

Artigo

Caracterização microestrutural de um feixe de mola e análise da viabilidade de utilizá-lo como ferramenta de corte

Natanael da Silva Juvêncio ^[1], Manoel Quirino da Silva Júnior ^[2]

^[1] Universidade Federal Rural do Semiárido - UFERSA, Engenharia Mecânica; Natanael da Silva Juvêncio;
100Natanael@gmail.com

^[2] Universidade Federal Rural do Semiárido - UFERSA, Engenharia Mecânica; Manoel Quirino da Silva Júnior;
Manoel.quirino@ufersa.edu.br

Data da defesa: 15/05/2023;

Resumo: Feixes de molas são projetados para suportarem níveis elevados de deformações elásticas, porém o desgaste prematuro ou não, fazem surgir a necessidade da substituição da lâmina danificada ou até mesmo o feixe por completo, como consequência, favorecendo o acúmulo desses materiais em sucatas. Visto isso, este estudo se propõe a caracterizar micro estruturalmente o aço SAE 5160 empregado na fabricação de feixes de mola e analisar a viabilidade de utilizá-lo como ferramenta de corte, variando parâmetros de tratamentos térmicos para obtenção da dureza referida para a aplicação. Foram realizados tratamentos térmicos de têmpera e revenimento, utilizando como meio de resfriamento na têmpera água para uma amostra e óleo em três amostras. As amostras passaram por procedimentos de preparação superficial por técnica de lixamento, polimento e ataque químico para posterior caracterização por meio de exame microscópico. A dureza obtida em duas amostras (61,3 e 57 HRC) foi superior ao valor mínimo recomendado para aços ferramentas (55 HRC), porém se manteve abaixo do valor do bit utilizado como referência na pesquisa (63 a 67 HRC). Uma amostra não atingiu o valor mínimo recomendado para aços ferramentas. A microestrutura obtida pós têmpera foi a martensita. O revenimento promoveu redução nos grãos martensíticos à medida que se aumentava a temperatura do mesmo. A água como meio de resfriamento no processo de têmpera para o aço SAE 5160, comprovou ser inadequado, visto que sua severidade promoveu a formação de trincas.

Palavras-chave: Feixes de mola; Dureza; Microestrutura; Ferramenta de corte.

1. INTRODUÇÃO

Os veículos são compostos de uma vasta gama de peças e equipamentos, para se alcançar seu pleno funcionamento. Dentre essa vasta gama de peças e equipamentos, tem-se os feixes de mola, elemento o qual é capaz de suportar altos níveis de deformações elásticas quando submetidos à ação de forças e momentos, sendo capaz de acumular níveis elevados de energia potencial elástica, atuando principalmente como um elemento elástico e estrutural nas suspensões de eixo rígido, conseguindo assim atenuar deslocamentos de pequenas frequência e elevada amplitude, proporcionando ao motorista e passageiros um maior conforto, estabilidade e segurança.

Os feixes de mola são formados por barras chatas, amplamente conhecida por lâminas, com um grau de curvatura, na qual são conectadas por intermédio de um parafuso na região central. As principais causas que favorece o desgaste precoce ou não, dos feixes de mola, são as imperfeições comumente encontradas nas pistas e estradas, como também o excesso de carga ou até mesmo uma manutenção incorreta ou insuficiente, trazendo como consequência desse desgaste, a necessidade de substituir a lâmina, quando constatado que a mesma está inadequada para o propósito na qual foi desenvolvida, resultando assim no acúmulo desses materiais em sucatas.

Os aços de médio teor de carbono apresentam concentrações de carbono entre aproximadamente 0,25% e 0,6%p. Adições de cromo, níquel e molibdênio melhoram a capacidade dessas ligas de serem tratadas termicamente, dando origem a diversas combinações de resistência mecânica, resistência à abrasão, ductilidade e tenacidade [1]. O aço SAE 5160 é geralmente utilizado na fabricação de feixes de mola, sendo catalogado como um aço de médio teor de carbono e baixa liga, tendo como principal elemento de liga o cromo (Cr) e Manganês (Mn), conforme pode se observar na Tabela 1 e 2.

Composição Química (%)								
<i>C</i>	<i>Si</i>	<i>Mn</i>	<i>P</i>	<i>S</i>	<i>Cr</i>	<i>Ni</i>	<i>Mo</i>	<i>V</i>
0,56-0,64	0,15-0,35	0,75-1,00	0,03 máx	0,04máx	0,70-0,90	-	-	-

TABELA 1. Composição Química principal do aço SAE 5160 (adaptado). [2]

Especificação AISI/SAE ^a	Especificação UNS	Faixas de Composição (%p dos Elementos de Liga em Adição ao C) ^b			
		Ni	Cr	Mo	Outros
10xx, Aço-carbono comum	G10xx0				
11xx, Fácil usinagem	G11xx0				0,08–0,33S
12xx, Fácil usinagem	G12xx0				0,10–0,35S 0,04–0,12P
13xx	G13xx0				1,60–1,90Mn
40xx	G40xx0			0,20–0,30	
41xx	G41xx0		0,80–1,10	0,15–0,25	
43xx	G43xx0	1,65–2,00	0,40–0,90	0,20–0,30	
46xx	G46xx0	0,70–2,00		0,15–0,30	
48xx	G48xx0	3,25–3,75		0,20–0,30	
51xx	G51xx0		0,70–1,10		
61xx	G61xx0		0,50–1,10		0,10–0,15V
86xx	G86xx0	0,40–0,70	0,40–0,60	0,15–0,25	
92xx	G92xx0				1,80–2,20Si

TABELA 2. Sistema de especificação AISI/SAE e UNS e faixa de composições para aços-comuns e vários aços de baixa liga. [1]

A adição do cromo (Cr) no aço SAE 5160 tem por finalidade, aumentar a resistência à corrosão e a oxidação, além de elevar a capacidade de endurecimento, melhorar a resistência à alta temperatura, como também melhorar a resistência à abrasão em composições de alto carbono [3]. O cromo (Cr), é um excelente formador de carbonetos, como também proporciona ao material uma maior temperabilidade, aumentando assim a capacidade do material de obter um endurecimento uniforme em toda seção, por meio da formação da estrutura martensítica, proporcionando deste modo maiores níveis de resistência mecânica e dureza ao material tratado termicamente. O manganês em aços que possui médio e alto teor de carbono, ajuda na formação do composto Mn_3C que se associa com o Fe_3C , aumentando ainda mais a dureza e a resistência do aço [4]. O manganês também proporciona ao material uma maior temperabilidade, assim como atua reduzindo a temperatura de austenitização.

