

ESTUDO DO PROCESSO DE TÊMPERA DE AÇO-CARBONO EM ÓLEOS VEGETAIS PUROS COM DIFERENTES TEMPERATURAS DE BANHO

Pedro Augusto Ramos, pedroaugustoramos@hotmail.com¹
Leandro Pegorete Resende, leandropegorete@gmail.com¹
Douglas Antônio Faria, faria_douglas@yahoo.com.br¹
Pedro Paiva Brito, pbrito@pucminas.br¹

¹Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Rua Rio Comprido 4.580, Contagem (MG), 32010-025.

Resumo: Os óleos vegetais apresentam características físicas interessantes para serem aplicados como meio de resfriamento na têmpera dos aços, além do fato de que são renováveis e biodegradáveis, o que não ocorre com óleos minerais derivados do petróleo. O objetivo do presente trabalho foi realizar um estudo sistemático das características físicas de óleos vegetais puros de girassol e soja aplicados à têmpera de aços-carbono. As propriedades de molhabilidade, densidade e viscosidade dos óleos foram avaliadas e ensaios de têmpera foram realizados em corpos-de-prova do aço ABNT 1045 com diferentes temperaturas de banho (25, 40, 60 e 80°C). Os ciclos de resfriamento em cada situação foram monitorados com o auxílio de um termopar conectado ao sistema de aquisição de dados. Para efeito comparativo, os mesmos procedimentos foram adotados para um óleo de origem mineral comercial. O desempenho dos diferentes óleos testados nas diversas condições de variação da temperatura do banho foi verificado por meio do levantamento da variação de microdureza ao longo da seção transversal do material temperado. Por meio da metodologia empregada, foi possível atestar a viabilidade técnica de utilização dos óleos vegetais selecionados, pelo fato de que não houve alteração significativa da profundidade de têmpera alcançada com a utilização dos diferentes óleos testados.

Palavras-chave: têmpera, óleo vegetal, microdureza, aço-carbono.

1. INTRODUÇÃO

O processo de têmpera é amplamente utilizado na indústria para elevação da dureza de componentes de aço pela formação de microestrutura completamente ou predominantemente martensítica. O processo consiste de uma etapa inicial de aquecimento para que se estabeleça no aço estrutura austenítica homogênea, o que normalmente se atinge para temperaturas entre 815 e 870°C, a depender da composição química do material (Colpaert, 2008). Em seguida, o aço deve ser resfriado rapidamente até a temperatura ambiente para que se evite a formação de constituintes de dureza inferior à martensita, tais como ferrita e perlita, o que se pode obter pela imersão do material aquecido em meio líquido. Os meios mais comuns de resfriamento incluem: salmoura, água e óleos diversos (Chiaverini, 2008), com destaque para os óleos minerais derivados do petróleo, que permitem taxas de resfriamento elevadas o suficiente para o endurecimento adequado do aço evitando-se, contudo, a formação de trincas ou distorções que podem surgir em meios de resfriamento mais severos.

A têmpera realizada por imersão em meio líquido não é um problema de convecção simples, porém envolve distintos mecanismos de troca de calor. Segundo Kobasko (2011), o mecanismo tradicional envolve inicialmente a formação de um filme de vapor que envolve gradualmente a superfície. Em seguida, tem-se a nucleação de bolhas de vapor que agitam o líquido pelo mecanismo de alteração de densidade em função da temperatura e, finalmente, ocorre troca de calor por convecção. Tais etapas estão associadas a diferentes taxas de troca de calor entre a peça e o meio de resfriamento; normalmente o resfriamento é lento no início, pela baixa condução de calor através do filme de vapor, e eleva-se com a nucleação de bolhas e se reduz novamente ao final com a etapa de convecção onde são impostas as tensões residuais no material derivadas deste processo de tratamento (Colpaert, 2008).

