



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO
CENTRO DE ENGENHARIA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

VICTOR MENEZES COSTA

ANÁLISE E CARACTERIZAÇÃO DA MICROESTRUTURA DO AÇO AISI M2

MOSSORÓ – RN

2019

VICTOR MENEZES COSTA

ANÁLISE E CARACTERIZAÇÃO DA MICROESTRUTURA DO AÇO AISI M2.

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

Orientador (a): Manoel Quirino da Silva Júnior,
Prof. Dr.

MOSSORÓ – RN

2019

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

CC837a Costa, Victor Menezes. Análise e
caracterização da microestrutura do aço AISI
M2 / Victor Menezes Costa. - 2019.
44 f. : il.

Orientador: Manoel Quirino da Silva Júnior.
Monografia (graduação) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Curso de Engenharia
Mecânica, 2019.

1. Aço rápido. 2. AISI M2. 3. Tratamentos
térmicos. 4. Caracterização. I. Júnior, Manoel
Quirino da Silva, orient. II. Título.

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

VICTOR MENEZES COSTA

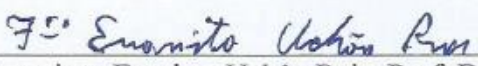
ANÁLISE E CARACTERIZAÇÃO DA MICROESTRUTURA DO AÇO AISI M2

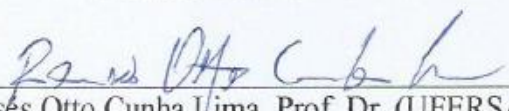
Monografia apresentada a Universidade Federal Rural do Semiárido como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Defendida em: 13 / 08 / 2019.

BANCA EXAMINADORA


Manoel Quirino da Silva Júnior, Prof. Dr. (UFERSA)
Presidente


Francisco Evaristo Uchôa Reis, Prof. Dr. (UFERSA)
Membro Examinador


Ramsés Otto Cunha Lima, Prof. Dr. (UFERSA)
Membro Examinador

À memória da minha bisavó Alzira, pois mesmo ausente está sempre em meus pensamentos.

Aos meus pais, Homero e Leila, que são a minha base e sempre estão presentes fazendo o que for preciso para que eu consiga atingir meus objetivos.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Homero e Leila, por sempre se esforçarem ao máximo para me oferecerem o melhor possível, sempre visando o meu sucesso e conquista seja no que for. Apoio, dedicação e amor é o que não falta, obrigado por tudo!

Às minhas irmãs, Maria Clara e Maria Isabel, pelo companheirismo e apoio de sempre.

À minha namorada Isabelly, pelo inventivo, apoio e compreensão, sempre entendendo meus momentos de ausência dedicados aos estudos. Por seu amor dedicado a mim e ajuda ao longo dessa jornada.

Ao meu orientador Manoel Quirino, pela orientação.

À toda minha família, amigos, da graduação ou não, e demais professores que, direta ou indiretamente, contribuíram na minha formação e conclusão desse curso.

Aos membros da banca examinadora, por dedicarem tempo à análise deste trabalho, contribuindo para a consolidação do resultado final.

RESUMO

Os aços rápidos são um dos aços ferramenta mais utilizados, tendo em vista suas várias propriedades, algumas como: a elevada dureza a quente e a frio, boa resistência ao desgaste e tenacidade. Para esse tipo de aço é inviável classificá-lo apenas por sua composição, como geralmente é feito pela SAE/ABNT, devido a sua ampla variedade de composição química. Devido a isso, produtores e usuários de ferramentas chegaram a um consenso de classificar os aços ferramentas de acordo com sua composição, características de emprego e tipo de tratamento térmico, como é feito pela norma AISI. Neste trabalho foi realizada a análise e caracterização da microestrutura de um aço rápido AISI M2 por meio de ensaios de microdureza e microscopia óptica. Foram analisadas sete amostras, sendo uma analisada como entregue, três analisadas após o tratamento de têmpera em diferentes temperaturas (950°C, 1050°C e 1150°C) e outras três após o tratamento de têmpera com posterior revenimento à 550°C. Após os tratamentos e ensaios realizados foi possível analisar que a dureza aumenta de acordo com o aumento da temperatura de têmpera e que, mesmo com o revenimento, a dureza se manteve elevada devido ao endurecimento secundário que é característico nos aços rápidos. Em relação à microscopia, foi constatado que a quantidade de carbonetos residuais diminuiu com o aumento da temperatura de austenitização devido a sua dissolução na matriz durante o aquecimento.

Palavras-chave: Aço rápido. AISI M2. Caracterização.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Dureza a quente de diferentes aços rápidos com a variação de temperatura de serviço.	19
Figura 2 - Comparação da dureza dos carbonetos dos aços rápidos, cementita e martensita. .	20
Figura 3 - Curva de temperabilidade obtida por ensaio Jominy de cinco aços diferentes.	23
Figura 4 - Ciclo de têmpera + revenimento.....	24
Figura 5 - Curvas de revenimento do aço rápido M2 com diferentes temperaturas de austenitização.....	25
Figura 6 - Diferentes condições de revenimento.	26
Figura 7 - Fresa de aço rápido AISI M2.	28
Figura 8 - Exemplo do formato de um Box Plot.	30
Figura 9 - Box Plot dos valores médios e dispersões na escala Rockwell C. Amostras como entregue e temperadas.	34
Figura 10 - Box Plot dos valores médios e dispersões na escala Rockwell C. Amostras como entregue e temperadas com posterior revenimento.....	34
Figura 11 – Gráfico com a relação das durezas obtidas com os tratamentos térmicos realizados.	35
Figura 12 - Micrografia das amostras temperadas: A) 950°C; B) 1050°C; C) 1150°C. Aumento de 200X.	37
Figura 13 - Micrografia das amostras temperadas e revenidas. Todos os revenimentos realizados a 550°C. Têmperas a: A) 950°C; B) 1050°C; C) 1150°C. Aumento de 200X.....	38
Figura 14 - Micrografia da amostra conforme obtida no laboratório da UFERSA, sem nenhum tratamento realizado durante a pesquisa. Aumento 200X.....	39

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Classificação dos aços ferramenta (norma AISI).....	13
Quadro 2 - Microdureza de carbonetos em materiais para ferramentas.	18
Quadro 3 - Resultados da microdureza para a amostra como entregue e temperadas. Dados em escala HRC e HV.....	31
Quadro 4 - Resultados da microdureza para a amostra como entregue e temperadas com posterior revenimento. Dados em escala HRC e HV.....	32

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química (% em peso) do aço rápido AISI M2.	16
Tabela 2 - Morfologia, composição química e localização dos carbonetos presentes nos aços rápidos.	21

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	11
2. OBJETIVO.....	12
2.1. OBJETIVO GERAL	12
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	12
3. REFERENCIAL TEÓRICO	13
3.1. CLASSIFICAÇÃO DOS AÇOS FERRAMENTA	13
3.2. AÇOS RÁPIDOS	14
3.2.1. Aços rápidos ao Tungstênio – Série T.....	14
3.2.2. Aços rápidos ao Molibdênio – Série M	15
3.2.2.1. Aço rápido AISI M2	15
3.2.3. Elementos de Liga dos Aços Rápidos.....	16
3.2.4. Microestrutura dos Aços Rápidos.....	19
3.3. TRATAMENTOS TÉRMICOS	22
3.3.1. Têmpera	22
3.3.2. Revenimento.....	23
3.3.3. Têmpera e revenimento dos Aços Rápidos	24
4. MATERIAIS E MÉTODOS	28
4.1. AMOSTRAS UTILIZADAS	28
4.2. PREPARAÇÃO PARA CARACTERIZAÇÃO	29
4.3. ANÁLISE DE MICROSCOPIA ÓPTICA.....	29
4.4. ENSAIO DE MICRODUREZA.....	29
4.5. TRATAMENTO ESTATÍSTICO DOS DADOS	29
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	31
5.1. ENSAIO DE MICRODUREZA	31
5.2. ANÁLISE DE MICROSCOPIA ÓPTICA	36
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	41
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	42

1. INTRODUÇÃO

Desde a antiguidade as ferramentas são utilizadas pelo homem para realizar os mais diversos tipos de atividades. Há milhares de anos, utilizando ferramentas de pedra, foram sendo adaptadas geometrias da mesma de acordo com sua necessidade. Nos dias de hoje não é diferente, devido ao constante avanço da tecnologia e da necessidade de instrumentos de trabalho cada vez mais resistentes e precisos para tarefas específicas, se tem uma incansável procura por propriedades cada vez melhores, por meio de estudos para tal obtenção.

Os aços ferramenta são um dos importantes tipos de material utilizados na produção dessas ferramentas e fazem parte desta evolução que não tem prazo para acabar. Os primeiros aços ferramenta foram simples aços carbono comuns, porém por volta do ano de 1868 até recentemente no século XX, foram desenvolvidos muitos aços ferramenta complexos, contendo diversos elementos de liga a fim de se obter uma qualidade e durabilidade superiores.

Sua utilização é bastante variada, podendo este aço atuar em diversos processos mecânicos e componentes de máquinas. Como sua classificação apenas pela utilização ou composição é bastante complicada, adota-se a classificação da AISI como a mais aceita, que leva em consideração a composição química, as características de utilização e o tipo de tratamento térmico, dividindo os aços ferramenta em grupos e subgrupos, facilitando a sua seleção.

O aço em estudo, pertence ao subgrupo dos aços rápidos e tem esse nome principalmente pela capacidade de usinar metais em maiores velocidades e profundidades sem perder suas características. Eles são subdivididos nas Classes M e T, ambos considerados aços de alta liga contendo cobalto, cromo, molibdênio, tungstênio e vanádio como principais elementos de liga.

A obtenção de propriedades mecânicas satisfatórias é conseguida através de têmpera e revenimento. Devido à grande quantidade de elementos de liga nos aços rápidos, são utilizadas elevadas temperaturas de austenitização a fim dissolvê-los na austenita, levando sempre em consideração rigorosos cuidados para não se obter uma queda de qualidade do material final.

A análise e caracterização microestrutural do aço AISI M2 em estudo é de suma importância, uma vez que conhecido o material é possível verificar se o mesmo é adequado para o serviço ao qual é aplicado e se há alguma forma de melhoria no mesmo para evitar as possíveis falhas que possam ocorrer, prejudicando as atividades que necessitam dessa peça.

