



TRABALHO DE GRADUAÇÃO

ENGENHARIAS 2020

ANÁLISE DA VARIAÇÃO DA DUREZA E CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL DO AÇO FERRAMENTA AISI D2 TRATADO TERMICAMENTE ANALYSIS OF THE VARIATION IN HARDNESS AND MICROSTRUCTURAL CHARACTERIZATION OF A HEAT TREATED AISI D2 TOOL STEEL

BENIGNE DE PAIVA, Alexandre Augusto¹; GASPAR, Marlon Cardoso²;
Conrado Augusto Fantini²
Graduando do Curso de Engenharia Mecânica – Universidade São Francisco);
xandebenignepaiva@hotmail.com
marloncgaspar@hotmail.com

Resumo. As propriedades mecânicas, químicas e físicas dos materiais influenciam diretamente em suas aplicações na indústria. Por esse motivo, muitos materiais passam pelo processo de tratamento térmico com a finalidade de se adequarem à uma determinada aplicação, pois desse modo é possível modificar a microestrutura do material e sua resistência mecânica. A têmpera e o revenimento são práticas metalúrgicas comuns aplicadas às ligas ferrosas, favorecendo um equilíbrio entre resistência mecânica e tenacidade. Neste artigo, verificaram-se as variações causadas pela têmpera e revenimento na microestrutura e na dureza do aço ferramenta para trabalho a frio, AISI D2. Foram preparadas diversas amostras, sendo que todas passaram pelo mesmo processo de têmpera, de modo que um conjunto ficou temperada e os demais passaram pelo revenimento (iniciou em 200°C e finalizou em 700°C, com intervalos de 50°C). As amostras foram caracterizadas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) e por ensaio de dureza em escala Rockwell C.

Palavras-chave: Revenimento, Têmpera, Dureza, Tratamento térmico, Microestrutura.

Abstract. *The mechanical, chemical and physical properties of materials directly influence their applications in the industry. For this reason, many materials go through the heat treatment process in order to fit in a particular, as this way it is possible to modify the microstructure of the material and its mechanical resistances. The quench and tempering are common metallurgical practices that can guarantee an increase in hardness and homogeneity in the material. In this article, it was verified the variations caused quenching and tempering in the microstructure and hardness of the cold working tool steel, AISI D2. Several samples were prepared, all of which underwent the same tempering process, so that one set was quenched and the others went through tempering (started at 200°C and ended at 700°C with 50°C intervals). The samples were characterized by scanning electron microscopy and hardness tests performed on a Rockwell C scale.*

Keywords: *Tempering, Quench, Hardness, Heat treatment, Microstructure.*

1. INTRODUÇÃO

1.1 AÇOS FERRAMENTAS PARA TRABALHO A FRIO SÉRIE D

Para a classificação AISI existem diversos aços ferramentas para trabalho à frio, sendo as principais séries: D, O, A e W. A Série D (*Die Steels*) representam os aços chamados alto Cromo-alto Carbono. O alto Cromo presente torna esses aços mais resistentes a corrosão que os aços simplesmente ao Carbono ou com baixo teor de elementos de liga e, é possível ressaltar, que a resistência ao desgaste desses aços é cerca de oito vezes maior que a dos aços-carbono (CHIAVERINI, 2012). Essas características ocorrem, principalmente, pelos carbonetos de Cromo na microestrutura.

Dentro da Série D, uma das ligas mais importantes de aço ferramenta para ser utilizado em temperaturas próximas à temperatura ambiente é o AISI D2, pois possuem elevada dureza e são os menos sujeitos a alterações dimensionais durante o tratamento térmico, sendo considerados com alta estabilidade dimensional, resistência ao desgaste, especialmente em condições abrasivas, e por possuírem uma alta tenacidade superior aos demais aços da série D (CHIAVERINI, 2012).

Dessa forma, esses materiais são indicados para aplicações que exigem controle dimensional, sendo utilizados para lâminas de corte, estampagem, punções, forjamento, compactação de pós-metálicos, calibres, etc (CHIAVERINI, 2012).

O Aço AISI D2 tem como seu principal elemento de liga o Cromo com concentração nominal da ordem de 12,5% em peso. Isso faz com que ele tenha excelente resistência ao desgaste e ataques externos. Esse elemento junto ao Vanádio além da boa resistência mecânica, também melhora sua performance em relação a têmpera e ao revenimento (FANTINI, 2019). A Tabela 1 apresenta a composição química da liga AISI D2.

Tabela 1 – Composição química do aço AISI D2 em % peso, Fe-balanço.

C	Mn	Si	Cr	Mo	V	P (máx)	S(máx)
1,4	0,10	0,10	11,00	0,70	0,50	0,030	0,030
1,6	0,60	0,60	13,00	1,20	1,10	-	-

Fonte: Adaptado de FANTINI, 2019

Os elementos microestruturais mais relevantes presentes nesses aços são: a matriz metálica e os carbonetos. A matriz é responsável pela maior fração volumétrica da microestrutura, já os carbonetos podem ser: eutéticos (geralmente com a estrutura bruta de fundição quebrada após a conformação plástica), secundários (em estado sólido precipitados durante tratamento térmico) e secundários de revenido (FARINA, 2011 *apud.* FANTINI 2019).

O aço AISI D2 tem sua conformação à quente, conforme se solidifica ocorre a formação de carboneto do tipo M_7C_3 por uma reação eutética, e a quantidade de carbonetos presentes na microestrutura vai aumentando com a redução da temperatura. O carboneto M_7C_3 apresenta seu reticulado hexagonal (FANTINI, 2019).

Para se ter um bom desempenho dos aços para trabalho a frio a microestrutura desejada é uma matriz martensítica com uma dispersão uniforme de carbonetos (COSTA e MEI, 1988), a qual se forma a partir da têmpera do aço. Para realizar a correção da dureza excessiva e a consequente fragilidade que ela causa ao material, o revenimento deve ser realizado logo em seguida para melhorar sua ductilidade e a tenacidade.

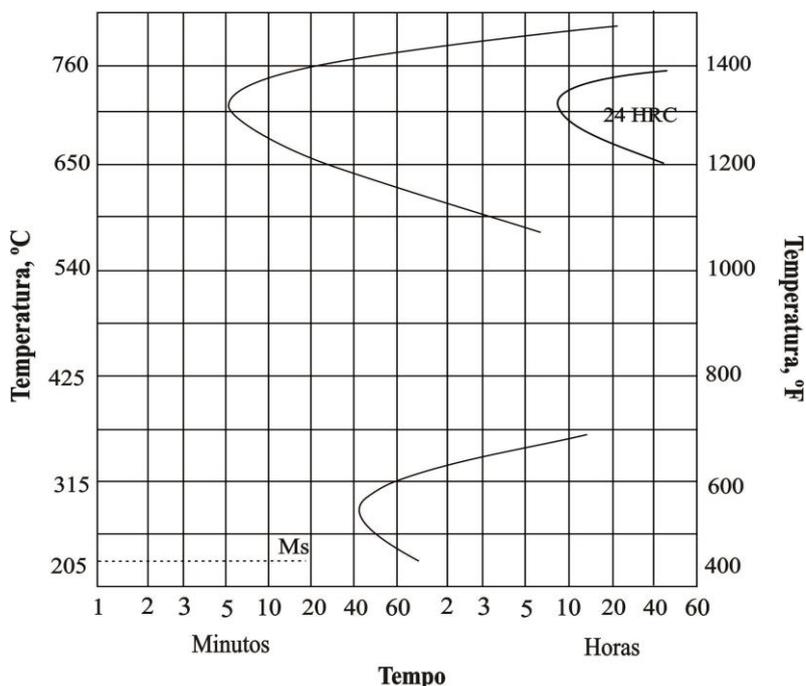
No tratamento térmico, a quantidade de carbono e os demais elementos de liga influenciam diretamente na microestrutura e nas propriedades mecânicas. Neste sentido, pode-se destacar os aços hipereutetóides, em que as condições de austenitização impactam fortemente na resposta ao tratamento térmico, estabelecendo a quantidade de carbono e de elementos de liga dissolvidos na austenita e precipitados sob a forma de carbonetos (COSTA e MEI, 1988).

1.2 TRANSFORMAÇÕES MARTENSÍTICAS

A martensita é uma solução sólida, supersaturada de carbono na estrutura Tetragonal de Corpo Centrado (TCC) (CHIAVERINI, 2012), que ocorre através do processo de cisalhamento de planos, acompanhados de uma mudança sistemática de forma na região transformada durante a têmpera (NISHIYAMA, 1978; MURATA, 2018, *apud.* FANTINI, 2019), podendo ser classificada como: atérmica (transformação rápida durante a têmpera), isotérmica (transformação lenta, mantendo o aço a uma temperatura constante) e induzida por deformação plástica (FANTINI, 2019). Sua morfologia depende da quantidade de carbono na composição, de modo que para aços de baixo carbono a martensita apresenta a forma de ripas cruzadas (apresentando muitas discordâncias) e para aços com alto carbono encontram-se na forma de placas (com muitas maclas internas) (KRAUSS e MARDER, 1971).

A maior parte dos aços martensíticos pertence a uma categoria na qual a martensita é atérmica, cuja transformação inicia à temperatura M_s (inicial) e continua enquanto a temperatura diminui, conforme mostra esquematicamente a Figura 1. Uma vez que o resfriamento seja interrompido as reações param e, quando o resfriamento é reiniciado, a transformação recomeça, de forma que as reações ocorrem somente enquanto a temperatura está mudando (FANTINI, 2019).

Figura 1 - Curva Tempo-Temperatura-Transformação para o aço ferramenta AISI D2.



Fonte: Adaptado de FANTINI, 2019.

As curvas Tempo-Temperatura-Transformação (TTT), auxiliam na determinação dos parâmetros do tratamento térmico de têmpera e na previsão dos constituintes formados. Alguns fatores como composição química do aço, tamanho de grão e homogeneidade da austenita influenciam na posição das curvas TTT, que podem ser deslocadas para a direita ou esquerda, facilitando ou dificultando assim a formação de martensita (CALLISTER, 2013).

Após atingir a temperatura de austenitização, é necessário que o material permaneça por um período aquecido para que ocorra a transformação alotrópica completa e de forma homogênea. Na sequência o aço é resfriado bruscamente, o que impede a difusão do carbono e dos outros elementos de liga para os seus lugares preferenciais, pois assim, a mobilidade atômica se torna mais difícil em consequência do rápido resfriamento (BRAGA, 2015).

Desse modo, quando a transformação martensítica ocorre há a mudança da estrutura do material passando de cúbico de face centrada (CFC) para cúbico de corpo centrado (CCC) ou tetragonal de corpo centrado (TCC) (FANTINI, 2019).

1.3 ENSAIOS DE MATERIAL

1.3.1 Microscopia Eletrônica de Varredura

O Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) é um dos mais versáteis instrumentos disponíveis para a observação e análise das características microestruturais de materiais sólidos. O seu princípio de funcionamento consiste em utilizar um feixe de elétrons de pequeno diâmetro para explorar a superfície da amostra, ponto a ponto, por linhas sucessivas e transmitir o sinal do detector a uma tela catódica cuja varredura está perfeitamente sincronizada com aquela do feixe incidente. Por um sistema de bobinas de deflexão, o feixe pode ser guiado de modo a varrer a superfície da amostra. O sinal de imagem resulta da interação do feixe incidente com a superfície da amostra. A maioria dos instrumentos usa como fonte de elétrons um filamento de Tungstênio aquecido. O feixe é acelerado pela alta tensão criada entre o filamento e o ânodo. O feixe interagindo com a amostra produz elétrons e fótons que podem ser coletadas por detectores adequados e convertidas em um sinal de vídeo (DEDAVID, GOMES e MACHADO, 2007).

A imagem formada a partir do sinal captado na varredura eletrônica de uma superfície pode apresentar diferentes características, uma vez que a imagem resulta da amplificação de um sinal obtido de uma interação entre o feixe eletrônico e o material da amostra. Diferentes sinais podem ser emitidos pela amostra. Dentre os sinais emitidos, os mais utilizados para obtenção da imagem são originários dos elétrons secundários e/ou dos elétrons retroespalhados (DEDAVID, GOMES e MACHADO, 2007).

1.3.2 Ensaios de Dureza

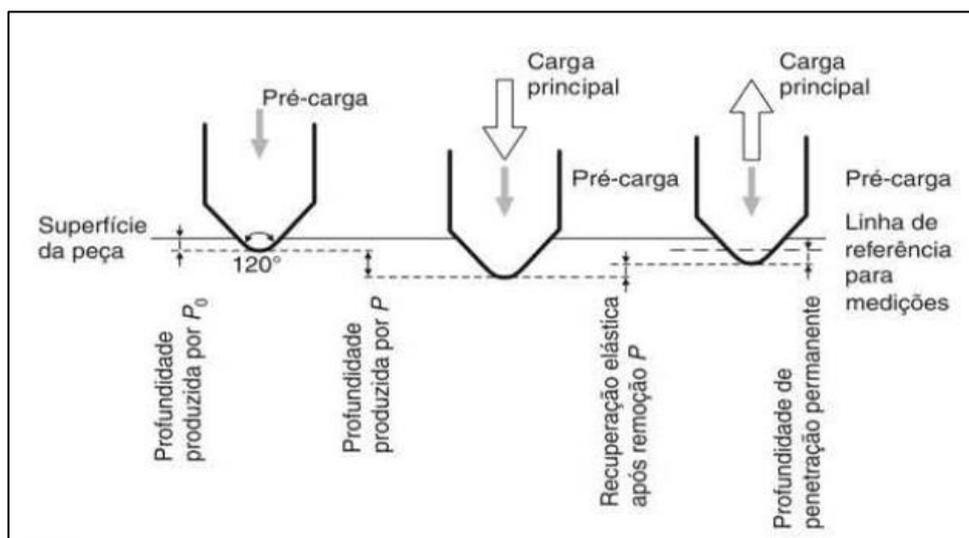
Os principais ensaios de dureza em metais são: Rockwell, Brinell e Vickers, no entanto existem outros métodos como: microdureza Knoop, Ludwik, que são aplicados geralmente para outros tipos de materiais.

Para a realização deste artigo foi utilizado o ensaio de dureza do método Rockwell, que é usualmente aplicado para materiais que consistem de alta dureza como os aços ferramentas. A escala utilizada é a C (simbolizado por HRC), que tem como característica penetrador de diamante com 120° de conicidade, carga final aplicada de 150 kgf (SOUSA, 1982).

