces centradas, tendo como elemento químico básico o cromo, que pode ser substituído pelo ferro combinado ao tungstênio, ao molibdênio e ao vanádio. Sua morfologia é de pequenos glóbulos isolados, distribuído na matriz de maneira relativamente homogênea. Está presente em aços ferramenta de alto teor de cromo e em todos os aços rápidos.

Na Figura 3.7 são exibidas as representações esquemáticas da morfologia dos carbonetos MC, M_2C , M_6C , M_7C_3 e $M_{23}C_6$ (VITRY et al., 2012).

Figura 3.7 – Representação esquemática da morfologia de alguns carbonetos usualmente presentes nos aços ferramenta.

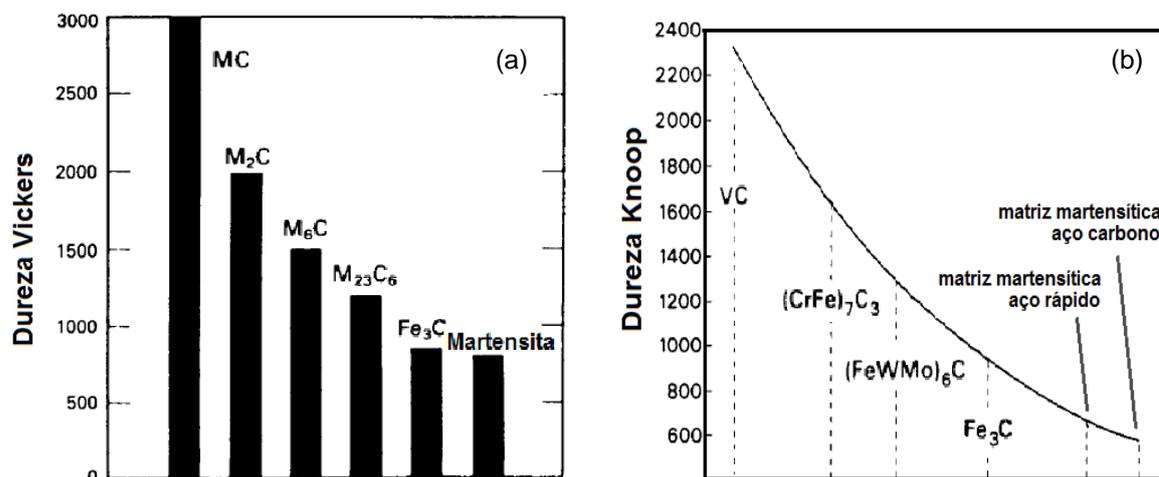


Fonte: VITRY et al., 2013 (adaptada).

Na Figura 3.8 são mostrados gráficos por meio dos quais podem ser verificados os valores de dureza para carbonetos diversos, comparados entre si e com a estrutura martensítica que, a princípio, seria desenvolvida na matriz do material na têmpera (KRAUSS, 1990). Considerando inicialmente o comportamento mostrado na Figura 3.8 (a), observa-se que os carbonetos do tipo MC apresentariam a maior dureza, seguidos dos tipos M_2C , M_6C e $M_{23}C_6$, todos com valores superiores ao determinado para a martensita. Na Figura 3.8 (b) podem ser visualizados os valores de alguns

precipitados específicos, que envolvem a presença de vanádio, de cromo e ferro e de ferro, tungstênio e molibdênio.

Figura 3.8 – 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).

Quanto à identificação e quantificação dos carbonetos, estas podem ser realizadas por meio de diversas técnicas, como metalografia, empregando ou não ataque químico específico para determinados tipos de carbonetos, difração de raios-X, análise química dos resíduos de carbonetos extraídos, análise química empregando a microsonda de feixe de elétrons acoplada a um microscópio eletrônico de varredura e difração por elétrons retroespalhados (*electron backscatter diffraction* EBSD) (KRAUSS, 1990; HETZNER; GEERTRUYDEN, 2008).

3.3. Aços Ferramenta para Trabalho a Frio

Os aços ferramenta para trabalho a frio são materiais caracterizados, em geral, pela exibição de elevadas dureza, resistência ao desgaste e tenacidade (KRAUSS, 1990; ARSLAN et al., 2011). Os efeitos dos tratamentos térmicos nessas ligas metálicas, em termos de alterações de forma e dimensões, ou seja, distorções, podem ser

considerados pouco acentuados em comparação aos demais grupos de aços ferramenta. Dessa forma, costumam ser apontados como “indeformáveis”, sendo indicados para aplicações nas quais um cuidadoso controle dimensional é exigido (CHIAVERINI, 2005; SILVA; MEI, 2010).

Considerando as propriedades já mencionadas, os aços ferramenta para trabalho a frio são utilizados na fabricação de componentes a serem empregados em operações de conformação mecânica, corte ou rebarbação, a temperaturas próximas da temperatura ambiente (KRAUSS, 1990; SILVA; MEI, 2010). Esses aços apresentam uma ampla gama de aplicações, como, por exemplo, lâminas de corte para guilhotinas, matrizes de forjamento, matrizes de estampagem, cilindros para laminação a frio, alargadores, punções, brochas, dentre outros (ARSLAN et al., 2011; CHIAVERINI, 2005). Comparando com os demais grupos de aços ferramenta, as ligas para trabalho a frio são apontadas como as mais importantes dessa classe de materiais (BOURITHIS et al., 2006).

Esses materiais são subdivididos basicamente em três classes: aços temperáveis em óleo, designados pela letra O; aços de média liga e temperáveis ao ar, indicados pela letra A; e aços de alto carbono e alto cromo, nomeados com a letra D. Todas as classes apresentam alto teor de carbono, com o objetivo de produzir as elevadas dureza e resistência ao desgaste requeridas para as aplicações no trabalho a frio, mas diferem em termos da presença de elementos de liga que, por sua vez, afetam na temperabilidade do material e na distribuição dos carbonetos incorporados à estrutura martensítica produzida na têmpera (KRAUSS, 1990). Como consequência, outras propriedades, como a tenacidade, podem variar. Em termos de composição química, são aços ao cromo, ao vanádio, ao cromo-tungstênio, ao cromo vanádio etc. (ARSLAN et al., 2011).

Considerando o desenvolvimento dos carbonetos nos aços ferramenta para trabalho a frio, a quantidade de carbono e de elementos de liga influencia na fração volumétrica desses precipitados (SILVA; MEI, 2010). A obtenção de uma distribuição relativamente uniforme de carbonetos, portanto, uma situação mais desejável para utilização final do componente, depende do estágio de processamento no qual os mesmos foram formados. Um exemplo dessa situação é o fato de que teores

elevados dos elementos de liga levam ao aumento da temperatura relativa ao limite de solubilidade do aço no estado líquido. Dessa forma, pode haver formação de carbonetos no estado líquido durante a etapa de solidificação, Esses carbonetos se apresentam, em geral, com dimensões elevadas, formas inadequadas e distribuição heterogênea, em comparação com a microestrutura que levaria às propriedades requeridas para a liga.

3.3.1. Classes de aços ferramenta para trabalho a frio

a) aços ferramenta para trabalho a frio temperáveis em óleo – O

Esses aços exibem elevado teor de carbono, entre 0,9% e 1,45%, e quantidade de elementos de liga relativamente baixa, porém superior à dos aços ferramenta temperáveis em água. Isso possibilita a obtenção de resultados eficientes na têmpera, ou seja, leva à formação de estruturas predominantemente martensíticas em peças de dimensões médias com resfriamento em óleo que, por sua vez, implica em menor perigo de trincas e modificações dimensionais (RAUTER, 1974; COUTINHO, 1992; SILVA; MEI, 2010). Os elementos de liga mais usuais são o cromo, o tungstênio, o manganês e o molibdênio.

Como propriedades, os aços ferramenta para trabalho a frio exibem elevada resistência ao desgaste, alta dureza e temperabilidade suficiente para promover uma boa profundidade de endurecimento no tratamento com resfriamento em óleo (KRAUSS, 1998). Por outro lado, apresentam baixa dureza a quente, não sendo recomendados para utilização nessa condição (CHIAVERINI, 2005).

Na Tabela 3.3 são mostradas composições químicas e principais aplicações de aços ferramenta para trabalho a frio temperáveis em óleo (COUTINHO, 1992). O aço ferramenta AISI O1 é o mais utilizado, apresentando menor tendência à formação de trincas na têmpera, devido à presença do cromo e do tungstênio (CHIAVERINI, 2005; COUTINHO, 1992). O aço ferramenta AISI O2 é aquele que exibe menor distorção no tratamento térmico, fenômeno associado ao teor de manganês, que reduz a temperatura de austenitização do material (COUTINHO, 1992). O aço AISI O6, devido à presença do silício, pode apresentar grafita, resultando uma melhor

usinabilidade na condição recozida e boa resistência ao desgaste na condição temperada (KRAUSS, 1998). Por fim, o aço AISI O7 é caracterizado pela maior resistência ao desgaste entre os aços ferramentas para trabalho a frio possuindo, entretanto, menor temperabilidade (COUTINHO, 1992).

Tabela 3.3- Composições químicas e principais aplicações dos aços ferramentas para trabalho a frio temperáveis em óleo

Tipo	Composição Química, %					Aplicações	
	AISI	C	W	Cr	Mn		Outros
O1		0,9	0,5	0,5	1,2	0,30 V	matrizes de recortar, matrizes de estiramento, facas de papel, folhas de tesoura, punções, tarraxas, alargadores, calibres, matrizes de estampagem e matrizes de dobramento
O2		0,9	-	0,4	1,6	0,30 V 0,30 Mo	matrizes de recortar, matrizes para prensagem, matrizes para rebarbação, matrizes para conformação a frio, cilindros de laminação a frio, alargadores, calibres, serras circulares, brochas
O6		1,5	-	0,3	0,8	0,25 Mo 1,00 Si	mandris, punções, matrizes para estampagem profunda, excêntricos, calibres, tarraxas, matrizes para cortar papel, gabaritos, hastes de ferramentas, guias
O7		1,2	1,5	0,6	1	0,40 V 0,30 Mo	mandris, alargadores, brocas, facas para papel, calibres, ferramentas para acabamento de latões, raspadores, punções de recortar e de puxar

Fonte: COUTINHO, 1992 (adaptada).

b) aços ferramenta para trabalho a frio de média liga e temperáveis ao ar – A

Os aços ferramenta para trabalho a frio de média liga e temperáveis ao ar apresentam, em sua maioria, elevados teores de carbono, de cromo, de manganês, de molibdênio e, em algumas situações, de vanádio (RAUTER, 1974). Sua

composição química possibilita a realização de têmpera completa em seções de dimensões elevadas com resfriamento menos severo, ao ar (KRAUSS, 1998; SILVA; MEI, 2010).

Como características gerais, esses materiais, além da elevada temperabilidade, exibem alta dureza, alta resistência ao desgaste e alta tenacidade (CHIAVERINI, 2005), sendo esta última uma de suas propriedades básicas (SILVA; MEI, 2010). A possibilidade de emprego de velocidades de resfriamento reduzidas, como é o caso do resfriamento ao ar, faz com que a distorção associada aos tratamentos térmicos seja minimizada e promove boa estabilidade dimensional (KRAUSS, 1998). Exibem custo menor que os aços ferramenta para trabalho a frio da classe D (RAUTER, 1974).

Na Tabela 3.4 podem ser observadas as composições químicas e principais aplicações de aços ferramenta para trabalho a frio de média liga e temperáveis ao ar (COUTINHO, 1992). Nessa classe, o aço AISI A2 é o mais utilizado, concorrendo com os aços da série O e os da série D, apresentando como vantagem a velocidade de resfriamento reduzida (SILVA E MEI, 2010).

c) aços ferramenta para trabalho a frio de alto carbono e alto cromo – D

Os aços ferramenta para trabalho a frio de alto carbono e alto cromo apresentam teores de carbono e de cromo entre 1,0% e 2,35% e igual ou acima de 12%, respectivamente (RAUTER, 1974). Podem ainda conter molibdenio, vanádio, tungstênio e cobalto.

Esses aços ferramenta foram desenvolvidos inicialmente com o objetivo de substituir os aços rápidos (COUTINHO, 1992; SILVA; MEI, 2010). Entretanto, devido à reduzida dureza quando empregados em operações de usinagem a altas velocidades de corte, foram destinados a outras aplicações. Apresentam alta resistência ao desgaste, propriedade associada à acentuada presença de carbonetos de cromo em sua microestrutura final, elevada temperabilidade e estabilidade em termos de forma e dimensões nos tratamentos térmicos em geral (RAUTER, 1974; CHIAVERINI, 2005; SILVA; MEI, 2010; COUTINHO, 1992). Por

outro lado, exibem baixa resistência a esforços bruscos, o que restringe o seu uso em ferramental submetido a cargas dinâmicas (RAUTER, 1974). Operações de usinagem ou polimento para melhorar o acabamento superficial dos componentes fabricados com esses aços são consideradas difíceis (KRAUSS, 1998). Devido à presença dos carbonetos diversos, essas ligas permitem aquecimento durante serviço até cerca de 450°C a 480°C.

Tabela 3.4 - Composições químicas e principais aplicações dos aços ferramentas para trabalho a frio de média liga e temperáveis ao ar.

Tipo	Composição Química, %					Aplicações
	AISI	C	Cr	Mo	Mn	
A2	1,0	5,0	1,0	1,0	0,30 V	matrizes para extrusão e para cunhagem, mandris, folhas de tesoura, calibres, matrizes de estampagem, punções, roletes formadores, cilindros de repuxar, buchas
A4	1,0	1,5	1,2	2,0	-	matrizes para recortar, punções, mandris, matrizes para dobramento, calibres, ferramentas para recartilhar, roletes formadores, fresas, facas
A7	2,4	5,2	1,2	-	4,5V	revestimento de moldes para tijolos, matrizes para trefilação em geral, revestimentos para equipamentos de jateamento com granalha, calibres, matrizes de estampagem
A8	0,5	5,0	1,4	-	1,25W1,0Si	folhas de tesoura, matrizes para prensagem a quente, matrizes para recortar, ferramentas de incisão, fresas, punções, moldes

Fonte: COUTINHO, 1992 (adaptada).

Na Tabela 3.5 são mostradas composições químicas e aplicações de alguns aços ferramenta para trabalho a frio de alto carbono e alto cromo (COUTINHO, 1992),

dentre os quais o aço AISI D2 é o mais empregado mundialmente (SILVA; MEI, 2010).

Tabela 3.5 - Composições químicas e principais aplicações dos aços ferramentas para trabalho a frio de alto carbono e alto cromo.

Tipo	Composição Química, %					Aplicações
	AISI	C	Cr	Mo	V	
D2	1,5	12,0	1,0	1,0	-	matrizes para conformação a frio, folhas de tesoura, ferramentas de brunir e de recartilhar, punções, calibres, , mandris, matrizes para recortar
D3	2,2	12,0	-	1,0	1,0 W	matrizes para conformação a frio, fieiras de trefilação, roletes formadores, ferramentas de brunir, punções, calibres, matrizes para prensa viradeira e para forjamento rotatório
D5	1,5	12,0	1,0	1,0	3,0 Co	matrizes para conformação a frio, para recortar, para cunhagem, para aparar, para trefilação, folhas de tesoura, punções, cutelaria de qualidade, cilindros
D7	2,3	12,0	1,0	4,0	-	matrizes para estampagem profunda, cilindros para desempenar, matrizes para trefilação, cilindros para laminador, ferramentas para matrizes cerâmicas

Fonte: COUTINHO, 1992 (adaptada).

3.3.2. Tratamentos térmicos nos aços ferramenta para trabalho a frio

Considerando os tratamentos térmicos a serem realizados para obtenção das propriedades finais do aço ferramenta para trabalho a frio, têmpera e revenimento, diversos aspectos vêm sendo investigados e devem ser considerados, dentre os quais se destacam: a ocorrência de austenita retida, envolvendo sua quantidade, e os carbonetos presentes durante e ao final de cada tratamento, incluindo suas

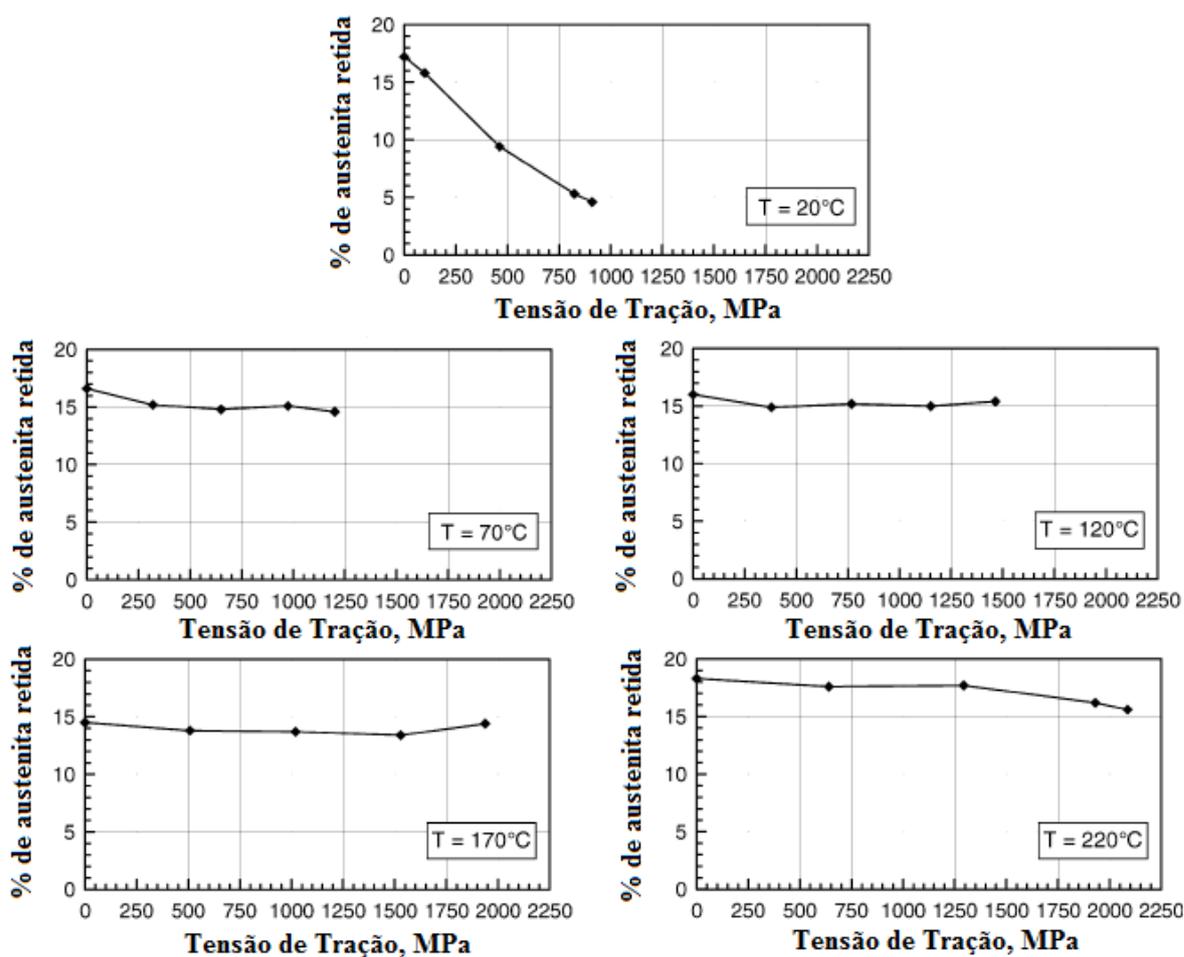
características estruturais, morfologia, composição química, sua fração volumétrica, tamanho e distribuição (TORKAMANI et al., 2014).

Avaliando inicialmente a têmpera e a possível ocorrência de austenita retida ao final do tratamento, o elevado teor de carbono e a presença dos elementos de liga, além de elevar a temperabilidade do aço, leva à diminuição das temperaturas de início e de fim da transformação martensítica, conforme descrito na seção 3.2, sendo essa última em geral em níveis abaixo de 0°C. Como resultado dessa alteração, ao final da têmpera, quando realizada à temperatura ambiente, quantidades diversas de austenita retida podem estar presentes no material. A austenita retida, diferentemente da microestrutura desejada para o aço ferramenta para trabalho a frio, apresenta dureza relativamente baixa, podendo reduzir a vida útil do produto e, nas condições de uso, pode ser transformada em martensita por deformação plástica, o que resultaria ainda em uma mudança volumétrica do componente durante a aplicação, podendo levar a alterações dimensionais e distorção (ARSLAN et al., 2011; DAS; DUTTA; RAY, 2010).

Na Figura 3.9 são exibidos resultados exemplificando a ocorrência de austenita retida em aços ferramenta para trabalho a frio. Neste caso, trata-se de um aço com teor de elementos de liga relativamente reduzido (0,7%C; 2,15%Mn; 0,54%Si; 0,44%Mo; 0,16%V), temperado a 820°C com resfriamento em óleo e revenido por 120 minutos nas seguintes temperaturas: 70°C, 120°C, 170°C e 220°C (KOKOSZA; PACYNA, 2005). Essas temperaturas foram escolhidas de forma que não fossem ultrapassados os valores indicados para o início da desestabilização ou decomposição da austenita no revenimento deste material. São mostrados dados relativos apenas ao processamento de têmpera (indicado pela temperatura posterior de 20°C), antes e após a deformação plástica (ensaio de tração), e dados relativos às operações de têmpera seguida de revenimento, também antes e após a deformação plástica. Percebe-se que, em geral, para as situações nas quais não foi realizada deformação plástica, independente do tratamento térmico, a quantidade de austenita retida se situou acima de 15% (com exceção da temperatura de 170°C), porém com resultados considerados próximos. Com o processamento mecânico, para o aço temperado, a quantidade de austenita retida foi alterada significativamente, ou seja, reduzida com a magnitude da deformação plástica

subsequente conduzida (representada no trabalho por meio do aumento na tensão de tração). Já para o aço revenido esse fenômeno não foi observado, sendo as mudanças nos resultados discretas. Dessa forma, foi concluído que, apesar da presença de austenita retida como resultado do tratamento térmico de têmpera, em função da realização de um revenimento posterior a temperaturas relativamente baixas, a mesma seria estabilizada em relação ao fenômeno de transformação martensítica por deformação plástica a frio.

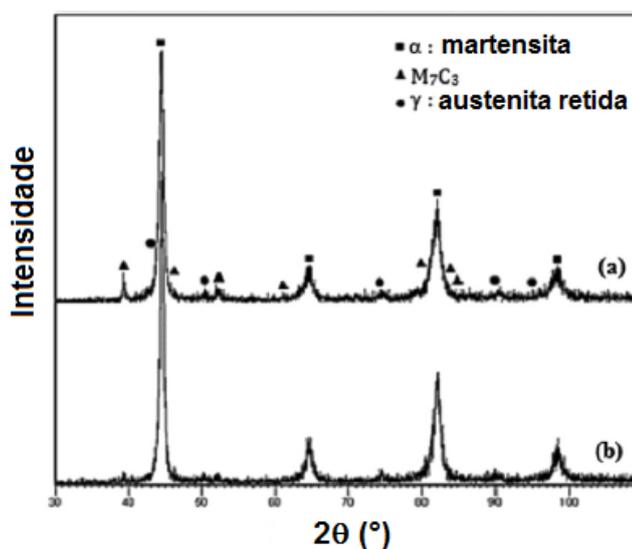
Figura 3.9 – Influência do tratamento térmico e da tensão de tração na quantidade de austenita retida em um aço ferramenta para trabalho a frio (0,7%C; 2,15%Mn; 0,54%Si; 0,44%Mo; 0,16%V) temperado e temperado e revenido em diferentes temperaturas.



Fonte: KOKOSZA; PACYNA, 2005 (traduzida).

Ainda analisando a ocorrência de austenita retida após a têmpera e também a presença de carbonetos, na Figura 3.10 são exibidos os difratogramas de amostras do aço ferramenta AISI D2 temperado em duas condições (TORKAMANI et al., 2014). Ambas envolveram austenitização a 1050°C por 45 minutos, seguida de resfriamento até 520°C com encharque por 10 minutos e dois tipos de resfriamento final, com tempo de imersão de 5 minutos: a) em banho de sal (60% de KOH e 40% de NaOH) a 230°C e b) em óleo sem agitação a 60°C. Para as duas condições de resfriamento são verificados picos referentes à estrutura martensítica, à austenita retida e à presença de carbonetos, nesse caso do tipo M_7C_3 . Esses dados possibilitaram a determinação das quantidades de austenita retida no material, exibidas na Tabela 3.6, acompanhadas das frações volumétricas de carboneto, calculadas por meio de metalografias semiquantitativa empregando imagens obtidas por microscopia óptica. Observa-se que o tratamento térmico de têmpera realizado com resfriamento em banho de sal levou a uma menor quantidade de austenita retida e maior fração volumétrica de carbonetos, sugerindo que a probabilidade do aço ferramenta para trabalho a frio AISI D2 tratado termicamente com esse procedimento romper seria reduzida.

Figura 3.10 – Difratogramas do aço ferramenta AISI D2 temperado em diferentes meios de resfriamento.



(a) óleo sem agitação a 60°C e (b) banho de sal a 230°C.

Fonte: TORKAMANI et al., 2014 (traduzida).

Tabela 3.6 – Fração volumétrica de carbonetos e quantidade de austenita retida no aço AISI D2 temperado em diferentes condições.

Meio de Resfriamento na Têmpera	Fração de Carbonetos	Quantidade de Austenita Retida
banho de sal a 230°C	9%	17%
óleo sem agitação a 60°C	6%	26%

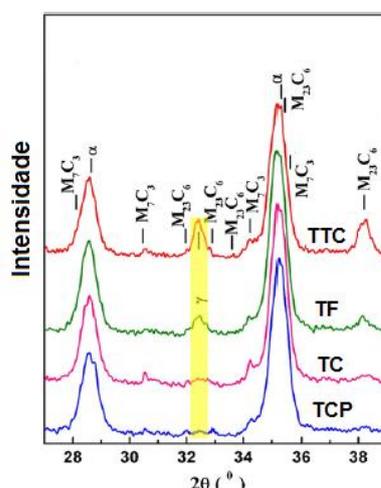
Fonte: TORKAMANI et al., 2014 (adaptada).

Considerando o fenômeno mencionado e exemplificado, um dos tratamentos térmicos que vem sendo investigado é o tratamento subzero, classificado como a frio ou criogênico, por meio do qual poderia ser diminuída a quantidade de austenita retida no aço ferramenta para trabalho a frio temperado (AMINI et al., 2010; DAS; DUTTA; RAY, 2010; DAS et al., 2010, DAS; RAY, 2012). Trata-se de uma operação na qual o material após ser submetido ao procedimento de tempera usual é resfriado a níveis de temperatura inferiores a 0°C. Empregando esse tratamento, realizado entre a têmpera e o revenimento, são obtidos melhores resultados, sendo observada ainda redução nos níveis de tensão residual e estrutura mais homogênea. O resfriamento sub zero, que pode chegar até -196°C, também é utilizado quando a estabilidade dimensional de ferramentas se situa em faixas muito estreitas de tolerância. Em termos de propriedades, a resistência ao desgaste aumenta consideravelmente com os resfriamentos criogênicos comparados ao convencional. A mudança estrutural mais significativa dos tratamentos criogênicos é a transição de austenita retida para martensita, mais dura e estável.

Das; Dutta; Ray (2010) realizaram um trabalho no qual compararam, dentre outros aspectos, a quantidade de austenita retida formada em um aço ferramenta AISI D2 empregando quatro grupos de operações: 1) tratamentos de têmpera e revenimento convencionais (TTC); 2) tratamento subzero, mencionado como tratamento a frio, com temperatura de resfriamento entre a têmpera e o revenimento de -75°C e tempo de encharque de 5 minutos (TF); 3) tratamento subzero, mencionado como criogênico, com temperatura de resfriamento de -125°C e tempo de encharque de 5 minutos (TC); 4) tratamento subzero, mencionado como criogênico profundo, com temperatura de resfriamento de -196°C e tempo de encharque de 2160 minutos (TCP). Para todas as situações, a têmpera foi conduzida a 1024°C, com encharque

de 30 minutos e resfriamento em óleo, e o revenimento a 210°C, por 120 minutos. Em relação à ocorrência de austenita retida, avaliada por difração de raios-X, na Figura 3.11 podem ser observados os difratogramas para as quatro condições descritas. Percebe-se que para os tratamentos denominados criogênico e criogênico profundo, nos quais o resfriamento sub zero foi mais acentuado, não aparecem picos referentes à estrutura austenítica, somente à martensítica e a carbonetos diversos, indicando que a quantidade desse constituinte ao final da operação seria bem reduzida. Após a análise quantitativa pela integração das áreas dos picos, foram determinadas as quantidades de 9,8% e de 4,6% de austenita retida utilizando os tratamentos convencional (TTC) e subzero frio (TF), respectivamente.

Figura 3.11 – Difratogramas do aço ferramenta AISI D2 tratado termicamente em quatro grupos de operações.

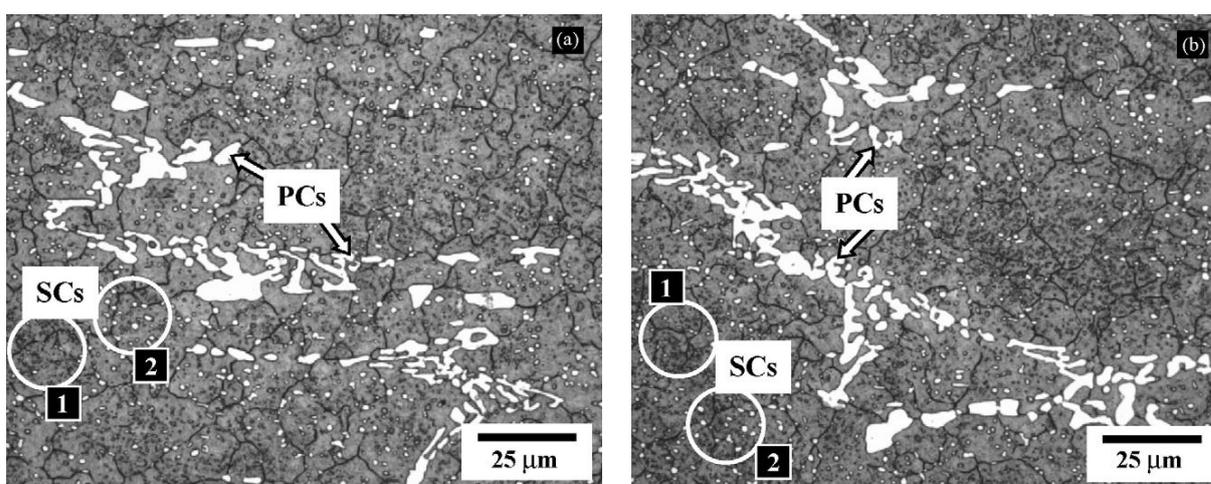


Fonte: DAS; DUTTA; RAY, 2010 (traduzida).

Considerando outro aspecto que vem sendo investigado referente aos tratamentos térmicos dos aços ferramenta para trabalho a frio, ainda no trabalho de Das; Dutta; Ray (2010), a avaliação dos carbonetos presentes após as quatro operações (TTC, TF, TC e TCP) foi realizada. O trabalho envolveu a análise do tipo (resultado podendo já ser observado no difratograma da Figura 3.11), da quantidade, da morfologia, do tamanho e a distribuição dos carbonetos no aço AISI D2. Na Figura 3.12 são apresentadas fotomicrografias, obtidas por microscopia óptica, do material submetido às operações TTC e TC. Nesse caso, foram considerados como carbonetos primários (PCs) aqueles com dimensão superior a 5µm e carbonetos

secundários (SCs) aqueles com dimensão inferior a $5\mu\text{m}$. Verifica-se em ambas as imagens a ocorrência de uma distribuição não uniforme de carbonetos primários (alongados, com formato dendrítico) e relativamente uniforme de carbonetos secundários (brancos e negros) na matriz de martensita revenida. Em relação aos precipitados primários, a quantidade, o tamanho e a distribuição parecem ser similares, independente do tratamento realizado, o que é justificado pelo fato de que essas características dos PCs são controladas apenas pelo tempo e pela temperatura de austenitização na têmpera, que foram idênticas no trabalho. Em relação aos carbonetos secundários, a ampliação obtida na microscopia óptica não permitiu observar as possíveis diferenças. Dessa forma, na Figura 3.13 são exibidas imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura do aço AISI D2 após os quatro tipos de operação. Nesse caso, não só é possível visualizar com detalhes os SCs, como esses aparecem com novas definições: carbonetos secundários grandes (LSCs), com dimensões entre $1\mu\text{m}$ e $5\mu\text{m}$, e carbonetos secundários pequenos (SSCs), com dimensões entre $0,1\mu\text{m}$ e $1\mu\text{m}$. Percebe-se pelas imagens que a quantidade de carbonetos SSCs aumenta ao comparar os tratamentos convencional com os subzero a -75°C , a -125°C e a -196°C , nessa ordem. Verifica-se ainda a presença de austenita retida γ_r com o tratamento TTC.