Os óleos de origem animal e vegetal têm sido utilizados em operações de têmpera pelo homem há vários séculos (Otero *et al.*, 2011 *apud* Schicchi *et al.*, 2012). Entretanto, é possível destacar nas últimas décadas, pela tendência de incorporação de matérias-primas biodegradáveis e renováveis em diversos processos industriais, o renovado estímulo

para a utilização de óleos de origem vegetal nas operações de têmpera em substituição aos óleos minerais (Totten *et al.*, 1999). Os óleos de origem vegetal possuem características físicas interessantes para utilização na têmpera. Dentre os aspectos positivos podem-se citar a cinética molhabilidade favorável (Prabhu *et al.*, 2008), maior severidade de têmpera para óleos de girassol, côco e dendê (Fernandes e Prabhu, 2008), menores riscos de incêndio devido ao mais alto ponto de fulgor e menor susceptibilidade à alteração de viscosidade com a temperatura, conduzindo a resfriamento mais uniforme (Ramesh e Prabhu, 2014). Por outro lado, as dificuldades encontradas para a têmpera com óleos vegetais são as maiores taxas de degradação do óleo (por oxidação) em comparação com óleos derivados do petróleo (Said *et al.*, 2013), formação de carepas na superfície dos materiais temperados (Ramesh e Prabhu, 2014) e, também, maior propensão a distorções devido a tensões residuais (Canale *et al.*, 2005; Schicchi *et al.*, 2012).

No presente trabalho, se propõe um estudo sistemático da influência da temperatura do meio de resfriamento em diferentes óleos (mineral: Houghto Quench G; vegetais: girassol e soja) no processo de têmpera do aço carbono ABNT 1045. Objetivou-se analisar tanto as propriedades físicas dos óleos utilizados, incluindo as taxas de resfriamento a serem obtidas, como o efeito da têmpera nas propriedades do material (profundidade de têmpera).

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

2.1. Materiais

Os óleos vegetais (soja e girassol) utilizados foram adquiridos em rede de varejo local e o óleo mineral comercial Houghto Quench G foi doado pela empresa Combustol Minas (Contagem, MG). Para cada óleo, foram realizados testes com temperaturas de banho de 25, 40, 60 e 80°C. A elevação da temperatura do óleo foi obtida com o uso de um ebulidor elétrico e os valores foram monitorados por meio de um termômetro. Os ciclos de resfriamento durante a têmpera foram determinados utilizando-se um termopar de isolamento mineral tipo K com bainha de Inconel 600, acoplado a um sistema de aquisição de dados, com frequência de aquisição igual a 1Hz.

As operações de têmpera foram efetuadas em aço ABNT 1045 obtido inicialmente na forma de barras cilíndricas. Ao longo do eixo maior das barras foi produzido um furo com diâmetro 1,5 mm para permitir o alojamento de um termopar no interior do material e a determinação experimental da temperatura durante o resfriamento. Os corpos-de-prova foram preparados com base na norma ASTM D-6200, que prevê além de um termopar em bainha de Inconel 600, prevê também um condutor para o próprio termopar funcionando como um suporte de Inconel para inserção do termopar no corpo-de-prova. Em virtude da indisponibilidade desse material, foi produzido um suporte de aço inoxidável ABNT 310. A sua fixação na barra de aço-carbono foi obtida com a abertura de uma rosca, conforme ilustrado na Fig. 1.

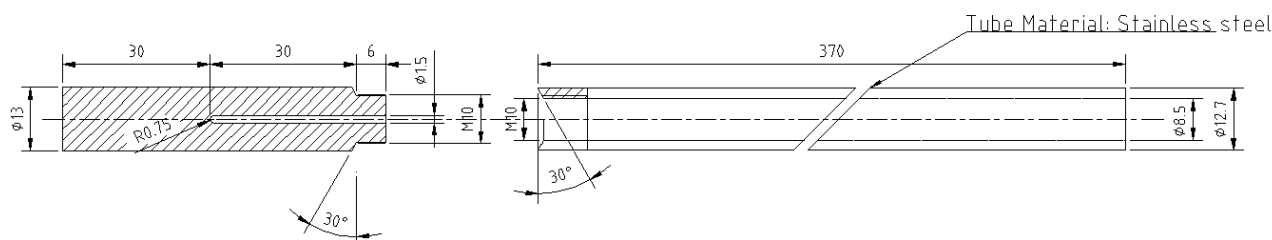


Figura 1. Corpo-de-prova utilizado nos testes de têmpera. Esquerda: barra de aço ABNT 1045 com furo para alojamento de termopar. Direita: suporte de fixação do termopar em tubo de aço inoxidável ABNT 310.