Algumas vantagens do método são: a aplicação para todo tipo de material desde duros até macios; maior precisão já que o resultado é automático; pequeno tamanho de impressão e dependendo do material pode ser testado sem danos, com isso, o método pode ser utilizado para outros experimentos (SOUSA, 1982).

Esse tipo de ensaio de dureza, utiliza-se da profundidade da impressão causada por um penetrador padronizado sob a ação de uma carga aplicada em dois estágios (pré-carga e carga suplementar) como indicador da medida de dureza. Devido ao penetrador ser pequeno, a impressão é pequena, desta forma, torna-se possível indicar pequenas diferenças de dureza na mesma região de uma peça. A profundidade de penetração é correlacionada pela máquina de ensaio, de modo que, após a retirada da carga principal, a carga inicial ou pré-carga é mantida. A Figura 2 ilustra uma representação do princípio de medição de dureza Rockwell (GARCIA, SPIM e SANTOS, 2012).

Figura 2 - representação esquemática de medição de dureza Rockwell.



Fonte: GARCIA, SPIM e SANTOS Ensaios dos materiais 2º Ed, 2012.

Há dois tipos de penetradores, os esféricos (aço endurecido ou carboneto de tungstênio) e o cônico (cone de diamante tendo 120° de conicidade). A pré-carga tem a função de garantir um contato firme do penetrador com a superfície do corpo de prova, evitando que aconteça algum escorregamento. Neste ensaio é possível verificar a dureza superficial e também uma dureza com uma profundidade um pouco maior (a utilizando usualmente nos ensaios), chamada de dureza comum (SOUSA, 1982). Para a dureza superficial, a pré-carga é de 3 kgf, para os testes usualmente utilizados está pré-carga é de 10kgf. Para a carga suplementar, a força comum varia de 60 kgf até 150 kgf e a carga para o teste superficial os valores variam de 15 kgf até 45 kgf (GARCIA, SPIM e SANTOS, 2012).

O ensaio de dureza Rockwell é bastante versátil e confiável, contudo, devem ser tomadas algumas precauções. São elas: escolha correta da escala (penetrador e cargas); o penetrador e o suporte devem estar limpos e assentados; a superfície a ser testada deve estar limpa e seca; ser plana e perpendicular ao penetrador (GARCIA, SPIM e SANTOS 2012).

O presente artigo, tem como objetivo analisar a variação de dureza e a caracterização microestrutural causadas pelo revenimento, em diversas faixas de temperaturas para o aço ferramenta para trabalho a frio, AISI D2. Para isso, os requisitos a serem considerados para a análise são: caracterização da microestrutura por meio de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e do ensaio de dureza para o método Rockwell (escala C).

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Foram confeccionados 36 corpos de prova do aço ferramenta AISI D2 (condição inicial como recozido) com sessão transversal circular de 3/4 polegadas com 40mm de comprimento conforme a Figura 3, para verificar a influência da têmpera e do revenimento em sua microestrutura e dureza. O material foi adquirido da empresa Villares Metals S.A. – Sumaré - Brasil.

Figura 3 - Amostra dos corpos de prova.



Fonte: próprio autor.

2.1 PROCESSO DE TÊMPERA E REVENIMENTO

No processo de tratamento térmico foi utilizado um forno elétrico QUIMIS Mufla Microprocessado Q318M.

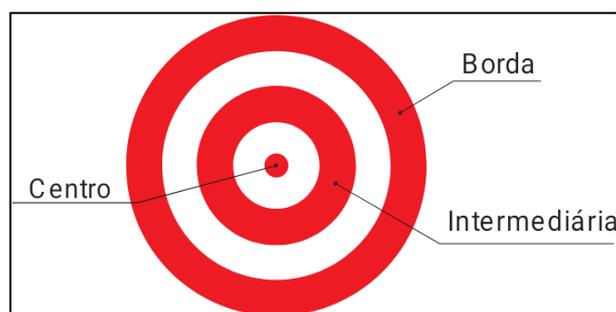
Para a têmpera foram necessárias 3 etapas devido ao tamanho do forno ser pequeno, de modo que cada etapa conteve 12 corpos de prova, possuindo todos os ciclos os mesmos parâmetros. As amostras ficaram no forno na temperatura de 1030 °C por um período de 60 minutos, após o processo da austenitização todas as peças foram retiradas do forno e passaram a ser resfriadas em ar calmo na temperatura ambiente.

Para o revenimento foram utilizados 11 conjuntos de amostra, de modo que cada conjunto conteve 3 corpos de prova. O processo iniciou na temperatura de 200 °C e a finalizou em 700 °C, com intervalos de 50°C. Após o alcance da temperatura desejada, o conjunto foi inserido no forno e permaneceu no local por um período de 60 minutos. Depois do processo de aquecimento, as amostras foram submersas na água à temperatura ambiente e agitadas por 1 minuto. O processo de execução foi idêntico para todas as temperaturas.

2.2 ENSAIO DE DUREZA

A análise de dureza é parte essencial do experimento por meio da qual foi obtida a curva de revenimento, e para ser possível realizar este ensaio todas as peças passaram pelo processo de lixamento nas duas secções transversais, para retirar deformações superficiais. Para efetuar a análise de dureza a secção transversal foi dividida em 3 regiões, sendo elas: centro, intermediária (meio raio) e borda (raio), conforme Figura 4. Para cada temperatura se obteve 3 amostras do aço AISI D2, de modo que foi realizado em cada amostra 3 ensaios de dureza por região. Após a coleta desses dados realizou-se uma média, e a partir dessa média se calculou a média geral, conforme Tabela 2 apresentada no próximo capítulo deste trabalho.

Figura 4 - Separação de pontos na secção transversal do corpo de prova.



Fonte: próprio autor.

Foi escolhida a escala de dureza Rockwell C (HRC) para aferir a dureza das amostras, utilizando-se um durômetro Kontrol – PRECISION conforme mostra a Figura 5.

Figura 5 - Durômetro Kontrol.



Fonte: próprio autor.

Após a realização do ensaio de dureza, é possível observar os pontos de impressão do cone de diamante, de modo que é nítido verificar as regiões em que a secção transversal foi separada, conforme imagem da Figura 6.

Figura 6 - Marca em secção transversal do corpo de prova após ensaio.



Fonte: próprio autor.

Com grandes quantidades de ensaios em cada temperatura, torna-se plausível estatisticamente gerar dados com maiores precisões para a representação da curva de dureza em relação as temperaturas.

2.3 METALOGRAFIA

As análises microestruturais foram realizadas com o objetivo de verificar a ocorrência de transformação martensítica com a têmpera e precipitação de carbonetos secundários no revenimento. Para a caracterização metalográfica, as amostras foram lixadas em uma politriz modelo PLF, idênticas com a da Figura 7, em lixas d'água com uma rotação de 250 RPM, seguindo uma sequência de granulometrias: 80, 120, 220, 320, 400, 600, 800 e 1200 mesh, seguido de polimento em feltro com pasta de diamante de granulometria de 3 e 1 μ m. Por fim, para revelar o contraste na microestrutura, todas as amostras foram atacadas quimicamente por imersão com o reagente nital 2% (para cada 100mL do reagente há 98mL de álcool etílico e 2mL ácido nítrico), uma vez que o mesmo é indicado para revelar a microestrutura de aço carbono em geral. O ataque foi realizado em temperatura ambiente, este reagente revela os contornos de grãos em aço carbono, exhibe contraste máximo entre perlita e ferrita ou cementita, revela os contornos de ferrita e diferencia a ferrita da martensita.

Figura 7 - Politriz para preparação metalográfica.



Fonte: próprio autor.

Para obter as imagens das microestruturas em alta resolução na microscopia eletrônica de varredura utilizou-se um microscópio da marca Jeol modelo JSM-6610LV (conforme Figura 8) de uma empresa contratada, pelo motivo da pandemia do COVID-19 houve o acesso restrito a diversos laboratórios. Para a captura das imagens o microscópio foi configurado com uma tensão de 5kV e utilizado elétrons secundários (Secondary Electrons - SE).

Figura 8 - Microscópio eletrônico de varredura.



Fonte: próprio autor.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 SÉRIE DE EXPERIMENTOS PARA ANÁLISE DA DUREZA

O aço em seu estado inicial (recozido) foi encontrado uma dureza média de 22 HRC, o valor está de acordo com o fornecido pelo fabricante (Villares Metals, 2003), que indicou uma dureza máxima 250 HB (o que é equivalente a aproximadamente 24 HRC).

A Tabela 2, demonstra o modo em que foram inseridos os dados da dureza, para o cálculo da média por amostra e da média geral entre as amostras da mesma temperatura e região.

Tabela 2 – Tabela de valores ensaio de dureza para a amostra apenas temperada.

AMOSTRA	BORDA			DUREZA MÉDIA	INTERMEDIARIA			DUREZA MÉDIA	CENTRO			DUREZA MÉDIA
1	69	69,5	68,5	69	70	69,5	70,3	69,9	69,8	70	69,8	69,8
2	71	71	70,8	70,9	71,3	70,5	71	70,9	71,5	71	71	71,2
3	67,5	67,5	66	67	69,5	68,3	68	68,6	69	68,5	68,5	68,7
Média Geral				69	Média Geral			69,8	Média Geral			69,9

Fonte: próprio autor.

A Tabela 3, apresenta os valores da média geral obtidos para cada faixa de revenimento, analisados de acordo com a região e o desvio padrão.

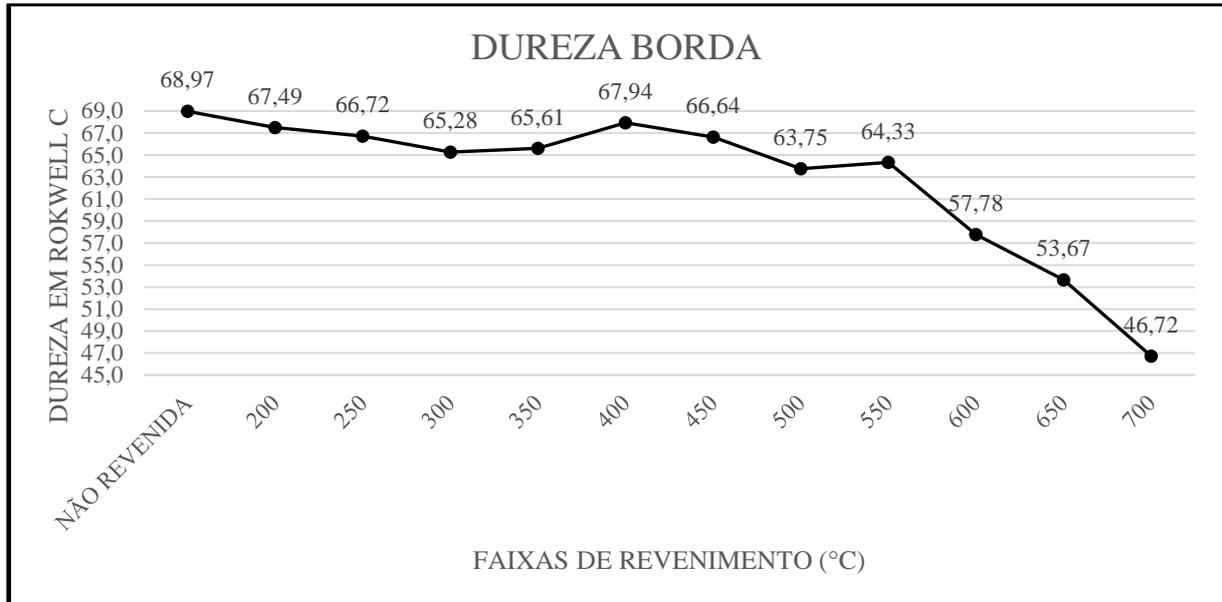
Tabela 3 – Valores médios de dureza (HRC) para cada faixa de revenimento.

TEMPERATURA DE REVENIMENTO (°C)	DUREZA RAI0		DUREZA MEIO RAI0		DUREZA CENTRO	
	MÉDIA (μ)	DESVIO PADRÃO (σ)	MÉDIA (μ)	DESVIO PADRÃO (σ)	MÉDIA (μ)	DESVIO PADRÃO (σ)
0	69,0	1,8	69,8	1,1	69,9	1,1
200	67,5	0,1	67,3	0,1	67,2	0,2
250	66,7	2,0	67,1	1,6	67,0	1,6
300	65,3	1,8	65,8	1,3	65,9	1,4
350	65,6	1,8	64,7	2,5	65,5	2,1
400	67,9	0,7	67,9	0,7	67,9	0,7
450	66,6	1,7	66,7	1,9	67,1	1,2
500	63,8	1,3	64,1	0,8	64,4	0,5
550	64,3	1,9	65,6	1,2	65,8	1,2
600	57,8	0,9	58,2	0,9	58,6	0,9
650	53,7	1,4	52,9	1,4	53,3	1,3
700	46,7	2,5	46,4	2,1	48,3	0,8

Fonte: próprio autor.

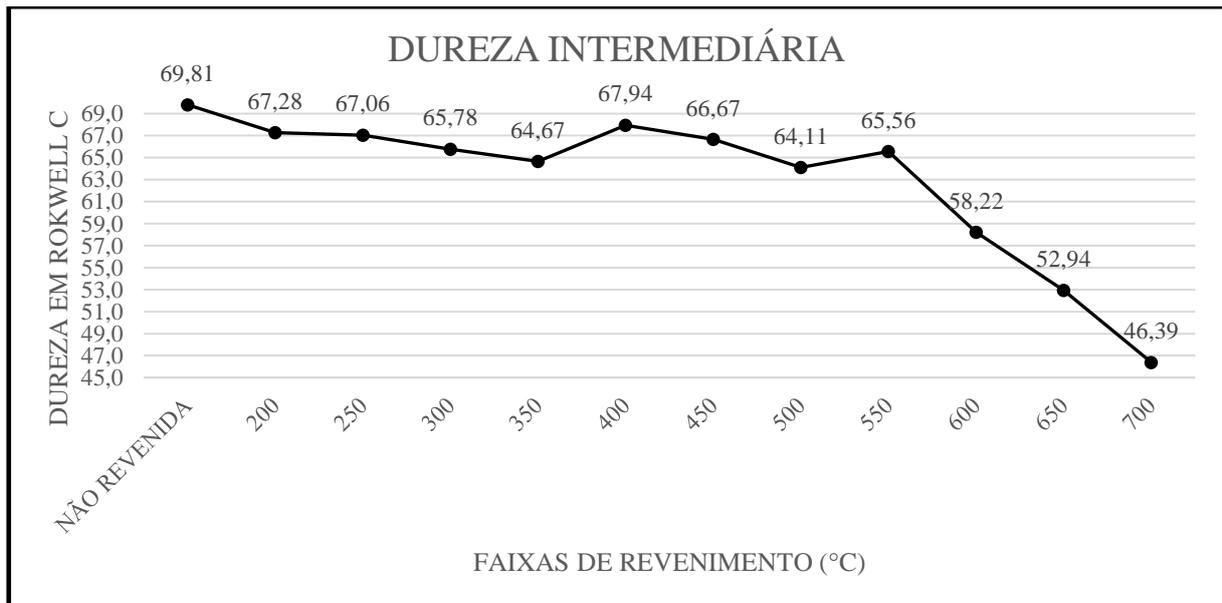
As Figuras 9, 10 e 11 apresentam as curvas de revenimento, respectivamente na região do raio, meio raio e centro para cada faixa de temperatura.

