

## **EFEITO DA TEMPERATURA DE AQUECIMENTO NA TÊMPERA NA MICROESTRUTURA DE UM AÇO FERRAMENTA PARA TRABALHO A FRIO**

L. H. Zeitune<sup>1</sup>; A. S. Magalhães<sup>1</sup>; A. C. S. Bezerra<sup>1</sup>; W. Lopes<sup>1</sup>; E. C. S. Correa<sup>1</sup>

(1) CEFETMG

CEFET/MG - Departamento de Engenharia de Materiais, Av. Amazonas 5253 - Nova  
Suíça - Belo Horizonte - MG, Brasil, CEP: 30.421-169. E-mail:

elaine@deii.cefetmg.br

### **RESUMO**

*Os aços ferramenta para trabalho a frio são caracterizados por elevada resistência ao desgaste e boa tenacidade, propriedades associadas à sua microestrutura, em geral composta de martensita revenida e carbonetos diversos, cuja natureza, presença e quantidade dependem da composição química e das condições de processamento do material. Neste trabalho foi avaliada a influência da temperatura na têmpera na microestrutura, por meio de microscopia óptica, eletrônica de varredura e difração de raios x, e na dureza de um aço ferramenta para trabalho a frio. A elevação na temperatura de aquecimento na têmpera levou à redução na quantidade de carbonetos presentes, fenômeno observado pela análise qualitativa das micrografias. A proporção dos carbonetos considerados pequenos diminuiu significativamente ao passo que os carbonetos denominados como grandes apresentaram uma leve queda com a mesma comparação. Os resultados foram comparados com a dureza do material, cuja elevação foi verificada com o aumento da temperatura no tratamento.*

Palavras-chave: aço ferramenta para trabalho a frio, têmpera, microestrutura, carbonetos

## INTRODUÇÃO

O uso de ferramentas para a fabricação de peças metálicas à temperatura ambiente é uma das formas mais comuns para a produção de componentes nas indústrias de transformação. Desse modo, a melhora do desempenho de aços ferramenta para trabalho a frio pode vir a contribuir para o aumento de sua eficiência e confiabilidade <sup>(1)</sup>, cujas condições de trabalho requerem propriedades específicas.

Uma microestrutura composta de martensita e carbonetos diversos possibilita a combinação de propriedades atrativas para tal classe de aços, dentre as quais se destacam elevada dureza, boa tenacidade e resistência ao desgaste. A obtenção de tal microestrutura está associada ao processo de fabricação desses aços desde a fundição, passando pelas operações de transformação mecânica para obter a forma desejada do produto e chegando ao tratamento térmico final.

Em geral, os carbonetos formados variam de acordo com a composição química do aço, com as condições de operação anteriores e com os parâmetros dos tratamentos térmicos de têmpera e revenimento posteriormente conduzidos. Dessa forma, diferenças em termos de morfologia, fração volumétrica e distribuição desses carbonetos podem ser observadas, levando a propriedades mecânicas distintas <sup>(2)</sup>.

Em aços para trabalho a frio, o desenvolvimento de carbonetos, especificamente no que se refere à sua fração volumétrica, é influenciado pelo teor de carbono e elementos de liga <sup>(2)</sup> e a obtenção de uma distribuição relativamente uniforme está associada aos estágios de processamento nos quais ocorre a formação dos mesmos. A caracterização de tais carbonetos é de relevante importância no intuito de compreender a relação entre a microestrutura e as propriedades dos aços ferramenta para trabalho a frio e conseqüentemente, possibilitar a otimização do processo de produção <sup>(1)</sup>.

Dentro deste contexto, neste trabalho foram avaliados os efeitos da temperatura do tratamento térmico de têmpera na microestrutura, na quantidade relativa dos carbonetos e na dureza de um aço ferramenta para trabalho a frio de alto teor de carbono apresentando ainda cromo, molibdênio e vanádio.

## MATERIAIS E MÉTODOS

Como material de estudo foram utilizadas barras de seção transversal quadrada, com aproximadamente 12mm x 12mm x 100mm, de um aço ferramenta

para trabalho a frio, de elevados percentuais de carbono e cromo, com teores ainda de molibdênio, vanádio e silício. A composição química é exibida na tabela 1.