2.2. Levantamento das características físicas dos óleos

As propriedades de densidade, viscosidade cinemática e viscosidade dinâmica foram determinadas no laboratório de mecânica dos fluidos da PUC Minas (Contagem). O ângulo de contato entre os óleos mineral, soja e girassol e o substrato de aço 1045 (molhabilidade) foi avaliado para as temperaturas de 25, 40, 60 e 80°C. Para cada condição, foram depositadas 3 gotas de óleo e realizados registros fotográficos em câmera digital. O ângulo de contato foi determinado utilizando-se software de tratamento de imagens. O procedimento é ilustrado na Fig. 2.

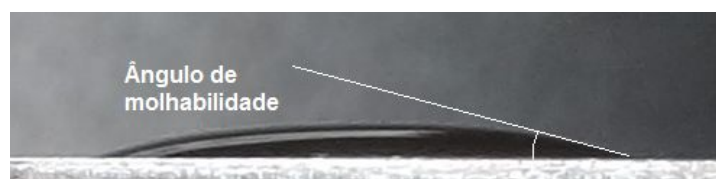


Figura 2. Exemplo de fotografia colhida para determinação da molhabilidade entre a superfície metálica e os óleos utilizados no trabalho.

2.3. Execução dos testes de têmpera

Os corpos-de-prova de aço ABNT 1045 foram inicialmente aquecidos em fornos tipo mufla (sem controle de atmosfera) até a temperatura de 850°C com tempo de encharque de 30 min. A têmpera foi feita por imersão direta nos banhos de óleo com volume de 5 l, sem agitação dos corpos-de-prova.

2.4. Análise da profundidade de têmpera

As amostras para análise de microdureza foram cortadas da extremidade dos corpos-de-prova temperados, lixadas em papel abrasivo de SiC (#180, #320, #400, #600, #1200) e, finalmente, polidas em suspensão de Al_2O_3 própria para preparação metalográfica, posteriormente atacadas com Nital 2%, por tempo aproximado de 15 segundos. A análise da profundidade de endurecimento após a realização das operações de têmpera foi realizada em microdurômetro Shimadzu HMV-1 empregando-se carga de 50 gf e tempo de aplicação de carga de 20 s. As impressões de microdureza foram realizadas ao longo do diâmetro das amostras, com espaçamento entre medições de 1 mm. A microestrutura das amostras também foi analisada por microscopia ótica convencional, após procedimento de preparação igual ao adotado para as amostras submetidas a análise de microdureza.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Características físicas

Os resultados relativos às propriedades físicas dos óleos à temperatura ambiente (viscosidade cinemática, viscosidade dinâmica e densidade) são apresentados na Tab. 1 e os resultados dos testes de molhabilidade realizados às temperaturas de 25, 40, 60 e 80 °C são apresentados na Tab. 2.

Tabela 1. Valores das propriedades físicas dos óleos utilizados à temperatura ambiente.

Óleos	Soja	Girassol	Mineral
Viscosidade Cinemática (m/s)	1.24×10^{-4}	1.20×10^{-4}	1.16×10^{-4}
Viscosidade Dinâmica (Pa.s)	0.11	0.11	0.10
Densidade (Kg/m ³)	910	910	850

Tabela 2. Valores obtidos para o ângulo de contato (molhabilidade) dos óleos utilizados a 25, 40, 60 e 80°C.

Temperatura	Soja	Girassol	Mineral
25 °C	24°	20°	14°
40 °C	29°	20°	17°
60 °C	20°	20°	16°
80 °C	17°	18°	14°

Consultando-se a Tab. 1 é possível verificar que há relativamente pouca diferença entre os valores de viscosidade dos três óleos analisados, enquanto que a densidade do óleo mineral situou-se ligeiramente abaixo (6,6%) em relação aos óleos vegetais o que propiciaria um arraste menor causado pela diferença de densidade entre os óleos. Com relação aos resultados de molhabilidade (Tab. 2), foi possível verificar que o óleo mineral apresentou, para todas as temperaturas, ângulo de contato inferior em comparação com os óleos vegetais o que significa menor tensão superficial atuando sobre o óleo mineral. Embora esse resultado possa ser indicativo de maior capacidade de extração de calor durante a têmpera, é necessário considerar, também, a cinética de espalhamento do óleo sobre a superfície testada.