2. OBJETIVO

2.1. OBJETIVO GERAL

Realizar a análise da variação de microdureza do aço rápido AISI M2 com temperaturas de têmpera variadas.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar têmperas com temperaturas de austenitização de 950°C, 1050°C e 1150°C e posterior revenimento;
- Realizar medição de microdureza no aço rápido AISI M2 como entregue e após revenimento.
- Realizar análise de microscopia óptica;
- Realizar análise comparativo entre as microestruturas obtidas após tratamentos térmicos.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1. CLASSIFICAÇÃO DOS AÇOS FERRAMENTA

É praticamente impossível se ter uma definição exata de aço ferramenta de modo que “agrade” tanto o usuário quanto o produtor. Porém, para muitas pessoas qualquer aço utilizado para fabricar ferramenta é um aço ferramenta, sendo que muitos produtores vendem aços ferramentas que não são utilizados para este fim. Dividir os aços em ferramentas em grupos ou famílias de acordo com a composição química, como no caso da norma SAE/ABNT, acaba não sendo tão viável devido a imensa variação nas composições químicas, mesmo em aços para aplicações semelhantes. Uma classificação levando em conta apenas a utilização também não seria tão aceita, tendo em vista que para certas aplicações se pode utilizar desde aço carbono comum até aços rápidos (SILVA E MEI, 2010).

Ainda segundo os autores, a classificação mais viável e prática se deu por meio de uma mistura entre composição química, característica de emprego e tratamento térmico, que foi definida a partir de um consenso entre os produtores e usuários de ferramentas, dando origem à norma AISI, mostrada no Quadro 1.

Quadro 1 - Classificação dos aços ferramenta (norma AISI).

W - Aços temperáveis em água (<i>Water</i>)
S - Aços resistentes ao choque (<i>Shock</i>)
Aços para fins especiais
L - Tipo baixa liga (<i>Low alloy</i>)
F - Tipo carbono-tungstênio
P - Aços para moldes
Aços para trabalho a frio
O - Aços temperáveis em óleo (<i>Oil</i>)
A - Aços média liga, temperáveis ao ar (<i>Air</i>)
D - Aço alto carbono, alto cromo
Aços para trabalho a quente (<i>Hot Working</i>)
H1 - H19 - Ao cromo
H20 - H39 - Ao tungstênio
H40 - H59 - Ao molibdênio
Aços rápidos
T - Ao tungstênio
M - Ao molibdênio

Fonte: Adaptado de Silva e Mei (2010).

3.2. AÇOS RÁPIDOS

Conforme o Quadro 1, os aços rápidos constituem um dos tipos dos aços ferramenta e serão abordados com mais ênfase por se tratarem do tipo de aço abordado nesta pesquisa. CIMM (s.d.) define os aços rápidos como os materiais utilizados nas ferramentas para utilização em serviços de corte de metais em alta velocidade e com elevados avanços, parâmetros estes superiores aos utilizados com os aços carbonos de baixa e média liga. Como outras características são citadas: a não alteração da dureza com o aumento da temperatura de serviço (operam em temperaturas por volta de 550 a 600°C), ou seja, uma elevada dureza a quente, boa estabilidade dimensional e boa tenacidade.

Todas as propriedades já citadas são obtidas devido aos elementos presentes nesses aços. De modo geral, são formados por carbono e elementos de liga capazes de formar carbonetos de alta dureza durante o seu processamento, conferindo-lhes uma resistência ao desgaste superior a outros tipos de aços para ferramenta, aumentando sua durabilidade (DURAND-CHARRE, 2013).

A composição dos aços rápidos varia amplamente, atingindo valores elevados de elementos de liga de custo elevado como: molibdênio, vanádio, tungstênio e cobalto. Por consequência, percebe-se que eles estão entre os aços mais caros existentes, porém, o elevado custo acaba sendo compensado com a utilização correta da ferramenta, tendo em vista que a mesma apresenta uma elevada vida útil e proporciona menos paradas para afiação, elevando o custo final da produção (SILVA; MEI, 2010).

Segundo Robert, Kennedy e Krauss (1998), dentre os aços rápidos, o tipo mais ligado é capaz de atingir durezas de até 70 HRC após têmpera e revenimento. Isso é possível devido à elevada quantidade de elementos de liga presentes quem elevam a temperabilidade do material, sendo possível temperá-los em seções profundas apenas com resfriamento ao ar. Além disso, segundo o autor, durante o revenimento esses aços apresentam o fenômeno de endurecimento secundário o que eleva a dureza.

3.2.1. Aços rápidos ao Tungstênio – Série T

Apresenta um teor de carbono entre 0,65 a 1,6% responsável por gerar elevada quantidade de carbonetos ao Tungstênio e demais elementos de liga, garantindo resistência à abrasão. Dentre as porcentagens dos elementos de liga, se tem 11,75 a 21% de Tungstênio, de 3,75 a 5% de Cromo e outros elementos em menores quantidades, como Molibdênio e Vanádio.

Como diferencial desta série se tem a alta temperabilidade, com possibilidade de têmpera ao ar e a possibilidade de surgimento de austenita retida após a têmpera de acordo com o teor de Vanádio (SCHEID, 2010).

3.2.2. Aços rápidos ao Molibdênio – Série M

Como o próprio nome diz, apresenta o Molibdênio como principal elemento de liga (entre 3,25 e 11%), contendo ainda cerca de: 3,5 a 4,75% de Cromo, 0,95 a 3,75% de Vanádio, 0,78 a 1,52% de Carbono, além de Tungstênio e Vanádio. Em comparação com os aços rápidos da série T, estes apresentam uma melhor tenacidade, porém são susceptíveis à descarbonetação durante o tratamento térmico (SCHEID, 2010).

De modo geral, os aços das séries T e M possuem desempenho similares, porém os aços do grupo M acabam sendo mais empregados atualmente devido a vantagem econômica propiciada pelo molibdênio, tendo em vista que este possui aproximadamente metade do peso atômico do tungstênio, podendo, portanto, ser empregado em menor quantidade sem perder desempenho. Isto é possível devido ao molibdênio e tungstênio possuírem raios atômicos próximos e formarem carbonetos similares (ROBERT; KENNEDY; KRAUSS, 1998).

Entretanto, os aços rápidos deste grupo são muito susceptíveis à descarbonetação, em especial os que possuem elevados teores de molibdênio e baixos teores de tungstênio na sua composição. Isso acaba exigindo um maior controle nas operações de tratamentos térmicos, correndo o risco de ocorrer danos ao material por uma operação mau realizada. Por isso esses aços são sensíveis à temperatura e à atmosfera de austenitização (CHIAVERINI, 2012; MATTHEW, 2009).

3.2.2.1. Aço rápido AISI M2

Como dito anteriormente, os aços pertencentes à Série M (ao molibdênio) passaram a ser utilizadas com maior intensidade devido às suas vantagens, tendo como um dos principais tipos utilizados o aço M2, objeto de análise desta pesquisa.

Segundo Silva e Mei (2010), o aço M2 tem se caracterizado como um dos mais populares. Conforme o autor, um estudo da ASM mostrou que nas décadas de 50 e 60, nos EUA, os aços M1, M2 e M10 representavam mais de 70% dos aços consumidos, em peso e, o aço M2, teve um consumo superior a 40% da tonelagem total dos aços rápidos consumidos nos

anos citados. Hoje em dia, os aços da série M representam mais de 95% do aço rápido produzido nos EUA.

O aço rápido M2 apresenta os diversos elementos de liga que são característicos nos aços rápidos, em teores que variam de acordo com o fabricante e com as propriedades desejadas. A GGD Metals (2015), por meio de estudos, mostra a composição química (% em peso) de desse aço rápido conforme a Tabela 1.

Tabela 1 - Composição química (% em peso) do aço rápido AISI M2.

Aço	C	Mn	Si	Cr	W	Mo	V
AISI M2	0,90	0,30	0,30	4,20	6,20	5,00	1,90

Fonte: Adaptado de GGD Metals (2015).

3.2.3. Elementos de Liga dos Aços Rápidos

Dentre os principais elementos de ligas presentes nos aços rápidos estão: carbono, tungstênio, molibdênio, vanádio, cromo e cobalto. Devido ao excesso desses elementos, se tem um excesso de carbonetos complexos na estrutura tratada. A temperatura de têmpera é muito elevada (cerca de 65°C abaixo do ponto de fusão) o que exige cuidados especiais na sua realização; a estrutura temperada é bastante refinada; apresenta temperabilidade excelente; apresentam “endurecimento secundário” elevado (no revenimento entre 500°C e 600°C) e ainda pode-se conseguir elevadas durezas pelo resfriamento ao ar tranquilo (CHIAVERINI, 20012).

Chiaverini (2012) ainda aborda os principais elementos de liga citados e suas contribuições para as propriedades dos aços rápidos:

- **Carbono (C)**

Apresenta teor entre 0,70% a 1,30%, sendo que os valores mais baixos podem proporcionar menor dureza quando temperado e, conseqüentemente, menos dureza no estado revenido. Com o aumento do teor de carbono se tem o aumento de carbonetos complexos que possibilita obter melhores dureza e resistência ao desgaste finais. Além disso, mais carbono resultará uma maior retenção da austenita no estado temperado, exigindo tempos e temperaturas de revenido mais elevados. Porém, isto não é problema tendo em vista que os aços rápidos já aquecidos a temperaturas muito elevadas para o seu tratamento térmico, sendo dispensado o cuidado extra em controlar a quantidade de carbono seja por carbonetação ou decarbonetação.

Dentre estas duas, apenas a carbonetação poderá ser vantajosa, caso se necessite no fim do tratamento maior resistência ao desgaste.

- **Tungstênio (W)**

Está sempre presente nos aços rápidos e forma um carboneto complexo duro em conjunto com o ferro e carbono (o M_6C) que proporciona o aumento da resistência ao desgaste e da eficiência de cortes da ferramenta. Ao ultrapassar a temperatura de $980^{\circ}C$, esse carboneto se dissolve parcialmente na austenita e tende a precipitar-se durante o revenido (temperaturas de $510^{\circ}C$ a $595^{\circ}C$) provavelmente na forma de W_2C , um dos elementos efetivos no endurecimento secundário e na dureza a quente dos aços. Portanto, essa relação é diretamente proporcional: o aumento de tungstênio gera o aumento dos carbonetos complexos que, por consequência, eleva o tungstênio dissolvido na matriz austenítica (endurecimento secundário). Uma observação importante é que nos aços com baixo teor de carbono, o aumento excessivo do teor de tungstênio poderá causar o reaparecimento de grandes quantidades de ferrita, o que causa a queda da dureza do aço.

- **Molibdênio (Mo)**

Ele é introduzido no aço como um substituto parcial (não há a troca total do Mo pelo W) do tungstênio e forma o mesmo carboneto complexo duro M_6C responsável pela elevada resistência ao desgaste do aço rápido. A principal vantagem de sua utilização é o fato de possuir cerca da metade do peso atômico do tungstênio, ou seja, ao ser adicionado na mesma porcentagem em peso, produz o dobro de átomos que o ligarão ao aço. Eles também apresentam um menor ponto de fusão e, conseqüentemente, são temperados a menores temperaturas do que os aços somente ao tungstênio. Como desvantagem se tem a tendência a descarbonetação, o que exige um maior controle nos tratamentos térmicos. Por fim, os aços ao molibdênio possuem uma austenita residual menos estável, resultando em temperaturas de revenimento ligeiramente inferiores e, com isso, dureza a quente também ligeiramente inferiores.