Figura 9 – Curva de revenimento para os valores de dureza no raio das amostras.



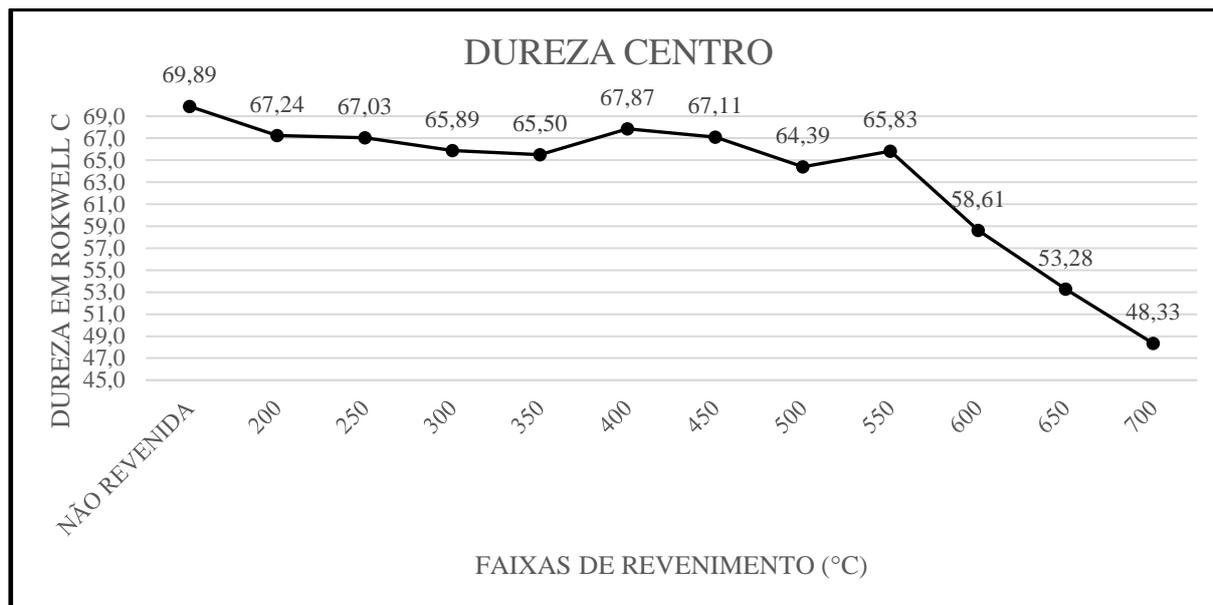
Fonte: próprio autor.

Figura 10 - Curva de revenimento para os valores de dureza no meio raio das amostras.



Fonte: próprio autor.

Figura 11 - Curva de revenimento para os valores de dureza no centro das amostras.



Fonte: próprio autor.

Considerando o estado inicial, observa-se que a têmpera aumenta consideravelmente a dureza do material, devido a presença de uma matriz martensítica. As faixas de temperatura de revenimento aplicadas tem o objetivo de corrigir a dureza excessiva da estrutura martensítica e melhorar a ductilidade e a tenacidade do material.

A queda de dureza nas faixas de temperatura de 200°C até 350°C, de 450°C, de 500°C, 600°C até 700°C é decorrente dos alívios de tensões na matriz martensítica, transformando a martensita em martensita revenida. Durante o revenimento o principal fenômeno que ocorre é a precipitação de carbonetos, conforme citado por Farina (2011), que causa uma retirada extensa de carbono da martensita e a consequente perda da tetragonalidade de sua estrutura cristalina, aproximando-se de uma célula unitária cúbica. Verifica-se, nas amostras que a dureza do aço teve picos nas temperaturas de 400°C e 550°C, isso ocorre possivelmente devido à precipitação de carbonetos secundários.

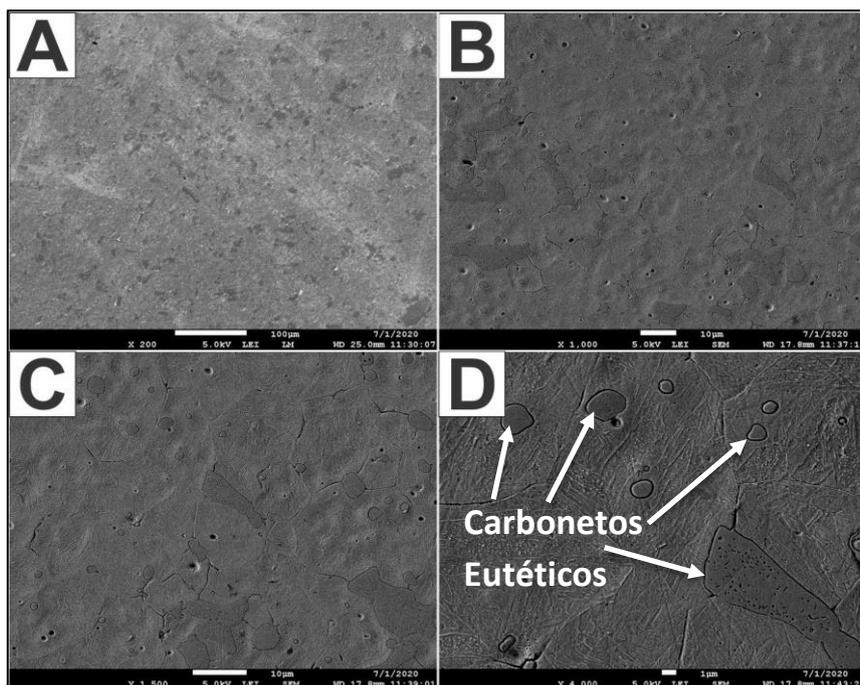
O pico de dureza que ocorre na temperatura de 550°C é sistemático, e verifica-se os mesmos resultados em temperaturas próximas nas curvas de revenimento nos trabalhos de Weber *et al* (2010) e Pellizari *et al* (2002), vide anexos I e II respectivamente. Conforme comentário de Pellizari *et al* (2002), próximo a 500°C carbonetos nanométricos de Cromo e Molibdênio precipitam da austenita retida. O pico de dureza na temperatura de 400°C não é um fator comum, possivelmente aconteceu devido ao rápido resfriamento após o revenimento, no artigo de Weber *et al* (2010) também ocorreu o endurecimento em temperatura próxima, no entanto, não é explicado a maneira do resfriamento após o revenimento.

3.2 SÉRIE DE EXPERIMENTOS PARA CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL

A Figura 11 apresenta as imagens obtidas por MEV com elétrons secundários, para a amostra que foi apenas temperada, verifica-se a martensita, carbonetos eutéticos e primários, provavelmente do tipo M_7C_3 , conforme pesquisas realizadas por Farina (2011). Para aços com elevada concentração de carbono, a martensita apresenta o formato de placas, conforme observação de Krauss e Marder (1971). Na sequência, a Figura 12 mostra a microestrutura com maior escala na ampliação de 4000 vezes, de modo que permite uma melhor visualização da matriz e dos carbonetos.

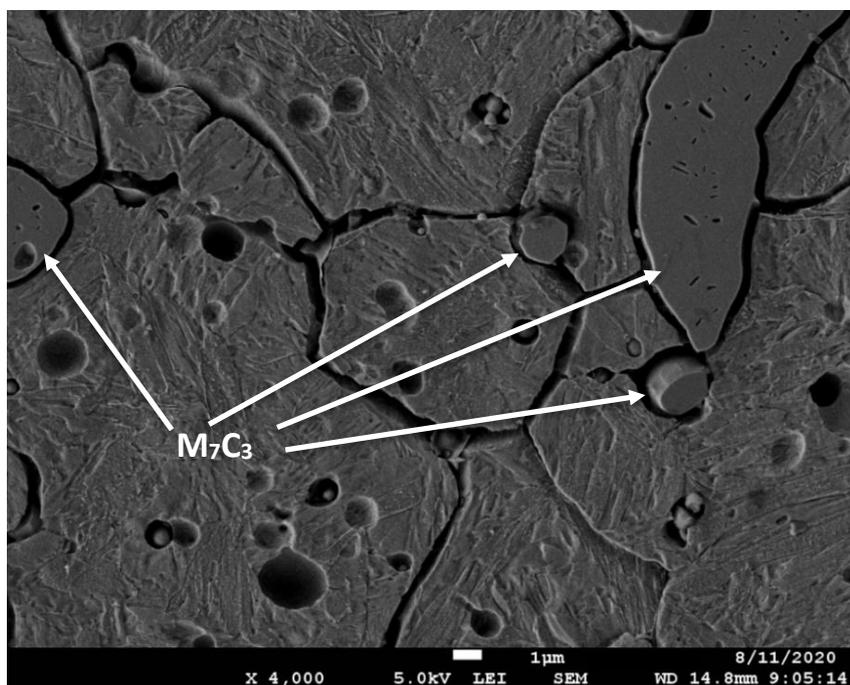
Conforme a microscopia de Cintia (2015), a amostra apenas temperada (vide anexo III), encontra-se com uma matriz semelhante ao da Figura 12, composta por carbonetos eutéticos e matriz martensítica. O processo de austenitização foi feito a 1100 °C por um período de 60 minutos e resfriado em óleo, de modo que a matriz não apresentou diferença em relação a amostra deste trabalho. A autora nomeia os carbonetos como $M_{23}C_6$ e MC, baseado na literatura de Vitry *et al* (2011), a mesma realizou seus difratogramas (vide anexo IV) utilizando um difratômetro de raios-X, porém este equipamento não apresenta a mesma precisão de uma análise feita com luz síncrotron, conforme realizado por Farina (2011).

Figura 8 - Microestrutura da Amostra apenas temperada (A) 200 vezes ampliada (B) 1000 vezes ampliada (C) 1500 vezes ampliada (D) 4000 vezes ampliada. Aço AISI D2. Ataque: Nital 2%. MEV (elétrons secundários).



Fonte: próprio autor.

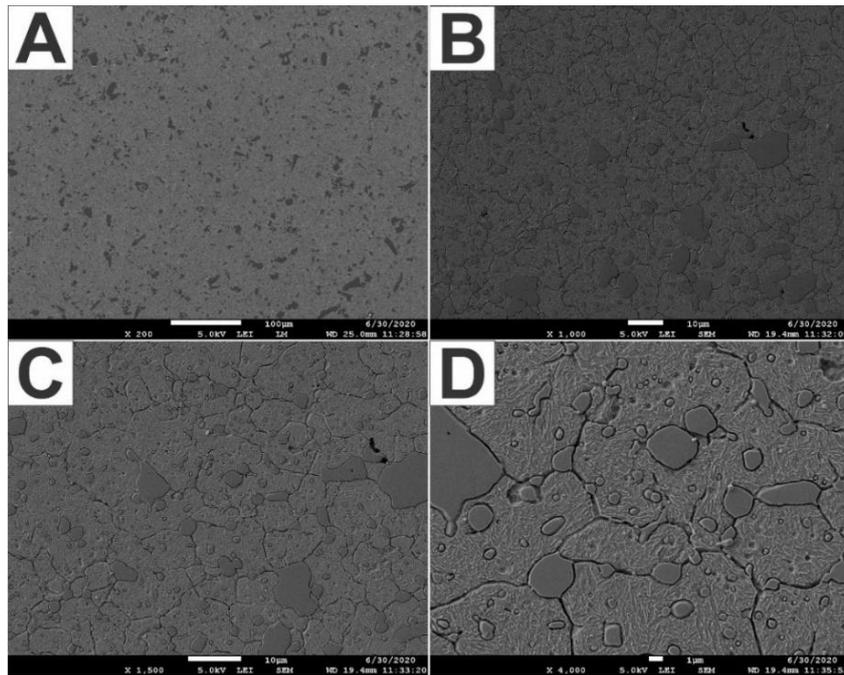
Figura 12 - Microestrutura da Amostra apenas temperada com ampliação de 4000 vezes. Aço AISI D2. Ataque: Nital 2%. MEV (elétrons secundários).



Fonte: próprio autor.

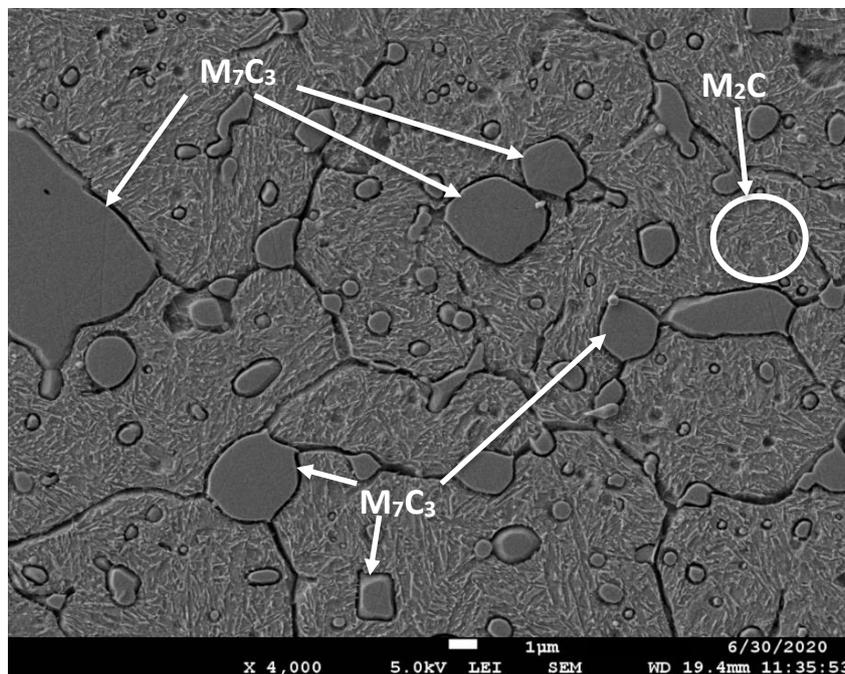
A Figura 13 apresenta as imagens obtidas por MEV com elétrons secundários, para a amostra que foi revenida a temperatura de 300°C, verifica-se a martensita em forma de placas, carbonetos eutéticos e secundários de revenido. Na sequência, a Figura 14 mostra a microestrutura com uma ampliação de 4000 vezes, de modo que permite uma melhor visualização da matriz e dos carbonetos, nesta figura é possível observar grandes quantidades de carbonetos provavelmente do tipo M_7C_3 e carbonetos nanométricos de revenido provavelmente do tipo M_2C , que se localizam dentro da marcação de linha cheia em branco.