**Tabela 1 - Composição química do aço ferramenta para trabalho a frio.**

<b>C (%)</b>	<b>Cr (%)</b>	<b>Mo (%)</b>	<b>V (%)</b>	<b>Si (%)</b>
1,0%	8,0%	1,6%	1,6%	0,9%

O tratamento térmico de têmpera foi realizado com resfriamento em óleo, conforme recomendação da literatura para aços ferramenta para trabalho a frio <sup>(3)</sup>. Os experimentos foram conduzidos em um forno elétrico da marca *Brasimet* modelo Heraus, com sistema analógico de controle de temperatura, considerando os parâmetros de tempo de encharque e de temperatura de aquecimento mostrados na Tabela 2. A escolha dos valores ocorreu a partir de consulta à bibliografia referente a este grupo de aços <sup>(3-5)</sup> e ainda a alguns testes preliminares, ressaltando o fato de que a análise dos efeitos especificamente da temperatura de austenitização na microestrutura e na dureza do material foi um dos objetivos do trabalho.

**Tabela 2 - Parâmetros aplicados ao tratamento térmico de têmpera.**

Temperatura	Tempo de Encharque	Meio de Resfriamento
900°C		
1000°C	60 minutos	Óleo
1100°C		

A microestrutura foi caracterizada a partir de microscopia óptica MO e eletrônica de varredura MEV e difração de raios X. A preparação das amostras foi realizada por meio da técnica metalográfica convencional, consistindo em embutimento a frio com polimetilmetacrilato, lixamento com lixas de óxido de alumínio (#120, #240, #320, #400, #600, #1200) e polimento em panos com pasta de diamante (9µm, 3µm, 1µm). Posteriormente, as amostras foram submetidas a ataque químico com o reativo nital 5%. Após a finalização da preparação, duas amostras de cada condição foram encaminhadas à microscopia óptica, em um equipamento *Fortel* com sistema de captura digital de imagens marca *Kontrol*, e depois à microscopia eletrônica de varredura em um microscópio *Shimadzu* modelo SSX-550. Além da análise qualitativa da microestrutura, a obtenção das imagens por microscopia óptica e microscopia eletrônica de varredura foi realizada para

possibilitar uma avaliação semiquantitativa dos microconstituintes no aço ferramenta para trabalho a frio. A análise por metalografia semiquantitativa permitiu, diante das informações obtidas na análise da microestrutura, calcular em termos percentuais a fração que corresponde aos carbonetos dispersos na matriz martensítica, utilizando o método de contagem de pontos <sup>(6)</sup>.

A difração de raios-X foi realizada com o objetivo de confirmar a presença das fases e constituintes identificados nas imagens de MO e MEV e acompanhar eventuais modificações na presença de austenita retida (quando for o caso) com os tratamentos térmicos. Nesta etapa foi empregado um difratômetro com alvo metálico de cobre da marca *Shimadzu* modelo XRD-7000, com parâmetros de ângulo de varredura de 10° a 100° e passo de 0,02°s<sup>-1</sup>. Finalmente, para a caracterização mecânica, foram realizadas medições de dureza Rockwell em um durômetro da marca Reichester, com sistema de medição Mitutoyo. Os experimentos foram conduzidos empregando a escala C, com carga de 150kgf e penetrador cônico de diamante para as amostras temperadas, e a escala B, com carga de 100Kgf e penetrador esférico de carboneto de tungstênio com 1/16" de diâmetro, para a amostra da liga no estado inicial.

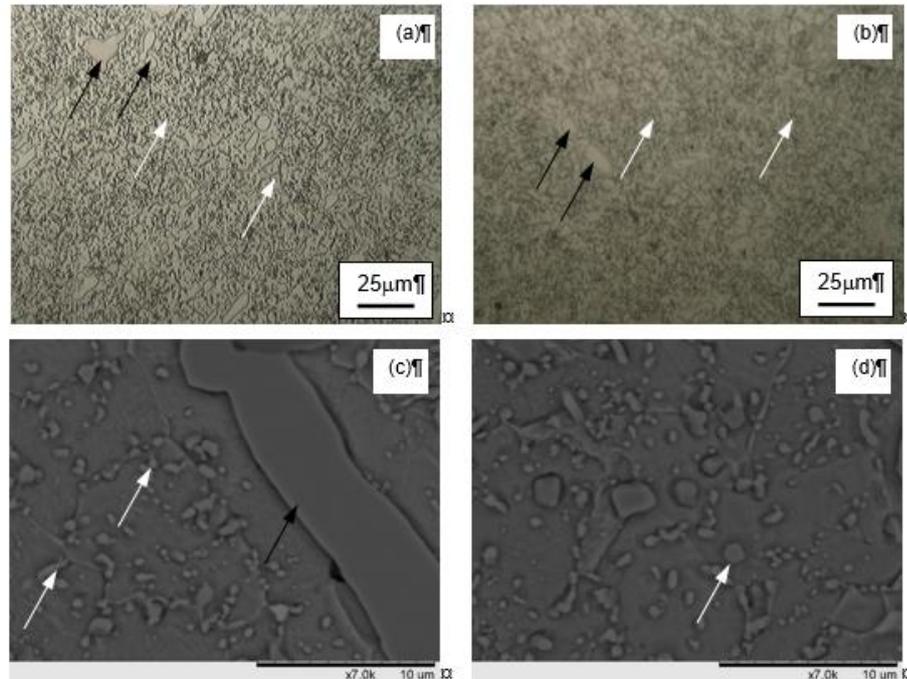
## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 1 são apresentadas as microestruturas obtidas por meio de microscopias óptica e eletrônica de varredura do material no estado como fornecido. Verifica-se a ocorrência de matriz de ferrita e carbonetos diversos, de dimensões mais elevadas, classificados no trabalho como “grandes” (seta negra) e de dimensões reduzidas, denominados “pequenos” (seta branca).