- **Vanádio (V)**

Inicialmente esse elemento foi adicionado com a função de desoxidante, porém verificou-se um aumento do rendimento de corte dos aços rápidos e sua dureza a quente. Isso pode ser explicado pelo fato de o carboneto de vanádio ser o carboneto mais duro dos aços rápidos, conforme mostra o Quadro 2 abaixo. A elevada resistência ao desgaste, porém, torna esses aços mais difíceis de serem afiados, sendo necessários rebolos impregnados de diamantes

para realizar a afiação. Um ponto importante nesse elemento de liga é o de ser necessário sempre aumentar de forma igualitária os teores de carbono e vanádio, tendo em vista que um aumento excessivo de vanádio com um teor fixo de carbono causa rápida queda da dureza do aço devido a formação de quantidade apreciável de ferrita.

Quadro 2 - Microdureza de carbonetos em materiais para ferramentas.

Material	Dureza Knoop (média)
Matriz de aço para ferramentas (com 60,5 HC)	790
Carboneto de ferro em aço-carbono para ferramenta	1150
Carboneto de cromo em aço de alto carbono e alto cromo	1820
Óxido de alumínio em rebolo de retificação	2440
Carboneto de vanádio em aço de alto carbono e alto vanádio	2520
Material	Dureza Rockwell C convertida
Matriz de aço rápido	66,0
Carboneto de ferro-tungstênio-molibdênio em aço rápido	75,2
Carboneto de tungstênio em metal duro	82,5
Carboneto de vanádio em aço rápido de alto carbono e alto vanádio	84,2

Fonte: Adaptado de Chiaverini (2012).

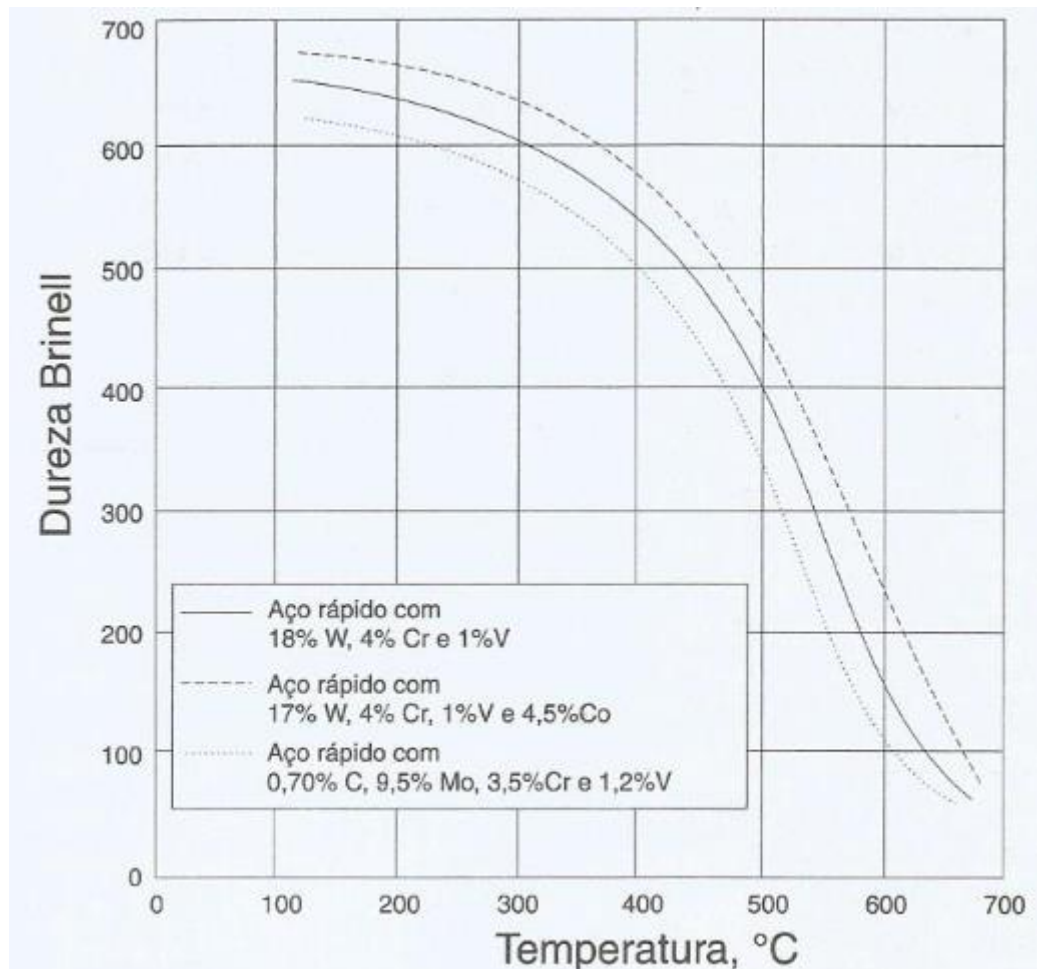
- **Cromo (Cr)**

Aparece quase sempre com teores em torno de 4,0% e é responsável por uma boa combinação entre a dureza a e a tenacidade dos aços rápidos. Contribui nos tratamentos térmicos para uma elevada temperabilidade (juntamente com o carbono), tornando possível a têmpera ao ar, assim como a diminuição da tendência de oxidação.

- **Cobalto (Co)**

Tem como principal característica o aumento da dureza a quente e, por consequência, a eficiência de corte em altas temperaturas, sendo muito indicados para os processos de desbastes ou de corte profundo. O cobalto dissolve-se em grande parte na matriz, aumentando a dureza de forma generalizada, tanto à temperatura ambiente quanto a altas temperaturas. Outro ponto importante é a grande quantidade de austenita retida, o que resulta em um elevado endurecimento secundário, sendo responsável pela melhor dureza a quente entre todos os aços rápidos. A Figura 1 mostra o comportamento dos aços rápidos ao W, ao W-Co e ao Mo em diferentes temperaturas de serviços.

Figura 1 - Dureza a quente de diferentes aços rápidos com a variação de temperatura de serviço.



Fonte: Chiaverini (2012).

3.2.4. Microestrutura dos Aços Rápidos

De modo geral, os aços rápidos apresentam microestrutura composta de carbonetos complexos (primários) de elevada dureza e estabilidade, que garantem alta resistência ao desgaste abrasivo, imersos em uma matriz resistente e tenaz de martensita revenida reforçada por carbonetos precipitados durante o revenimento, no processo de endurecimento secundário. Estes carbonetos precipitados exercem a função de retenção dos carbonetos primários, mesmo em altas temperaturas e presença de tensões cisalhantes criadas na interface entre a aresta de corte da ferramenta e o material usinado, o que demonstra a característica de elevada dureza a quente desses aços (JESUS, 2004).

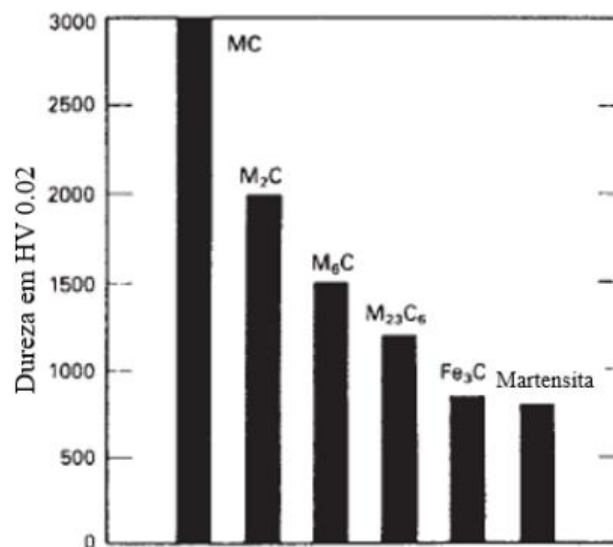
De acordo com Chiaverini (2012), os carbonetos complexos presentes na microestrutura dos aços rápidos consistem em:

- **M₆C**: carboneto rico em tungstênio ou molibdênio, com estrutura CFC (cúbico de face centrada) de composições Fe₃W₃C e Fe₄W₂C nos aços ao tungstênio, ou Fe₃Mo₃C e Fe₄Mo₂C nos aços ao molibdênio. Esses podem dissolver também certa quantidade de cromo, vanádio e cobalto;
- **M₂₃C₆**: carboneto rico em cromo correspondente ao carboneto **Cr₂₃C₆** de estrutura CFC, capaz de dissolver ferro, tungstênio, molibdênio e vanádio;
- **MC**: carboneto rico em vanádio, com estrutura CFC de composição que varia dentro da faixa VC a V₄C₃, capaz de dissolver quantidades de tungstênio, molibdênio, cromo e ferro;
- **M₂C**: carboneto rico em tungstênio (W₂C) ou molibdênio (Mo₂C) com estrutura hexagonal (HC). Esse carboneto somente foi observado como uma fase de transição durante o revenimento dos aços rápidos.

OBS: “M” representa a soma dos elementos de liga W, Mo, Cr, V e Fe.

Através da Figura 2, é possível observar a elevada dureza dos carbonetos citada anteriormente, dureza bem superior a dureza da martensita, estrutura base da matriz dos aços rápidos.

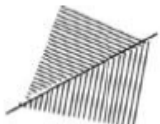
Figura 2 - Comparação da dureza dos carbonetos dos aços rápidos, cementita e martensita.



Fonte: Adaptado de Krauss (2015).

Os carbonetos MC, M_2C , M_6C e $M_{23}C_6$ (M representa os elementos de liga), presentes no aço rápido podem ser observados quanto a sua morfologia, composição química e localização conforme a apresentação na Tabela 2 (VITRY et al., 2012).

Tabela 2 - Morfologia, composição química e localização dos carbonetos presentes nos aços rápidos.

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

Fonte: Adaptado de Vitry, et al. (2012).

Na Tabela 2 é possível verificar várias informações importantes sobre os carbonetos presentes na microestrutura dos aços rápidos. Organizados de forma crescente em nível de dureza de cima para baixo, pode-se observar a morfologia desses elementos, ou seja, a forma como são observados na matriz do material, podendo aparecer, basicamente, em forma de glóbulos ou lamelas, dispostos em diferentes configurações.

Em relação à composição química são apresentados quais elementos de liga estão presentes em maior quantidade tanto na condição de carboneto primário quanto na de secundário. Também se tem a localização desses carbonetos, que podem ser encontrados no centro ou nos contornos de grão, por exemplo.

3.3. TRATAMENTOS TÉRMICOS

De acordo com Silva e Mei (2010), os tratamentos térmicos são procedimentos que proporcionam variações em algumas propriedades dos aços e ligas especiais, como a dureza, tenacidade, ductilidade, entre outras. Essas operações consistem em aquecimento e resfriamento controlados, tendo como principais tratamentos: recozimento, têmpera, revenimento e normalização.