3.2. Curvas de resfriamento

Na Fig. 3 (a-f) são apresentados os resultados relativos à evolução de temperaturas durante a têmpera para os óleos testados. É interessante notar que as curvas de taxa de resfriamento revelam os diferentes estágios de troca de calor pelos quais passa o aço durante a têmpera. As taxas são inicialmente lentas, devido à formação do filme de vapor. Em seguida, se tem a ruptura desse filme pela nucleação de bolhas de vapor forte aumento da taxa de resfriamento. Essa fase, para todos os óleos testados, foi observada entre aproximadamente 800 e 700°C. A porção final dos diagramas, com baixas taxas de resfriamento, corresponde à situação em que a temperatura do fluido no entorno da peça reduziu-se para abaixo do ponto de vaporização, cessando assim a nucleação de bolhas e, conseqüentemente, a agitação do meio. Nesse estágio final, a troca de calor com o meio de têmpera ocorre por convecção simples.

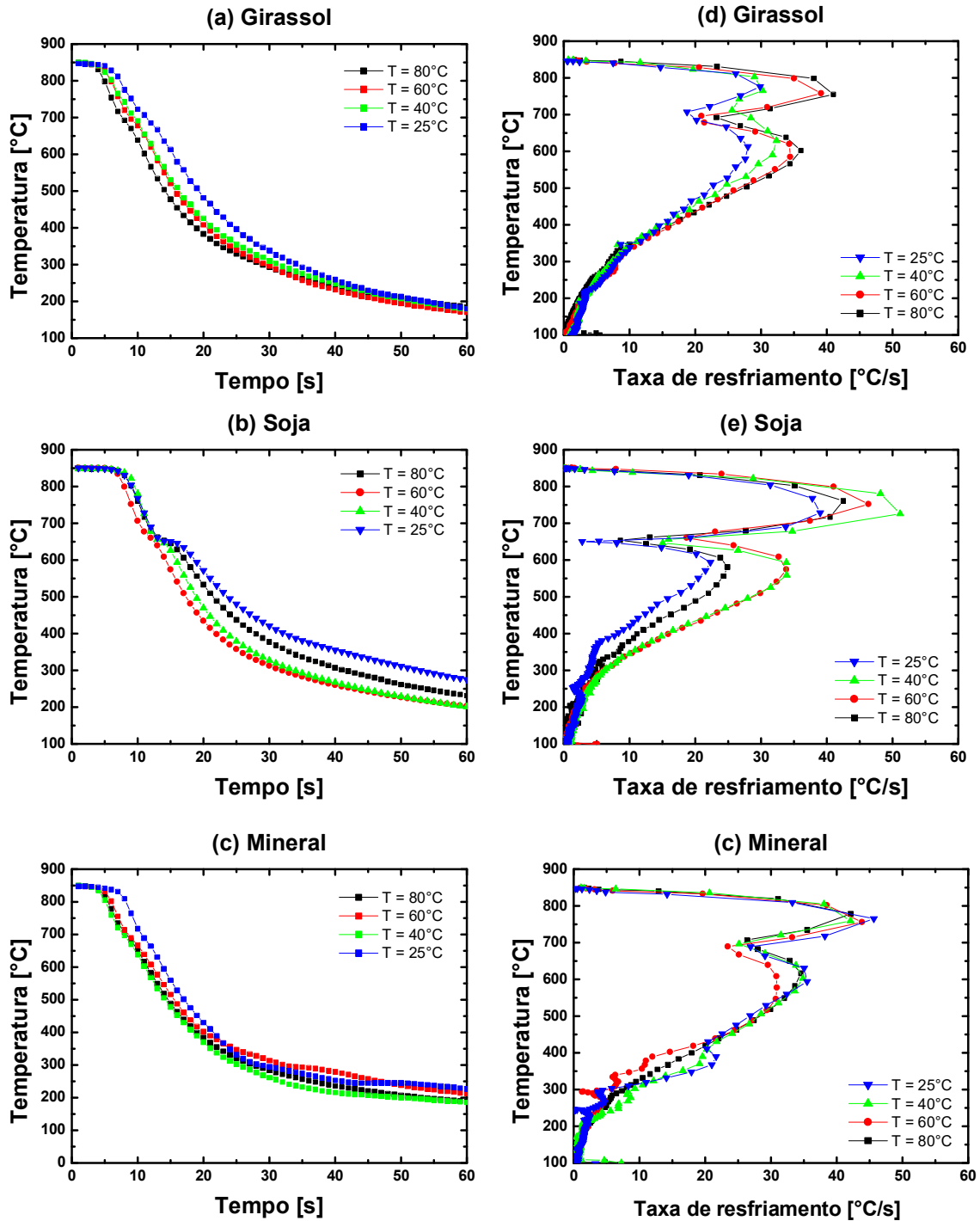


Figura 3. Evolução das temperaturas durante a têmpera para os óleos: (a) girassol, (b) soja e (c) mineral. Taxas de resfriamento em função da temperatura para os óleos: (d) girassol, (e) soja e (f) mineral.