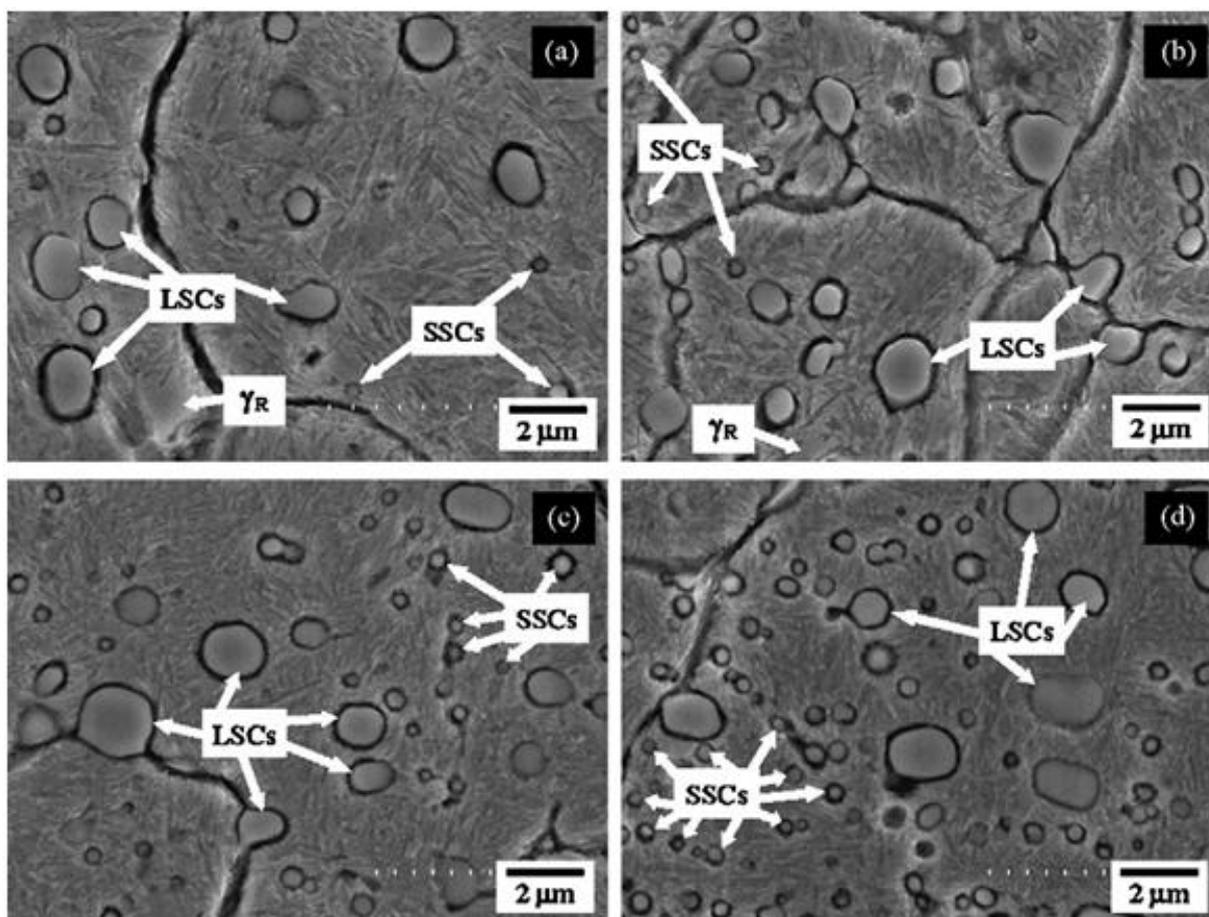
Figura 3.12 – Imagens (microscopia óptica) do aço AISI D2 submetido a tratamentos térmicos distintos.



(a) tratamentos de têmpera e revenimento convencionais (TTC) e (b) tratamento sub-zero, criogênico, com temperatura de resfriamento entre a têmpera e o revenimento de -125°C (TC).

Fonte: DAS; DUTTA; RAY, 2010.

Figura 3.13 – Imagens (microscopia eletrônica de varredura) do aço AISI D2 submetido a tratamentos térmicos distintos.



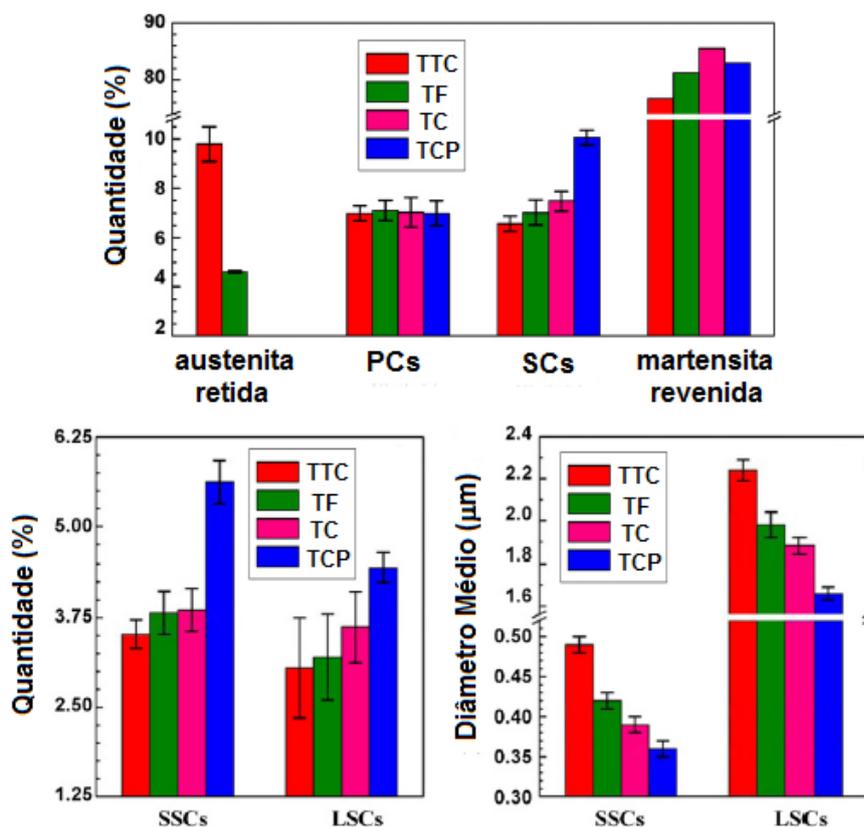
(a) tratamentos de têmpera e revenimento convencionais (TTC); (b) tratamento sub-zero, a frio, com temperatura de resfriamento entre a têmpera e o revenimento de -75°C (TF); (c) tratamento sub-zero, criogênico, com temperatura de resfriamento entre a têmpera e o revenimento de -125°C (TC) e (d) tratamento sub-zero, criogênico profundo, com temperatura de resfriamento entre a têmpera e o revenimento de -196°C (TCP).

Fonte: DAS; DUTTA; RAY, 2010.

A partir da análise de uma série de imagens como as micrografias exibidas na Figura 3.13, a quantidade e o diâmetro médio dos carbonetos são mostrados na Figura 3.14. Observa-se que, como verificado pela visualização das imagens, a quantidade de carbonetos primários não variou com o tipo de operação e a quantidade de carbonetos secundários aumentou ao comparar os tratamentos convencional com os subzero a -75°C , a -125°C e a -196°C . Em relação às dimensões dos carbonetos secundários, verifica-se que tanto os designados SSCs

como os LSCs tiveram seu diâmetro médio reduzido com a sequência tratamento convencional, subzero a -75°C , subzero a -125°C e subzero a -196°C .

Figura 3.14 – Análise quantitativa dos carbonetos (e outros constituintes) do aço AISI D2 submetido a tratamentos térmicos distintos.



Fonte: DAsSet al., 2010 (adaptada).

Considerando ainda utilização do tratamento térmico com resfriamento criogênico, trabalho similar àqueles descritos foi desenvolvido para o aço 80CrMo12.5 (AMINI et al., 2010). Nesse caso, foram investigadas duas condições de resfriamento, uma com temperatura de -80°C , classificado no trabalho como criogênico superficial, e a outra com temperatura de -196°C , denominado como criogênico profundo. Foi observado que para o tratamento térmico utilizando resfriamento criogênico profundo ocorreu tanto uma diminuição da austenita retida quanto um aumento na precipitação de carbonetos, cuja distribuição foi se tornando mais homogênea. Em relação às propriedades, foi observado um aumento da dureza de acordo com a diminuição da temperatura de resfriamento, atribuída à redução da quantidade de austenita retida. Na Tabela 3.7 podem ser verificados alguns dos resultados mencionados, seguida

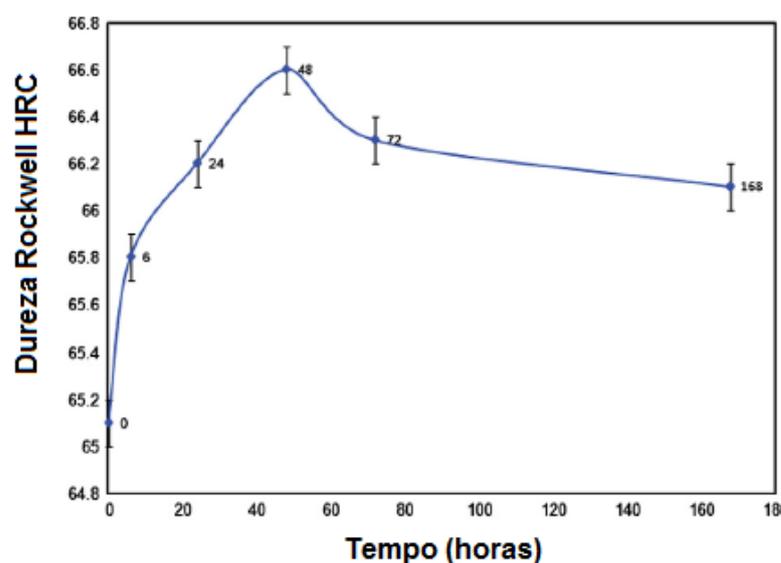
da Figura 3.15, que mostra a influência do tempo de resfriamento na dureza do material com resfriamento criogênico a -196°C .

Tabela 3.7 – Resultados de tratamentos com resfriamento convencional e criogênicos em diferentes condições para o aço 80CrMo12 5.

Tratamento Térmico	Dureza Vickers HV	Quantidade de Austenita Retida
têmperaconvencional	785 ± 15	12%
criogênicosuperficial	805 ± 7	---
criogênico profundo – tempo = 0	828 ± 9	---
criogênico profundo – tempo = 6 horas	876 ± 12	6%
criogênico profundo – tempo = 24 horas	895 ± 6	< 1%
criogênico profundo – tempo = 48 horas	912 ± 8	---
criogênico profundo – tempo = 72 horas	905 ± 6	---
criogênico profundo – tempo = 168 horas	886 ± 7	---

Fonte: AMINlet al., 2010 (adaptada).

Figura 3.15 – Variação da dureza com o tempo de permanência a -196°C no tratamento criogênico do aço 80CrMo12 5.



Fonte: AMINlet al., 2010 (adaptada).

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1. Material

O material utilizado no trabalho foi um aço ferramenta para trabalho a frio, de elevado teor de carbono e cromo, contendo ainda molibdênio, vanádio e silício. Esse aço foi adquirido em barras de seção transversal quadrada, com aproximadamente 12mm x 12mm x 100mm, cuja composição química (% em peso), fornecida pelo fabricante *SchmolzBieckenbach*, é apresentada na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Composição química do aço ferramenta para trabalho a frio empregado.

Elemento	C%	Cr%	Mo%	V%	Si%
% em peso	1,0	8,0	1,6	1,6	0,9

Fonte: Certificado do fabricante -SchomlzBickenbach (adaptada).

De acordo com as informações do fabricante, trata-se de um aço considerado de última geração, com alta dureza, boa tenacidade, alta resistência a elevadas temperaturas e boa estabilidade dimensional após os tratamentos térmicos, combinando as características dos aços AISI A2 e AISI D2 (Tabelas 3.4 e 3.5).Dentre as aplicações previstas para esse material, podem ser mencionadas ferramentas de corte, punções e matrizes para corte, matrizes para abrir roscas, ferramentas para conformação, lâminas circulares de cisalhamento, mandris para tubos sem costura, rolos para laminadores, rolos retificadores e moldes para plásticos.

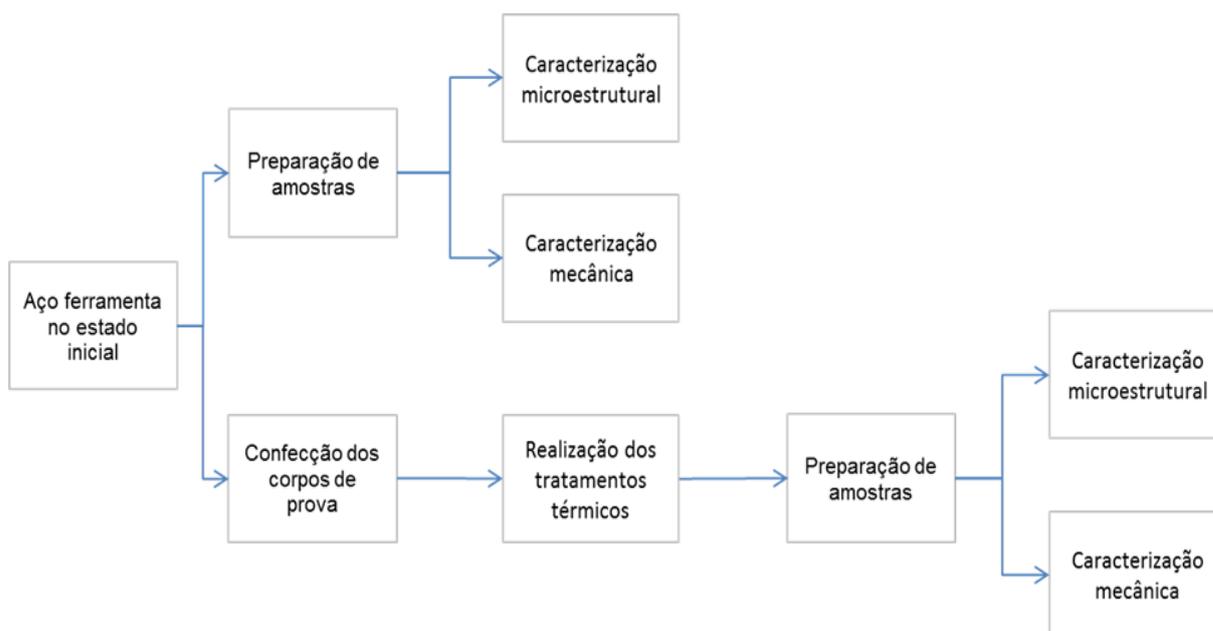
4.2. Descrição Geral do Trabalho Realizado

O trabalho realizado teve como objetivo a análise dos efeitos das condições de têmpera e de revenimentona microestrutura e na dureza de um aço ferramenta para trabalho a frio contendo cromo, molibdênio e vanádio. Foram observados, além da microestrutura e das propriedades de cada amostra individualmente, os efeitos da temperatura de austenitização na têmpera e da temperatura de revenimentonas

características mencionadas, assim como a influência das condições de têmpera anteriores resultados referentes ao revenimento subsequente. Foi analisada, de forma qualitativa e semiquantitativa, a presença dos microconstituintes formados com o processamento térmico, especialmente a presença e a formação dos carbonetos primários e secundários no material de acordo com a variação dos parâmetros de tratamentos térmicos.

Dessa forma, em termos experimentais, o trabalho consistiu basicamente em: 1) confecção de corpos de prova para realização de tratamentos térmicos; 2) realização dos tratamentos térmicos de têmpera e revenimento, considerando, para a têmpera, três condições de operação, e para o revenimento, um total de onze condições; 3) caracterização microestrutural e caracterização mecânica do aço ferramenta submetido aos tratamentos citados anteriormente e no estado inicial. Na Figura 4.1 é apresentado o fluxograma geral do trabalho experimental realizado.

Figura 4.1 – Fluxograma geral do trabalho experimental realizado.

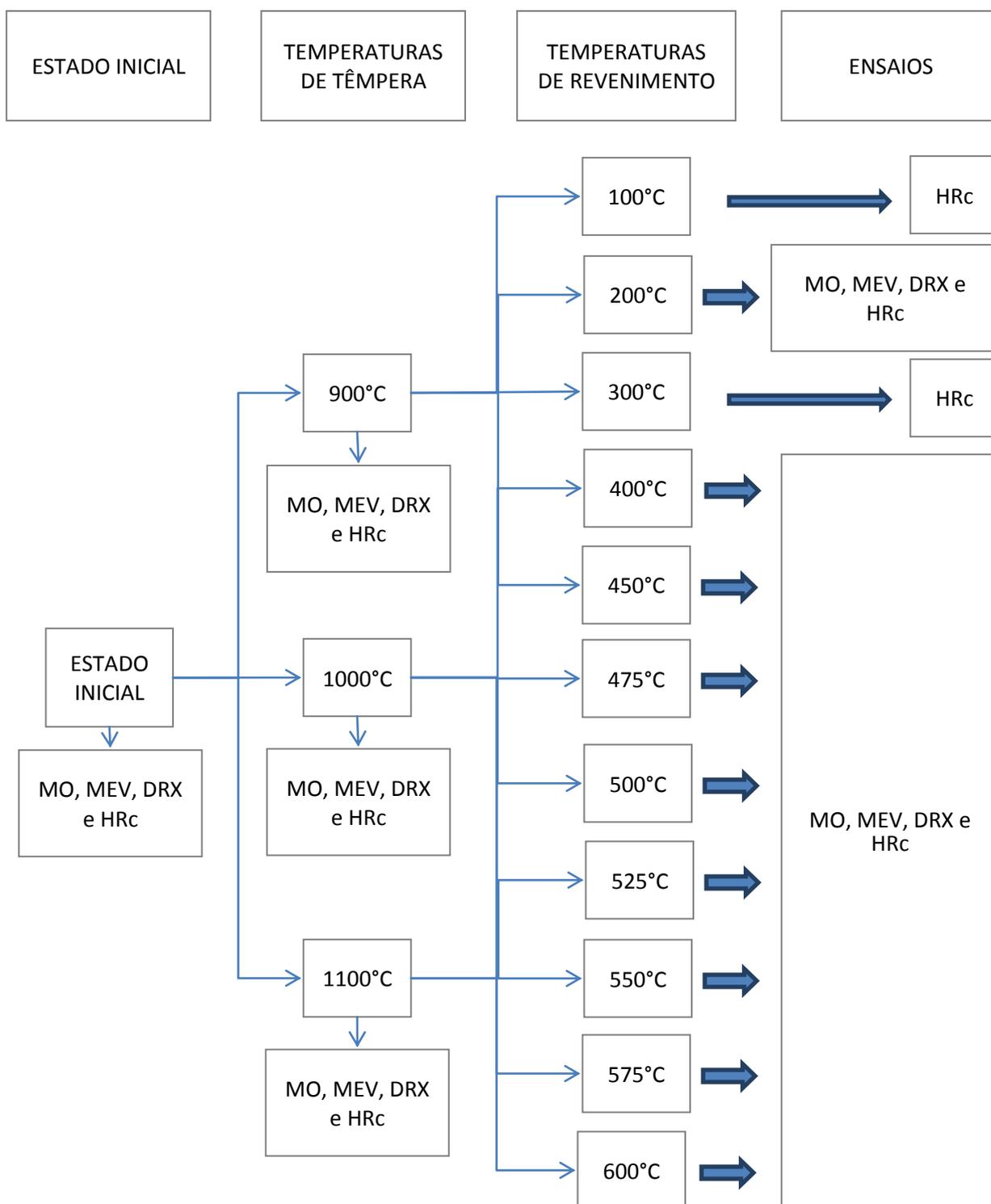


Fonte: Próprio autor.

Para a caracterização microestrutural, foram utilizadas as técnicas metalográficas, envolvendo a análise por meio de microscopia óptica (MO) e microscopia eletrônica de varredura (MEV), e de difração de raios-X (DRX). Para a caracterização

mecânica, foram realizados ensaios de dureza. A Figura 4.2 mostra o fluxograma detalhado do trabalho relativo ao aço ferramenta tratado termicamente.

Figura 4.2 – Fluxograma detalhado do trabalho a cerca do material tratado termicamente.

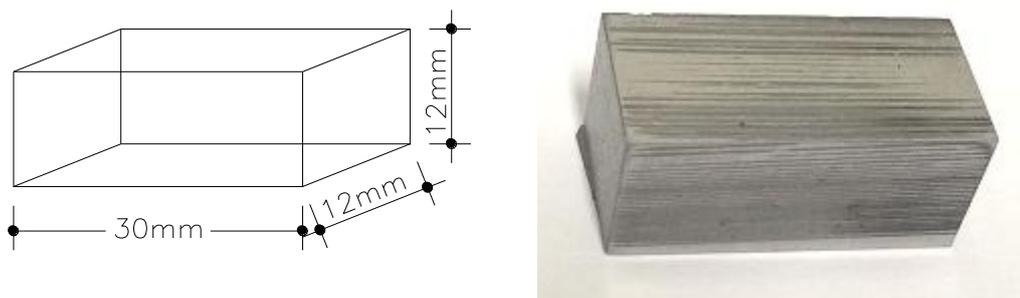


Fonte: Próprio autor.

4.3. Corpos de Prova

Na Figura 4.3 são mostradas a representação esquemática e a imagem, como exemplo, do corpo de prova utilizado para os tratamentos térmicos de têmpera e de revenimento. Esses corpos de prova foram preparados a partir do material com a geometria e as dimensões adquiridas (mencionados na seção 4.1), empregando uma máquina de corte da marca *Struers* com disco abrasivo de óxido de alumínio da marca *Arotec*.

Figura 4.3 – Representação e imagem, como exemplo, do corpo de prova utilizado nos tratamentos térmicos de têmpera e revenimento.

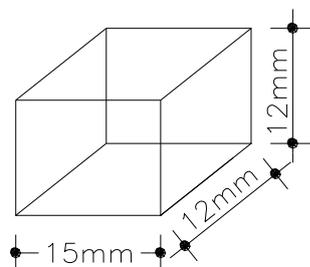


Fonte: Próprio autor.

Para a caracterização mecânica e microestrutural do aço ferramenta, tanto no estado inicial como após os tratamentos térmicos, foram preparadas amostras cujas representações esquemática e imagem são exibidas na Figura 4.4. Similarmente ao corpo de prova a ser submetido ao tratamento térmico, essa preparação (geometria e dimensões) se deu com a utilização de uma máquina de corte com disco abrasivo de óxido de alumínio da marca *Struers*. No caso específico do material após os tratamentos térmicos, a confecção consistiu em seccionar a região central dos corpos de prova em relação ao comprimento. Todos os experimentos de caracterização foram realizados na seção interna das amostras, ou seja, na região na qual o corte foi realizado.

Neste caso, considerando ainda os corpos de prova para caracterização mecânica e microestrutural do aço ferramenta para trabalho a frio, foram empregados 186 corpos de provas no total do trabalho.

Figura 4.4 – Representação e imagem, como exemplo, da amostra de aço ferramenta levada à caracterização mecânica e microestrutural.



Fonte: Próprio autor.

4.4. Tratamentos Térmicos

Foram realizados dois tipos de tratamentos térmicos no trabalho: têmpera e revenimento, empregando diferentes temperaturas em ambas as operações.

A têmpera foi realizada com resfriamento em óleo, conforme recomendação da literatura para aços ferramenta para trabalho a frio (ASM HANDBOOK, 1999). Os experimentos foram conduzidos em um forno elétrico da marca *Brasimet* modelo Heraeus, com sistema analógico de controle de temperatura, considerando os parâmetros de tempo de encharque e de temperatura de aquecimento (também referida como temperatura de austenitização ao longo do trabalho) mostrados na Tabela 4.2. Novamente, a determinação ou escolha dos valores ocorreu a partir de consulta à bibliografia referente a este grupo de aços (ASM HANDBOOK, 1999; DAS; DUTTA; RAY, 2010; TORKAMANI et al., 2014) e ainda a alguns testes preliminares, ressaltando o fato de que a análise dos efeitos especificamente da temperatura de austenitização na microestrutura e na dureza do material antes e após o revenimento foi um dos objetivos do trabalho. No intuito de evitar o resfriamento prematuro dos corpos de prova durante a retirada do forno, todas as peças foram envolvidas em arame de baixo teor de carbono, em uma espécie de “gaiola” com alça, de forma que o contato da tenaz durante a remoção das peças se deu com a alça mencionada. Na Figura 4.5 são exibidas imagens do forno utilizado e

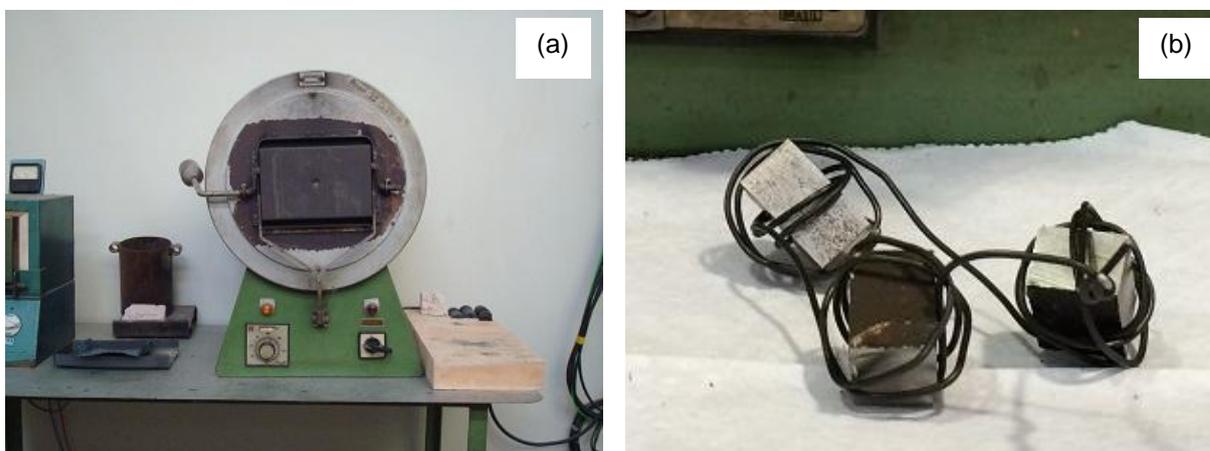
de corpos de prova, como exemplos, envolvidos com o arame antes do tratamento térmico de têmpera em óleo.

Tabela 4.2 – Temperaturas de aquecimento e tempo de encharque utilizados nos tratamentos térmicos de têmpera.

Temperatura de Aquecimento na Têmpera	Tempo de Encharque
900°C	
1000°C	60 minutos
1100°C	

Fonte: Próprio autor.

Figura 4.5 – Imagens do forno utilizado e de corpos de prova, como exemplos, ainda envolvidos com o arame após o resfriamento em óleo.



(a) forno e (b) amostras envolvidas com arame.

Fonte: Próprio autor.

O revenimento dos corpos de prova temperados foi realizado com resfriamento ao ar, com um único tempo de permanência no forno e onze temperaturas, informações mostradas na Tabela 4.3. Neste caso, a princípio, foi planejado analisar o comportamento do material com intervalos de 100°C, ou seja, considerando seis

temperaturas. Posteriormente, a partir dos resultados obtidos, optou-se por incluir intervalos de temperatura menores, de 25°C, a partir de 450°C. Esse procedimento foi realizado para avaliar de forma mais precisa o eventual aparecimento do fenômeno de endurecimento secundário no tratamento. Os experimentos também foram realizados no forno descrito anteriormente, sendo o mesmo procedimento de retirada das peças do equipamento com o auxílio da tenaz e da “gaiola”.

Tabela 4.3 – Temperaturas e tempo de permanência utilizados nos tratamentos térmicos de revenimento.

Temperatura de Revenimento (°C)										
100	200	300	400	450	475	500	525	550	575	600
Tempo de Permanência no Forno										
60 minutos										

Fonte: Próprio autor.

4.5. Caracterização Microestrutural do Material

A análise da microestrutura do aço ferramenta para trabalho a frio foi realizada tanto nas amostras apenas temperadas como em amostras temperadas e revenidas, além do material no estado inicial. Na Tabela 4.4 são exibidas as condições de tratamentos térmicos nas quais essa avaliação foi realizada. Esta etapa do trabalho foi conduzida por meio de microscopia óptica (MO), microscopia eletrônica de varredura (MEV) e difração de raios-X (DRX).

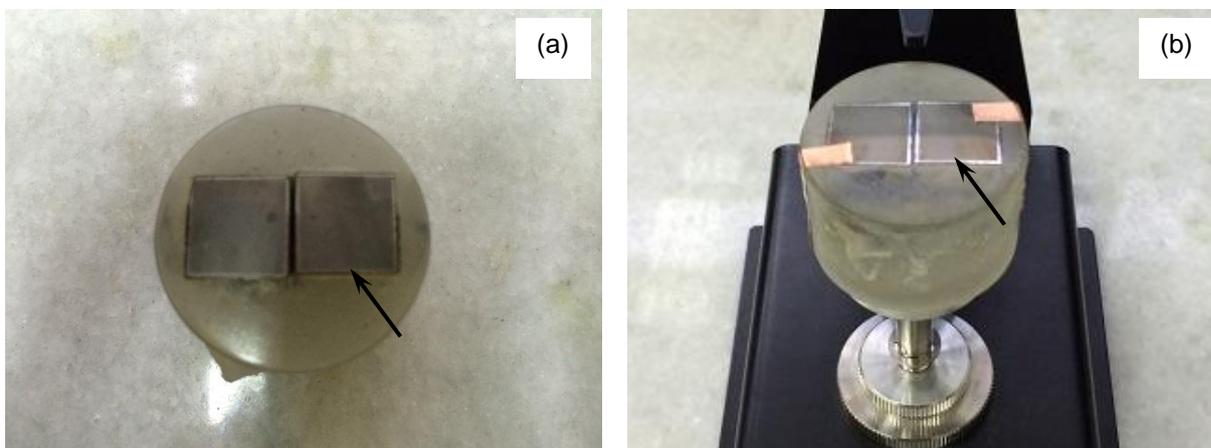
Tabela 4.4 – Condições nas quais foi realizada a caracterização microestrutural(MO, MEV e DRX) do aço ferramenta.

Temperado	Temperado e Revenido
900°C, 1000°C e 1100°C	Têmpera 900°C, 1000°C e 1100°C Revenimento 200°C, 400°C, 450°C, 475°C, 500°C, 525°C, 550°C, 575°C e 600°C

Fonte: Próprio autor.

Foram preparadas três amostras para cada condição do material. Para a realização das três técnicas, a preparação das amostras foi similar. Como mencionado anteriormente, no caso específico do aço ferramenta após os tratamentos térmicos, todos os experimentos de caracterização microestrutural foram realizados na seção interna dos corpos de prova temperados e temperados revenidos, a certa distância da superfície, na região central da seção. Esse procedimento foi conduzido com o objetivo de desconsiderar da análise a camada do material que sofreu descarbonetação, em virtude do alto teor de carbono da liga e da temperatura e tempo de permanência no tratamento (especialmente a têmpera). Na Figura 4.6 são mostradas imagens, como exemplos, da seção transversal de duas amostras que evidenciam a ocorrência dessa camada descarbonetada, indicadas por setas negras.

Figura 4.6 – Imagens, como exemplos, de amostras do aço ferramenta temperado após preparação metalográfica completa, evidenciando a ocorrência de descarbonetação superficial associada ao tratamento térmico.



(a) e (b) vistas distintas.

Fonte: Próprio autor.

A preparação do aço ferramenta foi realizada por meio da técnica metalográfica convencional, consistindo em embutimento a frio em moldes de silicone com polimetilmetacrilato (em alguns casos, duas amostras foram colocadas no mesmo molde), lixamento com lixas de óxido de alumínio com granulometrias diversas (#120, #240, #320, #400, #600, #1200) e polimento em panos com pasta de diamante (9 μ m, 3 μ m, 1 μ m). A limpeza ao final do processo e entre todas as etapas

foi conduzida com álcool etílico. Os principais equipamentos utilizados foram lixadeiras e poltrizes elétricas das marcas *Struers* e *Arotec*. Em relação ao ataque químico, foi empregado o reagente Nital 5%, (ASM HANDBOOK, 2004), cuja composição é mostrada na Tabela 4.5.

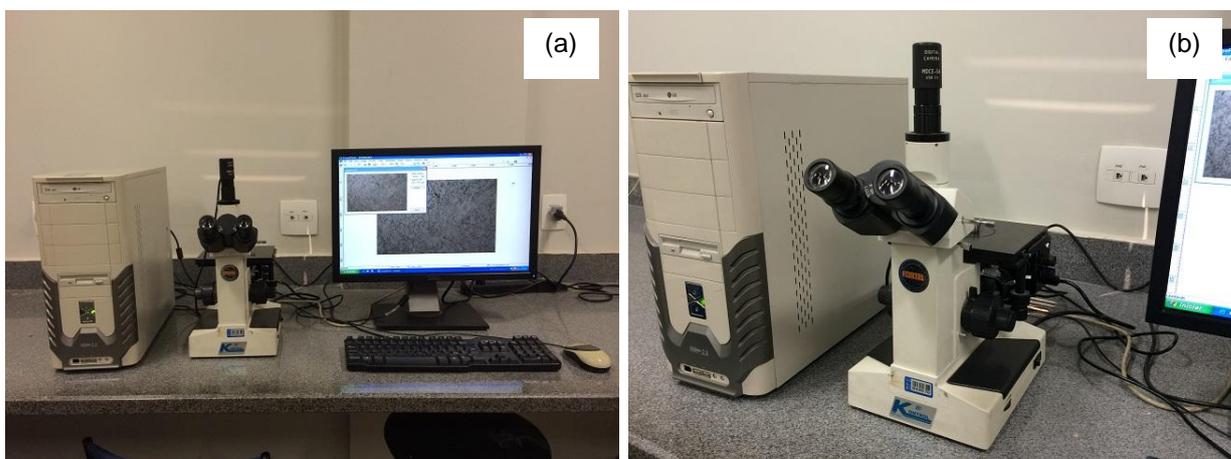
Tabela 4.5 – Composição do reagente utilizado.

Reagente	Composição
Nital 5%	5ml de HNO ₃ , 95ml de álcool etílico

Fonte: ASM HANDBOOK, 2004 (adaptada).

Após a finalização da preparação, duas amostras de cada condição foram encaminhadas à microscopia óptica e depois à microscopia eletrônica de varredura e uma amostra foi retirada do embutimento e encaminhada à difração de raios-X. Em relação à microscopia óptica, o equipamento utilizado foi um microscópio da marca *Fortel*, com sistema de captura digital de imagens marca *Kontrol*, que pode ser observado na Figura 4.7. Imagens diversas foram obtidas/avaliadas com três ampliações (200X, 400X e 800X) das duas amostras mencionadas para cada condição do aço ferramenta.

Figura 4.7 – Imagens do microscópio óptico utilizado para caracterização microestrutural das amostras.

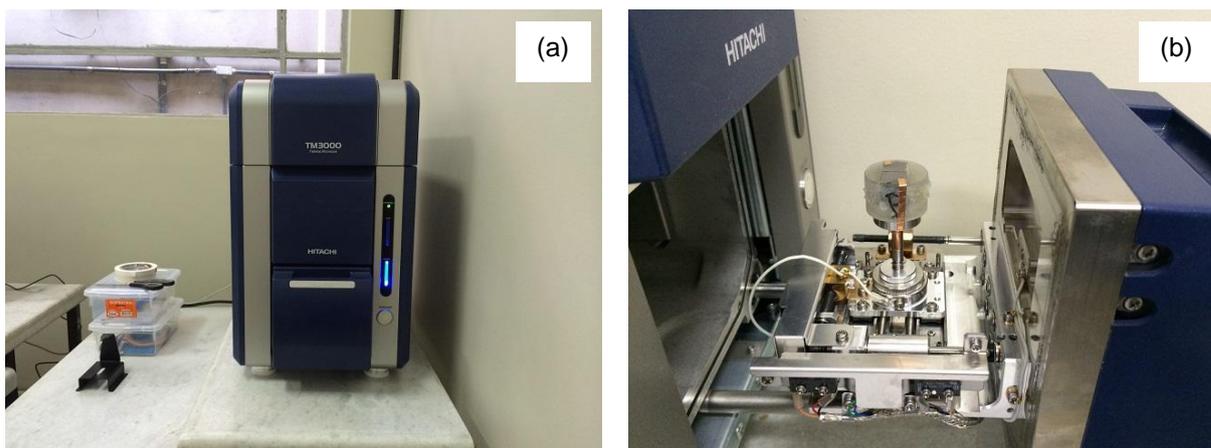


(a) e (b) vistas gerais do equipamento.