Além de aplicado na fabricação de molas, sejam elas semi-elípticas ou helicoidais, o aço SAE 5160 é bastante utilizado em outras aplicações na indústria automobilística, por exemplo para fabricação de barras estabilizadoras do sistema de suspensão do veículo, eixos, pinos e fixadores, assim como na fabricação de utensílios de corte e na indústria em geral [3]. Um dos principais motivos da utilização do aço SAE 5160, é seu ótimo custo benefício proporcionado, pois apresenta um elevado limite de elasticidade, como também alta resistência a fadiga, mecânica e tenacidade, podendo alcançar boas propriedades mecânicas quando submetido a tratamentos térmicos, além de apresentar níveis de eficiência semelhante a aços de composições mais nobres, como os da classe 86XX, 92XX e 61XX. As Tabelas 3 e 4 observa-se algumas propriedades mecânicas do aço SAE 5160 para diferentes tratamentos térmicos e parâmetros.

Aço	Condição	Temp. Austenit. [°C]	Resist. à Tração [Mpa]	Lim. Escoa. [Mpa]	Alonga. ϵ [%]	Red. área ϕ [%]	Dureza [HB]	Impacto [J]
SAE 5160	Normalizado	860	960	530	17,5	45	269	11
	Recozido	815	725	275	17,2	31	197	10

TABELA 3. Propriedades mecânicas do aço SAE 5160 (adaptado). [2]

Aço	Condição	Temp. Revenim. [°C]	Resist. à Tração [Mpa]	Lim. Escoa. [Mpa]	Alonga. ϵ [%]	Red. área ϕ [%]	Dureza [HB]
SAE 5160	Temperado e Revenido	205	2220	1793	4	10	627
		315	1999	1772	9	30	555
		425	1606	1462	10	37	461
		540	1165	1041	12	47	341
		650	896	800	20	56	269

TABELA 4. Propriedades mecânicas do aço SAE 5160 (adaptado). [2]

Tratamento térmico é um conjunto de operações de aquecimento e resfriamento a que são submetidos os aços, sob condições controladas de temperatura, tempo, atmosfera e velocidade de esfriamento, com o objetivo de alterar as suas propriedades ou conferir-lhe características determinados [4]. A partir dos tratamentos térmicos, concentração de carbono e a presença/concentração de elementos de liga no aço tratado termicamente, pode-se alcançar grandes vantagens, por exemplo, aumento de resistência mecânica, remoção de tensões internas, acréscimo ou redução da dureza. Todavia, um tratamento térmico nem sempre atinge todas as necessidades de engenharia demandada, dessa forma melhorando uma propriedade mecânica e consequentemente afetando na redução de outra. Sendo assim, é preciso analisar com bastante atenção o tratamento térmico empregado, visto a necessidade de melhorar algumas propriedades mecânicas desejadas e em contrapartida, reduzindo as indesejadas.

Existe uma diversidade de tratamentos térmicos, sendo um deles a têmpera. A têmpera consiste em resfriar o aço, após austenitização, a uma velocidade suficientemente rápida para evitar as transformações perlíticas e bainíticas na peça em questão [5]. A operação de têmpera objetiva atingir a máxima dureza na superfície do material a certa profundidade, obter microestrutura totalmente martensítica a determinada profundidade por intermédio de um resfriamento a uma taxa crítica [6]. Como resultado da têmpera, as principais propriedades mecânicas enaltecidas são a dureza e o limite de resistência a tração, por outro lado afetando a ductibilidade e tenacidade do material tratado. A martensita é uma fase metaestável que surge perante o resfriamento da austenita. A transformação martensítica é caracterizada por ser um processo adifusional, que resulta do cisalhamento da estrutura, sem a ocorrência de mudança de composição química [5]. A primeira etapa da operação envolve o aquecimento do material até sua austenitização, e ele permanecerá nessa temperatura por um intervalo de tempo adequado, e posteriormente será resfriado bruscamente de maneira continuada, em um meio de resfriamento que garanta cinética favorável para obtenção da estrutura martensítica [7]. Para formação da martensita no aço tratado termicamente, deve-se levar em consideração a composição da liga, principalmente o carbono, além do meio de resfriamento empregado e dimensão da peça. Vale salientar que na têmpera são alcançados os maiores níveis de dureza, porém a formação da martensita, provoca o surgimento de tensões internas e tensões térmicas, como também a severidade do resfriamento na têmpera, pode provocar níveis de tensões internas capaz de causar deformações plásticas (empeno da peça) e ruptura (trincas de têmpera). Na Figura 1, observamos o estado de tensão gerado em cada estágio do tratamento de têmpera.

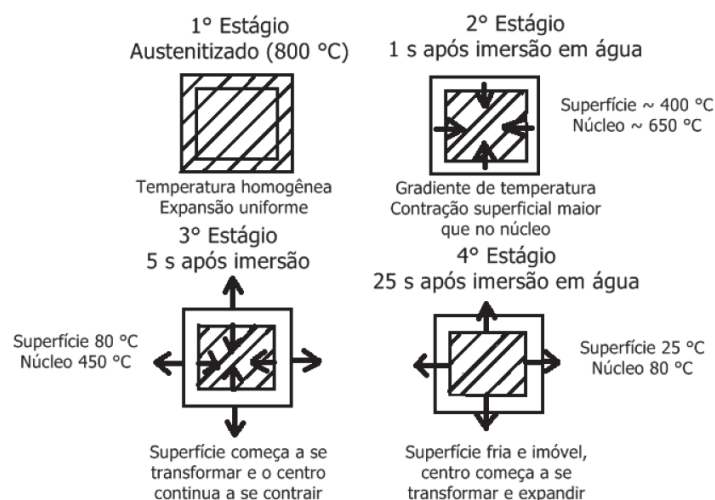


FIGURA 1. Ilustração esquemática do estado de tensão na têmpera [5].