Dentre os tratamentos citados, serão abordados neste trabalho os de têmpera e revenimento, ambos utilizados variando alguns parâmetros para se analisar a microestrutura do aço rápido AISI M2.

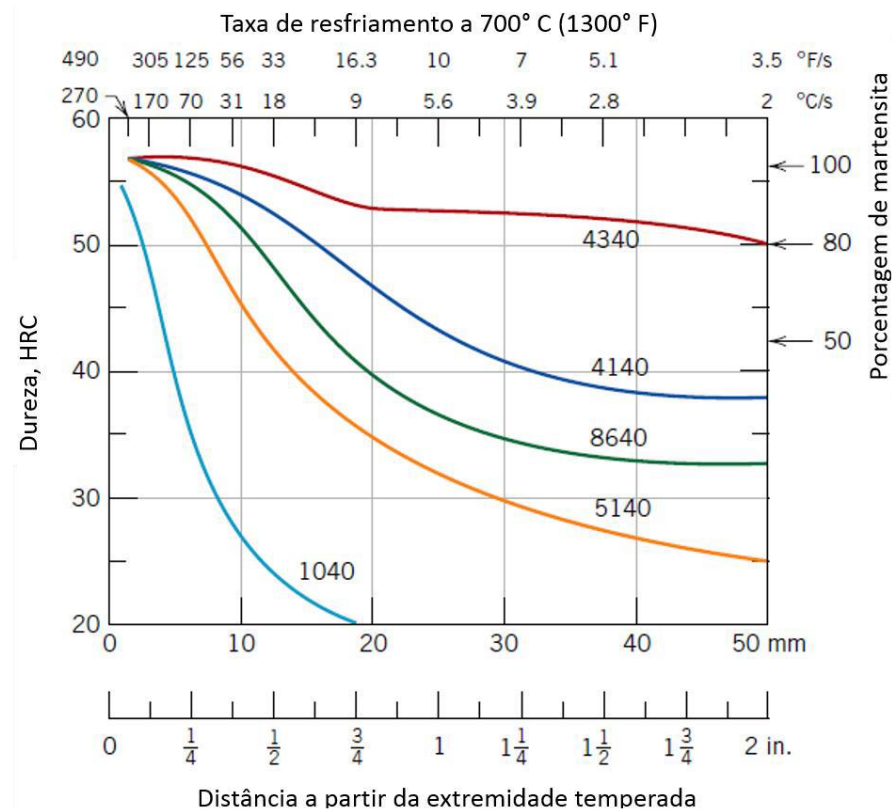
3.3.1. Têmpera

A têmpera consiste no aquecimento do aço até a sua temperatura de austenitização, garantindo que todas as fases se transformem em austenita e, sem seguida, realiza-se um resfriamento suficientemente rápido para evitar transformações bainíticas e perlíticas na peça, obtendo-se apenas a estrutura metaestável martensítica (CHIAVERINI, 2012).

Cada aço apresenta uma temperabilidade diferente, que consiste, segundo Silva e Mei (2010), à capacidade de endurecimento do aço durante o tratamento de têmpera (resfriamento rápido), ou seja, capacidade de formar martensita a uma determinada profundidade em material. Callister e Rethwisch (2012) ilustram bem a temperabilidade de diferentes aço, com e sem elementos de liga, na Figura 3. Nesta imagem, todas as ligas apresentam o mesmo percentual de carbono variando apenas a quantidade dos elementos de liga. Com isso, é possível observar que a temperabilidade do aço carbono comum cai de forma brusca à medida que se penetra na peça, enquanto nos aços com elementos de liga a queda da curva se dá de forma mais suave. É importante ressaltar que em todos a dureza na superfície é a mesma, pois depende apenas do teor de carbono, o que se altera é a dureza no interior da peça.

Os meios de resfriamento utilizados dependem do teor de carbono e elementos de liga presentes no aço, da forma e dimensões da peça. Os meios mais comuns de resfriamento são líquidos (água, água com sais, óleo e soluções de polímeros) ou gasosos (ar, gases inertes). Dentre esses, a água apresenta o resfriamento mais intenso, enquanto o ar o mais suave; o óleo por sua vez é recomendado para aços com elevados teores de carbono, tendo em vista que o resfriamento em água poderia causar trincas ou contrações (CHIAVERINI, 2012).

Figura 3 - Curva de temperabilidade obtida por ensaio Jominy de cinco aços diferentes.



Fonte: Callister e Rethwisch (2012).

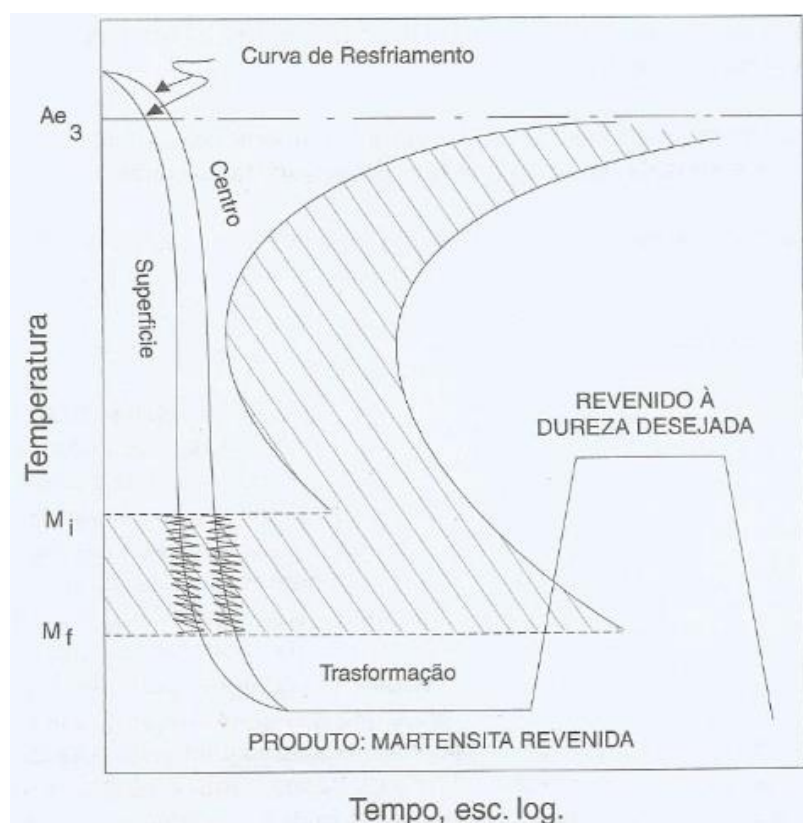
3.3.2. Revenimento

Após o tratamento térmico de têmpera, a martensita é extremamente dura e frágil, ocorrendo grande risco de trincas devido ao elevado tensionamento interno e, além disso, devido a sua baixa tenacidade, torna essas estruturas praticamente sem emprego prático. Para sanar esse problema e atingir valores adequados de resistência mecânica e tenacidade, é recomendado o tratamento de revenimento logo posterior à têmpera (SILVA; MEI, 2010).

Esse tratamento nada mais é do que o aquecimento uniforme da peça até uma temperatura abaixo da temperatura de austenitização, com permanência por tempo suficiente para equalização da temperatura em toda a peça e obtenção das propriedades desejadas, com posterior resfriamento até a temperatura ambiente (SILVA; MEI, 2010).

Chiaverini (2012) ilustra os procedimentos de têmpera e revenimento na Figura 4 onde a curva de resfriamento passa à esquerda do cotovelo da curva C, formando a martensita (início da transformação martensítica em “Mi” e final em “Mf”), com posterior aquecimento para a realização do revenimento e obtenção do produto final de martensita revenida.

Figura 4 - Ciclo de têmpera + revenimento.



Fonte: Chiaverini (2012).

3.3.3. Têmpera e revenimento dos Aços Rápidos

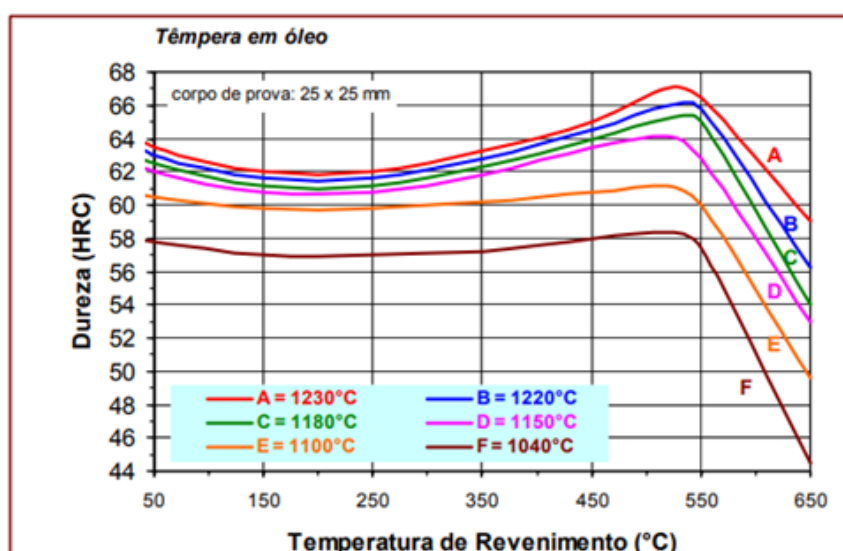
Nos aços rápidos o tratamento térmico é algo bastante delicado, tendo em vista que o ajuste dos parâmetros do tratamento é bastante crítico e definirá as propriedades finais. Dentre esses, o parâmetro da austenitização (temperatura da têmpera) define a quantidade de carbono e elementos de liga dissolvidos na austenita e presentes na forma de carbonetos, além do tamanho do grão austenítico. Portanto, a temperabilidade, quantidade de austenita retida, comportamento do revenimento e, conseqüentemente, as propriedades da ferramenta, são afetados diretamente pelos parâmetros da austenitização (SILVA; MEI, 2010).

A austenitização visa, principalmente, dois objetivos: ajustar o volume de carbonetos e ajustar a composição química da matriz para que esta responda de maneira satisfatória aos procedimentos de têmpera e revenimento. Etapas de austenitização realizadas em temperaturas superiores, leva a maior dissolução de carbonetos, os quais precipitam de maneira mais intensa durante o revenimento promovendo um maior endurecimento secundário (ROBERT; KENNEDY; KRAUSS, 1998).

Segundo Silva e Mei (2010), a faixa de temperatura para austenitização desses aços é relativamente ampla, dependendo de uma série de fatores já citados, como: dimensões da peça, taxa de aquecimento, propriedades desejadas etc. O resfriamento para realização da têmpera pode ser em óleo, ao ar ou em banho de sal e chumbo.

