

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET MG

Curso de Graduação em Engenharia de Materiais

Trabalho de Conclusão de Curso

Avaliação dos Efeitos de Alterações nas Condições de Tratamentos Térmicos na Dureza de
Aços Ferramenta para Trabalho a Frio

Autor (a): Grazielle Gianini Braga Maria

Orientador (a): Elaine Carballo Siqueira Corrêa

Coorientador (a): Wellington Lopes

Belo Horizonte, 2012

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET MG

Curso de Graduação em Engenharia de Materiais

Graziele Gianini Braga Maria

**Avaliação dos Efeitos de Alterações nas Condições de Tratamentos Térmicos na Dureza
de Aços Ferramenta para Trabalho a Frio**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao curso de Engenharia de Materiais do
Centro Federal Tecnológico de Minas Gerais

Orientador (a): Elaine Carballo Siqueira Corrêa

Coorientador (a): Wellington Lopes

Belo Horizonte, 2012

Graziele Gianini Braga Maria

**Avaliação dos Efeitos de Alterações nas Condições de Tratamentos Térmicos na Dureza
de Aços Ferramenta para Trabalho a Frio**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao curso de Engenharia de Materiais do
Centro Federal Tecnológico de Minas Gerais
requisito parcial para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia de Materiais.

Aprovado em

Banca Examinadora

Prof.(a) Elaine Carballo Siqueira Corrêa

Prof. Wellington Lopes

Prof. Wanderlei Ferreira de Freitas

Dedico este trabalho para meus amigos e familiares, em especial aos meus pais e avós.

Agradecimentos

A todos que contribuíram de alguma forma para a realização do trabalho, em especial a minha Orientadora Elaine que esteve sempre ao meu lado, sendo fofa e meiga.

Resumo

A busca por ferramentas com melhores propriedades mecânicas, maior vida útil e elevada capacidade de suportar condições severas de trabalho impulsionou o desenvolvimento dos aços ferramenta. Neste contexto, os aços ferramenta para trabalho a frio representam um grupo de grande importância, devido à combinação entre resistência ao desgaste e tenacidade. Neste trabalho foram analisados os efeitos das condições de tratamento térmico de têmpera na microestrutura e no comportamento mecânico dos aços ferramenta para trabalho a frio AISI D2 e AISI D6. As análises foram conduzidas através de testes de dureza, microscopias óptica e eletrônica de varredura e difração de raios-X. Foi observado que, para o aço similar ao AISI D2, um aumento na temperatura de austenitização ocasionou a elevação na dureza, oposto do que foi verificado para o aço similar ao AISI D6. Temperaturas de austenitização e tempos de encharque maiores aumentam a solubilização dos elementos de liga consequentemente a quantidade de carbonetos é reduzida e a porção martensítica aumentada. Esses resultados foram relacionados à microestrutura dos materiais.

Palavra chave: aços ferramenta para trabalho a frio, tratamentos térmicos, microestrutura.

ABSTRACT

The search for materials with better mechanical properties, longer life and high capacity to withstand harsh working conditions led to the development of tool steels. In this context, cold work tool steels represent an important group of alloys with an attractive combination of wear resistance and toughness. In this paper the effects of the heat treatment parameters on the microstructure and the mechanical behavior of AISI D2 and AISI D6 cold work tool steels was analyzed. The evaluation was carried out through hardness tests, optical and scanning electron microscopy and X-ray diffraction. It was observed that for AISI D2 steel, an increase in the austenitizing temperature led to higher hardness values. Different behavior was verified for AISI D6 cold work steel. Austenitizing temperatures and soak times increase the solubility of alloying consequently the amount of carbides is reduced and enlarged portion martensitic. The results were related to the microstructure of the materials.

Keyword: cold work tool steel, heat treatment, microstructure.

Lista de figuras

Figura 1 - Fundição do lingote	18
Figura 2 - Metalurgia do pó.....	19
Figura 3 - Processo spray.....	20
Figura 4 - Exemplos de aplicações dos aços ferramenta:.....	23
Fonte: (GONÇALVES, 2008) - (1) ferramental de calibração e acabamento de vergalhões, (2) matriz de extrusão e (3) cilindros de laminação para conformação de tubos.....	23
Figura 5 - Microestrutura do aço O para trabalho a frio	29
Figura 6 - Microestrutura do aço D6 com a presença de carbonetos primários em martensita revenida..	30
Figura 7 - Fases presentes em equilíbrio no aço D2.....	34
Figura 8- Metodologia adotada no trabalho	36
Figura 9- EDX Shimadzu modelo 720	38
Figura 10 - Forno elétrico empregado nos tratamentos térmicos	39
Figura 11 - Microscópio óptico utilizado para análise da microestrutura	40
Figura 12 - Microscópio eletrônico de varredura empregado para análise da microestrutura	40
Figura 13 - Difratômetro de raios-x.....	41
Figura 14 - Durômetro utilizado no trabalho.....	42
Figura 15- Microestrutura do aço D2 como recebido.....	45
Figura 16 - Microestrutura do aço D6 como recebido:	45
Figura 17- Dureza Rockwell C do aço AISI D2 em função da temperatura de austenitização, do tempo de encharque e meio de resfriamento.....	47
Figura 18 - Dureza Rockwell C do aço AISI D6 em função da temperatura de austenitização, do tempo de encharque e meio de resfriamento.....	48
Figura 19 - D2_Têmpera ao ar, austenitizado a 920°C durante 20 minutos.	49
Figura 20 - D2_Têmpera ao ar, austenitizado a 920°C durante 20 minutos.	49
Figura 21 - Análise química.....	50
Figura 22- D2_Têmpera ao ar, austenitizado a 920°C durante 60 minutos	51
Figura 23 - D2_Têmpera ao ar, austenitizado a 920°C durante 60 minutos.	51
Figura 24 - Análise química.....	52
Figura 25 - D2_Têmpera ao ar, austenitizado a 1020°C durante 20 minutos	53
Figura 26 - D2_Têmpera ao ar, austenitizado a 1020°C durante 20 minutos	53
Figura 27 - D2_Têmpera ao ar, austenitizado a 1020°C durante 60 minutos	54
Figura 28 - D2_Têmpera ao ar, austenitizado a 1020°C durante 60 minutos	54
Figura 29 - D2_Têmpera ao ar, austenitizado a 1120°C durante 20 minutos.	55
Figura 30 - D2_Têmpera ao ar, austenitizado a 1120°C durante 20 minutos	55
Fonte: (Autor) – (MEV) Aumento de 1000x (a) e 2000x (b).	55
Figura 31 - D2_Têmpera ao ar, austenitizado a 1120°C durante 60 minutos.	56
Figura 32 - D2_Têmpera ao ar, austenitizado a 1120°C durante 60 minutos	56
Figura 33 - Análise química.....	57
Figura 34 - D2_Têmpera em óleo, austenitizado a 920°C durante 20 minutos.	57

Figura 35 - D2_Têmpera em óleo, austenitizado a 920°C durante 20 minutos	58
Figura 36 - D2_Têmpera em óleo, austenitizado a 920°C durante 60 minutos	58
Figura 37 - D2_Têmpera em óleo, austenitizado a 920°C durante 60 minutos	59
Figura 38 - D2_Têmpera em óleo, austenitizado a 1020°C durante 20 minutos	59
Figura 39 - D2_Têmpera em óleo, austenitizado a 1020°C durante 20 minutos	60
Figura 40 - D2_Têmpera em óleo, austenitizado a 1020°C durante 60 minutos.	60
Figura 41 - D2_Têmpera em óleo, austenitizado a 1020°C durante 60 minutos	61
Figura 42 - D2_Têmpera em óleo, austenitizado a 1120°C durante 20 minutos	61
Figura 43 - D2_Têmpera em óleo, austenitizado a 1120°C durante 60 minutos.	62
Figura 44 - D6_Têmpera ao ar, austenitizado a 970°C durante 20 minutos.	63
Figura 45 - D6_Têmpera ao ar, austenitizado a 970°C durante 20 minutos	63
Figura 46 - Análise química.....	64
Figura 47 - D6_Têmpera ao ar, austenitizado a 970°C durante 60 minutos.	64
Figura 48 - D6_Têmpera ao ar, austenitizado a 970°C durante 60 minutos	65
Figura 49- D6_Têmpera ao ar, austenitizado a 1020°C durante 20 minutos.	66
Figura 50 - D6_Têmpera ao ar, austenitizado a 1020°C durante 20 minutos.	66
Figura 51 - Análise química.....	67
Figura 52 - D6_Têmpera ao ar, austenitizado a 1020°C durante 60 minutos.	67
Figura 53 - D6_Têmpera ao ar, austenitizado a 1020°C durante 60 minutos,	68
Figura 54 - D6_Têmpera ao ar, austenitizado a 1120°C durante 20 minutos.	69
Figura 55 - D6_Têmpera ao ar, austenitizado a 1120°C durante 20 minutos.	69
Figura 56 - D6_Têmpera ao ar, austenitizado a 1120°C durante 60 minutos.	70
Figura 57 - D6_Têmpera ao ar, austenitizado a 1120°C durante 60 minutos.	70
Figura 58 - D6_Têmpera em óleo, austenitizado a 970°C durante 20 minutos.	71
Figura 59 - D6_Têmpera em óleo, austenitizado a 970°C durante 20 minutos.	71
Figura 60 - Têmpera em óleo, austenitizado a 970°C durante 60 minutos.	72
Figura 61 - D6_Têmpera em óleo, austenitizado a 1020°C durante 20 minutos.	72
Figura 62 - D6_Têmpera em óleo, austenitizado a 1020°C durante 20 minutos.	73
Figura 63 - D6_Têmpera em óleo, austenitizado a 1020°C durante 60 minutos	73
Figura 64 - D6_Têmpera em óleo, austenitizado a 1020°C durante 60 minutos	74
Figura 65 - Análise química.....	74
Figura 66 - D6_Têmpera em óleo, austenitizado a 1120°C durante 20 minutos	75
Figura 67 - D6_Têmpera em óleo, austenitizado a 1120°C durante 60 minutos.	75
Figura 68 - Difratomogramas do aço AISI D2 temperado ao ar com temperatura de austenitização de 920 °C	76
Figura 69 - Difratomogramas do aço AISI D2 temperado ao ar com temperatura de austenitização de 1020°C	77
Figura 70 - Difratomogramas do aço AISI D2 temperado ao ar com temperatura de austenitização de 1120°C	77

Figura 71 - Difractogramas do aço AISI D2 temperado em óleo com temperatura de austenitização de 920°C.....	78
Figura 72 - Difractogramas do aço AISI D2 temperado em óleo com temperatura de austenitização de 1020°C.....	78
Figura 73 - Difractogramas do aço AISI D2 temperado em óleo com temperatura de austenitização de 1120°C.....	79
Figura 74 - Difractogramas do aço AISI D6 temperado ao ar com temperatura de austenitização de 970 °C	79
Figura 75 - Difractogramas do aço AISI D6 temperado ao ar com temperatura de austenitização de 1020 °C.....	80
Figura 76 - Difractogramas do aço AISI D6 temperado ao ar com temperatura de austenitização de 1120°C	80
Figura 77 - Difractogramas do aço AISI D6 temperado em óleo com temperatura de austenitização de 970°C.....	81
Figura 78 - Difractogramas do aço AISI D6 temperado em óleo com temperatura de austenitização de 1020°C.....	81
Figura 79 - Difractogramas do aço AISI D6 temperado em óleo com temperatura de austenitização de 1120°C.....	82

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Histórico de desenvolvimento dos aços ferramenta.	16
Tabela 2 - Elementos de liga principais dos aços ferramenta.	20
Tabela 3 - Aplicações dos aços ferramenta.....	22
Tabela 4 - Aços ferramenta de têmpera em água (W).....	25
Tabela 5 - Aços resistentes ao choque (S).	26
Tabela 6 - Aços para trabalho a quente (H).	27
Tabela 7 - Aços rápidos ao tungstênio (T) e ao molibdênio (M).....	28
Tabela 8 - Aços para trabalho a frio de têmpera em óleo (O).	31
Tabela 9 - Aços para trabalho a frio, de média liga (A).	32
Tabela 10 - Aços para trabalho a frio de alto teor cromo e carbono (D).....	33
Tabela 11 - Grupo D - Temperaturas de tratamento térmico e durezas.	34
Tabela 12 - Aço similar ao D2 – condições informadas pelo fabricante.	37
Tabela 13 - Aço similar ao D6 – condições informadas pelo fabricante.	38
Tabela 15 - Análise química inicial D2 – EDX.	43
Tabela 16 - Análise química inicial D6 – EDX.	43
Tabela 17 - Dureza (HRc) dos aços ferramenta no estado inicial.....	44
Tabela 18 - Dureza HRc D2 – Amostras austenitizadas a 920°C.....	46
Tabela 19 - Dureza HRc D2 – Amostras austenitizadas a 1020°C.....	46
Tabela 20 - Dureza HRc D2 – Amostras austenitizadas a 1120°C.....	46
Tabela 21 - Dureza HRc do aço D6 – Amostras austenitizadas a 970°C.....	47
Tabela 22 - Dureza HRc do aço D6 – Amostras austenitizadas a 1020°C.....	47
Tabela 23 - Dureza HRc do aço D6 – Amostras austenitizadas a 1120°C.....	48

Sumario

1. INTRODUÇÃO.....	14
2. OBJETIVOS.....	15
2.1. Objetivos Gerais	15
2.2. Objetivos Específicos	15
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	16
3.1. Características Gerais dos Aços Ferramenta	16
3.1.1. Histórico dos aços ferramenta.....	16
3.1.2. Processos de fabricação dos aços ferramenta	17
3.1.2. Elementos de liga nos aços ferramenta.....	20
3.1.3. Propriedades gerais dos aços ferramenta.....	21
3.1.4. Aplicações dos aços ferramenta	22
3.2. Tratamentos Térmicos dos Aços Ferramenta.....	23
3.3. Grupos de Aços Ferramenta.....	24
3.3.1. Grupo W – aços de têmpera em água.....	25
3.3.2. Grupo S – aços resistentes ao choque.....	26
3.3.3. Grupo H – aços para trabalho a quente.....	26
3.3.4. Grupo T – aços rápidos ao tungstênio	27
3.3.5. Grupo M – aços rápidos ao molibdênio.....	28
3.3.6. Grupo L – aços de baixa liga para fins especiais.....	28
3.3.7. Grupo F – aços para fins especiais ao Carbono-Tungstênio	28
3.3.8. Grupo P – aços para moldes plásticos	29
3.4. Aços Ferramenta para Trabalho a Frio.....	29
3.4.1. Grupo O – aços para trabalho a frio de têmpera em óleo	31
3.4.2. Grupo A – aços para trabalho a frio de média liga.....	32
3.4.3. Grupo D – aços para trabalho a frio de alto teor de cromo e carbono.....	33

4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	36
4.1. Descrição Geral do Trabalho Realizado	36
4.2. Materiais	37
4.3. Tratamentos Térmicos	39
4.4. Caracterização Microestrutural.....	39
4.5. Ensaio de Dureza.....	41
5. 1. Caracterização dos Materiais no Estado Inicial.....	43
5. 1.1. Análise química	43
5. 1.2. Dureza dos aços D2 e D6 no estado inicial.....	44
5. 1.3. Microestrutura dos aços D2 e D6 no estado inicial.....	44
5. 2. Caracterização Mecânica e Microestrutural Após Tratamentos Térmicos.....	45
5.2.1. Dureza	45
5.2.1.1 Dureza das amostras tratadas termicamente – D2.....	45
5.2.1.2. Dureza das amostras tratadas termicamente – D6.....	47
5.2.2. Microestrutura.....	49
5.2.2.1 Tratamentos térmicos D2.....	49
5.2.2.2 Tratamentos térmicos D6.....	62
5.2.3 Estudo da transformação de fases por Difração de Raios - X.....	76
5.2.3.1 Difração de Raios - X D2.....	76
5.2.3.2 Difração de Raios-X D6.....	79
6. Conclusão.....	83
7. Referências bibliográficas	84

1. INTRODUÇÃO

A busca por novas ferramentas foi intensificada com a revolução industrial e ao longo do século XIX, com o objetivo de ganhar maior vida útil e melhor desempenho, além de suportar condições de trabalho mais severas (SILVA, 2010).

As relações entre estrutura, propriedades, processamento que em conjunto definem o desempenho de um produto, no caso em questão, da ferramenta, eram consideradas complexas até meados do século XX e o desenvolvimento de materiais para ferramentas era feito de forma empírica (SILVA, 2010).

De forma prática, aços empregados como ferramenta podem ser considerados aços ferramenta, porém essa denominação é utilizada para aços especiais que apresentam alto grau de controle de processo e qualidade, como será discutido posteriormente. (COUTINHO, 1992) Esses aços especiais apresentam grande relevância no mercado mundial, sendo utilizadas em punções, machos, matrizes, ferramentas de corte e em componentes estruturais (SOARES, 2006).

Os processos mais utilizados na produção de componentes de aços ferramenta são a fundição do lingote, a metalurgia do pó e o ospray ou spray forming. O que diferencia os processos quanto à microestrutura são o tipo, o tamanho e a distribuição dos carbonetos, fazendo com que um aço com a mesma composição química produzido por esses três processos possa apresentar diferenças em suas propriedades (TOTTEN, 2007).

Os aços ferramenta são classificados em diversos grupos, como exemplos podem ser citados os aços para trabalho a frio, para trabalho a quente e para moldes de injeção de materiais poliméricos, e dentro desses grandes grupos existem algumas subdivisões (RAUTER, 1974).

O que determinará o desempenho da ferramenta será a combinação de projeto, fabricação da ferramenta seguindo critérios rigorosos, seleção do aço e tratamento térmico mais adequado a cada situação (COUTINHO, 1992) Dessa forma, os tratamentos térmicos constituem uma etapa fundamental na produção do aço, uma vez que vão conferir as propriedades finais do material, e são definidos de acordo com sua aplicação. O recozimento, a têmpera e o revenimento estão presentes em grande parte dos casos, diferindo alguns parâmetros em função do aço tratado termicamente (COUTINHO, 1992).

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivos Gerais

Analisar os efeitos das condições de tratamentos térmicos de têmpera no comportamento posterior de aços ferramenta para trabalho a frio.

2.2. Objetivos Específicos

- Avaliar os efeitos dos parâmetros de tratamento térmico de têmpera (meio de resfriamento, temperatura de austenitização e tempo de encharque) no comportamento mecânico de aços ferramenta para trabalho a frio.
- Analisar a influência das condições de tratamentos térmicos na microestrutura dos aços ferramenta para trabalho a frio
- Comparar o efeito dos elementos de liga nas propriedades mecânicas dos aços D2 e D6.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Características Gerais dos Aços Ferramenta

Os aços ferramenta podem ser definidos como uma classe de aços de alta qualidade no que diz respeito à composição química, ao processamento e ao controle de qualidade metalúrgico. Os aços ferramenta são utilizados em diferentes operações de fabricação de outros materiais, dando origem a vários produtos, logo a necessidade do rigor em seu processamento e controle de qualidade é justificada (COUTINHO, 1992).

3.1.1. Histórico dos aços ferramenta

Em termos históricos, pode-se afirmar que o desenvolvimento de ferramentas acompanha a evolução dos homens e, dessa forma, está relacionado ao progresso dos aços em geral. Dentro deste contexto, na tabela 1 pode ser verificado um resumo do desenvolvimento dos aços ferramenta (SOARES, 2006).

Tabela 1 – Histórico de desenvolvimento dos aços ferramenta.

Histórico	
1200 a.C.	Primeira ferramenta com estrutura martensítica - Galileia
350	Wootz steel - Índia
900	Espadas Japonesas
1740	Fusão em cadinho de aço Blister (Huntsman)
1868	Primeiro aço ligado aplicado como ferramenta Fe-C-W (Mushet)
1902	Aços ferramenta ligados ao Mn, W, Cr, Ni(Otto Thallner)
1920	As ligas específicas para aços ferramenta chegam a doze
1939	Surgimento dos Aços Ferramenta com alto C e V
1961	Adição de Co

Fonte: (SOARES, 2006)

A primeira ferramenta encontrada, de acordo com a literatura, foi uma picareta, datada de aproximadamente 1000 a.C. Essa ferramenta, utilizada na Galiléia, foi produzida com o aquecimento e resfriamento brusco, sendo foi constatado o endurecimento pela absorção de carbono e também pela estrutura encontrada, martensítica (DCM-FCT).

Em 350 a.C., na Índia, foi encontrado o chamado ferro de fusão, no qual o ferro era extraído do minério através de fornos. A escória era removida a partir do martelamento dos blocos de

ferro, que eram então posteriormente refundidos em cadinhos e resfriados lentamente (DCM-FCT).

Na Idade Média, entretanto, houve um retrocesso. O aço era fabricado através do contato do ferro aquecido com um material rico em carbono.

Em 1740, Huntsman fundiu em um cadinho pequenas porções de ferro enriquecido em carbono, obtendo um aço de aspecto homogêneo. Karsten, em 1820, apontou que a diferença entre o ferro, o aço e o ferro gusa estava no teor de carbono. A adição de tungstênio ao aço permitiu o seu endurecimento sem utilizar a têmpera, o que conferiu melhor resistência ao desgaste e possibilitou a manutenção do fio de corte em ferramentas utilizadas por longos períodos. Dessa forma, surgiu o primeiro aço rápido, com a descoberta datando do ano de 1868, feita por Mushet. Holtzer, 1878, propôs a adição de cromo, o que não foi levado adiante naquele momento devido à pouca experiência com tratamentos térmicos, sendo retomada no final do século XIX por Taylor, que verificou um aumento nas propriedades mecânicas do aço e a possibilidade de atingir a velocidade de 10m/min, considerada grande na época (DCM-FCT). A partir de 1920, o número de classes dos aços ferramenta chegou a 12. Além dos aços rápidos, se encontravam entre eles os aços para trabalho a frio e os aços para trabalho a quente.

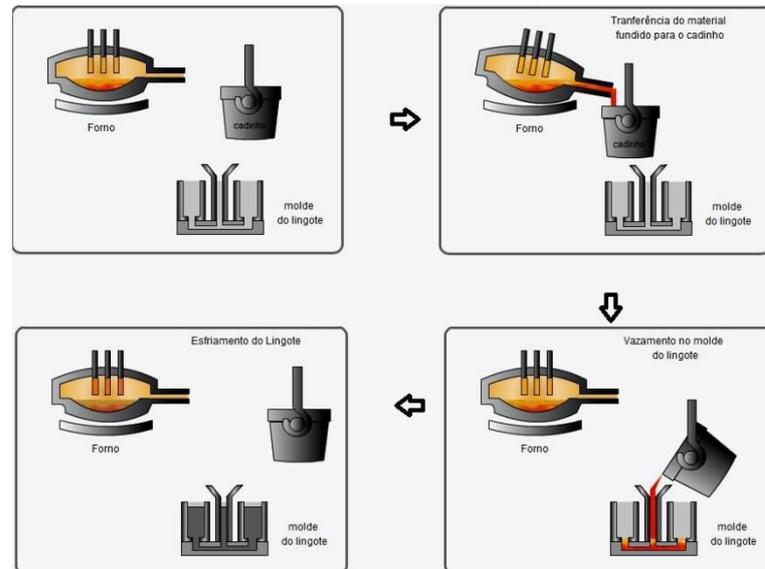
3.1.2. Processos de fabricação dos aços ferramenta

Em termos de processos de fabricação, as operações mais utilizadas na produção de componentes de aços ferramenta são a fundição do lingote, a metalurgia do pó e o ospray ou spray forming.

Considerando a fundição, a maioria dos aços ferramenta é processada utilizando forno a arco elétrico, controlando a composição química, a temperatura e a desgaseificação no refino secundário. A vantagem de sua utilização está na redução do tempo de forno, qualidade e reprodutibilidade. Neste caso, os carbonetos produzidos são não uniformes em tamanho e distribuição. Quando existe a necessidade de um aço com melhor acabamento superficial e uma melhor resistência, o processo de refusão à vácuo (VAR) pode ser utilizado. O aço produzido no forno elétrico é então refundido sob vácuo, em um molde e resfriado com água. O lingote é forjado em tarugos intermediários, apresentando uma menor quantidade de

inclusões e segregações, o mesmo ocorre com o processo de refusão sob escória (ESR). (TOTTEN, 2007) Na figura 1 é mostrada uma representação do processo de fundição de um lingote (CIMM).

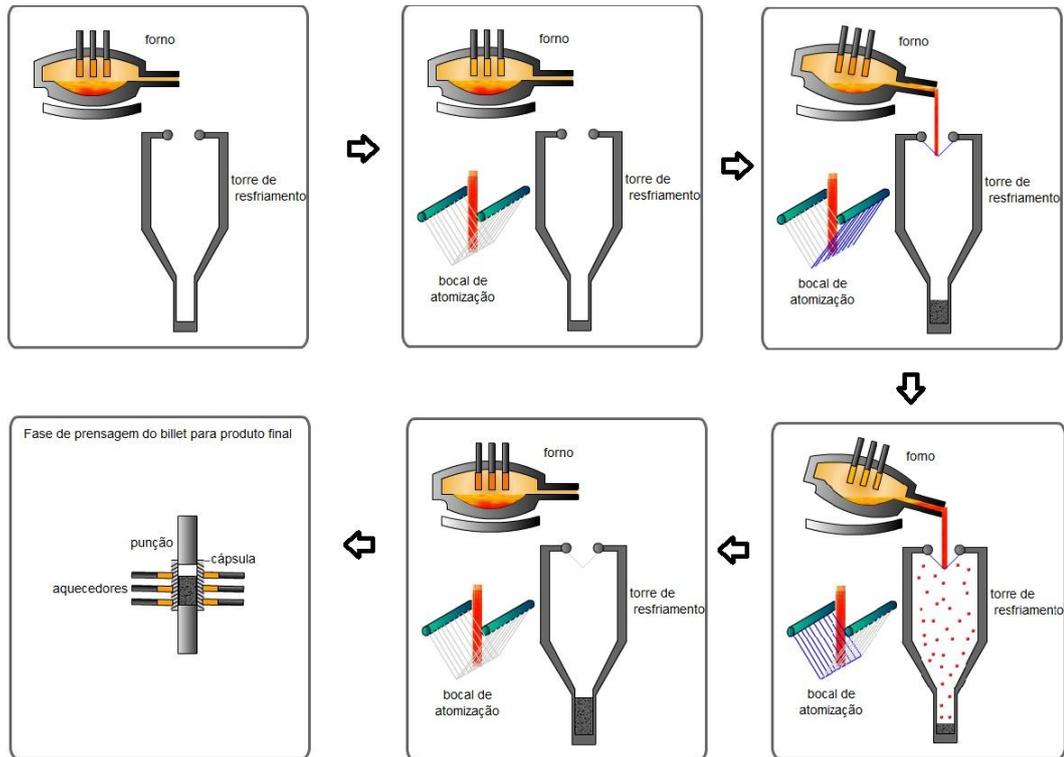
Figura 1 - Fundição do lingote



Fonte: (CIMM).

No processo de metalurgia do pó, figura 2 (CIMM), o metal que se encontra fundido é atomizado pela ação de um gás inerte a uma alta velocidade, formando gotas que se solidificam formando um pó. O pó é aquecido, forjado e, posteriormente, ocorre a densificação por prensagem isostática. Possíveis vazios são removidos devido à aplicação da pressão e da temperatura. Carbonetos esferoidizados e distribuídos uniformemente são produzidos (TOTTEN, 2007).