Figura 13 - Microestrutura da Amostra revenida a 300°C. Indicados carbonetos presentes na estrutura. (A) 200 vezes ampliada (B) 1000 vezes ampliada (C) 1500 vezes ampliada (D) 4000 vezes ampliada. Aço AISI D2. Ataque: Nital 2%. MEV (elétrons secundários).



Fonte: próprio autor.

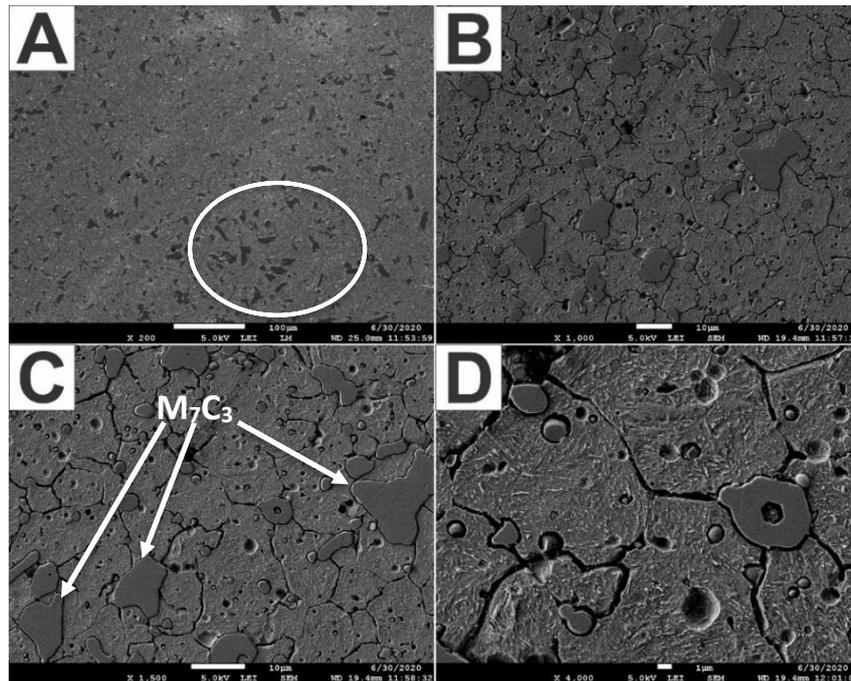
Figura 14 - Microestrutura da Amostra revenida em 300°C por 60 minutos com ampliação de 4000 vezes. Aço AISI D2. Ataque: Nital 2%. MEV (elétrons secundários).



Fonte: próprio autor.

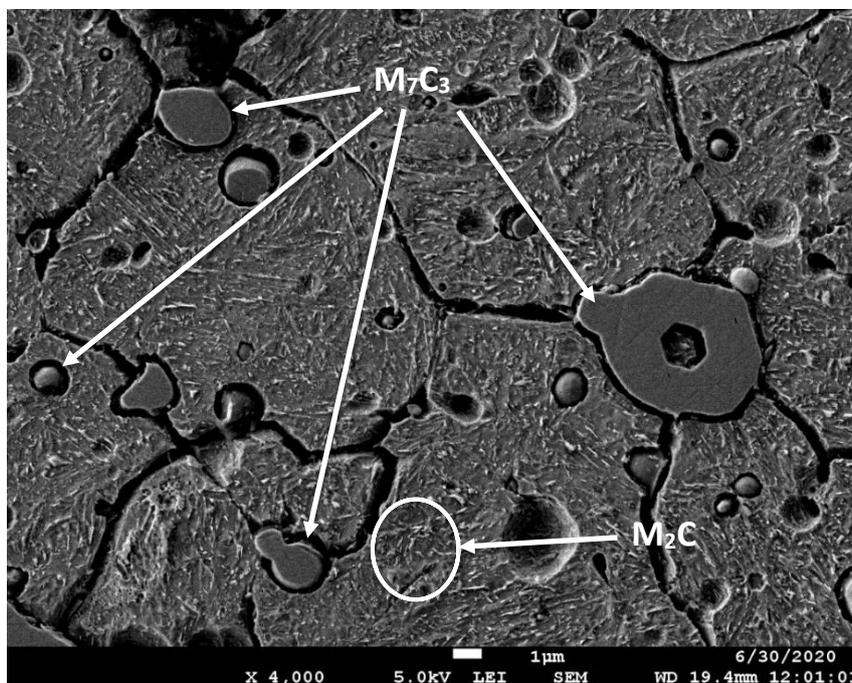
A Figura 15 apresenta as imagens obtidas por MEV com elétrons secundários, para a amostra que foi revenida a temperatura de 400°C, temperatura que teve um pico de dureza. É possível verificar a martensita, carbonetos eutéticos e secundários de revenido, visualiza-se na Figura 15(a) uma concentração de carbonetos provavelmente do tipo M_7C_3 dentro da marcação de linha cheia em branco. Na sequência, a Figura 16 mostra a microestrutura com uma ampliação de 4000 vezes, de modo que permite uma melhor visualização da matriz e dos carbonetos. Na Figura 16 é possível observar grandes quantidades de carbonetos secundários de revenido dentro da marcação de linha cheia em branco.

Figura 15 - Microestrutura da Amostra revenida a 400°C. Setas Brancas apontam os carbonetos eutéticos presentes na matriz martensítica (A) 200 vezes ampliada (B) 1000 vezes ampliada (C) 1500 vezes ampliada (D) 4000 vezes ampliada. Aço AISI D2. Ataque: Nital 2%. MEV (elétrons secundários).



Fonte: próprio autor.

Figura 16 - Microestrutura da Amostra revenida em 400°C por 60 minutos com ampliação de 4000 vezes. Aço AISI D2. Ataque: Nital 2%. MEV (elétrons secundários).



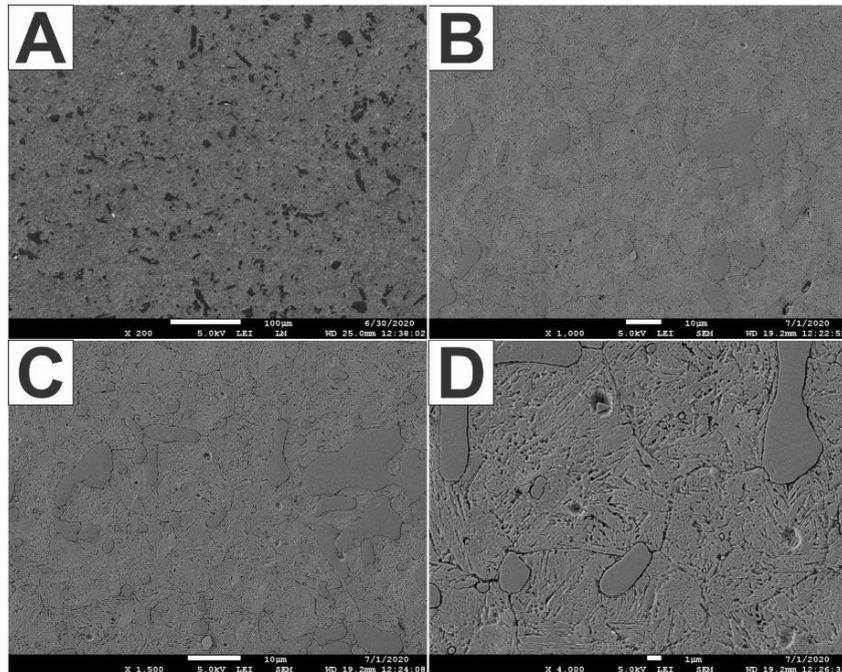
Fonte: próprio autor.

A Figura 17 apresenta as imagens obtidas por MEV com elétrons secundários, para a amostra que foi revenida a temperatura de 550°C, cujos resultados revelaram um aumento de dureza pronunciado. É possível verificar a martensita, carbonetos eutéticos e primários e carbonetos secundários de revenido. Na sequência, a Figura 18 mostra a microestrutura com uma ampliação de 4000 vezes, de modo que permite uma melhor visualização da matriz e dos carbonetos. Na Figura 18 observa-se carbonetos provavelmente do tipo M_2C e M_7C_3 . Nas ampliações obtidas, não se observam quantidades

relevantes de carbonetos secundários de revenido, que são os responsáveis pelo pico de dureza secundário, no entanto, para se obter detalhes desses carbonetos nanométricos deve-se recorrer à outras técnicas de microscopia, como MEV-FEG ou microscopia eletrônica de transmissão (MET), por exemplo, o que está além da proposta deste trabalho.

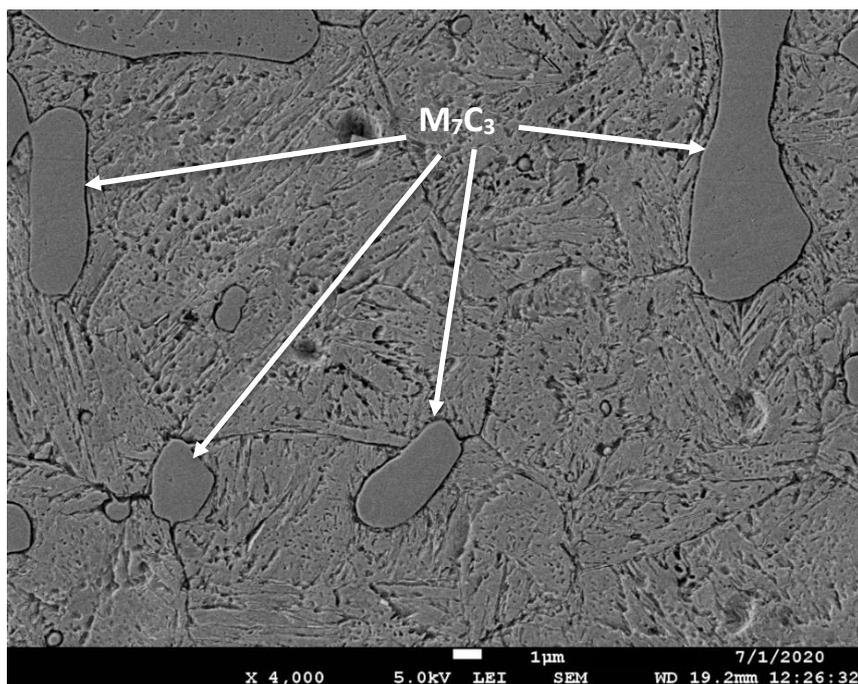
Conforme verificado na microscopia relatada por Cintia (2015), a matriz apresenta carbonetos globulares e muitas martensitas em formato de ripas cruzadas (vide anexo V). Segundo a autora, a amostra de 550°C também teve pico de dureza, é comentado que isso ocorre devido aos carbonetos secundário, no entanto, não se comenta sobre o tipo específico do carboneto.

Figura 17 - Microestrutura da Amostra revenido a 550°C (A) 200 vezes ampliada (B) 1000 vezes ampliada (C) 1500 vezes ampliada (D) 4000 vezes ampliada. Aço AISI D2. Ataque: Nital 2%. MEV (elétrons secundários).



Fonte: próprio autor.

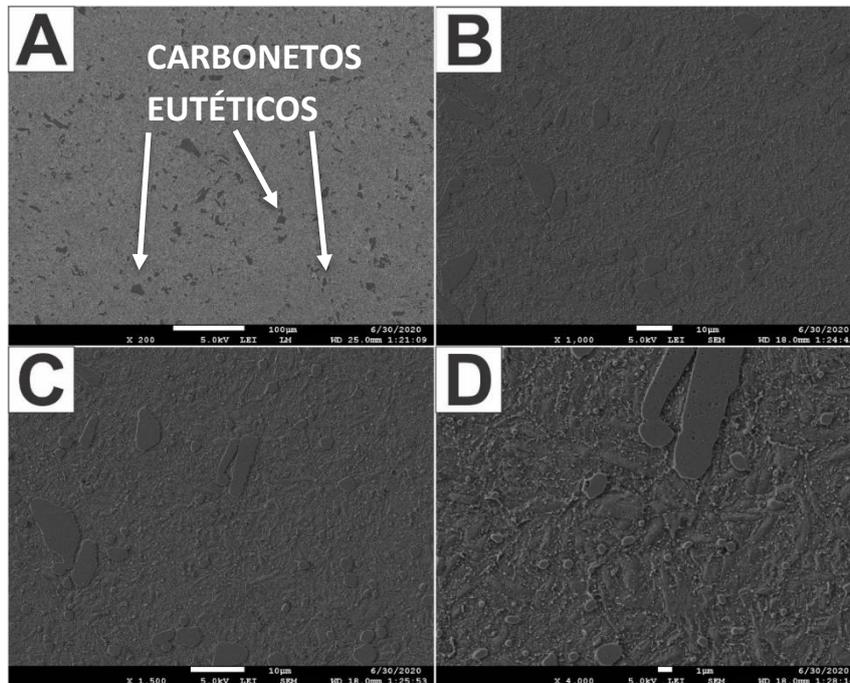
Figura 18 - Microestrutura da Amostra revenida em 550°C por 60 minutos com ampliação de 4000 vezes. Aço AISI D2. Ataque: Nital 2%. MEV (elétrons secundários).



Fonte: próprio autor.