Fonte: Próprio autor.

Para a análise por microscopia eletrônica de varredura, foram utilizados dois microscópios, um da marca *Hitachi* modelo TM3000, empregando elétrons retroespalhados, e outro da marca *Shimadzu* modelo SSX-550, empregando elétrons secundários, cujas imagens podem ser visualizadas nas Figuras 4.8 e 4.9. Em relação ao primeiro, o objetivo foi a aquisição de imagens. Neste caso, a princípio, três ampliações foram consideradas em diversas regiões de cada amostra (2000X, 5000X e 7000X). Em relação ao segundo, com o auxílio do acessório para análise por espectroscopia dispersiva em energia (EDS), acoplado ao equipamento, a análise da composição química do material, por meio da determinação de mapas de composição e análise pontual, foi realizada.

Figura 4.8 – Imagens de um dos microscópios eletrônicos de varredura utilizados para caracterização microestrutural das amostras.

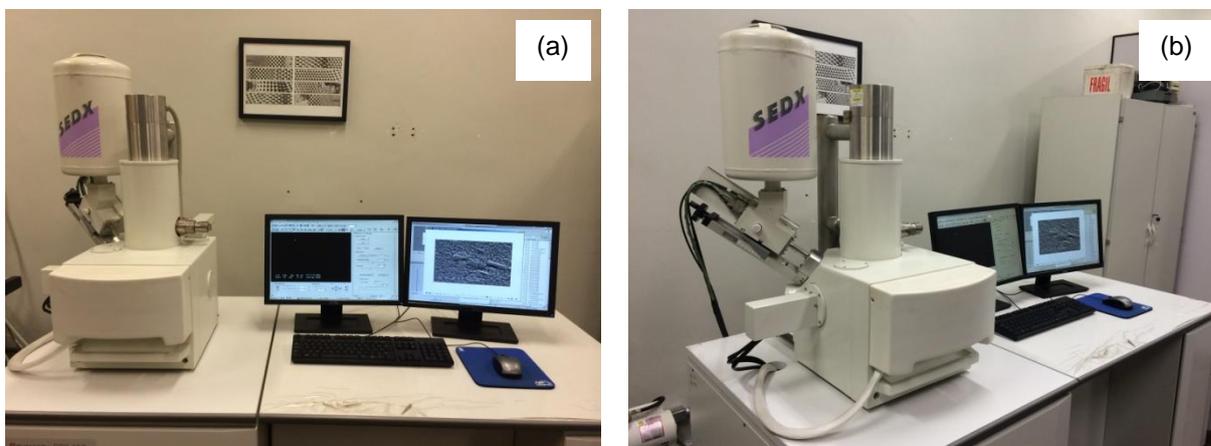


(a) vista geral do equipamento e (b) detalhe da amostra no suporte.

Fonte: Próprio autor.

Além da análise qualitativa da microestrutura, a obtenção das imagens por microscopia óptica e microscopia eletrônica de varredura foi realizada para possibilitar uma avaliação semiquantitativa dos microconstituintes no aço ferramenta para trabalho a frio (metalografia quantitativa). Após a verificação de alguns resultados, constatando as dimensões médias gerais dos carbonetos no material, especialmente considerando os de dimensões reduzidas, optou-se por trabalhar nesta etapa com as duas técnicas, ou seja, com as imagens obtidas por microscopia óptica com ampliações de 800X e com as imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura com ampliações de 7000X.

Figura 4.9 – Imagens do microscópio eletrônico de varredura utilizado para caracterização microestrutural das amostras – análise química.



(a) e (b) vistas gerais do equipamento.

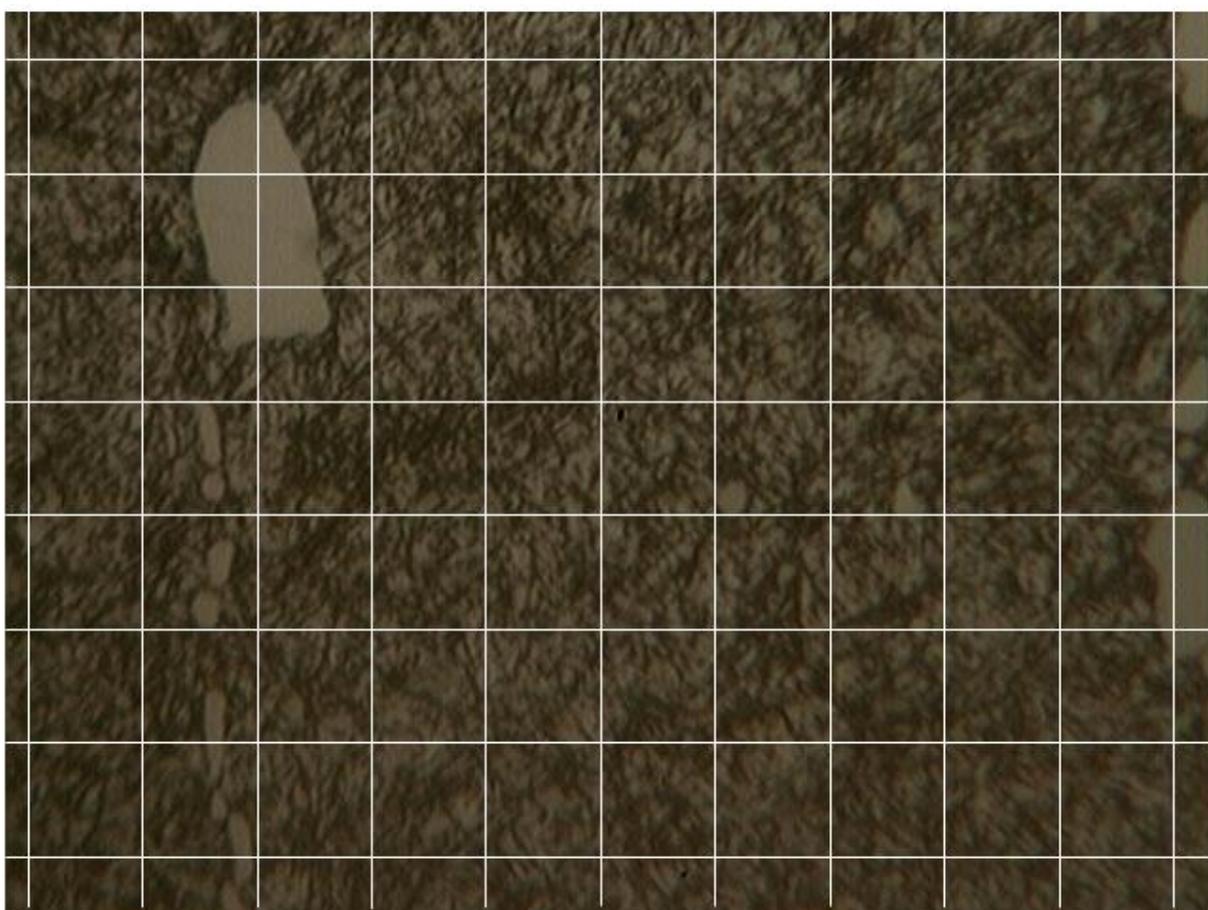
Fonte: Próprio autor.

Dessa forma, para cada uma das amostras, dez a doze regiões/imagens foram digitalizadas, em cada uma das técnicas, levando a um total de 20 a 24 regiões/imagens de cada condição de processamento investigada, tanto para MO como para MEV. Essas imagens tiveram uma rede com 88 nós (composta por 8 linhas horizontais e 11 linhas verticais) superposta, com o objetivo de determinar a quantidade (fração %) de carbonetos e de martensita presente no aço ferramenta em cada situação, empregando o método clássico de contagem de pontos (PADILHA; AMBROZIO FILHO, 2004; ASM HANDBOOK, 2004). Essa técnica consiste em superpor uma rede sobre uma dada área da microestrutura, sendo que o número de pontos que estão localizados sobre as áreas de interesse dividido pelo número de pontos totais fornece a fração do constituinte desejado. Nesse caso, os pontos da rede que incidirem no objeto de interesse contam como 1 unidade e os pontos que incidirem em um contorno desse objeto contam como $\frac{1}{2}$ unidade.

Nas Figuras 4.10e 4.11 são mostradas a rede empregada superposta a imagens de MO e MEV do material investigado como exemplos. Ressalta-se ainda que na análise semiquantitativa, os carbonetos foram divididos em dois grupos, aqueles denominados “grandes” e aqueles denominados “pequenos”, de forma similar ao trabalho de Das; Dutta; Ray (2010) que, no entanto, classificou-os como “primários” e “secundários”. Neste trabalho, as imagens obtidas por MO (com ampliação de

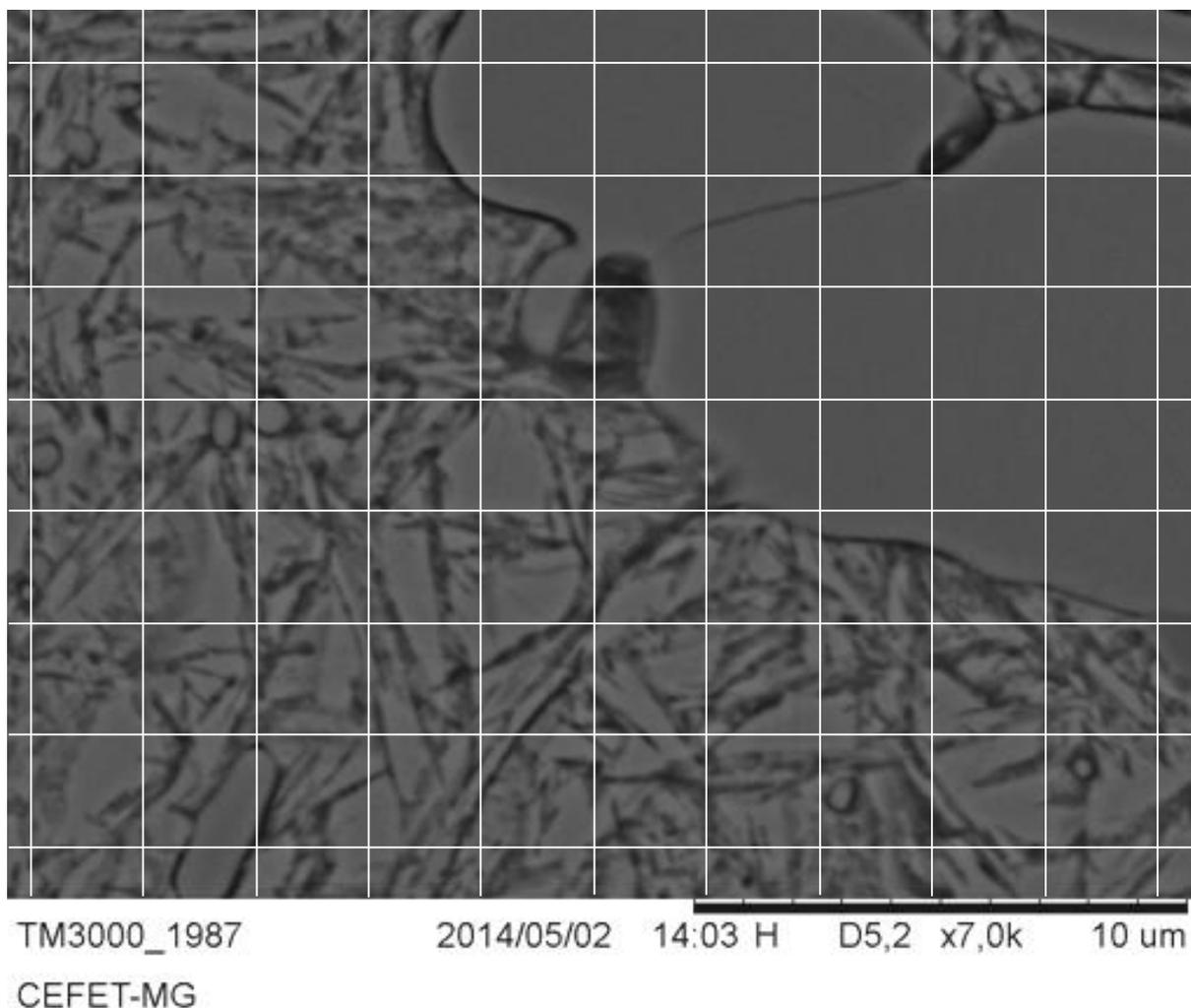
800X) foram empregadas para determinação da fração de carbonetos “grandes” e as imagens obtidas por MEV (com ampliação de 7000X) foram empregadas para determinação da fração de carbonetos “pequenos”. Essa diferenciação se deu devido ao fato de que para o uso da técnica de contagem de pontos é recomendado que não se deve trabalhar com ampliações nas quais o objeto de interesse (cuja quantidade deve ser determinada) tenha incidido sobre si muitos pontos da rede (PADILHA; AMBROZIO FILHO, 2004). Dessa forma, ampliações muito elevadas não seriam adequadas para a análise semiquantitativa dos carbonetos “grandes”. Por outro lado, ao reduzir a ampliação, seria difícil identificar os carbonetos “pequenos”. Dessa forma, optou-se por trabalhar com ampliações distintas de acordo com o tipo de carboneto avaliado.

Figura 4.10 – Rede empregada para determinação da fração % dos constituintes no aço ferramenta para trabalho a frio superposta em uma imagem de microestrutura (MO) como exemplo.



Fonte: Próprio autor.

Figura 4.11 – Rede empregada para determinação da fração % dos constituintes no aço ferramenta para trabalho a frio superposta em uma imagem de microestrutura (MEV) como exemplo.

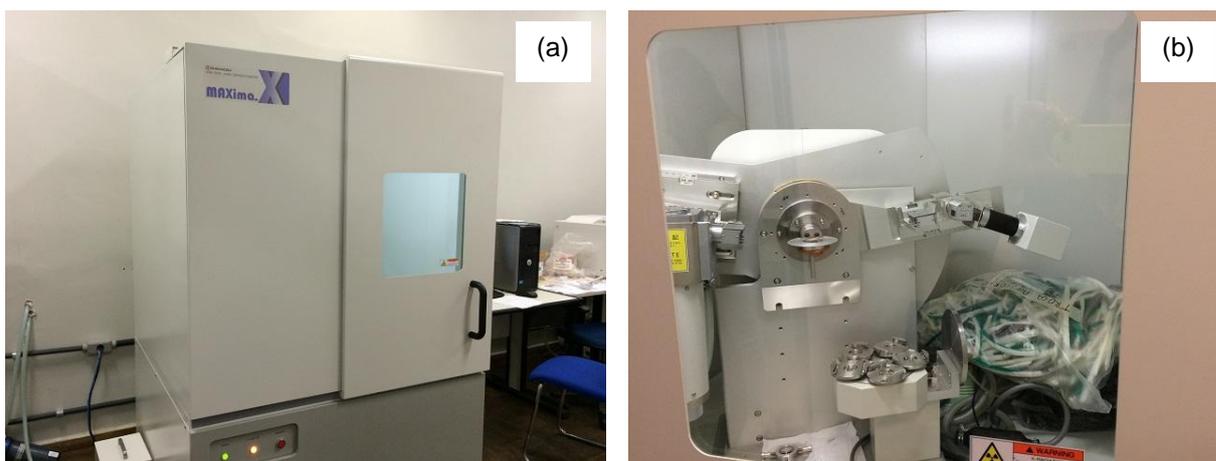


Fonte: Próprio autor.

A difração de raios-X foi realizada com o objetivo de confirmar a presença das fases e constituintes identificados nas imagens de MO e MEV e acompanhar eventuais modificações na presença de austenita retida (quando for o caso) com os tratamentos térmicos. Em termos de possibilitar uma análise semiquantitativa das fases, por meio da técnica das intensidades integradas, os resultados evidenciaram limitação da técnica, devido à superposição de picos relativos a estruturas distintas. Nesta etapa foi empregado um difratômetro com alvo metálico de cobre da marca *Shimadzu* modelo XRD-7000, mostrado na Figura 4.12. Foi utilizado ângulo de varredura de 10° a 100° e passo de $0,02^\circ\text{s}^{-1}$. A preparação das amostras foi similar

àquela para MO e MEV, inclusive com polimento e ataque químico, essas duas técnicas empregadas para retirar os efeitos do lixamento na superfície do material, que poderiam induzir a transformação da eventual austenita retida em martensita por deformação plástica.

Figura 4.12 – Imagens do difratômetro de raios-X utilizado para caracterização microestrutural das amostras.



(a) vista geral do equipamento e (b) detalhe durante o experimento.

Fonte: Próprio autor.

4.6. Caracterização Mecânica do Material

A caracterização do aço ferramenta para trabalho a frio em termos de propriedades mecânicas foi realizada por meio de ensaios de dureza Rockwell. Os experimentos foram conduzidos empregando a escala C, com carga de 150kgf e penetrador cônico de diamante (penetrador de Brale), para as amostras temperadas com ou sem revenimento subsequente, e a escala B, com carga de 100Kgf e penetrador esférico de carboneto de tungstênio com 1/16" de diâmetro, para amostras da liga no estado inicial.

Para cada condição do aço ferramenta foram utilizadas três amostras, sendo realizados oito ensaios em cada uma. Similarmente ao procedimento para a caracterização microestrutural, todos os experimentos foram realizados na seção interna dos corpos de prova temperados e temperados revenidos, a certa distância

da superfície, na região central da seção. A preparação das amostras para os ensaios de dureza envolveu embutimento a frio em moldes de silicone com polimetilmetacrilato, lixamento com lixas de óxido de alumínio com granulometrias de #120, #240, #320 e #400.

Os ensaios foram realizados em um durômetro da marca Reichester, com sistema de medição Mitutoyo, cujas imagens são exibidas na Figura 4.13.

Figura 4.13 – Imagens do durômetro utilizado para caracterização mecânica das amostras.



(a) vista geral do equipamento e (b) detalhe da amostra durante o ensaio.

Fonte: Próprio autor.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Caracterização do Aço Ferramenta no Estado Inicial

Na Tabela 5.1 é apresentado o resultado médio dos ensaios de dureza Rockwell do aço ferramenta para trabalho a frio investigado. Observa-se que o valor da propriedade foi obtido por meio da escala B, mostrando que o material no estado como adquirido não estava endurecido por tratamentos térmicos.

Tabela 5.1 – Durezando aço ferramenta no estado inicial, como adquirido.

Dureza Rockwell B
93,4 ± 2,8

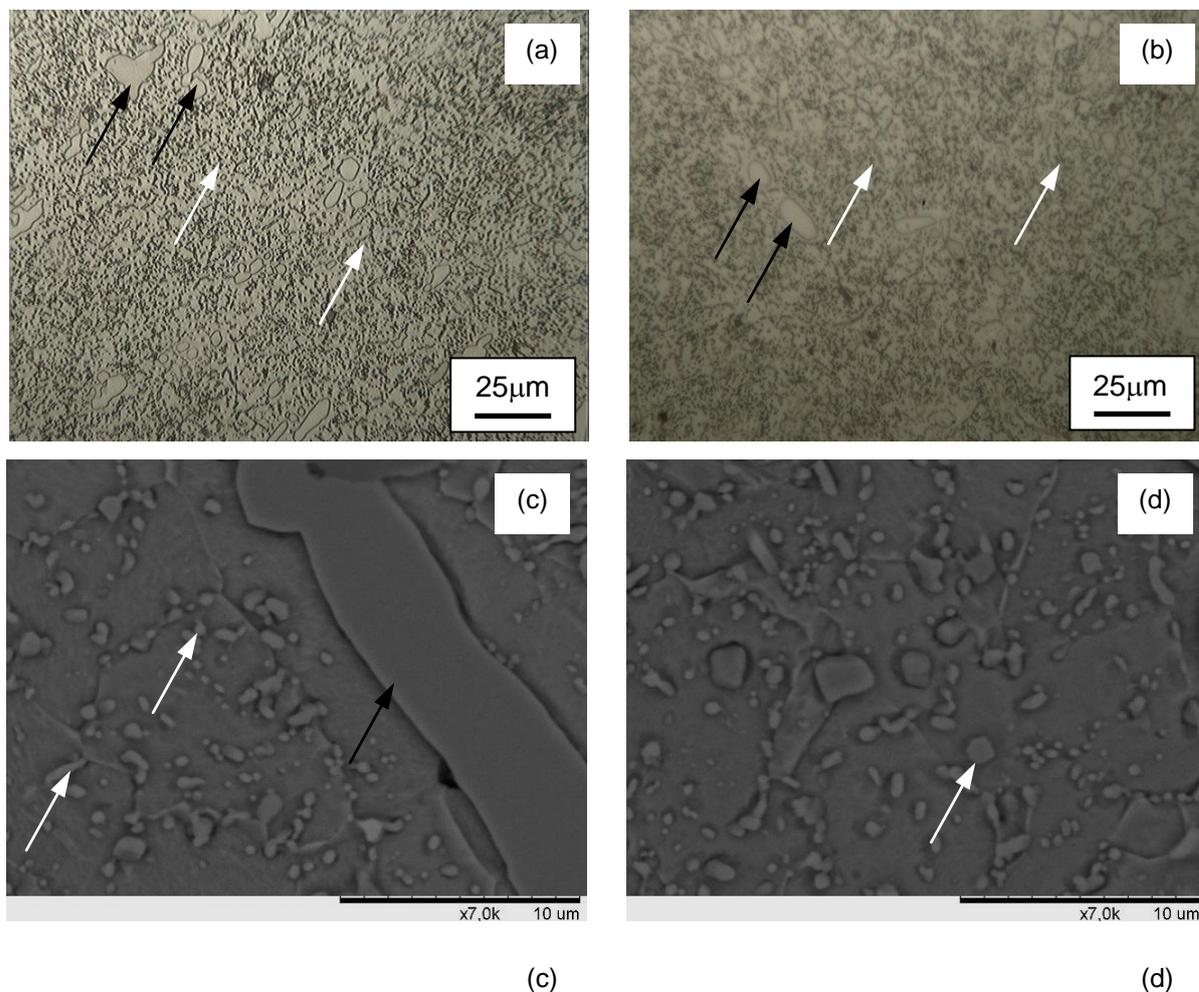
Fonte: Próprio autor.

Na Figura 5.1 são apresentadas as imagens obtidas por meio de MO e MEV, respectivamente. Verifica-se a ocorrência de matriz de ferrita e carbonetos diversos, de dimensões mais elevadas, classificados no trabalho como “grandes” (seta negra) e de dimensões reduzidas, denominados “pequenos” (seta branca). A princípio, essas imagens estão de acordo com o resultado de dureza apresentado, típico do material sem a presença de estrutura martensítica.

A morfologia dos precipitados da Figura 5.1, ao ser comparada com a Figura 3.7 e com a descrição dos principais tipos de carbonetos em aços ferramenta apresentada na seção 3.2, sugere que os mesmos sejam de carbonetos dos tipos MC, M_7C_3 e $M_{23}C_6$ (KRAUSS, 1990; TOTTEN, 2007; HETZNER; VAN GEERTRUYDEN, 2008; BOURITHIS et al., 2006; VITRY et al., 2012). Os carbonetos do tipo MC, apontados como globulares, aparecem associados ou isoladamente, sendo que os elementos que o compõem podem ser o vanádio (principalmente), o molibdênio e o cromo. Os carbonetos M_7C_3 se desenvolvem de forma associada, aparecendo em grupo como uma “espinha de peixe”, porém com lamelas relativamente grossas (com morfologia similar à estrutura dendrítica), sendo principalmente compostos de cromo e ferro, podendo ainda envolver a ocorrência de molibdênio, vanádio e tungstênio. Já os carbonetos do tipo $M_{23}C_6$, também globulares, porém de dimensões reduzidas, distribuem-se isoladamente e de maneira relativamente uniforme, formados pelos

elementos cromo (principalmente), tungstênio, molibdênio e vanádio. Essa descrição está de acordo com o material investigado, um aço para trabalho a frio contendo alto teor de carbono, alto teor de cromo e ainda vanádio e molibdênio (Tabela 4.1).

Figura 5.1 – Fotomicrografias (MO e MEV) do aço ferramenta no estado inicial.



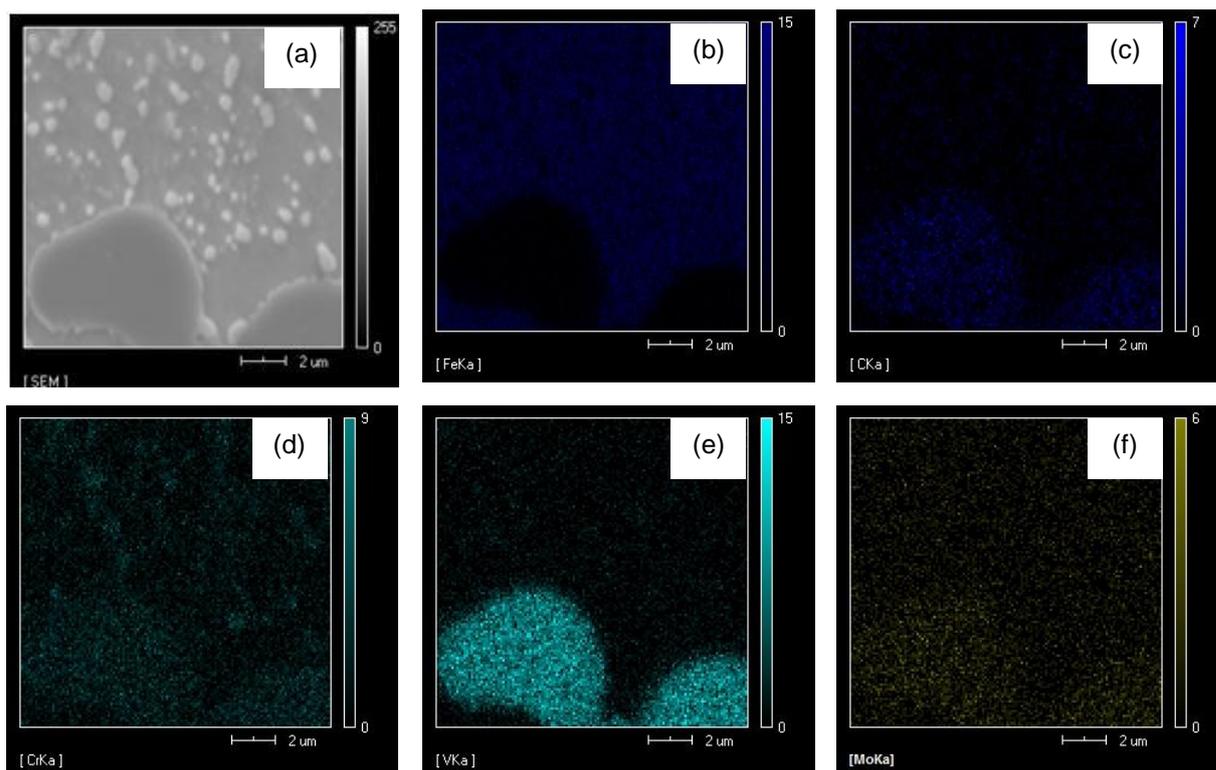
(a) e (b) MO, (c) e (d) MEV.

Fonte: Próprio autor.

Esses resultados são confirmados pela análise de composição química realizada pela microsonda com feixe de elétrons acoplada ao MEV, como mapas com a presença dos elementos, apresentada na Figura 5.2. Verifica-se que na região na qual aparece o carboneto com morfologia típica, a princípio, do MC, predomina o elemento vanádio (e carbono), com ainda cromo e molibdênio. Em relação aos carbonetos $M_{23}C_6$, observa-se a presença de cromo mais disperso na imagem (e ainda o molibdênio, de forma mais discreta), possivelmente estando combinado com o carbono e também em solução sólida substitucional. Na Figura 5.3 é apresentada a

análise química pontual, de forma qualitativa, da matriz de ferrita e dos dois tipos de carbonetos. Em relação ao precipitado “pequeno”, a presença de todos os elementos certamente está associada à reduzida dimensão e à dificuldade de limitar o feixe de elétrons à mesma.

Figura 5.2 – Mapas de composição química do aço ferramenta como adquirido.



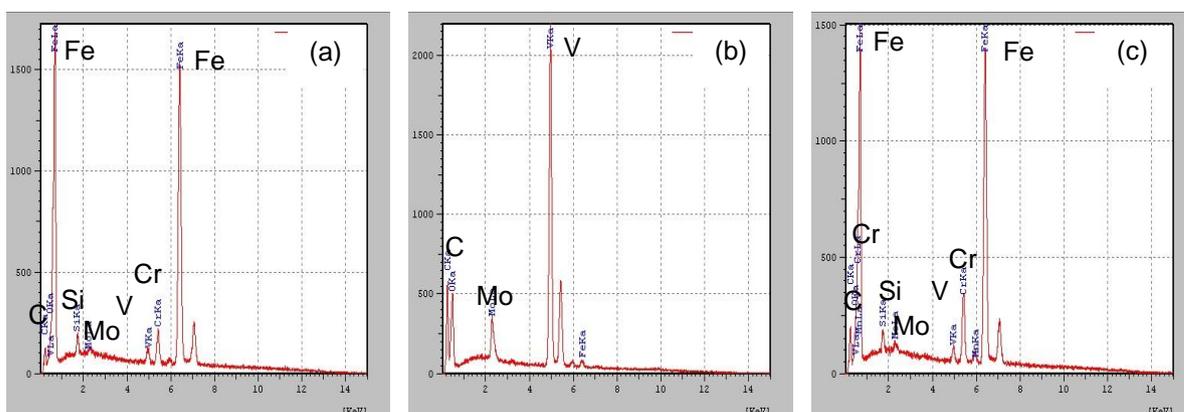
(a) imagem, (b) Fe, (c) C, (d) Cr, (e) V e (f) Mo.

Fonte: Próprio autor.

Na Figura 5.4 é mostrado o difratograma referente ao aço ferramenta para trabalho a frio também no estado inicial. Os resultados comentados anteriormente são, em geral, confirmados, uma vez que podem ser observados picos associados à estrutura ferrítica (marcados como F) e picos possivelmente relacionados com os carbonetos MC , M_7C_3 e $M_{23}C_6$. Ressalta-se que, nesse caso, a identificação dos picos se deu a partir da comparação com os resultados exibidos em trabalhos diversos, acerca do desenvolvimento de precipitados em aços ferramenta para trabalho a frio, como aqueles exemplificados nas Figuras 3.10 e 3.11 (TORKAMANI et al., 2014; DAS; DUTTA, RAY, 2010). Nas Figuras 5.5 e 5.6 são mostrados outros dois difratogramas encontrados na literatura que permitiram, em conjunto com

aqueles das duas figuras mencionadas, a identificação ou suposição dos picos não só da figura em questão como das demais associadas à difração no trabalho (ARSLAN et al., 2011; BOURITHIS et al., 2006). Verifica-se realmente a presença de resultados relativos aos carbonetos mencionados. Observa-se também que há carbonetos cujos ângulos de difração coincidem com alguns ângulos dos outros e ainda da estrutura ferrítica/martensítica (contrastando a Figura 5.4 com as demais). Dessa forma, não foi possível avaliar os carbonetos e a microestrutura como um todo, de forma quantitativa por meio dessa técnica, apenas qualitativamente, uma vez que não seria possível saber qual a proporção de cada fase em cada pico.

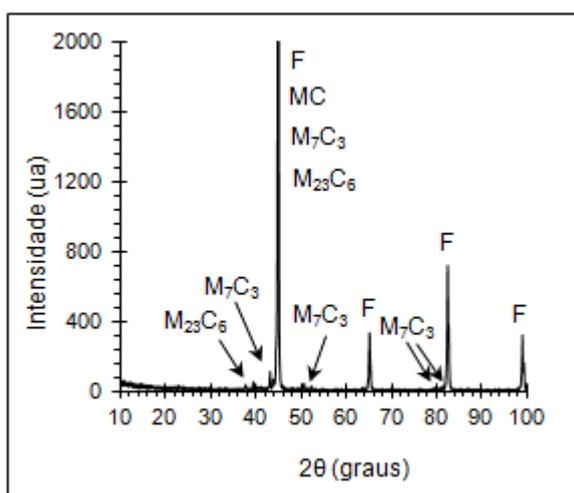
Figura 5.3 – Elementos presentes no material como adquirido.



(a) matriz, (b) carboneto “grande” e (c) carboneto “pequeno”.

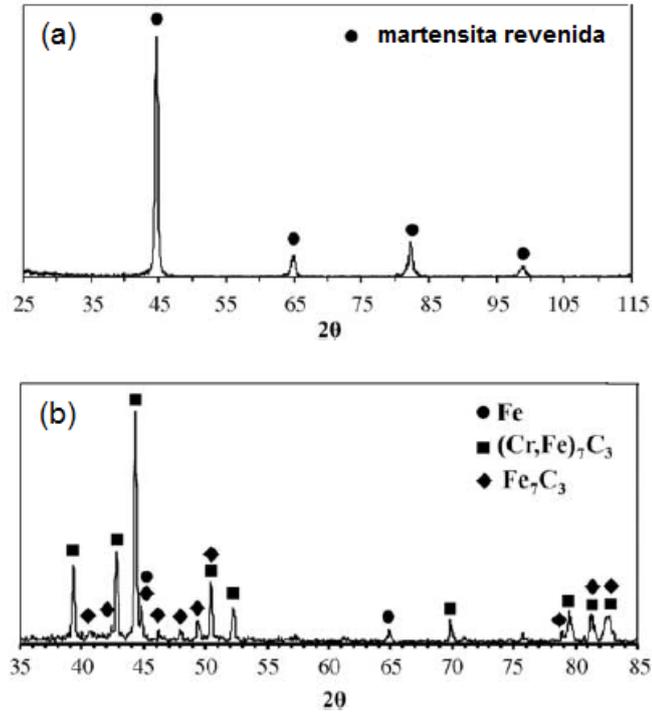
Fonte: Próprio autor.

Figura 5.4 – Difratoograma do aço ferramenta no estado inicial, como adquirido.



Fonte: Próprio autor.