Na Figura 5 é possível observar diferentes curvas de revenimento obtidas de acordo com suas respectivas temperaturas de austenitização para a realização da têmpera. Pode-se notar o que foi dito anteriormente sobre a fundamental influência do parâmetro de austenitização sobre as propriedades finais da peça.

Figura 5 - Curvas de revenimento do aço rápido M2 com diferentes temperaturas de austenitização.



Fonte: Villares Metals (2003).

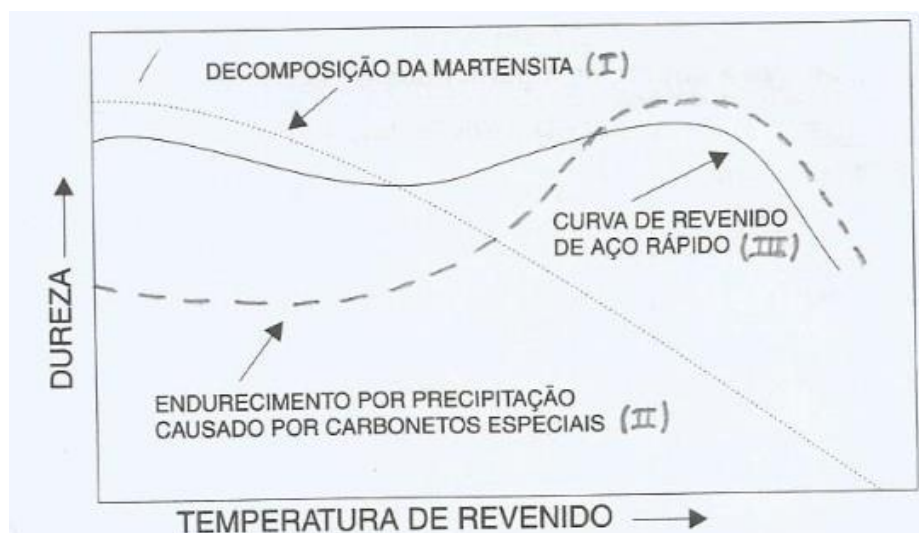
Para os aços rápidos, é recomendado realizar mais de uma etapa de revenimento, devido à transformação da austenita retida em martensita durante o resfriamento no primeiro ciclo de resfriamento. Essa transformação é responsável por aliviar as tensões da martensita obtida na têmpera, presente no aço, a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

Na condição temperada, o aço rápido é composto por: martensita, austenita retida e carbonetos residuais. Os elementos de liga estão presentes tanto na matriz martensítica quanto na forma de carbonetos residuais. É admitido que a austenita retida possua a mesma composição

da martensita, ou seja, constituída por cromo, vanádio, tungstênio e molibdênio (CHIAVERINI, 2012).

A Figura 6 demonstra três condições de revenimento. A curva I (pontilhada), demonstra a decomposição da martensita que ocorre em um aço comum ao ser revenido, caracterizada pela queda contínua da dureza com o aumento da temperatura do revenido. A curva II (tracejada) corresponde a um aço que apresenta “endurecimento por precipitação”, ou seja, ocorre a elevação da dureza durante o reaquecimento pelo revenimento devido a precipitação de compostos. Já a curva III (cheia) demonstra o comportamento de um aço rápido ao ser revenido (CHIAVERINI, 2012).

Figura 6 - Diferentes condições de revenimento.



Fonte: Adaptado de Chiaverini (2012).

Ainda segundo Chiaverinni (2012), pode-se notar que pela Figura 6, a temperaturas mais baixas de revenido, a curva referente ao aço rápido (III) se assemelha à curva do aço carbono comum (I); enquanto para temperatura mais elevadas de revenimento, assemelha-se à curva dos aços endurecidos por precipitação (II). O autor ainda explica que esse “endurecimento secundário”, fenômeno típico de aço altamente ligados e muito presente nos aços rápidos, principalmente em faixas de temperatura de revenido de 550°C a 560°C, se dá pela combinação de dois fatores:

- ✓ Transformação da austenita retida em martensita, durante o resfriamento no revenimento;
- ✓ Precipitação de carbonetos de elementos de liga com granulação extremamente fina, contendo principalmente vanádio (VC), tungstênio (W_2C) e molibdênio (Mo_2C).

De forma quantitativa, pode-se dizer que o aço temperado, previamente ao início do revenimento, apresentam microestrutura constituída em proporções de aproximadamente 70% de martensita altamente ligada, 20% austenita retida altamente ligada e 10% de carbonetos primários não dissolvidos (MC e M_6C , por exemplo). Nessas condições, o aço é muito duro, frágil, com altas tensões internas e com dimensões instáveis (ROBERT; KENNEDY; KRAUSS, 1998). Portanto, cabe ao revenimento corrigir esses excessos e, nesse processo que pode ocorrer uma ou mais vezes, ocorre o endurecimento secundário já mencionado (CHIAVERINI, 2012).

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. AMOSTRAS UTILIZADAS

O material analisado nesta pesquisa foi obtido no laboratório de usinagem da Universidade Federal Rural do Semiárido – UFERSA. A peça em questão é uma fresa composta pelo aço rápido AISI M2, conforme apresentada na Figura 7 abaixo.

Figura 7 - Fresa de aço rápido AISI M2.



Fonte: Autoria Própria (2019).

A composição química (% em peso) do aço em questão já foi mencionada anteriormente conforme Tabela 1.

Para realizar o estudo foram retiradas sete amostras do material ilustrado acima, sendo uma amostra analisada no estado em que se encontrava, em outras três amostras foi realizado o tratamento de têmpera com diferentes temperaturas (950°C, 1050°C e 1150°C) e nas outras três amostras foi realizado o tratamento de têmpera com as temperaturas já citadas com um posterior revenimento a 550°C por duas horas.

Os tratamentos de têmpera foram realizados em forno tipo mufla da GP Científica, com a permanência do aquecimento nas temperaturas citadas por um tempo de 10 minutos e posterior resfriamento em óleo. Os tratamentos de revenimento foram realizados no mesmo forno.

4.2. PREPARAÇÃO PARA CARACTERIZAÇÃO

Após realizar os tratamentos térmicos citados anteriormente, as amostras foram preparadas para as análises por meio da microscopia óptica e ensaio de microdureza. Esta preparação se deu com as seguintes etapas:

- Embutimento a frio com resinas acrílica e poliéster em moldes de silicone;
- Lixamento das amostras em uma lixadeira/politriz Arotec – Aropol 2V, usando lixas d'água na ordem das seguintes granulometrias: 180, 220, 320, 400, 500, 600, 800, 1000 e 1200;
- Após o lixamento foi realizado o polimento com alimina 1µm na mesma máquina do ponto anterior;
- De posse das amostras polidas, foi realizado o ataque químico da superfície utilizando o reagente químico Nital 3% (3ml de HNO_3 e 97ml de Álcool Etílico).

4.3. ANÁLISE DE MICROSCOPIA ÓPTICA

Finalizando as etapas de preparação, foi analisada a microestrutura das amostras utilizando um Microscópio Óptico Metalográfico da Olympus, modelo GX-51 com aumentos de 50, 100, 200, 500 e 1000 vezes.

Além disso, foi utilizado o software Analysis getIT e uma câmera digital Olympus SC30 (acoplada ao microscópio óptico) para obtenção das imagens das microestruturas observadas.

4.4. ENSAIO DE MICRODUREZA

Para o ensaio de microdureza foi utilizado um Microdurômetro SHIMADZU M-1, sendo realizadas 15 (quinze) medições em cada amostra, com uma carga constante de 1,961 N e tempo de carregamento de 10 segundos. Os valores de microdureza foram obtidos tanto na escala Rockwell C (HRC) quanto na Vickers (HV). O penetrador utilizado foi um do Tipo Vickers, pirâmide de diamante com ângulo de 136°.

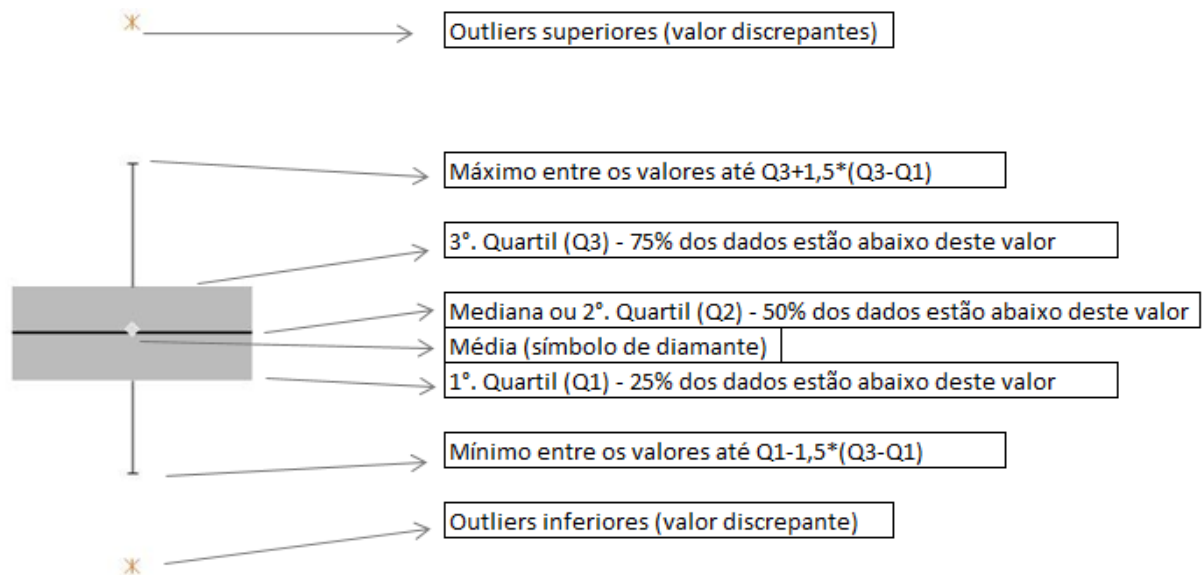
4.5. TRATAMENTO ESTATÍSTICO DOS DADOS

Para realizar a análise dos valores obtidos na microdureza, utilizou-se o software MS Excel 2016 para elaboração de gráficos e a ferramenta Box Plot (ou diagrama de caixa) para

avaliar a distribuição dos dados obtidos. Esta ferramenta, em resumo, é formada por um retângulo (chamado de caixa) cujo suas alturas são definidas pelos quartis Q1 e Q3 com uma linha que o secciona no valor da mediana (Q2). Em cada um dos lados apostos do retângulo está uma semirreta que liga, respectivamente, os quartis Q1 e Q3 ao valor mínimo e máximo do conjunto de dados. Valores discrepantes (outliers) também podem ser plotados nessa ferramenta como pontos individuais isolados.