No 1º estágio, a peça está totalmente austenitizada com sua temperatura homogênea, consequentemente sua expansão é uniforme [5]. No 2º estágio, acontece a imersão da peça no meio de resfriamento, onde a superfície da peça se contrai mais que o núcleo, causando um resfriamento não uniforme, por consequência promove mudanças volumétricas não uniformes, gerando assim forças compressivas em relação as camadas internas [5]. No 3º estágio, se inicia a transformação martensítica na superfície da peça, como efeito da transformação um aumento volumétrico, enquanto o núcleo está em contração, portanto se é gerado um estado plano de tensão completamente trativo, de tal forma que quando as tensões geradas excedem o limite de escoamento do aço tratado, ocorre deformação plástica (empeno) e quando excede o limite de resistência a tração, provoca-se o surgimento de tricas, logo tornando a peça inapropriada para aplicação, consequentemente sendo necessário o descarte [5]. Por fim, no 4º estágio ocorre a transformação martensítica no centro da peça, como consequência ocorre uma expansão volumétrica [5].

A formação da martensítica, traz consigo particularidades indesejadas tais como tensões residuais e internas, baixa ductilidade e tenacidade. Portanto, comumente se utiliza um tratamento térmico complementar almejando um melhor equilíbrio entre as propriedades do material. Tal tratamento é denominado de revenimento. O revenimento é o tratamento térmico que normalmente sempre acompanha a têmpera, pois elimina a maioria dos inconvenientes produzidos por esta; além de aliviar ou remover tensões internas, corrige a excessiva dureza e fragilidade do material, aumentando sua ductibilidade e resistência ao choque [4]. Este tratamento consiste em aquecer o aço uniformemente até uma temperatura abaixo daquela de austenitização, mantendo o aço nesta temperatura por tempo suficiente para equalização de temperatura e obtenção das propriedades desejadas [5]. O revenimento é um tratamento térmico que depende de dois fatores, sendo eles a temperatura de operação e o tempo de permanência nessa temperatura. Sendo assim, esses dois fatores são definidos de acordo com a microestrutura, propriedades mecânicas e aplicação desejadas ao aço tratado.

Algumas pesquisas foram conduzidas com a finalidade de avaliar o efeito da temperatura de revenimento na dureza do aço SAE 5160, além de caracterizar micro estruturalmente e variar meios de resfriamento na têmpera [8,9,11 e 12].

Foi realizado tratamentos térmicos de têmpera e revenimento, utilizando como meio de resfriamento o óleo para o aço SAE 5160 [8 e 9]. Para as amostras temperada, revenida a 200 e 300 °C, foram obtidos valores de dureza aproximadamente em 64, 59 e 55 HRc [8 e 9]. O aumento da temperatura de revenimento promoveu uma maior mobilidade atômica, o que facilitou o movimento de carbono para menor energia [11]. Logo, o aumento de temperatura possibilitou a formação de carbonetos e a decomposição da austenita retida, formando assim microestruturas convencionais de mecanismos difusivos [11].

Observa-se na Figura 2, a metalografia de um corpo de prova do aço SAE 5160 na condição temperado em óleo, com a presença da microestrutura martensítica [9].



FIGURA 2. Metalografia de um corpo de prova do aço SAE 5160, com aumento de 1000 x [9].

Foi analisado as microestruturas das amostras de aço SAE 5160, na condição de apenas temperado, como também temperado e revenido a 200 e 300 °C em óleo [11]. Observou uma presente microestrutura em formas de ripas, que é característica da martensita, para amostra apenas temperado [11]. Com o aumento da temperatura de revenimento, ocorreu o aumento de difusão de carbonetos, sendo característico da martensita revenida, logo os carbonetos mais difusos são mais uniformemente espalhados pelo o material [11].

O revenimento em faixas de temperatura a 200 °C promove a precipitação de carbonetos na forma de pequenas ripas, reduzindo consequentemente o teor de carbono na martensita [5]. Durante o revenimento em faixas de temperatura de 230 e 300 °C, se inicia a decomposição da austenita retida formando posteriormente ferrita e cementita [5].

Existe diversos meios de resfriamento na têmpera, sendo os meios mais comuns água, óleo e ar [5]. Quando comparado ao óleo, a água é um meio de resfriamento mais severo, dessa forma sendo mais recomendado para aços de mais baixa temperabilidade [9]. Para o aço SAE 5160, a água como meio de resfriamento na têmpera, provoca o surgimento de trincas, devido os níveis de tensões gerados na transformação martensítica, que chega a ultrapassar o limite de resistência a tração do material [12].

Os aços ferramentas em geral, são usados em aplicações para dar forma a outros materiais em processos como matrizes de conformação mecânica, estampagem, forjamento, injeção de ligas metálicas ou até polímeros, usados em operação de conformação de aços ou materiais com dureza inferior ao material da ferramenta [13]. São projetados para terem elevada dureza e durabilidade submetidos a condições severas de serviço, normalmente situações que requerem resistência ao desgaste e elevada tenacidade nas aplicações [14]. Os aços ferramentas possuem composições, propriedades e características diferentes entre si sendo, em alguns casos, classificados de acordo com suas aplicações. As ferramentas de corte são comumente fabricadas a partir de aços ferramentas, devido possuir propriedades mecânicas essenciais para a devida aplicação, tal como elevada dureza, resistência ao desgaste e tenacidade suficiente para suporta as operações que as ferramentas de corte são submetidas. Dentre a vasta gama de aços ferramentas, existe uma classe resistente ao choque, os da série “S”, podendo combinar elevada resistência ao choque, boa resistência a fadiga e ao desgaste, alcançando níveis de dureza acima de 50 HRC. Suas principais aplicações são punções, matrizes e ferramentas de corte [15]. Na Tabela 5, observa-se a composição química do aço AISI S1 da série “S”.

