

INFLUÊNCIA DO REVENIMENTO NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E MICROESTRUTURAIS DE LÂMINAS FORJADAS EM AÇO SAE 5160

OLIVEIRA, A.T.¹; NERES, R.V.²; TAVARES, W.R.³; BRANDÃO, S.M.⁴

^{1,2,3,4}Departamento de Engenharia Mecânica, Centro Universitário de Anápolis - UniEVANGÉLICA, Avenida Universitária, Km. 3,5, CEP 75083 - 515 – Cidade Universitária - Anápolis, GO, Brasil.

¹alexturnioni@gmail.com, ²rafaelvieiraneres@gmail.com, ³weber.rabelo@gmail.com,

⁴sergio.brandao@unievangelica.edu.br

RESUMO

Durante a fabricação de lâminas o material passa por um processo de forjamento que consiste na deformação por prensagem ou martelamento que, por consequência, causam o aparecimento de tensões internas sendo necessário a realização de tratamentos térmicos subsequentes para amenizar as características mecânicas indesejáveis. Se tratando de lâminas forjadas é necessário a combinação de resistência mecânica e tenacidade do material, para tanto são necessários a realização do tratamento térmico de têmpera e revenimento. A têmpera tem como foco a formação da fase martensítica, microestrutura caracterizada por sua alta dureza e baixa ductilidade e tenacidade tornando necessário a realização do revenimento para eliminação das tensões internas e aumento da ductilidade e da resistência ao impacto. O objetivo do trabalho é avaliar a influência da variação da temperatura de revenimento nas propriedades mecânicas e microestruturais do aço SAE 5160 forjado afim de identificar a melhor faixa de temperatura que garanta as propriedades mecânicas exigidas para uma boa lâmina. Realizou-se o forjamento de uma barra do aço SAE 5160 do qual foram retiradas amostras que foram submetidas a tratamentos térmicos variando a temperatura de revenimento, de 200°C, 300°C e 400°C com duração de uma hora. Para caracterização dos materiais trabalhados foram realizadas análises metalográficas, ensaio de dureza e de impacto Charpy-V, conforme ABNT NBR ISO 148-1/2013. Os resultados comprovaram que o tratamento executado a 400°C por uma hora mostrou-se mais eficiente, proporcionando uma dureza próximo dos valores das lâminas produzidas de forma industrial e o maior valor de resistência ao impacto Charpy-V.

Palavras-Chave: Forjamento, Lâminas de Corte; Revenimento, Aço SAE 5160.

ABSTRACT

In the manufacture of the blades the material undergoes a forging process which is the deformation of the material by pressing or hammering it, consequently, internal strains appear in the material. To minimize these undesirable mechanical characteristics it is necessary to do subsequent heat treatments. In the matter of forged blades it is necessary to combine the mechanical strength and tenacity of the material, therefore, a tempering and heat treatment are crucial in this process. The quenching aims to create the martensitic phase, a microstructure marked by the hardness and reduction of ductility and tenacity making necessary the tempering process to eliminate internal tension and increase ductility and impact resistance. The purpose of the current paper is to evaluate the influence of tempering temperature variation in the mechanical and microstructural characteristics present in the SAE 5160 forged steel, in order to identify the best temperature range to guarantee the required mechanical properties in a good blade. For this work, was carried out the forging of SAE 5160 steel bar, from which samples were taken and submitted under heat treatment processes, ranging the tempering temperature from 200°C, 300°C and 400°C, during one hour. For assessment of the achieved properties, metallographic analyses, hardness and Charpy-V impact tests were held

according to NBR ISO 148-1/2013. The results showed that the treatment performed at 400°C for one hour proved to be more efficient, providing a hardness close to the values of the industrially produced slides and the higher value of the Charpy-V impact resistance.

Keywords: Forging, Cutting blades, Tempering, Steel SAE 5160.

1. INTRODUÇÃO

A fabricação de lâminas consiste basicamente na conformação do material bruto, processo conhecido por forjamento, seguido de tratamentos térmicos afim de se corrigir as propriedades mecânicas do material [1].

O processo de forjamento é considerado o processo mais antigo de conformação de metais e ligas, consistindo na deformação de um metal por prensagem ou martelamento. Este processo é normalmente realizado a quente para se evitar o encruamento do material. Dependendo da complexidade de forma e de nível de precisão, o forjamento pode ser realizado em matriz fechada ou aberta, sendo o forjamento em matriz aberta o realizado nos experimentos desse trabalho [1]. O processo de forjamento em matriz aberta é caracterizado pela ausência de restrição lateral o que faz com que o material escoe livremente para as regiões adjacentes com o objetivo de promover a redução da seção da peça que, por consequência, geram tensões internas no material que podem ocasionar tricas ou rupturas precoces [1]. Com o intuito de aliviar as tensões internas, após o forjamento devem ser realizados tratamentos térmicos para alívio de tensões do material [2]. Para os experimentos deste trabalho foram realizados os tratamentos térmicos de normalização, recozimento, têmpera e revenimento para a fabricação dos corpos de prova.