A morfologia dos precipitados sugere que os mesmos sejam de carbonetos dos tipos MC, M<sub>7</sub>C<sub>3</sub> e M<sub>23</sub>C<sub>6</sub> <sup>(7-11)</sup>. Os carbonetos do tipo MC, apontados como globulares, aparecem associados ou isoladamente, sendo que os elementos que o compõem podem ser o vanádio (principalmente), o molibdênio e o cromo.

Os carbonetos M<sub>7</sub>C<sub>3</sub> se desenvolvem de forma associada, aparecendo em grupo como uma “espinha de peixe”, porém com lamelas relativamente grossas (com morfologia similar à estrutura dendrítica), sendo principalmente compostos de cromo e ferro, podendo ainda envolver a ocorrência de molibdênio, vanádio e tungstênio. Já os carbonetos do tipo M<sub>23</sub>C<sub>6</sub>, também globulares, porém de dimensões reduzidas, distribuem-se isoladamente e de maneira relativamente

uniforme, formados pelos elementos cromo (principalmente), tungstênio, molibdênio e vanádio. Essa descrição está de acordo com o material investigado, um aço para trabalho a frio contendo alto teor de carbono, alto teor de cromo e ainda vanádio e molibdênio.



**Figura 1 – Fotomicrografias do aço no estado inicial. (a) e (b) MO, (c) e (d) MEV.**

Nas Figuras 2, 3 e 4 são mostradas imagens obtidas por MO e MEV, da microestrutura do material submetido ao tratamento térmico de têmpera, nas quais, de maneira geral, observa-se uma matriz martensítica, com ripas/agulhas, com a presença de carbonetos “grandes”, dispersos de forma heterogênea e, em sua maioria, agrupados, e carbonetos “pequenos”, dispersos de forma mais homogênea. Esses carbonetos exibem as mesmas morfologias e características discutidas anteriormente, sendo associados aos tipos MC,  $M_7C_3$  e  $M_{23}C_6$ .

Comparando as três situações (Figuras 2, 3 e 4) e ainda o estado inicial do material (Figura 1), observa-se, qualitativamente, certa tendência à diminuição na quantidade ou proporção de carbonetos de ambos os tipos (grandes e pequenos), tanto com a realização do tratamento térmico como com a elevação na temperatura de austenitização.

Confrontando com o aço ferramenta para trabalho a frio no estado como adquirido, a realização da têmpera proporcionou uma redução na quantidade de

carbonetos, especialmente o de dimensões reduzidas, o que era esperado, uma vez que a matriz martensítica comporta uma quantidade de carbono não compatível com a microestrutura ferrítica.