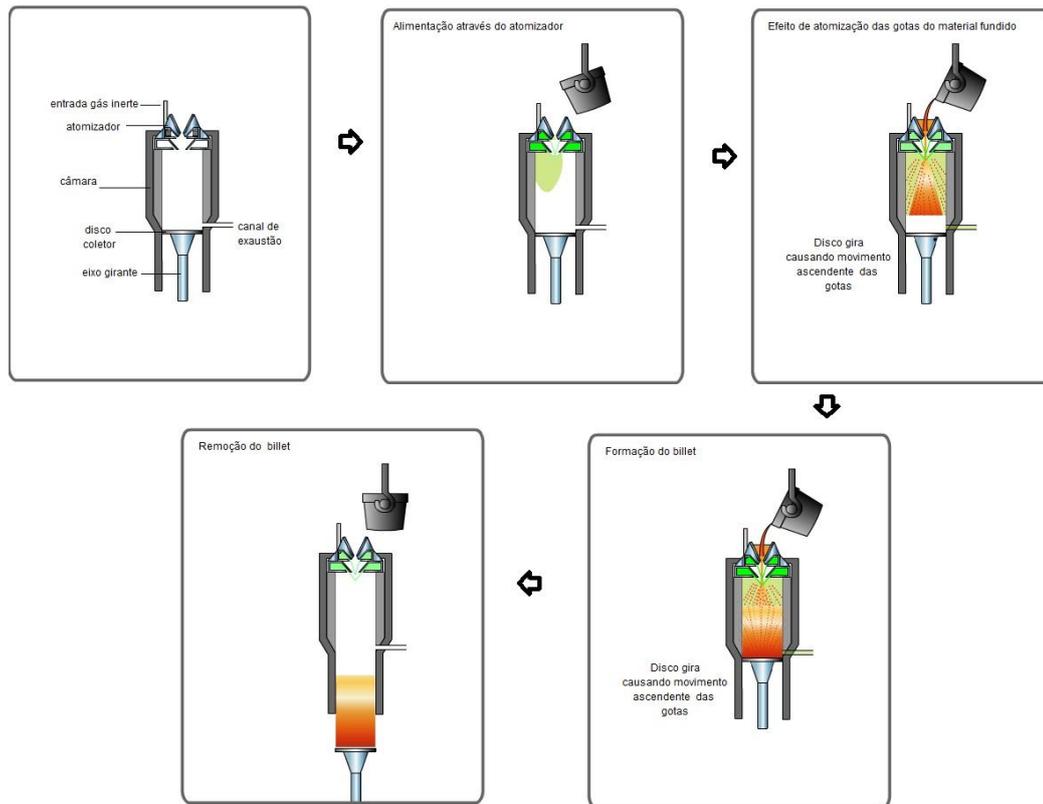
Figura 2 - Metalurgia do pó.



Fonte: (CIMM).

A conformação por spray, figura 3 (CIMM), é relativamente semelhante à metalurgia do pó, diferindo em alguns aspectos. Dois bocais oscilantes estão presentes no atomizador, o gás inerte, presente em alta velocidade transforma o metal fundido em gotas, coletadas em um disco metálico. Esse disco, gira fazendo um movimento ascendente, produzindo o tarugo. A rápida solidificação do metal nesse processo produz carbonetos circulares distribuídos uniformemente (TOTTEN, 2007).

Figura 3 - Processo spray



Fonte: (CIMM)

3.1.2. Elementos de liga nos aços ferramenta

Os principais elementos de liga utilizados nos aços ferramenta são o manganês, cromo, tungstênio, vanádio, molibdênio e cobalto, conforme apresentado na tabela 2. O carbono pode estar presente em grande teor, para a formação de carbonetos, ou em menores quantidades quando existe a necessidade de uma maior tenacidade (COUTINHO, 1992).

Tabela 2 - Elementos de liga principais dos aços ferramenta.

Elemento	Teor (%)	Efeitos
Manganês (Mn)	0,15 - 1,80	O Mn influencia a temperabilidade, quando não combinado com o enxofre.
Cromo (Cr)	0,15 - 13,5	Principal elemento de temperabilidade
Silício (Si)	0,15 - 2,25	Pequenos teores pequena elevação na temperabilidade Teor próximo de 1% aumenta a resistência a oxidação. Combinado com outros elementos melhora a tenacidade e resistência mecânica
Tungstênio (W)	0,40 - 19	Forma carbonetos estáveis Estabilizador da ferrita Forma carbonetos complexos extremamente duros e resistentes à abrasão
Vanádio (V)	0,15 - 5,25	Controla o tamanho do grão austenítico Carboneto estável em altas temperaturas, todo o V se encontra na forma de carbonetos Reduz a difusividade do carbono Aumento da resistência ao revenimento Endurecimento secundário
Molibdênio (Mo)	0,20 - 9,25	Uma parcela forma carbonetos outra é dissolvida na ferrita Aumento da resistência ao revenimento Endurecimento secundário
Cobalto (Co)	0,60 - 9,5	Retenção da dureza à quente Uso limitado devido a redução da temperabilidade

Fonte: (COUTINHO, 1992)

3.1.3. Propriedades gerais dos aços ferramenta

Algumas características são essenciais aos aços ferramenta, conforme listado a seguir:

- **Dureza à temperatura ambiente:** em aços com baixo teor de elementos de liga, a dureza esta relacionada ao teor de carbono, já em aços com grande teor de elementos de liga a dureza é influenciada também pela presença desses elementos. A dureza máxima é requisitada em ferramentas de corte e matrizes de estampagem, já em ferramentas de percussão e matrizes para trabalho a quente a dureza máxima não é de fundamental importância (CHIAVERINI, 2007).
- **Resistência ao desgaste:** A capacidade de resistir ao desgaste é uma importante propriedade, uma vez que o desgaste pode causar falhas, principalmente o desgaste por abrasão. A composição química, a capacidade de endurecimento superficial por encruamento, a resistência mecânica e as condições de operação afetam essa propriedade (CHIAVERINI, 2007).
- **Temperabilidade:** A uniformidade do endurecimento confere melhores propriedades mecânicas, o que é dificultado nos aços-carbono. Entretanto, com a adição dos elementos de liga essa diferença entre o centro e a superfície é reduzida. Condições menos severas de têmpera também podem ser utilizadas (CHIAVERINI, 2007).
- **Tenacidade:** As ferramentas são submetidas à aplicação de cargas de diversas naturezas, logo se torna necessário apresentar uma boa tenacidade aliada a elevada resistência mecânica. Tensões residuais vindas da têmpera podem atuar como concentrador de tensão reduzindo a tenacidade. Encruamento, alta dureza e segregação anormal também podem reduzir essa capacidade de absorver a carga sem romper (CHIAVERINI, 2007).
- **Resistência mecânica:** A resistência mecânica deve ser alta, para que as ferramentas suportem a carga sem deformar ou romper (CHIAVERINI, 2007).
- **Dureza a quente:** Característica desejável nos aços que funcionam em altas temperaturas. Os aços rápidos e os aços para trabalho a quente devem ser capazes de manter a

dureza em temperaturas elevadas. A presença de tungstênio, molibdênio, cobalto, cromo e vanádio interfere diretamente nessa propriedade (CHIAVERINI, 2007).

- **Tamanho do grão:** São requeridos grãos pequenos ou metal de granulação fina (CHIAVERINI, 2007).
- **Usinabilidade:** A usinabilidade é dificultada em razão da alta dureza, tornando-se muitas vezes um desafio à usinagem desses aços. O recozimento para a redução da dureza também é dificultado (CHIAVERINI, 2007).

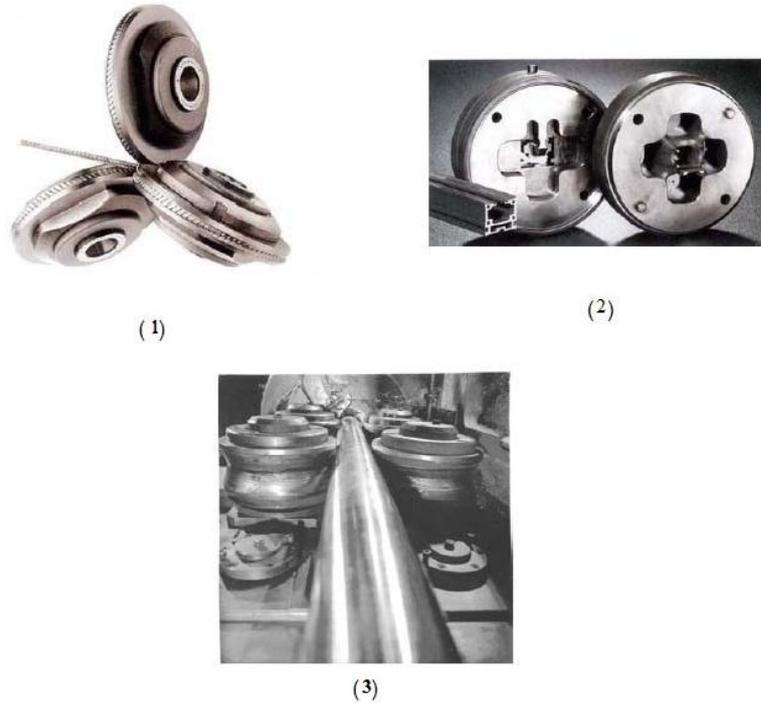
3.1.4. Aplicações dos aços ferramenta

Os aços ferramentas podem ser empregados em diversos tipos de ferramentas e matrizes. A seguir são apresentados exemplos de aplicações (tabela 3) e são exibidas imagens de algumas situações de emprego (figura 4). (GONÇALVES, 2008)

Tabela 3 - Aplicações dos aços ferramenta.

Matrizes	Roletes	Ferramentas
Estampagem	Conformação	Punções
Corte	Dobramento	Repuxo
Laminação	Aperto de solda	Brunimento
Dobradeiras	Guias de chapas	Calibradores
Extrusão		Acabamento
Perfiladeiras		Cutelaria
Rebarbadeiras		mandriladores

Fonte: (GONÇALVES, 2008)

Figura 4 - Exemplos de aplicações dos aços ferramenta:

Fonte: (GONÇALVES, 2008) - (1) ferramental de calibração e acabamento de vergalhões, (2) matriz de extrusão e (3) cilindros de laminação para conformação de tubos.

3.2. Tratamentos Térmicos dos Aços Ferramenta

Os tratamentos térmicos são operações essenciais para definir as propriedades finais dos materiais, por esse motivo alguns pontos considerados de maior relevância serão mencionados neste trabalho.

Os recozimentos mais utilizados nos aços ferramenta são o subcrítico e o de esferoidização. O subcrítico é executado a uma temperatura abaixo de A_1 (temperatura crítica inferior), com o objetivo de aliviar tensões residuais, podendo ocorrer o fenômeno de recuperação. Ao ser submetido a operações de usinagem e conformação, o material apresenta certo grau de encruamento, aumento da resistência mecânica devido à movimentação e interação de discordâncias. Durante a recuperação, o material pode sofrer um rearranjo estrutural, reduzindo também tensões residuais. Esse tratamento é recomendado em diversas situações como, por exemplo, quando as superfícies das ferramentas estão submetidas a grandes tensões e antes da usinagem de acabamento (COUTINHO, 1992). O recozimento de esferoidização é utilizado para a obtenção de uma microestrutura esferoidizada, que é uma estrutura de maior

usinabilidade. O material é aquecido a uma temperatura abaixo de A1, por um grande período e depois resfriado lentamente (COUTINHO, 1992).

Considerando o tratamento térmico de têmpera, é realizado o aquecimento a uma temperatura na qual ocorra austenitização total ou parcial, seguido de resfriamento rápido, fora das condições de equilíbrio, impedindo a difusão e favorecendo a formação da martensita mediante têmpera (COUTINHO, 1992). Em algumas situações, o pré aquecimento da peça é recomendado, com o intuito de impedir a formação de trincas e o empenamento. A estrutura formada após a têmpera é composta, a princípio, de martensita e austenita retida. O meio de resfriamento utilizado está ligado à taxa de resfriamento recomendada a um determinado aço ferramenta e usualmente são empregados como meios o ar, água, salmoura, óleo (COUTINHO, 1992).

O revenimento é um tratamento executado após a têmpera com o objetivo de devolver tenacidade ao aço, aliviando tensões residuais adquiridas na operação anterior. O material é aquecido a uma temperatura abaixo de A1 e mantido por certo período nessa temperatura (COUTINHO, 1992). Em algumas situações, nas quais existe uma grande quantidade de austenita retida, ainda passível de transformação, é necessário mais de um revenimento, uma vez que o primeiro irá promover a transformação martensítica a partir da austenita retida, sendo necessário um revenimento posterior para reaver a estrutura martensítica remanescente (COUTINHO, 1992).

3.3. Grupos de Aços Ferramenta

Os sistemas de classificação para os aços ferramenta que mais se sobressaem são o *Society of Automotive Engineers* (SAE) e o *American Iron and Steel Institute* (AISI), em ambos os sistemas os aços ferramenta estão segregados de acordo com o tratamento térmico ou aplicação. Cada grupo é designado por uma letra maiúscula, e dentro de um mesmo grupo a distinção entre eles é feita por números, escritos após a letra. (RAUTER, 1974)

Nos itens a seguir são descritos brevemente os principais grupos de aços ferramenta, acompanhados de tabelas nas quais as propriedades e as composições químicas apresentam classificações para tenacidade, resistência ao desgaste, dureza a quente e usinabilidade. Essas classificações variam de 1 a 9, em escala crescente. Nesse caso, exibindo o de menor valor

absoluto, menor é a qualidade em relação à propriedade avaliada e o de maior valor absoluto, maior é a qualidade (CHIAVERINI, 2007).

3.3.1. Grupo W – aços de têmpera em água

Os aços ferramenta de têmpera em água apresentam teor de carbono variável, sendo comercialmente encontrado na faixa de 0,60 a 1,4%. Os elementos de liga estão presentes em pequenas quantidades. O cromo quando utilizado não ultrapassa 0,50%, aumentando a temperabilidade e a resistência ao desgaste. Já o vanádio é adicionado com a intenção de refinar o grão e conferir maior tenacidade, não excedendo 0,25%. O pequeno teor de carbono confere maior tenacidade acompanhada de perda de resistência ao desgaste (RAUTER, 1974).

O grupo de aços W é considerado o ponto de partida para a seleção dos aços ferramenta.

A Tabela 4 apresenta alguns aços do grupo W, suas propriedades foram classificadas com valores que vão 1 a 9, que estão associados ao menor e maior grau de uma determinada propriedade, respectivamente.

Tabela 4 - Aços ferramenta de têmpera em água (W).

	Composição química nominal %					Características gerais					
	C	Mn	Si	Cr	V	Profundidade de endurecimento	Tenacidade	Resistência ao desgaste	Dureza a quente	Usinabilidade	
W1	0,70/1,50	0,25	0,25	0,15 max	x	Pequena	3 a 7	2 a 4		1	9
W2	0,85/1,50	0,25	0,25	0,15 max	0,25	Pequena	3 a 7	2 a 4		1	9
W3	1,00	0,25	0,25	0,15 max	0,50	Pequena	3 a 7	4		1	9
W4	1,00	0,25	0,25	0,25	x	Pequena	3 a 7	3 a 4		1	9
W5	1,10	0,25	0,25	0,50	x	Pequena	3 a 7	3 a 4		1	9
W7	1,00	0,25	0,25	0,35	0,20	Pequena	3 a 7	3		1	9

Fonte: (CHIAVERINI, 2007)

O grupo ainda pode ser dividido em quatro classes:

- Classe 1: Classe de melhor qualidade. Controle rigoroso quanto à temperabilidade e à composição química.
- Classe 2: Classe de alta qualidade. Controle rigoroso quanto à temperabilidade, porém com maiores tolerâncias em relação à composição química.
- Classe 3: Não apresenta certificado de qualidade.
- Classe 4: Não apresenta certificado de qualidade e nem uniformidade de têmpera.

3.3.2. Grupo S – aços resistentes ao choque

Para os aços resistentes ao choque (tabela 5) (CHIAVERINI, 2007), em virtude da tenacidade, o teor de carbono gira em torno de 0,50% o que leva, por outro lado, a uma dureza após a têmpera reduzida. Elementos formadores de carbonetos são adicionados para atenuar a perda de resistência ao desgaste. O elevado teor de silício não provoca grafitação, devido ao baixo teor de carbono. Esse grupo de aços ferramenta apresenta alta resistência a fadiga e a choques mecânicos (RAUTER, 1974).

Tabela 5 - Aços resistentes ao choque (S).

	Composição química nominal %						Características gerais				
	C	Mn	Si	Cr	V	Mo	Profundidade de endurecimento	Tenacidade ao desgaste	Resistência ao desgaste	Dureza a quente	Usinabilidade
S2	0,50	0,40	1,00	x	0,20	0,50	Média	8	2	2	8
S4	0,55	0,80	2,00	0,25	0,20	x	Média	8	2	2	8
S5	0,55	0,80	2,00	0,25	0,20	0,20 a 1,35	Média	8	2	3	8
S6	0,45	1,40	2,25	1,50	0,30	0,40	Média	8	2	3	8

Fonte: (CHIAVERINI, 2007)

3.3.3. Grupo H – aços para trabalho a quente

Os aços para trabalho a quente são empregados em ferramentas que trabalham em contato com materiais aquecidos a temperaturas superiores a 1000 °C e, portanto, devem apresentar elevada dureza a quente, boa resistência ao desgaste e a capacidade de manter essas propriedades quando aquecido. Dessa forma, apresentam elementos como cromo, molibdênio, tungstênio e vanádio em diferentes proporções, conforme pode ser observado na tabela 6 (CHIAVERINI, 2007).

Os altos teores dos elementos de liga conferem boa temperabilidade. A resistência mecânica e à choque térmicos é importante para evitar trincas profundas e superficiais. O teor de carbono fica em torno de 0,60 (RAUTER, 1974).

Os aços para trabalho a quente podem ser divididos em subgrupos:

- H10 a H19: Aços para trabalho a quente ao cromo. Podem apresentar outros elementos, porém em menor quantidade. O teor de cromo fica em torno de 5%, o carbono varia de 0,35 a 0,55%. Apresentam grande temperabilidade com pequenas distorções na têmpera (CHIAVERINI, 2007).

- H20 a H26: Aços para trabalho a quente ao tungstênio. Exibem baixo teor de carbono, já o tungstênio, principal elemento de liga, varia de 9 a 18%. São aços que apresentam grande capacidade de retenção de suas propriedades a quente, porém são de baixa resistência ao choque (CHIAVERINI, 2007).
- H41 a H43: Aços para trabalho a quente ao molibdênio. Apresentam de 5 a 8 % de molibdênio, o teor de carbono fica entre 0,55 e 0,65%. Foram criados como uma alternativa ao tungstênio, em virtude de seu menor peso atômico e maior eficiência (CHIAVERINI, 2007).

Na tabela 6 são apresentados exemplos de composição química e propriedades de alguns aços ferramenta para trabalho a quente dos três subgrupos descritos anteriormente (CHIAVERINI, 2007).

Tabela 6 - Aços para trabalho a quente (H).

	Composição química nominal %							Características gerais				
	C	Mn	Si	W	Cr	V	Mo	Profundidade de endurecimento	Tenacidade	Resistência ao desgaste	Dureza a quente	Usinabilidade
H11	0,35	0,30	1,00	x	5,00	0,40	1,50	Grande	9	3	6	8
H12	0,35	0,30	1,00	1,50	5,00	0,40	1,50	Grande	9	3	8	8
H24	0,45	0,30	0,30	15,00	3,00	0,50	x	Grande	5	5	8	6
H25	0,25	0,30	0,30	15,00	4,00	1,00	x	Grande	6	4	8	6
H26	0,50	0,30	0,30	18,00	4,00	1,00	x	Grande	4	6	8	5
H41	0,65	0,30	0,30	1,50	4,00	1,00	8,00	Grande	4	6	7	6
H42	0,65	0,30	0,30	6,40	4,00	2,00	5,00	Grande	4	6	7	6
H43	0,55	0,30	0,30	x	4,00	2,00	8,00	Grande	4	6	7	6

Fonte: (CHIAVERINI, 2007)

3.3.4. Grupo T – aços rápidos ao tungstênio

Os aços rápidos ao tungstênio podem ser submetidos a altas velocidades e avanços nas operações de usinagem, sem que ocorra a perda da dureza a quente. O teor de carbono fica próximo de 0,7%, formando uma grande quantidade de carbonetos complexos. O cromo, principal elemento que confere temperabilidade a esse aço ferramenta, fica próximo de 4%. O vanádio forma carbonetos complexos e favorece o aumento da resistência a abrasão. Alguns aços rápidos apresentam o cobalto que tem por finalidade aumentar a dureza a quente (RAUTER, 1974). Na tabela 7 são mostrados alguns exemplos dessas ligas. (CHIAVERINI, 2007)

3.3.5. Grupo M – aços rápidos ao molibdênio

Os aços rápidos ao molibdênio apresentam o mesmo desempenho das ligas ao tungstênio no que diz respeito à abrasividade, porém com maior tenacidade. O teor de molibdênio fica entre 3,5 a 9,5% e o de carbono é alto, entre 0,8 a 1,5%. Possuem grande durabilidade devido ao elevado número de carbonetos formados que aumentam sua abrasividade. (CHIAVERINI, 2007) Na tabela 7 são exibidos, em conjunto com o grupo T, alguns exemplos dessas ligas (CHIAVERINI, 2007).

Tabela 7 - Aços rápidos ao tungstênio (T) e ao molibdênio (M).

	Composição química nominal %							Características gerais				
	C	Mn	Si	Cr	W	V	Mo	Profundidade de endurecimento	Tenacidade	Resistência ao desgaste	Dureza a quente	Usinabilidade
T1	0,75	0,30	0,30	4,00	18,00	1,00	0,70 (opcional)	Grande	3	7	8	5
T9	1,20	0,30	0,30	4,00	14,00	2,00	0,75 (opcional)	Grande	2	9	8	3
M1	0,85	0,30	0,30	4,00	1,50	1,00	8,50	Grande	3	7	8	6
M7	1,00	0,30	0,30	4,00	1,75	2,00	8,75	Grande	3	8	8	5
M10	0,90	0,30	0,30	4,00		2,00	8,00	Grande	3	7	8	6

Fonte: (CHIAVERINI, 2007)

3.3.6. Grupo L – aços de baixa liga para fins especiais

Os aços para fins especiais são caracterizados por um teor de carbono próximo de 1,00% e ainda pequenas quantidades de cromo e manganês. O cromo contribui para a alta resistência ao desgaste e aumenta a temperabilidade, o molibdênio e o manganês também melhoram a temperabilidade. Esses aços apresentam grande estabilidade dimensional, sendo utilizado em machos, tarraxas, calibradores, pinos, cames, e em placas (RAUTER, 1974).

3.3.7. Grupo F – aços para fins especiais ao Carbono-Tungstênio

Os aços para fins especiais ao carbono-tungstênio podem ser utilizados quando existe a necessidade de alta resistência ao desgaste e retenção de uma aresta fina de corte, encontrados em matrizes de estiramento de fios e pequenos tubos, pouco usados em usinagem. Podem ser temperados em óleo (CHIAVERINI, 2007).

3.3.8. Grupo P – aços para moldes plásticos

Apresentam pequenos teores de carbono, tendo como principais elementos de liga o níquel e o cromo. Sua resistência ao desgaste necessária às suas diferentes aplicações é adquirida após a cementação (CHIAVERINI, 2007).

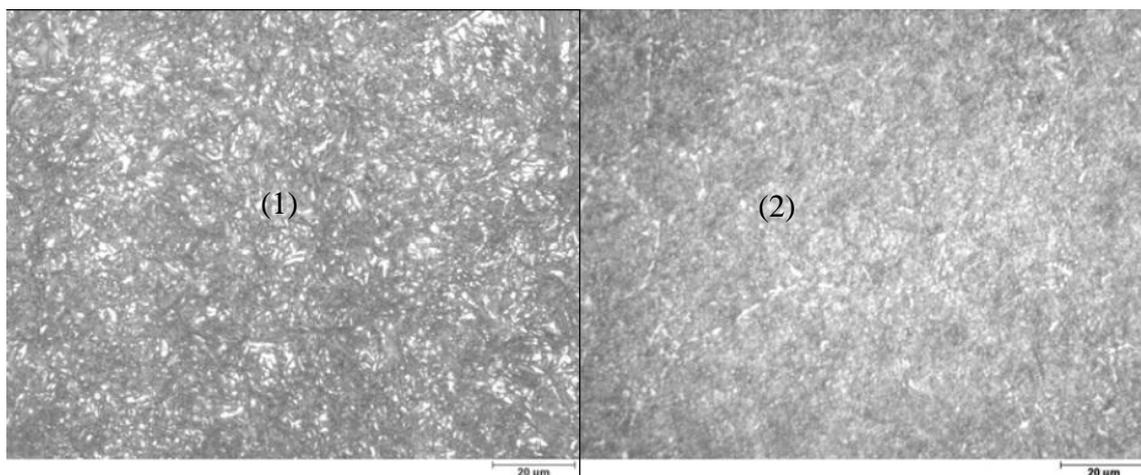
3.4. Aços Ferramenta para Trabalho a Frio

Os aços ferramenta para trabalho a frio também são conhecidos como aços indeformáveis, devido à capacidade de manter suas dimensões e forma durante o tratamento térmico. Em geral, são utilizados na fabricação de ferramentas que necessitam de alta resistência ao desgaste e boa tenacidade (CHIAVERINI, 2007).

Operações de corte, embutimento, estiramento e rebarbação, são processamentos em que os aços indeformáveis são frequentemente utilizados. Além das propriedades de alta resistência a abrasão e boa tenacidade, apresentam manutenção do gume cortante, característica essencial para ferramentas cortantes.

A microestrutura desejada relacionada às propriedades finais desses aços, comumente obtida utilizando a têmpera e o revenimento, é uma matriz martensítica revenida com carbonetos dispersos de forma homogênea (SILVA & MEI, 2010), conforme exemplificado na figura 5 (SOUZA, 2006).

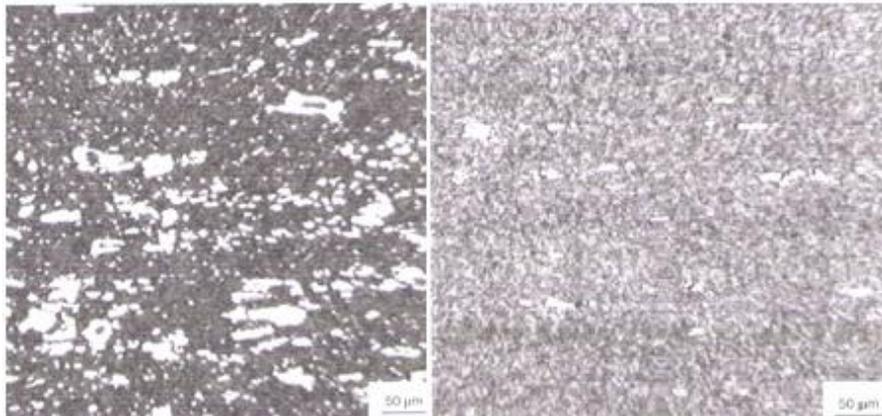
Figura 5 - Microestrutura do aço O para trabalho a frio



Fonte: (SOUZA, 2006). - (1) após a têmpera e (2) revenido a 370 °C .

A quantidade de carbonetos formados está relacionada à porcentagem de carbono presente no aço, e sua distribuição está relacionada ao processamento a que o aço foi submetido (SILVA & MEI, 2010). Na figura 6 pode ser verificado um exemplo de situação na qual o material é caracterizado pela presença de carbonetos. Uma homogeneidade na distribuição e tamanho dos carbonetos confere maior ductilidade e interfere diretamente na resistência à abrasão dos aços ferramenta para trabalho a frio (SILVA & MEI, 2010).

Figura 6 - Microestrutura do aço D6 com a presença de carbonetos primários em martensita revenida



Fonte: (SILVA & MEI, 2010).

Os aços para trabalho a frio em geral podem ser classificados como de têmpera em óleo, de média liga e de alto teor de cromo e carbono (RAUTER, 1974).

Ao grupo O são atribuídas características de pequena deformação em têmpera, elevada dureza, boa temperabilidade, sendo um dos mais utilizados na confecção de ferramentas devido às suas propriedades e ao seu menor custo comparado aos outros grupos.

O grupo A possui boa temperabilidade, passível de ser feita ao ar. Quanto aos teores dos elementos de liga apresentam valores intermediários àqueles observados nos grupos O e D.

Os aços pertencentes ao grupo D apresentam altos teores de carbono e cromo. Possuem elevada resistência ao desgaste e as distorções posteriores à têmpera são muito reduzidas (SILVA & MEI, 2010).

3.4.1. Grupo O – aços para trabalho a frio de têmpera em óleo

Esses aços possuem elevado teor de carbono, entre 0,9% e 1,45%. Outros elementos como o tungstênio, molibdênio, manganês e cromo, aparecem em menores quantidades, conforme indicado na tabela 8 (CHIAVERINI, 2007).

Tabela 8 - Aços para trabalho a frio de têmpera em óleo (O).

	Composição química nominal %							Características gerais				
	C	Mn	Si	Cr	V	W	Mo	Profundidade de endurecimento	Tenacidade	Resistência ao desgaste	Dureza a quente	Usinabilidade
O1	0,95	1,20	0,25	0,50	0,20	0,50	x	Média	3	4	3	8
O2	0,95	1,60	0,25	0,20	0,15	x	0,30	Média	3	4	3	8
O7	1,20	0,25	0,25	0,60	0,20	1,60	0,25	Média	3	5	3	7

Fonte: (CHIAVERINI, 2007)

A elevada temperabilidade dos aços ferramenta para trabalho a frio temperados em óleo é conferida principalmente pelo teor de manganês, em média 1,2%. O meio de resfriamento é o óleo, o que reduz a possibilidade de formação de trincas e distorções dimensionais, uma vez que o meio apresenta menor severidade de resfriamento, sendo muito utilizado em aplicações nas quais a grande precisão das ferramentas é exigida (COUTINHO, 1992).