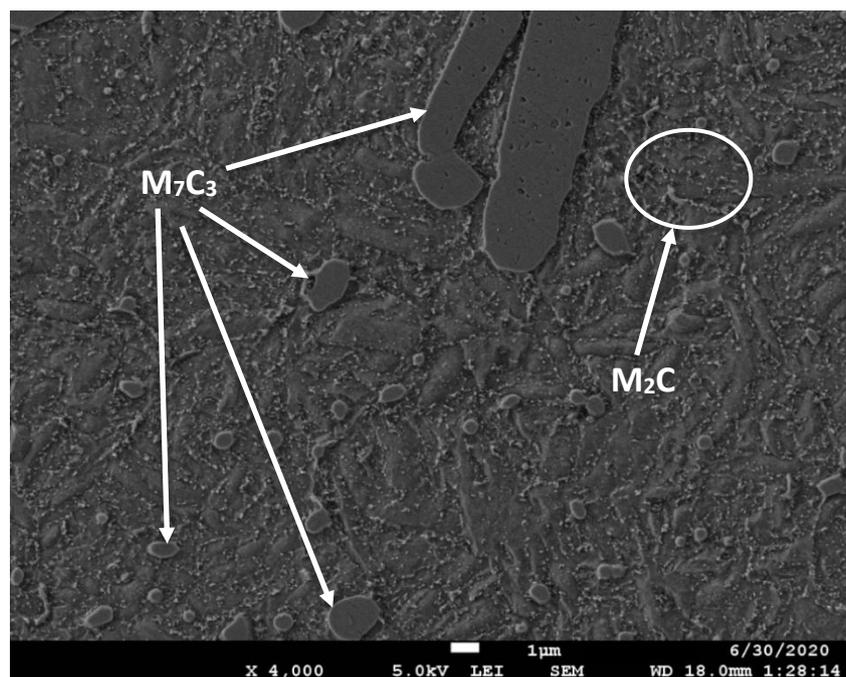
A Figura 19 apresenta as imagens obtidas por MEV com elétrons secundários, para a amostra que foi revenida em uma temperatura de 700°C, onde é possível verificar a martensita, carbonetos eutéticos e secundários de revenido. Na Figura 19 (a) se observa uma baixa concentração de carbonetos do tipo M_7C_3 , se comparado com as demais amostras, porém a redução da dureza é consequência da martensita revenida. Na sequência, a Figura 20 mostra a microestrutura com uma ampliação de 4000 vezes, de modo que permite uma melhor visualização da matriz e dos carbonetos, nesta figura é possível observar carbonetos do tipo M_7C_3 e M_2C , o último dentro da marcação de linha cheia em branco.

Figura 19 - Microestrutura da Amostra revenido a 700°C (A) 200 vezes ampliada (B) 1000 vezes ampliada (C) 1500 vezes ampliada (D) 4000 vezes ampliada. Aço AISI D2. Ataque: Nital 2%. MEV (elétrons secundários).



Fonte: próprio autor.

Figura 20 - Microestrutura da Amostra revenida em 700°C por 60 minutos com ampliação de 4000 vezes. Aço AISI D2. Ataque: Nital 2%. MEV (elétrons secundários).

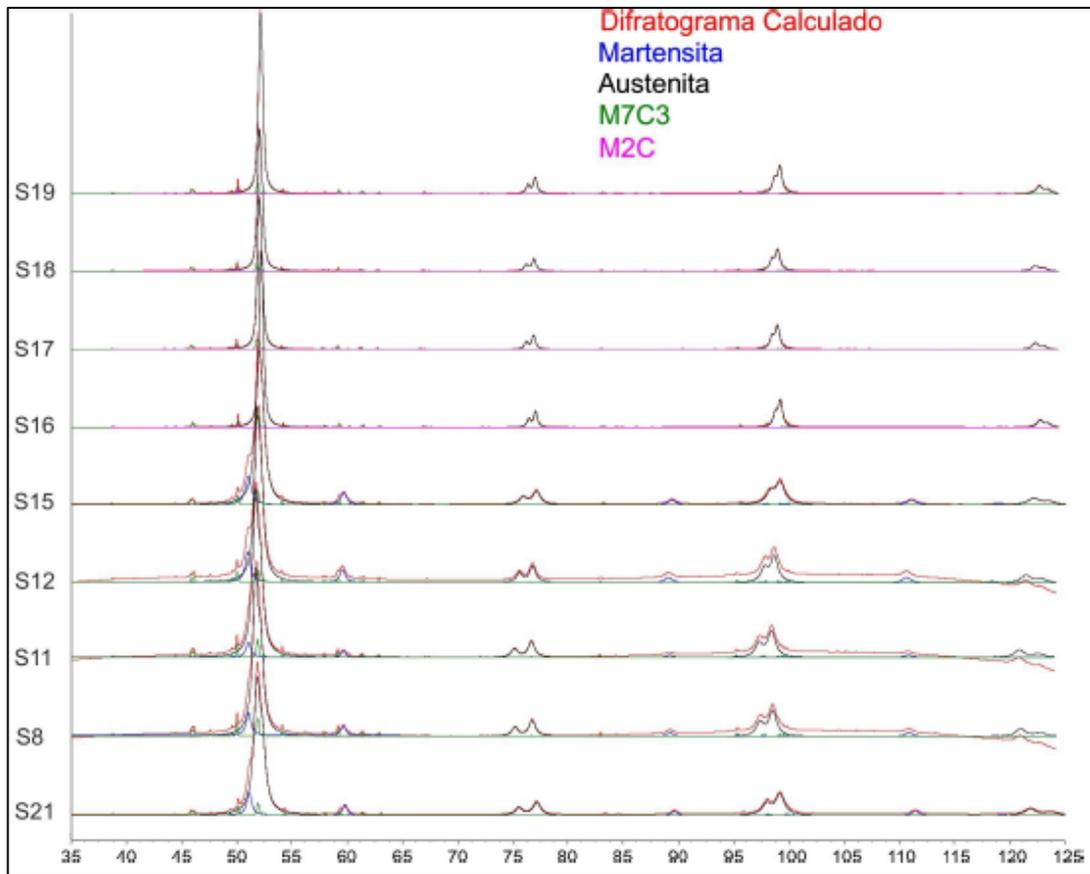


Fonte: próprio autor

Pelo motivo da limitação de páginas deste artigo, as imagens de microscopia eletrônica das demais amostras serão inseridas nos anexos de VI até XII, em ordem crescente e usando como referência as temperaturas de revenimento.

Em geral, observa-se por meio da microscopia do aço AISI D2 há uma matriz predominante de martensítica, conforme já observado por Farina (2011). Através de difratogramas é possível supor as fases presentes na matriz dessas amostras, conforme Figura 21, é possível relatar a existência de carbonetos, martensita e austenita retida (conforme verificado em diversos trabalhos, mesmo utilizando-se o tratamento criogênico não é possível eliminar toda a austenita). Os difratogramas realizados através de luz síncrotron conseguem identificar os tipos de carbonetos, sendo eles: M_2C e M_7C_3 .

Figura 21 – Difratogramas realizado com luz síncrotron para amostra do aço ferramenta AISI D2



Fonte: Farina, 2011

Conforme relatado por Farina (2011), os carbonetos do tipo M_2C estão presentes apenas nas amostras que passaram por revenimento, conforme a Tabela 4, e apenas as amostras que contém “+R” foram as que passaram por este processo, isso justifica que esses são carbonetos de revenido.

Tabela 4 – Valores em percentuais para as quantidades de carbonetos em amostras.

Amostra		M ₇ C ₃				M ₂ C		
		a	b	c	%	a	c	%
R	(S20)	4,503	7,013	12,115	9,35	-	-	-
T	(S21)	4,503	6,985	12,157	5,75	-	-	-
T+TC/3	(S6)	4,501	7,067	12,061	6,93	-	-	-
T+TC/10	(S7)	4,506	7,007	12,086	6,26	-	-	-
T+TC/30	(S8)	4,506	7,006	12,084	6,24	-	-	-
T+SZ/3	(S9)	4,503	7,012	12,090	6,15	-	-	-
T+SZ/10	(S10)	4,509	7,008	12,088	6,09	-	-	-
T+SZ/30	(S11)	4,506	7,003	12,083	6,03	-	-	-
T+AT	(S12)	4,506	7,014	12,068	5,27	-	-	-
T+AT+TC/3	(S13)	4,505	7,014	12,071	4,89	-	-	-
T+AT+TC/10	(S14)	4,511	7,033	12,123	6,07	-	-	-
T+AT+TC/30	(S15)	4,512	7,035	12,125	6,18	-	-	-
T+AT+TC/30+R	(S16)	4,500	7,001	12,102	6,92	2,780	4,376	0,76
T+TC/30+R	(S17)	4,507	7,020	12,122	7,46	2,787	4,394	1,10
T+AT+R	(S18)	4,507	7,024	12,131	6,63	2,793	4,360	0,48
T+R	(S19)	4,500	7,004	12,103	7,58	2,783	4,359	0,93

Fonte: Adaptado de FARINA, 2011

Neste artigo não é possível observar a austenita retida nas imagens de microscopia, devido ao reagente utilizado. Para visualizar a austenita retida seria necessário utilizar Vilella Bain, que ataca preferencialmente a martensita em relação a austenita.

4. CONCLUSÃO

De acordo com o estudo realizado neste trabalho, para o aço ferramenta para trabalho a frio AISI D2, através do tratamento térmico de têmpera, foi possível observar a ocorrência da transformação martensítica, conforme esperado.

Para aprimorar as propriedades mecânicas, essencialmente a tenacidade e ductibilidade do aço temperado, foi aplicado o tratamento térmico de revenimento em diversas faixas de temperaturas.

A condição apenas temperada foi a que obteve o maior valor de dureza, chegou em 69,9 HRC no centro da amostra, isso ocorre devido a formação de martensita que é super saturada em carbono. Além disso, ocorre a transformação na estrutura do material em TCC, de modo que essa transformação gera altas tensões internas, deixando o frágil.

A amostra que foi revenida a 200°C obteve uma dureza de 67,2 HRC no centro da amostra, apresentando-se com baixa redução da dureza, isso ocorre pelo motivo de haver pouca transformação da matriz em martensita revenida. Também é possível observar um aumento na quantidade de carbonetos sobre a matriz, devido à difusão que ocorre no revenimento, já que os carbonetos que sofreram a difusão precipitam-se sob a matriz.

Para a amostra que foi revenida a 700°C, o valor de dureza foi de 48,3 HRC no centro da amostra, com uma temperatura maior, a quantidade de energia fornecida também aumenta, deste modo, uma alta fração volumétrica da matriz se transforma em martensita revenida, reduzindo a dureza do material, mas com ganhos em outras propriedades mecânicas.

Analisando o pico de dureza da amostra revenida de 400°C, pode-se observar que o mesmo não é comum. Já para a amostra revenida a 550°C é sistêmico, e ocorreu em todos os trabalhos analisados, conforme dados da literatura discutidos ao longo deste trabalho. O pico de dureza é conhecido como endurecimento secundário, e ocorre devido a difusão acentuada de carbono da matriz martensítica e da austenita retida metaestável, precipitando-se sob a forma de finos carbonetos sobre a matriz. A partir da temperatura de revenimento de 550°C, ocorreu uma queda brusca da dureza em virtude de uma maior intensidade de precipitação de carbonetos.

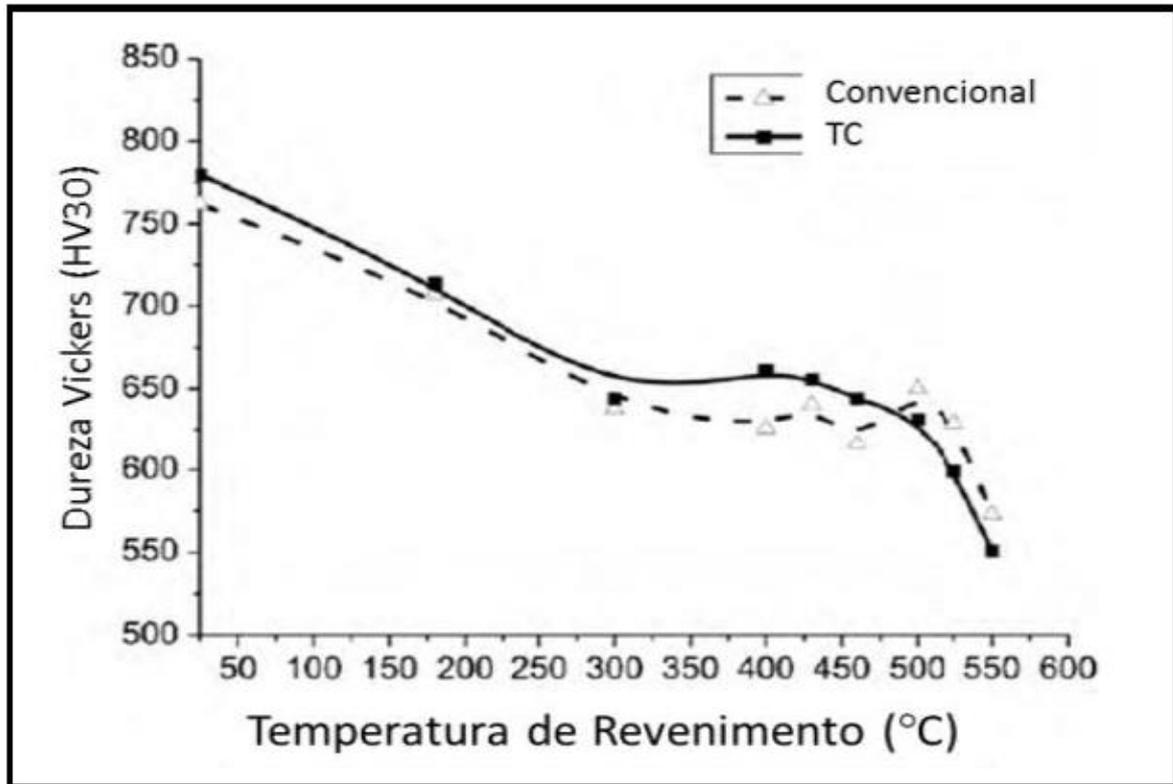
Através das análises microestruturais, foi possível verificar a matriz martensítica, os carbonetos eutéticos e os carbonetos de revenido, porém para uma melhor visualização dos carbonetos de revenido, seria necessário maiores ampliações, constatando que são de tamanhos nanométricos (recomenda-se a microscopia eletrônica de transmissão).

Com isso, pode-se definir uma aplicação correta do material baseando-se na curva de revenimento, de modo que, verifica-se a melhor dureza para a aplicação desejada, evitando-se problemas.