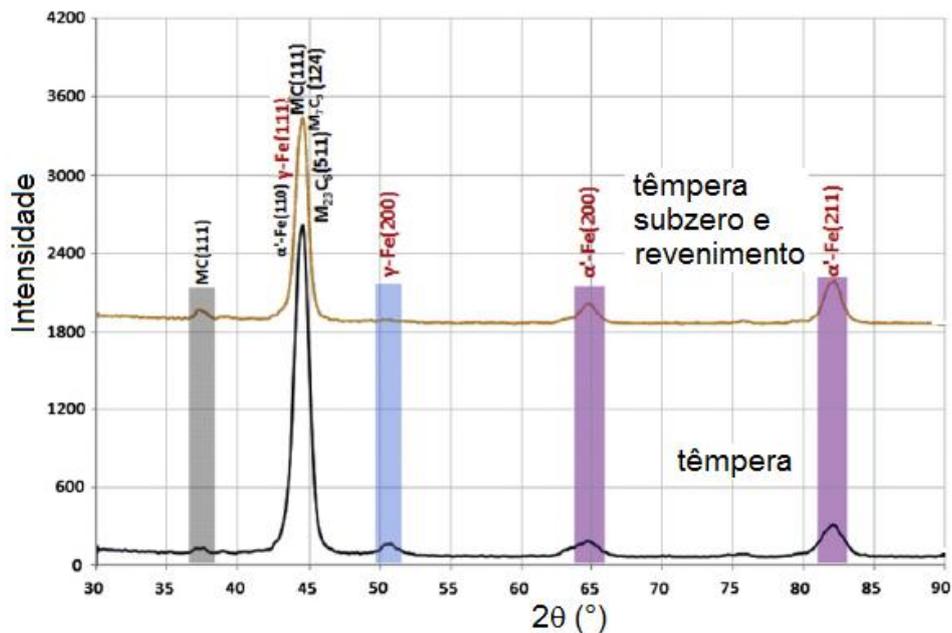
Figura 5.5 – Difratomogramas do aço ferramenta AISI D2 temperado e revenido.



(a) difratograma da matriz e (b) difratogramados carbonetos extraídos.

Fonte: BOURITHIS et al., 2006 (traduzida).

Figura 5.6 – Difratomogramas de um aço ferramenta para trabalho a frio (1,4%C; 4,7%Cr; 3,5%Mo;3,7%V) submetido a distintos tratamentos térmicos.



Fonte: ARSLAN et al., 2011(traduzida).

Na Tabela 5.2 são mostrados os resultados relativos á análise semi-quantitativa da microestrutura do material no estado inicial realizada por meio da técnica de contagem de pontos, conforme descrito no capítulo anterior. Observa-se uma proporção total de carbonetos de 14,55% no material e, a partir da diferença, 85,45% de estrutura ferrítica.

Tabela 5.2 – Análise quantitativa dos constituintes no aço ferramenta no estado inicial.

Carboneto “Grande”	Carboneto “Pequeno”	Total
5,35%	9,20%	14,55%

Fonte: Próprio autor.

5.2. Caracterização Mecânica e Microestrutural do Aço Ferramenta Temperado

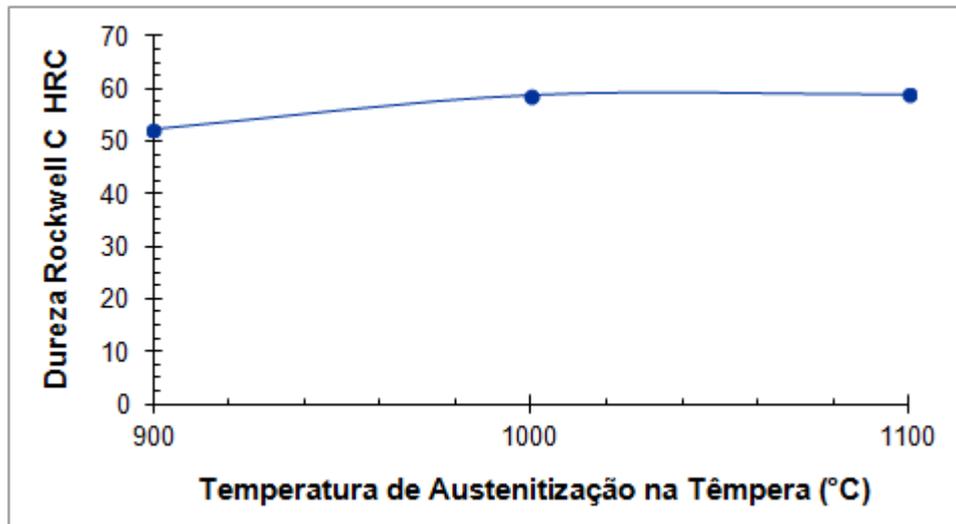
Na Tabela 5.3 são mostrados os resultados médios dos ensaios de dureza Rockwell C do aço ferramenta após a têmpera em óleo considerando as três temperaturas de aquecimento, seguida da Figura 5.7, com a representação gráfica dos valores. Verifica-se no material a tendência de aumento da dureza com a elevação da temperatura de austenitização, especialmente ao comparar a temperatura de 900°C com as demais.

Tabela 5.3 – Dureza do aço ferramenta temperado em óleo austenitizado em diferentes temperaturas.

Temperatura de Austenitização na Têmpera	Dureza Rockwell C
900°C	52,3±1,9 HRC
1000°C	58,8±1,5 HRC
1100°C	58,9±1,8 HRC

Fonte: Próprio autor.

Figura 5.7 – Dureza do aço ferramenta temperado em óleo em função da temperatura de austenitização.



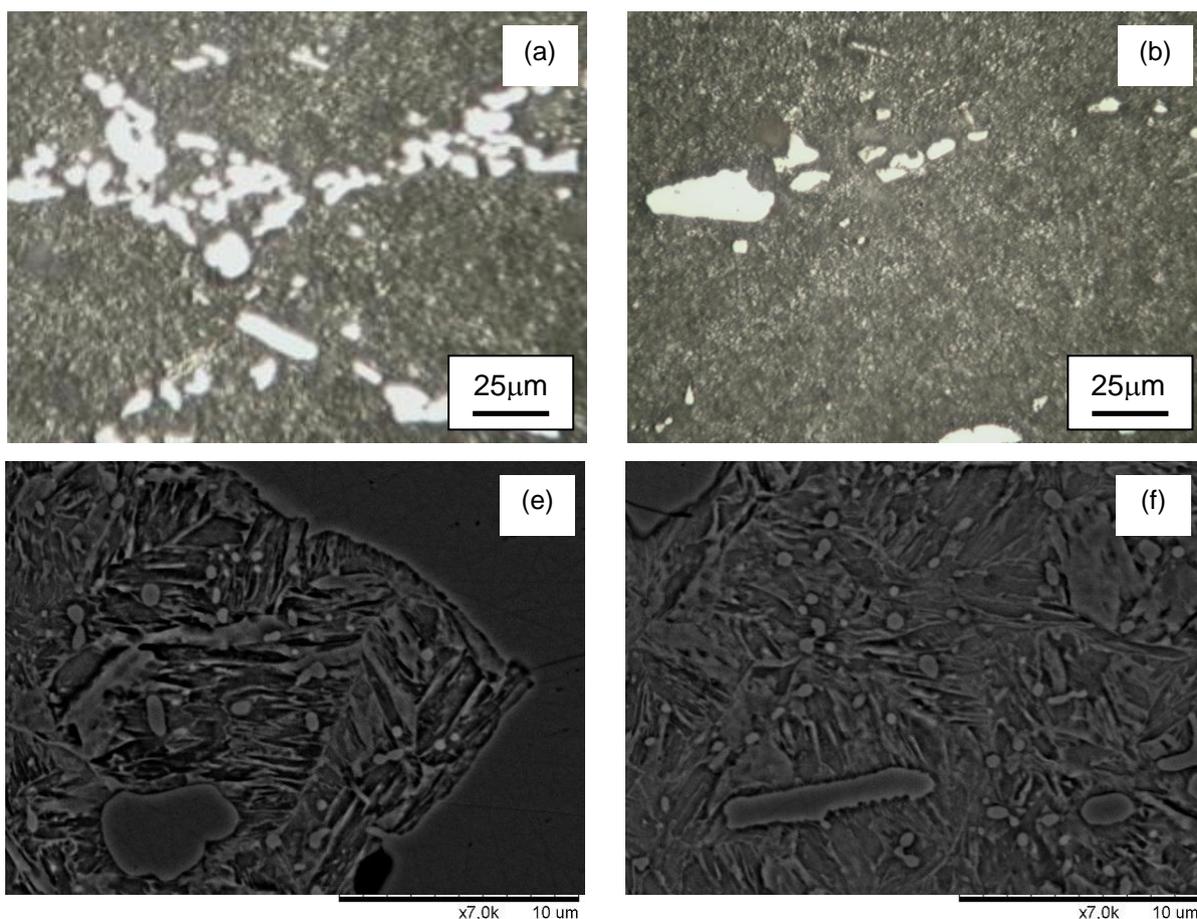
Fonte: Próprio autor.

Nas Figuras 5.8a 5.10 são mostradas imagens obtidas por MO e MEV, como exemplos, da microestrutura do material nas condições descritas. De maneira geral, uma matriz martensítica, com ripas/agulhas, é observada, com a presença de carbonetos “grandes”, dispersos de forma heterogênea, em sua maioria, agrupados, e carbonetos “pequenos”, dispersos de forma mais homogênea. Esses carbonetos exibem as mesmas morfologias e características discutidas anteriormente, sendo associados aos tipos MC, M_7C_3 e $M_{23}C_6$.

Comparando as três situações (Figuras 5.8, 5.9 e 5.10) e ainda o estado inicial do material (Figura 5.1), observa-se, qualitativamente, certa tendência à diminuição na quantidade ou proporção de carbonetos de ambos os tipos (grandes e pequenos), tanto com a realização do tratamento térmico como com a elevação na temperatura de austenitização. Confrontando com o aço ferramenta para trabalho a frio no estado como adquirido, a realização da têmpera proporcionou uma redução na quantidade de carbonetos, especialmente o de dimensões reduzidas, o que era esperado, uma vez que a matriz martensítica comporta uma quantidade de carbono não compatível com a microestrutura ferrítica. Em relação ao aumento na temperatura de austenitização da têmpera, a redução na quantidade de precipitados sugere que essa elevação de temperatura propicia maior susceptibilidade aos elementos de liga

entrar em solução sólida na estrutura austenítica, dissolvendo os carbonetos. Dessa forma, ao dissolver os carbonetos, durante o encharque, a austenita aparece com maior teor de carbono, levando à formação, a princípio, de uma maior proporção de martensita e ainda uma martensita de maior teor de carbono, com maior dureza.

Figura 5.8 – Fotomicrografias (MO e MEV) do aço ferramenta temperado em óleo com temperatura de austenitização de 900°C.



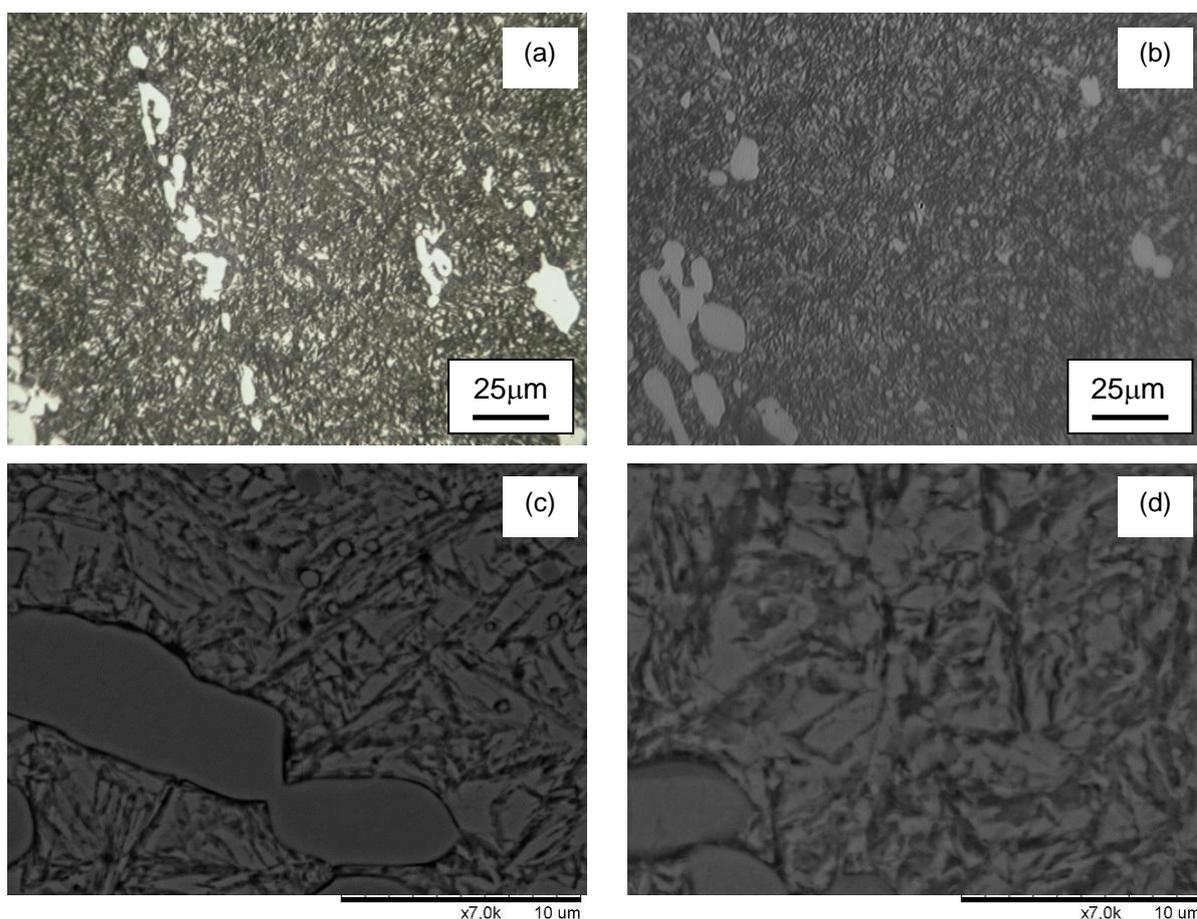
(a) e (b) MO; (c) e (d) MEV.

Fonte: Próprio autor.'

Esse comportamento está de acordo com os resultados de dureza do aço ferramenta exibidos na tabela 5.3. A realização do tratamento de têmpera levou ao desenvolvimento da microestrutura típica de aços endurecidos: estrutura martensítica, justificando a diferença em relação ao metal no estado como adquirido. Com o aumento da temperatura de austenitização na têmpera, levando a uma maior dissolução de carbonetos e, com isso, a uma maior quantidade de estrutura

martensítica e maior dureza da mesma, a dureza média da amostra seria elevada, como observado.

Figura 5.9 – Fotomicrografias (MO e MEV) do aço ferramenta temperado em óleo com temperatura de austenitização de 1000°C.



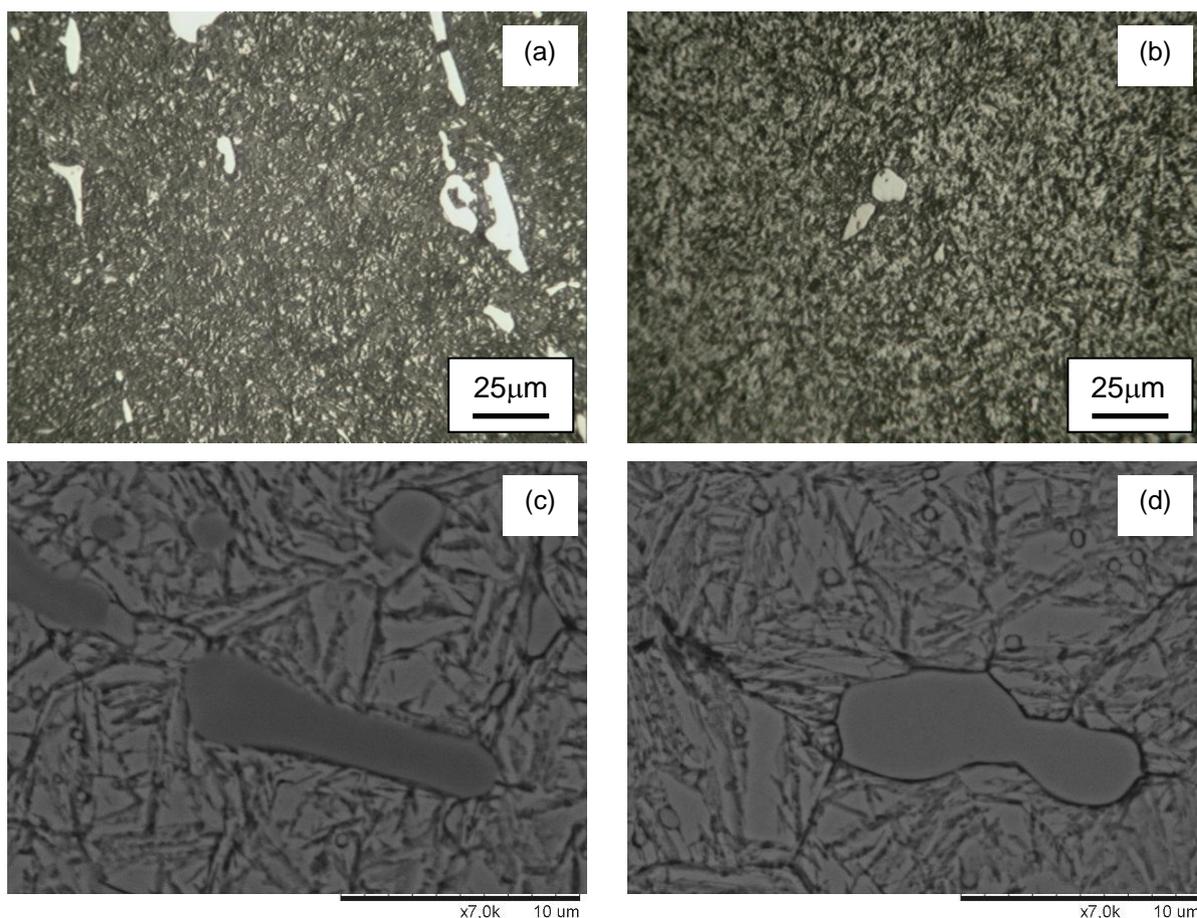
(a) e (b) MO, (c) e (d) MEV.

Fonte: Próprio autor.

Nas Figuras 5.11 a 5.14 são exibidos os resultados referentes à análise da composição química do material por meio da microsonda com feixe de elétrons acoplada ao MEV. Nesse caso, são mostradas as imagens relativas ao aço temperado austenitizado a 900°C e a 1100°C. Considerando inicialmente o material austenitizado a 900°C (Figuras 5.11 e 5.12), verifica-se uma concentração mais acentuada de vanádio e de cromo no carboneto do tipo MC e M_7C_3 (eles podem aparecer em conjuntos, superpostos, como uma única morfologia), sendo que esses elementos parecem estar também presentes (de forma mais discreta) nos

carbonetos $M_{23}C_6$ e dispersos na matriz, certamente em solução sólida. Já o molibdênio aparece distribuído de maneira quase uniforme em toda a imagem, ou seja, parece ser o elemento a entrar em solução sólida de maneira mais acentuada. Comparando com o material no estado inicial, cujo mapa de composição química mostrava uma concentração pronunciada de vanádio na região do carboneto supostamente MC, o mesmo tipo de precipitado (com formato/morfologia similar) no aço temperado parece apresentar teor de vanádio mais reduzido, seja por estar em solução sólida, seja pela presença de cromo, configurando nesse caso também carboneto M_7C_3 . Em geral, os elementos de liga mencionados aparentemente estão mais “espalhados” na microestrutura.

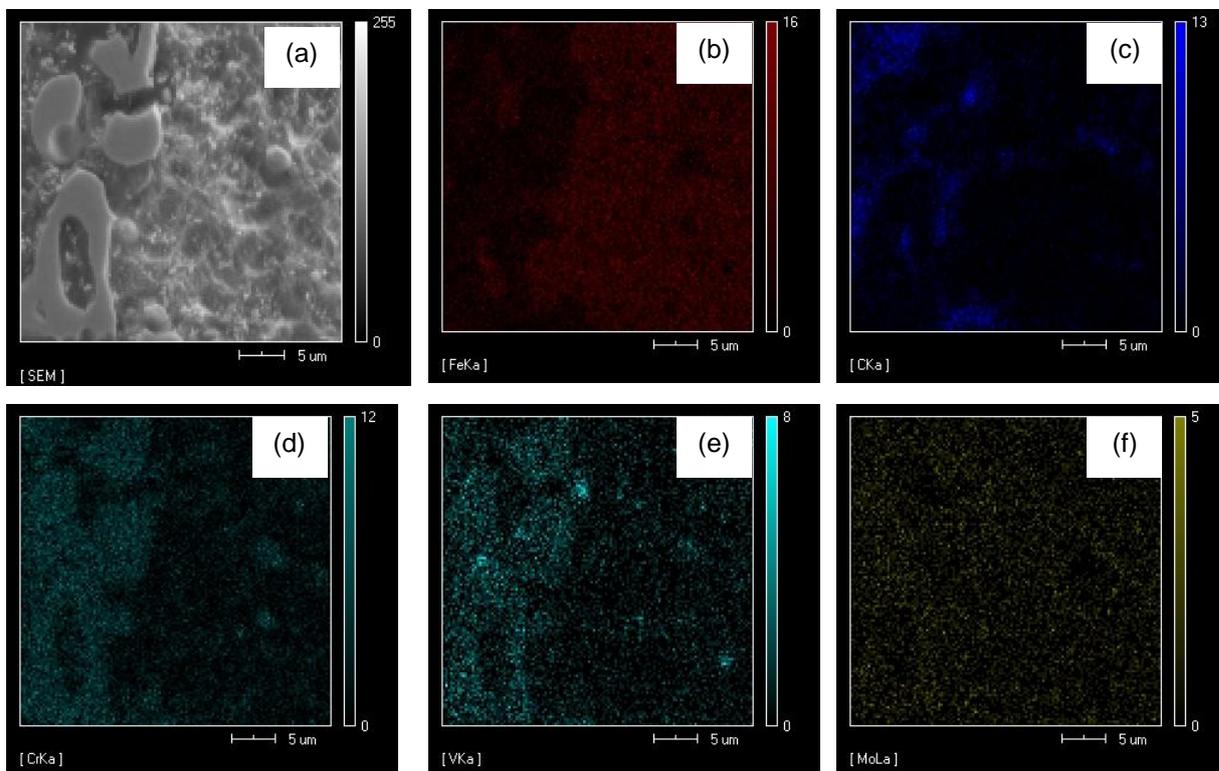
Figura 5.10 – Fotomicrografias (MO e MEV) do aço ferramenta temperado em óleo com temperatura de austenitização de 1100°C.



(a) e (b) MO, (c) e (d) MEV.

Fonte: Próprio autor.

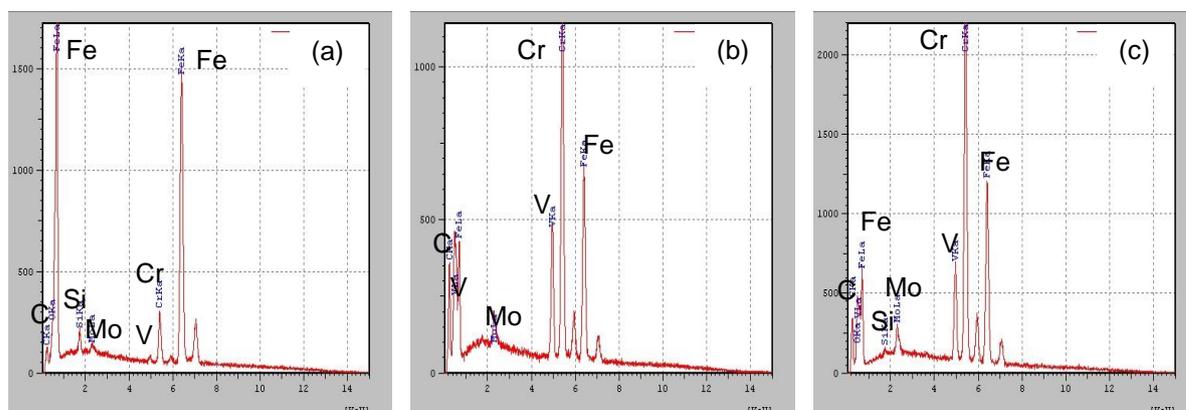
Figura 5.11 – Mapas de composição química do aço ferramenta temperado em óleo com temperatura de austenitização de 900°C.



(a) imagem, (b) Fe, (c) C, (d) Cr, (e) V e (f) Mo.

Fonte: Próprio autor.

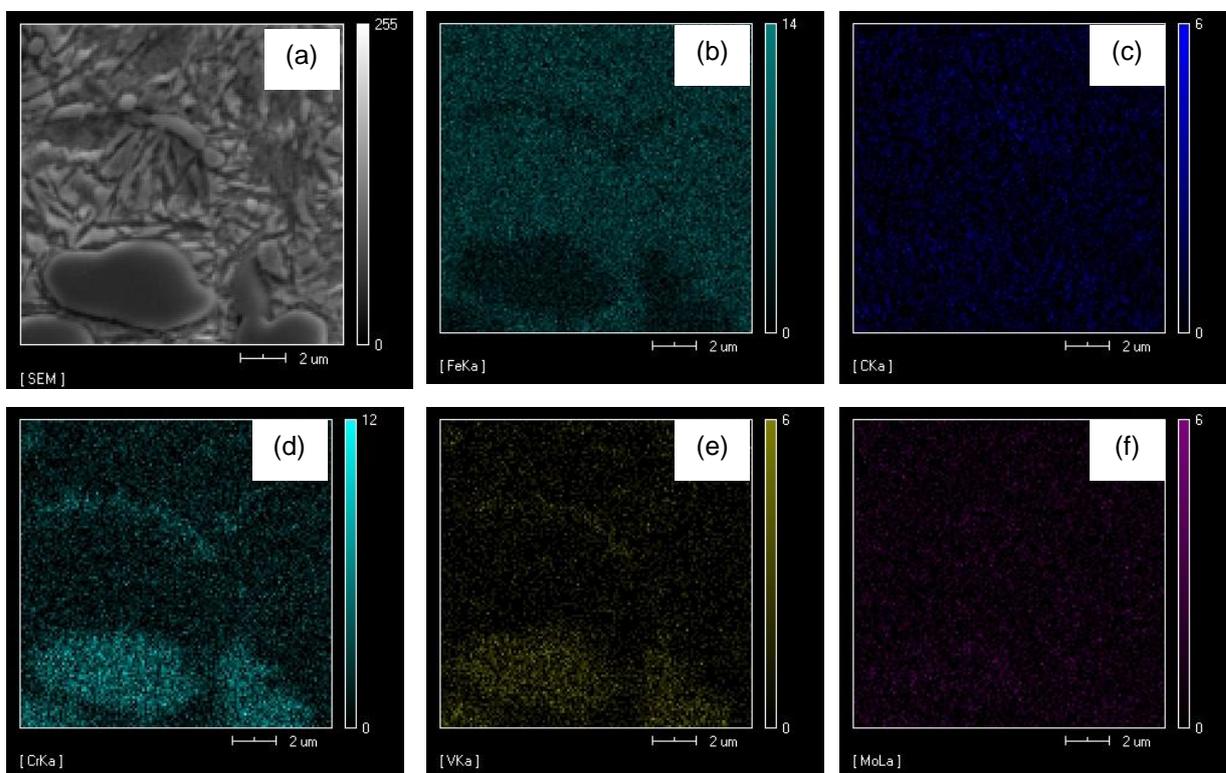
Figura 5.12 – Elementos presentes no aço ferramenta temperado em óleo com temperatura de austenitização de 900°C.



(a) matriz, (b) carboneto “grande” e (c) carboneto “pequeno”.

Fonte: Próprio autor.

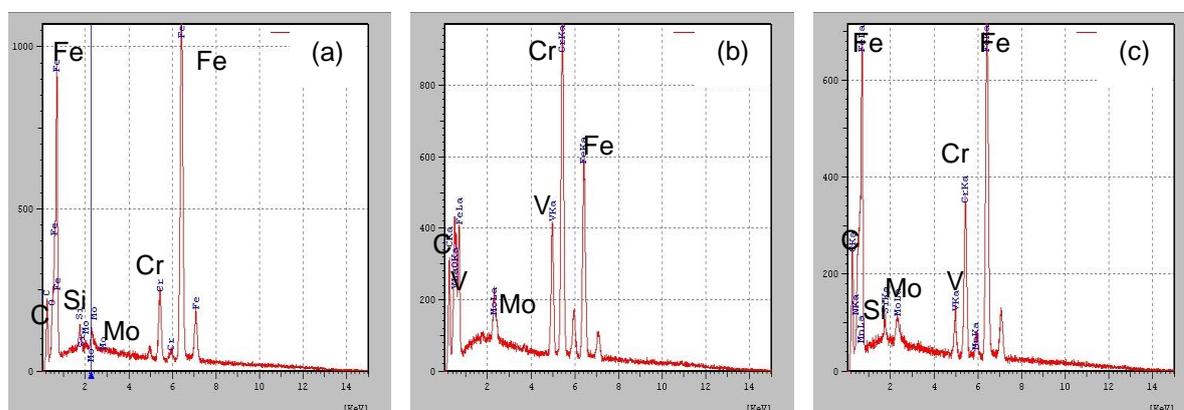
Figura 5.13 – Mapas de composição química do aço ferramenta temperado em óleo com temperatura de austenitização de 1100°C.



(a) imagem, (b) Fe, (c) C, (d) Cr, (e) V e (f) Mo.

Fonte: Próprio autor.

Figura 5.14 – Elementos presentes no aço ferramenta temperado em óleo com temperatura de austenitização de 1100°C.



(a) matriz, (b) carboneto “grande” e (c) carboneto “pequeno”.

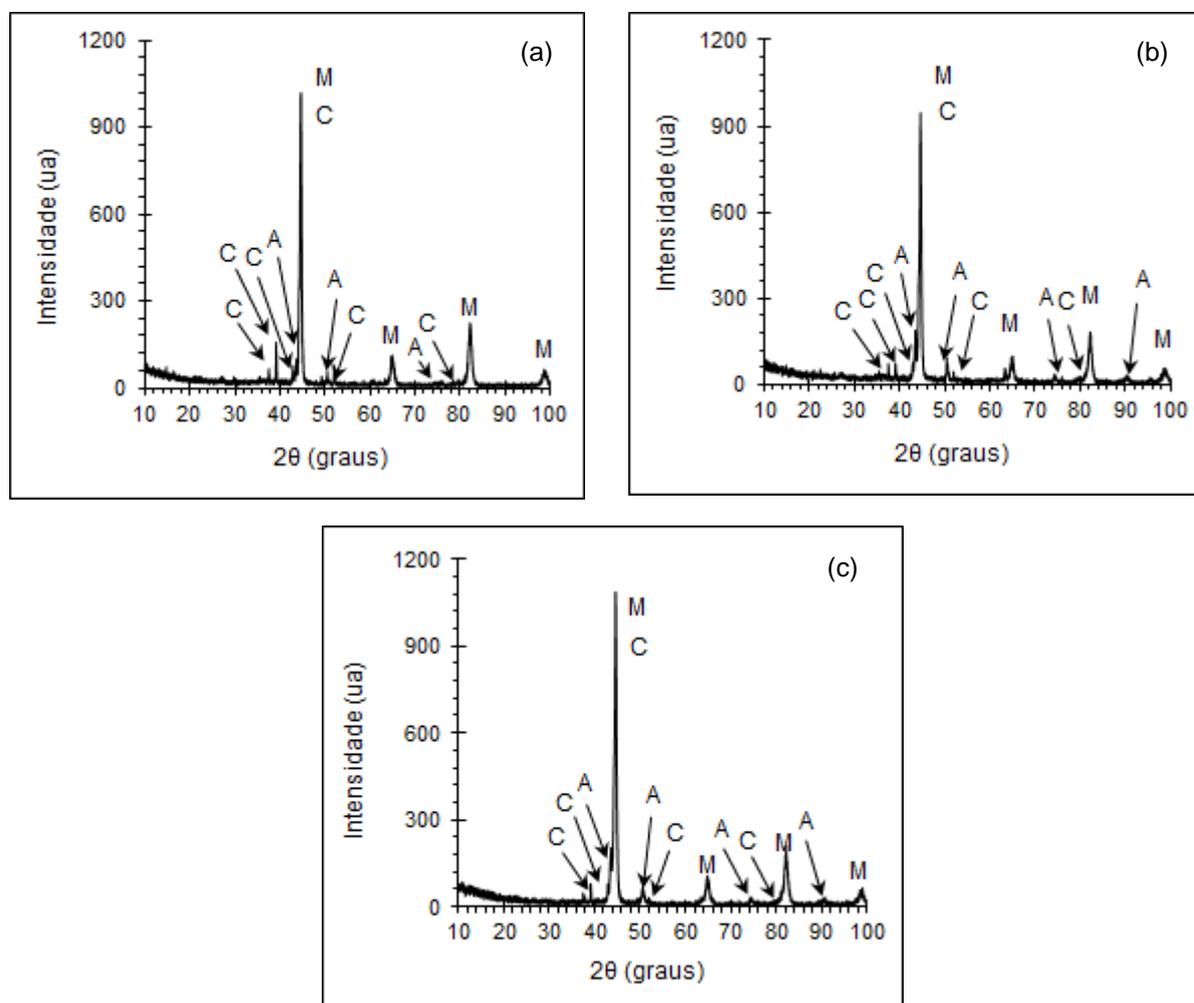
Fonte: Próprio autor.

Os resultados exibidos pelo material austenitizado a 1100°C são similares (Figuras 5.13 e 5.14). Os carbonetos maiores mostram uma concentração maior de cromo e vanádio, que surgem também dispersos nas demais áreas, o molibdênio aparece novamente distribuído na microestrutura e, diferentemente das situações anteriores, o carbono também surge mais distribuído, indicando uma maior quantidade na matriz, fenômeno compatível com a supostamente maior quantidade e maior teor de carbono da estrutura martensítica formada.

Na Figura 5.15 são exibidos os difratogramas do aço ferramenta para trabalho a frio temperado com as três temperaturas de austenitização. Para facilitar, a partir desse momento serão identificados os picos como M (referente à martensita), C (referente aos carbonetos em geral) e A (referente à austenita retida). Em relação às escalas dos gráficos, visto que as intensidades mudam, foi considerado como parâmetro o valor aproximado do maior pico, referente à estrutura martensítica/ferrítica, de forma a possibilitar, ainda que comparativamente, a análise da proporção dos constituintes. Comparando com o material no estado inicial, verifica-se que a realização da têmpera com temperatura de 900°C, possibilitou o aparecimento de picos referentes à estrutura austenítica e uma diminuição, também discreta, dos picos relativos aos carbonetos. Com a elevação da temperatura (1000°C e 1100°C), esses fenômenos se tornam mais acentuados, ou seja, a proporção de austenita retida parece ter aumentado com a temperatura, assim como a proporção de carbonetos diminuiu. Ressalta-se que essa avaliação qualitativa é baseada na presença e também na área abaixo de cada um dos picos intensidade $\times 2\theta$.