A normalização consiste em um aquecimento acima da zona crítica do material seguido de um resfriamento lento ao ar, esse tratamento térmico tem como objetivo promover a homogeneização da rede cristalina que passa a ser uma estrutura pouco homogênea e com tamanhos de grãos grosseiros após o forjamento [3]. Por promover uma estrutura mais uniforme e homogênea a normalização pode ser utilizada como um tratamento térmico preliminar aos tratamentos térmicos definitivos pois, com o refino da estrutura cristalina a possibilidade de empenamento é reduzida e os carbonetos adquirem uma menor dissolubilidade em tratamentos subsequentes [4]. Após a normalização os corpos de prova foram aquecidos até a zona crítica e resfriados lentamente processo chamado de recozimento que promove um rearranjo da rede cristalina e eliminações dos defeitos cristalinos causados pelo processo de conformação mecânica. Tem como intuito promover a remoção das tensões internas e diminuir a dureza do material [5].

Se tratando de lâminas forjadas é necessário a combinação de resistência e tenacidade do material, para isso foram realizados processos de têmpera e revenimento tendo como objetivo a formação de martensita revenida [3]. A têmpera tem como foco a formação da fase martensítica, microestrutura caracterizada por sua alta dureza e pouca ductilidade e tenacidade, e consiste em um aquecimento do aço até sua temperatura de austenitização, seguido de um resfriamento rápido. Durante esse processo o choque térmico pode ocasionar o aparecimento de tensões internas e durezas excessivas, tornando necessário a realização de um revenimento para a eliminação desses inconvenientes, aumentando a ductilidade e a resistência ao choque [4].

O aço SAE 5160 é amplamente utilizado na fabricação de feixes de molas, eixos automotivos, fixadores e lâminas de corte. Traz em sua composição, de 0,6 % de Carbono e entre 0,85 - 1 % de Cromo, é classificado como um aço de médio teor de carbono possuindo uma maior resistência mecânica, boa ductilidade e resistência a fadiga, ótima temperabilidade e forjabilidade [6].

A técnica desenvolvida pelos artesões baseia-se em um conhecimento adquirido através da prática e da observação dos resultados, em sua maioria, sem saber ao certo os parâmetros e a importância dos tratamentos térmicos pós-forjamento. O objetivo do presente trabalho é de avaliar a influência da variação da temperatura de revenimento nas propriedades mecânicas e microestruturais de lâminas forjadas em aço SAE 5160, a fim de buscar a melhor faixa de temperatura que garanta as propriedades mecânicas semelhantes às propriedades das lâminas produzidas de forma industrial que apresentam dureza entre 55 HRC e 58 HRC [7]. Para tanto, foram realizadas revenimentos à temperatura de 200°C, 300°C e 400°C com duração de uma hora.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

O material utilizado no estudo é o aço SAE 5160 caracterizado por ser de médio teor de carbono. A tabela 1 apresenta a composição química do material estudado.

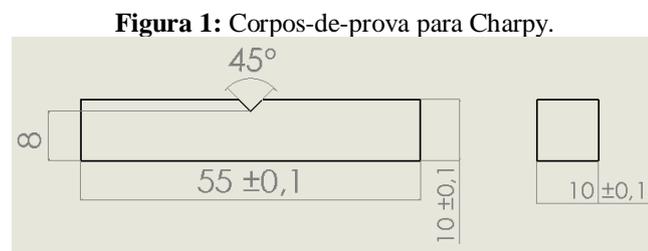
Tabela 1: Composição química do material.

Elementos	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	V	Cu
(%)	0,59	0,78	0,22	0,014	0,007	0,76	0,09	0,02	0,005	0,2

Fonte: [7]

A primeira etapa do trabalho consistiu na caracterização do material, na qual foram realizadas análises da microestrutura, ensaios de dureza HRC e de impacto Charpy-V, conforme a norma NBR ISO 148-1:2013.

Inicialmente necessitou-se usinar os corpos-de-prova a partir do material adquirido, barras redondas de 30 milímetros de diâmetro, obtendo-se corpos-de-prova para Charpy-V conforme desenho apresentado na figura 1.



Fonte: Do autor.

Para o estudo metalográfico retirou-se uma amostra do material, a mesma fora embutida em resina fenólica verde utilizando uma embutidora PANTEC PANPRESS 30, processo que dura um período de 15 minutos.

Realizado o embutimento das amostras, estas foram lixadas, polidas e atacadas quimicamente utilizando-se Nital 10% como agente revelador e realizando a observação da microestrutura através de um microscópio ótico, seguindo a norma ABNT NBR-13284 para preparação de corpos de prova para análise metalográfica.