O formato de um Box Plot, com a legenda de seus pontos bem como a representação matemática de alguns de seus limites é mostrado na Figura 8 a seguir.

Figura 8 - Exemplo do formato de um Box Plot.



Fonte: Autoria Própria (2019).

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. ENSAIO DE MICRODUREZA

A partir das 15 indentações realizadas em cada amostra, foi possível calcular os valores médios das microdurezas e os seus desvios padrões (DP), tanto na escala Rockwell C (HRC) como na escala Vickers (HV).

O Quadro 3 apresenta os dados obtidos para as amostras submetidas apenas ao tratamento de têmpera com as diferentes temperaturas: 950°C, 1050°C e 1150°C, bem como para a amostra no estado como entregue.

Quadro 3 - Resultados da microdureza para a amostra como entregue e temperadas. Dados em escala HRC e HV.

Amostra	Média (HRC)	DP (HRC)	Média (HV)	DP (HV)
Como Entregue	64,23	1,53	812	46
Têmp. 1150°C	67	1,10	902	40
Têmp. 1050°C	66,72	0,81	892	28
Têmp. 950°C	60,27	2,14	710	47

Fonte: Autoria Própria (2019).

De posse desses dados, é possível observar o que se esperava com o tratamento de têmpera: durezas elevadas e que aumentam diretamente com o aumento da temperatura de austenitização, característica de uma microestrutura martensítica. Conforme visto na literatura, Chiaverini (2012) aborda que os aços rápidos na condição temperada consistem em uma matriz martensítica em conjunto com austenita retida e carbonetos de elementos de liga residuais, o que justifica essa elevada dureza. Dentre os carbonetos existentes, nos aços rápidos temperados os principais encontrados são: o MC (rico em vanádio) e o $M_{23}C_6$ (rico em cromo), podendo também ser observado o M_6C (rico molibdênio). Como visto na Figura 2, o carboneto MC é o que apresenta a maior dureza entre todos.

As amostras temperadas a 1150°C e 1050°C apresentam valores de dureza bem próximos e superiores às demais amostras (inclusive às amostras revenidas, como será visto mais a frente). Esse comportamento está relacionado com o fato dessas temperaturas de austenitização terem sido suficientes para que grande parte dos carbonetos dissolvessem e, por isso, o carbono e elementos de liga entrassem em solução. Acontecendo isso, os elementos de

liga elevam a temperabilidade do material, facilitando a transformação martensítica, sendo esta martensita de maior teor de carbono e, portanto, resultando em plaquetas de maior dureza.

Em relação à amostra submetida ao tratamento de têmpera com temperatura de austenitização de 950°C, a dureza inferior às outras está associada ao fato desta temperatura não ter sido suficiente para a dissolução de grande parte dos carbonetos, não contribuindo, portanto, para o aumento da temperabilidade do material e, conseqüentemente, resultando em uma matriz martensítica menos dura após o resfriamento devido a menor quantidade de carbono e elementos de liga dissolvidos. É importante ressaltar que para os aços rápidos é sempre recomendado temperaturas de têmpera bem elevadas, próximas a 1200°C, para se obter os melhores resultados. Porém, mesmo com 950°C, se atingiu um valor bem elevado.

A amostra no estado “como entregue” foi colocada em conjunto com as demais no Quadro 3, bem como no Quadro 4, para comparar o resultado obtido com o tratamento térmico realizado e o valor da dureza em que ela se encontrava, a fim de se ter uma ideia em que estado ela realmente se encontra.

Em ambos os Quadros, 3 e 4, os valores de dureza na escala Vickers são mostrados como uma informação apenas complementar, tendo em vista que o microdurômetro utilizado no ensaio de microdureza mostra os valores nas duas escalas, dependendo da dureza medida. Neste caso, como os valores dessa grandeza são altos, é possível a conversão de Vickers em Rockwell C e por isso foi exposta nos quadros, sendo necessário a análise e comentários apenas em uma das escalas. O desvio padrão maior da escala HV em comparação com a HRC se dá apenas pelo formato de medição da escala.

No Quadro 4, são apresentados os valores médios das microdurezas e desvios padrões (DP) das amostras submetidas aos tratamentos de têmpera com as mesmas temperaturas citadas na análise anterior, porém com um posterior revenimento à temperatura de 550°C por 2 horas. De forma análoga ao Quadro 3, também são apresentados os valores da amostra como entregue.

Quadro 4 - Resultados da microdureza para a amostra como entregue e temperadas com posterior revenimento. Dados em escala HRC e HV.

Amostra	Média (HRC)	DP	Média (HV)	DP (HV)
Como Entregue	64,23	1,53	812	46
Têmp. 1150°C + Revenim.	63,7	1,05	795	31
Têmp. 1050°C + Revenim.	60,25	1,20	704	28
Têmp. 950°C + Revenim.	57,04	1,15	635	23

Fonte: Autoria Própria (2019).

Para o tratamento de revenimento foi escolhida a temperatura de 550°C devido a abordagem constante das literaturas sobre o uso do intervalo entre 550°C e 560°C para obtenção de maiores durezas. Em conjunto a isso, é recomendado o revenimento duplo de 2 horas cada. Neste trabalho, porém, foi adotado apenas um revenimento simples de 2 horas e os valores de dureza obtidas foram satisfatórios. Isso pode ser comprovado ao analisar os valores de dureza obtidos para as mesmas temperaturas de têmpera e com posterior duplo revenimento observados na Figura 5, onde percebe-se uma diferença pequena entre os valores.

Como pode ser observado, os valores de microdureza apresentaram uma diminuição em comparação aos do tratamento de têmpera isolado, contudo permaneceu bastante elevada. Isso pode ser explicado pelo fenômeno do “endurecimento secundário” que é típico nos aços rápidos altamente ligados, como o M2. Este processo consiste basicamente em:

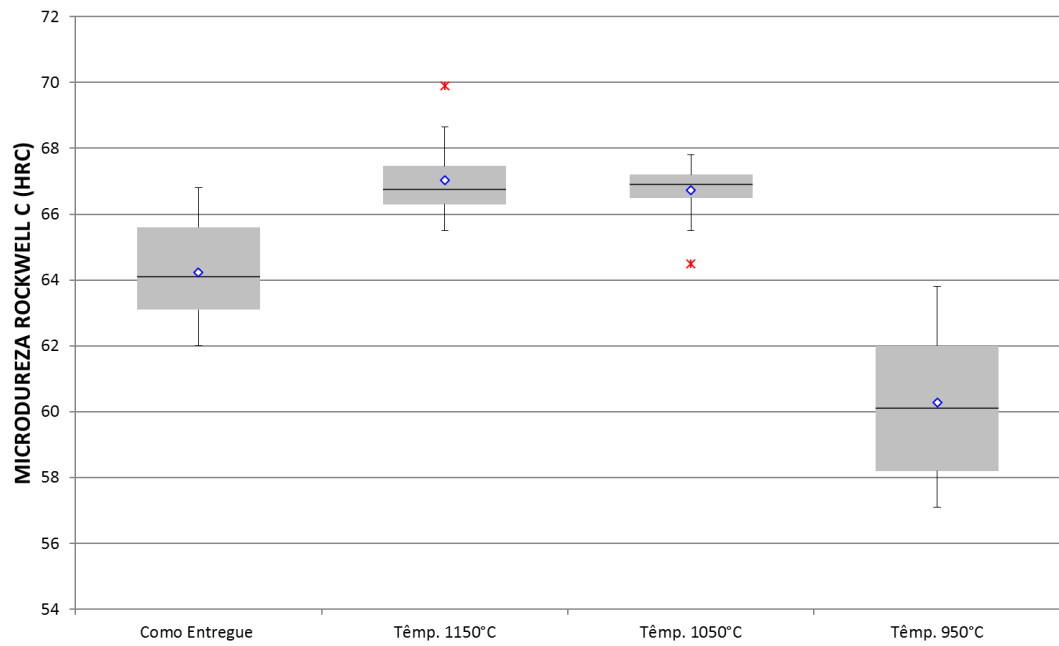
- Transformação da martensita obtida na têmpera em martensita revenida;
- Transformação da austenita retida em martensita;
- Intensa precipitação de carbonetos extremamente duros e finamente dispersos. Os principais carbonetos capazes de produzir esse efeito são: W_2C , Mo_2C e VC.

Analisando cada amostra separadamente, pode-se notar que o valor de dureza continua diretamente proporcional à temperatura de austenitização utilizada na têmpera, como ocorreu na análise das amostras submetidas apenas a este tratamento. A diferença aqui é que após o revenimento a dureza decaiu um pouco, o que era o esperado devido à característica deste tratamento de aliviar as tensões internas provenientes da têmpera e diminuir a dureza.

Olhando agora para a amostra “como entregue” pode-se notar que o seu valor de dureza se aproxima bastante do valor da amostra temperada à 1150 °C e revenida, o que nos leva a considerar que este material foi entregue nesta condição.

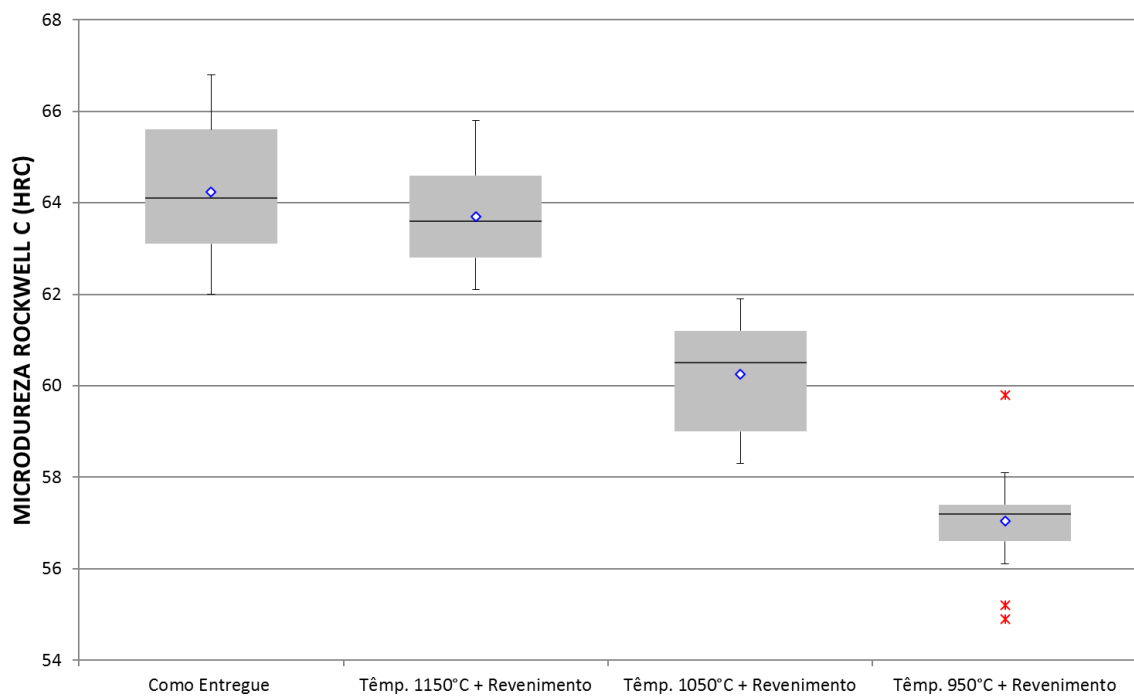
Um incremento na análise estatística dos dados obtidos no ensaio de microdureza pode ser observado com a ferramenta Box Plot, conforme as Figuras 9 e 10.