Composição Química (%)								
<i>C</i>	<i>Si</i>	<i>Mn</i>	<i>P</i>	<i>S</i>	<i>Cr</i>	<i>W</i>	<i>Mo</i>	<i>V</i>
0,40-0,55	0,15-1,20	0,10-0,40	0,03 máx	0,03 máx	1,00-1,80	1,50-3,00	0,50 máx	0,15-0,30

TABELA 5. Composição Química principal do aço AISI S1 (adaptado). [2]

Conforme apresentado na Tabela 1, é possível traçar um comparativo entre a composição química do aço SAE 5160 e do aço AISI S1, e perceber que ambos contêm um médio percentual de teor de carbono, variando em uma média de 0,5% C, além de possuir cromo e manganês em sua composição que contribui no aumento de dureza mediante a maior temperabilidade proporcionada, consequentemente favorecendo a formação martensita. Portanto, de acordo com o tratamento térmico aplicado no aço SAE 5160 é possível atingir ou se aproximar das principais propriedades mecânicas desejáveis e que são fundamentais em uma ferramenta de corte, tal como elevada dureza, resistência ao desgaste e tenacidade para resistir as aplicações na qual é designada.

Diante do exposto até aqui, a finalidade dessa pesquisa é caracterizar micro estruturalmente o aço SAE 5160 utilizado na fabricação de feixes de mola e analisar a viabilidade de utilizá-los como ferramenta de corte, variando diferentes parâmetros em tratamentos térmicos, visando alcançar níveis de dureza de um aço ferramenta.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Para realização do ensaio de dureza Rockwell C, foi utilizada a sequência de processo conforme observa-se na Figura 3.

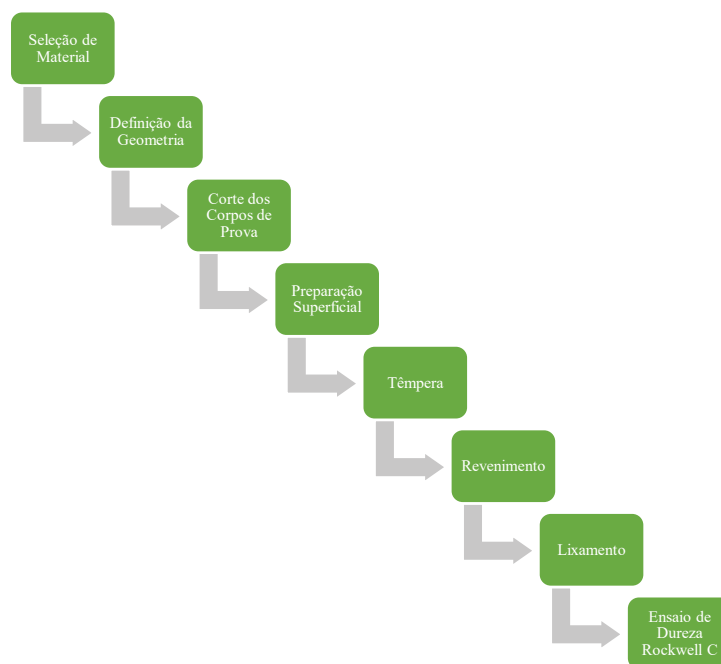


FIGURA 3. Sequência de procedimento experimental para ensaio de dureza Rockwell C (autoria própria).

A primeira etapa da fase experimental, consistiu em selecionar o material estudado, uma lâmina de um feixe de mola, conforme catálogo do fabricante de aço SAE 5160 [16], na qual foi definida a geometria das amostras de acordo com uma ferramenta de corte comercial, sendo ela 5/8" x 4 1/2" [17]. A dimensão da lâmina selecionada era de 600 mm x 70 mm x 17 mm, logo parte da mesma foi levada para aquecimento em uma forja de fabricação caseira por tempo de 15 minutos e uma temperatura aproximadamente de 900 °C, projetada para funcionar com carvão natural, em seguida foi desempenada por meio de martelamento sobre uma bigorna, com o propósito de sua superfície torna-se plana. Posteriormente, se iniciou a terceira fase experimental, os corpos de provas foram cortados com a referida geometria anteriormente mencionada, com o auxílio de uma morsa para fixação e uma esmerilhadeira Bosch 22-180. Após a operação de corte, os corpos de prova passaram por uma etapa de acabamento superficial, para alcançar a dimensões da ferramenta de corte utilizada como referência da pesquisa. Para tal operação foi utilizada uma lixadeira de cinta, com lixas de grão cerâmico de diferentes granulometrias (36, 60, 80, 100 e 120). A Figura 4 apresenta os corpos de prova.



FIGURA 4. Corpos de prova (autoria própria).

Para o tratamento térmico de têmpera, foi empregado um forno do tipo mufla fabricado pela Zezimaq®, com uma capacidade de aquecimento de até 1200 °C. O forno foi programado para operar em uma temperatura

de 850 °C, para garantir completa austenitização das amostras, tendo em vista que para o aço SAE 5160 a temperatura recomendada é de 802-843 °C [4]. Após o forno atingir a temperatura de operação, os corpos de provas foram posicionados no interior do forno para aquecimento, onde permaneceram em um período de 30 minutos, para garantir um aquecimento homogêneo em toda seção das amostras, sendo um corpo de prova de prova resfriado em água e três em óleo. A transferência dos corpos de prova ao meio de resfriamento aconteceu de forma rápida, não possibilitando perda de calor para o ambiente suficiente, a ponto de a temperatura ser inferior à de austenitização. No ato do resfriamento, os corpos de provas foram agitados em meio ao fluido utilizado como meio de extração de calor (água ou óleo), dessa forma prevenindo que a troca de calor entre a peça e o fluido não modificasse a viscosidade do mesmo, a ponto de comprometer a capacidade de remoção de calor do fluido utilizado.