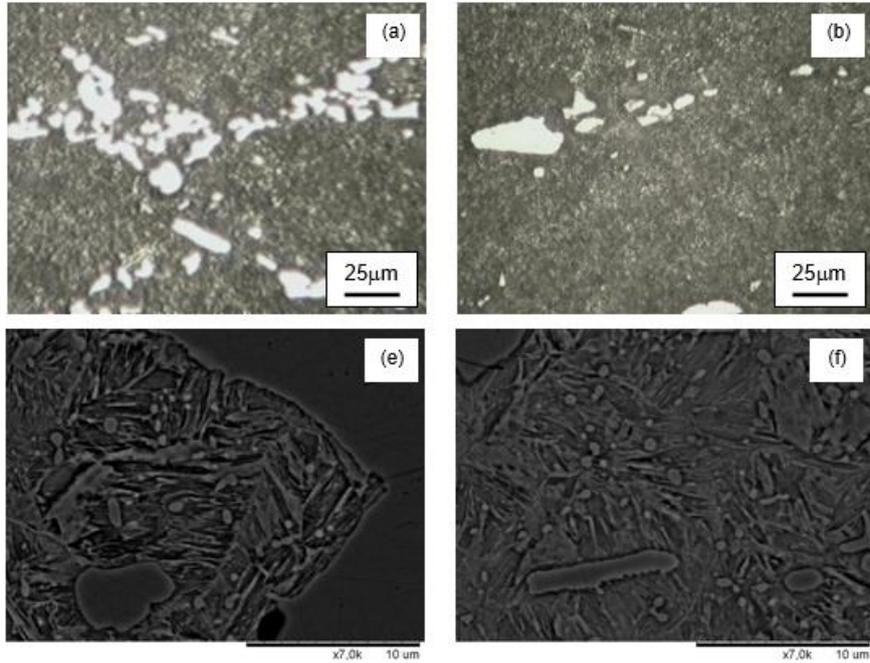


Figura 2– Fotomicrografias do aço temperado a 900°C. (a) e (b) MO, (c) e (d) MEV.

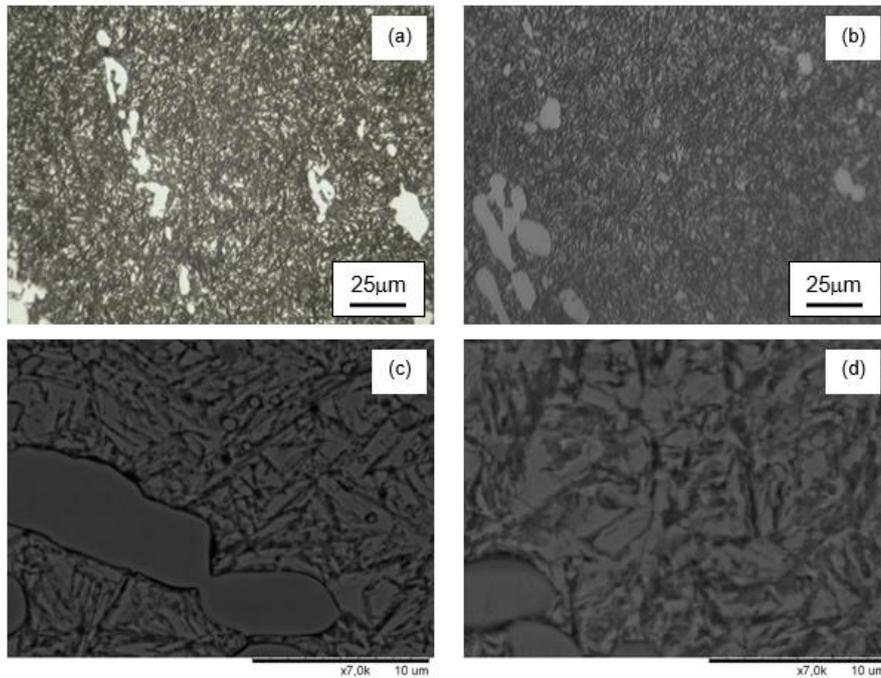
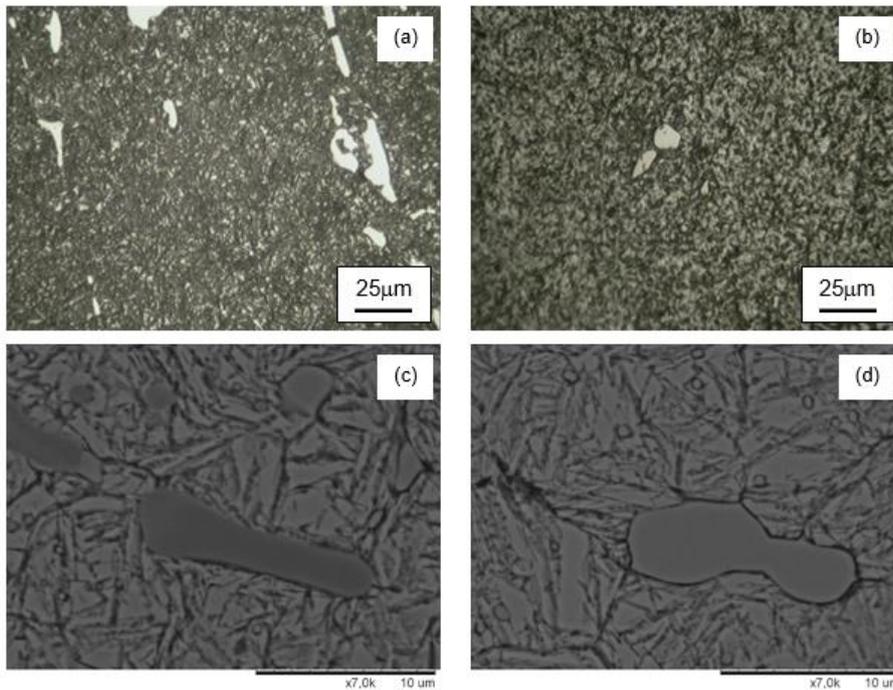