De acordo com MacKenzie (2014), as taxas de resfriamento no intervalo situado entre 700 e 600°C são preponderantes pela influência que exercem na microestrutura final formada durante a têmpera. Assim, como forma de permitir correlacionar as características das peças tratadas com os ciclos de resfriamento a que foram submetidas, são apresentadas na Fig. 4 os valores médios de taxa de resfriamento entre 700 e 600°C para todas as condições de têmpera. Observa-se que o óleo mineral apresentou comportamento mais homogêneo em função da temperatura e, também, taxas de resfriamento sistematicamente superiores às observadas nos óleos vegetais. Por sua vez, é possível perceber que o óleo vegetal de soja apresenta comportamento semelhante ao óleo de têmpera comercial para temperaturas de banho entre 40 e 60°C, enquanto que o óleo de girassol apresenta mesmo comportamento para a faixa de 40 a 80°C.

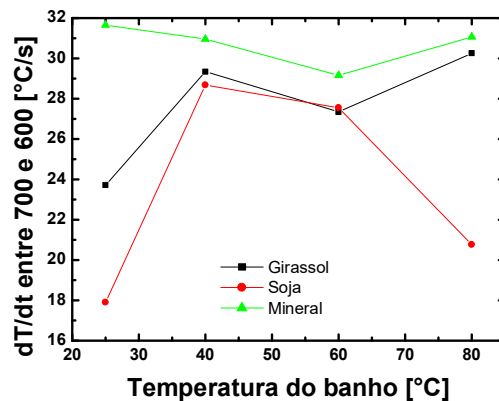


Figura 4. Valores médios das taxas de resfriamento entre as temperaturas de 700 e 600°C em função da temperatura do banho para os três óleos utilizados no trabalho.

3.3. Profundidade de endurecimento

A variação de microdureza ao longo da seção transversal de amostras temperadas nos óleos de soja, girassol e mineral às temperaturas de 25, 40, 60 e 80°C é apresentada na Fig. 5.