Os resultados exibidos na Figura 5.15 estão de acordo com a análise qualitativa da microestrutura do material temperado, ou seja, realização do tratamento térmico de têmpera levando à redução na quantidade de carbonetos, fenômeno acentuado com a elevação na temperatura de austenitização. Em relação à ocorrência de austenita retida, com a solubilização de carbonetos, mais acentuada com a temperatura, mais carbono fica em solução sólida na estrutura austenítica. Apesar da presença de carbono ser essencial na estrutura para a transformação martensítica, essa mesma presença, em quantidades elevadas, funciona como uma “restrição” ao mecanismo de transformação.

Figura 5.15 – Difratogramas do aço ferramenta temperado com diferentes temperaturas de austenitização.



(a) 900°C, (b) 1000°C e (c) 1100°C.

Fonte: Próprio autor.

Considerando que a transformação martensítica se dá por meio de cisalhamento (BHADESHIA; HONEYCOMBE, 2006; COLPAERT, 2008), nesse caso, uma vez que os átomos de carbono ficam em solução sólida intersticial na austenita, eles geram tensões que elevam a resistência ao cisalhamento, portanto, dificultando a deformação na rede cristalina (CHIAVERINI, 2005). Esse comportamento se torna mais acentuado com o aumento da temperatura de austenitização, pois mais carbono entra em solução sólida, o que geraria mais austenita retida. Diversos trabalhos vêm sendo realizados para tentar minimizar a presença de austenita retida nos aços ferramenta para trabalho a frio, como mencionado no capítulo de revisão

bibliográfica (ARSLAN et al., 2011; DAS et al., 2010; KOKOSZA; PACYNA, 2005). A ocorrência dessa estrutura é considerada, em geral, prejudicial, pois além de reduzir a dureza média desejada para o componente após a têmpera, o mesmo pode sofrer transformação martensítica no revenimento subsequente durante o resfriamento (KRAUSS, 1990), gerando uma estrutura ainda frágil em uma operação realizada para elevar a tenacidade do material. No presente trabalho, a presença de austenita retida não levou à queda na dureza média do material. Acredita-se que o ganho com a quantidade de martensita e com a dureza da mesma superou a dureza reduzida da austenita formada.

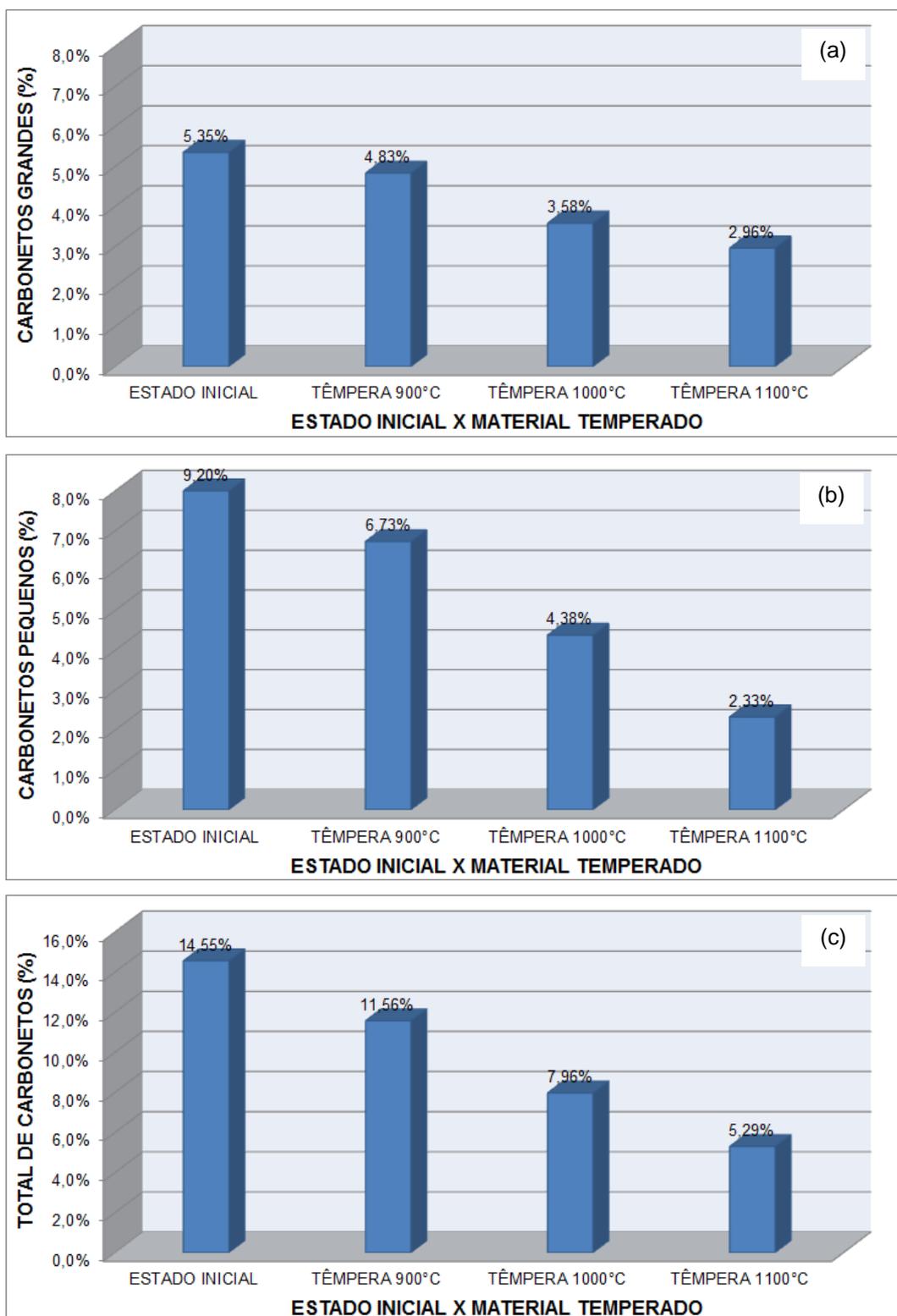
Na Tabela 5.4 são exibidos os resultados da análise quantitativa realizada a partir das imagens de MO e MEV do aço ferramenta para trabalho a frio temperado e na Figura 5.16 a representação gráfica dos dados (nesse caso também com os valores relativos à liga metálica no estado inicial). Verifica-se que, como observado qualitativamente, tanto a realização da têmpera como o aumento na temperatura de austenitização promoveu uma redução na quantidade de carbonetos presentes no material. Essa diminuição ocorreu tanto para os carbonetos denominados como “grandes” (MC e M_7C_3) como nos “pequenos” ($M_{23}C_6$), sendo mais acentuada para esse segundo grupo. Dessa forma, compõem o aço temperado a $900^\circ C$, $1000^\circ C$ e $1100^\circ C$ aproximadamente 80,44%; 91,04% e 93,44% de martensita (acrescida da austenita retida).

Tabela 5.4 – Análise quantitativa dos carbonetos no aço temperado empregando diferentes temperaturas de austenitização.

Temperatura de Austenitização	Quantidade de Carbonetos %		
	Carboneto “Grande”	Carboneto “Pequeno”	Total
900°C	4,83	6,73	11,56
1000°C	3,58	4,38	7,96
1100°C	2,96	2,33	5,29

Fonte: Próprio autor.

Figura 5.16 – Análise quantitativa dos carbonetos no aço no estado inicial e temperado empregando diferentes temperaturas de austenitização



(a) % carbonetos “grandes”, (b) % carbonetos “pequenos” e (c) % total de carbonetos.

Fonte: Próprio autor.

5.3. Caracterização Mecânica e Microestrutural do Aço Ferramenta Temperado e Revenido

Na Tabela 5.5 são exibidos os valores médios de dureza Rockwell C apresentados pelo aço ferramenta após a têmpera e o revenimento em diferentes temperaturas. Nas Figuras 5.17 a 5.19 são mostrados os resultados de dureza como gráficos, acompanhados dos dados obtidos pelo material apenas temperado.

Tabela 5.5 – Dureza do aço ferramenta temperado em óleo com diferentes temperaturas de austenitização e revenido em temperaturas distintas.

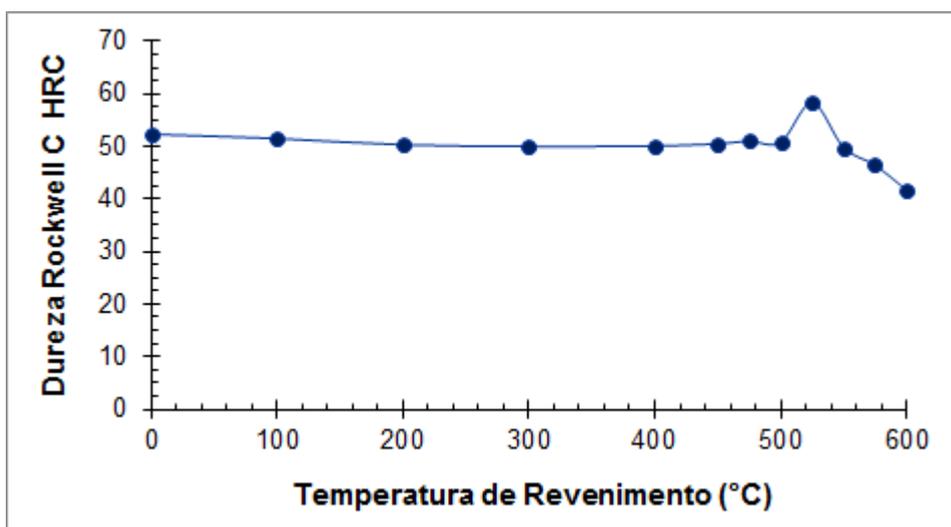
Temperatura de Revenimento	Dureza Rockwell C		
	Temperatura de Austenitização na Têmpera		
	900°C	1000°C	1100°C
100°C	51,5 ± 0,6	57,5 ± 0,3	58,4 ± 1,3
200°C	50,3 ± 0,5	57,0 ± 0,7	57,7 ± 1,1
300°C	50,0 ± 1,4	56,9 ± 1,0	57,5 ± 1,5
400°C	50,1 ± 2,4	56,5 ± 0,7	57,8 ± 0,8
450°C	50,5 ± 1,0	56,3 ± 1,0	59,4 ± 0,4
475°C	51,0 ± 1,0	55,6 ± 0,6	59,6 ± 0,8
500°C	50,8 ± 0,8	58,8 ± 0,6	60,4 ± 1,7
525°C	58,3 ± 0,5	61,0 ± 0,7	63,1 ± 0,6
550°C	49,8 ± 0,8	56,1 ± 0,7	57,2 ± 1,0
575°C	46,4 ± 0,5	53,9 ± 0,6	55,3 ± 0,5
600°C	41,7 ± 0,7	49,8 ± 0,6	52,8 ± 1,6

Fonte: Próprio autor.

Observando inicialmente o comportamento mecânico do aço ferramenta para trabalho a frio previamente temperado com temperatura de austenitização a 900°C (Figura 5.17), verifica-se que os resultados de dureza são praticamente constantes (apenas uma queda suave) com a realização do tratamento térmico, inclusive com o

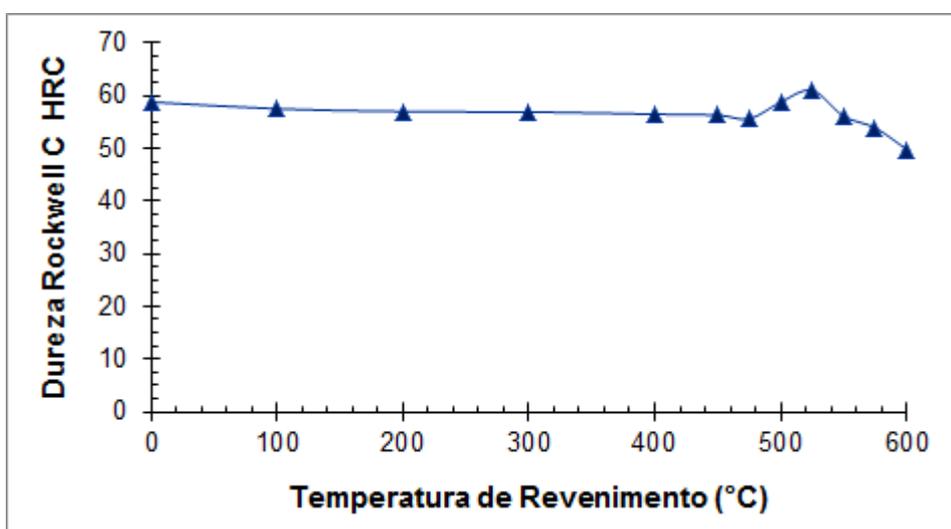
aumento da temperatura de revenimento até 500°C. A partir dessa temperatura, uma elevação acentuada no resultado médio de dureza é observada, com valor médio maior que aquele do metal apenas temperado, seguida da queda para as temperaturas de revenimento de 550°C, 575°C e 600°C.

Figura 5.17 – Dureza do aço ferramenta temperado em óleo com temperatura de austenitização de 900°C e revenido em diferentes temperaturas.



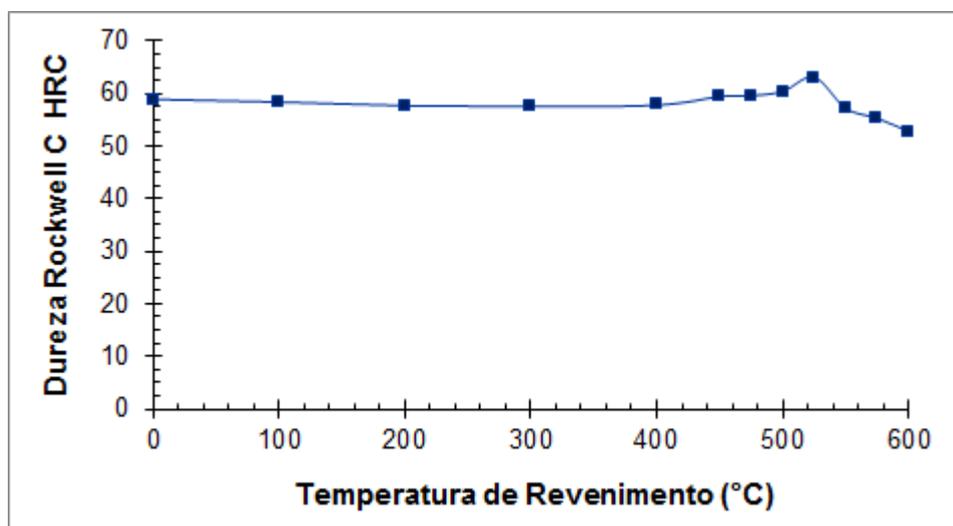
Fonte: Próprio autor.

Figura 5.18 – Dureza do aço ferramenta temperado em óleo com temperatura de austenitização de 1000°C e revenido em diferentes temperaturas.



Fonte: Próprio autor.

Figura 5.19 – Dureza do aço ferramenta temperado em óleo com temperatura de austenitização de 1100°C e revenido em diferentes temperaturas.



Fonte: Próprio autor.

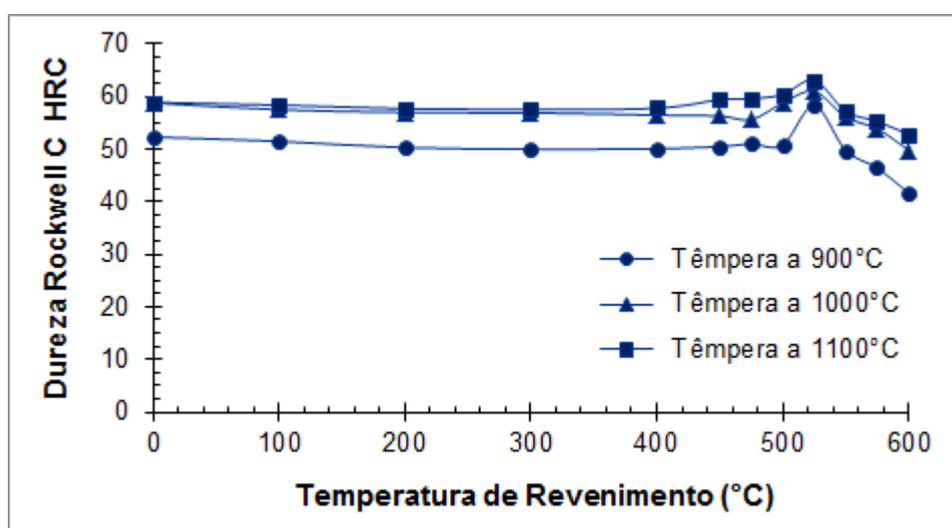
Comportamento similar é verificado para as demais condições de têmpera (Figuras 5.18 e 5.19), com a suave queda na dureza seguida da elevação no resultado médio com a temperatura de revenimento de 525°C, novamente levando a valores superiores àqueles do aço temperado.

Na Figura 5.20 pode ser observada a comparação entre as três condições avaliadas. Percebe-se que a alteração na temperatura de austenitização na têmpera não modificou a temperatura na qual a elevação máxima nos resultados de dureza foi verificada (para os intervalos investigados no trabalho). Em adição a este fato, percebe-se que a mudança nos resultados, para cada uma das temperaturas de revenimento, é pouco acentuada ao passar da temperatura de têmpera prévia 1000°C para 1100°C, contrário do que ocorre para a condição de 900°C em relação às demais. Verifica-se também que, para as três condições iniciais, os valores de dureza relativos a 525°C são mais próximos que as demais condições de revenimento.

O comportamento do aço ferramenta exibido nas Figuras 5.17 a 5.20, pelo menos parcialmente, é mencionado na literatura. A manutenção nos resultados de dureza com a elevação da temperatura de revenimento, oposto do que é observado para os

aços carbono e de baixa liga, é um fenômeno aceito para as ligas Fe-C com alto teor de carbono e elevada quantidade de elementos de liga. Nesse caso, esse resultado é associado à interferência dos elementos de liga no sentido de atrasar a precipitação dos carbonetos durante o revenimento (TOTTEN, 2007; HETZNER; GEERTRUYDEN, 2008), e uma vez que essa precipitação implica na alteração drástica na estrutura martensítica, a inibição desse fenômeno leva à conservação da dureza. Já a ocorrência da elevação da dureza da liga em uma dada temperatura, considerada relativamente elevada, é denominada, como já mencionado, endurecimento secundário, fenômeno exemplificado na Figura 3.6 para aços com a presença de cromo, vanádio, molibdênio e tungstênio. De acordo com a teoria, o endurecimento secundário é caracterizado pela transformação da martensita em martensita revenida de alta temperatura, ou seja, uma microestrutura não mais associada à presença da estrutura cristalina tetragonal de corpo centrado, com supersaturação de carbono, mas sim à presença de uma matriz com estrutura cristalina cúbica de corpo centrado (ferrita) com carbonetos de ferro e carbonetos dos demais elementos de liga precipitados, esses últimos de elevada dureza e finamente dispersos no metal (KRAUSS, 1990). Dessa forma, esses carbonetos compensariam (e poderiam superar) o decréscimo na dureza do material com o fim da estrutura martensítica.

Figura 5.20 – Comparação da dureza do aço ferramenta temperado com distintas temperaturas de austenitização e revenido em temperaturas diversas.



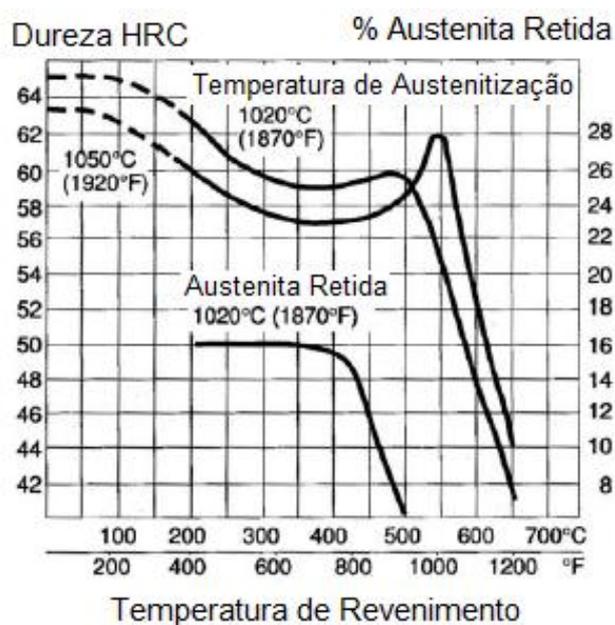
Fonte: Próprio autor.

De forma a possibilitar a comparação dos resultados obtidos no trabalho com outros trabalhos realizados, com diferentes aços ferramenta para trabalho a quente e em distintas condições de processamento térmico, nas Figuras 5.21 e 5.22 são exibidos gráficos de dureza em função da temperatura de revenimento (BOURITHIS et al., 2006; OPPENKOWSKI et al., 2010). Considerando o primeiro gráfico (Figura 5.21), os resultados exibidos foram obtidos para o aço ferramenta AISI D2, temperado em óleo, com duas temperaturas de austenitização, e revenido em temperaturas diversas (BOURITHIS et al., 2006). Verifica-se a ocorrência do fenômeno de endurecimento secundário para ambas situações. No entanto, diferentemente do que foi observado no presente trabalho de pesquisa, a temperatura de austenitização influenciou na temperatura de revenimento na qual o endurecimento secundário foi detectado: para 1020°C e 1050°C na têmpera, as temperaturas de revenimento foram 500°C e 550°C, respectivamente. Comportamento similar foi verificado, novamente para o aço AISI D2, porém comparando os resultados obtidos com a realização de têmpera convencional e têmpera com resfriamento subzero, conforme a Figura 5.22 (OPPENKOWSKI et al., 2010). Nesse caso, foi verificada a alteração da temperatura do endurecimento secundário (máxima) tanto no tratamento térmico convencional como no tratamento criogênico. Dessa forma, ficam evidenciados os efeitos de diferenças na composição química no comportamento do aço ferramenta posterior aos tratamentos térmicos.

Nas Figuras 5.23 a 5.27 são exibidas, como exemplos, fotomicrografias do aço ferramenta temperado a 900°C e revenido em diferentes temperaturas. Verifica-se a presença de matriz martensítica revenida, sendo que para algumas situações essa não é tão nítida, possivelmente devido à dificuldade de ataque químico, que revelou de forma mais acentuada a ocorrência dos carbonetos. Em geral, observa-se que a estrutura martensítica parece se tornar mais difusa, com agulhas menos definidas, à medida que a temperatura de revenimento é elevada. Comparando com o material apenas temperado, parece ter ocorrido uma redução na quantidade de carbonetos “pequenos”, que depois parece ser elevada em temperaturas de revenimento maiores (em torno de 500°C/525°C). Em relação aos carbonetos “grandes”, o comportamento, qualitativamente, não é claro.

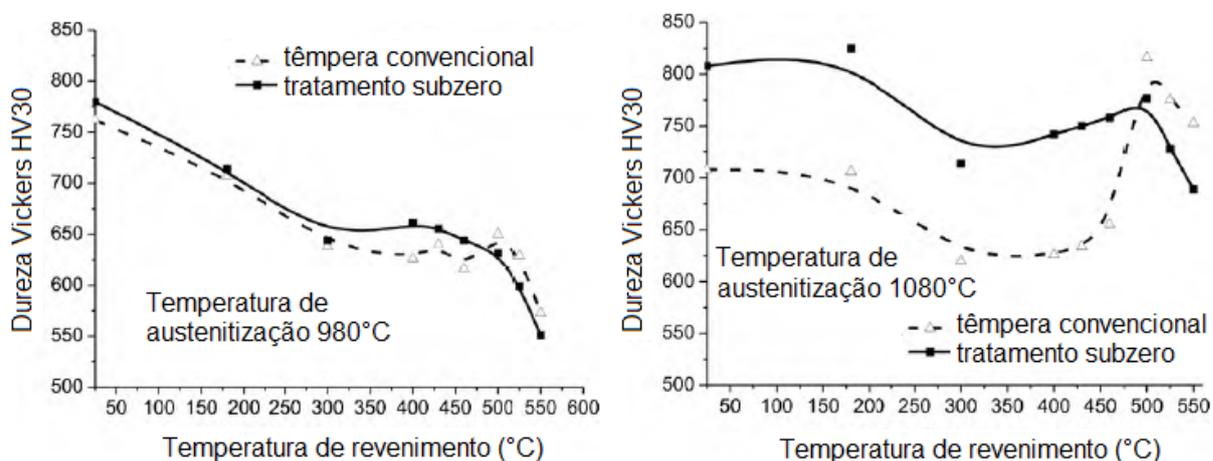
Nas Figuras 5.28 a 5.32 são apresentadas as fotomicrografias, novamente como exemplos, do aço ferramenta temperado a 1000°C e revenido. Em geral, em termos da estrutura martensítica, o comportamento é similar à condição anterior. Considerando a presença dos carbonetos “pequenos”, observa-se, a princípio, a elevação de sua proporção por volta de 525°C/550°C.

Figura 5.21 – Curvas dureza – temperatura de revenimento para o aço AISI D2.



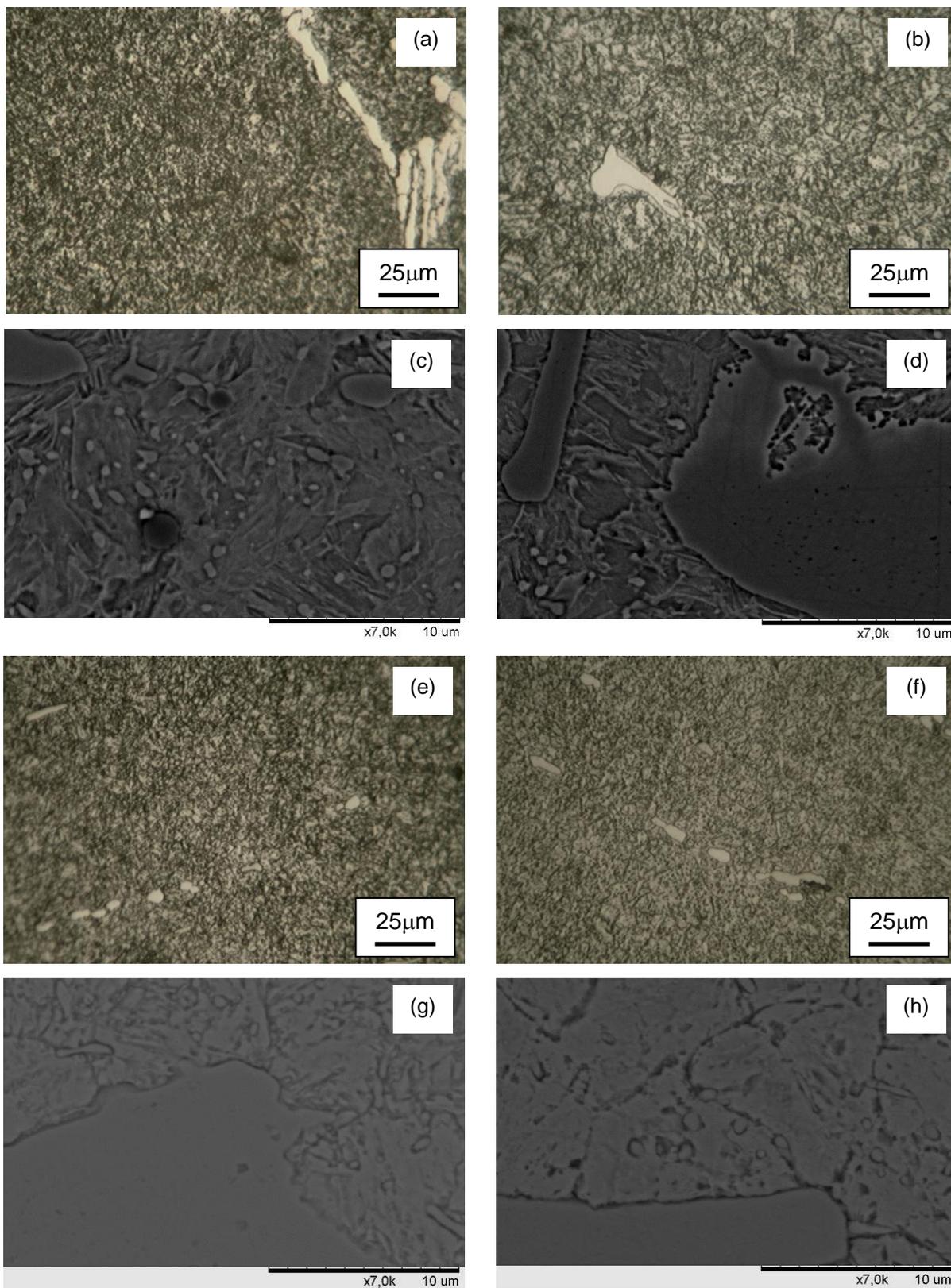
Fonte: BOURITHIS et al., 2006 (adaptada).

Figura 5.22 – Curvas dureza – temperatura de revenimento para o aço AISI D2 temperado de forma convencional e submetido a tratamento subzero.



Fonte: OPPENKOWSKI et al., 2010 (adaptada).

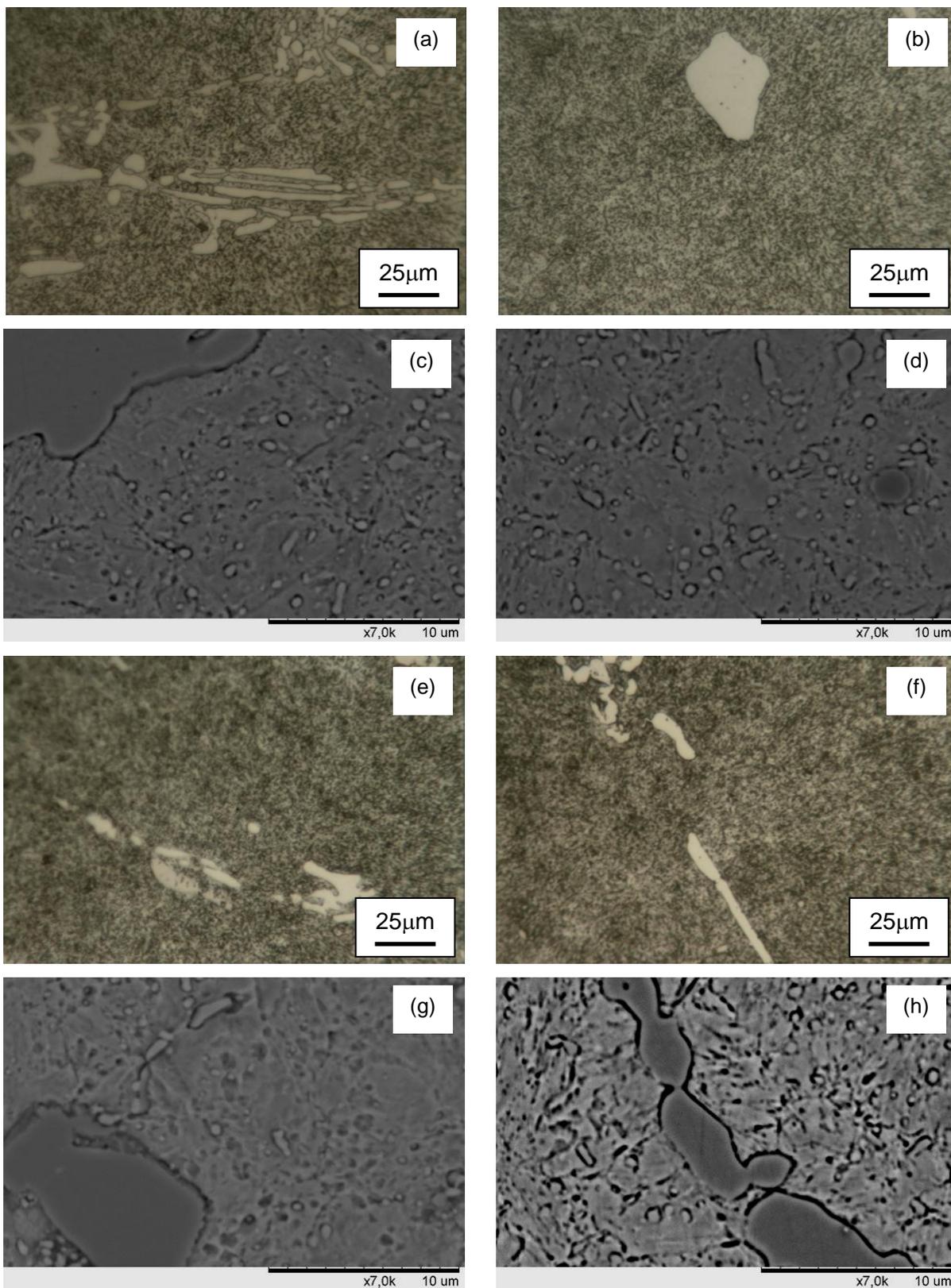
Figura 5.23 – Fotomicrografias (MO e MEV) do aço ferramenta temperado com temperaturas de austenitização de 900°C e revenido a 200°C e a 400°C.



(a) a (d) revenimento a 200°C, (e) a (h) revenimento a 400°C.

Fonte: Próprio autor.