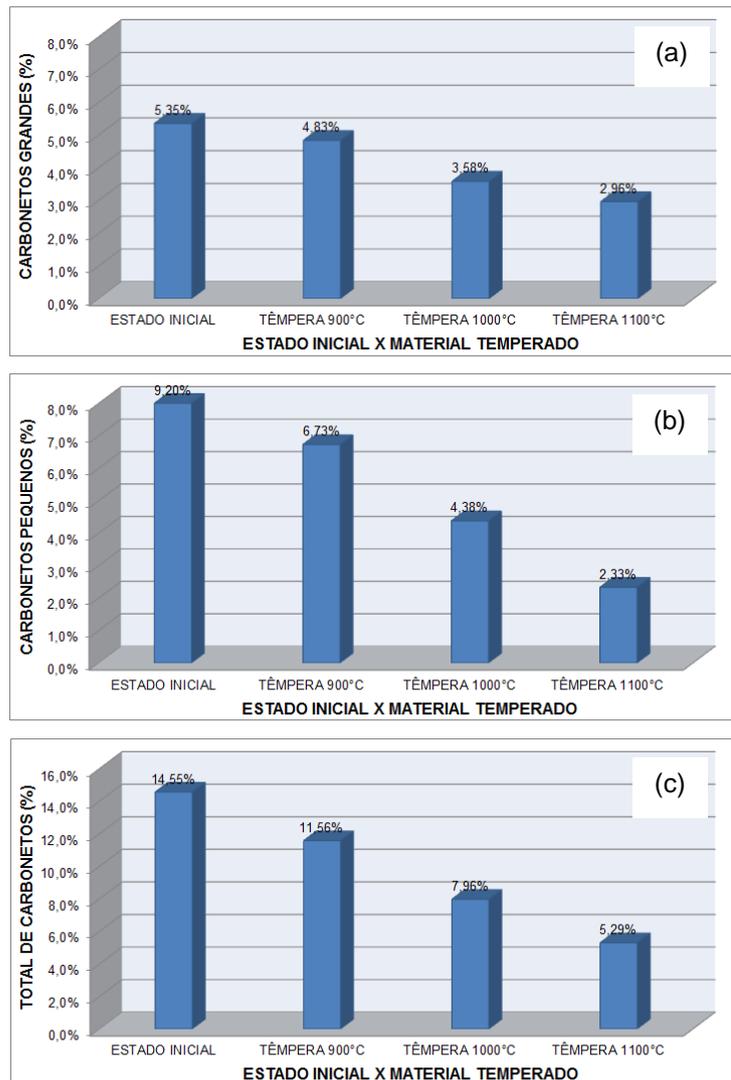
Figura 3 – Fotomicrografias do aço temperado a 1000°C. (a e b) MO, (c e d) MEV.

Em relação ao aumento na temperatura de austenitização da têmpera, a redução na quantidade de precipitados sugere que essa elevação de temperatura propicia maior susceptibilidade aos elementos de liga entrar em solução sólida na estrutura austenítica, dissolvendo os carbonetos. Dessa forma, ao dissolver os carbonetos, durante o encharque, a austenita aparece com maior teor de carbono, levando à formação, a princípio, de uma maior proporção de martensita e ainda uma martensita de maior teor de carbono, com maior dureza.