O cromo e o tungstênio atuam favorecendo a temperabilidade e limitam a tendência de crescimento do grão (SILVA & MEI, 2010).

O aço O2 exibe menor distorção após a têmpera, devido ao teor elevado de manganês, o que também diminui a temperatura de austenização. Já o O7 apresenta a maior resistência ao desgaste e menor temperabilidade (COUTINHO, 1992).

Em situações nas quais o aço tenha sido submetido a temperaturas superiores à temperatura de austenitização, a normalização é recomendada com o objetivo de refino do grão. Neste caso, deve-se fazer de forma criteriosa para evitar defeitos como a descarbonetação da peça. O recozimento para alívio de tensões é recomendado a uma temperatura na faixa de 550°C - 650°C, muito utilizado em ferramentas de elevada precisão. O meio de resfriamento da têmpera é o óleo, feito a partir da temperatura de austenização, que fica no intervalo de 790°C a 880°C. A temperatura de revenimento é determinada em função do projeto da ferramenta (COUTINHO, 1992).

Esses aços são utilizados para fabricação de machos, matrizes, punções, tesouras, guilhotinas, brocas, trefilas, moldes de plásticos. (SILVA & MEI, 2010)

3.4.2. Grupo A – aços para trabalho a frio de média liga

Os teores de cromo, manganês, molibdênio, vanádio exibidos pelos aços do grupo A, conferem boa temperabilidade e também a possibilidade de resfriamento ao ar, com baixa deformação. A resistência à abrasão é garantida pelo alto teor de carbono. São comumente empregados em solicitações nas quais alta tenacidade e boa resistência a abrasão são exigidas. A combinação de seus elementos confere alta resistência ao impacto (RAUTER, 1974). Na tabela 9 são mostrados exemplos dos aços para trabalho a frio comerciais de média liga mais comuns (CHIAVERINI, V. 2007).

Tabela 9 - Aços para trabalho a frio, de média liga (A).

	Composição química nominal %						Características gerais					
	C	Mn	Si	Cr	V	W	Mo	Profundidade de endurecimento	Tenacidade	Resistência ao desgaste	Dureza a quente	Usinabilidade
A2	1,00	0,60	0,25	5,00	0,25	x	1,00	Grande	4	6	5	8
A3	1,25	0,60	0,25	5,00	1,00	x	1,00	Grande	3	7	5	8
A8	0,55	0,30	1,00	5,00	0,40	1,25	1,25	Grande	8	4	6	8

Fonte: (CHIAVERINI, V. 2007)

Para os aços para trabalho a frio de média liga recomenda-se o recozimento para alívio de tensões antes das operações de usinagem, em temperaturas no intervalo de 675°C a 700°C. Para outras operações, a temperatura de austenitização escolhida deve possibilitar dissolução dos carbonetos, evitando, entretanto, uma temperatura excessivamente alta, que poderia levar a uma grande quantidade de austenita retida, reduzindo a dureza do material. A têmpera é feita ao ar. Em ferramentas mais espessas recomenda-se a martêmpera, tratamento semelhante à têmpera. Essa operação é caracterizada pelo resfriamento brusco a partir do estado austenítico até uma temperatura acima da linha de transformação martensítica, na qual o aço é mantido por um tempo e depois resfriado, formando a martensita, porém, com menos distorções dimensionais, reduzindo assim a possibilidade de nucleação de trincas. Recomenda-se de dois a três revenimentos para que a austenita retida, ainda remanescente da têmpera, possa completar sua transformação (COUTINHO, 1992).

Esses aços são utilizados em punções, roletes, matrizes para extrusão e estampagem, cilindros de repuxar, buchas, facas, fresas, matrizes para recortar, folhas de tesoura, mandris, moldes de compressão, entre outras aplicações (COUTINHO, 1992).

3.4.3. Grupo D – aços para trabalho a frio de alto teor de cromo e carbono

Os aços para trabalho a frio com alto teor de cromo e carbono foram desenvolvidos durante a Segunda Guerra Mundial, com a função de ocupar o lugar dos aços rápidos, o que não foi possível uma vez que suas propriedades não são mantidas a altas velocidades de corte (SILVA & MEI, 2010).

O teor de carbono exibido por esses aços usualmente está entre 1 e 2,35%, enquanto o cromo aparece com um teor médio de 12%. O alto teor desses elementos confere alta resistência ao desgaste, através da formação de carbonetos duros, presentes em elevada fração volumétrica (SILVA & MEI, 2010).

Outros elementos como o molibdênio, vanádio, tungstênio e cobalto podem estar presentes, contribuindo para sua elevada temperabilidade. Em altas temperaturas essas ligas exibem boa resistência à oxidação (RAUTER, 1974).

Na tabela 10 são apresentadas as composições químicas e as propriedades dos aços para trabalho a frio de alto teor de cromo e carbono mais usuais (CHIAVERINI, V. 2007).

Tabela 10 - Aços para trabalho a frio de alto teor cromo e carbono (D).

	Composição química nominal %								Características gerais				
	C	Mn	Si	Cr	Ni	V	W	Mo	Profundidade de endurecimento	Tenacidade	Resistência ao desgaste	Dureza a quente	Usinabilidade
D2	0,50	0,30	0,25	12,00	x	0,60	x	0,80	Grande	2	8	6	3
D3	2,20	0,30	0,25	12,00	0,50(a)	0,60(a)	x	x	Grande	1	8	6	2
D6	2,10	0,30	0,85	12,00	x	x	0,75	x	Grande	1	8	6	2
D1	1,00	0,20	0,25	12,00	x	0,60	x	0,80	Grande	3	6	6	4
D7	2,30	0,50	0,50	5,25	x	4,75	1,10(a)	1,10(a)	Grande	1	9	6	1

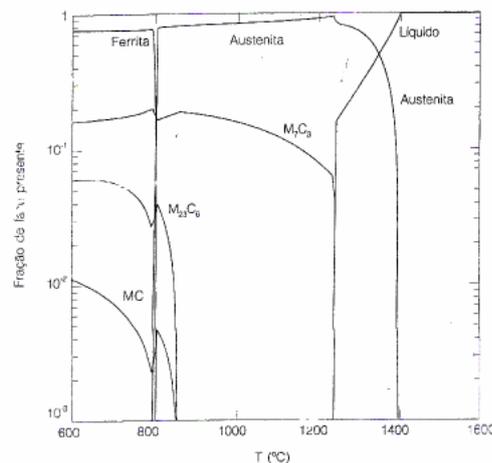
Fonte: (CHIAVERINI, 2007)

A figura 7 mostra, como exemplo, a quantidade de fases presentes no aço D2, quando resfriado lentamente, nas condições de equilíbrio. A quantidade de carbonetos na austenita está associada à temperatura, quando esta é reduzida a quantidade de carbonetos aumenta (SILVA & MEI, 2010).

Em termos de tratamentos térmicos, recomenda-se o recozimento para alívio de tensões antes das operações de usinagem, em temperaturas no intervalo de 871°C a 899°C. Já em relação à têmpera, o aquecimento deve ser lento, para evitar alterações dimensionais, sendo recomendado um pré aquecimento. Assim como em determinadas situações para alguns aços do grupo A, a martêmpera é recomendada. O revenimento pode ocasionar endurecimento secundário, em temperaturas elevadas. Por fim, são passíveis de nitretação, com o objetivo de se obter uma superfície mais resistente ao desgaste (CHIAVERINI, 2007).

As temperaturas de tratamento térmico para alguns aços do grupo D podem ser verificadas na tabela 11 (CHIAVERINI, 2007).

Figura 7 - Fases presentes em equilíbrio no aço D2



Fonte: (SILVA & MEI, 2010).

Tabela 11 - Grupo D - Temperaturas de tratamento térmico e durezas.

	Temperaturas dos tratamentos térmicos (°C)					
	Dureza de trabalho (HRc)	Dureza superficial no estado temperado (HRc)	Recozimento	Têmpera	Meio de resfriamento	Revenido
D2	58 - 64	61 - 64	871 - 899	982 - 1024	ar	204 - 538
D3	58 - 64	64 - 66	871 - 899	927 - 982	óleo	204 - 538
D6	58 - 64	64 - 66	871 - 899	927 - 954	óleo	204 - 538
D1	58 - 64	61 - 64	871 - 899	968 - 1010	ar	240 - 538
D7	58 - 66	64 - 66	871 - 899	1010 - 1066	ar	149 - 538

Fonte: (CHIAVERINI, V. 2007)

O aço D2 é o mais utilizado dessa classe no mundo. Entretanto, no Brasil, o mais popular é o aço D6, devido a todas as suas propriedades conhecidas e por possuir grande vida útil (SILVA & MEI, 2010).

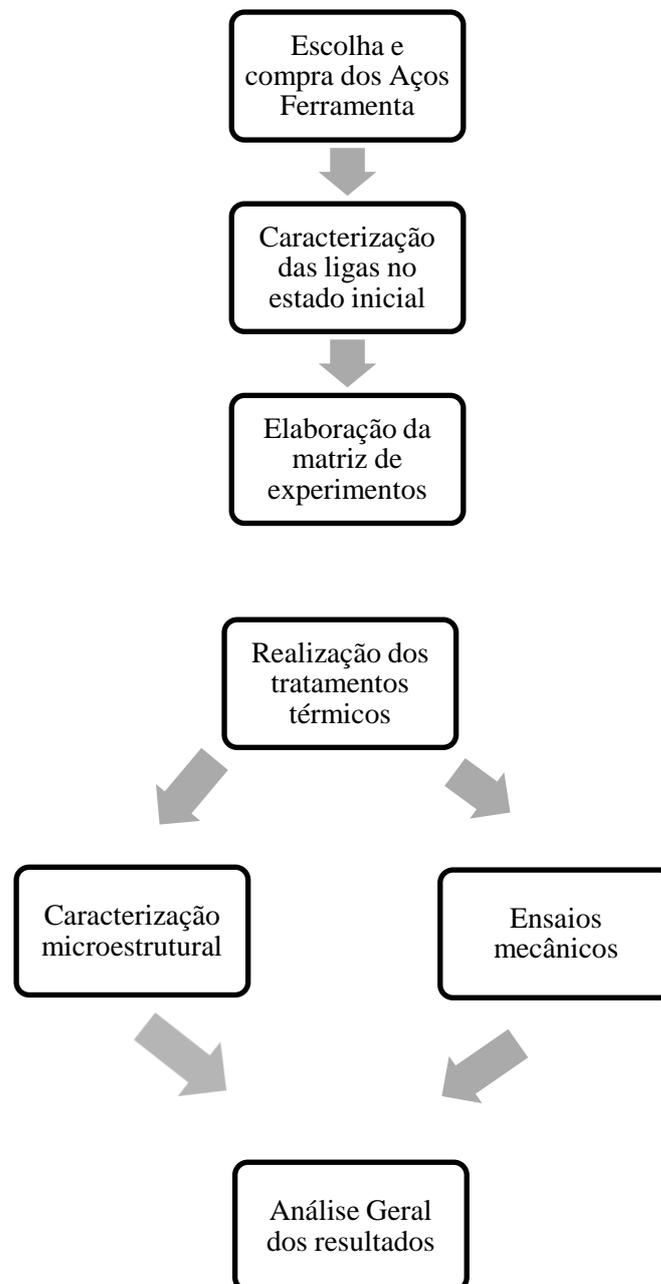
Os aços para trabalho a frio com alto teor de cromo e carbono são utilizados em matrizes para cortar, trefilar, em conformação a frio, na estampagem, no brunimento, no recartilamento, em mandris, roletes formadores, punções, cutelaria de qualidade, cilindros (COUTINHO, 1992).

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. Descrição Geral do Trabalho Realizado

O trabalho consistiu na análise dos efeitos das condições de tratamento térmico no comportamento de aços ferramenta para trabalho a frio. As condições de operação avaliadas foram basicamente o meio de resfriamento, a temperatura e tempo de encharque na têmpera. Na figura 8 é mostrada uma representação esquemática do estudo realizado.

Figura 8- Metodologia adotada no trabalho



4.2. Materiais

Os aços selecionados para a utilização no trabalho, Thyrodur 2379 similar ao AISI D2 e o Thyrodur 2436 similar ao AISI D6, apresentam algumas diferenças quanto à composição química, propriedades e condições de tratamento térmico recomendadas pelo fabricante (SCHMOLZ - BIKENBACH).

O aço similar ao AISI D2 apresenta alto teor de carbono com boa resistência ao desgaste e boa tenacidade, característica dos aços ferramenta para trabalho a frio, além de ser passível de nitretação. É um metal usualmente aplicado em punções, ferramentas e matrizes de corte, ferramentas utilizadas em extrusão a frio, estampagem e moldes plásticos. A composição química e condições de tratamento térmico fornecidas pelo fabricante podem ser verificadas na tabela 12 (SCHMOLZ - BIKENBACH).

Tabela 12 - Aço similar ao D2 – condições informadas pelo fabricante.

D2 - 2379			
Composição química			
C (%)	Cr(%)	Mo (%)	V (%)
1,55	12,00	0,70	1,00
Tratamento térmico			
Recozimento			
Temperatura	830°C - 860 °C		
Resfriamento	Forno		
Dureza	250 HB máx		
Têmpera			
Temperatura	1000°C - 1050 °C		
Resfriamento	Ar, óleo, ou banho de sal		
Dureza	57 HRc		

Fonte: (SCHMOLZ - BIKENBACH)

O aço similar ao AISI D6 apresenta um teor de carbono superior ao aço similar ao AISI D2, alta resistência ao desgaste e uma tenacidade reduzida quando comparado ao aço anterior. A utilização desse aço é em grande parte para confecção de matrizes de corte, ferramentas de corte e estampagem, núcleos de feiras de trefilação, rolos de brunimento e polimento. A composição química e as condições de tratamento térmico fornecidas pelo fabricante podem ser verificadas na tabela 13 (SCHMOLZ - BIKENBACH).

Para verificação da composição química foi utilizada a técnica de espectroscopia de raios X por dispersão em energia EDX, feita ao ar.. O equipamento utilizado foi da marca Shimadzu, modelo 720 (figura 9).

Tabela 13 - Aço similar ao D6 – condições informadas pelo fabricante.

D6 - 2436			
Composição química			
C (%)	Mn (%)	Cr (%)	W (%)
2,10	0,35	12,00	12,00
Tratamento térmico			
Recozimento			
Temperatura	800°C - 840 °C		
Resfriamento	Forno		
Dureza	250 HB máx		
Têmpera			
Temperatura	950°C - 980 °C		
Resfriamento	Ar, óleo, ou banho de sal		
Dureza	64 HRc		

Fonte: (SCHMOLZ - BIKENBACH)

Figura 9- EDX Shimadzu modelo 720



Fonte: (Autor)

Ao longo do trabalho, para facilitar, os aços serão denominados apenas AISI D2 e AISI D6.

4.3. Tratamentos Térmicos

O tratamento térmico analisado no trabalho foi a têmpera. Foram empregados dois meios de resfriamento, três temperaturas de austenitização e dois tempos de encharque, conforme a tabela 14. A escolha dos meios de resfriamento e das temperaturas de austenitização foi baseada em uma consulta inicial ao catálogo do fabricante. O equipamento utilizado na operação foi um forno elétrico da marca *Magnus* (figura 10).

Tabela 14 - Condições de têmpera consideradas no trabalho.

Aço	Temperaturas de austenitização	Tempos de encharque	Meios de Resfriamento
AISI D2	920°C, 1020°C, 1120°C	20 minutos, 60 minutos	Ar e óleo
AISI D6	970°C, 1020°C, 1120°C	20 minutos, 60 minutos	Ar e óleo

Fonte: (Autor)

Figura 10 - Forno elétrico empregado nos tratamentos térmicos



Fonte: (Autor)

4.4. Caracterização Microestrutural

A caracterização microestrutural dos aços AISI D2 e AISI D6 foi conduzida através de ensaios metalográficos e difração de raios-x.

Em relação à metalografia, a preparação das amostras no estado inicial e tratadas termicamente foi realizada através do procedimento convencional, consistindo em corte,

embutimento, lixamento com óxido de alumínio e polimento com pasta de diamante. O ataque químico foi conduzido com o reagente Nital 5%. As peças foram analisadas por microscopia óptica MO e microscopia eletrônica de varredura MEV, empregando microscópios das marcas *Fortel* e *Shimadzu*, respectivamente. Em relação à microscopia eletrônica por varredura, foi ainda conduzida durante a operação a análise química de algumas regiões observadas através de espectroscopia de energia dispersiva EDS, com um equipamento acoplado também da marca *Shimadzu*. Nas figuras 11 e 12 podem ser visualizadas imagens dos microscópios óptico e eletrônico de varredura utilizados no trabalho

Figura 11 - Microscópio óptico utilizado para análise da microestrutura



Fonte: (Autor)

Figura 12 - Microscópio eletrônico de varredura empregado para análise da microestrutura



Fonte: (Autor)

A difração de raios-X foi conduzida em um equipamento também da marca *Shimadzu*, com ângulo de varredura entre 20° a 90° e passo de $0,02s^{-1}$. Neste caso, a preparação das amostras

envolveu apenas o lixamento das peças no estado inicial e tratadas termicamente. Na figura 13 pode ser visualizado o difratômetro de raios-x empregado no estudo.

Figura 13 - Difratômetro de raios-x



(a)

(b)

Fonte: (Autor) - visão geral (a) e detalhe do porta amostra (b)

4.5. Ensaios de Dureza

A análise do comportamento mecânico dos aços para trabalho a frio foi realizada através de testes de dureza Rockwell, empregando um durômetro da marca *IGV*, e a escala C, ou seja, com um penetrador cônico de diamante com 120° de conicidade. Na figura 14 pode ser observado o equipamento utilizado nos experimentos. Similarmente à difração de raios-x, as amostras foram apenas lixadas antes dos testes. Para cada condição, foram realizados ao menos 4 ensaios de dureza

Figura 14 - Durômetro utilizado no trabalho



Fonte: (Autor)

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. Caracterização dos Materiais no Estado Inicial

5.1.1. Análise química

A composição química dos materiais investigados é exibida nas tabelas 15 e 16. Nota-se que as principais diferenças entre as ligas estão associadas à presença de molibdênio e de vanádio no primeiro aço e de tungstênio no segundo. O teor de carbono, também distinto, não pode ser observado nessa análise devido a uma limitação da técnica de caracterização, que só detecta elementos com número atômico maior ou igual a 11. Os resultados encontrados são similares àqueles informados pelo fabricante, estando dentro da tolerância estabelecida pela norma.

Tabela 14 - Análise química inicial D2 – EDX.

Análise Química - D2				
			μ (Média)	σ (Desvio padrão)
Fe	84,7620%	84,8200%	84,7910%	0,0410%
Cr	12,8030%	12,6120%	12,7710%	0,0453%
V	1,0560%	1,0680%	1,0620%	0,0085%
Mo	1,0000%	0,9950%	0,9975%	0,0035%
S	0,3120%	0,3180%	0,3150%	0,0042%
Cu	0,0670%	0,0600%	0,0635%	0,0049%

Fonte: (Autor)

Tabela 15 - Análise química inicial D6 – EDX.

Análise Química - D6				
			μ (Média)	σ (Desvio padrão)
Fe	86,6370%	86,5720%	86,6045%	0,0460%
Cr	12,5390%	12,6120%	12,5755%	0,0516%
W	0,5230%	0,5520%	0,5375%	0,0205%
Ni	0,1310%	0,0690%	0,1000%	0,0438%
Cu	0,0750%	0,0700%	0,0725%	0,0035%
Mo	0,0710%	0,0740%	0,0725%	0,0021%
Se	0,0250%	0,0160%	0,0205%	0,0064%
Au	x	0,033%	0,0330%	0,0000%

Fonte: (Autor)

5. 1.2. Dureza dos aços D2 e D6 no estado inicial

Na tabela 17 são apresentados os resultados de dureza dos materiais no estado inicial. Ressalta-se que os resultados do aço D2 indicam a necessidade de alterar a escala de dureza, entretanto, o penetrador adequado não estava disponível para uso no momento das medições. Os valores típicos de dureza de aços ferramenta no estado recozido estão em torno de 250 HB, que ao ser convertido para a dureza Rockwell escala C fica em torno de 20 HRc.

Tabela 16 - Dureza (HRc) dos aços ferramenta no estado inicial.

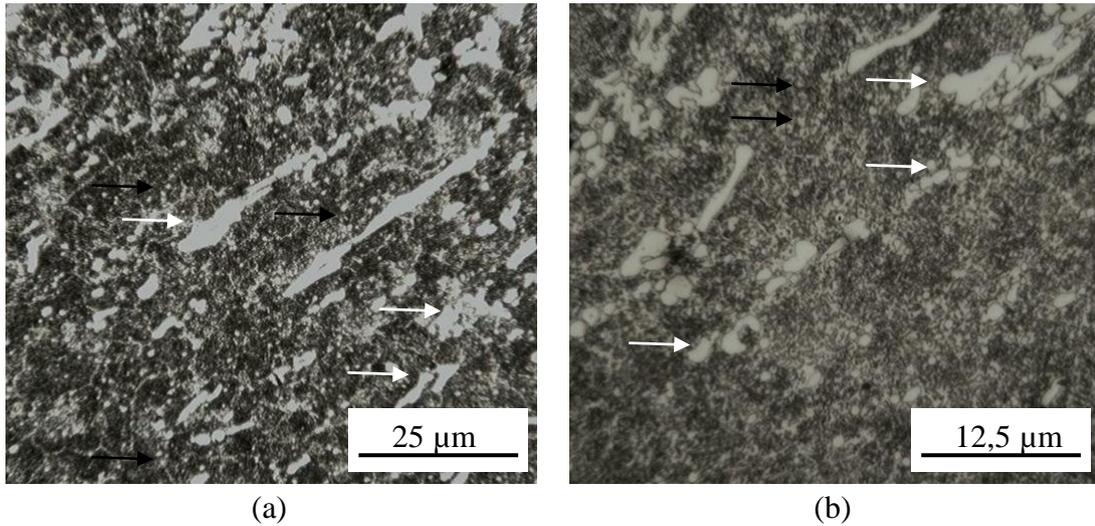
	D2	D6
	12	33
	8	26
	18	28
	18	29
μ (média)	14,00	29,00
σ (Desvio)	4,90	2,94

Fonte: (Autor)

5. 1.3. Microestrutura dos aços D2 e D6 no estado inicial

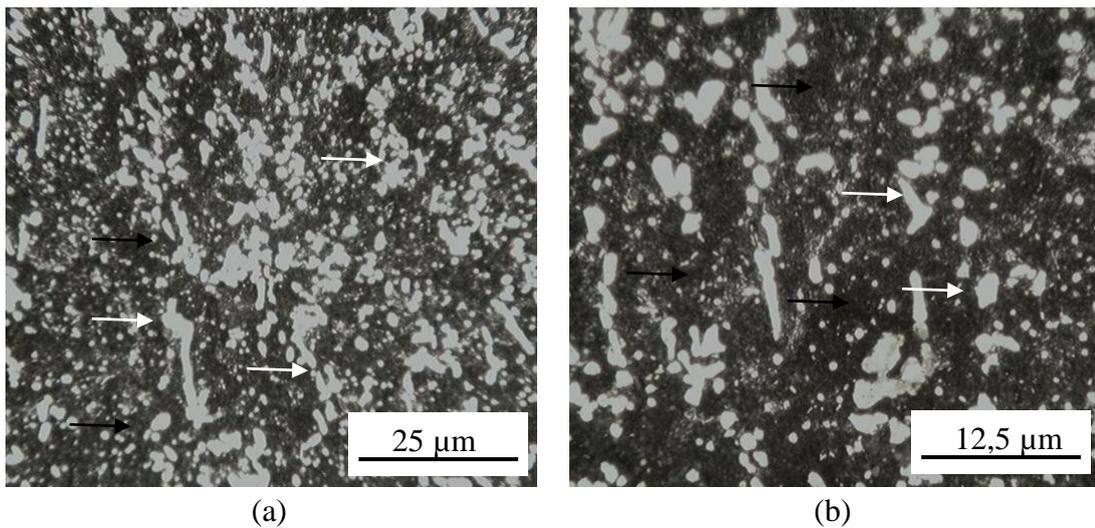
As fotomicrografias obtidas através de microscopia óptica dos aços como recebidos são mostradas nas figuras 15 e 16. As microestruturas ratificam o resultado obtido nos ensaios de dureza: em ambas as ligas podem ser observadas uma matriz ferrítica perlítica (setas pretas) com a presença de carbonetos (setas brancas), arranjo característico dos aços ferramenta no estado recozido, o que normalmente caracteriza a condição de fornecimento dos fabricantes.

Figura 15- Microestrutura do aço D2 como recebido



Fonte: (Autor) – (MO) Aumentos distintos 25 µm (a) e 12,5 (b) µm.

Figura 16 - Microestrutura do aço D6 como recebido:



Fonte:(Autor) - (MO) Aumentos distintos 25 µm (a) e 12,5 (b) µm..

5. 2. Caracterização Mecânica e Microestrutural Após Tratamentos Térmicos

5.2.1. Dureza

5.2.1.1 Dureza das amostras tratadas termicamente – D2

As tabelas 18, 19 e 20 são referentes aos ensaios de dureza Rockwell C do aço AISI D2 tratado termicamente nas temperaturas e meios de resfriamento adotados no trabalho.

Tabela 17 - Dureza HRc D2 – Amostras austenitizadas a 920°C.

	D2_920°C_Ar_20min	D2_920°C_óleo_20min	D2_920°C_Ar_60min	D2_920°C_óleo_60min
	51	52	51	53
	52	53	52	53
	52	53	52	53
μ (média)	51,67	52,67	51,67	53,00
σ (Desvio padrão)	0,58	0,58	0,58	0,00

Fonte: (Autor)

Tabela 18 - Dureza HRc D2 – Amostras austenitizadas a 1020°C

	D2_1020°C_Ar_20min	D2_1020°C_óleo_20min	D2_1020°C_Ar_60min	D2_1020°C_óleo_60min
	55	56	52	53
	55	58	53	53
	55	59	54	51
μ (média)	55,00	57,67	53,00	52,33
σ (Desvio padrão)	0,00	1,53	1,00	1,15

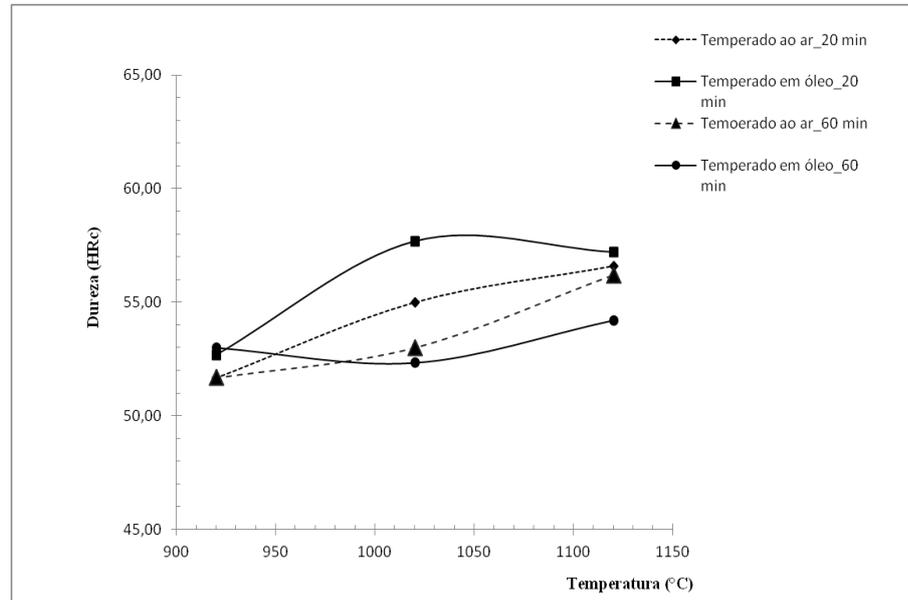
Fonte: (Autor)

Tabela 19 - Dureza HRc D2 – Amostras austenitizadas a 1120°C

	D2_1120°C_Ar_20min	D2_1120°C_óleo_20min	D2_1120°C_Ar_60min	D2_1120°C_óleo_60min
	56	58	56	53
	56	56	57	55
	58	58	57	54
μ (média)	56,60	57,20	56,20	54,20
σ (Desvio padrão)	1,95	1,10	1,30	1,30

Fonte: (Autor)

Na figura 17 são apresentados os resultados médios de dureza obtidos para o aço AISI D2, na qual pode ser observado seu comportamento nas condições de tratamento térmico estabelecidas. De maneira geral, o aumento da temperatura de austenitização implicou em um aumento na dureza, com exceção para a temperatura de austenitização de 1020°C, resfriamento em óleo e tempo de encharque de 60 minutos e para a temperatura de austenitização de 1120°C, resfriamento em óleo e tempo de encharque de 20 minutos. Considerando as amostras temperadas em um mesmo meio, o aumento no tempo de encharque resultou em uma dureza menor.