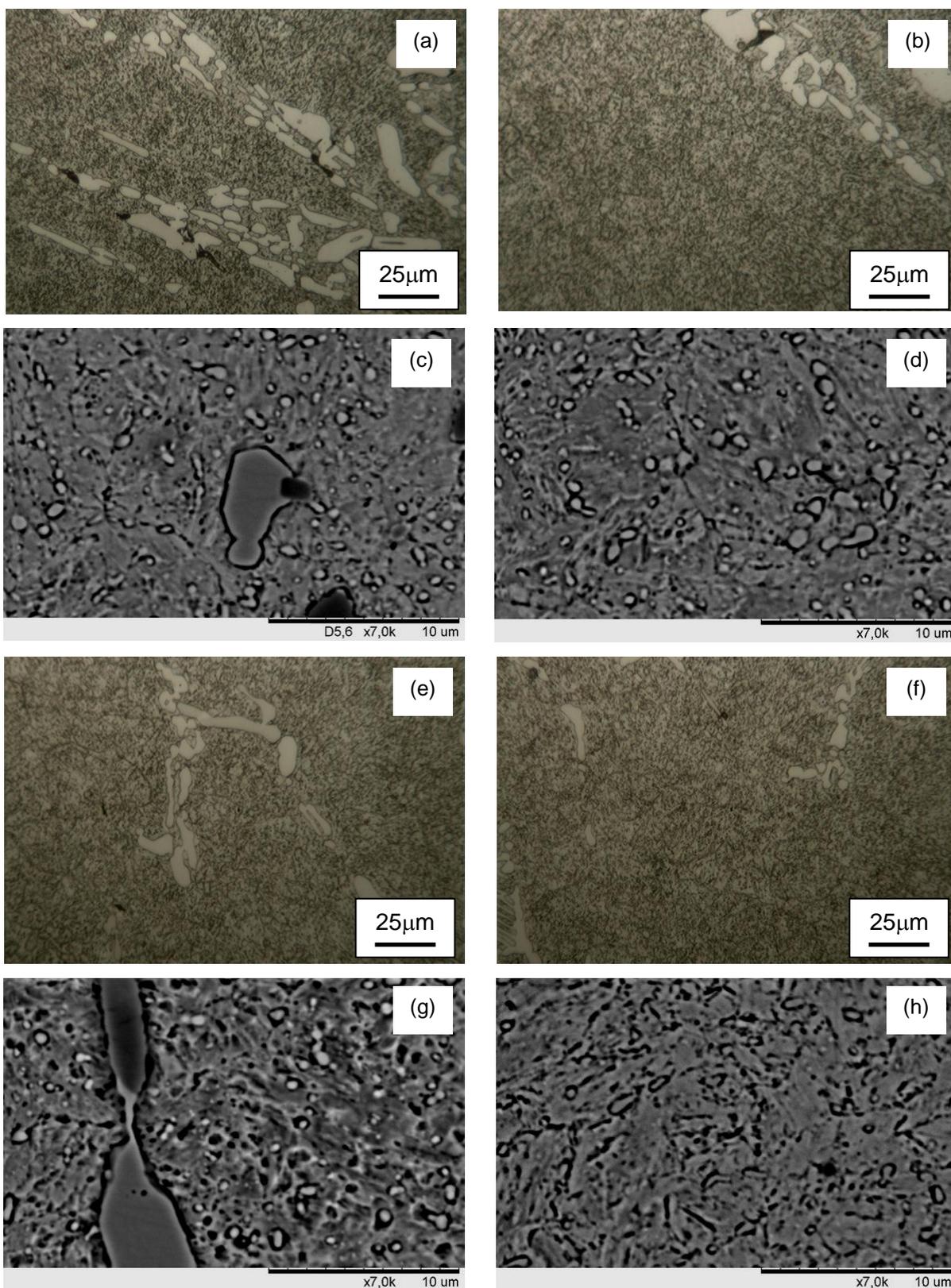
Figura 5.24 – Fotomicrografias (MO e MEV) do aço ferramenta temperado com temperaturas de austenitização de 900°C e revenido a 450°C e a 475°C.



(a) a (d) revenimento a 450°C, (e) a (h) revenimento a 475°C.

Fonte: Próprio autor.

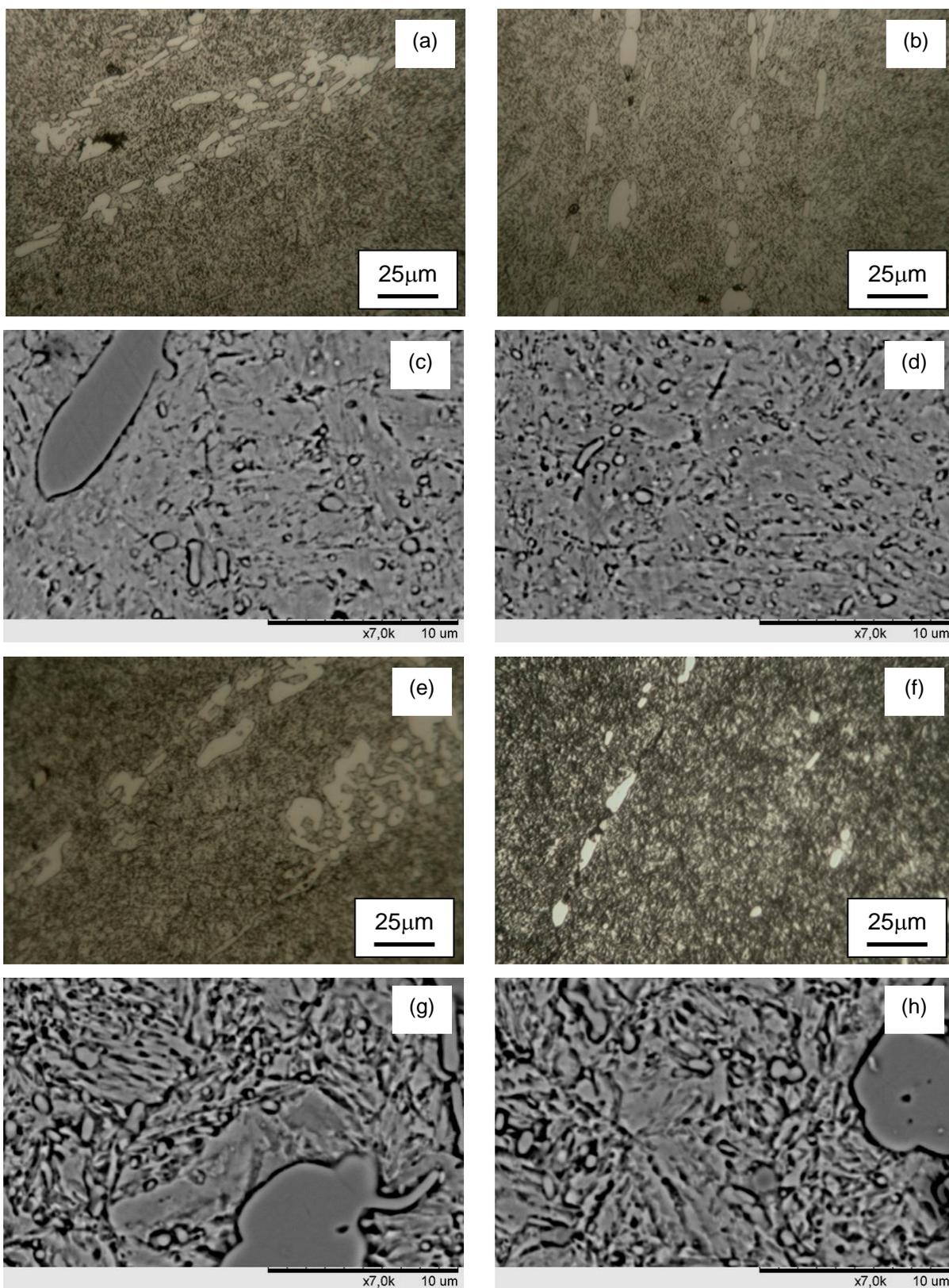
Figura 5.25 – Fotomicrografias (MO e MEV) do aço ferramenta temperado com temperaturas de austenitização de 900°C e revenido a 500°C e a 525°C.



(a) a (d) revenimento a 500°C, (e) a (h) revenimento a 525°C.

Fonte: Próprio autor.

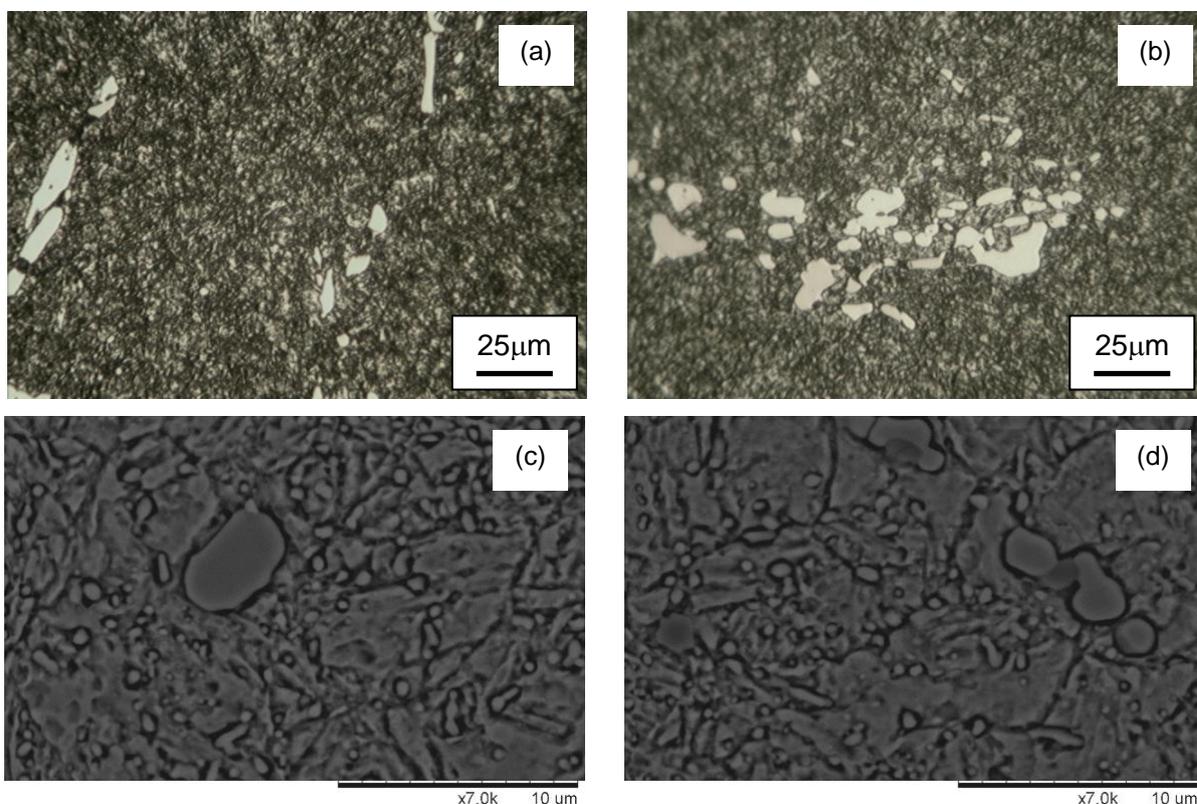
Figura 5.26 – Fotomicrografias (MO e MEV) do aço ferramenta temperado com temperaturas de austenitização de 900°C e revenido a 550°C e a 575°C.



(a) a (d) revenimento a 550°C, (e) a (h) revenimento a 575°C.

Fonte: Próprio autor.

Figura 5.27 – Fotomicrografias (MO e MEV) do aço ferramenta temperado com temperaturas de austenitização de 900°C e revenido a 600°C.



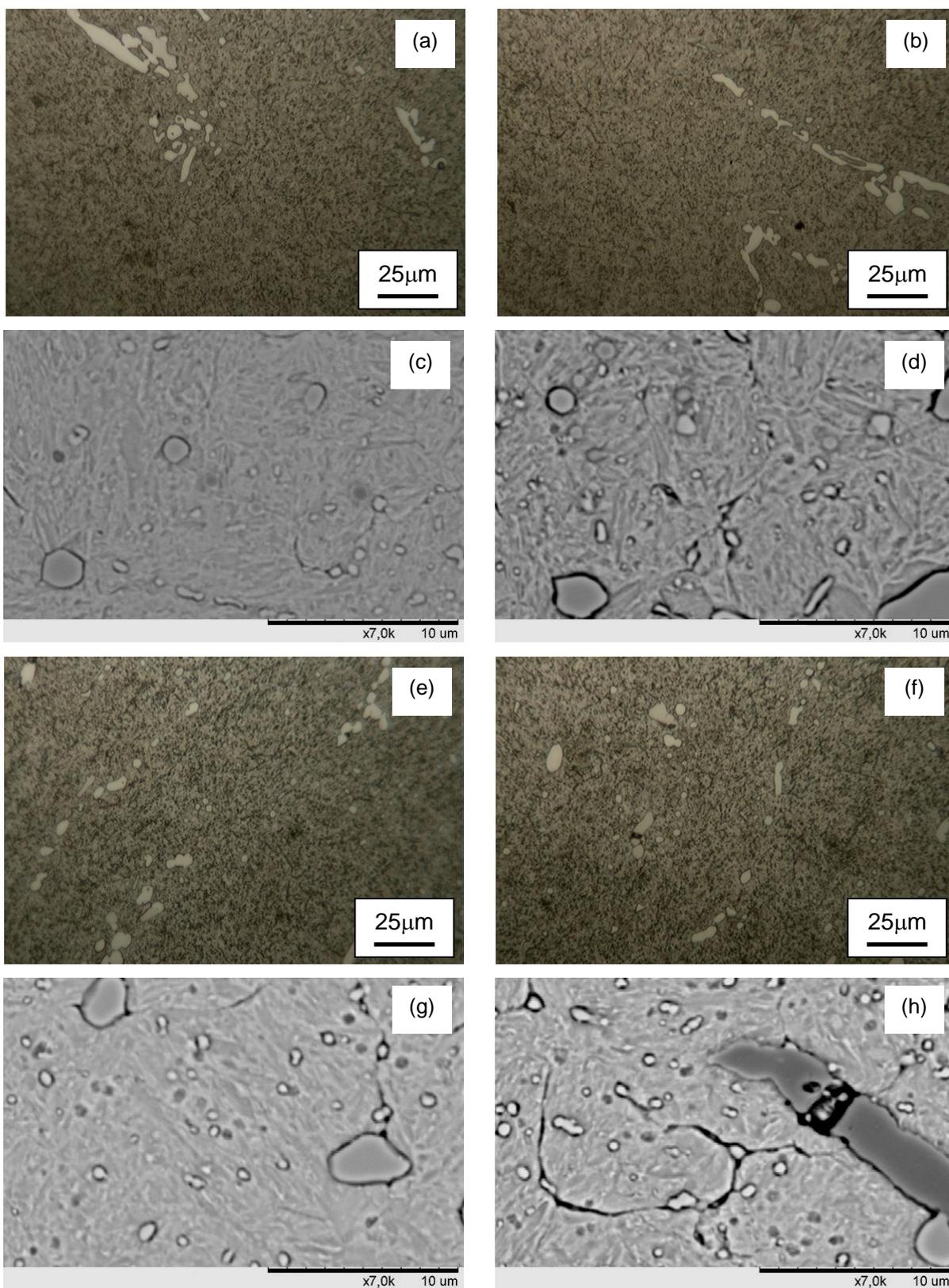
(a) a (d) revenimento a 600°C.

Fonte: Próprio autor.

Nas Figuras 5.33 a 5.37 são mostradas imagens referentes à microestrutura do aço ferramenta temperado a 1100°C e revenido. Mais uma vez, o comportamento geral considerando a matriz de martensita revenida é semelhante às outras condições. Para o caso dos carbonetos “grandes”, eventuais modificações não são claras. Já para os carbonetos “pequenos”, a quantidade parece ser reduzida com a temperatura de revenimento e depois ser elevada em 525°C.

De maneira geral, em termos de morfologia, para todas as condições de têmpera e de revenimento, os carbonetos parecem ser os mesmos observados anteriormente, ou seja, dos tipos MC, M_7C_3 e $M_{23}C_6$. Comparando os resultados relativos às três condições de têmpera, similarmente ao que foi observado para o metal não revenido, a elevação da temperatura de austenitização parece implicar na redução na proporção de carbonetos em geral mesmo após o revenimento.

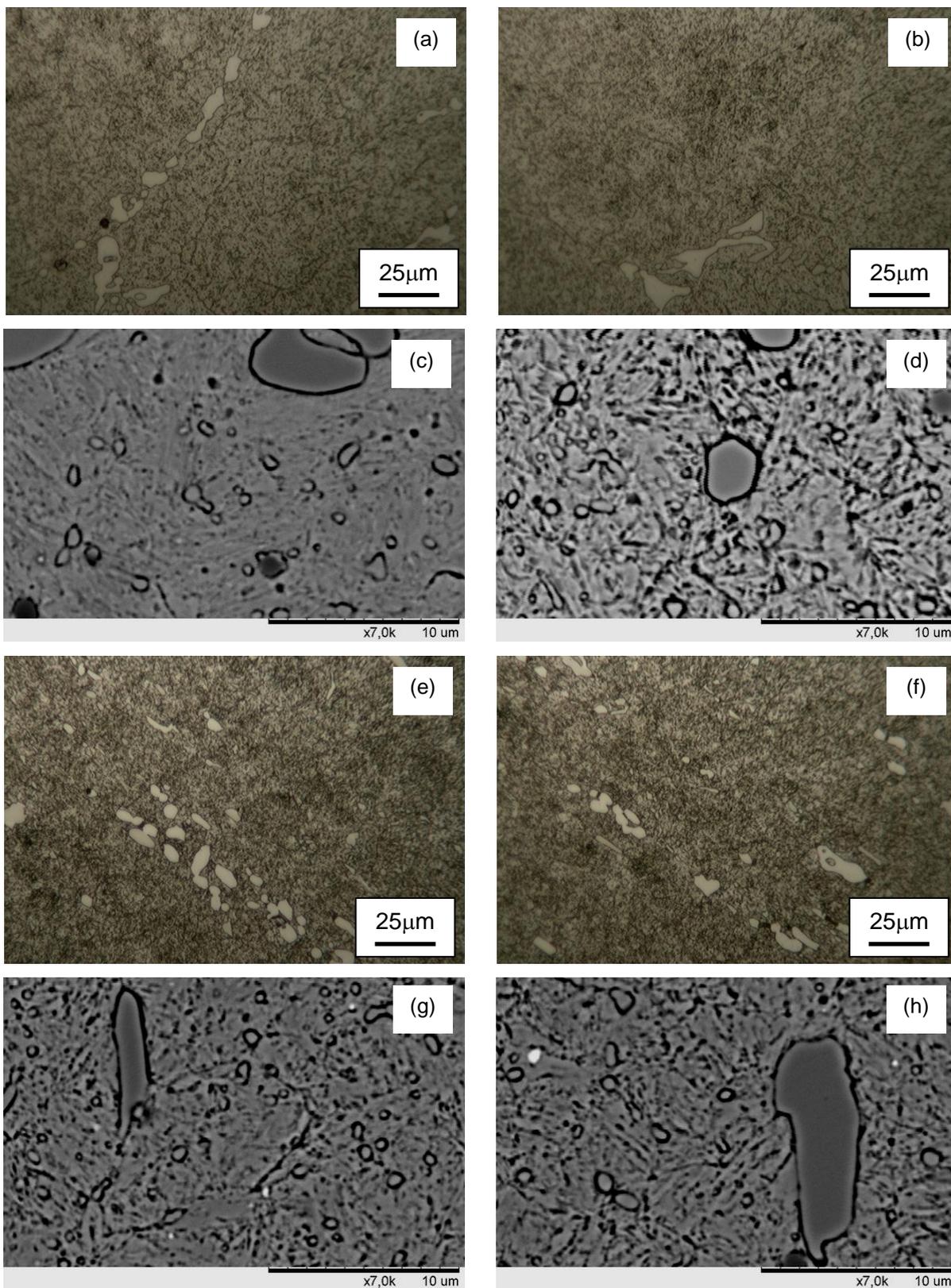
Figura 5.28 – Fotomicrografias (MO e MEV) do aço ferramenta temperado com temperaturas de austenitização de 1000°C e revenido a 200°C e a 400°C.



(a) a (d) revenimento a 200°C, (e) a (h) revenimento a 400°C.

Fonte: Próprio autor.

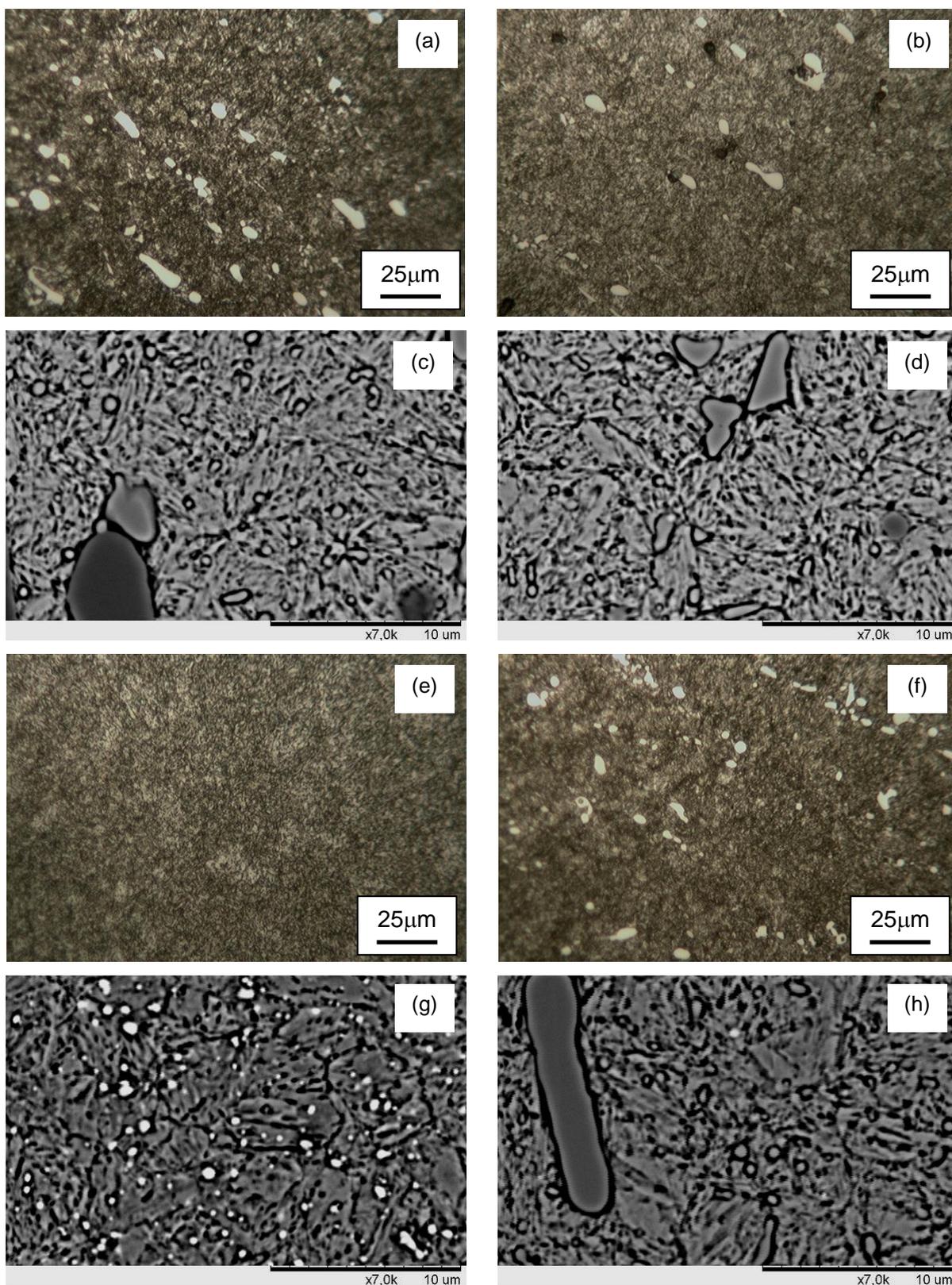
Figura 5.29 – Fotomicrografias (MO e MEV) do aço ferramenta temperado com temperaturas de austenitização de 1000°C e revenido a 450°C e a 475°C.



(a) a (d) revenimento a 450°C, (e) a (h) revenimento a 475°C.

Fonte: Próprio autor.

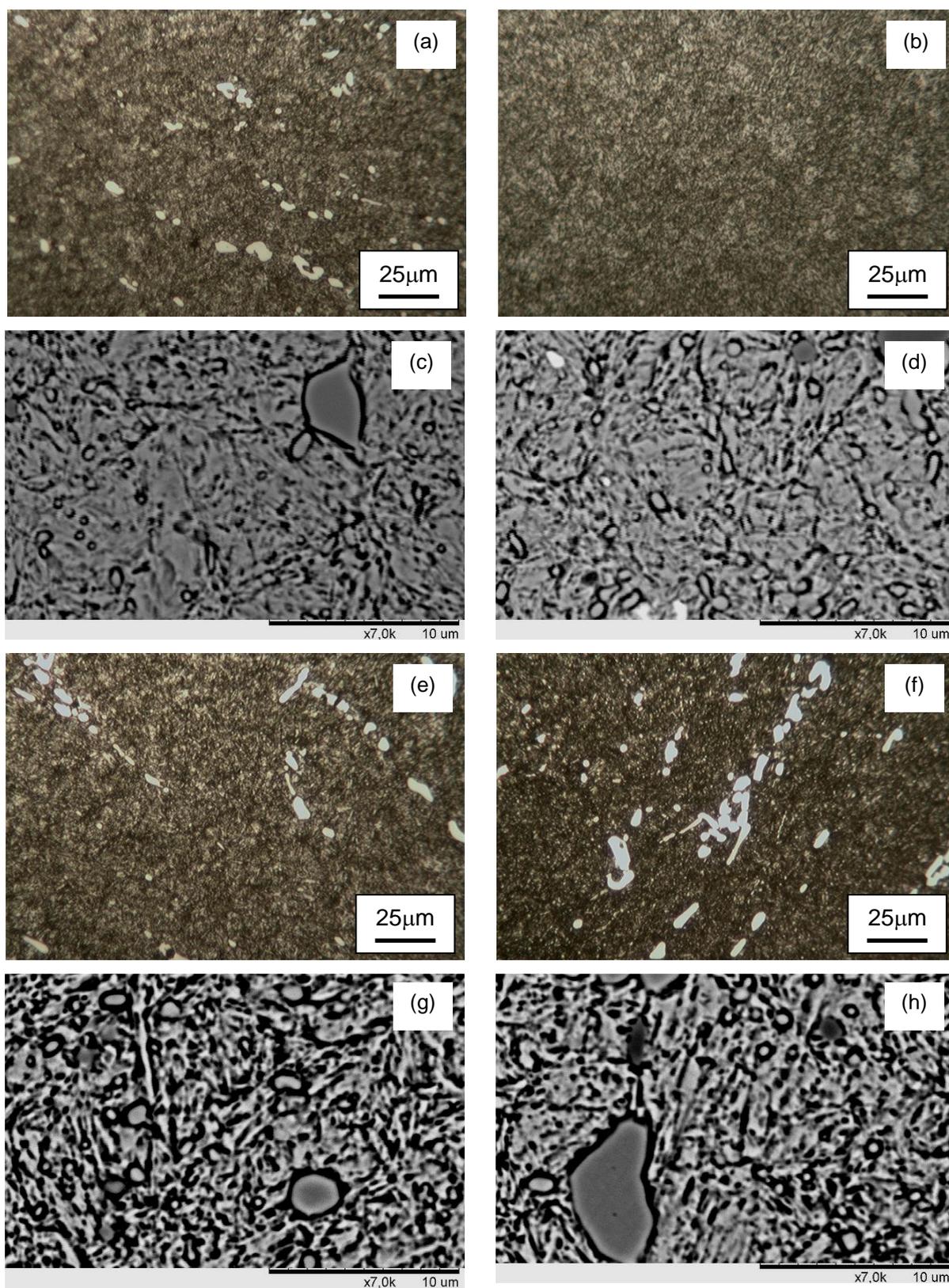
Figura 5.30 – Fotomicrografias (MO e MEV) do aço ferramenta temperado com temperaturas de austenitização de 1000°C e revenido a 500°C e a 525°C.



(a) a (d) revenimento a 500°C, (e) a (h) revenimento a 525°C.

Fonte: Próprio autor.

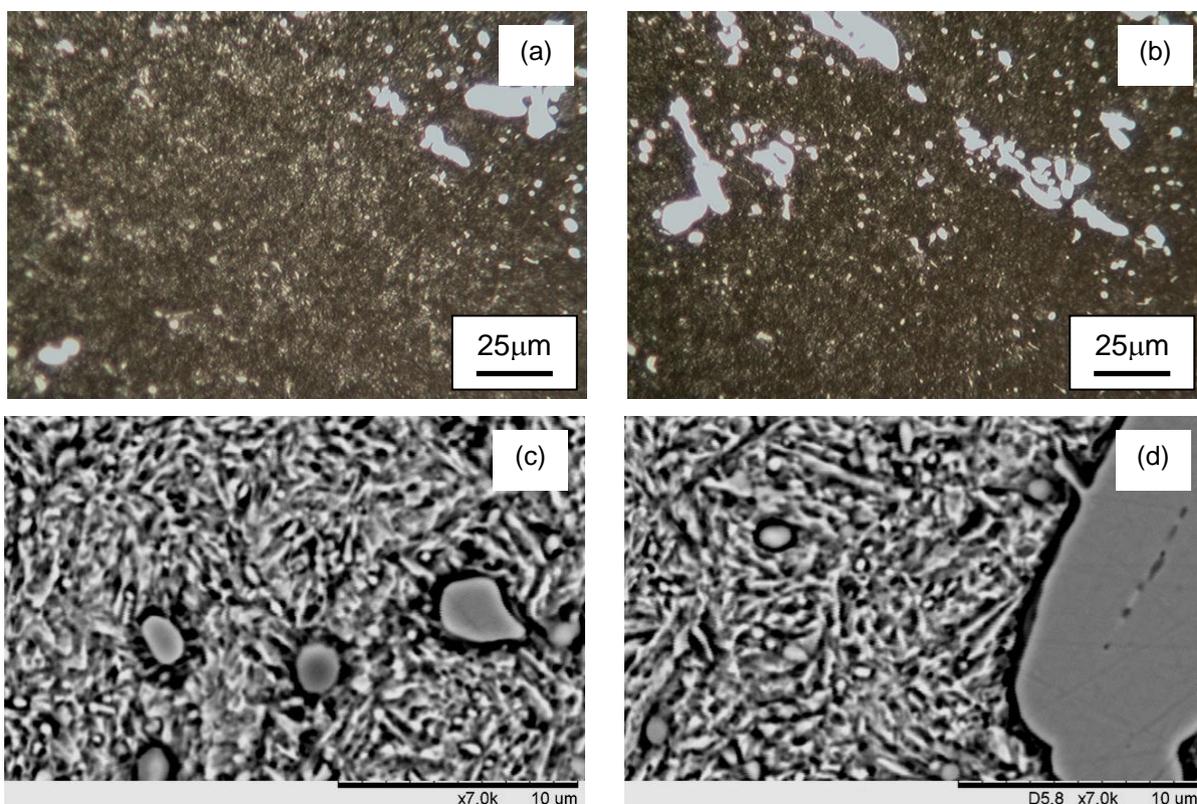
Figura 5.31 – Fotomicrografias (MO e MEV) do aço ferramenta temperado com temperaturas de austenitização de 1000°C e revenido a 550°C e a 575°C.



(a) a (d) revenimento a 550°C, (e) a (h) revenimento a 575°C.

Fonte: Próprio autor.

Figura 5.32 – Fotomicrografias (MO e MEV) do aço ferramenta temperado com temperaturas de austenitização de 1000°C e revenido a 600°C.

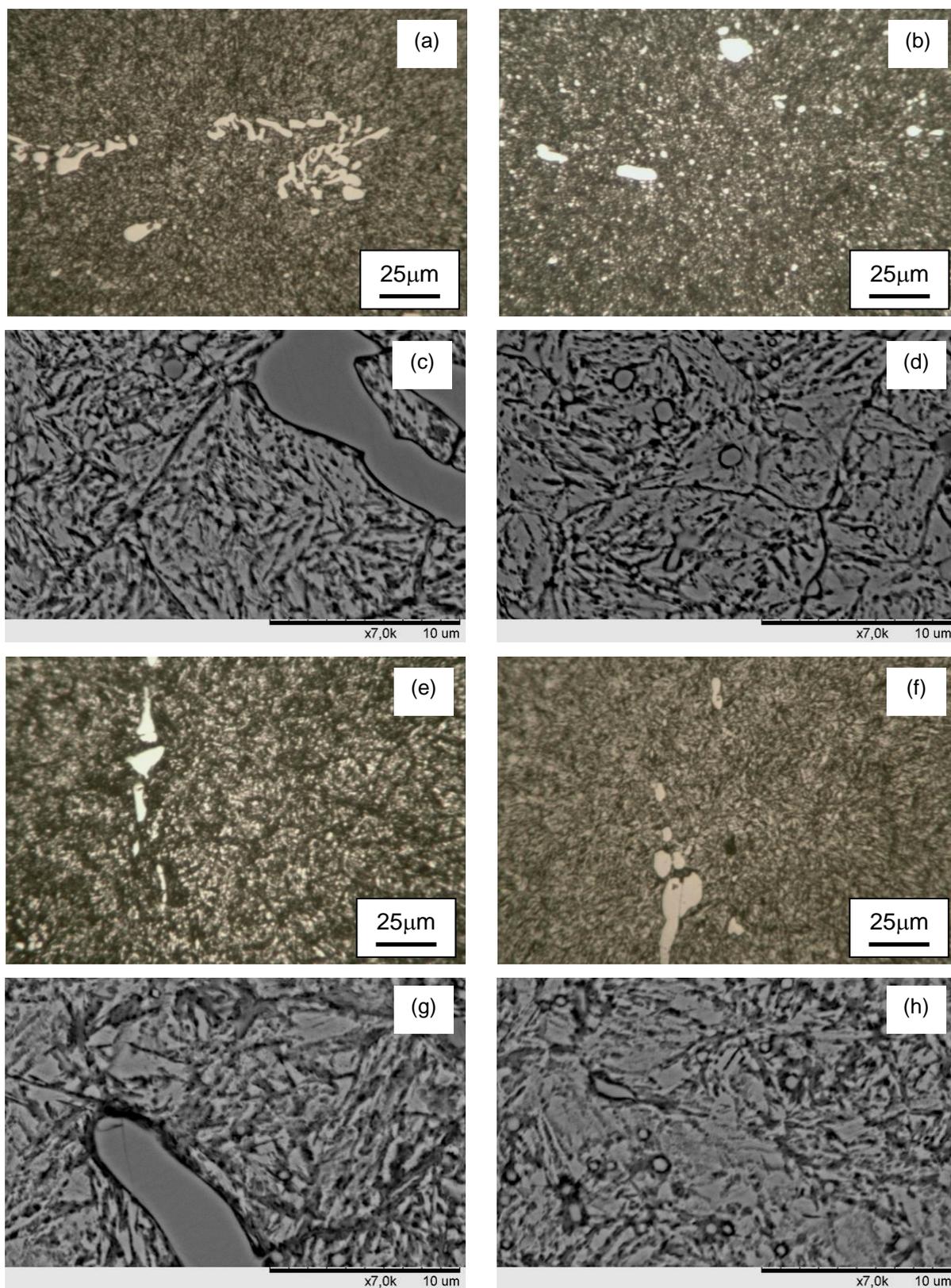


(a) a (d) revenimento a 600°C.

Fonte: Próprio autor.

Nas Figuras 5.38 a 5.41 são mostrados resultados associados à composição química do aço ferramenta temperado e revenido realizada por meio da microsonda com feixe de elétrons acoplada ao MEV. A análise, obtida para o material temperado a 900°C e temperado a 1100°C, ambos revenidos a 525°C, foi realizada para verificar se os carbonetos presentes seriam similares àqueles identificados no aço no estado como recebido e temperado. Para as duas situações exemplificadas os resultados são similares: os carbonetos “grandes” (do tipo MC e M_7C_3) são constituídos principalmente de vanádio e de cromo (e obviamente de carbono), sendo que esses dois elementos aparecem também distribuídos (de maneira mais discreta) nas demais regiões, sugerindo sua presença na formação de carbonetos “pequenos” ($M_{23}C_6$) e ainda em solução sólida. O molibdênio ainda aparece distribuído no material de maneira relativamente uniforme.