5. REFERÊNCIAS

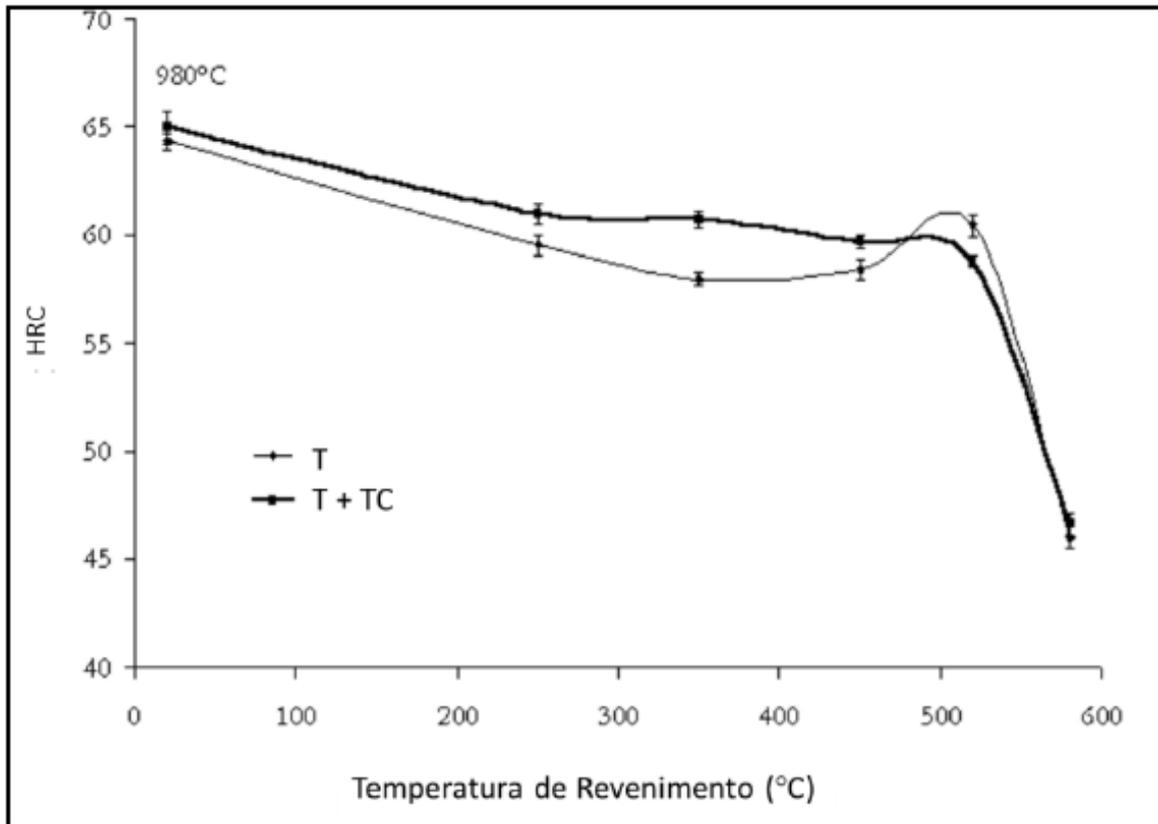
- BRAGA, C. **Análise da dureza e microestrutura dos aços AISI D2 e D6 submetidos a têmpera convencional e tratamento criogênico**. 2015. 67 p. Monografia (Graduação Engenharia de Materiais). Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Departamento de Engenharia de Materiais, Belo Horizonte, 2015.
- CALLISTER, W. D. **Fundamentos da Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Abordagem Integrada**. 2ª edição, Rio de Janeiro: LTC, 2013.
- CHIAVERINI, Vicente, **Aços e ferro fundidos**. 7ª edição, Rio de Janeiro: Assoc. Brasileira de Metais, 2012.
- COSTA, A. L.; MEI, S. P. R. **Aços e ligas especiais**. 2ª edição, Sumaré, SP: Eletrometal S.A. Metais Especiais, 1988.
- DEDAVID, B.; GOMES, C; MACHADO G. **Microscopia eletrônica de varredura - Aplicações e preparação de amostras**., Porto Alegre: EDIPUCRS, 2007.
- FANTINI, C. A. **Efeito do tratamento de alívio de tensões no ciclo térmico de um aço matriz AISI D2 contendo etapa criogênica**. 2019. 115 p. Tese (Mestrado em Engenharia na Área Metalúrgica e de Materiais). Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, Faculdade de Engenharia Mecânica, Campinas, 2019.
- FARINA, P. F. D. S. **Efeito das adições de tratamentos criogênicos e de alívio de tensões no ciclo térmico do aço ferramenta AISI D2**. 2011. 122 p. Tese (Doutorado em Engenharia na Área Metalúrgica e de Materiais). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – EPUSP, São Paulo, 2011.
- GARCIA, A.; SPIM, J. A.; SANTOS, C. **Ensaio dos Materiais**, 2 ed., Rio de Janeiro: LTC- Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda., 2012.
- KRAUSS, G.; MARDER, A. R. The morphology of martensite in iron alloys. **Metallurgical Transactions**, v. 2, p. 2343-2357, 1971.
- PELLIZARI, M.; MOLINARI, A. **DEEP CRYOGENIC TREATMENT OF COLD WORK TOOL STEEL**. University of Trento, Itália. p. 657-669, 2002.
- SOUSA, S. A., **Ensaio mecânicos de materiais metálicos - Fundamentos teóricos e práticos**, 5ª ed., São Paulo: Edgard Blücher Ltda, 1982.
- VILLARES METALS. **Catálogo técnico aços ferramenta**. São Paulo, Brasil, 2003. Disponível em: <https://www.villaresmetals.com.br/villares/pt/Produtos/Acos-Ferramenta/Trabalho-a-frio/VD2>. Acesso em: 27 Abril 2020.
- VITRY, V.; NARDONE, S.; BREYER, J. -P.; SINNAEVE, M.; DELAUNOIS, F. Microstructure of two centrifugal cast high speed steels for hot strip mills applications. **Materials and Design**. v. 34. p. 372-378, 2011.
- WEBER, S.; OPPENKOWSKI, A; THEISEN, W. Evaluation of factors influencing deep cryogenic treatment that effect the properties of tool steels. **Journal of Materials Processing Technology**, p. 1949-1955, 2010.

ANEXO I – Figura 1 - Curvas de revenimento para amostras com austenitização a 980°C.



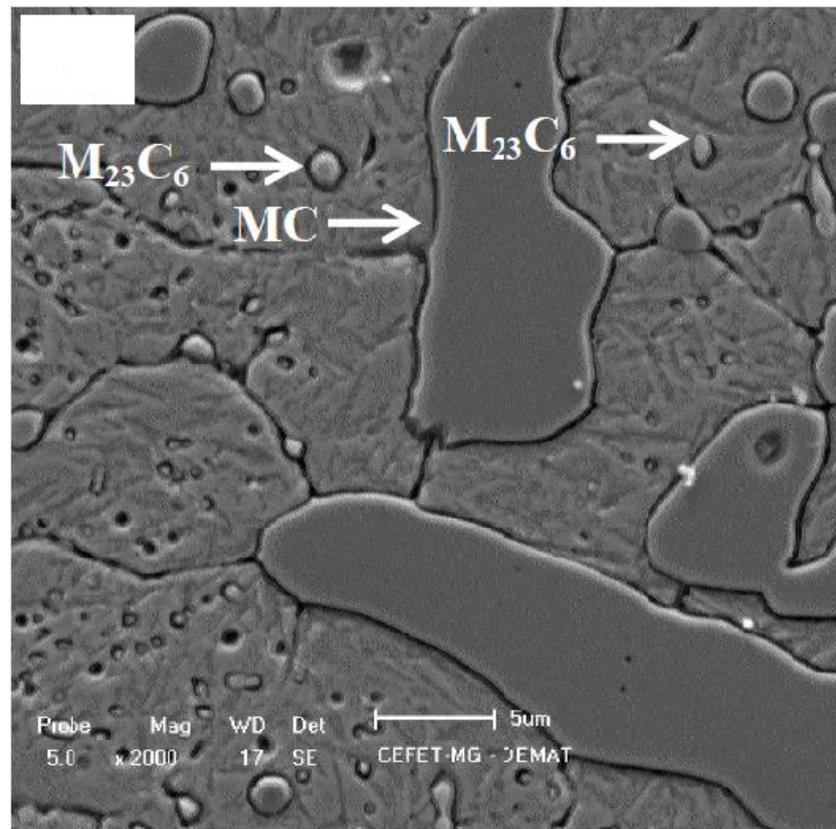
Fonte: WEBER, S. Journal of Materials Processing Technology, 2010.

ANEXO II – Figura 2 - Curvas de revenimento para um aço AISI D2 com austenitização a 980°C.



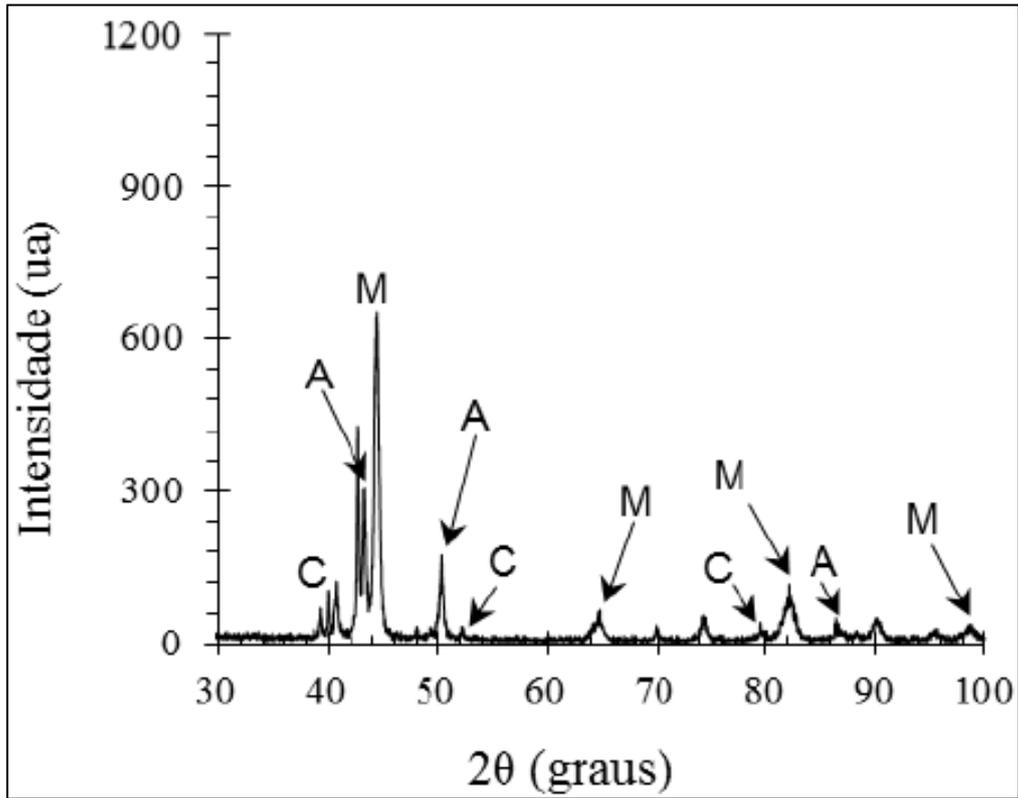
Fonte: PELLIZARI, M. Deep Cryogenic Treatment of Cold Work Tool Steel, 2002

ANEXO III – **Figura 3** - Microestrutura da Amostra apenas temperada 2000 vezes ampliada para aço AISI D2.
Ataque: Nital 3%.



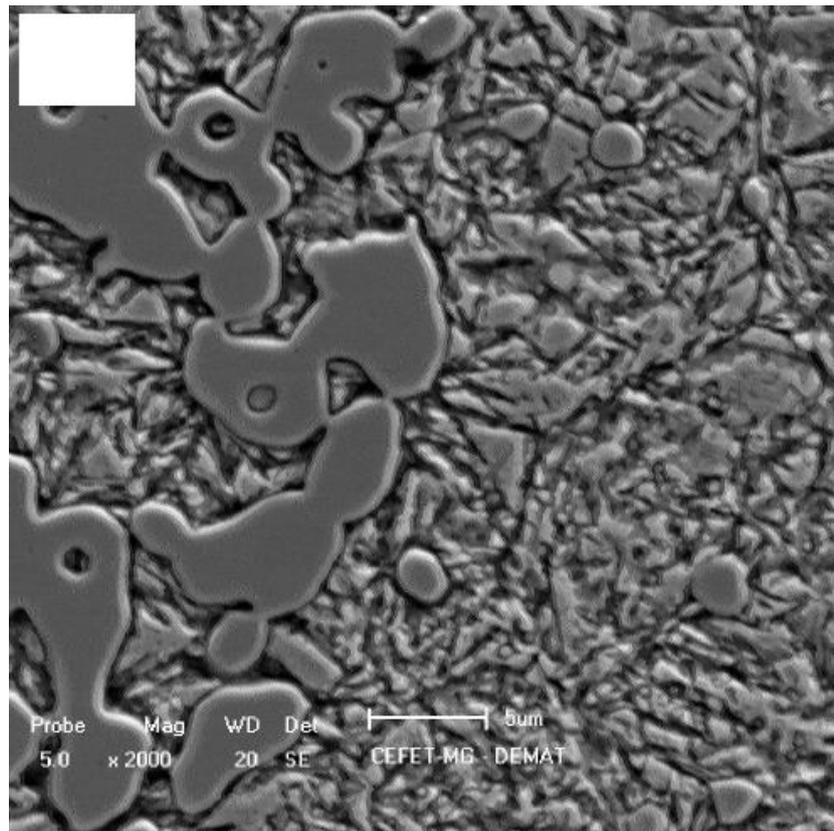
Fonte: Braga, C. Análise da Dureza e Microestrutura dos Aços AIDI D2 e AISI D6 Submetidos a Têmpera Convencional e Tratamento Criogênico, 2015.

ANEXO IV – **Figura 4** – Difratomogramas do aço AISI D2 para amostra apenas temperada a 1100°C.