Figura 17- Dureza Rockwell C do aço AISI D2 em função da temperatura de austenitização, do tempo de encharque e meio de resfriamento.

Fonte: (Autor)

5.2.1.2. Dureza das amostras tratadas termicamente – D6

As tabelas 21, 22 e 23 são referentes aos ensaios de dureza do aço AISI D6 tratado termicamente nas temperaturas e meios de resfriamento adotados no trabalho.

Tabela 20 - Dureza HRC do aço D6 – Amostras austenitizadas a 970°C.

	D6_970°C_Ar_20min	D6_970°C_óleo_20min	D6_970°C_Ar_60min	D6_970°C_óleo_60min
	60	62	58	60
	58	62	56	60
	59	61	57	60
μ (média)	59,00	61,67	57,00	60,00
σ (Desvio padrão)	1,00	0,58	1,00	0,00

Fonte: (Autor)

Tabela 21 - Dureza HRC do aço D6 – Amostras austenitizadas a 1020°C.

	D6_1020°C_Ar_20min	D6_1020°C_óleo_20min	D6_1020°C_Ar_60min	D6_1020°C_óleo_60min
	63	61	57	53
	64	61	57	56
	63	61	57	55
μ (média)	63,33	61,00	57,00	54,67
σ (Desvio padrão)	0,58	0,00	0,00	1,53

Fonte: (Autor)

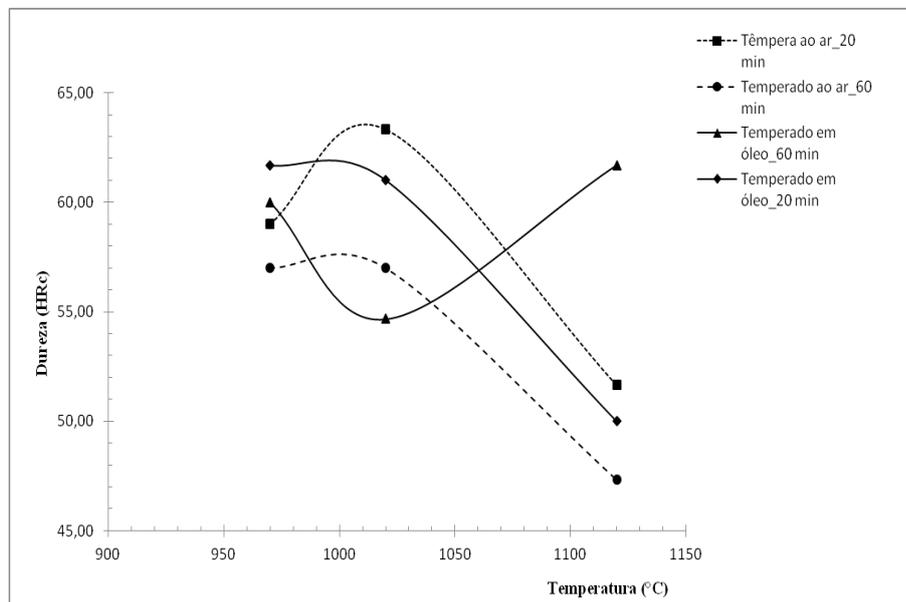
Tabela 22 - Dureza HRC do aço D6 – Amostras austenitizadas a 1120°C.

	D6_1120°C_Ar_20mi	D6_1120°C_óleo_20mi	D6_1120°C_Ar_60mi	D6_1120°C_óleo_60mi
	52	51	47	62
	51	50	48	62
	52	49	47	61
μ (média)	51,67	50,00	47,33	61,67
σ (Desvio padrão)	0,58	1,00	0,58	0,58

Fonte: (Autor)

Na figura 18 são apresentados os resultados médios de dureza que foram obtidos. Em geral, o aumento da temperatura de austenitização levou a uma redução na dureza do metal, apresentando diferença apenas para duas condições das oito avaliadas no trabalho. Esses resultados contrastam com aqueles verificados para o aço AISI D2, através dos quais verifica-se um aumento da resistência do metal com a temperatura. Por outro lado, comparando as amostras temperadas no mesmo meio, de maneira geral, o aumento do tempo de encharque também resultou em uma dureza menor.

Figura 18 - Dureza Rockwell C do aço AISI D6 em função da temperatura de austenitização, do tempo de encharque e meio de resfriamento.



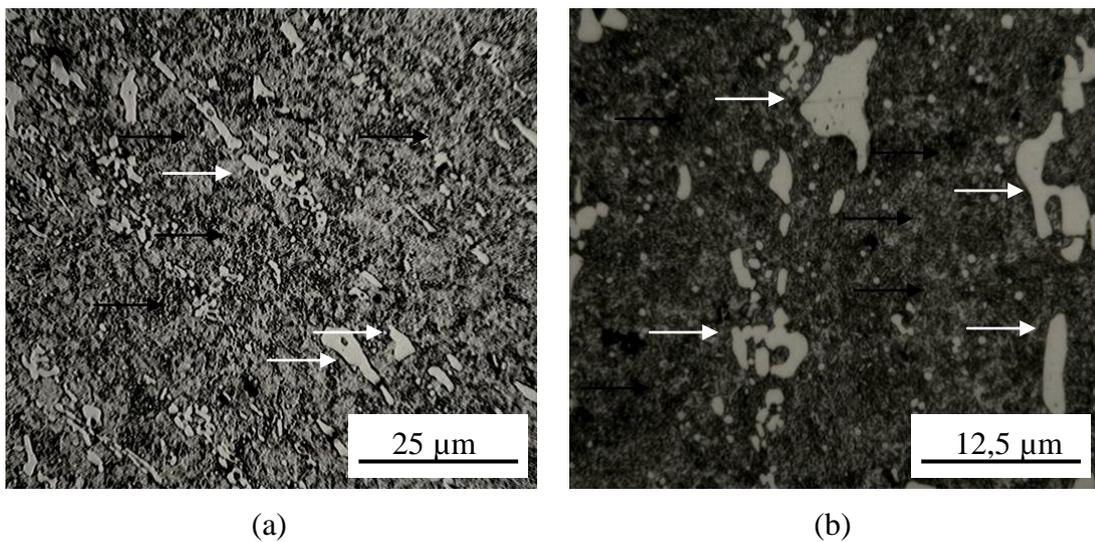
Fonte: (Autor)

5.2.2. Microestrutura

5.2.2.1 Tratamentos térmicos D2

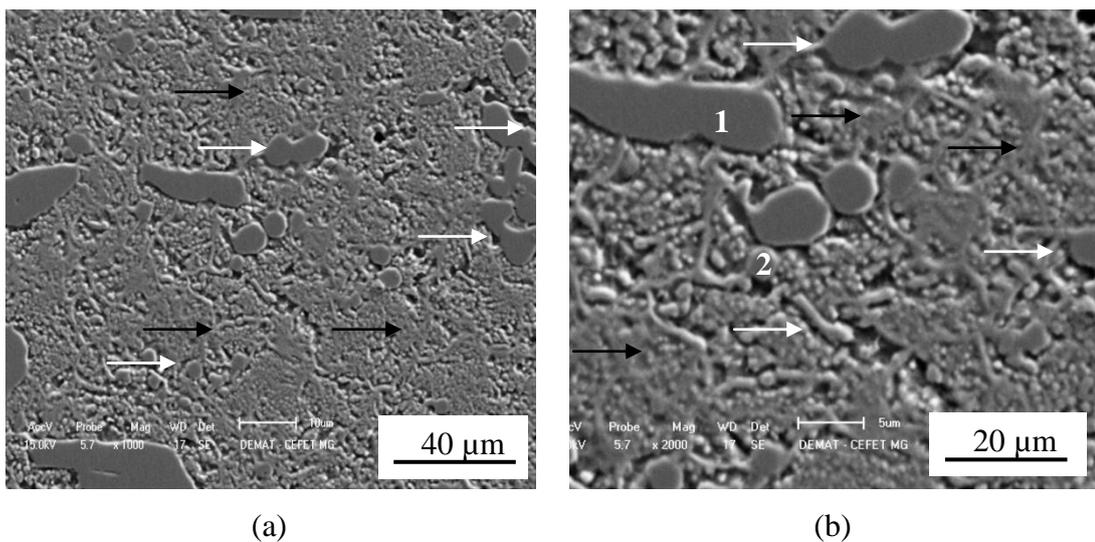
Nas figuras 19 e 20 são exibidas as imagens (MO e MEV) do aço AISI D2 austenitizado a 920°C, com um tempo de encharque de 20 minutos resfriado ao ar. Observa-se uma matriz martensítica (setas pretas) com a acentuada presença de carbonetos (setas brancas) nela dispersos.

Figura 19 - D2_Têmpera ao ar, austenitizado a 920°C durante 20 minutos.



Fonte: (Autor) – (MO) Aumentos distintos 25 μm (a) e 12,5 (b) μm.

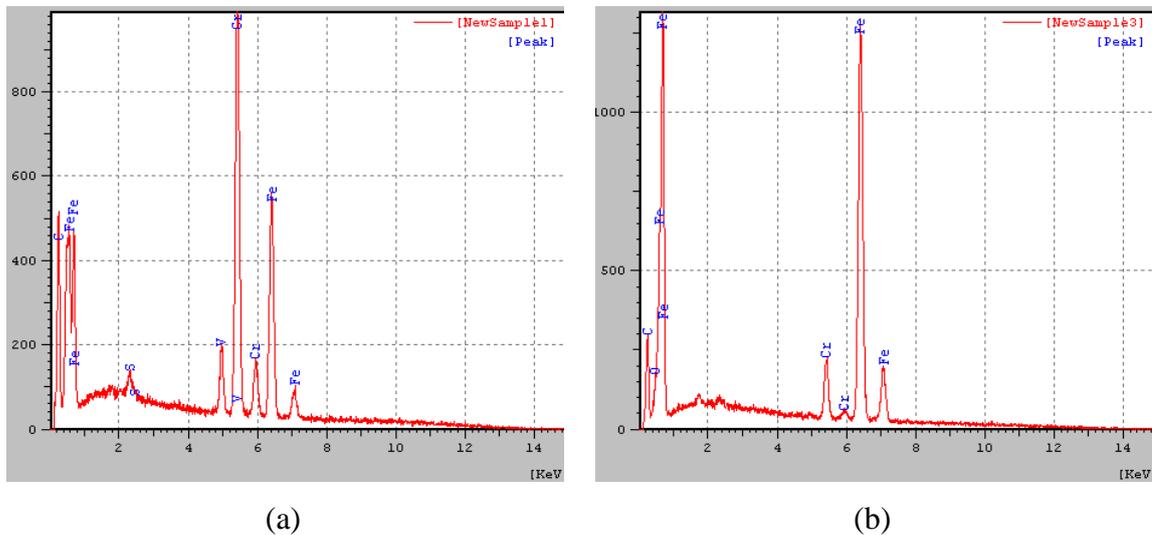
Figura 20 - D2_Têmpera ao ar, austenitizado a 920°C durante 20 minutos.



Fonte: (Autor) – (MEV) Aumento de 1000x (a) e 2000x (b).

Os números 1 e 2 na figura 20(b) indicam pontos nos quais foram realizadas microanálises químicas por EDS, cujos resultados são mostrados na figura 21. Picos dos elementos Fe, C, Cr e V indicam que essa porção do material em forma de bastonetes e glóbulos, de acordo com os resultados da literatura, são carbonetos primários dos tipos M_2C e MC (BORRO, 2001), respectivamente. Na figura 21(a), correspondente a região 1, os carbonetos predominantes são formados pelos elementos cromo e vanádio. Já na região 2, figura 21(b), os carbonetos predominantes são de cromo.

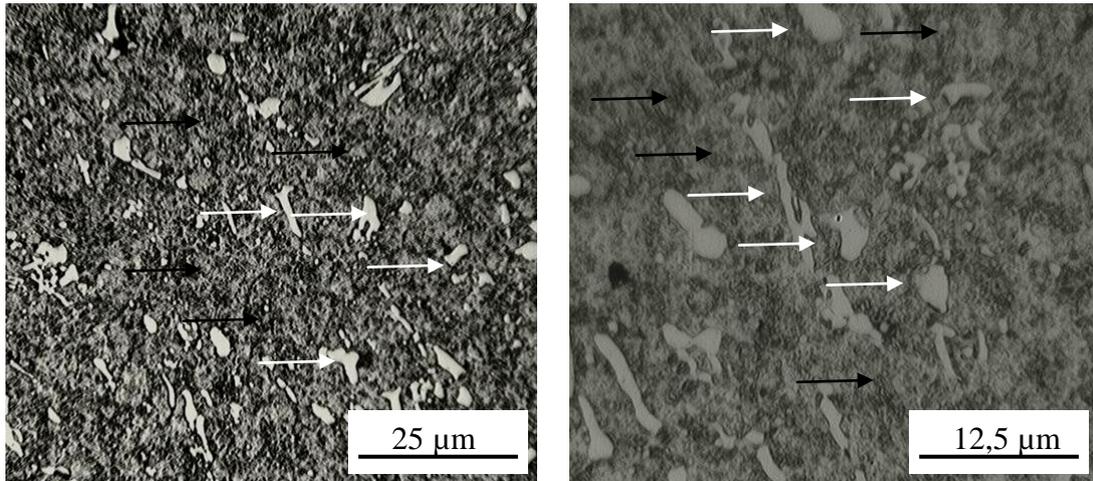
Figura 21 - Análise química



Fonte: (Autor) - correspondente a região 1(a) e 2(b) da figura 20 b

As figuras 22 e 23 apresentam o AISI D2 nas mesmas condições da amostra das figuras 21 e 22, porém com um tempo de encharque de 60 minutos. Resultados análogos são observados, caracterizados pela matriz martensítica (setas pretas) com a presença ainda acentuada de carbonetos (setas brancas). Os números indicados na figura 23b correspondem à microanálise química qualitativa feita nessas regiões, cujos resultados são mostrados na figura 24. Verifica-se que na região 1 há a predominância do Cr e V, indicando que os carbonetos dessa região são constituídos por esses elementos. Na região 2, o carboneto predominante é o de Cr, uma vez que esse elemento tem presença acentuada na região. Comparando as imagens mostradas nas figuras 19 e 20 com as fotomicrografias das figuras 22 e 23 observa-se que não são verificadas diferenças significativas com a alteração dos tempos de encharque.

Figura 22- D2_ Têmpera ao ar, austenitizado a 920°C durante 60 minutos

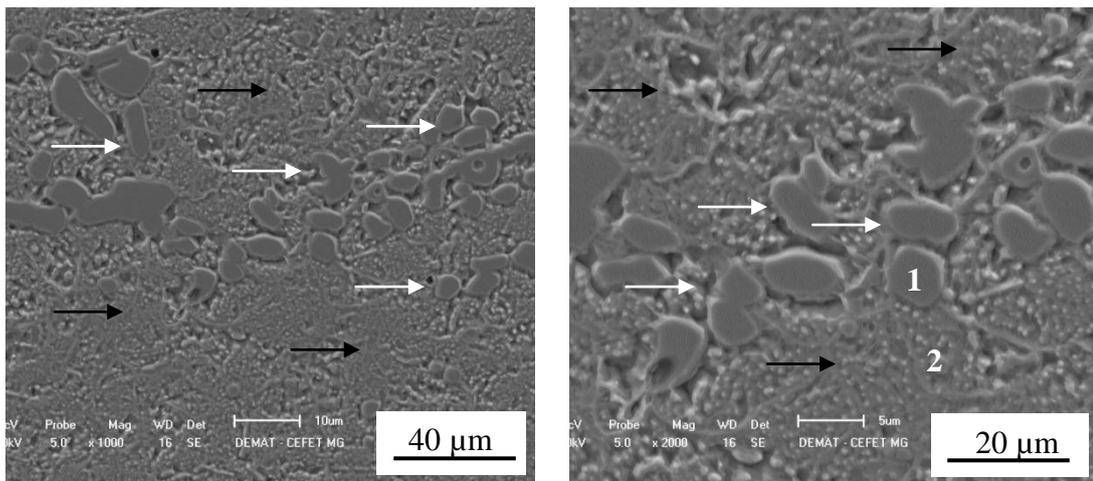


(a)

(b)

Fonte: (Autor) – (MO) Aumentos distintos 25 µm (a) e 12,5 (b) µm.

Figura 23 - D2_ Têmpera ao ar, austenitizado a 920°C durante 60 minutos.

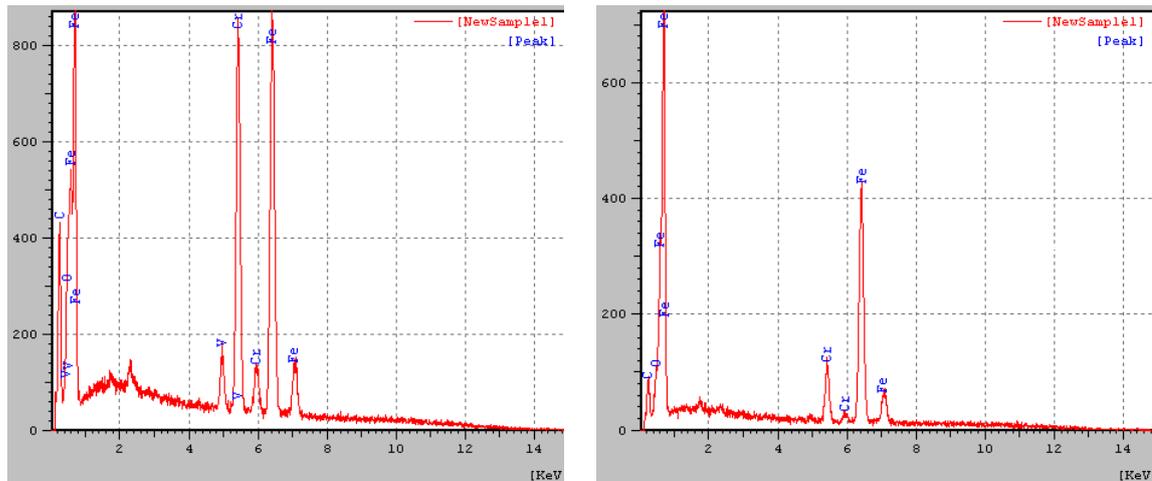


(a)

(b)

Fonte: (Autor) –(MEV) Aumento de 1000x (a) e 2000x (b).

Figura 24 - Análise química



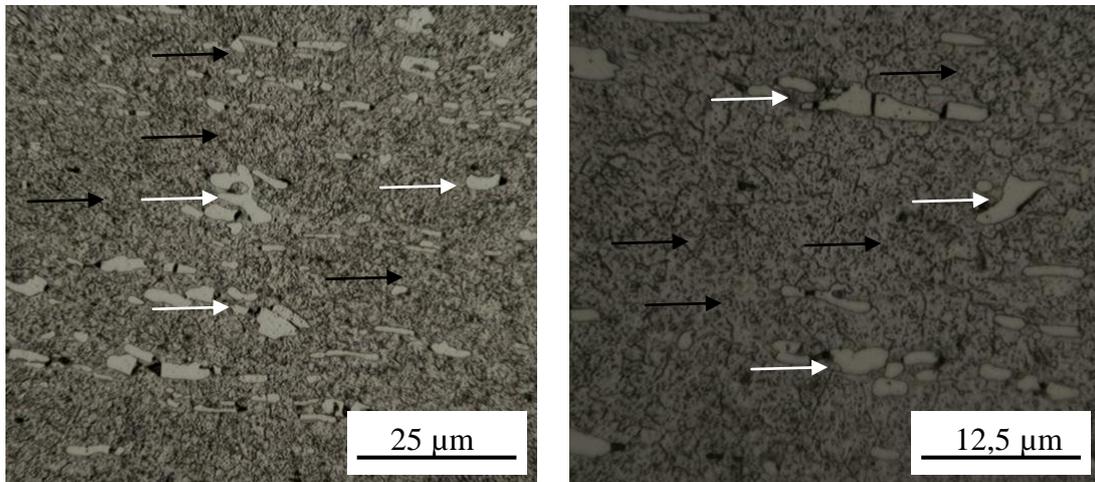
(a)

(b)

Fonte: (Autor) - correspondente a região 1(a) e 2(b) da figura 23 b

As figuras 25, 26, 27 e 28 correspondem ao aço AISI D2 austenitizado a 1020 °C e resfriado ao ar com os tempos de encharque de 20 minutos e 60 minutos. Para ambas as condições de processamento, as microestruturas desenvolvidas são qualitativamente similares às das condições anteriores: martensita e carbonetos. A quantidade de precipitados, entretanto, é menor do que aquela verificada no metal temperado com temperatura de austenitização mais baixa, confirmando o fato de que à medida que a temperatura é elevada, aumenta a susceptibilidade dos elementos de liga entrar em solução sólida, ou seja, maior é a dissolução de precipitados. Por outro lado, diferentemente das condições de tratamentos térmicos anteriores, nota-se também que com maior tempo de encharque os carbonetos apresentam maior solubilidade, novamente sendo encontrados em quantidade menor.

Figura 25 - D2_Têmpera ao ar, austenitizado a 1020°C durante 20 minutos

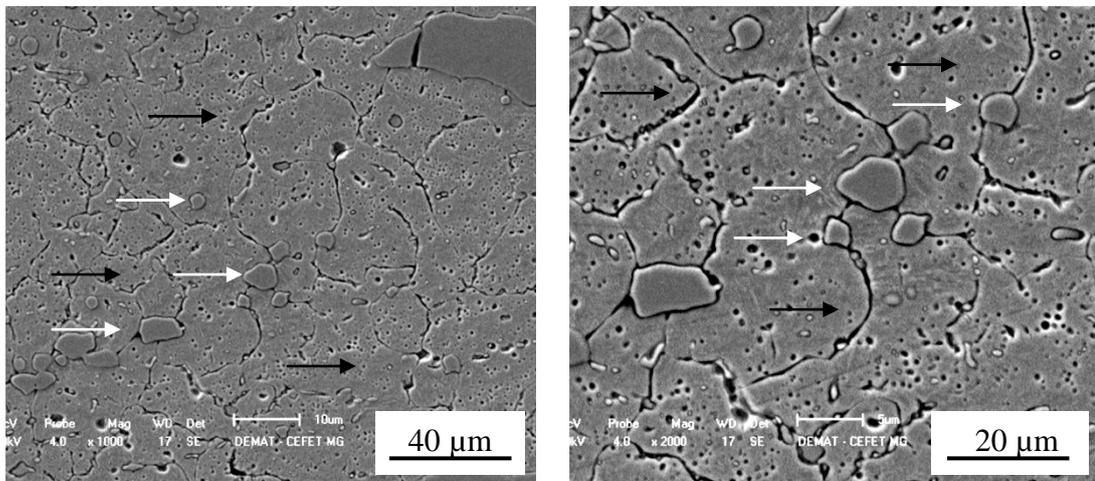


(a)

(b)

Fonte: (Autor) (MO) Aumentos distintos 25 µm (a) e 12,5 (b) µm.

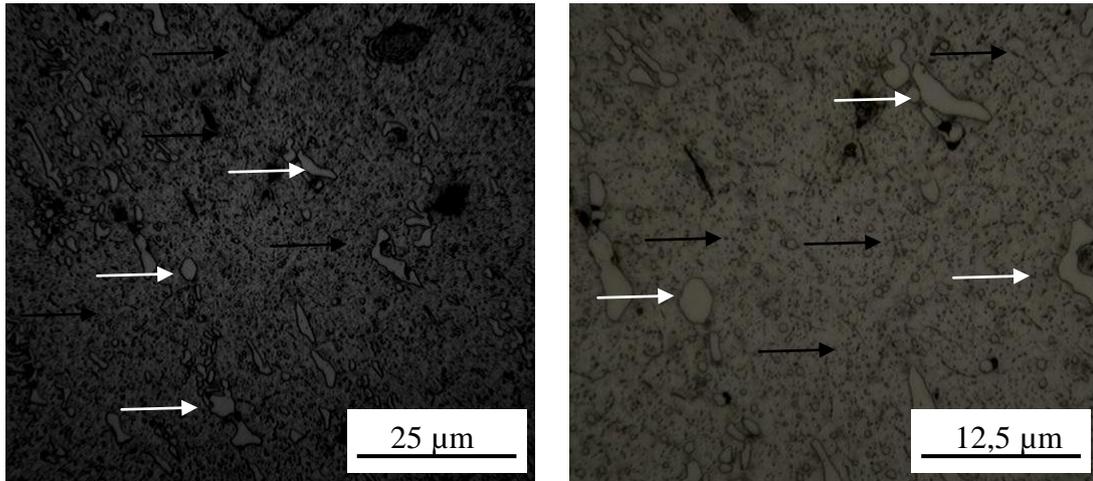
Figura 26 - D2_Têmpera ao ar, austenitizado a 1020°C durante 20 minutos



(a)

(b)

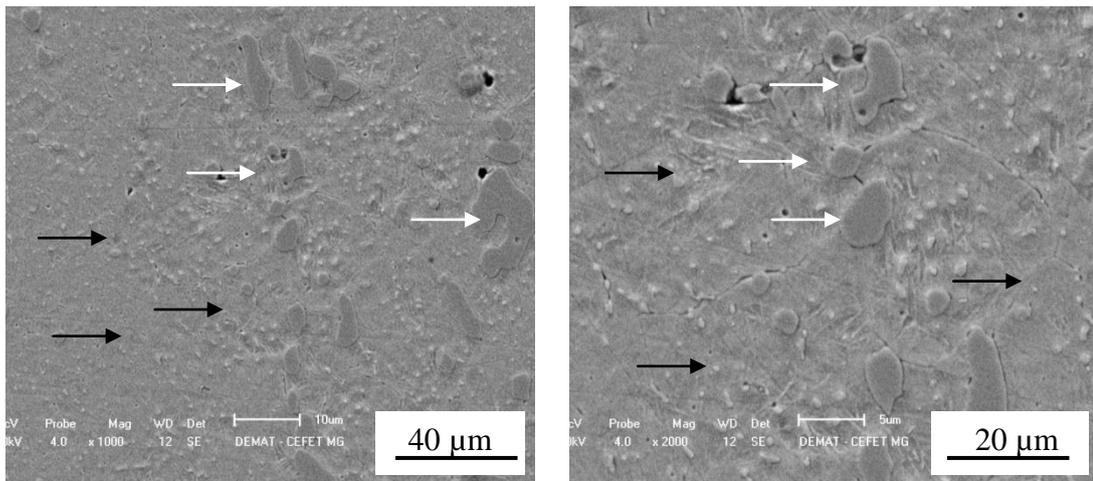
Fonte: (Autor) – (MEV) Aumento de 1000x (a) e 2000x (b).

Figura 27 - D2_Têmpera ao ar, austenitizado a 1020°C durante 60 minutos

(a)

(b)

Fonte: (Autor) – (MO) Aumentos distintos 25 µm (a) e 12,5 (b) µm.

Figura 28 - D2_Têmpera ao ar, austenitizado a 1020°C durante 60 minutos

(a)

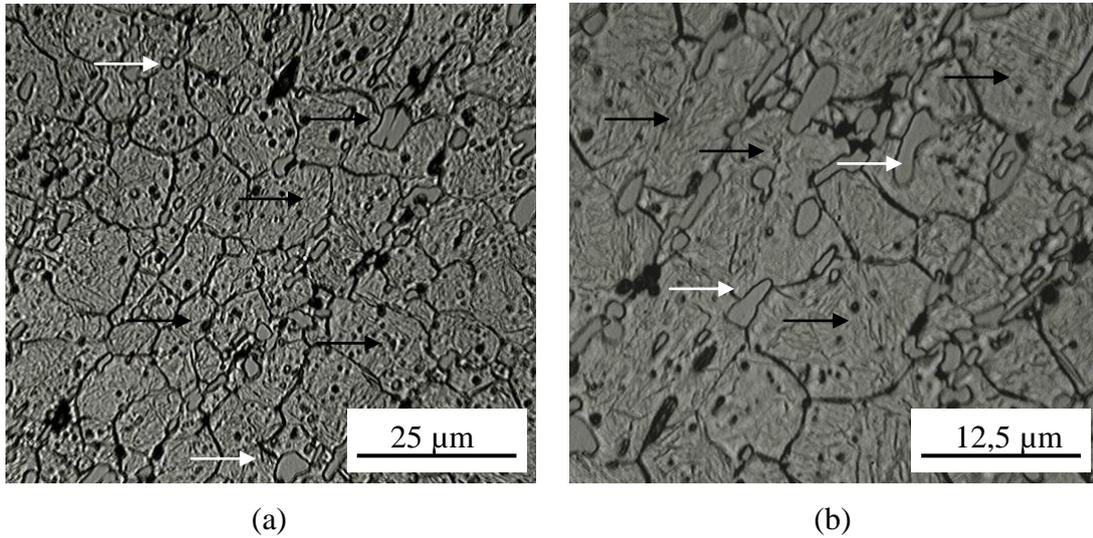
(b)

Fonte: (Autor) – (MEV) Aumento de 1000x (a) e 2000x (b).