Finalizado a têmpera, duas amostras foram lavadas em água corrente para remoção da carepa formada na operação de têmpera, em sequência se iniciou-se o tratamento térmico de revenimento. Foi utilizado também fornos do tipo mufla fabricado pela Zezimaq®, sendo um programado para operar em 200 °C e outro em 300 °C [8]. Alcançado a temperatura de operação programada, os corpos de prova foram depositados no interior do forno por um período de 1 hora [11], sendo resfriado posteriormente em óleo.

Após realizado o revenimento, iniciou-se a preparação superficial das amostras por meio do lixamento, com a finalidade de remover toda camada de óxido formada, sendo aplicada lixa d'água com granulação #180, 220, 320, 400 e 600, fundamental para a preparação superficial que antecede o ensaio de dureza Rockwell C, conforme orientação da norma ASTM E 18-19. Para a realização do ensaio de dureza, foi empregado o durômetro Mitutoyo®HR-300, sendo realizado trinta medições em cada corpo de prova, ao longo de toda superfície anteriormente lixada, iniciando sempre a primeira medição no centro e as demais a uma distância entre si, de pelo menos 4 calotas (diâmetro) formada pelo o penetrador cônico de diamante, afim de evitar coleta de medidas nas proximidades periféricas da indentação do penetrador, e assim obter uma média de dureza mais assertiva ao longo da amostra. A sequência do procedimento para o ensaio se deu primeiramente no posicionamento da amostra e seleção do local da indentação, em seguida aproximação do indentador, aplicação da pré-carga (10kgf) e carga maior (150kgf), logo depois sendo removida a carga maior, coletando assim os valores de dureza em Rockwell C.

Para realização dos exames microscópicos, foi utilizada a sequência de processo conforme observa-se na Figura 5.

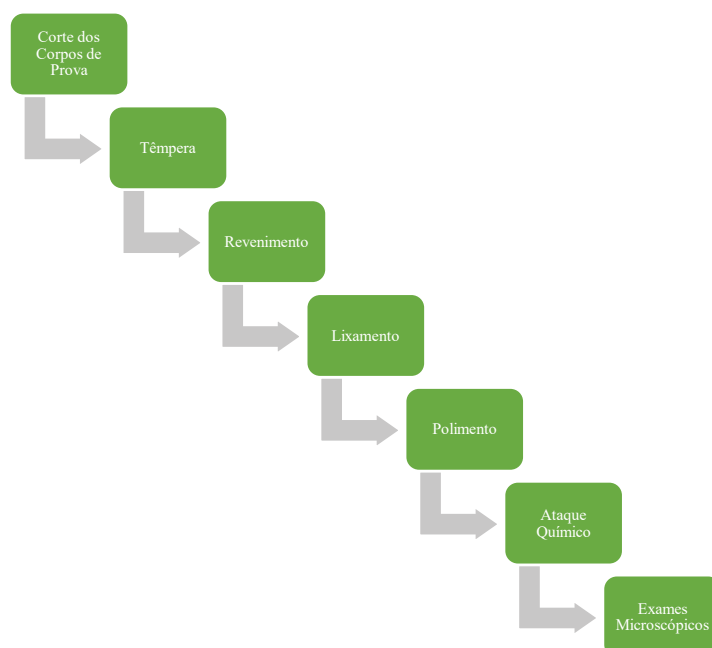


FIGURA 5. Sequência de procedimento experimental ensaio de dureza Rockwell C (autoria própria).

Para corte dos corpos de prova foi empregado um policorte Arotec AROCOR 60, na qual se seccionou as amostras com dimensões 5/8" x 1 1/2". Em seguida, as amostras foram levadas ao forno para tratamento térmico de têmpera e revenimento, utilizando metodologia anteriormente descrita. Após essa etapa, todas as amostras foram lixadas de forma manual, com objetivo de se alcançar um melhor acabamento superficial e superfícies planas para o futuro polimento. As lixas d'água empregadas possui granulação #180, 220, 320, 400, 600, 800,

1000 e 1200. Para realização do polimento foi utilizado uma politriz Arotec AROPOL 2V, com pano autoadesivo e umedecido com alumina. Para o ataque químico nas amostras anteriormente lixadas e polidas, foi usado Nital 3% [17], por técnica de imersão durante 5 s, almejando como resultado obter as amostras com superfície de aspecto opaca. Finalizado o ataque químico, as amostras foram limpas com álcool etílico e secas com secador. Utilizando um microscópio óptico Olympus®, GX51, com ampliação de 500 e 1000 $\times$, foi realizado o exame microscópico para obtenção de imagens microestruturais. Procurou-se obter uma focalização conveniente, para extrair imagens mais nítida quanto possível da microestrutura, tendo em vista o contraste causado pela ação do Nital 3%.

3. RESULTADOS

3.1 Análise de resultados do ensaio de dureza

A Tabela 6 apresenta os resultados obtidos do ensaio de dureza Rockwell C dos corpos de provas submetidos a diferentes tratamentos térmicos.

	<i>Temperaturas de revenimento (°C)</i>	<i>Dureza Média (HRC)</i>	<i>Desvio Padrão (HRC)</i>
Temperadas à 850 °C	Sem revenimento	61,3	1,8
	200 °C	57,0	1,2
	300 °C	52,9	1,4

TABELA 6. Dureza obtida após tratamentos térmicos (autoria própria).

Com base nos resultados obtidos no ensaio de dureza Rockwell C, foi construído uma curva de dureza em função do revenimento, com a finalidade de traçar um comparativo com uma nova curva composta por resultados obtidos em outros trabalhos científico realizado [14] e [15], conforme a Figura 6 apresenta. Para construção da curva experimental, foi utilizado valores médios obtidos a partir dos resultados da dureza Rockwell C e seus respectivos valores de desvio padrão, mediante as diferentes circunstâncias de tratamento térmico, sendo desde corpos de prova apenas temperado até revenimentos em diferentes temperaturas.