**Figura 4 – Fotomicrografias do aço temperado a 1100°C. (a) e (b) MO, (c) e (d) MEV.**

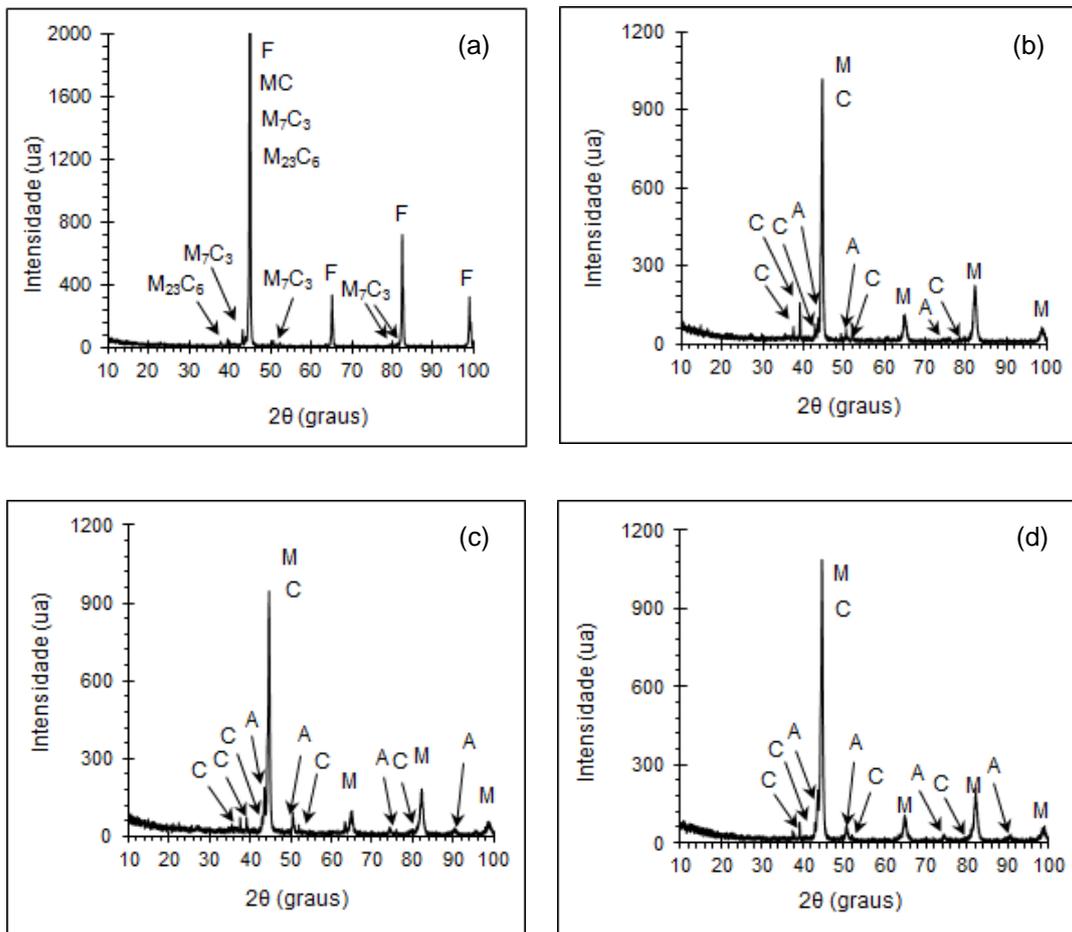
Na Figura 5 são exibidos os resultados da análise quantitativa realizada a partir das imagens de MO e MEV do aço no estado inicial e temperado por meio da técnica de contagens de pontos. Observa-se, no estado inicial, uma proporção total de carbonetos de 14,55% no material e, a partir da diferença, 85,45% de estrutura ferrítica. Verifica-se que, como observado qualitativamente, tanto a realização da têmpera como o aumento na temperatura de austenitização promoveu uma redução na quantidade de carbonetos presentes no material. Essa diminuição ocorreu tanto para os carbonetos denominados como “grandes” como para os “pequenos”, sendo mais acentuada para esse segundo grupo. Dessa forma, compõem o aço temperado a 900°C ,1000°C e 1100°C aproximadamente 80,44%; 91,04% e 93,44% de martensita (acrescida da austenita retida).



**Figura 5 – Análise quantitativa dos carbonetos no aço no estado inicial e temperado empregando diferentes temperaturas de austenitização. (a) % carbonetos “grandes”, (b) % carbonetos “pequenos” e (c) % total de carbonetos.**