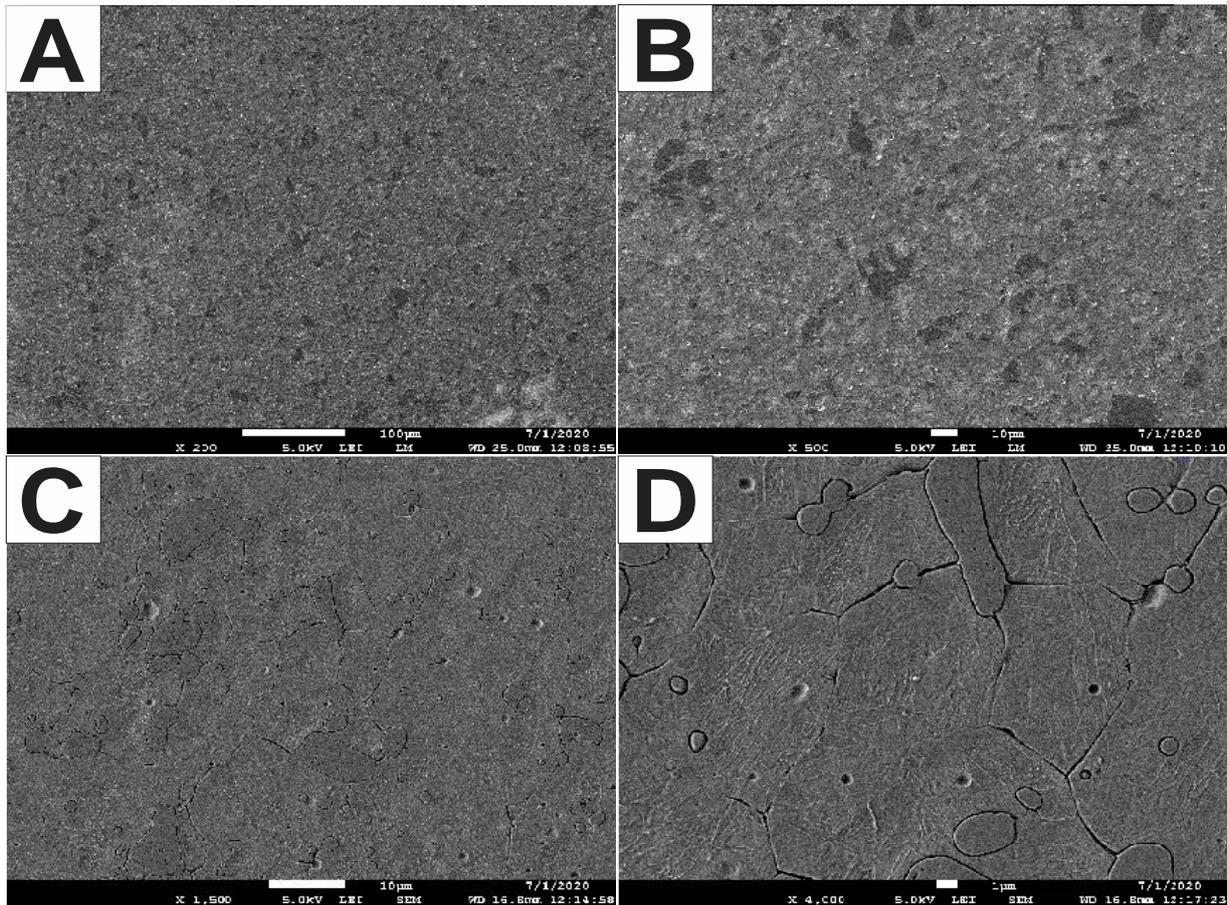
Fonte: Braga, C. Análise da Dureza e Microestrutura dos Aços AIDI D2 e AISI D6 Submetidos a Têmpera Convencional e Tratamento Criogênico, 2015.

ANEXO V – Figura 5 - Microestrutura da Amostra revenido a 550°C com ampliação de 2000 vezes ampliada para aço AISI D2. Ataque: Nital 3%.



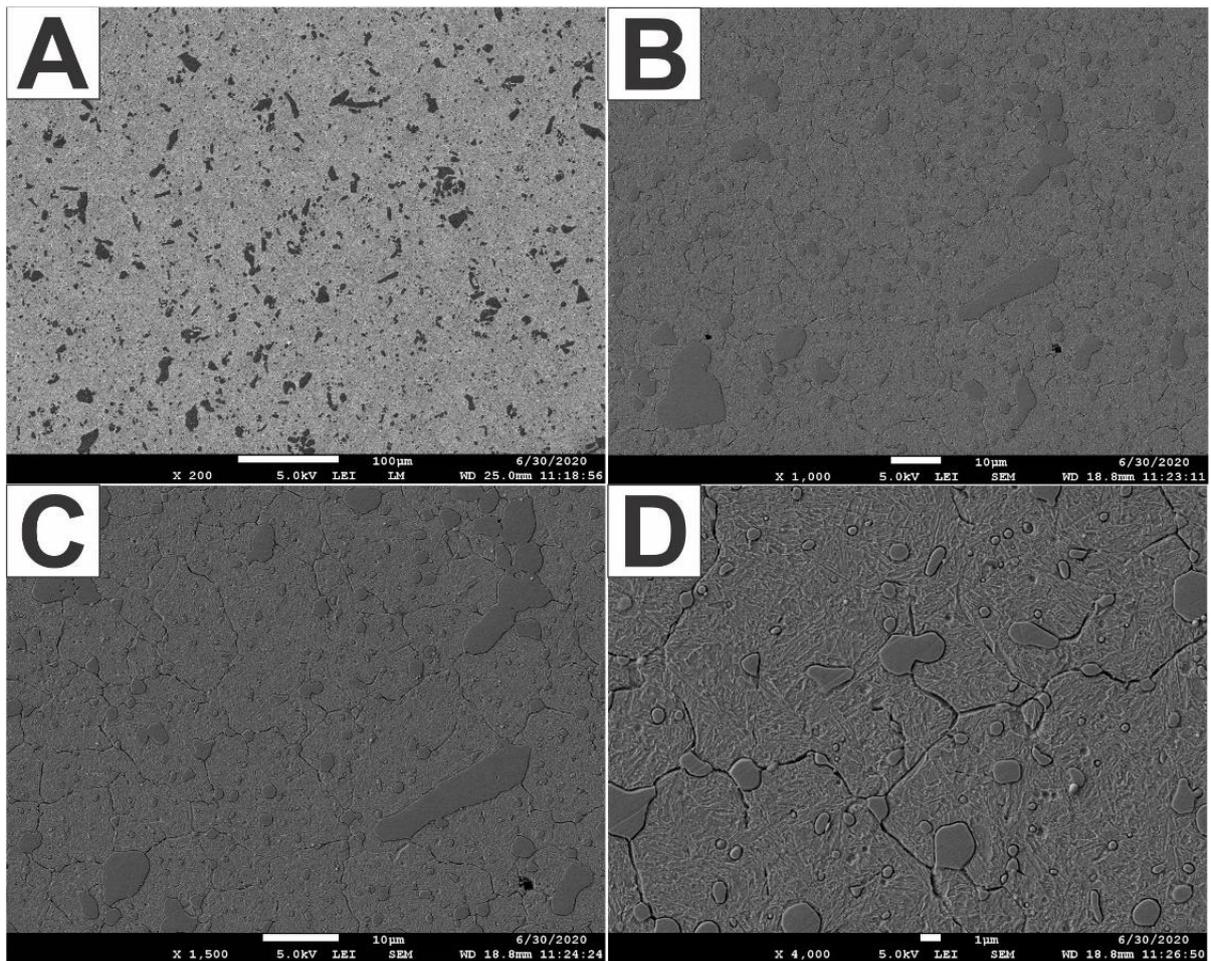
Fonte: Braga, C. Análise da Dureza e Microestrutura dos Aços AIDI D2 e AISI D6 Submetidos a Têmpera Convencional e Tratamento Criogênico, 2015.

ANEXO VI – Figura 6 - Microestrutura da Amostra revenida a 200°C por 60 minutos (A) 200 vezes ampliada (B) 1000 vezes ampliada (C) 1500 vezes ampliada (D) 4000 vezes ampliada. Aço AISI D2. Ataque: Nital 2%. MEV (elétrons secundários).



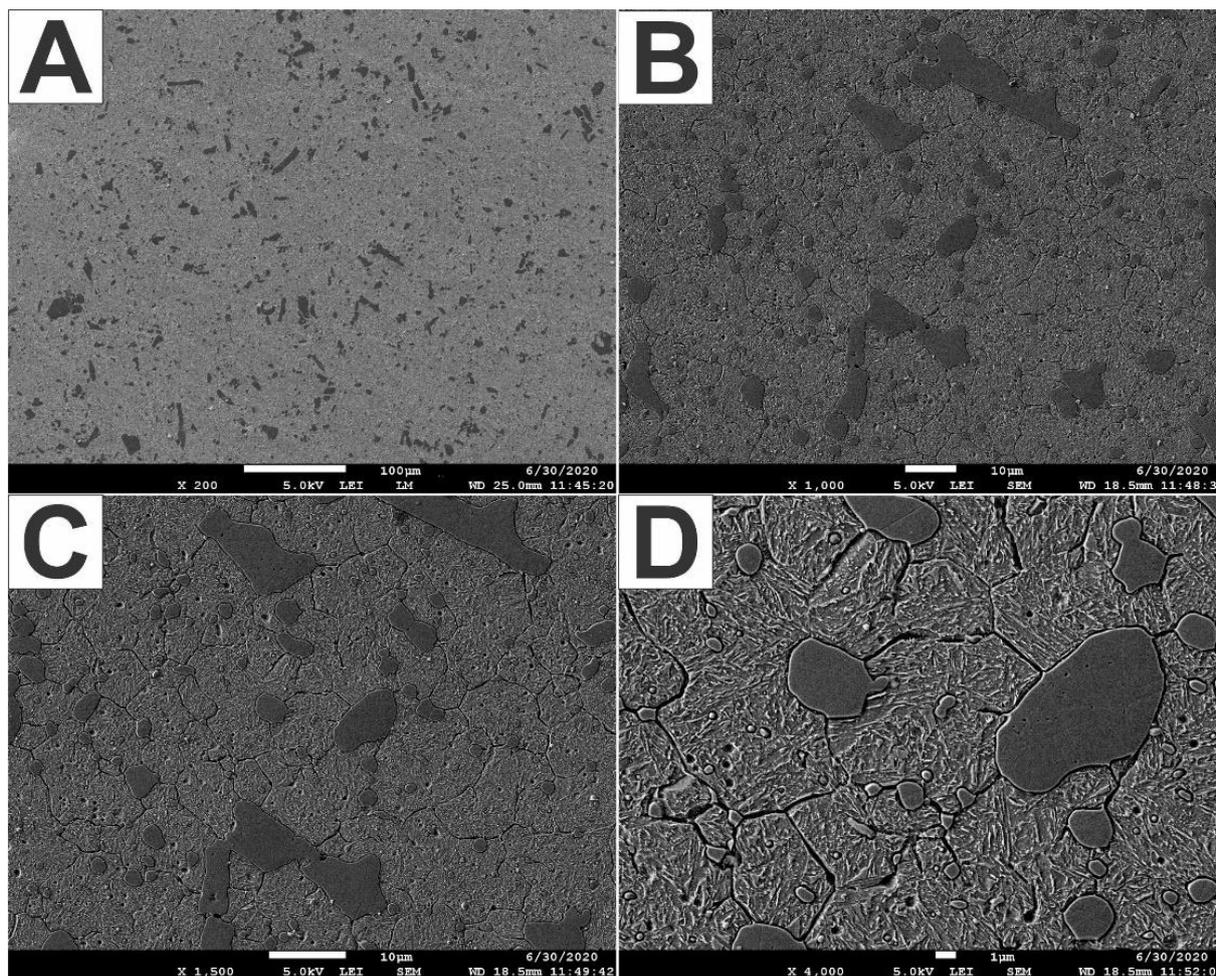
Fonte: próprio autor

ANEXO VII – Figura 7 - Microestrutura da Amostra revenido a 250°C (A) 200 vezes ampliada (B) 1000 vezes ampliada (C) 1500 vezes ampliada (D) 4000 vezes ampliada. Aço AISI D2. Ataque: Nital 2%. MEV (elétrons secundários).



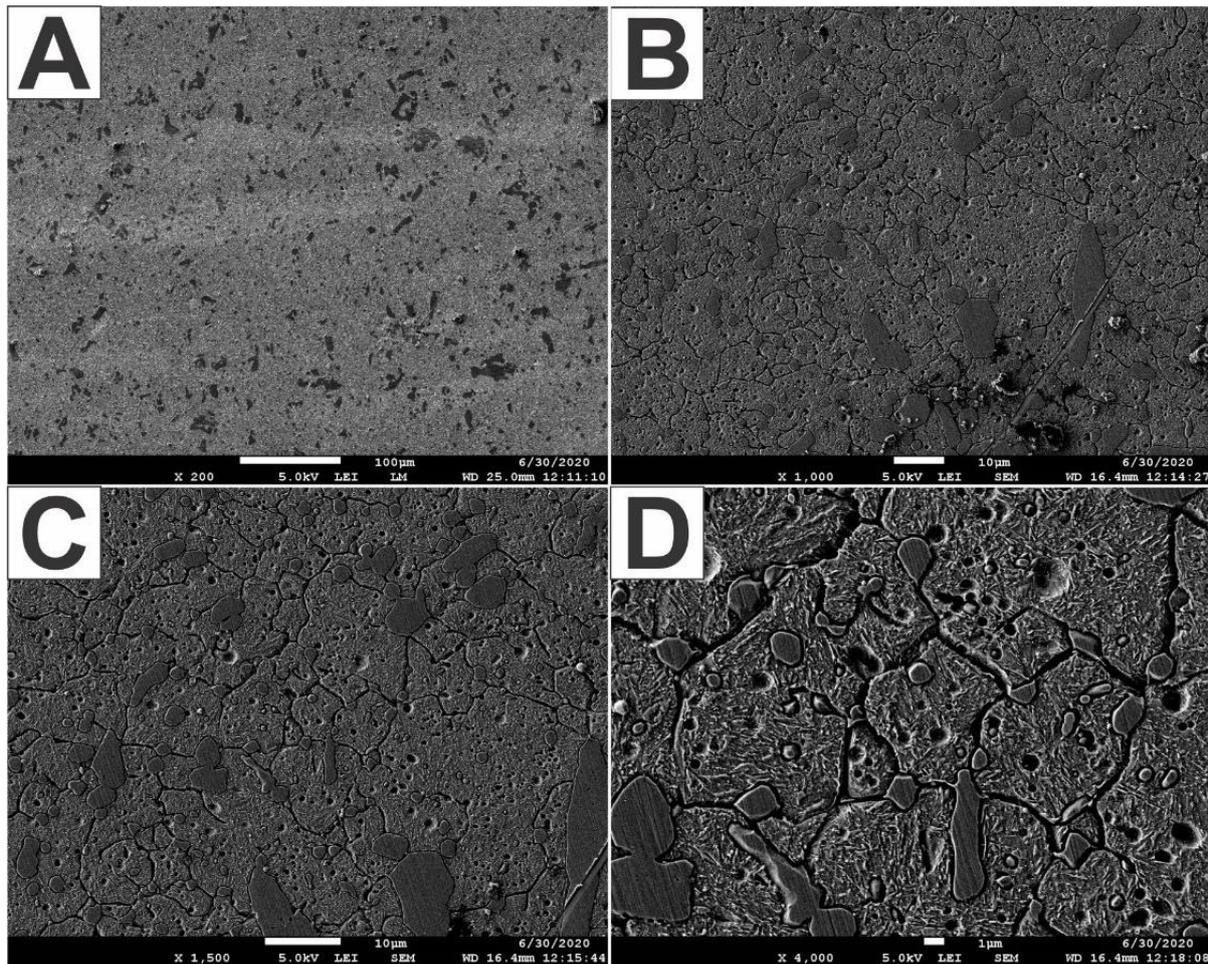
Fonte: próprio autor

ANEXO VIII – Figura 8 - Microestrutura da Amostra revenido a 350°C (A) 200 vezes ampliada (B) 1000 vezes ampliada (C) 1500 vezes ampliada (D) 4000 vezes ampliada. Aço AISI D2. Ataque: Nital 2%. MEV (elétrons secundários).