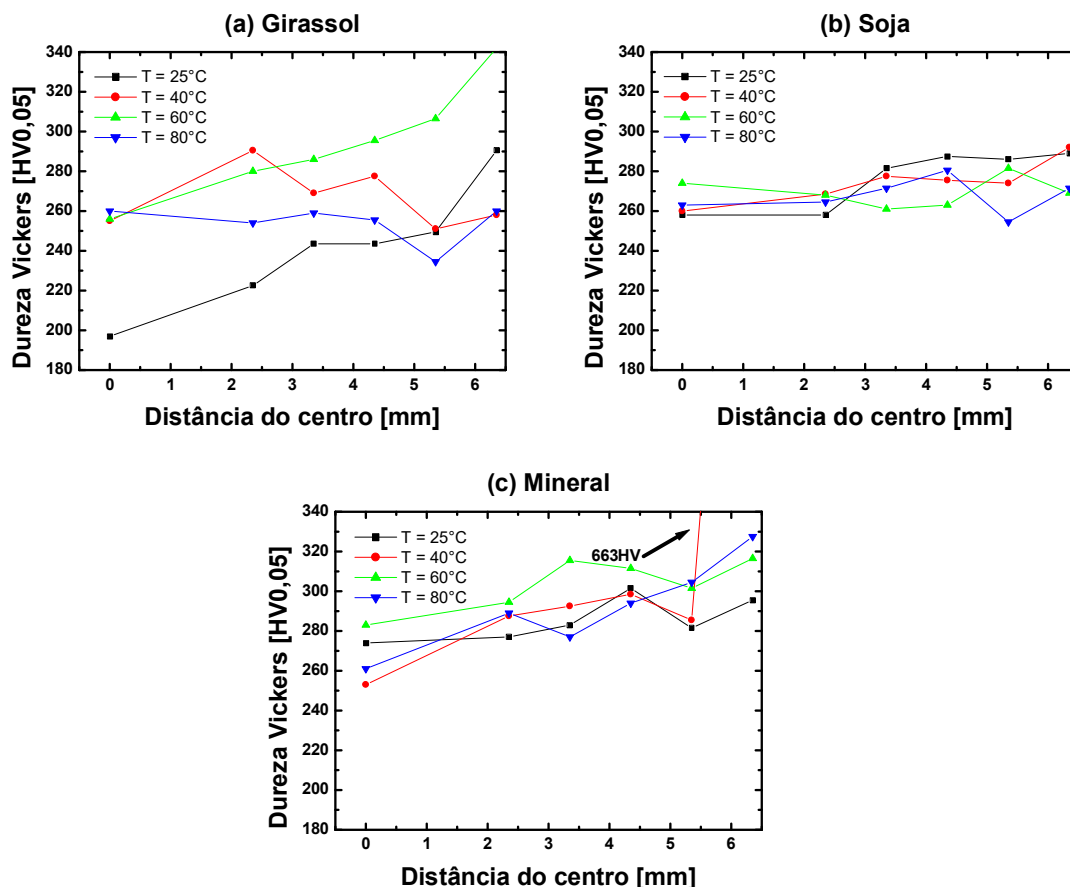


Figura 5. Evolução das microdurezas ao longo da seção transversal dos corpos-de-prova temperados nos óleos: (a) girassol, (b) soja e (c) mineral.

Na avaliação da profundidade de endurecimento pode-se observar que o óleo de Girassol proporcionou características de endurecimento similares ao óleo mineral. Obtendo um endurecimento maior nas extremidades e com leve decaimento ao longo da seção transversal da amostra ensaiada, já o óleo vegetal de soja apresentou um perfil de microdureza bem homogêneo, confirmado pela sua menor capacidade de extração de calor entre 700°C e 600°C na Fig. 4 comparado aos óleos vegetais de girassol e mineral. A formação microestrutural predominante resultante destes processos de têmpera, foi a perlita e em alguns casos a martensita, isso devido à temperatura de austenitização não

muito elevada (850°C) e ao fato do ABNT 1045 não possuir elementos de liga suficientes para promover endurecimento considerável, e predominante formação martensítica. Foi possível notar que, apesar dos resultados apresentados na Fig. 4, que sugeriam maior dispersão dos resultados das taxas de resfriamento em função da temperatura do banho para o óleo de soja, com esse óleo foi possível obter distribuição de microdurezas mais homogêneas.

As constatações relativas à profundidade de endurecimento puderam ser comprovadas pelo exame da microestrutura da amostra, como se pode perceber pelos resultados mostrados na Figura 6(a-f). São ilustradas as micrografias referentes às regiões de centro e borda das amostras de aço ABNT 1045 temperadas nos banhos dos óleos de girassol, soja e mineral a 80°C .