A fabricação das amostras forjadas compõe-se, em sua primeira etapa, do pré-aquecimento do material acima da sua temperatura de zona crítica, a fim de torna-lo mais maleável e evitar o encruamento. No caso do aço SAE 5160, a temperatura recomendada está na faixa de 1000°C a 1100°C [4]. Realizou-se um forjamento artesanal utilizando um martelete excêntrico, para conferir forma ao material, passando de uma geometria circular para quadrada.

Assim que o material adquiriu a temperatura ambiente, as amostras selecionadas para o estudo do forjamento foram usinadas adquirindo as dimensões do corpo de prova, já

ilustrado na figura 01. Retirou-se então o material para os testes de dureza HRC e análises metalográficas.

As demais foram submetidas a tratamentos térmicos de normalização a uma temperatura de 900°C por um período de uma hora seguido de um resfriamento ao ar calmo seguido de um tratamento térmico de recozimento pleno a 840°C por uma hora com resfriamento lento no forno fechado, com o intuito de remover as tensões internas causadas pelo forjamento e diminuir a dureza para facilitar a fabricação das amostras.

Após a usinagem os corpos de prova foram submetidos a austenitização a 900°C por um período de uma hora e temperados em parafina. Com o intuito de estudar a influência do revenimento nas propriedades mecânicas e metalográficas, realizaram-se ciclos de revenimento a 200°C, 300°C e 400°C todos com duração de uma hora. Em cada etapa do processo realizou-se a retirada de cinco amostras para análises da influência do tratamento térmico nas propriedades mecânicas e metalográficas, conforme apresentado na tabela 2.

Tabela 2: Número de amostras coletadas por etapa

	Estado do material			Revenimento		
	Normal	Forjado	Temperado	200°C	300°	400°C
Número de amostras	5	5	5	5	5	5

Fonte: Do autor.

Para a caracterização microestrutural, foram embutidas as amostras em fenólica verde e em seguida atacadas utilizando Nital 10%, fazendo-se a observação da microestrutura utilizando um microscópio ótico.

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

3.1 EXECUÇÃO DO FORJAMENTO

Para a fabricação das amostras forjadas, o material foi aquecido afim de se aumentar a maleabilidade e o encruamento do material. O forjamento fora realizado à quente de forma artesanal, utilizando um martetele excêntrico para fazer a conformação, da barra redonda obteve-se uma barra quadrada que à temperatura ambiente, apresentou variações de dimensões, mas mantendo em média as dimensões de 17mm x 17mm \pm 0,5mm.

Figura 2: Material forjado à quente.



Fonte: Do autor.

3.2 USINAGEM DOS CORPOS-DE-PROVA

Na usinagem dos corpos de prova forjados observou-se um alto desgaste das ferramentas de corte devido à dureza adquirida pelo material após o forjamento. Com os tratamentos térmicos de normalização e recozimento pleno, a usinagem dos corpos de prova foi facilitada observando-se uma leve diminuição da dureza, conforme ilustrado na figura 3, todos os corpos de prova foram usinados para adquirirem as dimensões especificadas pela norma ABNT NBR ISO 148-1:2013.

Figura 3: Corpos-de-prova normal, forjados e normalizado/recozidos.



Fonte: Do autor.

Após a usinagem os mesmos foram utilizados nos tratamentos térmicos de têmpera e revenimento. Para cada uma das três faixas de temperatura de revenimento foram selecionados 5 (cinco) corpos de prova para as análises de impacto.

3.3 DESCRIÇÃO DOS ENSAIOS

Os ensaios de Charpy-V, segundo a norma NBR ISO 148-1/2013, foram realizados em corpos de prova 55 x 10 x 10 mm, com um entalhe no centro e rompidos com o pêndulo de 150J. A dureza HRC do material foi medida com 100kg e com ponta de diamante, devido à alta dureza, em todas as medições esperou-se em média 30 segundos para a estabilidade da carga.

As amostras metalográficas coletadas antes e após a execução do forjamento e em cada etapa do tratamento térmico sendo, logo após, embutidas em fenólica verde a 150°C e polidas com a utilização de 6 lixas rotativas, que respeitaram a sequência de granulometria 320, 400, 600, 800, 1200, 2500. O ataque químico foi realizado com Nital 10%.