Os aspectos microestruturais do aço ferramenta AISI D2, austenitizado a 1120 °C e temperado ao ar, com os tempos de encharque de 20 minutos e de 60 minutos são exibidos nas figuras 29 a 32. Mais uma vez é verificada a ocorrência de estrutura martensítica com carbonetos. O aumento no tempo de encharque diminui a quantidade de carbonetos assim como, mais uma vez, a elevação da temperatura de austenitização. As regiões 1 e 2, discriminadas na figura 32(b), representam análise química feita nos pontos indicados (figura

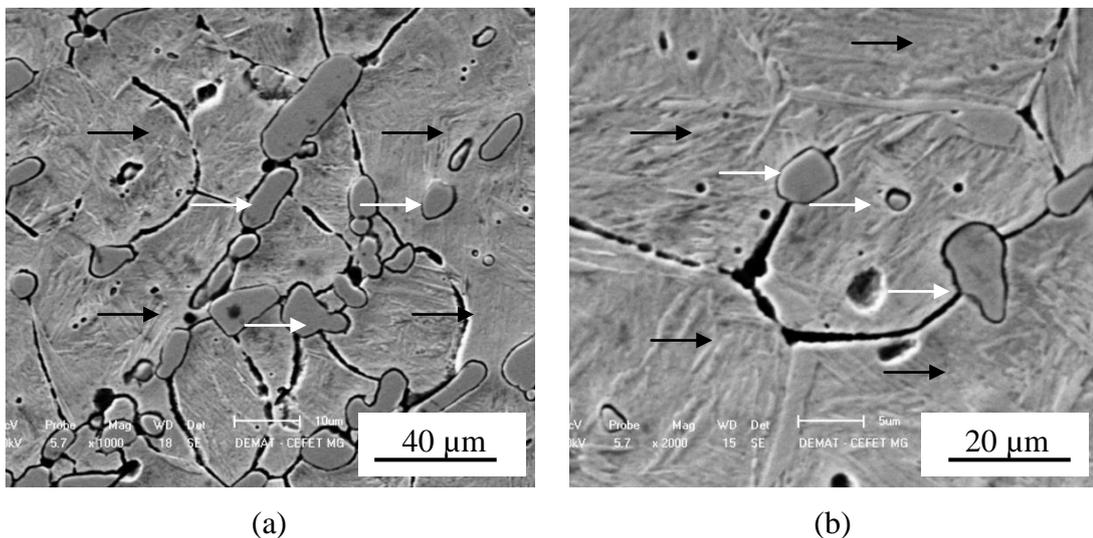
33). Na região 1 é verificada a presença do carboneto rico em Cr e V, e na região 2 verifica-se a presença dos elementos Fe e C, associados à matriz martensítica.

Figura 29 - D2_ Têmpera ao ar, austenitizado a 1120°C durante 20 minutos.



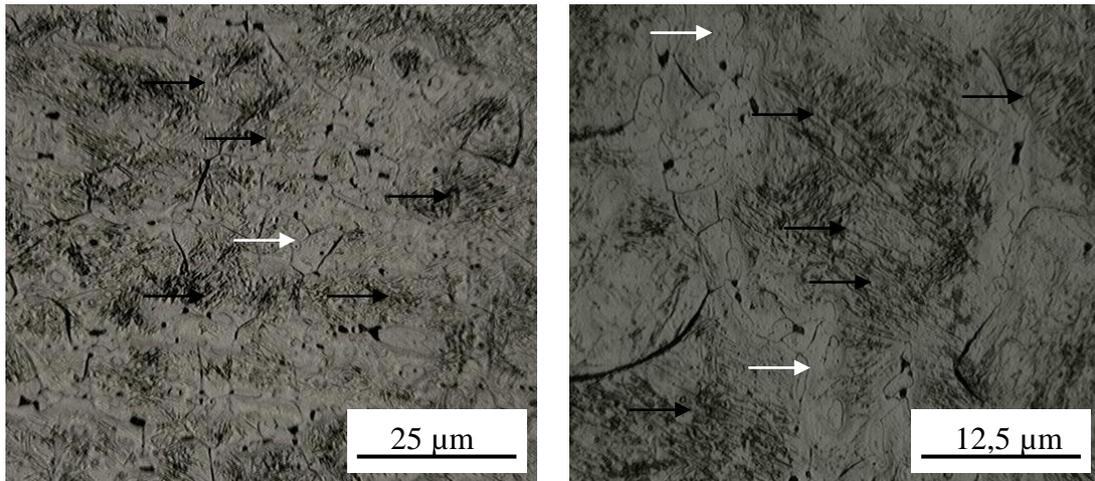
Fonte: (Autor) – (MO) Aumentos distintos 25 μm (a) e 12,5 (b) μm.

Figura 30 - D2_ Têmpera ao ar, austenitizado a 1120°C durante 20 minutos



Fonte: (Autor) – (MEV) Aumento de 1000x (a) e 2000x (b).

Figura 31 - D2_Têmpera ao ar, austenitizado a 1120°C durante 60 minutos.

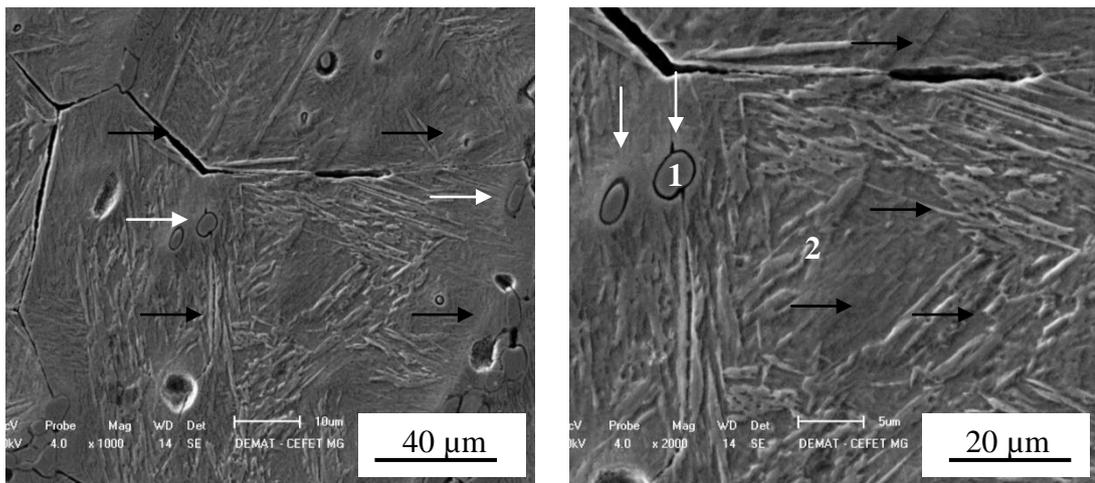


(a)

(b)

Fonte: (Autor) – (MO) Aumentos distintos 25 µm (a) e 12,5 (b) µm.

Figura 32 - D2_Têmpera ao ar, austenitizado a 1120°C durante 60 minutos

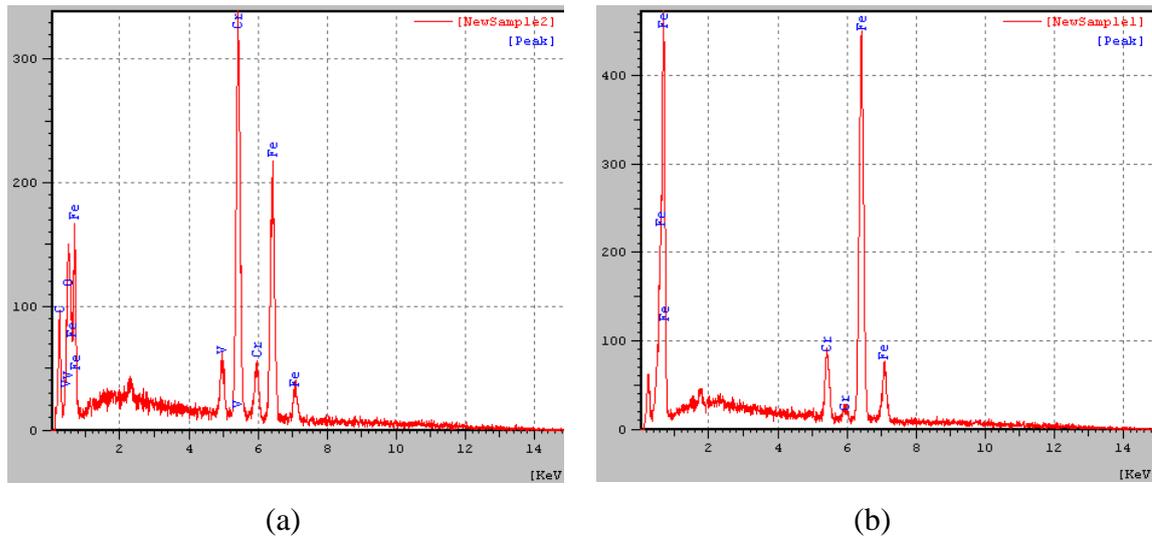


(a)

(b)

Fonte: (Autor) – (MEV) Aumento de 1000x (a) e 2000x (b).

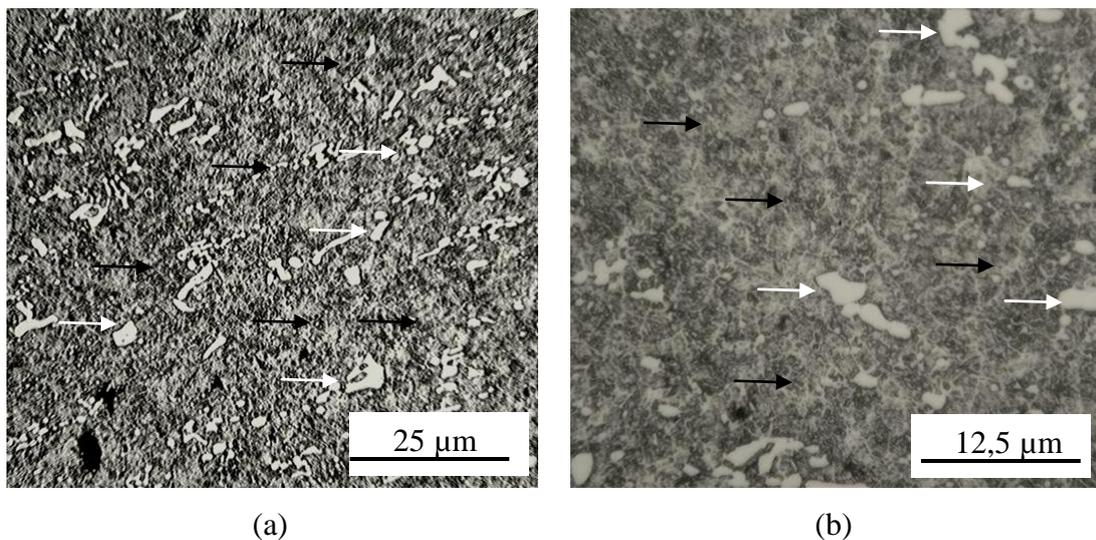
Figura 33 - Análise química



Fonte: (Autor) - Região 1(a) e 2(b) da figura 32 b

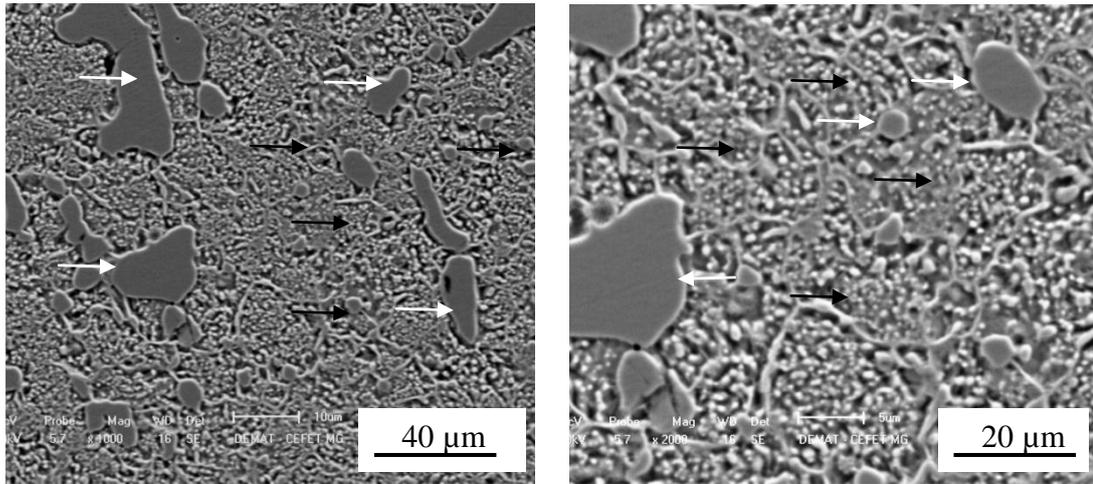
As figuras 34, 35, 36 e 37 representam as micrografias do aço AISI D2 austenitizado a 920 °C, temperado em óleo e com os tempos de encharque de 20 minutos e 60 minutos. Similarmente ao que foi verificado para a têmpera ao ar, observa-se a ocorrência de matriz martensítica (seta preta) e acentuada presença de carbonetos (seta branca), com tamanhos e morfologias diversas. Os carbonetos (seta branca) sinalizados na figura 37(a) se assemelham a uma espinha de peixe, o que pode ser relacionado aos carbonetos do tipo M_6C e M_7C_3 (BORRO, 2001).

Figura 34 - D2_ Têmpera em óleo, austenitizado a 920°C durante 20 minutos.



Fonte: (Autor) – (MO) Aumentos distintos 25 µm (a) e 12,5 (b) µm.

Figura 35 - D2_Têmpera em óleo, austenitizado a 920°C durante 20 minutos

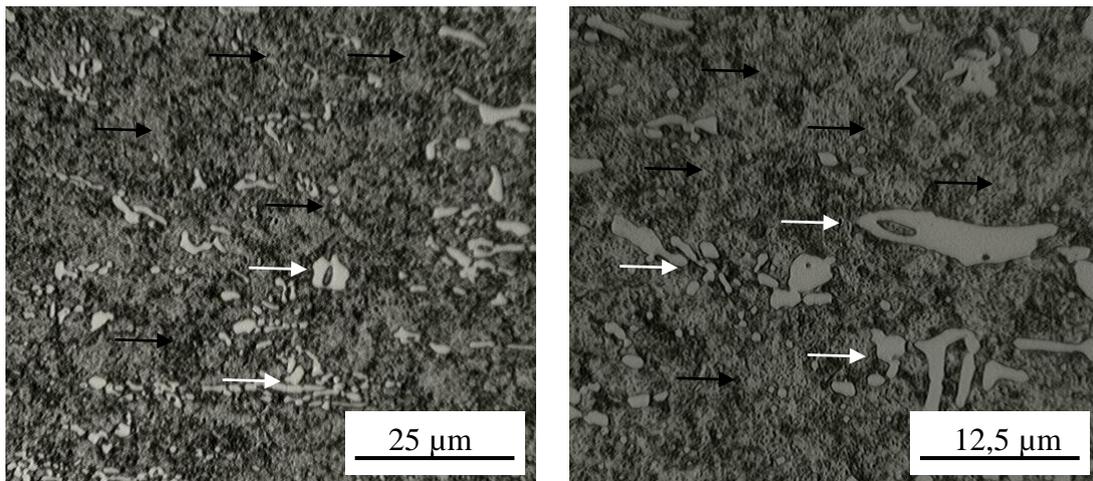


(a)

(b)

Fonte: (Autor) – (MEV) Aumento de 1000x (a) e 2000x (b).

Figura 36 - D2_Têmpera em óleo, austenitizado a 920°C durante 60 minutos

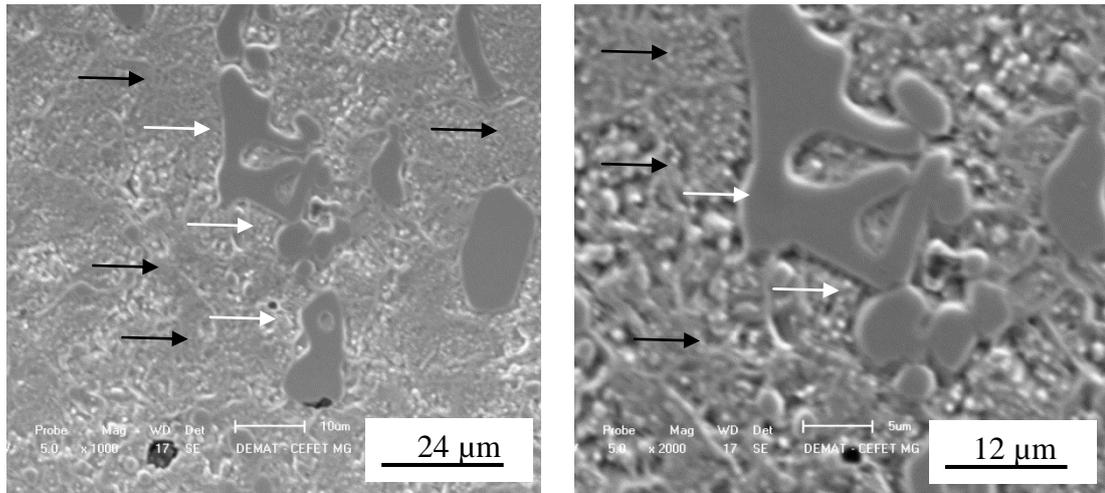


(a)

(b)

Fonte: (Autor) – (MO) Aumentos distintos 25 µm (a) e 12,5 (b) µm.

Figura 37 - D2_ Têmpera em óleo, austenitizado a 920°C durante 60 minutos



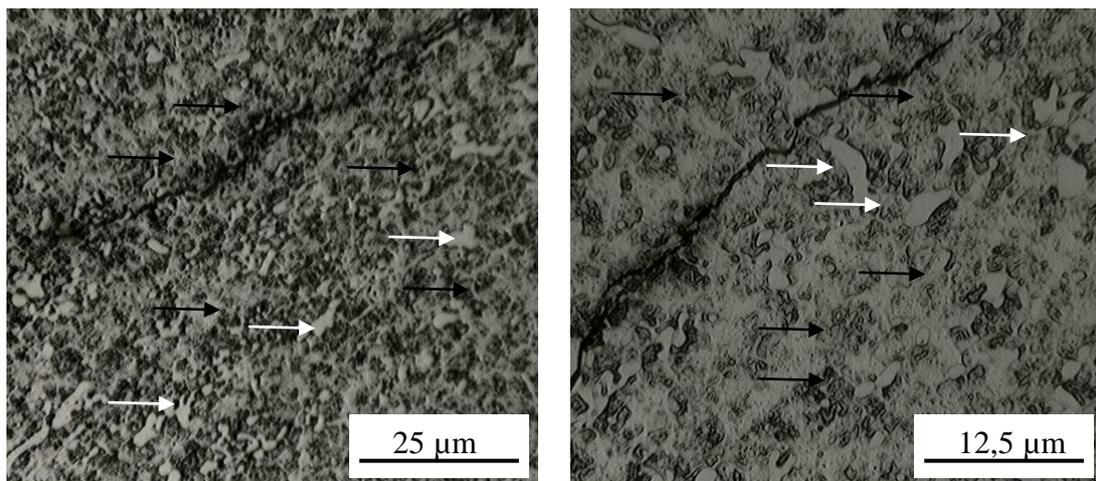
(a)

(b)

Fonte: (Autor) – (MEV) Aumento de 1000x (a) e 2000x (b).

As figuras 38, 39, 40 e 41, exibem micrografias do aço AISI D2, austenitizados a 1020°C, temperados ao óleo, com tempos de encharque de 20 minutos e de 60 minutos. Novamente a quantidade de carbonetos (setas brancas) reduziu quando avaliada a partir das regiões observadas ao microscópio.

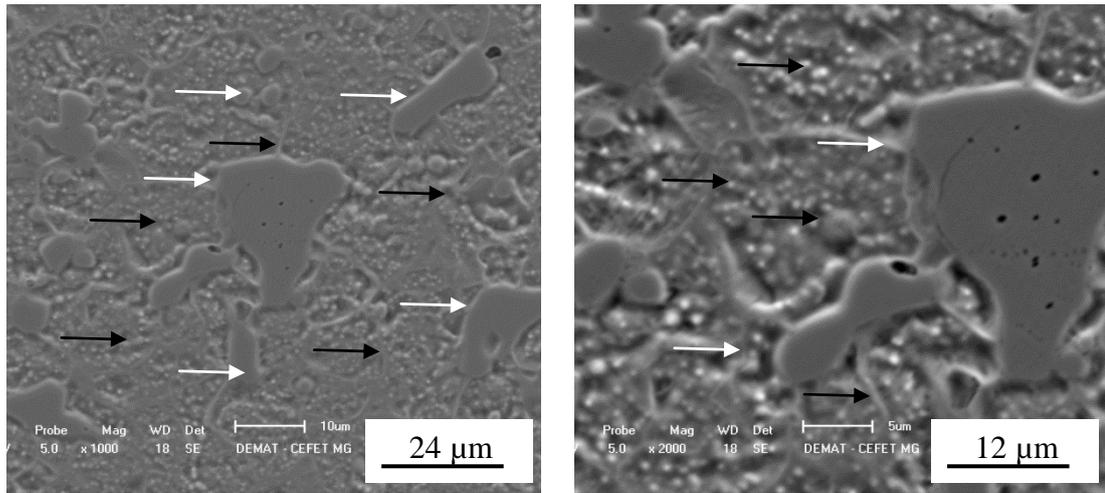
Figura 38 - D2_ Têmpera em óleo, austenitizado a 1020°C durante 20 minutos



(a)

(b)

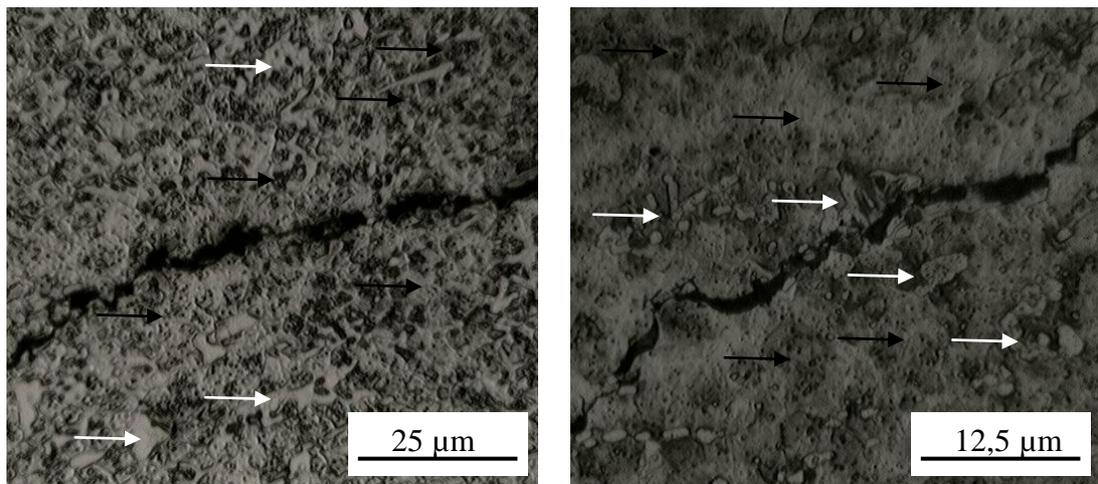
Fonte: (Autor) – (MO) Aumentos distintos 25 µm (a) e 12,5 (b) µm.

Figura 39 - D2_Têmpera em óleo, austenitizado a 1020°C durante 20 minutos

(a)

(b)

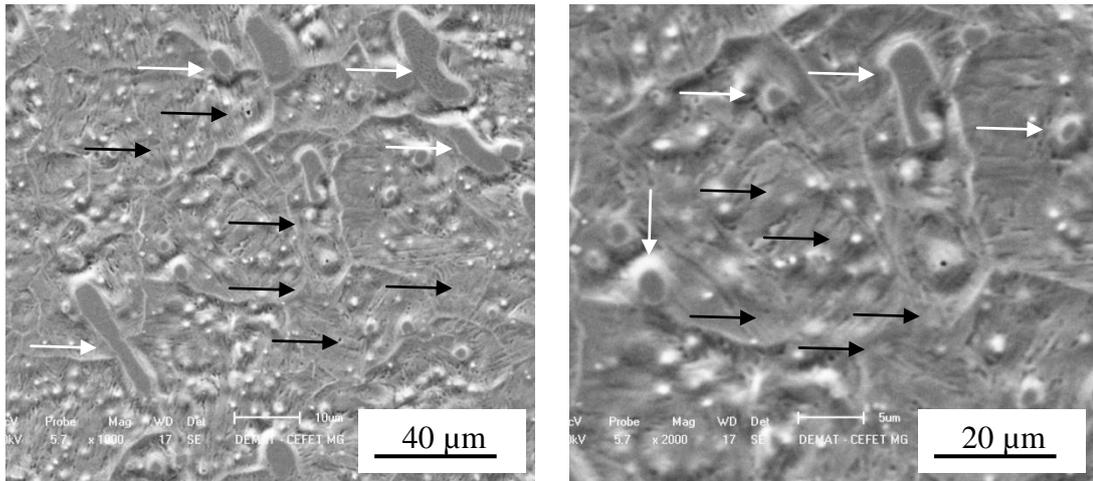
Fonte: (Autor) – (MEV) Aumento de 1000x (a) e 2000x (b).

Figura 40 - D2_Têmpera em óleo, austenitizado a 1020°C durante 60 minutos.

(a)

(b)

Fonte: (Autor) – (MO) Aumentos distintos 25 µm (a) e 12,5 (b) µm.

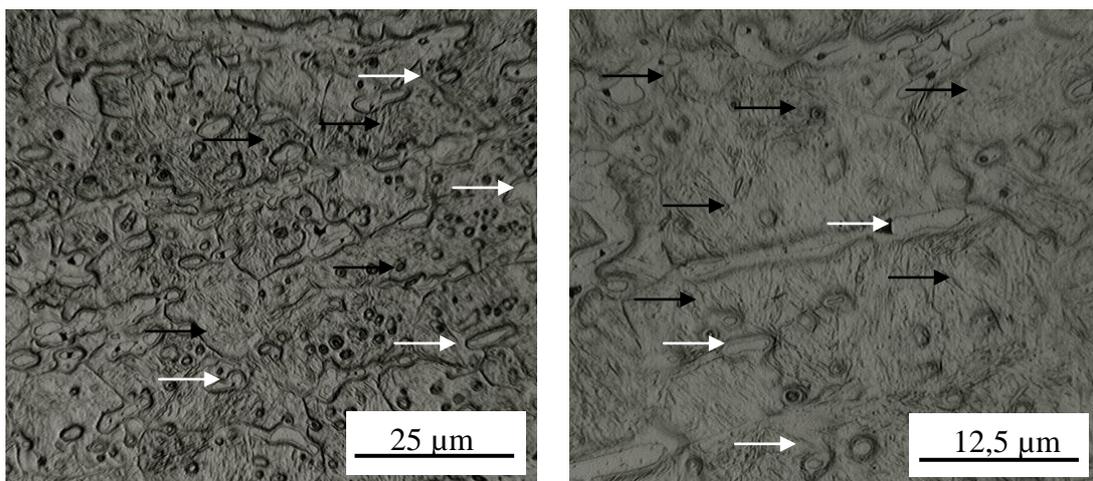
Figura 41 - D2_Têmpera em óleo, austenitizado a 1020°C durante 60 minutos

(a)

(b)

Fonte: (Autor) – (MEV) Aumento de 1000x (a) e 2000x (b).