Na Figura 6 são mostrados os difratogramas referentes ao aço ferramenta para trabalho a frio nas condições estudadas. Em relação ao material no estado inicial, os resultados comentados anteriormente são, em geral, confirmados, uma vez que podem ser observadas reflexões associadas à estrutura ferrítica (marcadas como F) e reflexões possivelmente relacionados aos carbonetos MC,  $M_7C_3$  e  $M_{23}C_6$ . Ressalta-se que, nesse caso, a identificação das reflexões se deu a partir da comparação com os resultados exibidos em trabalhos diversos, acerca do desenvolvimento de precipitados em aços ferramenta para trabalho a frio <sup>(4,5)</sup>. A partir do material temperado, no qual as reflexões identificadas como M referem-se à martensita, C – carbonetos em geral e A referem-se à austenita, observa-se que os resultados

parecem estar de acordo com a análise qualitativa da microestrutura do material temperado, ou seja, realização do tratamento térmico de têmpera levando à redução na quantidade de carbonetos, fenômeno acentuado com a elevação na temperatura de austenitização. Em relação à ocorrência de austenita retida, com a solubilização de carbonetos, mais acentuada com a temperatura, mais carbono fica em solução sólida na estrutura austenítica. Apesar da presença de carbono ser essencial na estrutura para a transformação martensítica, essa mesma presença, em quantidades elevadas, funciona como uma “restrição” ao mecanismo de transformação.



**Figura 6 – Difratograma do aço ferramenta (a) no estado inicial e temperado a (b) 900°C, (c) 1000°C e (d) 1100°C.**

Em relação às escalas dos gráficos, visto que as intensidades mudam, foi considerado como parâmetro o valor aproximado da maior reflexão, referente à estrutura martensítica/ferrítica, de forma a possibilitar, ainda que comparativamente, a análise da proporção dos constituintes. Comparando com o material no estado

inicial, verifica-se que a realização da têmpera com temperatura de 900°C, possibilitou o aparecimento de picos referentes à estrutura austenítica e uma diminuição, também discreta, dos picos relativos aos carbonetos. Com a elevação da temperatura (1000°C e 1100°C), esses fenômenos se tornam mais acentuados, ou seja, a proporção de austenita retida parece ter aumentado com a temperatura, assim como a proporção de carbonetos diminuiu. Ressalta-se que essa avaliação qualitativa é baseada na presença e na área abaixo de cada um dos picos intensidade  $\times 2\theta$ .

Considerando que a transformação martensítica se dá por meio de cisalhamento <sup>(12,13)</sup>, nesse caso, uma vez que os átomos de carbono ficam em solução sólida intersticial na austenita, eles geram tensões que elevam a resistência ao cisalhamento, portanto, dificultando a deformação na rede cristalina <sup>(14)</sup>. Esse comportamento se torna mais acentuado com o aumento da temperatura de austenitização, pois mais carbono entra em solução sólida, o que geraria mais austenita retida.

Diversos trabalhos vêm sendo realizados para tentar minimizar a presença de austenita retida nos aços ferramenta para trabalho a frio <sup>(4, 15, 16)</sup> e a ocorrência dessa estrutura é considerada, em geral, prejudicial, pois além de reduzir a dureza média desejada para o componente após a têmpera, o mesmo pode sofrer transformação martensítica no revenimento subsequente durante o resfriamento <sup>(7)</sup>, gerando uma estrutura ainda frágil em uma operação realizada para elevar a tenacidade do material. No presente trabalho, a presença de austenita retida não levou à queda na dureza média do material. Acredita-se que o ganho com a quantidade de martensita e com a dureza da mesma superou a dureza reduzida da austenita formada.

Na Tabela 3 é apresentado o resultado médio dos ensaios de dureza Rockwell do aço ferramenta para trabalho a frio investigado no estado inicial e submetido a tratamento térmico de têmpera. Observa-se que, no estado inicial, o valor da propriedade foi obtido por meio da escala B, mostrando que o material no estado como adquirido não estava endurecido por tratamentos térmicos. A partir dos resultados médios dos ensaios de dureza Rockwell C do aço ferramenta após a têmpera em óleo considerando as três temperaturas de aquecimento verifica-se a tendência de aumento da dureza com a elevação da temperatura de austenitização, especialmente ao comparar a temperatura de 900°C com as demais.

**Tabela 3 - Dureza do aço ferramenta no estado inicial e temperado.**

Condição		Dureza Rockwell
Estado Inicial		93,4 ± 2,8 HRB
Temperado	900°C	52,3±1,9 HRC
	1000°C	58,8±1,5 HRC
	1100°C	58,9±1,8 HRC

## CONCLUSÃO

A elevação na temperatura de aquecimento na têmpera levou à redução na quantidade de carbonetos presentes no material, fenômeno observado pela análise qualitativa das micrografias. Em termos semiquantitativos, a proporção dos carbonetos considerados pequenos diminuiu significativamente. Já os carbonetos denominados como grandes apresentaram uma leve queda com a mesma comparação. Tal comportamento é corroborado pelo aumento do valor da dureza para o aço analisado nas condições estudadas. No que se refere à austenita retida, avaliada qualitativamente pela observação dos difratogramas, esta pareceu diminuir com a temperatura de austenitização na têmpera.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à CAPES, à FINEP e à FAPEMIG pelo apoio financeiro e por concessão de bolsa.