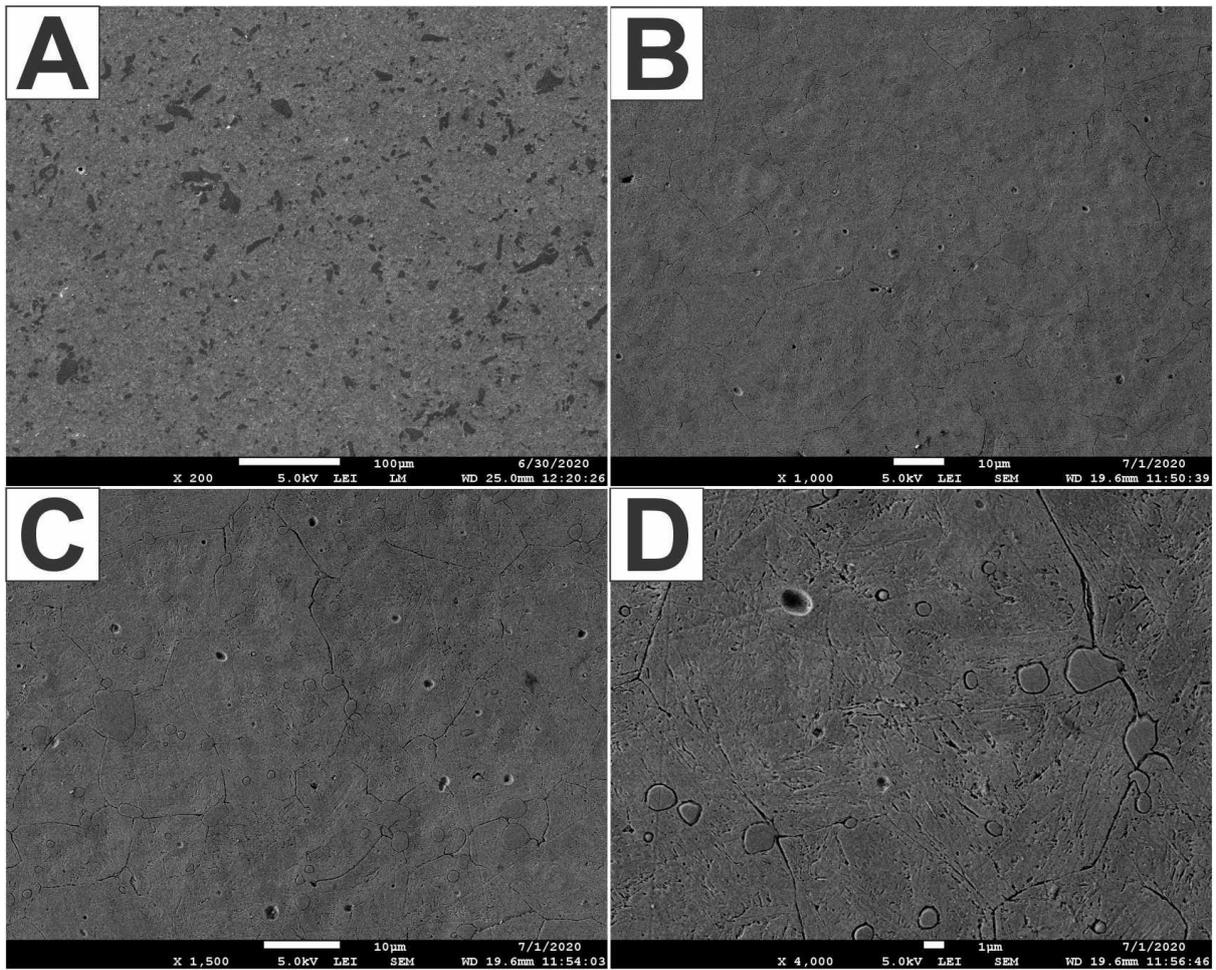
Fonte: próprio autor

ANEXO IX – Figura 9 - Microestrutura da Amostra revenido a 450°C. Setas Brancas apontam os carbonetos secundários Presentes na matriz martensítica (A) 200 vezes ampliada (B) 1000 vezes ampliada (C) 1500 vezes ampliada (D) 4000 vezes ampliada. Aço AISI D2. Ataque: Nital 2%. MEV (elétrons secundários).



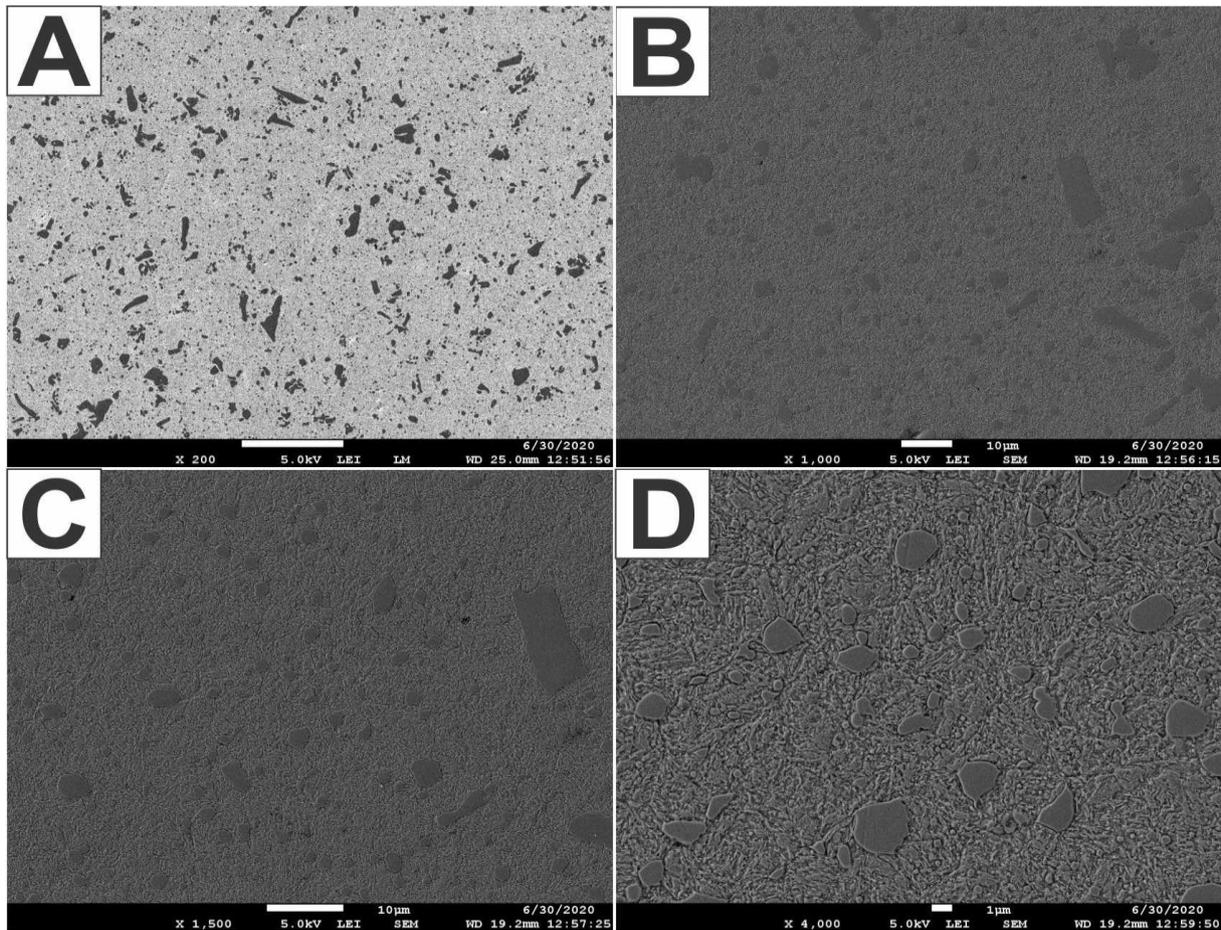
Fonte: próprio autor

ANEXO X – Figura 10 - Microestrutura da Amostra revenido a 500°C (A) 200 vezes ampliada (B) 1000 vezes ampliada (C) 1500 vezes ampliada (D) 4000 vezes ampliada. Aço AISI D2. Ataque: Nital 2%. MEV (elétrons secundários).



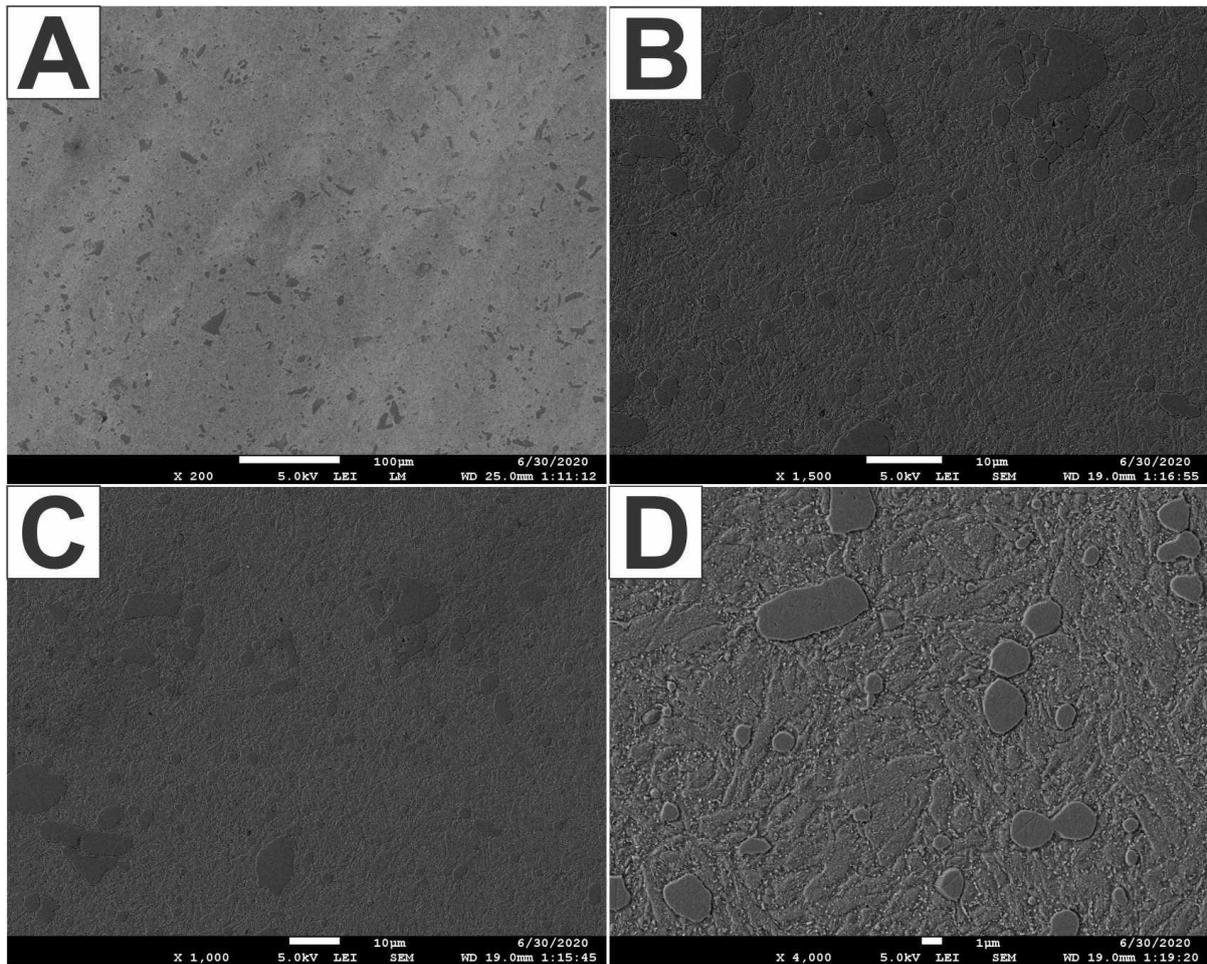
Fonte: próprio autor

ANEXO XI – Figura 11 - Microestrutura da Amostra revenido a 600°C (A) 200 vezes ampliada (B) 1000 vezes ampliada (C) 1500 vezes ampliada (D) 4000 vezes ampliada. Aço AISI D2. Ataque: Nital 2%. MEV (elétrons secundários).



Fonte: próprio autor

ANEXO XII – Figura 12 - Microestrutura da Amostra revenido a 650°C (A) 200 vezes ampliada (B) 1000 vezes ampliada (C) 1500 vezes ampliada (D) 4000 vezes ampliada. Aço AISI D2. Ataque: Nital 2%. MEV (elétrons secundários).



Fonte: próprio autor