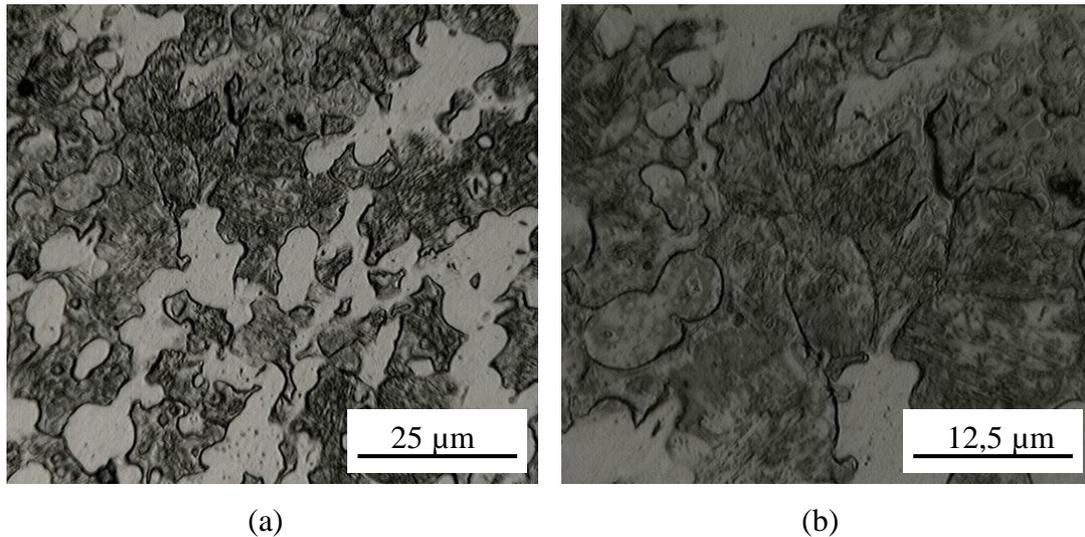
As figuras 42 e 43 exibem a microestrutura do aço AISI 2, austenitizado a 1120 °C, resfriado em óleo com tempos de encharque de 20 e 60 minutos respectivamente. Para a situação na qual o tempo é de 20 minutos, verifica-se uma maior redução da quantidade de carbonetos (seta branca) e uma maior porção da matriz martensítica (seta preta), em relação às condições anteriores. Para o tempo de 60 minutos, entretanto, os resultados não são conclusivos.

Figura 42 - D2_Têmpera em óleo, austenitizado a 1120°C durante 20 minutos

(a)

(b)

Fonte: (Autor) – (MO) Aumentos distintos 25 µm (a) e 12,5 (b) µm.

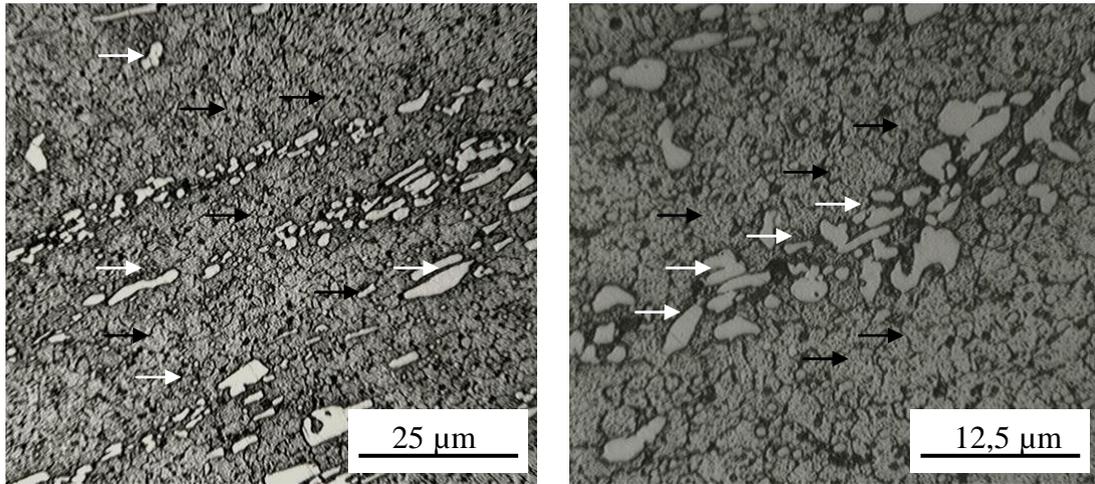
Figura 43 - D2_Têmpera em óleo, austenitizado a 1120°C durante 60 minutos.

Fonte: (Autor) – (MO) Aumentos distintos 25 µm (a) e 12,5 (b) µm.

5.2.2.2 Tratamentos térmicos D6

As figuras 44 a 48 estão associadas o aço AISI D6, austenitizado a 970 °C, resfriado ao ar, com tempos de encharque de 20 minutos e, as figuras 44 e 45, com tempo de 60 minutos. Nas figuras 47 e 48, é observada uma matriz martensítica (seta preta) com uma presença pronunciada de carbonetos nela dispersos (seta branca). Os carbonetos indicados na figura 44(b) apresentam uma morfologia em espinha de peixe, o que pode ser associado aos carbonetos do tipo M_6C e M_7C_3 (BORRO, 2001). Os números apontados na figura 45 a são equivalentes à análises químicas qualitativas feitas na região. As duas regiões são ricas em Cr indicando que os carbonetos dessas regiões são formados por esse elemento.

Figura 44 - D6_ Têmpera ao ar, austenitizado a 970°C durante 20 minutos.

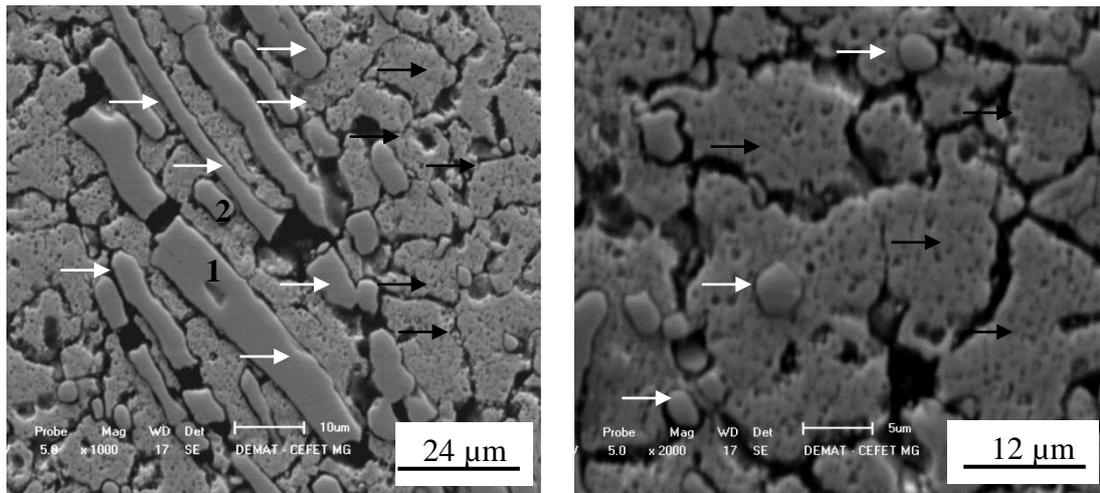


(a)

(b)

Fonte: (Autor) – (MO) Aumentos distintos 25 µm (a) e 12,5 (b) µm.

Figura 45 - D6_ Têmpera ao ar, austenitizado a 970°C durante 20 minutos

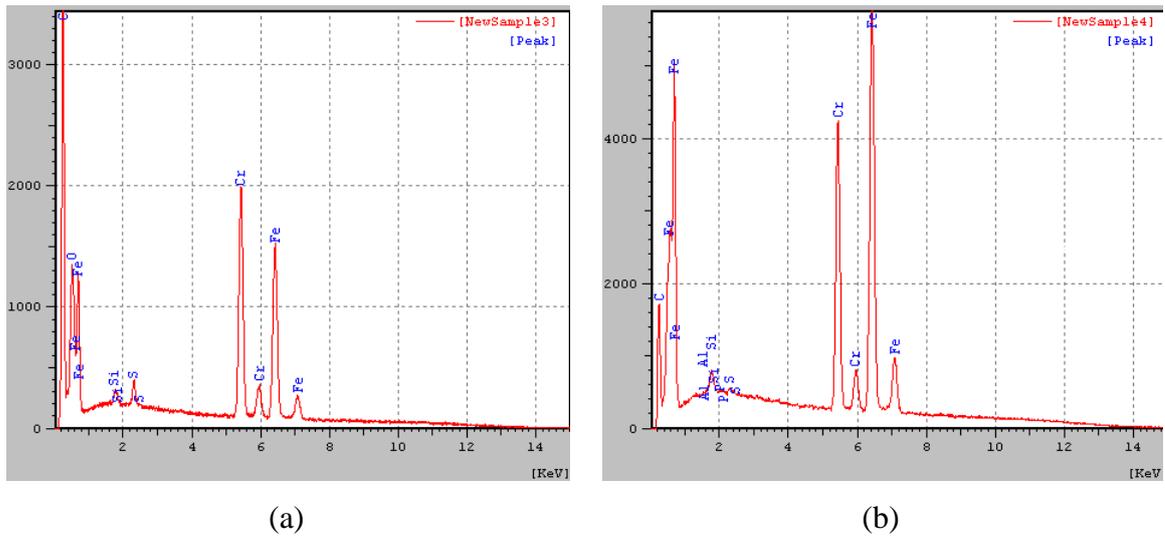


(a)

(b)

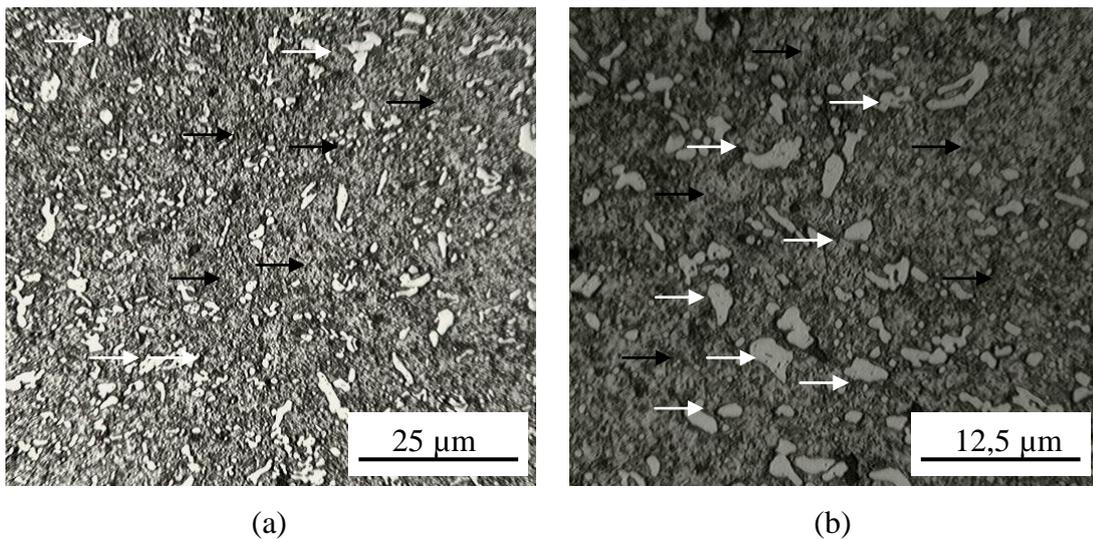
Fonte: (Autor) – (MEV) Aumento de 1000x (a) e 2000x (b).

Figura 46 - Análise química

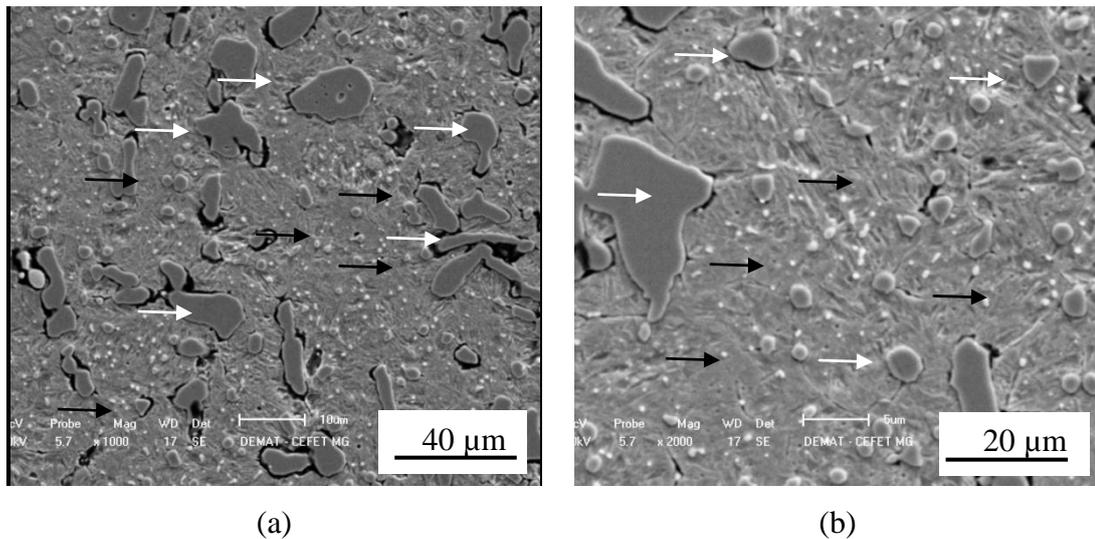


Fonte: (Autor) - Região 1(a) e 2(b) da figura 45 a

Figura 47 - D6_ Têmpera ao ar, austenitizado a 970°C durante 60 minutos.

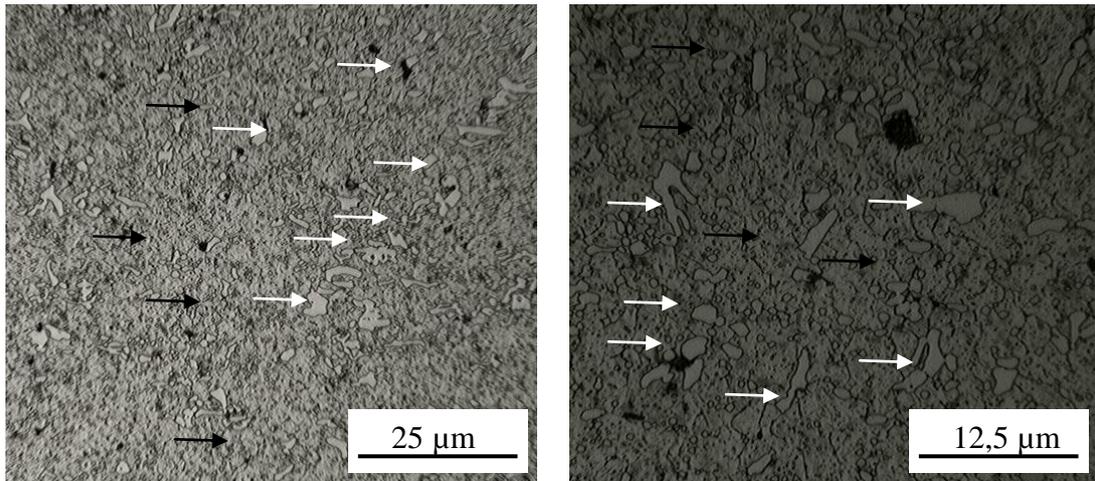


Fonte: (Autor) – (MO) Aumentos distintos 25 µm (a) e 12,5 (b) µm.

Figura 48 - D6_Têmpera ao ar, austenitizado a 970°C durante 60 minutos

Fonte: (Autor) – (MEV) Aumento de 1000x (a) e 2000x (b).

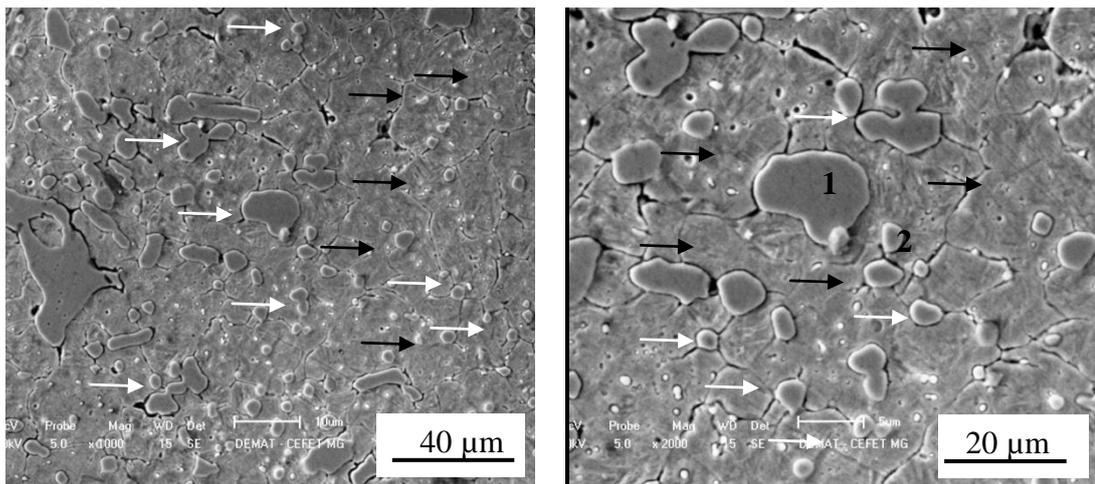
As figuras 49 a 53 correspondem ao aço AISI D6, austenitizado a 1020 °C e temperado ao ar, com tempos de encharque de 20 minutos, figuras 49 e 50, e 60 minutos nas figuras 52 e 53. Para ambas as condições de processamento as microestruturas observadas são similares a da condição anterior, porém com uma quantidade menor de carbonetos (seta branca) dispersos na matriz martensítica. Nota-se que aumentando o tempo de encharque a solubilização dos carbonetos é maior, reduzindo a quantidade dos mesmos na matriz. Os carbonetos identificados na figura 50 a possuem a forma de glóbulos o que pode ser associado aos carbonetos do tipo MC(BORRO, 2001). Os números sinalizados na figura 50 b equivalem a locais onde foram feitas microanálises químicas qualitativas, cujo resultado é exibido na figura 51. Verifica-se que na região 1 há a predominância do W e Cr, indicando que os carbonetos dessa região são constituídos por esses elementos. Na região 2 o carboneto encontrado é o de Cr, uma vez que esse é o elemento preponderante no local.

Figura 49- D6_ Têmpera ao ar, austenitizado a 1020°C durante 20 minutos.

(a)

(b)

Fonte: (Autor) – (MO) Aumentos distintos 25 µm (a) e 12,5 (b) µm.

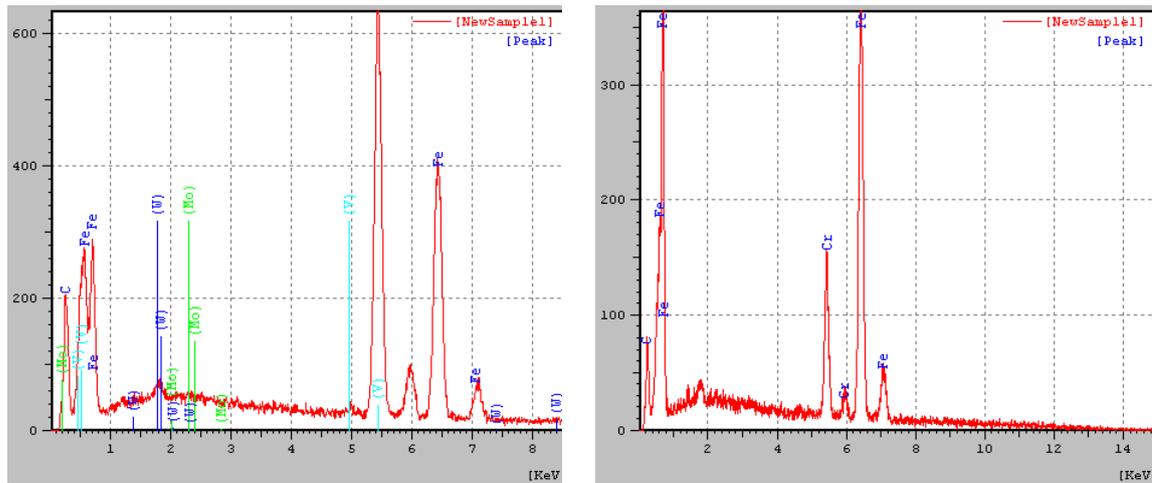
Figura 50 - D6_ Têmpera ao ar, austenitizado a 1020°C durante 20 minutos.

(a)

(b)

Fonte: (Autor) – (MEV) Aumento de 1000x (a) e 2000x (b).

Figura 51 - Análise química

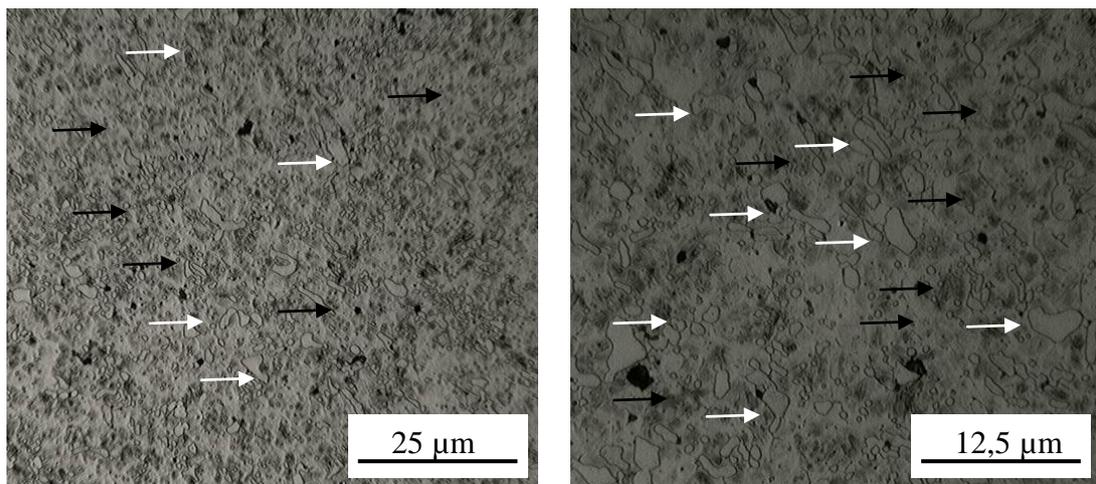


(a)

(b)

Fonte: (Autor) - Região 1(a) e 2(b) da figura 50 b

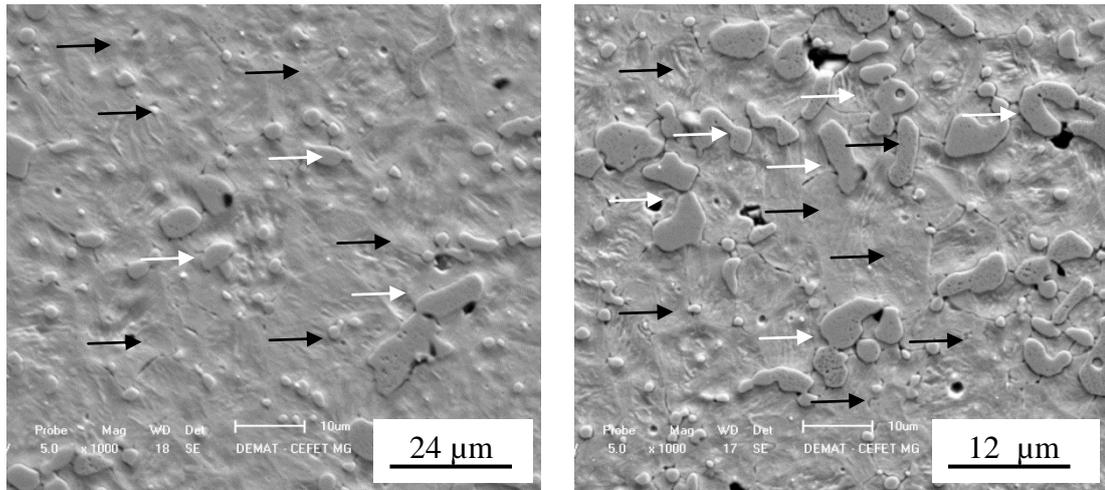
Figura 52 - D6_Têmpera ao ar, austenitizado a 1020°C durante 60 minutos.



(a)

(b)

Fonte: (Autor) – (MO) Aumentos distintos 25 μm (a) e 12,5 (b) μm.

Figura 53 - D6_Têmpera ao ar, austenitizado a 1020°C durante 60 minutos,

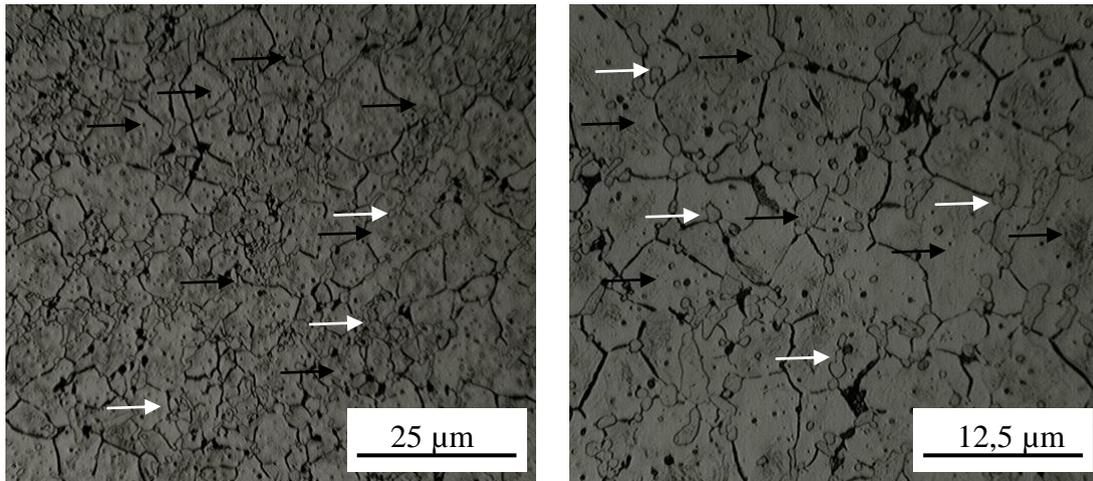
(a)

(b)

Fonte: (Autor) – (MEV) Aumento de 1000x (a) e 2000x (b).

Os aspectos microestruturais do aço AISI D6, austenitizado a 1120 °C e temperado ao ar, com os tempos de encharque de 20 minutos e de 60 minutos são exibidos nas figuras 54 a 57. Novamente é verificada a presença da estrutura martensítica com carbonetos. O aumento do tempo de encharque e temperatura de austenitização favorece a solubilização dos elementos de liga, levando a redução da quantidade de carbonetos formados. Na figura 55 pontos de corrosão por pites podem ser observados, isso é explicado devido ao elevado tempo de ataque químico em razão da não utilização de um reagente mais concentrado (nital 10%). A escolha do reagente nital 5% foi em função da falta da capela necessária para o manuseio correto do reagente.

Figura 54 - D6_Têmpera ao ar, austenitizado a 1120°C durante 20 minutos.

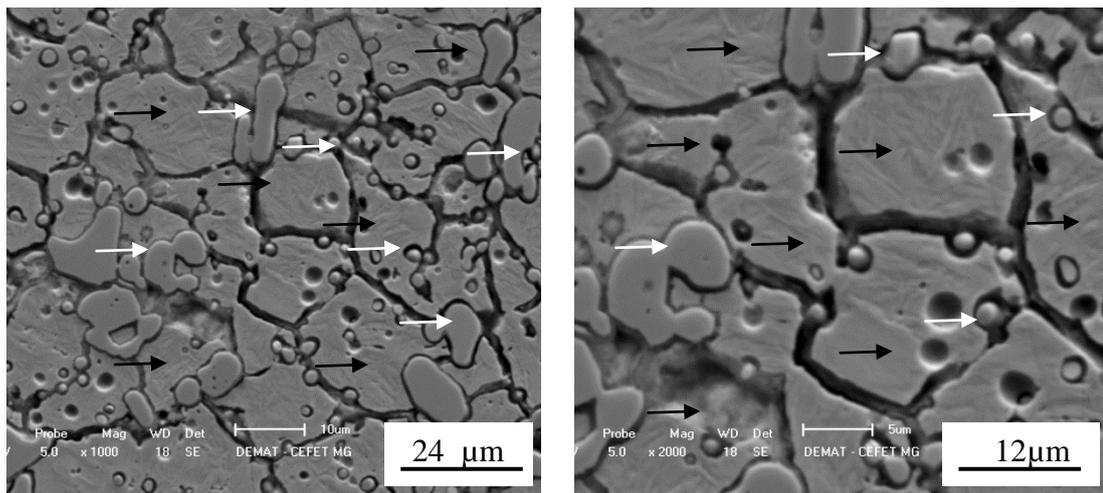


(a)

(b)

Fonte : (Autor) – (MO) Aumentos distintos 25 μm (a) e 12,5 (b) μm.

Figura 55 - D6_Têmpera ao ar, austenitizado a 1120°C durante 20 minutos.