## REFERÊNCIAS

- (1) KIM, H.; KANG, J.-J.; SON, D.; LEE, T.-H.; CHO, K.-M. Evolution of carbides in cold-work tool steel. *Materials Characterization*, v.107, p.376-385, 2015.
- (2) SILVA, A. L. V. C.; MEI, P. R. *Aços e ligas especiais*. 3 ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2010. 648p.
- (3) ASM HANDBOOK. *Heat treating*. 10 ed. Ohio: ASM International, 1999. 1012p.
- (4) DAS, D.; DUTTA, A. K.; RAY, K. K. Sub-zero treatments of AISI D2 steel: part 1 – microstructure and hardness. *Materials Science and Engineering A*, v. 527, p. 2182-2193, 2010.
- (5) TORKAMANI, H.; RAYGAN, S.; RASSIZADEHGHANI, J. Comparing microstructure and mechanical properties of AISI D2 steel after bright hardening and oil quenching. *Materials and Design*, v. 54, p. 1049-1055, 2014.
- (6) PADILHA, A. F.; AMBROZIO FILHO, F. *Técnicas de análise microestrutural*. São Paulo: Hemus, 2004. 190 p.

- (7) KRAUSS, G. Steel: heat treating and processing principles. Ohio: American Society for Metals – ASM International, 1990. 497p.
- (8) TOTTEN, G. E. Steel heat treatment: metalurgy and technologies. 2 ed. Portland: Portland University. 2007. 833p.
- (9) HETZNER, D. W.; GEERTRUYDEN, W. V. Crystallography and metallography of carbides in high alloy steels. *Materials Characterization*, v. 59, p. 825-841, 2008.
- (10) BOURITHIS, L.; PAPANIMITRIOU, G. D.; SIDERIS, J. Comparison of wear properties of tool steels AISI D2 and O1 with the same hardness. *Tribology International*, v. 39, p. 479-489, 2006.
- (11) VITRY, V.; NARDONE, S.; BREYER, J.P.; SINNAEVE, M.; DELAUNOIS, F. Microstructure of two centrifugal cast high speed steels for hot strip mills applications. *Materials and Design*, v.34, p.372-378, 2012.
- (12) BHADSHIA, H. K. G. H; HONEYCOMBE, R. W. K. Steels: microstructure and properties. 3 ed. London: Elsevier, 2006. 344p.
- (13) COLPAERT, H. Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns. Revisão técnica: André Luiz V. da Costa e Silva. 4.ed. São Paulo: Blücher, 2008. 651p.
- (14) CHIAVERINI, V. Aços e ferros fundidos. 7 ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais - ABM, 2005. 599p.
- (15) ARSLAN, F. K.; ALTINSOY, I.; HATMAN, A.; IPEK, M.; ZEYTIN, S.; BINDAL, C. Characterization of cryogenic heat treated vanadis 4 OM cold work tool steel. *Vacuum*, v. 86, p. 370-373, 2011.
- (16) KOKOSZA, A.; PACYNA, J. Evaluation of retained austenite stability in heat treated cold work tool steel. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 162-163, p. 327-331, 2005.

## **EFFECT OF TEMPERATURE IN QUENCHING IN THE MICROSTRUCTURE OF A COLD-WORK TOOL STEEL**

### **ABSTRACT**

Cold-work tool steels are characterized by high wear resistance and good toughness, properties associated with its typical microstructure, generally composed of tempered martensite and different carbides. The nature, presence and amount of these carbides depend on the chemical composition and the processing conditions to which the metal has been subjected. In this context, this study evaluated the influence of heating temperature in quenching in the microstructure and hardness of a cold-work tool steel. The evaluation of the microstructure was performed by optical microscopy and scanning electron microscopy and X-ray diffraction observation in addition to the types of carbides, we conducted a semiquantitative analysis of its volume fraction. The results showed that the rise in heating temperature in quenching led to a reduction in the amount of carbides, qualitative phenomenon observed by SEM analysis. In semi-quantitative terms, the proportion of carbides considered small decreased significantly. Carbides termed as large showed a slight decrease compared with the same. Finally, the results were compared with the hardness, whose elevation was observed with increasing heating temperature treatment.

Keywords: cold-work tool steel, quenching, microstructure, carbides.