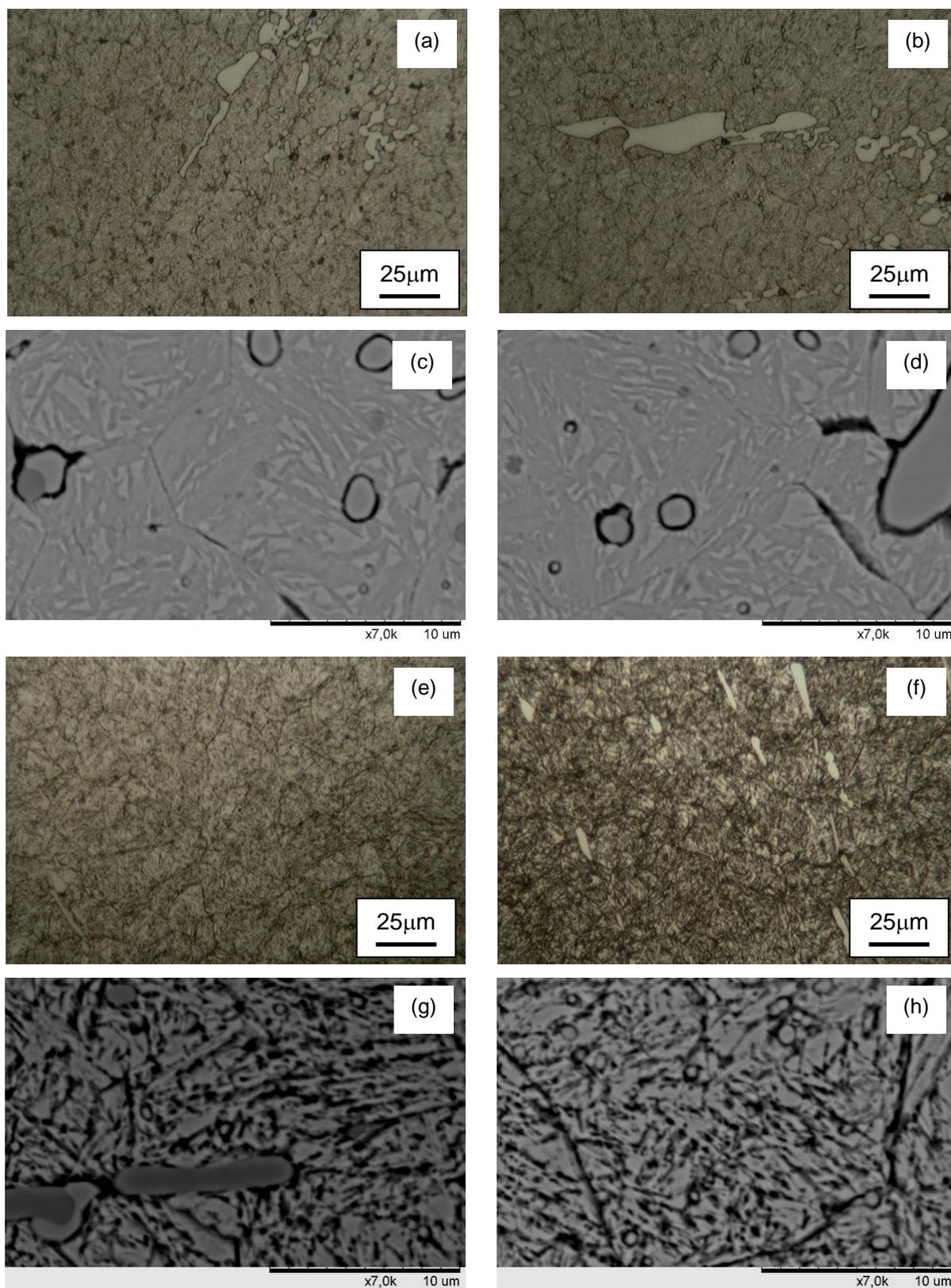
Figura 5.33 – Fotomicrografias (MO e MEV) do aço ferramenta temperado com temperaturas de austenitização de 1100°C e revenido a 200°C e a 400°C.



(a) a (d) revenimento a 200°C, (e) a (h) revenimento a 400°C.

Fonte: Próprio autor.

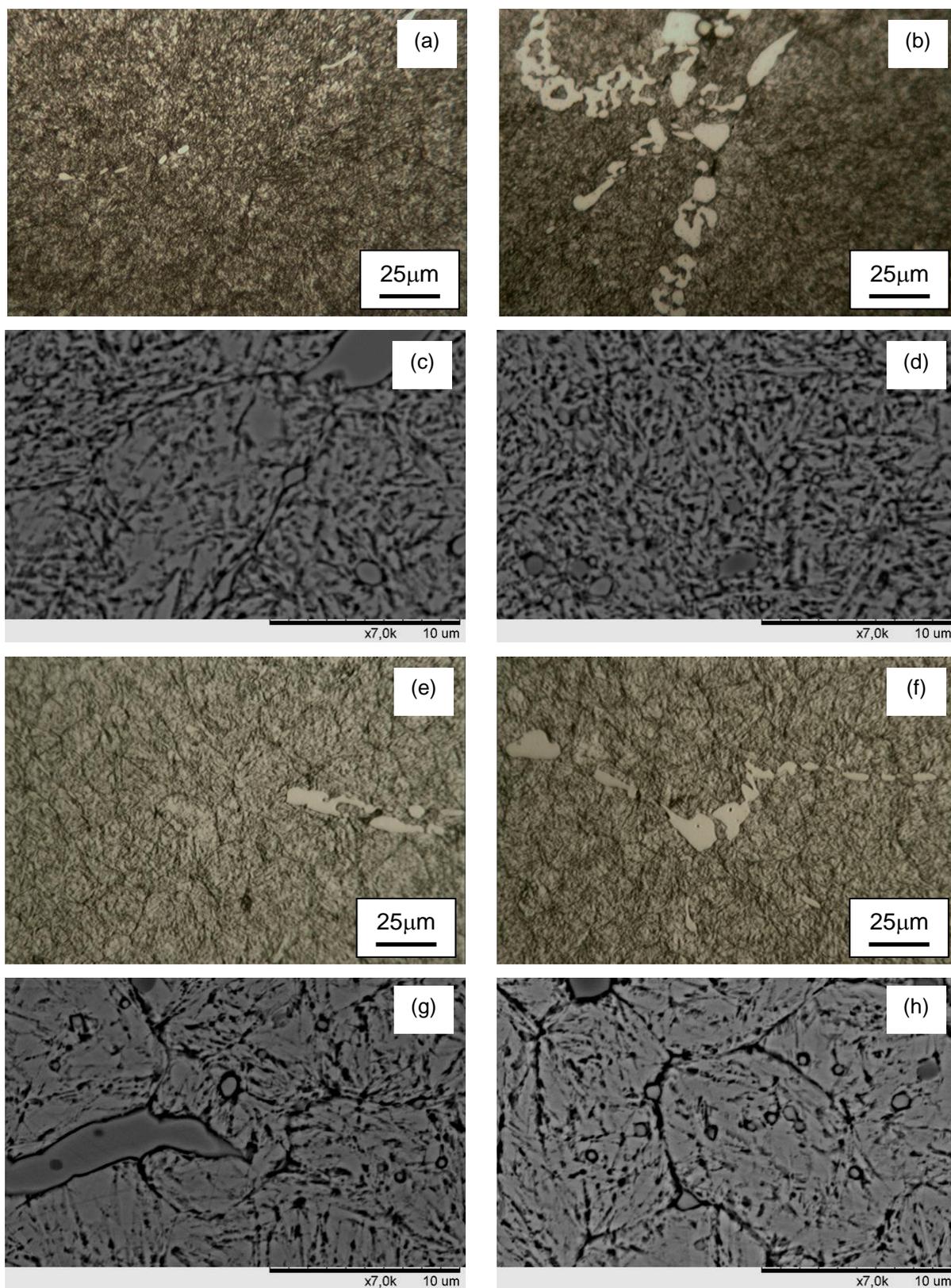
Figura 5.34 – Fotomicrografias (MO e MEV) do aço ferramenta temperado com temperaturas de austenitização de 1100°C e revenido a 450°C e a 475°C.



(a) a (d) revenimento a 450°C, (e) a (h) revenimento a 475°C.

Fonte: Próprio autor.

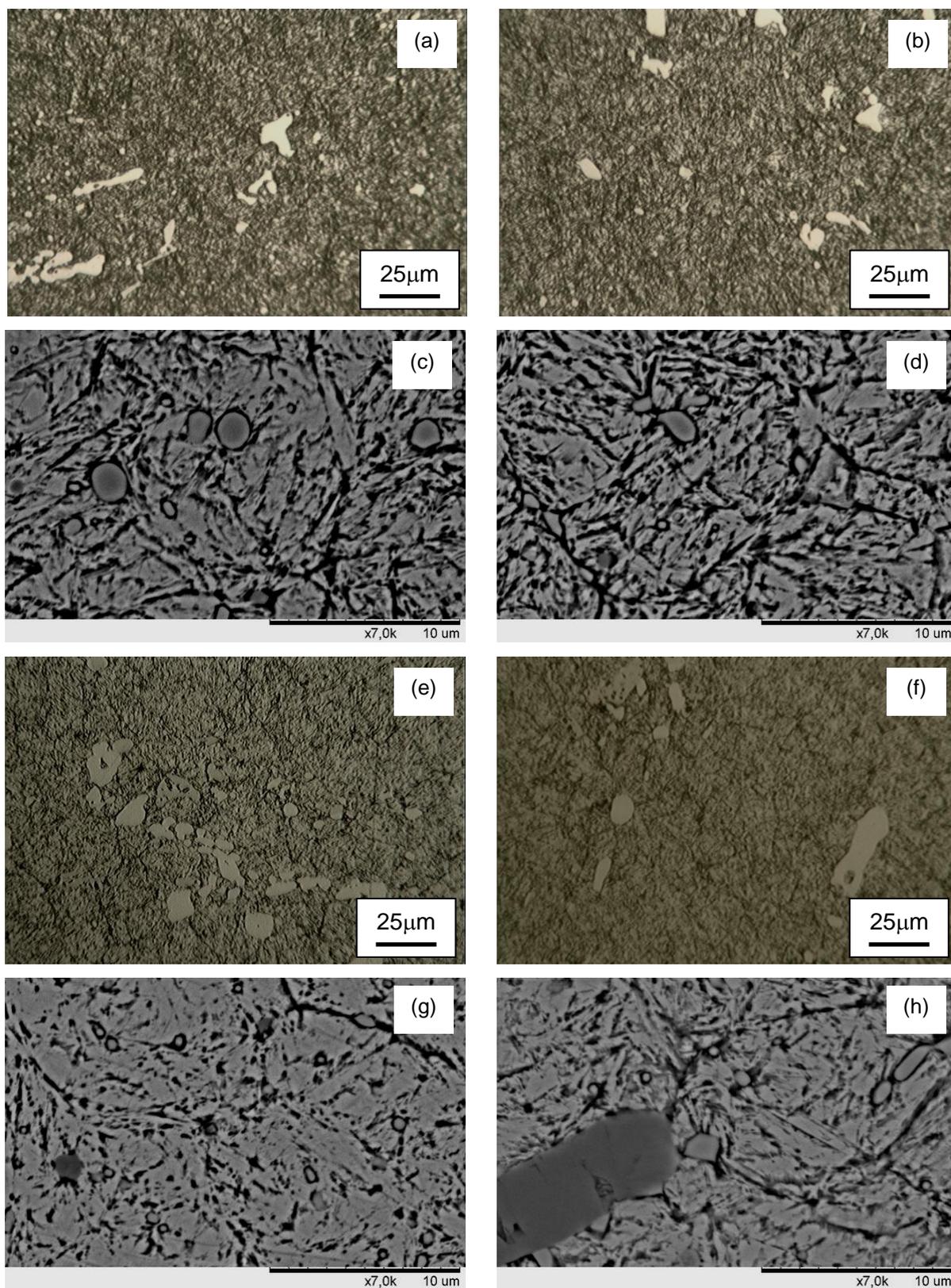
Figura 5.35 – Fotomicrografias (MO e MEV) do aço ferramenta temperado com temperaturas de austenitização de 1100°C e revenido a 500°C e a 525°C.



(a) a (d) revenimento a 500°C, (e) a (h) revenimento a 525°C.

Fonte: Próprio autor.

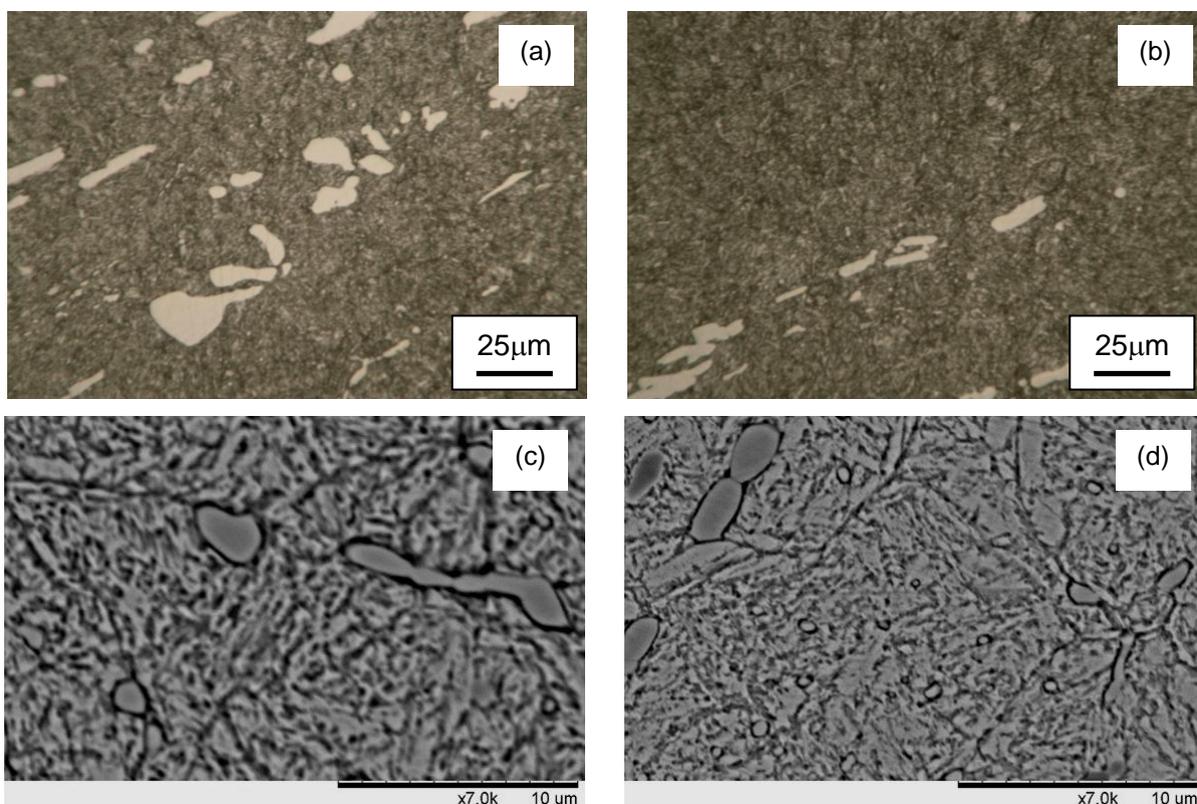
Figura 5.36 – Fotomicrografias (MO e MEV) do aço ferramenta temperado com temperaturas de austenitização de 1100°C e revenido a 550°C e a 575°C.



(a) a (d) revenimento a 550°C, (e) a (h) revenimento a 575°C.

Fonte: Próprio autor.

Figura 5.37 – Fotomicrografias (MO e MEV) do aço ferramenta temperado com temperaturas de austenitização de 1100°C e revenido a 600°C.

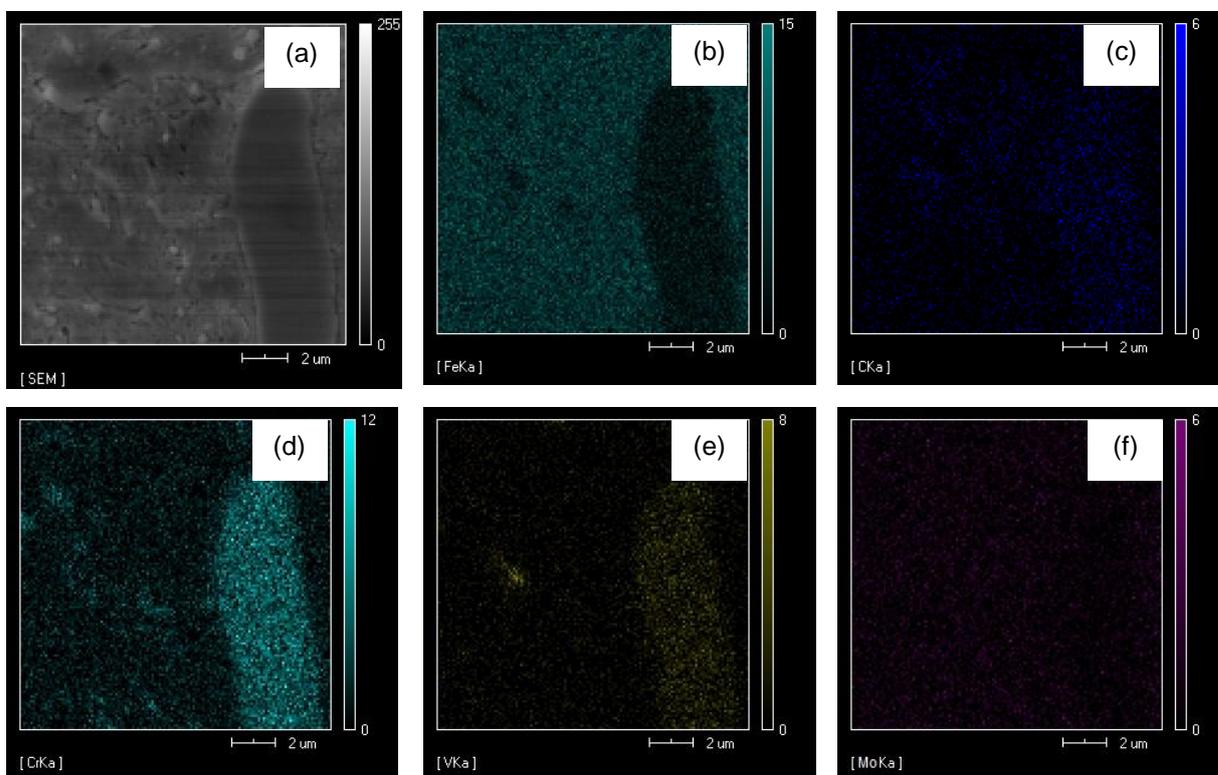


(a) a (d) revenimento a 600°C.

Fonte: Próprio autor.

Nas Tabelas 5.6 a 5.8 são apresentados os resultados da análise quantitativa da proporção de carbonetos no material revenido previamente temperado a 900°C, 1000°C e 1100°C. Nas Figuras 5.42 a 5.44 são exibidos esses resultados em forma de gráficos. Nesse caso, são mostrados também os dados referentes ao material apenas temperado, para facilitar a análise. Considerando inicialmente a Figura 5.42, relativa ao aço temperado com 900°C e posteriormente revenido, verifica-se que a quantidade de carbonetos “grandes” tende a ser reduzida com a realização do revenimento e com o aumento da temperatura do tratamento térmico. Em relação à presença de carbonetos “pequenos”, observa-se uma tendência à queda na quantidade até a temperatura de 500°C, a partir da qual essa proporção é elevada e depois tende a cair. Nesse caso, com exceção do material apenas temperado, a situação na qual aparece a maior proporção de carbonetos “pequenos” coincide com a temperatura de maior elevação de dureza no endurecimento secundário: 525°C.

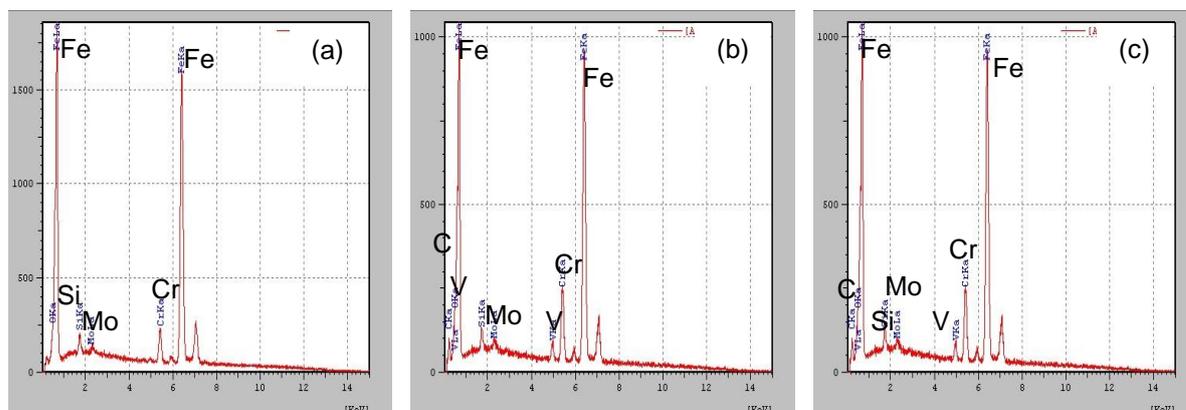
Figura 5.38 – Mapas de composição química do aço ferramenta temperado a 900°C e revenido a 525°C.



(a) imagem, (b) Fe, (c) C, (d) Cr, (e) V e (f) Mo.

Fonte: Próprio autor.

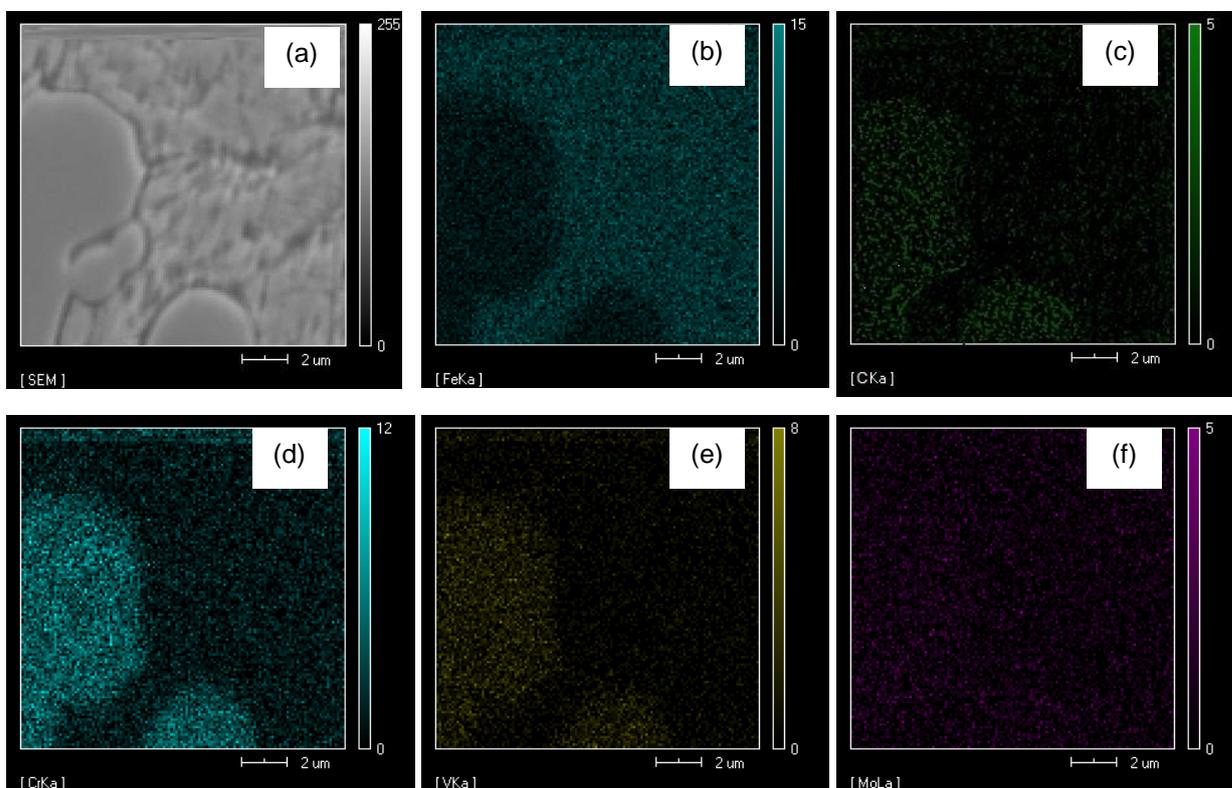
Figura 5.39 – Elementos presentes no aço ferramenta temperado a 900°C e revenido a 525°C.



(a) matriz, (b) carboneto “grande” e (c) carboneto “pequeno”.

Fonte: Próprio autor.

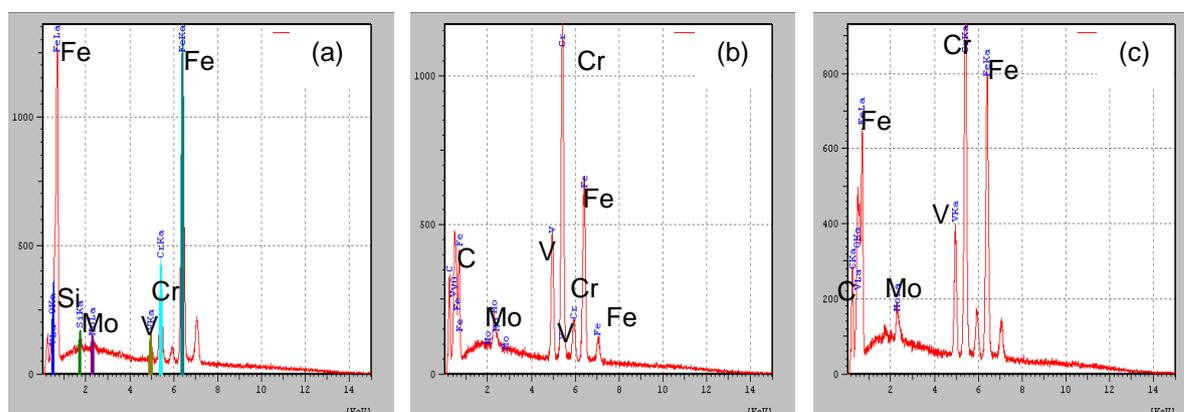
Figura 5.40 – Mapas de composição química do aço ferramenta temperado a 1100°C e revenido a 525°C.



(a) imagem, (b) Fe, (c) C, (d) Cr, (e) V e (f) Mo.

Fonte: Próprio autor.

Figura 5.41 – Elementos presentes no aço ferramenta temperado a 1100°C e revenido a 525°C.



(a) matriz, (b) carboneto “grande” e (c) carboneto “pequeno”.

Fonte: Próprio autor.

Tabela 5.6 – Análise quantitativa dos carbonetos no aço temperado em óleo com temperatura de austenitização de 900°C e revenido.

Temperatura de Revenimento	Temperatura de Austenitização na Têmpera 900°C		
	Carboneto “Grande”(%)	Carboneto “Pequeno”(5)	Total (%)
200°C	4,15	6,25	10,40
400°C	4,01	5,28	9,29
450°C	3,86	5,48	9,34
475°C	3,81	4,72	8,53
500°C	3,21	5,77	8,98
525°C	2,84	6,28	9,12
550°C	2,90	4,57	7,47
575°C	3,04	3,78	6,82
600°C	3,01	5,88	8,89

Fonte: Próprio autor.

Tabela 5.7 – Análise quantitativa dos carbonetos no aço temperado em óleo com temperatura de austenitização de 1000°C e revenido.

Temperatura de Revenimento	Temperatura de Austenitização na Têmpera 1000°C		
	Carboneto “Grande” (%)	Carboneto “Pequeno” (%)	Total (%)
200°C	3,55	3,64	7,19
400°C	3,52	4,09	7,61
450°C	3,76	4,69	8,45
475°C	3,71	3,89	7,60
500°C	3,01	3,88	6,89
525°C	2,73	5,41	8,14
550°C	2,80	4,20	7,00
575°C	2,31	2,67	4,98
600°C	2,34	2,24	4,58

Fonte: Próprio autor.

Tabela 5.8 – Análise quantitativa dos carbonetos no aço temperado em óleo com temperatura de austenitização de 1100°C e revenido.

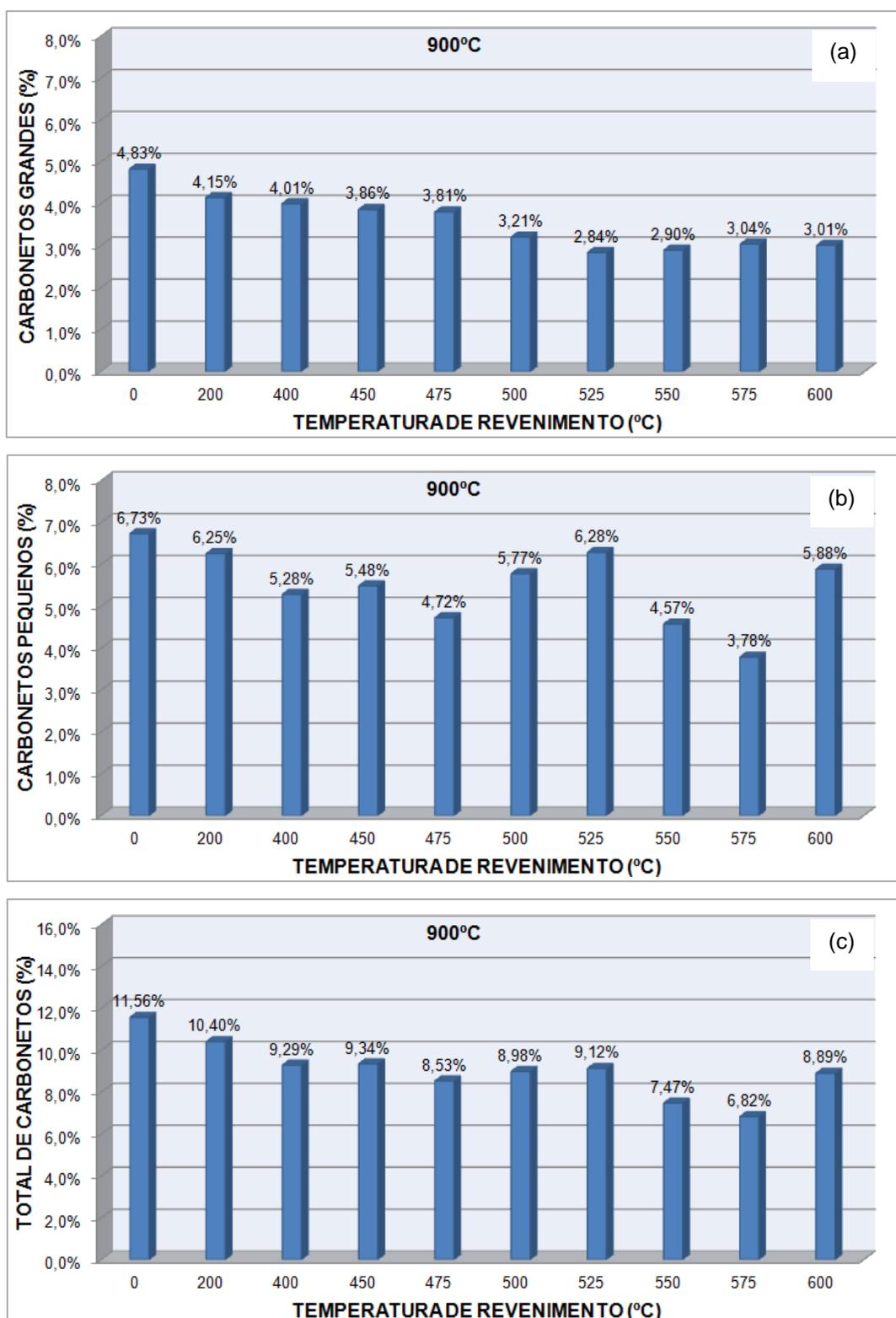
Temperatura de Revenimento	Quantidade de Carbonetos (%)		
	Temperatura de Austenitização na Têmpera 1100°C		
	Carboneto “Grande”	Carboneto “Pequena”	Total
200°C	3,12	1,62	4,74
400°C	3,35	1,65	5,00
450°C	3,38	0,99	4,37
475°C	2,93	1,33	4,26
500°C	2,78	1,93	4,71
525°C	2,76	2,81	5,57
550°C	2,81	1,82	4,63
575°C	2,53	1,99	4,52
600°C	2,22	2,50	4,72

Fonte: Próprio autor.

Para o material temperado a 1000°C (Figura 5.43), verifica-se tendência à queda na proporção dos carbonetos de dimensões mais elevadas e ocorrência de elevação na quantidade de carbonetos “pequenos” na temperatura na qual é detectado o endurecimento secundário (525°C). Para o aço temperado a 1100°C (Figura 5.44), o comportamento é semelhante.

Em termos gerais, salvo algumas exceções, a análise quantitativa acompanhou a avaliação qualitativa na proporção de carbonetos, ambas realizadas não somente baseadas nas imagens apresentadas como exemplos nas figuras anteriores, mas sim em todas as fotomicrografias obtidas para cada condição de tratamentos térmicos. Comparando os resultados das Figuras 5.42, 5.43 e 5.44, assim como ocorreu para o material apenas temperado, o aumento da temperatura de austenitização na têmpera anterior levou à redução na proporção de carbonetos (grandes, pequenos e em geral) mesmo após o revenimento em temperaturas diversas.