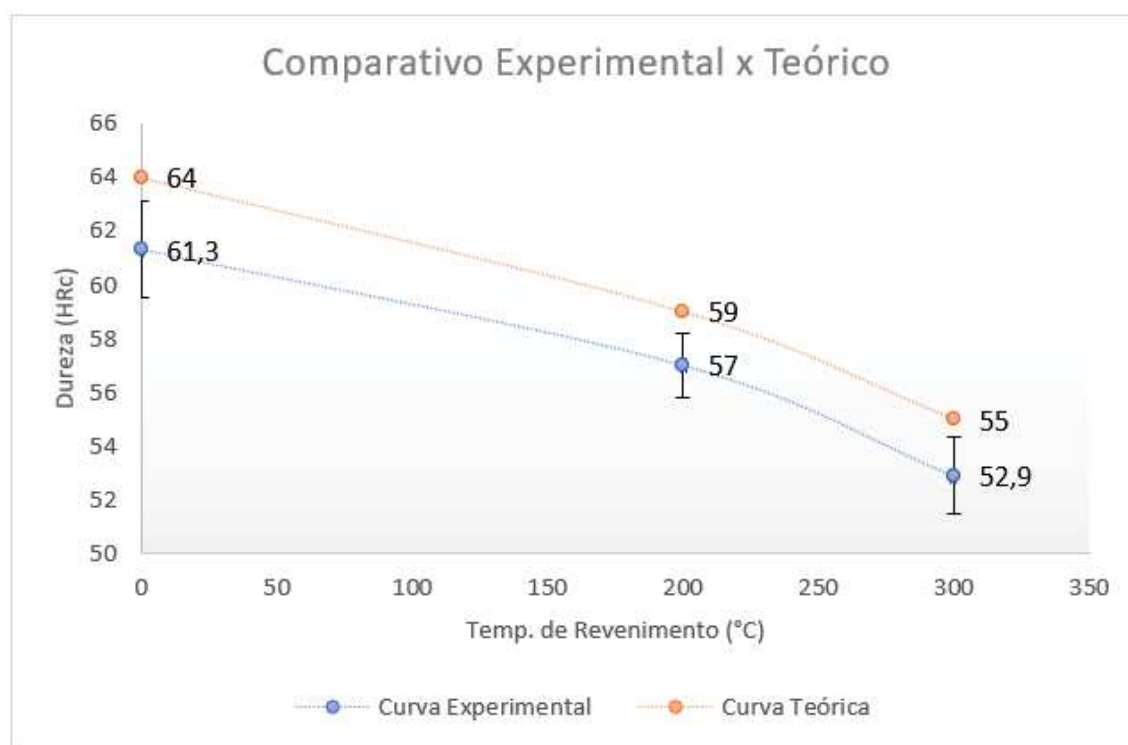


FIGURA 6. Comparativo de dureza experimental x teórico (autoria própria).

Pode-se constatar uma tendência de decréscimo da dureza à medida que se aumenta a temperatura de revenimento. O comportamento seguiu previsões observadas outras pesquisas [15 e 17]. Conforme mencionado anteriormente, no tratamento térmico de têmpera ocorre a formação da martensita, que por sua vez proporciona maiores níveis de dureza ao material. O revenimento a 200 °C realizado em um período de 1 hora, resultou em uma queda na dureza para 57 HRC, principalmente devido a precipitação de carboneto, que promove uma redução do teor de carbono na martensita [17 e 5]. O valor de dureza reduziu com mais intensidade, quando realizado o revenimento de 300 °C, chegando a 52,9 HRC. Revenimento nessa faixa de temperatura, faz com que ocorra a decomposição da austenita retida, formando assim ferrita e cementita. A cementita é precipitada e a martensita perde sua tetragonalidade transformando-se em ferrita. Por tanto, à medida que as partículas de cementita crescem as de carbonetos vão desaparecendo gradualmente [5]. Apesar da diferença de valores dos resultados experimentais obtidos, quando comparado com resultados alcançados em outras pesquisas [14 e 15], a curva experimental caracteriza com grande aproximação os resultados, principalmente quando observa-se os valores de desvio padrão associado, percebe-se que os valores se mantiveram próximo com uma pequena diferença entre eles. A dureza obtida por meio da têmpera e do revenimento a 200 °C, foram mais próximos da dureza normalmente encontrada na ferramenta de corte utilizada como referência na pesquisa, que costuma variar entre 63 a 67 HRC [13]. Embora tenha se observado diferença entre a dureza obtida com a dureza da ferramenta de corte comparada, os resultados foram superiores (11,4% e 3,6%) a dureza mínima normalmente recomendada a aços ferramentas, sendo ela de aproximadamente 55 HRC [4].

3.2 Análises Microestruturais

A Figura 7 apresenta um comparativo da microestrutura da Figura 2 e da microestrutura obtida na amostra apenas temperada a 850 °C em óleo, com ampliação de 1000×.