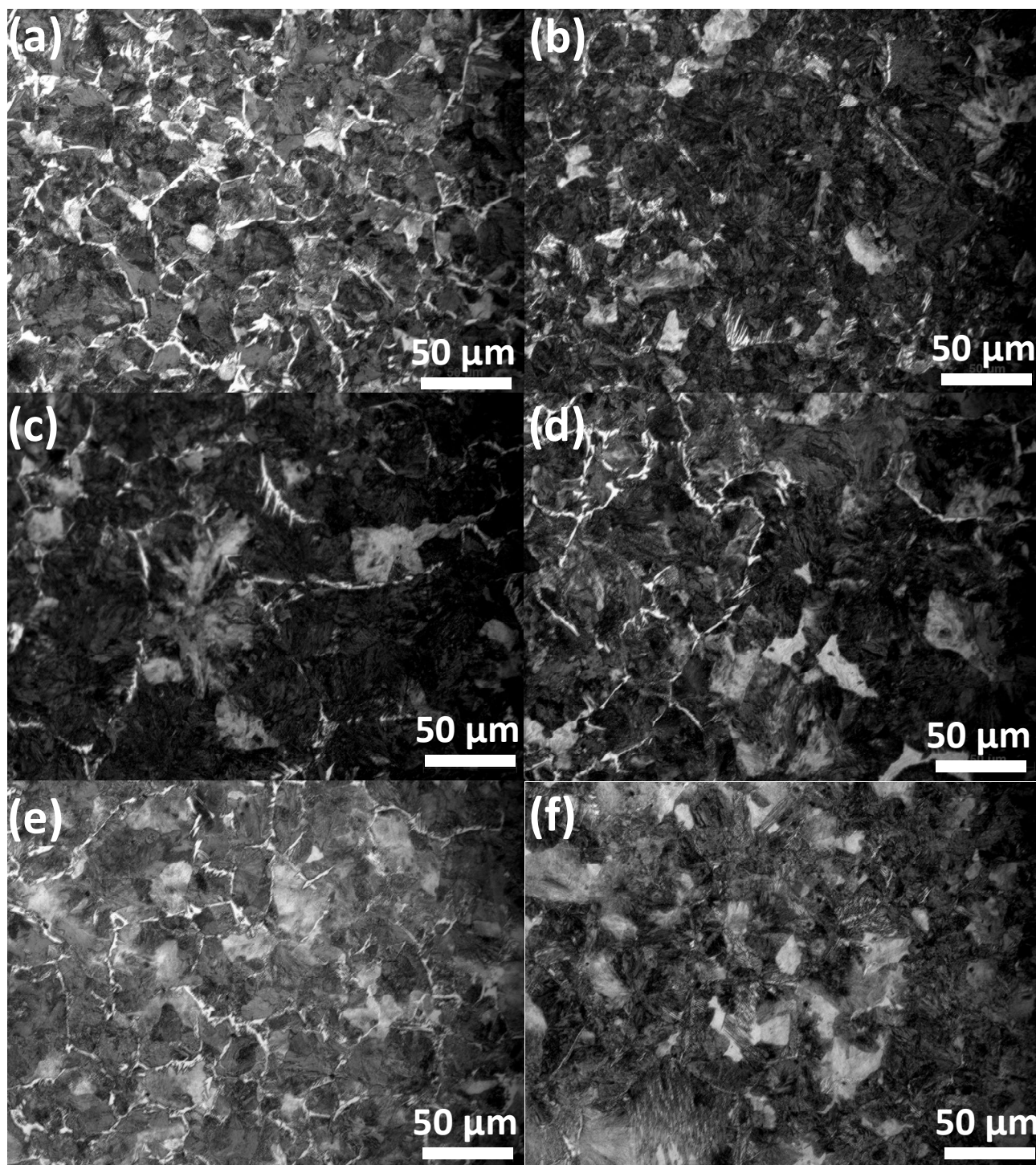


Figura 6. Microestrutura da seção transversal das regiões de centro e borda de amostras temperadas em banhos a 80°C : (a) óleo de girassol, centro; (b) óleo de girassol, borda; (c) óleo de soja, centro; (d) óleo de soja, borda; (e) óleo mineral, centro; (f) óleo mineral, borda.

Como se pode perceber, não houve formação de martensita nas amostras temperadas em óleo vegetal, Figuras 6(a-d), nem na região central da amostra temperada em óleo mineral, Figura 6(e). Ocorre formação de martensita

limitadamente na borda da amostra temperada em óleo mineral, Figura 6(f). Porém, como se pode perceber, há presença de ferrita e cementita também, razão pela qual a análise de microdureza não revelou endurecimento na superfície da amostra. Tanto para o óleo de soja como para o óleo de girassol, as microestruturas das regiões de centro e borda são equivalentes, com formação limitada de ferrita acicular, que resulta da taxa de resfriamento elevada, mas sem a presença de martensita.

4. CONCLUSÕES

Neste trabalho foi realizado um estudo da têmpera de aço ABNT 1045 em óleos vegetais e minerais com diferentes temperaturas de banho. Os óleos vegetais utilizados (girassol e soja) apresentaram curvas de resfriamento na têmpera similares às observadas para o óleo mineral. O óleo mineral apresentou, contudo, desempenho superior pela elevada capacidade de extração de calor na faixa de temperaturas entre 600 e 700°C para todas as temperaturas de banho testadas. Notou-se dispersão elevada dos valores de microdureza medidos ao longo da seção transversal dos corpos-de-prova tratados em óleo de girassol, enquanto que para os óleos de soja e mineral a distribuição de microdurezas foi mais homogênea. Com base nos resultados apresentados, foi possível constatar que, a despeito do desempenho superior do óleo mineral, apresentam-se os óleos vegetais como alternativas possíveis para a têmpera de aços.

5. AGRADECIMENTOS

Agradecimentos à FAPEMIG pelo apoio à participação no CONEM e à empresa COMBUSTOL MINAS pela doação do óleo mineral utilizado neste trabalho.