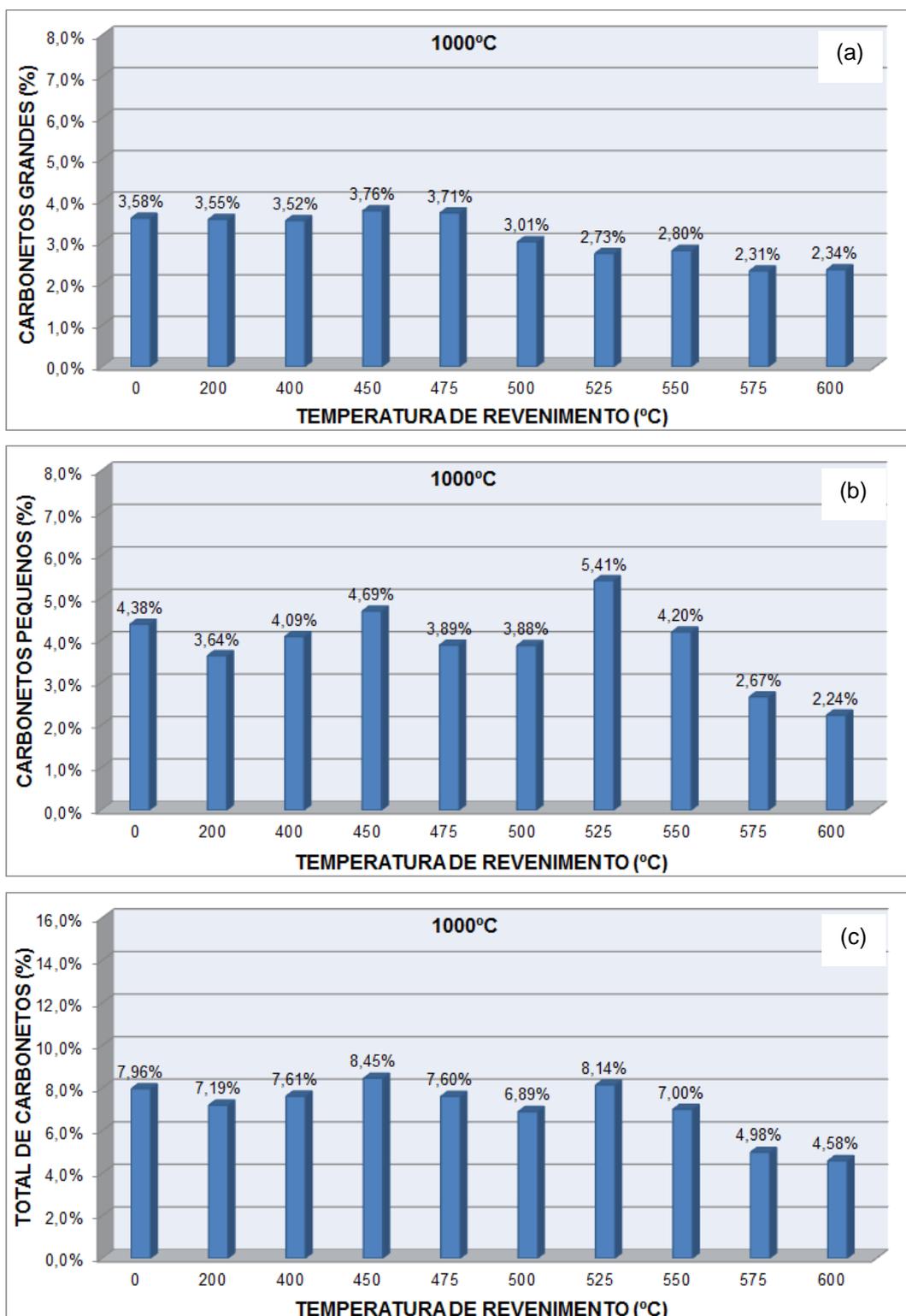
Figura 5.42 – Análise quantitativa dos carbonetos no aço temperado com temperatura de austenitização de 900°C e revenido em temperaturas diversas



(a) % carbonetos “grandes”, (b) % carbonetos “pequenos” e (c) % total de carbonetos.

Fonte: Próprio autor.

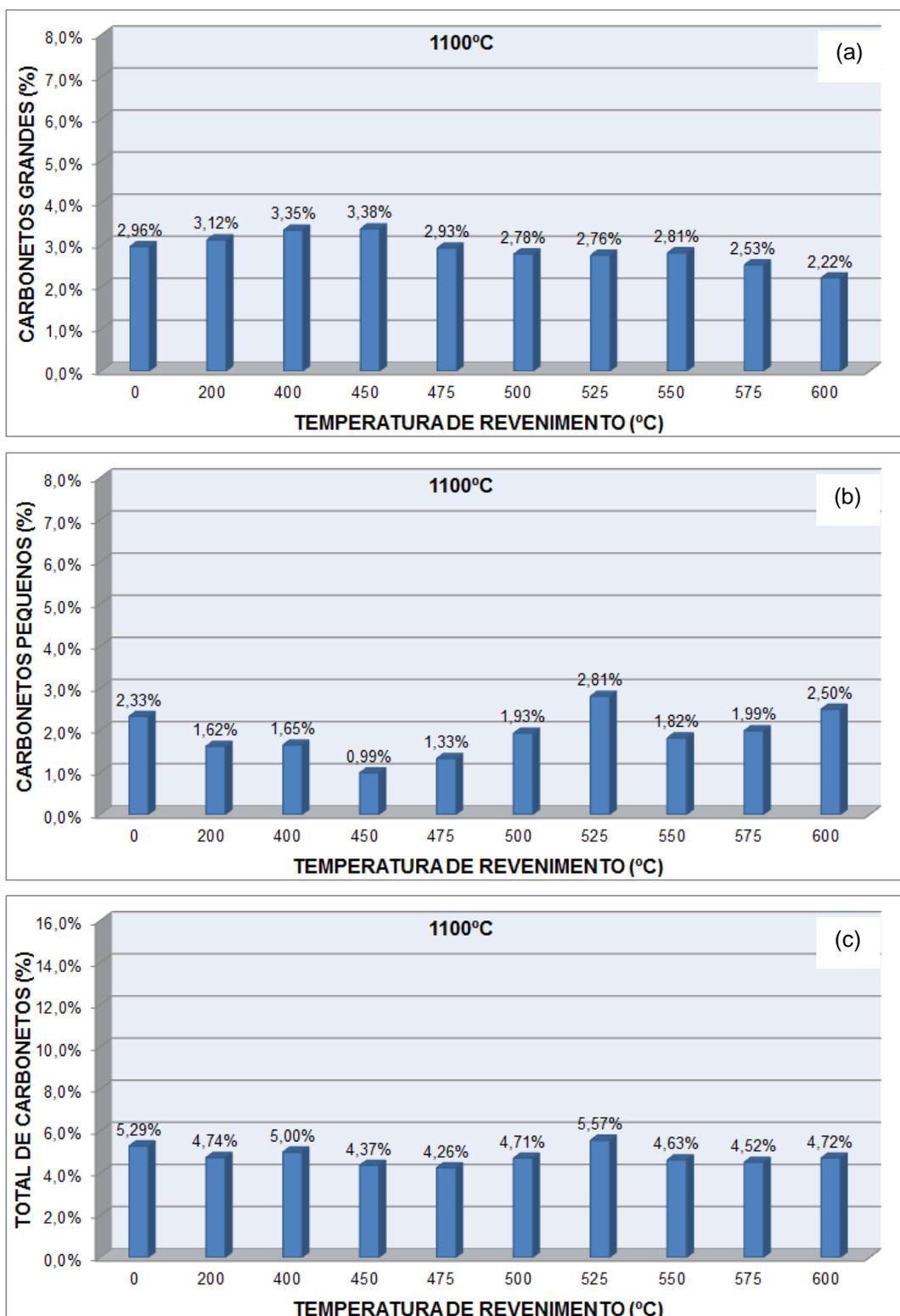
Figura 5.43 – Análise quantitativa dos carbonetos no aço temperado com temperatura de austenitização de 1000°C e revenido em temperaturas diversas



(a) % carbonetos “grandes”, (b) % carbonetos “pequenos” e (c) % total de carbonetos.

Fonte: Próprio autor.

Figura 5.44 – Análise quantitativa dos carbonetos no aço temperado com temperatura de austenitização de 1100°C e revenido em temperaturas diversas

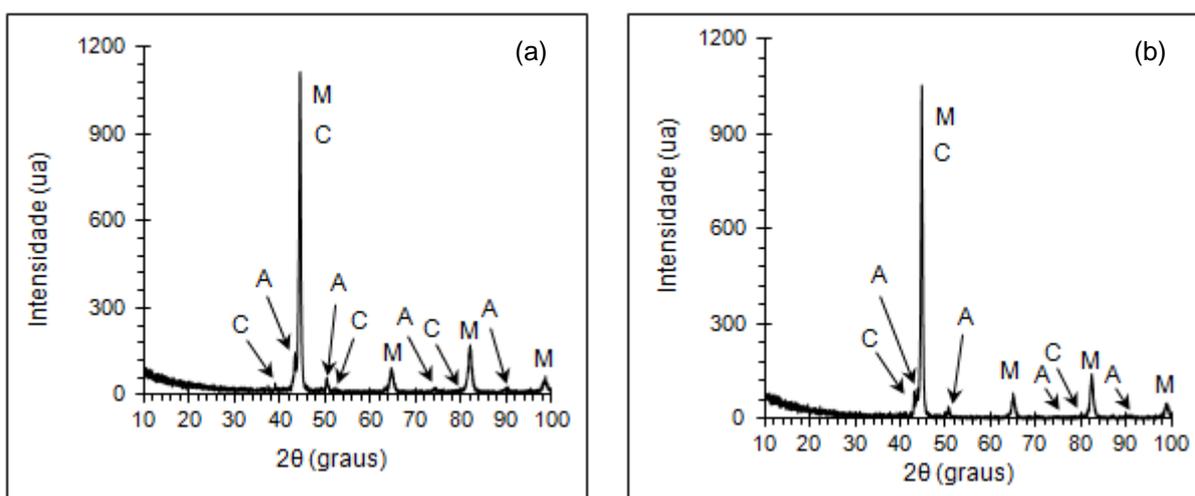


(a) % carbonetos “grandes”, (b) % carbonetos “pequenos” e (c) % total de carbonetos.

Fonte: Próprio autor.

Nas Figuras 5.45 a 5.49 e nas Figuras 5.50 a 5.54 são mostrados os difratogramas obtidos para o aço ferramenta para trabalho a frio revenido em diversas temperaturas, previamente temperado com temperatura de austenitização de 900°C e 1100°C, respectivamente.

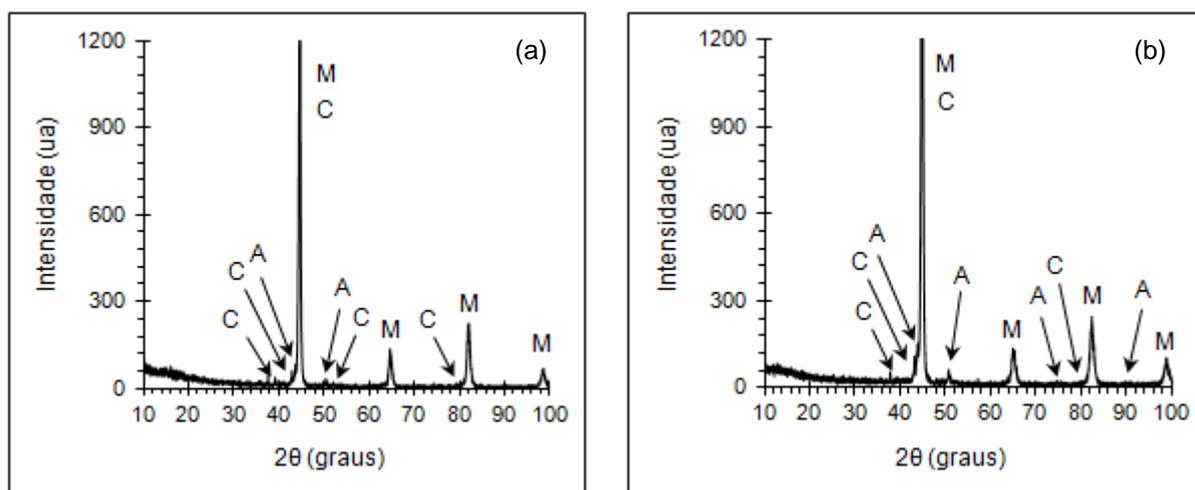
Figura 5.45 – Difratogramas do aço ferramenta temperado com temperatura de austenitização de 900°C e revenido a 200°C e 400°C.



(a) revenimento a 200°C e (b) revenimento a 400°C.

Fonte: Próprio autor.

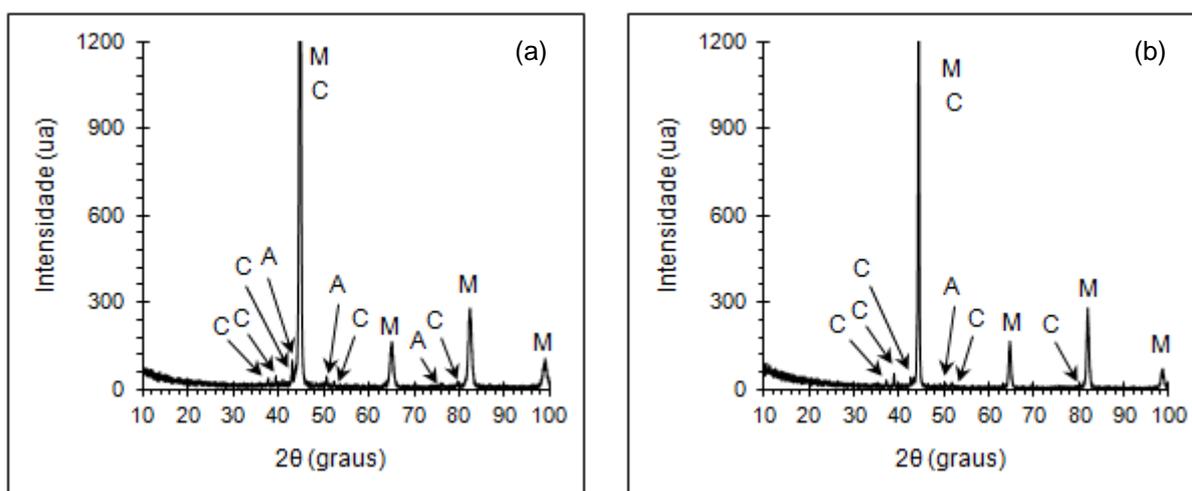
Figura 5.46 – Difratogramas do aço ferramenta temperado com temperatura de austenitização de 900°C e revenido a 450°C e 475°C.



(a) revenimento a 450°C e (b) revenimento a 475°C.

Fonte: Próprio autor.

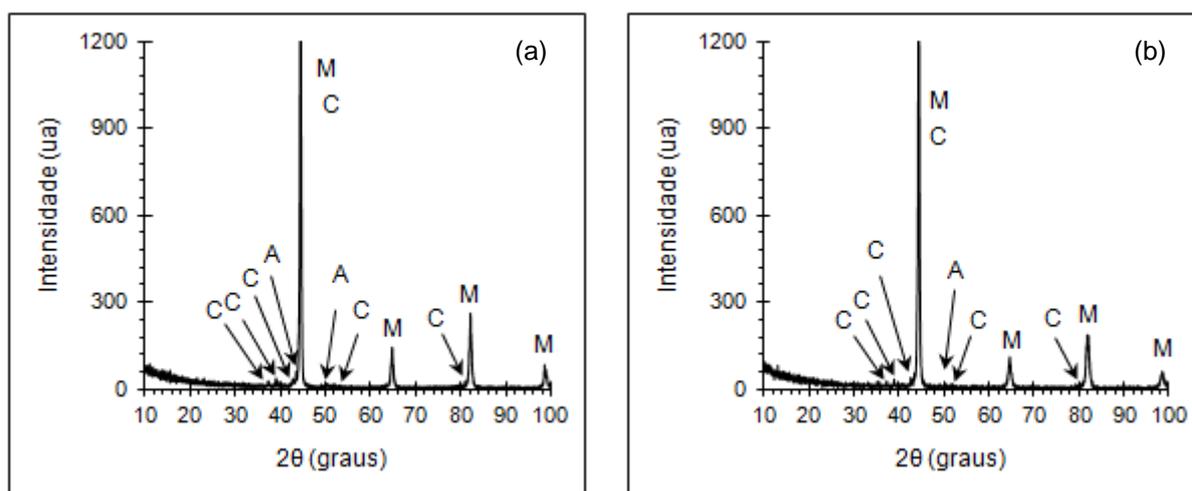
Figura 5.47 – Difratomogramas do aço ferramenta temperado com temperatura de austenitização de 900°C e revenido a 500°C e 525°C.



(a) revenimento a 500°C e (b) revenimento a 525°C.

Fonte: Próprio autor.

Figura 5.48 – Difratomogramas do aço ferramenta temperado com temperatura de austenitização de 900°C e revenido a 550°C e 575°C.



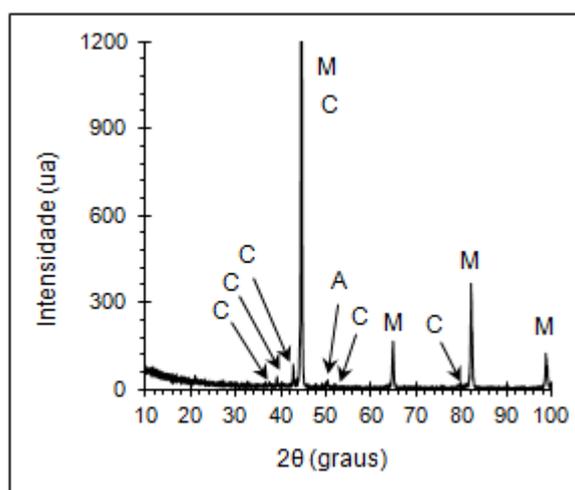
(a) revenimento a 550°C e (b) revenimento a 575°C.

Fonte: Próprio autor.

De maneira geral, tanto para as situações nas quais a temperatura de austenitização na têmpera foi de 900°C como nas condições nas quais essa foi de 1100°C, nos primeiros estágios de revenimento (considerados aqui como as temperaturas de 200°C, 400°C, 450°C) não foi verificada uma alteração apreciável nos

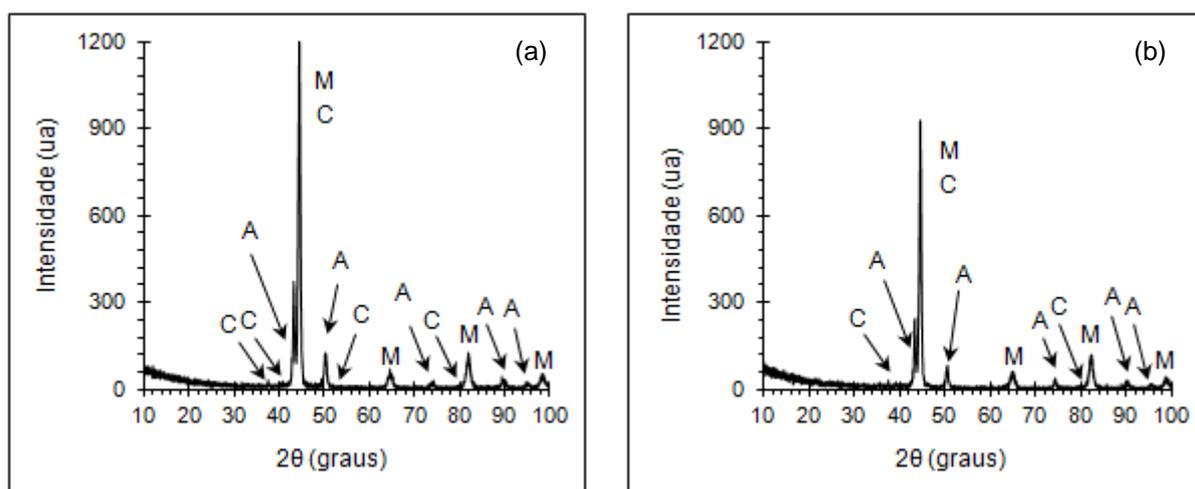
difratogramas do material em relação às amostras apenas temperadas. Por outro lado, à medida que a temperatura de revenimento foi elevada, a proporção de austenita retida (observada de forma qualitativa, pela área abaixo dos picos intensidade $\times 2\theta$) foi sendo reduzida, até praticamente não ser mais detectada pela técnica.

Figura 5.49 – Difratogramas do aço ferramenta temperado com temperatura de austenitização de 900°C e revenido a 600°C.



Fonte: Próprio autor.

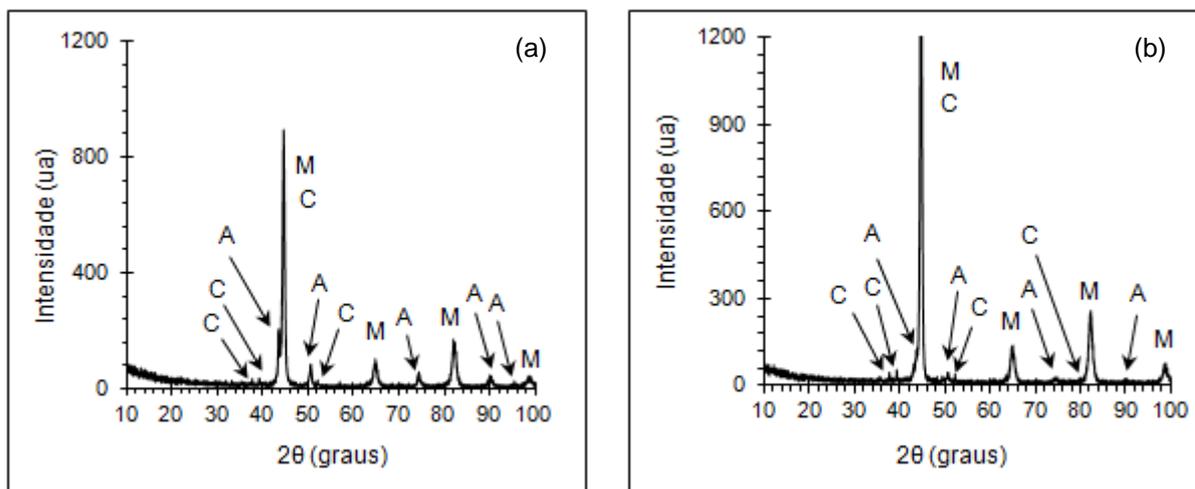
Figura 5.50 – Difratogramas do aço ferramenta temperado com temperatura de austenitização de 1100°C e revenido a 200°C e 400°C.



(a) revenimento a 200°C e (b) revenimento a 400°C.

Fonte: Próprio autor.

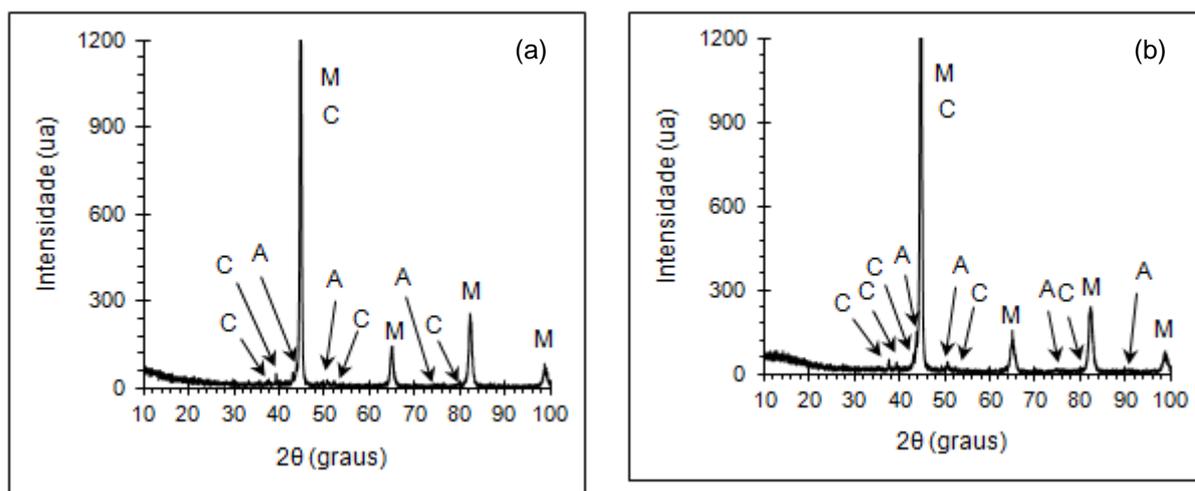
Figura 5.51 – Difratogramas do aço ferramenta temperado com temperatura de austenitização de 1100°C e revenido a 450°C e 475°C.



(a) revenimento a 450°C e (b) revenimento a 475°C.

Fonte: Próprio autor.

Figura 5.52 – Difratogramas do aço ferramenta temperado com temperatura de austenitização de 1100°C e revenido a 500°C e 525°C.



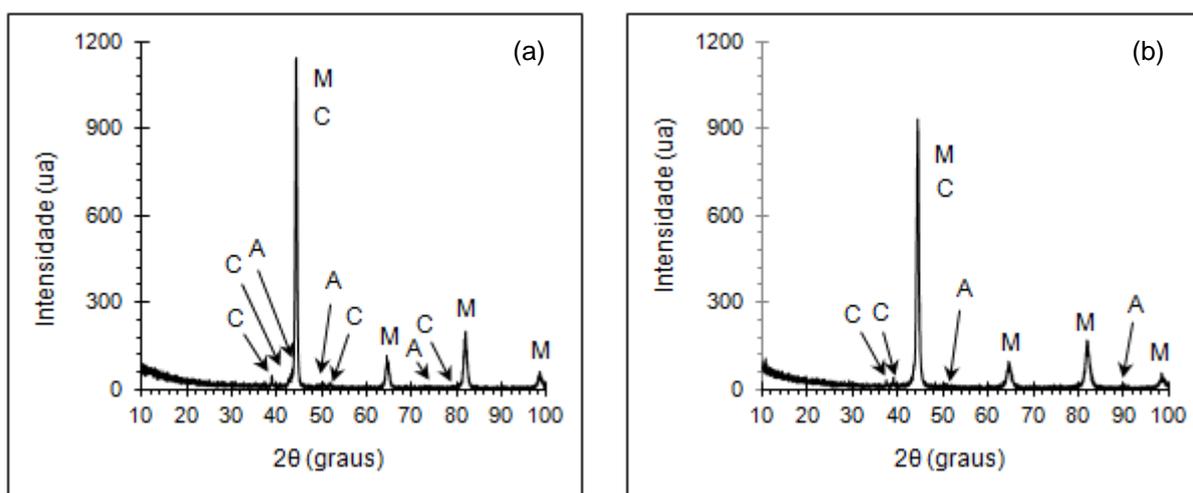
(a) revenimento a 500°C e (b) revenimento a 525°C.

Fonte: Próprio autor.

Essa diminuição aparente na proporção de austenita retida no revenimento pode estar associada à precipitação de carbonetos durante o tratamento. Com a formação dos carbonetos, o teor de carbono da austenita retida na matriz é reduzido e,

portanto, as temperaturas de início e de fim da transformação martensítica desse constituinte é elevada (em geral, quanto maior o teor de carbono do aço, menores são as temperaturas mencionadas). Dessa forma, com o aumento da temperatura de fim da transformação martensítica, durante o resfriamento da amostra no revenimento, a austenita retida pode se transformar em martensita, ainda que parcialmente.

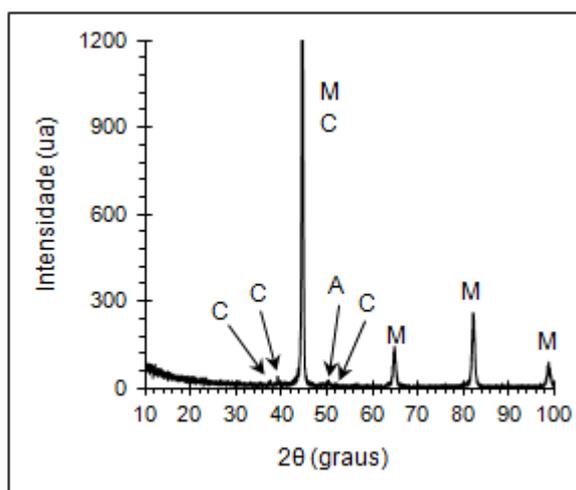
Figura 5.53 – Difratomogramas do aço ferramenta temperado com temperatura de austenitização de 1100°C e revenido a 550°C e 575°C.



(a) revenimento a 550°C e (b) revenimento a 575°C.

Fonte: Próprio autor.

Figura 5.54 – Difratomogramas do aço ferramenta temperado com temperatura de austenitização de 1100°C e revenido a 600°C.



Fonte: Próprioautor.

6. CONCLUSÕES

- ✓ A elevação na temperatura de aquecimento na têmpera levou ao aumento do valor de dureza do aço para trabalho a frio analisado.
- ✓ O aumento na temperatura de revenimento, independente da temperatura de austenitização na têmpera anterior, não provocou queda significativa na dureza do aço para trabalho a frio até 500°C. Para todas as condições, foi verificada a ocorrência de endurecimento secundário, cujo valor máximo foi na temperatura de 525°C.
- ✓ Por meio da avaliação da morfologia foi verificado que os carbonetos presentes no aço ferramenta para trabalho a frio são dos tipos MC, M_7C_3 e $M_{23}C_6$, tanto no estado inicial, como após a têmpera e após o revenimento.
- ✓ A partir dos mapas de composição química, obtidos a partir da análise conduzida por espectroscopia dispersiva em energia, foi verificado que os carbonetos denominados como grandes seriam compostos principalmente de vanádio e cromo, corroborando a associação dos mesmos aos tipos MC e M_7C_3 . Já os carbonetos denominados como pequenos seriam compostos desses elementos e de molibdênio. Os resultados sugeriram que esse último elemento apareceria também em solução sólida substitucional.
- ✓ A elevação na temperatura de austenitização na têmpera levou à redução na quantidade de carbonetos presentes no material, fenômeno observado pela análise qualitativa das micrografias. Em termos semiquantitativos, a proporção dos carbonetos considerados pequenos diminuiu significativamente. Já os carbonetos denominados como grandes apresentaram uma leve queda com a mesma comparação.
- ✓ Em termos de análise semiquantitativa, para as amostras revenidas, foi possível identificar que a maior concentração de carbonetos pequenos se deu na temperatura de revenimento de 525°C para todas as condições de

têmpera, coincidindo com a pico de dureza associado ao endurecimento secundário.

- ✓ A quantidade de austenita retida, avaliada qualitativamente pela observação dos difratogramas, pareceu diminuir com a temperatura de austenitização na têmpera. No revenimento realizado a temperaturas mais elevadas, a quantidade de austenita retida também foi reduzida, tendo possivelmente se transformado em martensita.

REFERÊNCIAS

- AMINI, K.; NATEGH, S.; SHAFYEI, A. Influence of different cryotreatments on tribological behavior of 80CrMo125 cold work tool steel. **Materials and Design**, v. 31, p. 4666-4676, 2010.
- ARSLAN, F. K.; ALTINSOY, I.; HATMAN, A.; IPEK, M.; ZEYTIN, S.; BINDAL, C. Characterization of cryogenic heat treated vanadis 4 OM cold work tool steel. **Vacuum**, v. 86, p. 370-373, 2011.
- ASM HANDBOOK. **Heat treating**. 10 ed. Ohio: ASM International, 1999. 1012p.
- ASM HANDBOOK. **Metallography and microstructures**. Ohio: ASM International, 2004. 1184p.
- BHADESHIA, H. K. G. H; HONEYCOMBE, R. W. K. **Steels**: microstructure and properties. 3 ed. London: Elsevier, 2006. 344p.
- BOURITHIS, L.; PAPADIMITRIOU, G. D.; SIDERIS, J. Comparison of wear properties of tool steels AISI D2 and O1 with the same hardness. **Tribology International**, v. 39, p. 479-489, 2006.
- CALLISTER, W. D. **Ciência e engenharia de materiais**: uma introdução. 7 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008. 590p.
- CHIAVERINI, V. **Aços e ferros fundidos**. 7 ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais - ABM, 2005. 599p.
- COLPAERT, H. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**. 4 ed. São Paulo: Blücher, 2008. 672p.
- COUTINHO, C. B. **Materiais metálicos para engenharia**. Belo Horizonte: FCO, 1992. 405p.
- DAS, D.; DUTTA, A. K.; RAY, K. K. Sub-zero treatments of AISI D2 steel: part 1 – microstructure and hardness. **Materials Science and Engineering A**, v. 527, p. 2182-2193, 2010.

DAS, D.; SARKAR, R.; DUTTA, A. K.; RAY, K. K. Influence of sub-zero treatments on fracture toughness of AISI D2 steel. **Materials Science and Engineering A**, v. 528, p. 589-603, 2010.

DAS, D.; RAY, K. K. Structure-property correlation sub-zero treated AISI D2 steel. **Materials Science and Engineering A**, v. 541, p. 45-60, 2012.

DIETER, G. E. **Metalurgiamecânica**. 2 ed. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1981. 653p.

DOBRZANSKI, L. A.; MAZURKIEWICZ, J.; HAJDUCZEK, E.; MADEJSKI, J. Comparison of the thermal fatigue resistance and structure of the 47CrMoWVTiCeZr16-26-8 hot work tool steel with X40CrMoV5-1 type one. **Journal of Materials processing Technology**, v.113, p.527-538, 2001.

DURAND-CHARRE, M. **Microstructure of steels and cast irons**. Berlin: Springer, 2004. 17p.

HETZNER, D. W.; GEERTRUYDEN, W. V. Crystallography and metallography of carbides in high alloy steels. **Materials Characterization**, v. 59, p. 825-841, 2008.

KHEIRANDISH, S.; SAGHAFIAN, H.; HEDJAZI, J.; MOMENI, M. Effect of heat treatment on microstructure of modified cast AISI D13 cold work steel. **Journal of Iron and Steel Research**, v. 17, n. 9, p. 40-45, 2010.

KOKOSZA, A.; PACYNA, J. Evaluation of retained austenite stability in heat treated cold work tool steel. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 162-163, p. 327-331, 2005.

KRAUSS, G. **Steel: heat treating and processing principles**. Ohio: American Society for Metals – ASM International, 1990. 497p.

KRAUSS, G. **Tool steels**. Ohio: American Society for Metals - ASM International, 1998. 335p.

MEDVEDEVA, A.; BERGSTROM, J.; GUNNARSSON, S.; ANDERSSON, J. High temperature properties and microstructural stability of hot work tool steels. **Materials Science and Engineering A**, v. 523, p. 39-46, 2009.

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 A**, v. 474, p. 328-334, 2008.

OPPENKOWSKI, A.; WEBER, S.; THEISEN, W. Evaluation of factors influencing deep cryogenic treatment that affect the properties of tool steels. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 210, p. 1949-1955, 2010.

PADILHA, A. F.; AMBROZIO FILHO, F. **Técnicas de análise microestrutural**. São Paulo: Hemus, 2004. 190p.

PIPPEL, E.; WOLTERS DORF, J.; POCKL, G.; LICHTENEGGER, G. Microstructure and nanochemistry of carbide precipitates in high speed steel S 6-5-2-5. **Materials Characterization**, v. 43, p. 41-55, 1999.

RAUTER, R. O. **Aços ferramentais**: seleção, tratamentos térmicos, pesquisa de defeitos. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Ltda, 1974. 254p.

REED-HILL, R. E. **Princípios de metalurgia física**. 2 ed. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1982. 776p.

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

TORKAMANI, H.; RAYGAN, S.; RASSIZADEHGHANI, J. Comparing microstructure and mechanical properties of AISI D2 steel after bright hardening and oil quenching. **Materials and Design**, v. 54, p. 1049-1055, 2014.

TOTTEN, G. E. **Steel heat treatment**: metalurgy and technologies. 2 ed. Portland: Portland University. 2007. 833p.

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 and Design, v.34, p.372-378, 2012.