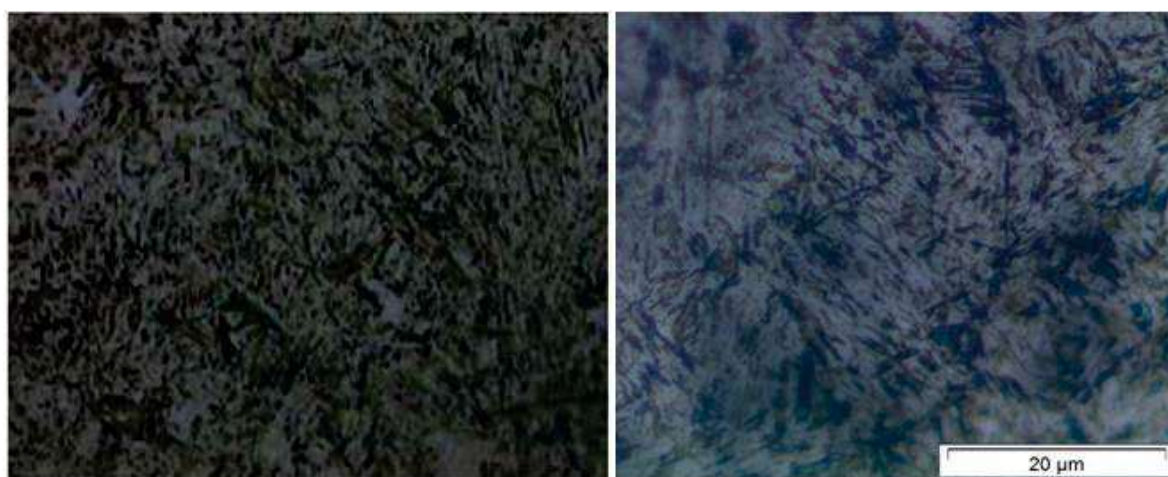


FIGURA 7. Comparativo entre microestrutura de outra pesquisa [15] e microestrutura experimental.

Apesar do contraste da iluminação empregada no microscópio para obtenção da fotomicrografia da microestrutura obtida experimentalmente, pode-se observar dois aspectos predominante em ambas microestruturas, sendo ela caracterizada por regiões bastante escura e regiões mais claras. As mais escuras remetem a martensita, devido a microestrutura apresentar formas com aspecto de placas e ripas em diferentes direções nas regiões dos grãos [5]. Resultado também corroborado pela dureza final obtida na amostra experimental, que se teve um aumento expressivo, anteriormente observado na Tabela 6, visto que normalmente a dureza estabelecida em projetos de feixes de mola, varia em torno de 43 – 48,5 HRC [18]. Portanto o tratamento térmico empregado foi bem sucedido.

A Figura 8 apresenta um comparativo entre as fotomicrografias das microestruturas obtidas com ampliação de 500×, para as condições de uma amostra apenas temperada a 850 °C em óleo, como também 2 amostras temperada 850 °C em óleo e revenida a 200 e 300 °C.

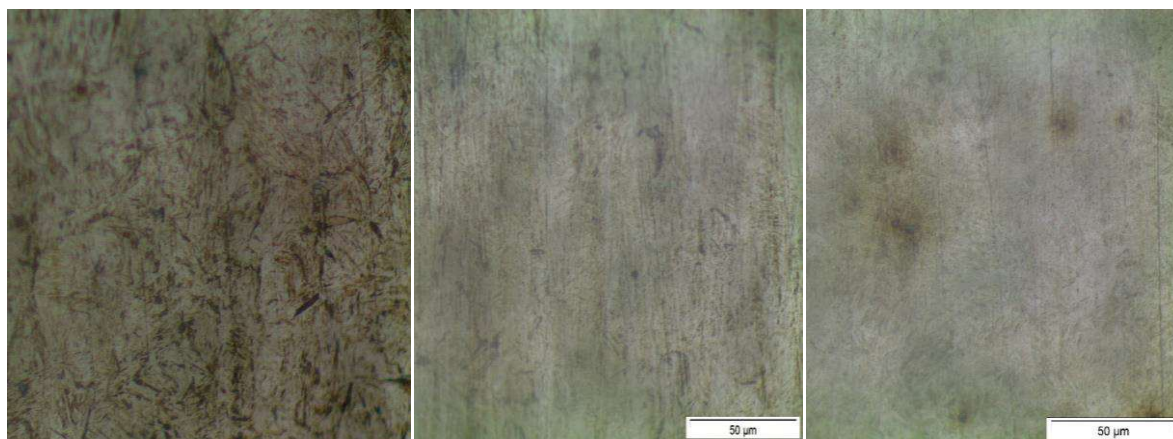


FIGURA 8. Comparativo entre microestrutura das amostras: Temperada a 850 °C em óleo. Temperada 850 °C em óleo e revenida a 200 °C. Temperada 850 °C em óleo e revenida a 300 °C.

Quando comparado a microestrutura obtida da amostra apenas temperada com a microestrutura da amostra temperada e revenida a 200° C, pode-se observar alteração microestrutural. As regiões mais escuras com aspecto de placas e ripas, reduziram, o que remete a concluir que o revenimento a 200° C promoveu redução nos grãos martensíticos, possivelmente em virtude da precipitação de carbonetos [5 e 17].

Comparando a microestrutura obtida da amostra apenas temperada com a microestrutura da amostra temperada e revenida a 300° C, houve uma redução ainda maior dos grãos martensíticos, pois as ripas e regiões mais escuras com aspecto de placa reduziram ainda mais. Tal causa também é resultante do fenômeno observado na amostra temperada e revenida a 200° C, onde ocorreu a precipitação de carbonetos [5 e 17]. Assim como também, o revenimento a 300 °C promoveu a decomposição da austenita retida, facilitando dessa maneira a formação de ferrita e cementita [5]. À medida que as partículas de cementita crescem as de carboneto vão desaparecendo gradualmente [5]. Pode-se notar algumas manchas escuras na fotomicrografia da Figura 8, da amostra temperada 850 °C em óleo e revenida a 300 °C. Elas são provenientes da alumina, que provavelmente não saiu no processo de polimento que antecede o ataque químico.

3.3 Análise dos meios de resfriamentos

O óleo como meio de resfriamento para o aço SAE 5160 confirmou ser mais adequado como meio de extração de calor, devido ao fato de se ter alcançado a microestrutura desejada, nesse caso a martensita e pelo o fato de possibilitar as amostras, níveis de dureza aproximada da ferramenta de corte utilizada como referência na pesquisa. Em contra partida, água como meio de resfriamento no processo de têmpera, para o aço em questão analisado, não demonstrou ser adequado como meio de extração de calor, visto que a severidade da velocidade do resfriamento ocasionou tensões de têmpera do tipo ruptura (trincas de têmpera), na qual as tensões geradas no tratamento superaram o limite de resistência do material [18], conforme demonstrado na Figura 9.



FIGURA 9. Imagem macroscópica da propagação da trinca (autoria própria).