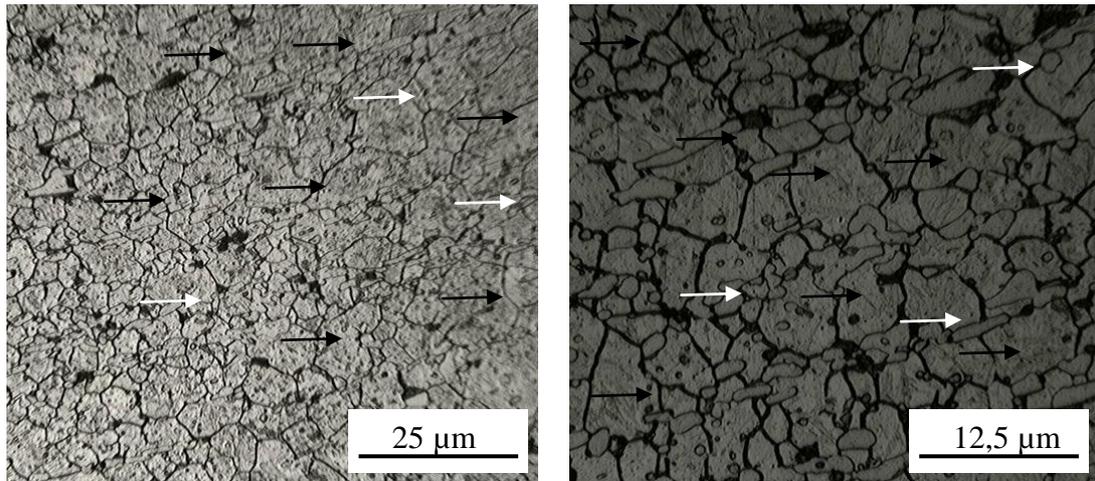


(a)

(b)

Fonte: (Autor) – (MEV) Aumento de 1000x (a) e 2000x (b).

Figura 56 - D6_Têmpera ao ar, austenitizado a 1120°C durante 60 minutos.

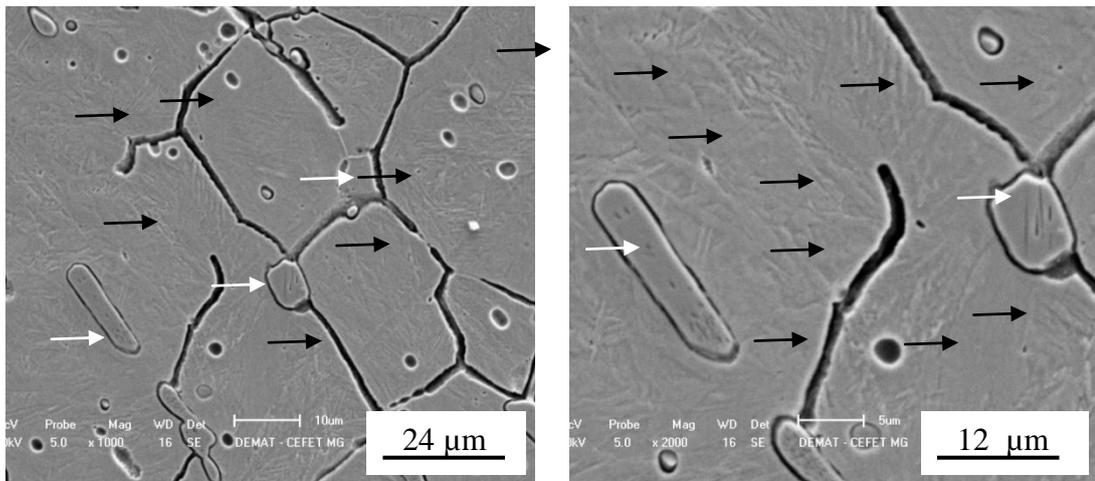


(a)

(b)

Fonte: (Autor) – (MO) Aumentos distintos 25 µm (a) e 12,5 (b) µm.

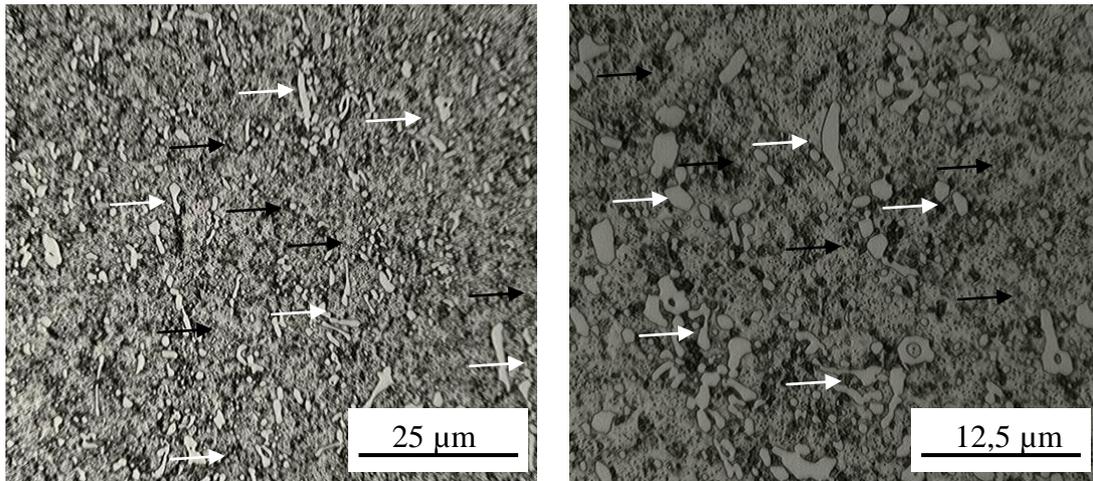
Figura 57 - D6_Têmpera ao ar, austenitizado a 1120°C durante 60 minutos.



(a)

(b)

Fonte: (Autor) – (MEV) Aumento de 1000x (a) e 2000x (b).

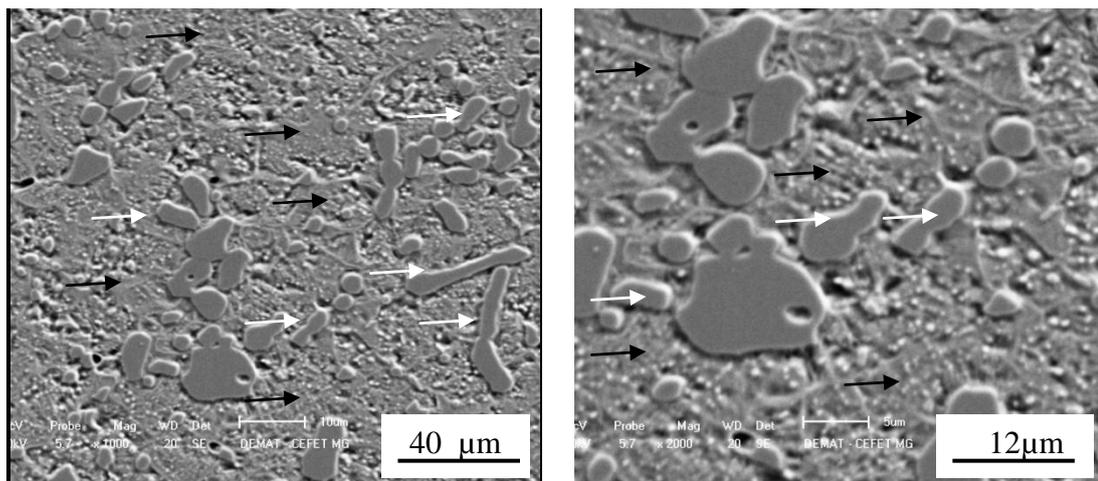
Figura 58 - D6_ Têmpera em óleo, austenitizado a 970°C durante 20 minutos.

(a)

(b)

Fonte: (Autor) – (MO) Aumentos distintos 25 µm (a) e 12,5 (b) µm.

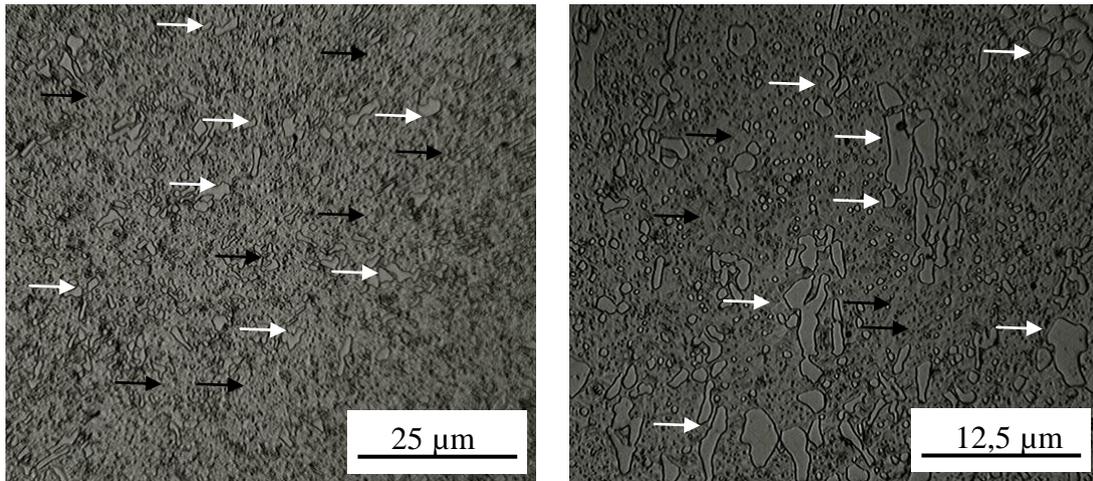
As figuras 58, 59 e 60 representam as micrografias do aço AISI D6, austenitizado a 970 °C, temperado em óleo e com tempos de encharque de 20 minutos, figuras 58 e 59, e 60 minutos, figura 60. Semelhantemente ao que foi observado para a têmpera ao ar nota-se a presença de uma pronunciada quantidade de carbonetos (seta branca) dispersos na matriz martensítica (seta preta). Os carbonetos indicados na figura 59 apresentam forma de bastonetes sendo associados aos carbonetos do tipo M_2C (BORRO,2001).

Figura 59 - D6_ Têmpera em óleo, austenitizado a 970°C durante 20 minutos.

(a)

(b)

Fonte: (Autor) – (MEV) Aumento de 1000x (a) e 2000x (b).

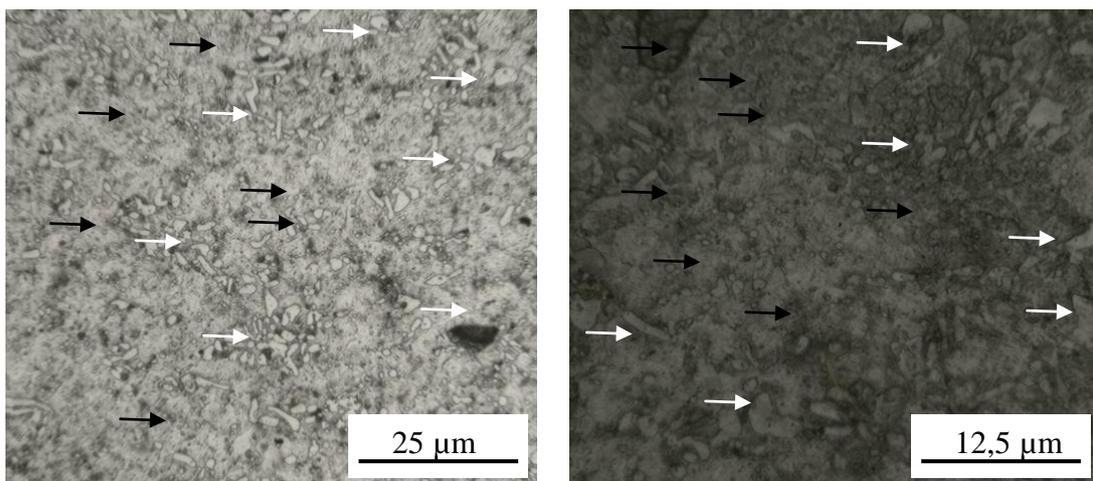
Figura 60 - Têmpera em óleo, austenitizado a 970°C durante 60 minutos.

(a)

(b)

Fonte: (Autor)- (MO) Aumentos distintos 25 µm (a) e 12,5 (b) µm.

As figuras 61 a 65 correspondem ao aço AISI D6 austenitizados a 1020°C, temperados em óleo, com tempos de encharque de 20 minutos, figuras 61 e 62, e de 60 minutos, figuras 63 e 64. Similarmente ao verificado a quantidade de carbonetos (setas brancas) reduziu. As regiões identificadas na figura 64 (a) representam uma análise química feita nesses pontos discriminados (figura 65). Nas duas regiões o Cr é predominante indicando que os carbonetos presentes no local são formados por esse elemento.

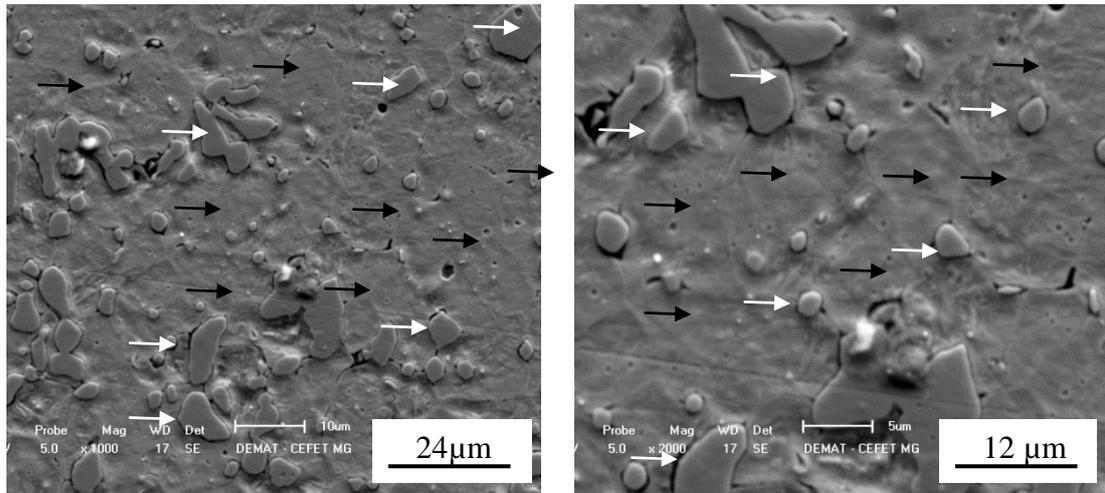
Figura 61 - D6_Têmpera em óleo, austenitizado a 1020°C durante 20 minutos.

(a)

(b)

Fonte: (Autor) – (MO) Aumentos distintos 25 µm (a) e 12,5 (b) µm.

Figura 62 - D6_Têmpera em óleo, austenitizado a 1020°C durante 20 minutos.

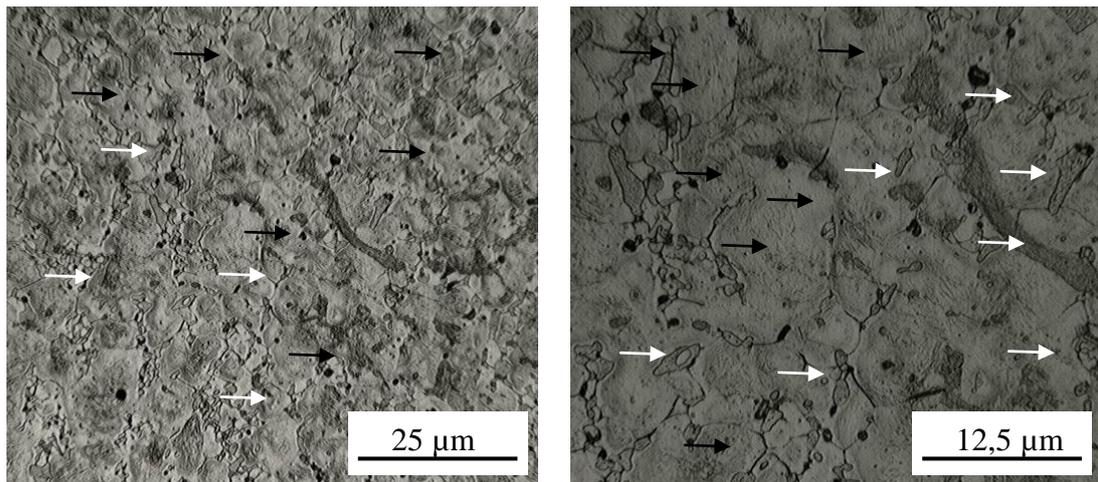


(a)

(b)

Fonte: (Autor) – (MEV) Aumento de 1000x (a) e 2000x (b).

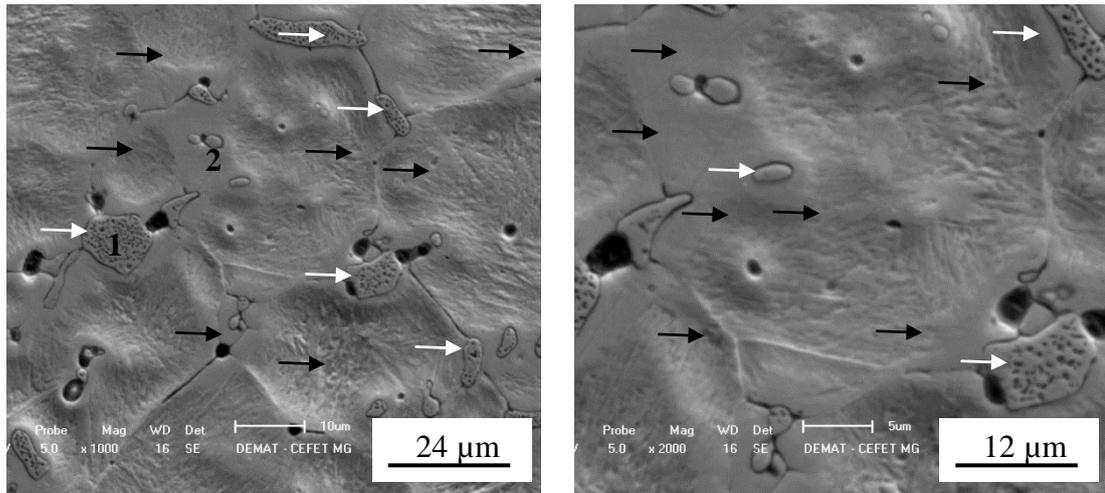
Figura 63 - D6_Têmpera em óleo, austenitizado a 1020°C durante 60 minutos



(a)

(b)

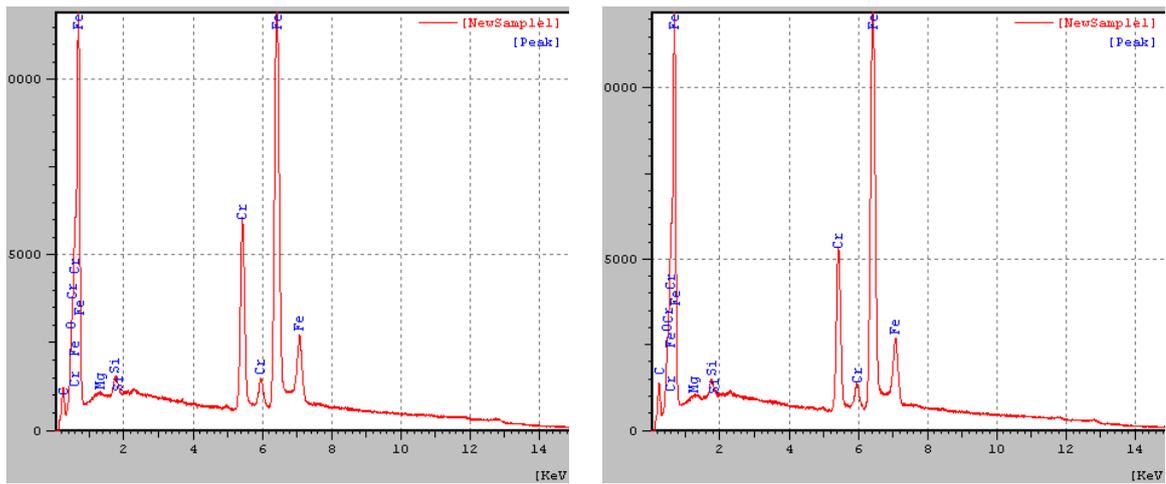
Fonte: (Autor) – (MO) Aumentos distintos 25 µm (a) e 12,5 (b) µm.

Figura 64 - D6_Têmpera em óleo, austenitizado a 1020°C durante 60 minutos

(a)

(b)

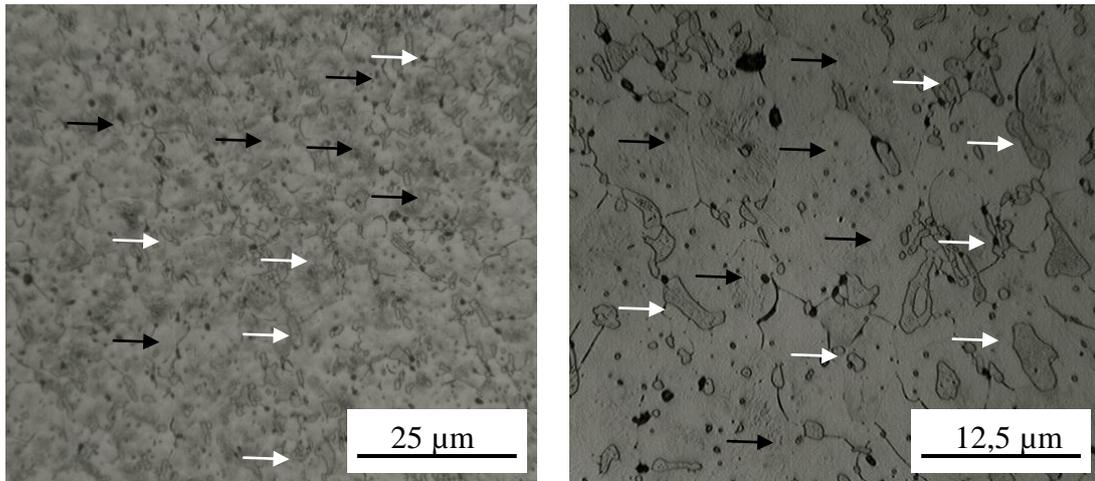
Fonte: (autor) – (MEV) Aumento de 1000x (a) e 2000x (b).

Figura 65 - Análise química

(a)

(b)

Fonte: (Autor) - região 1(a) e 2(b) da figura 64 a

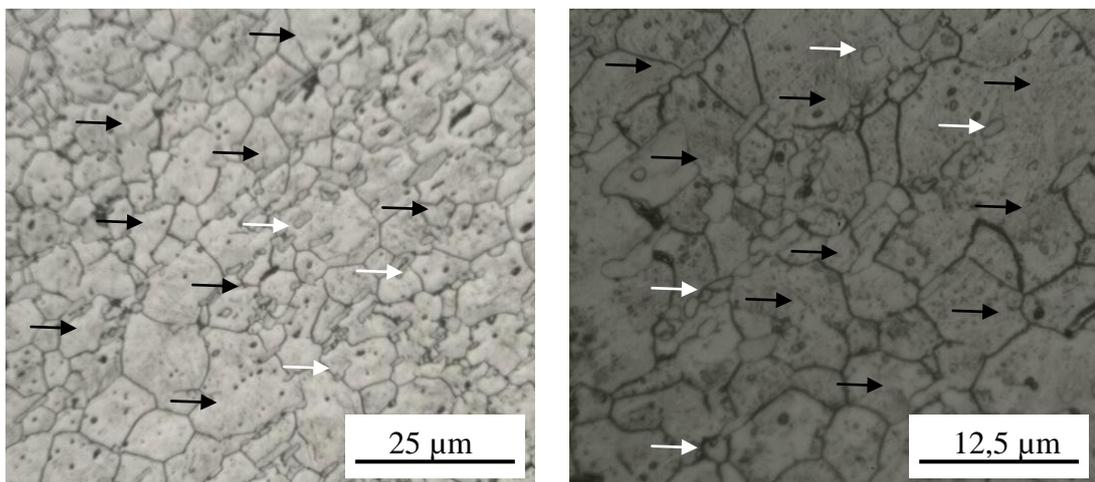
Figura 66 - D6_Têmpera em óleo, austenitizado a 1120°C durante 20 minutos

(a)

(b)

Fonte: (Autor)- (MO) Aumentos distintos 25 µm (a) e 12,5 (b) µm.

As figuras 66 e 67 exibem a microestrutura do aço AISI D6, austenitizado a 1120 °C, temperado em óleo, com tempos de encharque de 20 e 60 minutos respectivamente. É notada uma redução significativa na quantidade de carbonetos, conseqüentemente um aumento da porção martensítica.

Figura 67 - D6_Têmpera em óleo, austenitizado a 1120°C durante 60 minutos.

(a)

(b)

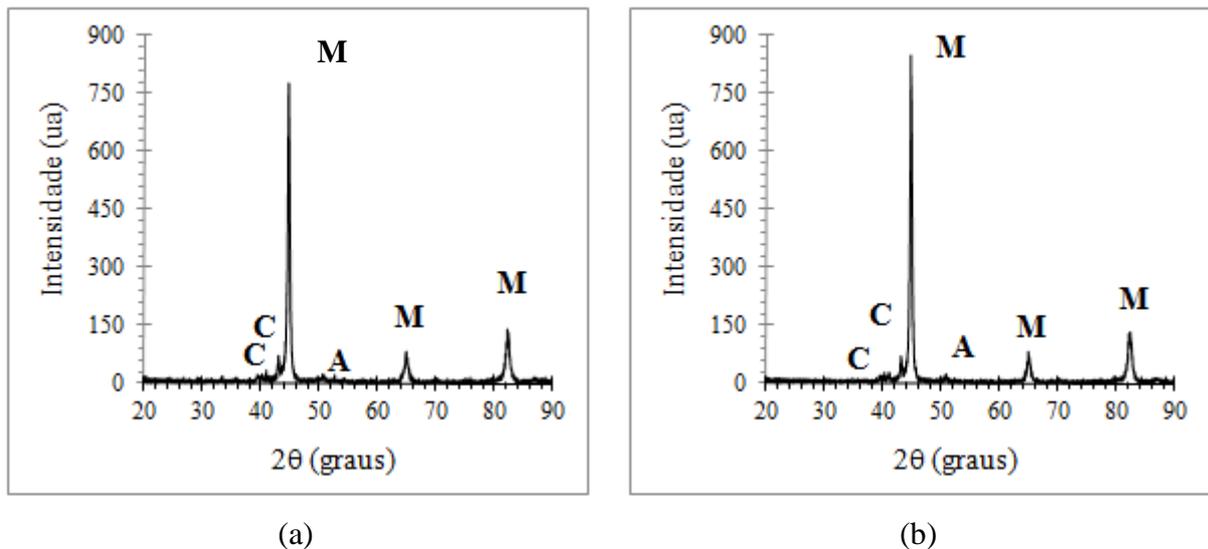
Fonte: (Autor) – (MO) Aumentos distintos 25 µm (a) e 12,5 (b) µm.

5.2.3 Estudo da transformação de fases por Difração de Raios - X

5.2.3.1 Difração de Raios - X D2

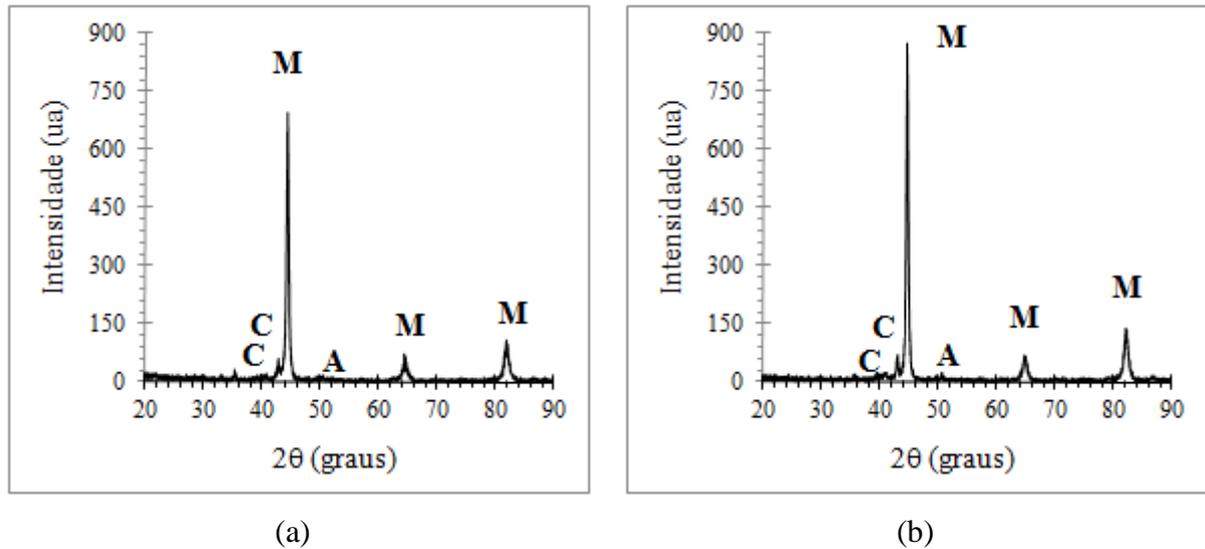
As figuras 68, 69 e 70 exibem os difratogramas do aço AISI D2, nas temperaturas de austenitização e tempos de encharque estabelecidos no trabalho, tendo como meio de têmpera o ar. São observados picos característicos da martensita (M) carbonetos (C) e austenita retida (A). Suspeitou-se que um dos picos característicos do carboneto, na figura 68a, fosse de austenita, porém o pico característico desse constituinte é um pouco mais deslocado para a direita.