6. REFERÊNCIAS

- Canale, L. C. F., Sarmiento, G. S., Totten, G. E., Penha, R. N., “Effect of vegetable oil oxidation on the ability to harden AISI 4140 steel”, Anais do 60º Congresso Anual da ABM, Vol. 1, 1-10.
- Chiaverini, V., 2008, “Aços e ferros fundidos”, Ed. ABM, São Paulo, Brazil, 599p.
- Colpaert, H., 2008, “Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns”, Ed. Edgard Blücher, São Paulo, Brazil, 652 p.
- Fernandes, P., Prabhu, K.N., 2008, “Comparative study of heat transfer and wetting behaviour of conventional and bioquenchants for industrial heat treatment”, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 51, pp. 526-538.
- Kobasko, N.I., 2011, “Discussion of the Problem on Designing the Global Database for Different Kinds of Quenchants”, Recent Advances in Fluid Mechanics, Heat & Mass Transfer and Biology, Vol. 1, pp. 117-125.
- MacKenzie, D.S., 2014, “Selection of oil quenchants for heat treating processes”, International Heat Treatment and Surface Engineering, Vol. 8, pp. 8-14.
- Otero, R.L.S., Canale, L. C. F., Totten, G., 2011, “Use of Vegetable Oils and Animal Oils as Steel Quenchants: A Historical Review—1850-2010”, Journal of ASTM International, Vol. 9, pp. 1-38.
- Prabhu, K. N., Fernandes, P., Kumar, G., 2009, “Effect of substrate surface roughness on wetting behaviour of vegetable oils”, Materials and Design, Vol. 30, pp. 297-305.
- Ramesh, G., Prabhu, K.N., 2014, “Wetting kinetics, kinematics and heat transfer characteristics of pongamia pinnata vegetable oil for industrial heat treatment”, Applied Thermal Engineering, Vol. 65, pp. 433-446.
- Said, D., Belinato, G., Sarmiento, G. S., Otero, R.L.S., Totten, G.E., Gastón, A., Canale, L.C.F., 2013, “Comparison of Oxidation Stability and Quenchant Cooling Curve Performance of Soybean Oil and Palm Oil”, Journal of Materials Engineering and Performance, Vol. 22, pp. 1929-1936.
- Schicchi, D.S., Belinato, G., Sarmiento, G.S., Gastón, A., Totten, G. E., Canale, L. C. F., 2012, “Effect of Soybean Oil and Palm Oil Oxidation Stability on the Variation of Heat Transfer Coefficients and Residual Stress”, Proceedings of the 6th International Quenching and Control of Distortion Conference, Vol. 1, pp. 621-633.
- Totten, G.E., Tensi, H.M., Lainer, K., 1999, “Performance of Vegetable Oils as a Cooling Medium in Comparison to a Standard Mineral Oil”, Journal of Materials Engineering and Performance, Vol. 8, pp. 409-416.

7. RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

A STUDY OF THE QUENCHING PROCESS OF CARBON STEEL WITH VEGETABLE OILS AT DIFFERENT TEMPERATURES

Pedro Augusto Ramos, pedroaugustoramos@hotmail.com¹

Leandro Pegorete Resende, leandropegorete@gmail.com¹

Douglas Antônio de Faria, faria_douglas@yahoo.com.br¹

Pedro Paiva Brito, pbrito@pucminas.br¹

¹Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Rua Rio Comprido 4.580, Contagem (MG), 32010-025.

Abstract. *Vegetable oils present interesting physical properties for application in quenching of steels, besides the fact that they are biodegradable and renewable resources, contrary to conventional petroleum derived mineral oils. In the present work, a systematic study of the physical characteristics of pure sunflower and soybean oils applied for quenching carbon steel specimens is carried out. Density, viscosity and wetting properties of the oils were determined and quenching tests in 25, 40, 60 and 80°C baths were performed in ABNT 1045 Steel. The cooling curves for each tested situation were determined experimentally by fixing a mineral thermocouple connected to data acquisition system to the steel specimen. Comparisons were made with a commercial mineral oil. The performance of the different oils in the tested conditions was verified by determining the microhardness profile along the cross section of the quenched specimens. By following the proposed methodology it was possible to attest the viability of using the selected vegetable oils as quenching media, due to the fact that no significant change in hardening depth could be observed in comparison to the commercial quenching oil.*

Keywords: *quenching, vegetable oil, hardness, carbon steel.*