De acordo com a Figura 5, que ilustra de forma esquemática o estado de tensão formado na têmpera, pode-se afirmar que a origem da trinca ocorreu devido o estado plano de tensão normal completamente trativo que acontece no momento da transformação martensítica (que proporciona a expansão da superfície da amostra) e da contração do núcleo da peça devido o resfriamento (3° estágio, Figura 5). Portanto, a severidade do

resfriamento na água, promoveu o surgimento de trinca que consequentemente inviabiliza o emprego prático para o aço em questão. Quanto mais severo for o meio de têmpera, maiores serão as chances de trincas nas peças e maiores suas deformações [5].

4. CONCLUSÃO

Diante do exposto até aqui, verificou-se por meio do ensaio de dureza que as amostras submetidas a têmpera e ao revenimento de 200 °C demonstrou valores próximos ao da ferramenta de corte utilizada como referência na pesquisa e se manteve com valores acima da dureza mínima recomendado para aços ferramentas. Toda via, o revenimento a 300 °C promoveu uma redução de dureza ainda maior, consequentemente a amostra não conseguiu alcançar o valor mínimo recomendado para aços ferramentas.

O comportamento apresentado pela dureza em função da temperatura de revenimento seguiu previsões de referências literárias, onde notou-se a influência do revenimento na redução de dureza, à medida que ocorria um aumento de temperatura do mesmo.

As fotomicrografias das amostras indicaram uma predominante matriz martensita que teve uma expressiva redução e refino dos grãos martensíticos com o aumento da temperatura do revenimento, portanto abrindo margem para outra transformação microestrutural, sendo ela a formação de ferrita e cementita por intermédio da martensita.

A condição de têmpera utilizando como meio de resfriamento a água para o aço SAE 5160, comprovou ser um meio inadequado, tendo em vista que o mesmo apresentou uma maior suscetibilidade a formação de trincas, comprometendo o aço para algum emprego prático.

5. AGRADECIMENTOS

Agradecimentos: Ao Prof. Dr. Manoel Quirino por toda orientação ao longo da pesquisa desenvolvida, ao suporte técnico do sr. Antônio Fabrício nos laboratórios onde as atividades experimentais foram realizadas. Aos laboratórios de Metalografia e Ensaio Mecânicos do curso de Eng. Mecânica da UFERSA e a FJ Tornearia e Caldeiraria por disponibilizar alguns equipamentos aplicados para preparação das amostras e por permitir minha ausência em expediente de trabalho, para desenvolver as atividades experimentais.

6. REFERÊNCIAS

- [1] CALLISTER, W. D. Jr. Ciência e Engenharia dos materiais: Uma introdução. 8 ed. Tradução Sérgio Murilo Stamile Soares, M. Sc.; Revisão Técnica José Roberto Moraes d'Almeida, D. Sc.-[Reimpr.]-Rio de Janeiro:LTC,2013.
- [2] GERDAU. Manual de aços Especiais. Catálogo Técnico. Disponível em: <<https://gsn.gerdau.com/pt-br/catalogos-e-manuais>>. Acesso em 16 de ago. 2022.
- [3] LONDERO, Felipe Oliveira. Avaliação de desgaste em ferramentas de metal duro revestido no torneamento do aço SAE 5160 Esferoidizado. Dissertação, Universidade de Caxias do Sul – UCS, Caxias do Sul, 2014.
- [4] CHIAVERINI, Vicente. Aços e Ferros Fundidos. - 6ª ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metais (ABM), 1988.
- [5] SILVA, André Luiz da Costa e; MEI, Paulo Roberto. Aços e ligas especiais. – 2.ª ed. Sumaré, SP: Eletrometal S.A. Metais Especiais, 1988.
- [6] ASM HANDBOOK. Heat treating. Ohio: ASM Internacional, 1991, v. 4.
- [7] COLPAERT, H. Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns. 4. Ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2008.
- [8] PEREZ, W.; OLAYA, J. J.; ARENAS, J. A. Influencia de las condiciones del tratamiento térmico sobre las propiedades mecánicas del acero 5160H. Rev. Téc. Ing. Univ. Zulia, Maracaibo, v. 36, n. 1, p. 23-31, abr. 2013.
- [9] CHIQUETI, Cleber Michel. Estudo das distorções em aços AISI 5160 e AISI 6150 com variação da temperatura e da agitação do meio de resfriamento. Dissertação, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

- [10] CASTRO, Danilo Borges Villarino de. Influência da temperatura de austenitização para têmpera e de revenimento na tenacidade e na vida em fadiga do aço SAE 5160 para diferentes teores de fósforo. 2007. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.
- [11] DIAS, Leonardo Viana e et al. Efeitos da temperatura de revenimento na dureza e resistência do aço AISI 5160, p. 2125-2136. In: *73º Congresso Anual da ABM*, São Paulo, 2018.
- [12] JUVÊNCIO, Natanael da Silva. Análise da viabilidade da dureza de uma ferramenta de corte fabricada a partir de um feixe de mola, pág. 8.
- [13] American Society for Metals. Surface engineering for corrosion and wear resistance. Ohio: ASM International; 2001.
- [14] Roberts G, Krauss G, Kennedy R. Tool steels. Ohio: ASM International; 1998.
- [15] STAATS, Marcel Eduardo. Estudo para otimização do projeto de navalha para corte a quente de vergalhão de 25 milímetros. Dissertação, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.
- [16] MONOBRASMA INDÚSTRIA DE MOLAS. Disponível online: <<https://mobrasma.com.br/#catalogos>> (acesso em 17 de maio de 2023).
- [17] LF MAQUINAS E FERRAMENTAS. Disponível online: <<https://www.lfmaquinaseferramentas.com.br/bits--quadrado-5-8-x-4-1-2---10--cobalto/p>> (acesso em 10 de jan. de 2023).
- [18] CASTRO, Danilo Borges Villarino de. Influência da temperatura de austenitização para têmpera e de revenimento na tenacidade e na vida em fadiga do aço SAE 5160 para diferentes teores de fósforo. 2007. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.