4. RESULTADOS

4.1 DUREZA

Com o tratamento de têmpera o material forjado sofreu um aumento expressivo da dureza, passando de valores que oscilavam em torno de 40 HRC para valores acima de 60 HRC. Durante a têmpera, com o resfriamento abrupto do material a partir da temperatura de austenitização, ocorre a formação de martensita que proporciona ao material uma dureza elevada. A dureza da martensita aumenta proporcionalmente com o teor de carbono e no caso do aço SAE 5160 pode adquirir valores de cerca de 65 HRC.[5]

Após o revenimento à 200°C por um período de uma hora o valor de dureza do material começou a diminuir, mas manteve o valor próximo ao valor de dureza da têmpera. O processo de revenimento a uma temperatura de 200°C, promove a precipitação de carboneto de ferro e a transformação da austenita retida em ferrita e cementita fazendo com que a dureza

Rockwell comece a cair chegando próximo ao valor de 60 HRC, embora não promova nenhuma modificação estrutural relevante [4, 5].

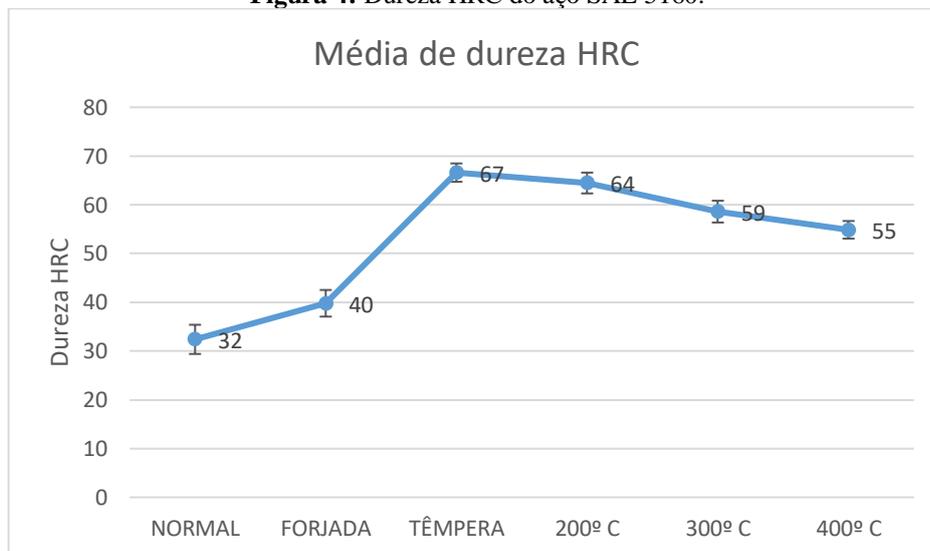
Os valores de dureza do material reduziram significativamente após os revenimentos realizados nas temperaturas de 300°C e 400°C. O revenimento, quando realizado na faixa de temperatura entre 300°C e 400°C, promove a redução do teor de carbono na austenita retida e a recuperação e recristalização da martensita, eliminando as discordâncias dos grãos martensíticos combinado com o crescimento e esferoidização das partículas de cementita resultando na diminuição da dureza e da resistência mecânica [3]. A dureza Rockwell do material adquire valores variando em torno de 50 HRC [5].

Tabela 3: Dureza HRC colhidas do material forjado, temperado, revenido a 200°C, 300°C e 400°C.

Ensaio	Dureza em HRC					
	Normal	Forjada	Têmpera	200°C	300°C	400°C
1	34	37	65	65	59	53
2	32	39	68	65	59	54
3	35	39	67	64	55	56
4	31	42	65	65	60	55
5	30	41	67	64	60	56
Média	32	40	67	64	59	55

Fonte: Do autor.

Figura 4: Dureza HRC do aço SAE 5160.



Fonte: Do autor.

Os valores de dureza das amostras forjadas, foram as que apresentaram maior variação de medida, este fato está relacionado aos pontos de concentração de dureza que o material adquire após o processo de forjamento. As amostras que passaram por revenimento à 400°C foram as que apresentaram menores variações de valores, conforme mostra o gráfico de desvio padrão.

4.2 CHARPY-V

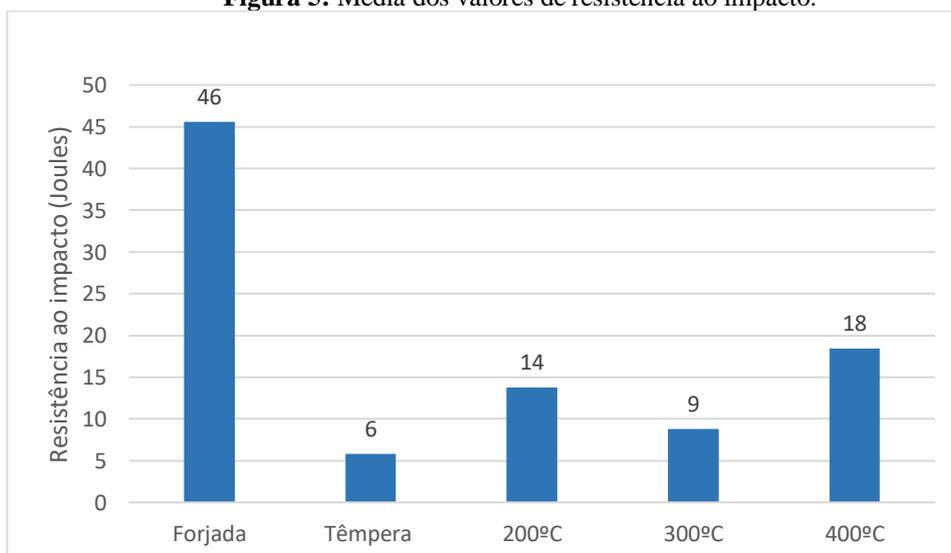
Os resultados obtidos com os ensaios de impacto Charpy-V, mostraram que os corpos de prova temperados possuem baixa resistência ao impacto. Como após a têmpera a estrutura cristalina no material passa a ser composta com predominância de martensita, essas baixas