Figura 9 - Box Plot dos valores médios e dispersões na escala Rockwell C. Amostras como entregue e temperadas.



Fonte: Autoria Própria (2019).

Figura 10 - Box Plot dos valores médios e dispersões na escala Rockwell C. Amostras como entregue e temperadas com posterior revenimento.



Fonte: Autoria Própria (2019).

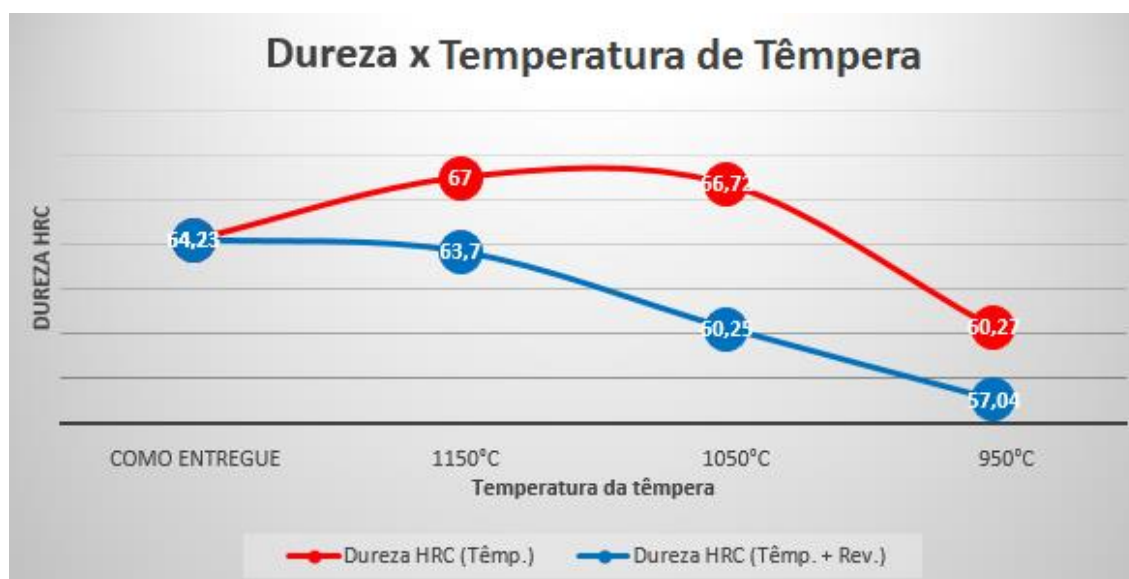
Analisando os gráficos das figuras acima, conclui-se que em todas as amostras o valor médio das medições (representado pelo símbolo de diamante dentro da caixa) está próximo do valor de referência (linha do interior da caixa que representa a mediana dos valores).

Na Figura 9 observa-se uma menor variabilidade dos valores nas temperaturas 1050°C e 1150°C, ou seja, possuem um menor desvio padrão, mesmo possuindo valores discrepantes (outliers). Estes valores representam as medidas atípicas obtidas e que podem ser explicadas pela indentação em uma região da amostra de maior ou menor dureza. As medições das amostras “como entregue” e com temperatura de têmpera de 950°C apresentam um maior desvio padrão (maior diferença na escala entre o máximo e o mínimo dos valores), o que se explica pela existência de mais regiões com durezas diferentes do que as demais amostras.

Já na Figura 10, para a temperatura de 950°C, grande parte dos valores estão variando bem próximo da média (pequena variação entre os valores máximos e mínimos representados pelas semirretas que saem da caixa) porém, a presença de muitos valores discrepantes aumenta o seu desvio padrão. Sendo assim, a amostra temperada à 1150°C se torna a que apresenta menor variabilidade em suas medições.

Para ilustrar os dados obtidos no ensaio de microdureza, realizando uma comparação entre as amostras de acordo com suas condições de tratamento, foi elaborado o gráfico da Figura 11, que traz curvas que demonstram o comportamento das amostras temperadas, temperadas e revenidas, e a como entregue.

Figura 11 – Gráfico com a relação das durezas obtidas com os tratamentos térmicos realizados.



Fonte: Autoria Própria (2019).

Como se observa, a dureza de todas as amostras varia proporcionalmente à temperatura de austenitização. As amostras apenas temperadas (curva vermelha) apresentam valores de dureza mais elevados, como se era esperado devido a composição de sua matriz após o tratamento de têmpera. A maior dissolução dos carbonetos primários durante a austenitização explica esse acontecimento.

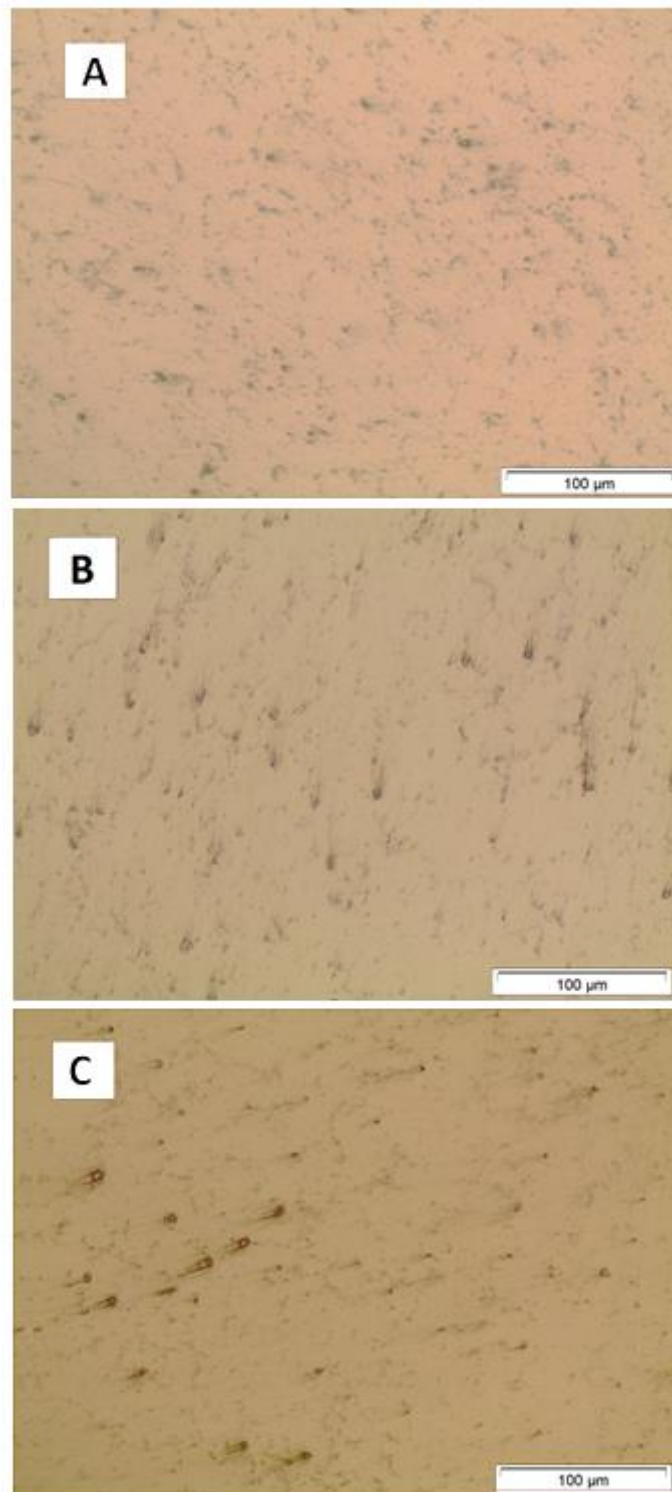
Na curva azul, que representa as amostras temperadas e revenidas, a queda de dureza ocorre de forma mais uniforme e mais acentuada devido a característica principal do revenimento que é o alívio de tensões e, conseqüentemente, da elevada dureza. O endurecimento secundário, processo típico dos aços rápidos, é o que explica a manutenção de uma dureza alta mesmo após esse tratamento. Também é possível notar a proximidade nos valores de dureza entre a amostra “como entregue” e a temperada a 1150°C com posterior revenimento, o que leva a considerar que a peça é entregue nesse estado.

5.2. ANÁLISE DE MICROSCOPIA ÓPTICA

Foram obtidas micrografias de todas as amostras em estudo após as mesmas passarem pelo processo de preparação metalográfica já descrito.

Dentre o total de amostras analisadas, três passaram apenas pelo tratamento de têmpera, variando a temperatura entre 950°C, 1050°C e 1150°C. A micrografia dessas está representada na Figura 12.