Figura 68 - Difratogramas do aço AISI D2 temperado ao ar com temperatura de austenitização de 920 °C



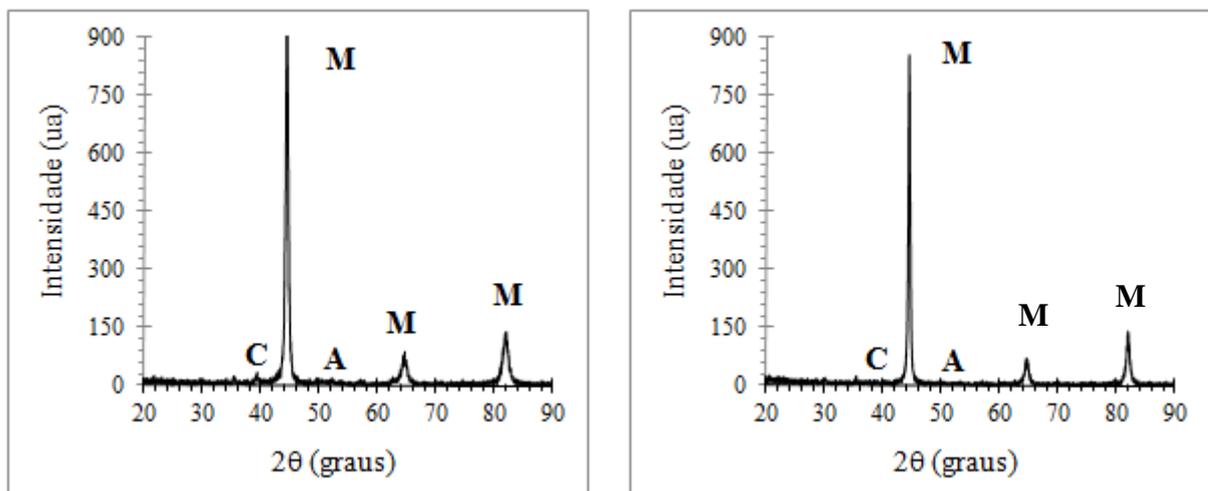
Fonte: (Autor) - Tempo de encharque de (a) 20 minutos e (b) 60 minutos.

Como verificado nas micrografias os constituintes do aço AISI D2 quando submetidos a têmpera são a martensita e os carbonetos, o que também fica evidenciado através dos difratogramas.

Figura 69 - Difratogramas do aço AISI D2 temperado ao ar com temperatura de austenitização de 1020°C

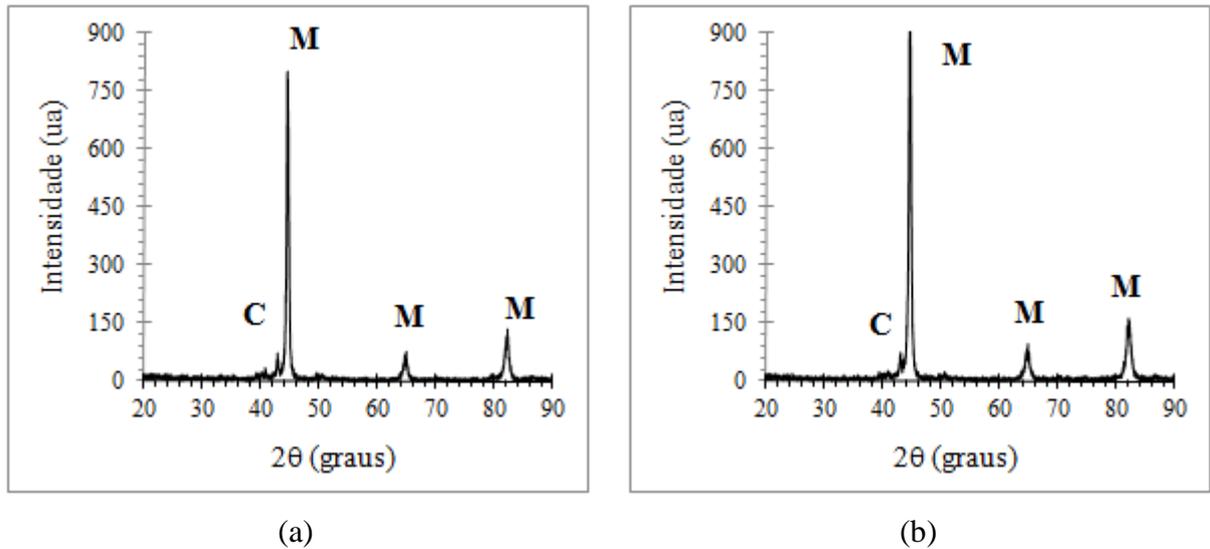
Fonte: (Autor) - Tempo de encharque de (a) 20 minutos e (b) 60 minutos.

Com o aumento da temperatura de austenitização a solubilização dos carbonetos é aumentada, o que pode ser verificado ao se comparar as figuras 68, austenitizado a 920°C, e 70, austenitizado a 1120 °C, na qual são exibidos picos de carbonetos e na condição posterior esses picos já não são mais observados.

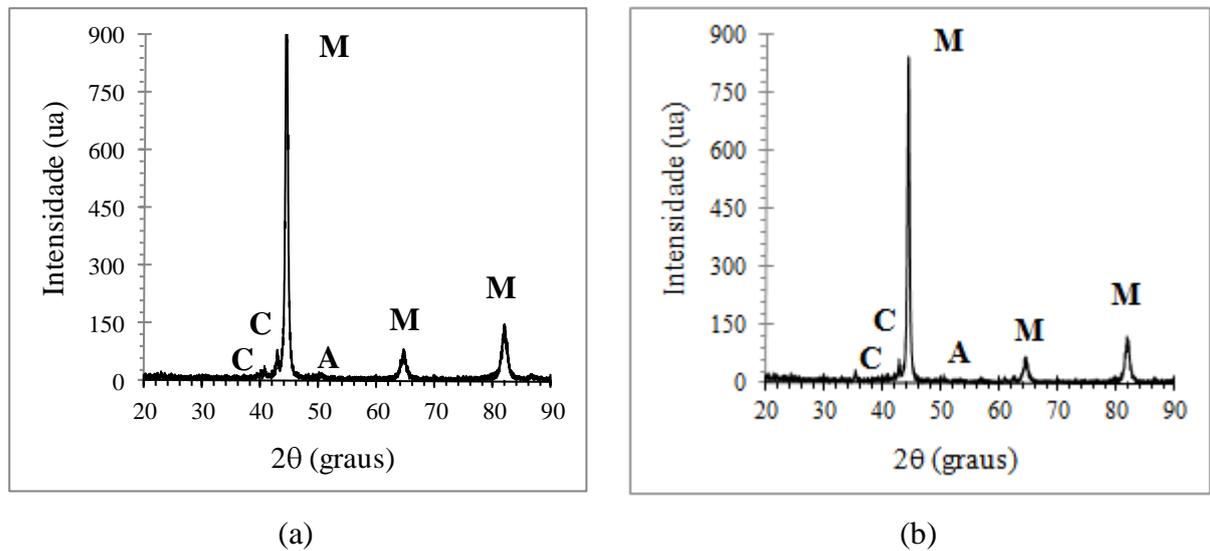
Figura 70 - Difratogramas do aço AISI D2 temperado ao ar com temperatura de austenitização de 1120°C

Fonte: (Autor) - Tempo de encharque de (a) 20 minutos e (b) 60 minutos

As figuras 70, 71 e 72 apresentam os difratogramas do aço AISI D2 após a têmpera, nas condições de tempo e temperatura definidas no trabalho, tendo como meio de têmpera o óleo.

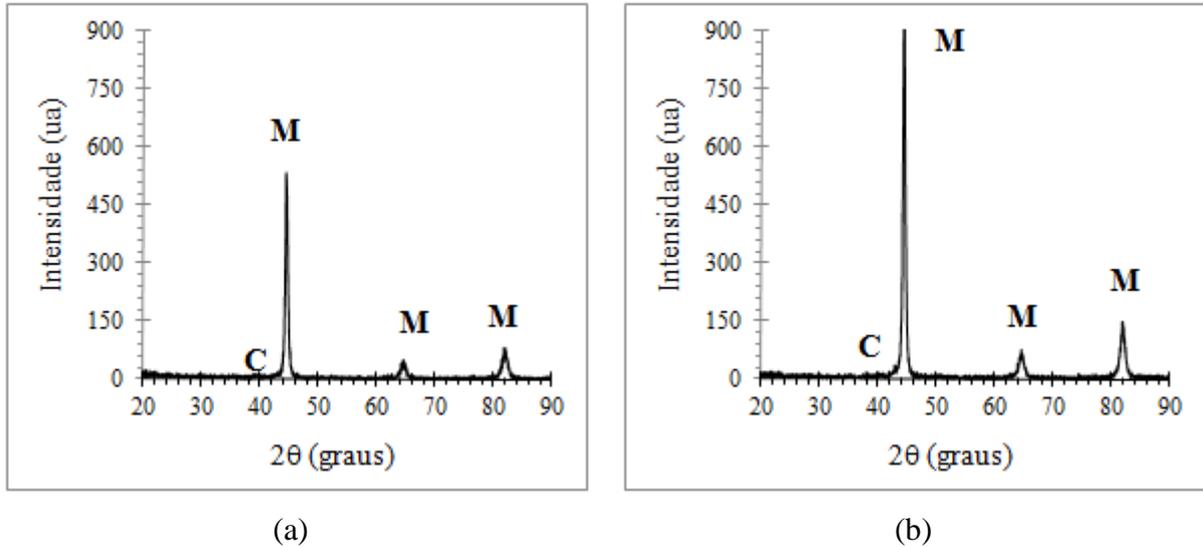
Figura 71 - Difratogramas do aço AISI D2 temperado em óleo com temperatura de austenitização de 920°C

Fonte: (Autor) - Tempo de encharque de (a) 20 minutos e (b) 60 minutos

Figura 72 - Difratogramas do aço AISI D2 temperado em óleo com temperatura de austenitização de 1020°C

Fonte: (Autor) - Tempo de encharque de (a) 20 minutos e (b) 60 minutos

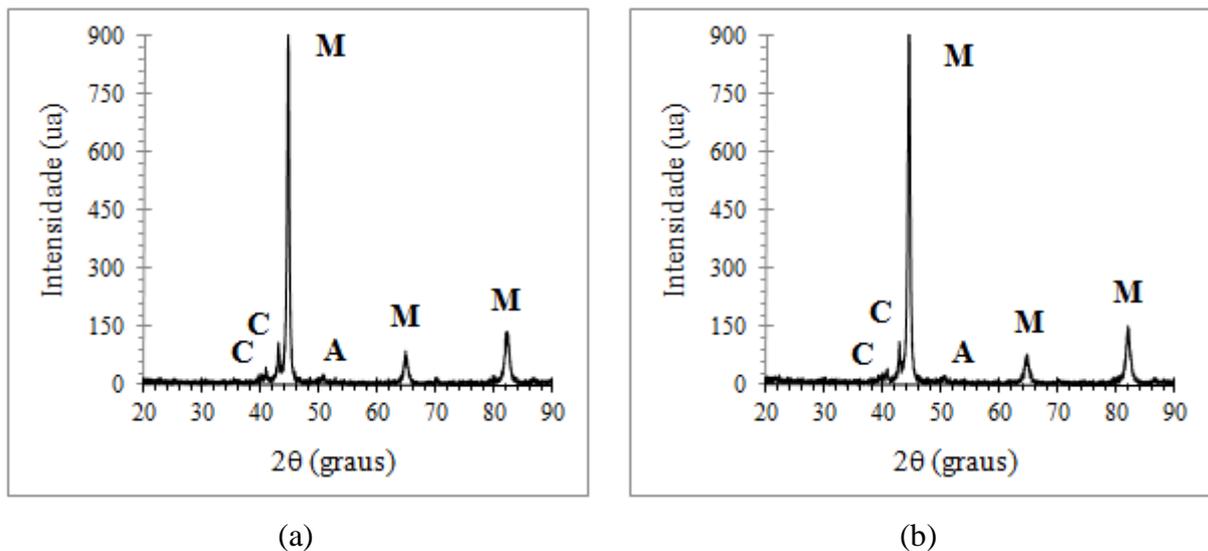
A presença de carbonetos (C) é acentuada a uma menor temperatura de austenitização, o que decresce com o aumento da temperatura, com a martensita(M) ocorre o contrario.

Figura 73 - Difratomogramas do aço AISI D2 temperado em óleo com temperatura de austenitização de 1120°C

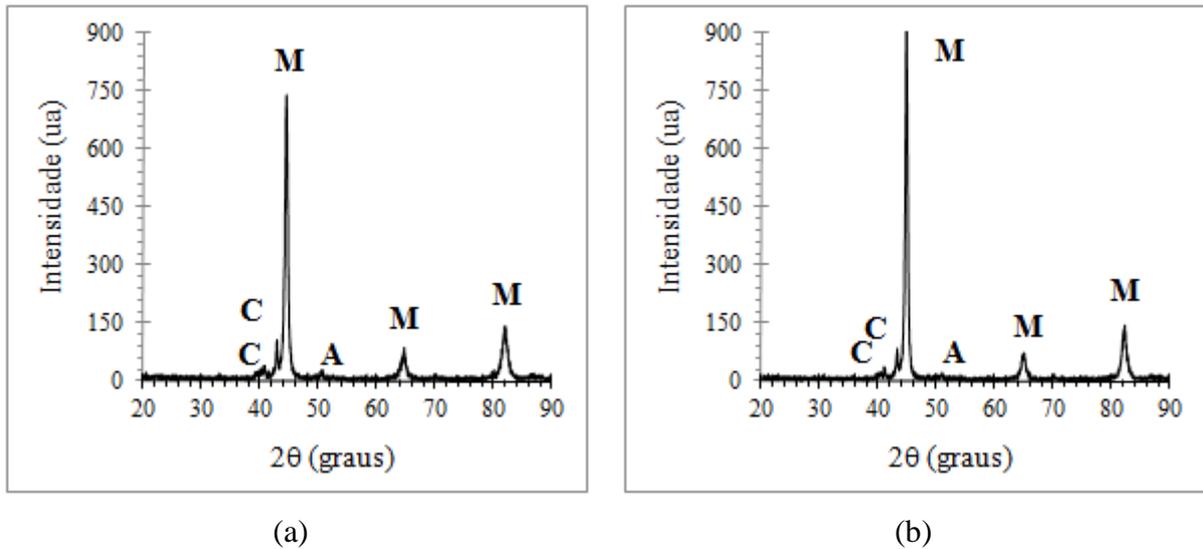
Fonte: (Autor) - Tempo de encharque de (a) 20 minutos e (b) 60 minutos

5.2.3.2 Difração de Raios-X D6

As figuras 74, 75 e 76 exibem os difratogramas do aço ferramenta AISI D6, nas temperaturas de austenitização e tempos de encharque adotados no trabalho, utilizando como meio de têmpera o ar. Como observado nas micrografias a microestrutura desse aço após a têmpera é de uma matriz martensítica com carbonetos nela dispersos o que é novamente ressaltado através dos difratogramas.

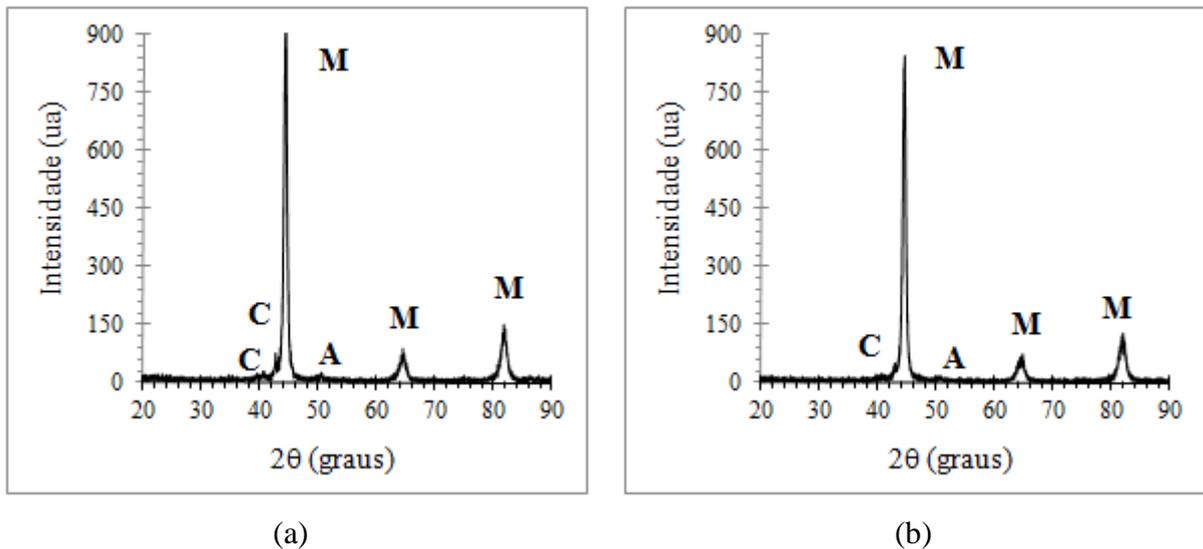
Figura 74 - Difratomogramas do aço AISI D6 temperado ao ar com temperatura de austenitização de 970 °C

Fonte: (Autor) - Tempo de encharque de (a) 20 minutos e (b) 60 minutos

Figura 75 - Difratogramas do aço AISI D6 temperado ao ar com temperatura de austenitização de 1020 °C

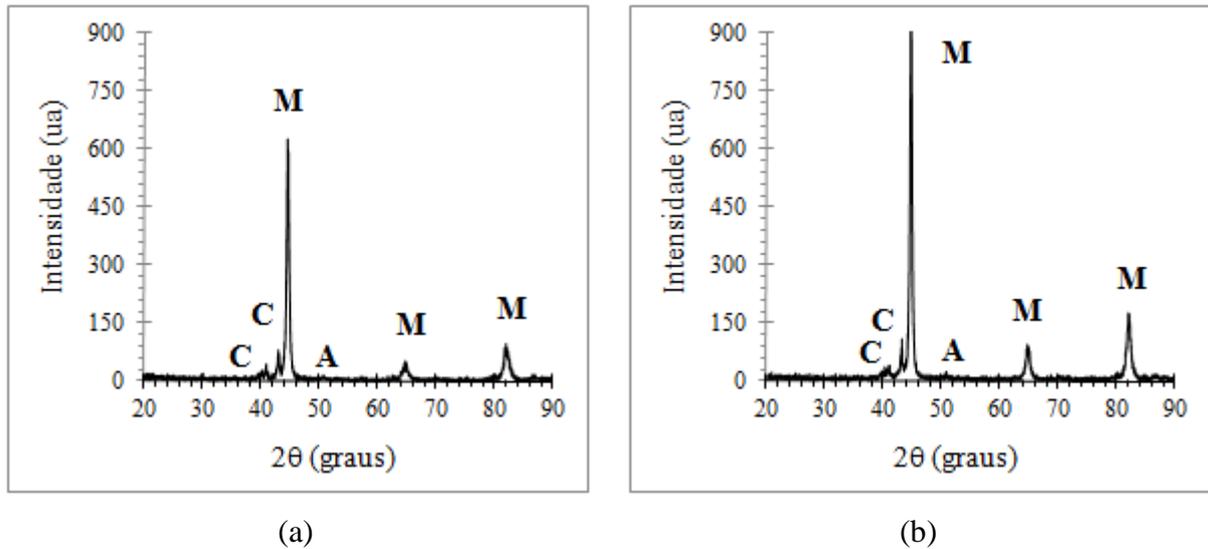
Fonte: (Autor) - Tempo de encharque de (a) 20 minutos e (b) 60 minutos

Com o aumento da temperatura a solubilização dos carbonetos é maior, o que pode ser observado ao se comparar as figuras 74 e 75, o mesmo acontecendo com o tempo de encharque, figuras 76 (a) e (b).

Figura 76 - Difratogramas do aço AISI D6 temperado ao ar com temperatura de austenitização de 1120°C

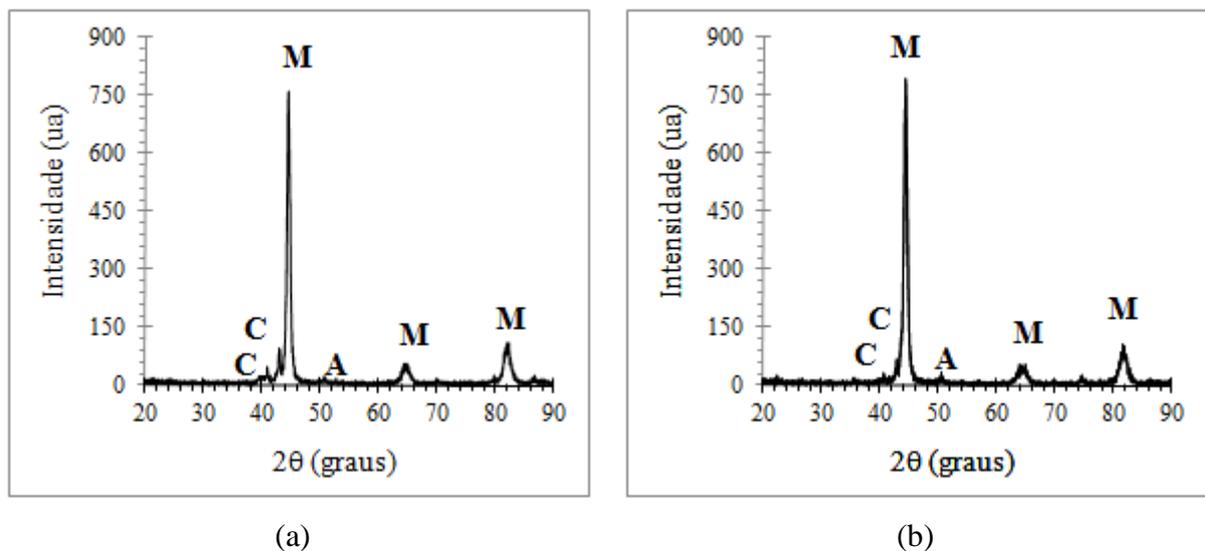
Fonte: (Autor) - Tempo de encharque de (a) 20 minutos e (b) 60 minutos

As figuras 77, 78 e 79 são difratogramas do aço AISI D6 tratado termicamente nas condições estabelecidas no trabalho, temperadas em óleo com tempode 20 e 60 minutos.

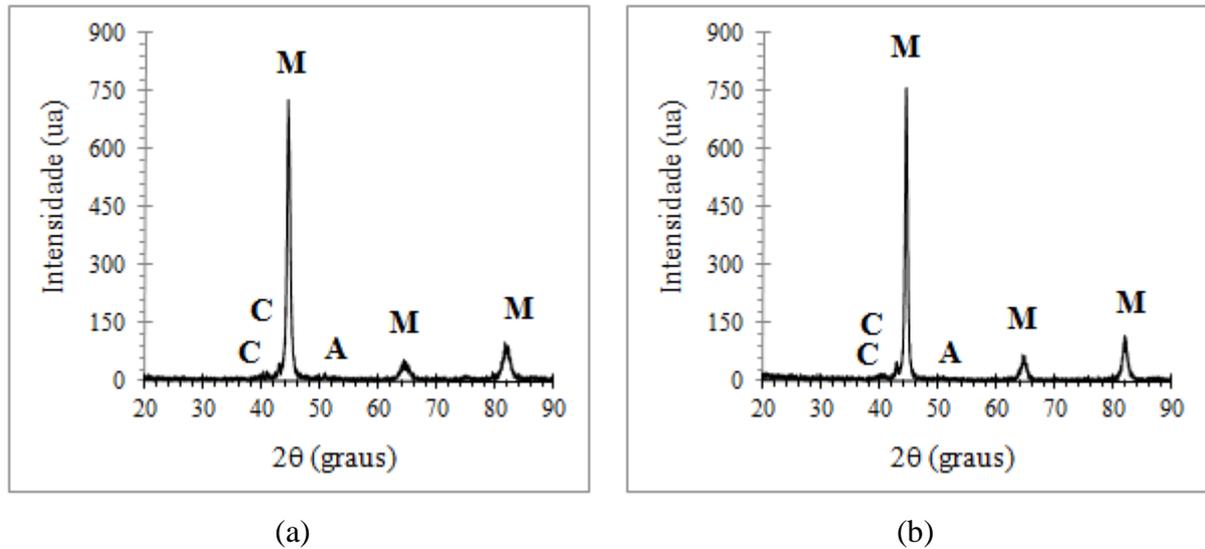
Figura 77 - Difratomogramas do aço AISI D6 temperado em óleo com temperatura de austenitização de 970°C

Fonte: (Autor) - Tempo de encharque de (a) 20 minutos e (b) 60 minutos

O comportamento observado é o mesmo da condição anterior, quando temperado ao ar. Tratado a uma temperatura menor de austenitização, é verificada a presença pronunciada dos carbonetos e com o aumento do tempo de encharque e da temperatura de austenitização a solubilização é maior.

Figura 78 - Difratomogramas do aço AISI D6 temperado em óleo com temperatura de austenitização de 1020°C

Fonte: (Autor) - Tempo de encharque de (a) 20 minutos e (b) 60 minutos

Figura 79 - Difratogramas do aço AISI D6 temperado em óleo com temperatura de austenitização de 1120°C

Fonte: (Autor) - Tempo de encharque de (a) 20 minutos e (b) 60 minutos

6. Conclusão.

O aumento da temperatura de austenitização implicou em um aumento na dureza em todas as condições de têmpera do aço AISI D2, exceto para a temperatura de 1020°C resfriada em óleo. Considerando as amostras temperadas no mesmo meio, o aumento no tempo de encharque resultou em uma dureza menor.

Em todas as condições de têmpera do aço AISI D6 pode ser observado que o aumento da temperatura de austenitização ocasionou a redução na dureza, apresentando diferença apenas para a amostra resfriada em óleo na temperatura de 1020°C. Comparando as amostras temperadas no mesmo meio o aumento do tempo de encharque resultou em uma dureza menor.

Para o par de aços ferramenta a análise da microestrutura dos aços revelou a ocorrência de estrutura martensítica e a presença de carbonetos, cuja quantidade diminuiu com o aumento da temperatura de austenitização.

7. Referências bibliográficas

CHIAVERINI, V. **Aços e ferros fundidos**. 7 ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais - ABM, 2005. 599p.

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

ASM HANDBOOK. **Heat treating**. 3 ed. Ohio: American Society for Metals – ASM International, v. 4, 1995. 1012p.

RAUTER, Raul Oscar. **Aços Ferramenta**. Livros Técnicos e Científicos Editora S.A. Rio de Janeiro, 1974.

COUTINHO, C.B. **Materiais metálicos para engenharia**. Belo Horizonte: Fundação Cristiano Ottoni, 1992.

GONÇALVES, J. V. **Estudo do comportamento do aço ferramenta D6 de fabricantes diferentes**. Novo Hamburgo, dez 2008. 71p.

SOARES, E. **Efeito do tratamento térmico e nas propriedades mecânicas de aços ferramenta para trabalho a frio**. São Paulo, 2006.84p.

DEPARTAMENTO DE CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS da Faculdade de ciência e Tecnologia – Universidade nova de Lisboa. (DCM-FCT). **Tratamento térmico de aços ferramenta**. Disponível em: < <http://disciplinas.dcm.fct.unl.pt/ttm/ttool0-0.pdf> Acesso em 13 de dez.2011.

CENTRO DE INFORMAÇÃO METAL MECÂNICA.(CIMM). **Processos de fabricação dos aços ferramenta**. Disponível em : <http://www.cimm.com.br/portal/material_didatico/6363#.TubpxbI6tC5 Acesso em 13 de dez.2011.

GGD Metals. **Aços ferramenta**. Disponível em: < <http://www.ggdmetals.com.br/aco-ferramenta/> Acesso em 13 de dez.2011.