resistências referem-se à propriedade mecânica que a estrutura martensítica transfere ao material, uma vez que, apesar da elevada dureza, essa estrutura cristalina possui um alto grau de fragilidade [5, 9]. Outra explicação, está relacionada as tensões internas que se originam nas peças temperadas devido à brusca mudança de fases e à contração do aço durante o resfriamento [9].

Os corpos de prova submetidos aos tratamentos térmicos à 200 °C e à 400 °C, apresentaram resultados bem semelhantes, aumentando significativamente os valores de resistência ao choque, se comparados com os valores obtidos pelo material temperado. Este aumento de resistência pode ser explicado no fato de que o revenimento realizado entre 100 °C e 200 °C começa a promover o alívio das tensões internas do material através da decomposição da austenita retida e da precipitação de carbonetos de ferro ϵ reduzindo o teor de carbono da martensita, com isso, a presença da estrutura martensítica decresce aumentando a resistência mecânica do material e diminuindo a dureza [9]. Quando o revenimento é realizado entre 400 °C e 600 °C ocorrem maiores transformações estruturais através do processo de recuperação e recristalização da martensita, com eliminação das discordâncias da rede cristalina combinado com o crescimento e esferoidização dos aglomerados de cementita e a ferrita formada apresentam os mesmos contornos das antigas ripas martensíticas, proporcionando ao material uma redução da dureza e a resistência mecânica apresenta uma tendência de aumento [3, 4, 5, 8].

A resistência ao impacto dos corpos de prova submetidos ao revenimento à 300 °C foram as de menores valores, provavelmente devido a fragilização do material. O tratamento térmico de revenimento quando realizado há uma faixa de temperatura de 260 °C à 370 °C provoca a fragilidade da martensita revenida, atualmente não existe explicações convincentes que expliquem esse fenômeno. A explicação mais aceita é de que a fragilidade da martensita revenida estaria associada à presença de impurezas segregadas nos contornos de grãos da austenita [9]. Sendo essas impurezas, possivelmente, causadas pela segregação de fósforo durante os processos de austenitização e têmpera [10].

Figura 5: Média dos valores de resistência ao impacto.



Fonte: Do autor.

4.3 METALOGRAFIA

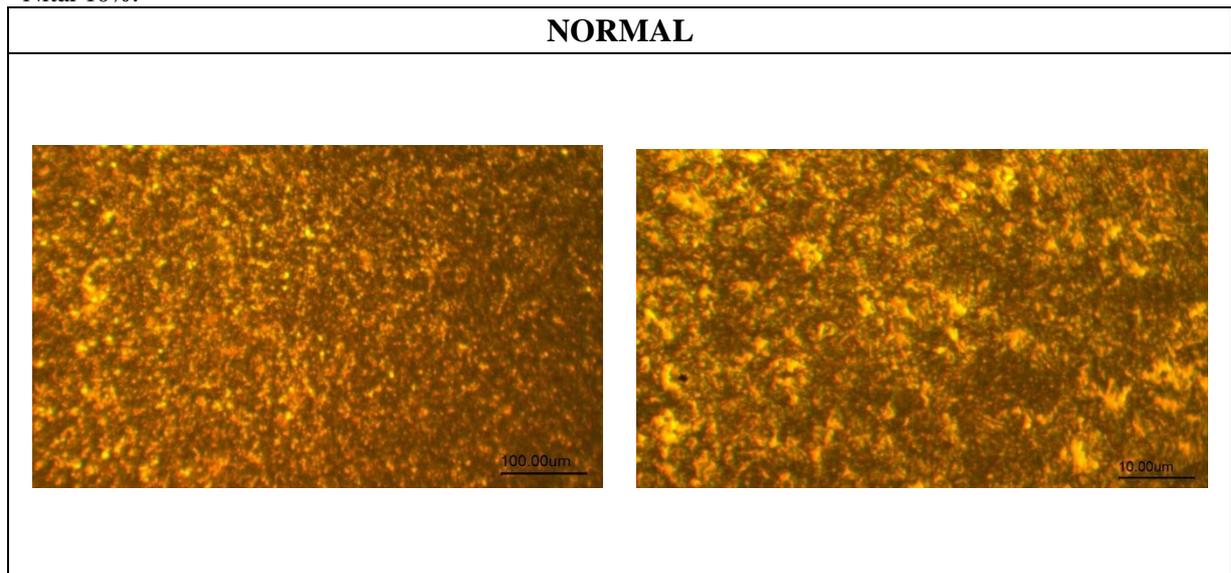
O processo de conformação mecânica proporcionou uma diminuição no tamanho dos grãos da amostra coletada, esta diminuição é causada pela a redução das dimensões do material durante o processo de forjamento. A redução dimensional causa a diminuição dos