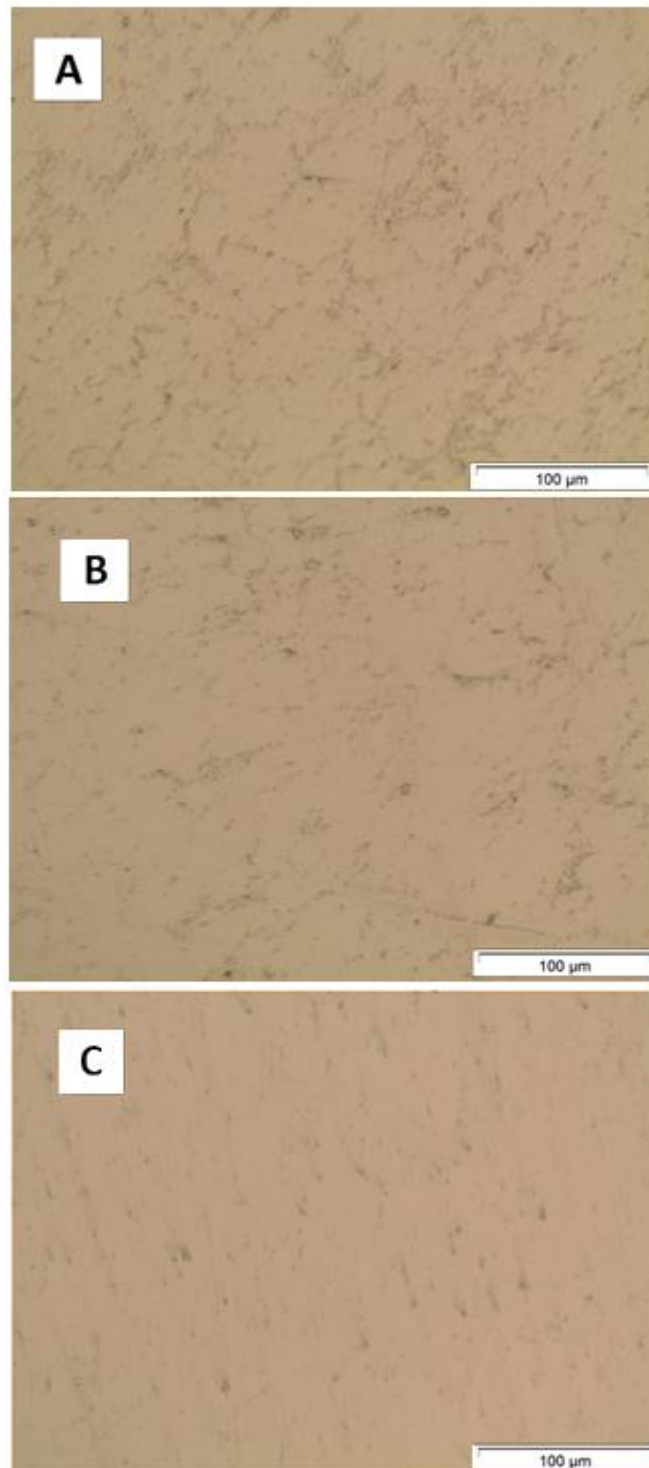
Figura 12 - Micrografia das amostras temperadas: A) 950°C; B) 1050°C; C) 1150°C.
Aumento de 200X.



Fonte: Autoria Própria (2019).

Já na Figura 13 a seguir, são mostradas as micrografias das amostras que foram temperadas nas mesmas temperaturas que as amostras citadas acima, porém passaram por um tratamento de revenimento à uma temperatura de 550°C com permanência de 2 horas.

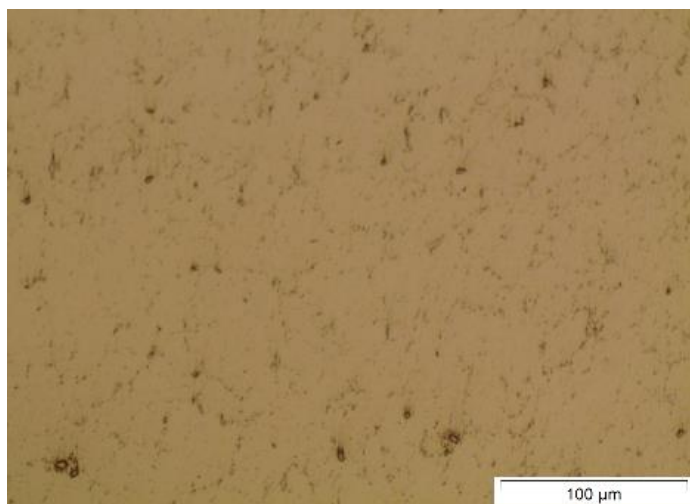
Figura 13 - Micrografia das amostras temperadas e revenidas. Todos os revenimentos realizados a 550°C. Têmperas a: A) 950°C; B) 1050°C; C) 1150°C. Aumento de 200X.



Fonte: Autoria Própria (2019).

A amostra analisada como entregue tem a sua micrografia representada pela Figura 14.

Figura 14 - Micrografia da amostra conforme obtida no laboratório da UFERSA, sem nenhum tratamento realizado durante a pesquisa. Aumento 200X.



Fonte: Autoria Própria (2019).

Dentre as microestruturas presentes tanto nos aços rápidos temperados quanto nos temperados e revenidos, conforme abordado anteriormente, é possível visualizar nas micrografias das Figuras 12, 13 e 14 apenas os carbonetos residuais, representados pelos pequenos pontos pretos. Na Figura 12, percebe-se uma leve diferença entre a quantidade de carbonetos presentes na imagem “A” comparada com as imagens “B” e “C”, que foram temperadas em maiores temperaturas e, por isso, apresentam menos carbonetos precipitados devido a sua maior dissolução. Já na Figura 13, essa diferença é mais nítida, podendo ser explicada pelo fato de que além da maior temperatura de têmpera ainda foi realizado o tratamento de revenimento que refina ainda mais a microestrutura. Com isso, fica clara a menor quantidade de carbonetos visíveis na imagem “C” em relação às demais.

Pode-se observar a maior semelhança entre a microestrutura da Figura 14, que representa a amostra “como entregue”, com as microestruturas da Figura 13 (amostras temperadas e revenidas) o que sustenta o que foi explicado no tópico do ensaio de microdureza sobre o estado da amostra que foi analisada como obtida.

Algumas dificuldades para realizar a análise por microscopia óptica foram encontradas durante a elaboração deste trabalho, tais como:

- Os aços rápidos apresentam uma microestrutura bastante refinada, o que dificulta bastante a análise por microscopia óptica, não sendo possível, as vezes, nem identificar

os contornos de grão. Se consegue uma melhor visualização com aumentos maiores, porém muitos microscópios só possuem até 1000x.

- Os carbonetos, apesar de vistos na microscopia óptica em forma de pontos, só são diferenciados e classificados com o auxílio de equipamentos como o Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV).
- Dificuldade em se ter o ataque químico superficial adequado para a revelação da microestrutura a ser observada. Serna (2008) deixa claro isso em sua pesquisa, quando cita que várias soluções testadas não forneceram uma imagem microscópica clara da microestrutura. Fala ainda que o melhor resultado foi obtido com solução de *Berzelius*, que é pouco conhecida e de difícil obtenção. Geralmente é utilizada a solução de Nital variando sua composição e tempo de ataque, o que foi feito nesta pesquisa, utilizando composições de 2%, 3% e 4% com diversos tempos de ataque químico na superfície.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

No trabalho em questão foi realizada a análise e caracterização da microestrutura do aço rápido AISI M2. Durante sua utilização, as ferramentas são submetidas às mais variadas condições de trabalho, sendo, portanto, necessário conhecer de que material são compostas e, com isso, concluir se é o mais adequado para o trabalho a ser realizado.

Além da pesquisa realizada, ensaios de microdureza e microscopia óptica foram realizados chegando às seguintes conclusões:

- O aço AISI M2 submetido apenas ao tratamento de têmpera apresentou valores de dureza compatíveis com o que era esperado para uma estrutura de matriz martensítica;
- As amostras submetidas ao revenimento simples apresentaram valores de dureza satisfatório comparados aos obtidos pelo duplo revenimento tido como ideal para esse tipo de aço pela literatura;
- Foi observado o típico “endurecimento secundário” dos aços rápidos ao se obter elevadas durezas após o revenimento, comprovando a dureza excessiva dos carbonetos existentes na microestrutura;
- Observou-se a diminuição da quantidade de carbonetos com o aumento da temperatura de têmpera, devido a sua dissolução. Nas amostras revenidas também ficou nítida essa ocorrência;
- A análise por microscopia óptica não obteve um resultado tão satisfatório, tendo em vista algumas dificuldades ao se trabalhar com esse tipo de material bem como algumas limitações do equipamento utilizado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CALLISTER Jr, William D.; RETHWISCH, David G. **Ciência Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. 8. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2012. 817 p.

CHIAVERINI, Vicente. **Aços e Ferros Fundidos**. 7. ed.ampl e ver. São Paulo: ABM, 2012.

CIMM. **Aços Ferramenta**. Disponível em: <
https://www.cimm.com.br/portal/material_didatico/6360#.WtjwNS7wbIU >. Acesso em: 22 mar. 2018.

DURAND-CHARRE, Madeleine. **Microstructure of steels and cast irons**. Springer Science & Business Media, 2013.

GGD METALS. **AISI M2**. 2015. Elaborado por GGD Metals. Disponível em: <
<https://ggdmetals.com.br/wp-content/uploads/2015/07/A%C3%87O-M2.pdf> >. Acesso em: 07 ago. 2019.

GUIMARÃES, Aline Silva et al. Efeito das condições de têmpera na microestrutura e na dureza do aço aisi m2. In: Congresso Anual da ABM, 69., 2014, São Paulo. **Anais**. São Paulo: Abm Week, 2014. p. 1425 - 1432.

JESUS, Edilson Rosa Barbosa de. **Ferramentas de usinagem em aço rápido AISI M2 obtido por conformação por spray, 2004**. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo.

KRAUSS, George. **Steels: processing, structure and performance**. Asm International, 2015.

MATTHEW, B. O. **High speed steel: the development, nature, treatment, and use of high speed steels, together with some suggestions as to the problems involved in their use**. New York: Charleston: BiblioBazaar, 2009. 374 p.

ROBERTS, George Adam; KENNEDY, Richard; KRAUSS, George. **Tool Steels**. ASM, international, 1998.

ROSA, Júnia Bicalho Duarte et al. Influência dos parâmetros de têmpera e revenimento sobre a dureza e a microestrutura do aço aisi m2. In: Congresso Anual da ABM, 72., 2017, São Paulo. **Anais do Congresso Anual da ABM**. São Paulo: Abm Week, 2017. v. 72, p. 1697 - 1704.

SCHEID, Adriano. **Curso básico de aços**. 2010. 100 f. Apostila, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR. Disponível em: <<http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/TM343/A%C7OS.pdf>>. Acesso em: 22 mar. 2018.

SCHLATTER, Djeison. **Efeito da têmpera e revenido nas propriedades mecânicas e microestruturais de aços rápidos obtidos por processos convencionais e metalurgia do pó**. 2012. 137 p. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, UFSC, Florianópolis, 2012.

SERNA, Marilene Morelli. **Quantificação e identificação de carbonetos no aço ferramenta AISI/SAE M2**. 2008. 115 f. Tese (Doutorado). Curso de Ciências na Área de Tecnologia Nuclear – Materiais, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – IPEN, São Paulo, 2003.

SILVA, André Luiz V. da Costa e; MEI, Paulo Roberto. **Aços e Ligas Especiais**. 3. ed. São Paulo: Blucher, 2010.

VILLARES METALS S.A. (Sumaré - SP). **Aços rápidos VWM2**. Disponível em:<<http://www.villaresmetals.com.br/pt/Produtos/Acos-Rapidos/VWM2>>. Acesso em: 25 jul. 2019.

VITRY, V; NARDONE, S.; BREYER, J. P.; SINNAEVE, M.; DELAUNOIS, F. **Microstructure of two centrifugal cast high speed steels for hot strip mills applications. Materials & Design**, [s.l.], v. 34, p. 372-378, fev. 2011. Elsevier BV. DOI: 10.1016/j.matdes.2011.07.041. Disponível em:<<http://api.elsevier.com/content/article/PII:S026130691100519X?httpAccept=text/xml>>. Acesso em: 01 ago. 2019.