espaços entre os braços das dendritas originadas na solidificação do material, durante a fabricação. Esta redução é favorável à homogeneização do material, por difusão [3]. Com a redução do espaçamento dos segregados, ocorre o fenômeno chamado de fibramento onde, o material passa a apresentar uma estrutura com aspecto de fibras, orientadas no sentido do maior alongamento, sendo facilmente observado na seção longitudinal [9].

As amostras temperadas apresentaram uma alta concentração de martensita, demonstrando que o tratamento térmico foi eficiente. A micrografia da martensita apresenta cristais em formas associadas com placas e lamelas finas que apresentam maior espessura no centro que nas extremidades com diferentes orientações dentro dos grãos [9, 11]. O tratamento térmico à 200 °C proporcionou uma leve diminuição nos tamanhos dos grãos martensíticos, provavelmente devido à precipitação de carbonetos e da decomposição da austenita retida, formando ferrita e cementita, diminuindo o aspecto acicular da estrutura cristalina e o teor de carbono [3, 9].

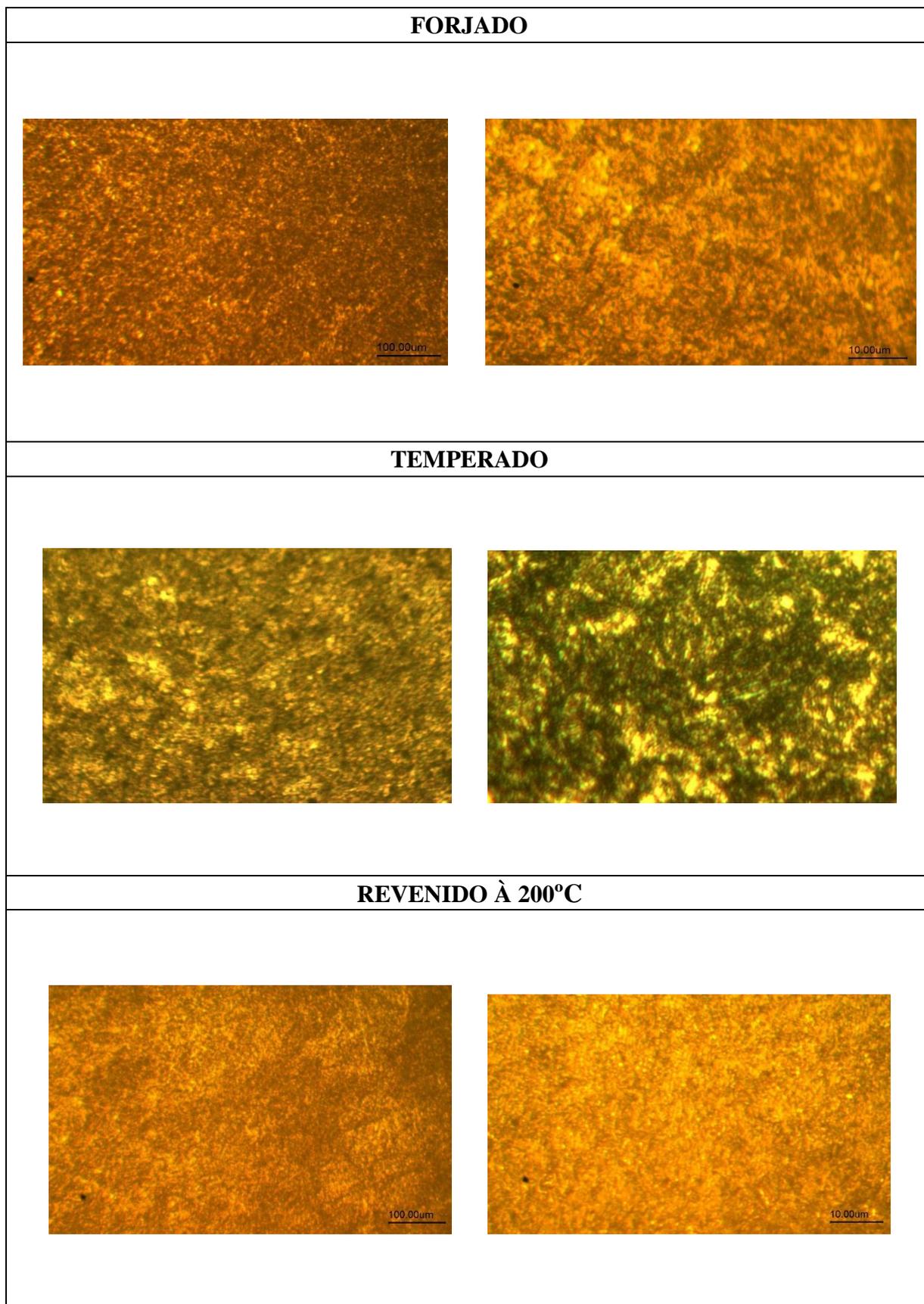
O tratamento térmico à 300 °C e 400 °C promoveram uma maior diminuição dos tamanhos dos grãos que passaram a apresentar formas mais circulares. O revenimento quando realizado acima de 300 °C inicia o processo de recuperação e recristalização da martensita promovendo a eliminação das discordâncias combinado com início do crescimento e esferoidização da cementita [3].

Figura 6: Metalografia do aço SAE 5160: imagens à esquerda em 50x e imagens à direita em 400x. Ataque: Nital 10%.



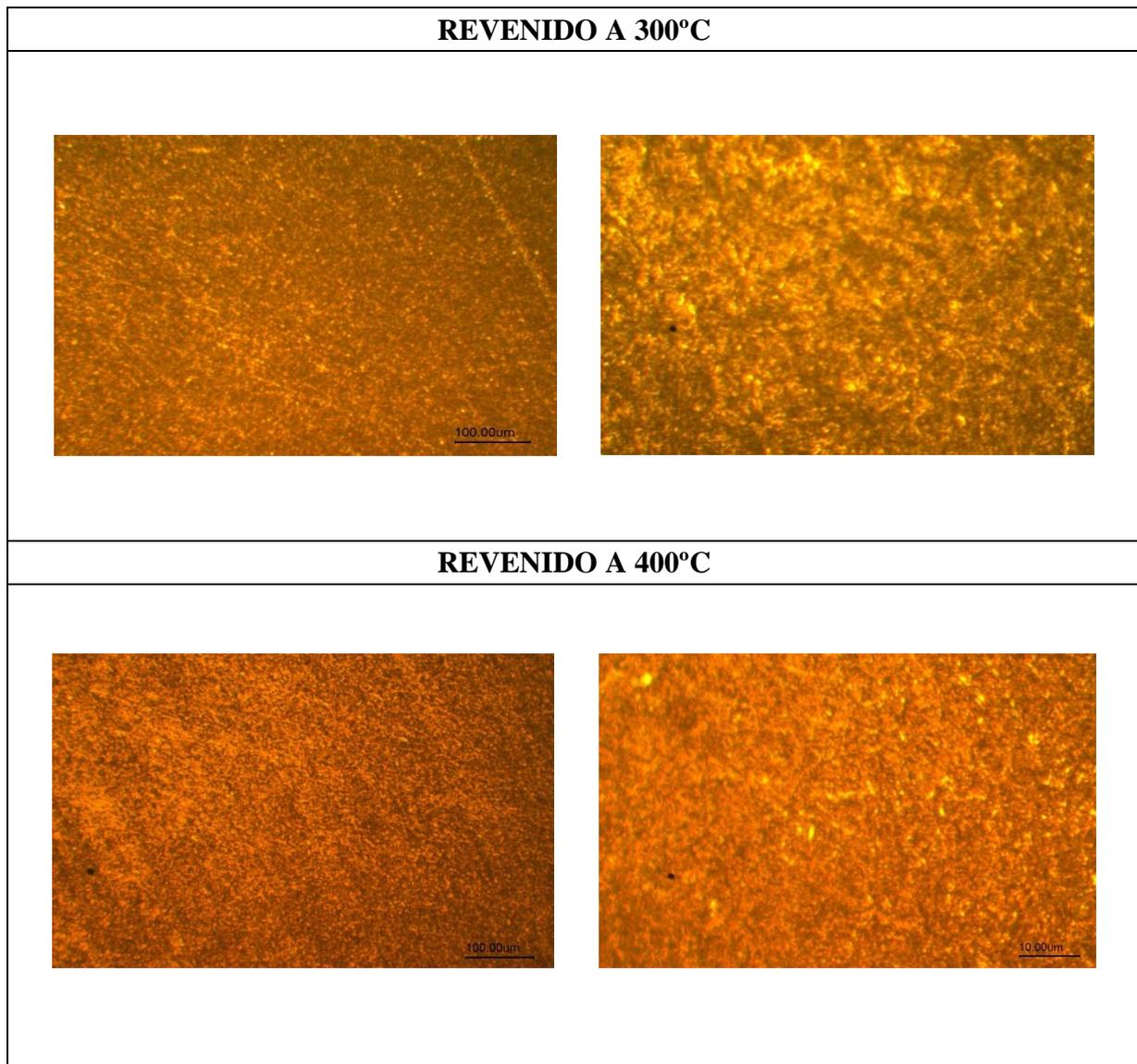
Fonte: Do autor.

Figura 7: Metalografia do aço SAE 5160: imagens à esquerda em 50x e imagens à direita em 400x. Ataque: Nital 10%.



Fonte: Do autor.

Figura 8: Metalografia do aço SAE 5160: imagens à esquerda em 50x e imagens à direita em 400x. Ataque: Nital 10%.



Fonte: Do autor.

5. CONCLUSÃO

Os ensaios de dureza das amostras submetidas ao tratamento térmico à 200 °C não apresentaram valores significativos de redução. Em contrapartida as amostras submetidas ao revenimento à 300 °C e 400 °C demonstraram uma relevante redução da dureza do material, sendo a amostra à 400 °C a que apresentou menor dureza.

As amostras submetidas ao revenimento à 400 °C apresentaram melhores valores de resistência ao impacto, aumentando a resistência das amostras temperadas em mais de 50%. As amostras submetidas ao tratamento térmico à 300 °C apresentaram menores valores de resistência ao impacto, provavelmente ocasionado por uma fragilização devido ao revenimento. O tratamento térmico à 200 °C também apresentou um bom valor de resistência ao impacto aumentando a resistência do material temperado, mas atingiu valores inferiores ao tratamento térmico realizado à 400 °C.

As imagens metalográficas apresentaram uma significativa diminuição e refino dos grãos martensíticos em todos os tratamentos térmicos. O mais eficaz foi o realizado à 400 °C

que possivelmente promoveu um processo de recuperação e recristalização da martensita proporcionando uma eliminação das discordâncias dos grãos.

Conforme o apresentado conclui-se que o tratamento térmico de revenimento realizado à 400 °C foi o que apresentou ser o mais eficaz para lâminas artesanais, visto que proporcionou uma dureza de 99,6% do valor da faixa mínima das lâminas produzidas de forma industrial e um valor relevante de resistência ao impacto.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] WEISS, A. **Processos de fabricação mecânica**. Curitiba: Livro Técnico, 2012.
- [2] FERREIRA, R. A. S. **Conformação plástica: fundamentos metalúrgicos e mecânicos**. 2. ed. Recife: Ed: Universitária da UFPE, 2010.
- [3] COLPAERT, H. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**. Revisão técnica André Luiz V. da Costa e Silva. 4. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2008.
- [4] CHIAVERINI, V. **Aços e ferros fundidos: características gerais, tratamentos térmicos, principais tipos**. 7. ed. ampl e rev. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2008.
- [5] CHIAVERINI, V. **Tratamento térmico das ligas metálicas**. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2008.
- [6] FAVORIT. **Aço SAE 5160**. Disponível em: <http://www.favorit.com.br/produtos/acos-construcao-mecanica/aco-sae-5160>. Acesso em: 03 de abril de 2017.
- [7] TRAMONTINA. **Facas Century**. Disponível em: <http://www.tramontina.com.br/p/24099037-98-jogo-de-facas-3-pecas>. Acesso em: 20 de março de 2017.
- [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. Disponível em: http://www.scielo.org.ve/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0254-07702013000100004&lng=es&nrm=iso. Acesso em 07 de dezembro. 2017
- [9] SILVA, A. L. V. C. e; MEI, P. R. **Aços e ligas especiais**; 3. ed. São Paulo: Blucher, 2010.
- [10] CASTRO, D. B. V. et al. **Influence of phosphorus content and quenching/tempering temperatures on fracture toughness and fatigue life of SAE 5160 steel**. *Mat. Res.*, São Carlos, v.13, n. 4, p. 445-455, Dec. 2010. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1516-14392010000400005&lng=pt_BR&nrm=iso. Acesso em 07 de dezembro de 2017.
- [11] BRAGA, Fábio de Oliveira et al. **Martensitic Transformation Under Compression of a Plasma Processed Polycrystalline Shape Memory CuAlNi Alloy**. *Mat. Res.*, São Carlos, v. 20, n. 6, p. 1579-1592, Dec. 2017. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1516-14392017000601579&lng=en&nrm=iso. Acesso em 08 de dezembro de 2017.