



TRATAMENTO TÉRMICO DE AÇO RÁPIDO ABNT M2.

Rodrigo Magnabosco

Roberto Zitelman de Oliva Jr.

Ronan Rocha S. Passos

FEI – Departamento de Engenharia Mecânica

Av. Humberto de Alencar Castelo Branco, 3972

CEP 09850-901 – S. B. Campo – S. P. - BRASIL

rodrmagn@cci.fei.br

Resumo. *O presente trabalho descreve a influência do tempo e da temperatura de austenitização e de revenimento na microestrutura e dureza do aço rápido ABNT M2. As temperaturas e tempos de austenitização utilizados foram de 900°C a 1200°C por até 30 minutos; para o revenimento, utilizou-se temperaturas entre 250°C e 700°C, por até 120 horas. Constata-se que a dureza máxima após têmpera é obtida quando a austenitização se dá a 1175°C por 5 minutos, e que austenitização a temperaturas de 900°C e 1000°C não são suficientes para a correta formação de austenita e a dissolução da fração ideal de carbonetos, resultando em estruturas de pouca dureza. Austenitização a 1220°C, ou por tempos superiores a 5 minutos, leva a aumento do tamanho de grão (inclusive com crescimento anormal destes) e da fração volumétrica de carbonetos dissolvidos, o que leva a maior fragilidade e perda na resistência a abrasão. No revenimento, o máximo de dureza obtido pela precipitação de carbonetos, chamado de endurecimento secundário, se dá a 550°C por 2,5 horas, e diferenças só podem ser constatadas por microscopia óptica após elevados tempos e temperaturas de revenimento.*

Palavras-chave: *aço rápido, ABNT M2, tratamentos térmicos.*

1. INTRODUÇÃO

Os aços rápidos, na condição usual de utilização (temperados e revenidos), apresentam frações consideráveis de carbonetos não dissolvidos durante a austenitização, que conferem excelente resistência ao desgaste. Tais carbonetos são suportados pela matriz de martensita revenida, que tem suas propriedades mecânicas incrementadas pelo fenômeno de endurecimento secundário provocado pela precipitação de carbonetos do tipo MC e M_2C finamente dispersos na matriz, nestas condições de estrutura cristalina cúbica de corpo centrado (CCC). Neste trabalho, descreve-se a influência do tempo e da temperatura de austenitização e de revenimento na microestrutura e dureza do aço rápido ABNT M2, obtendo a relação entre a dureza e as variáveis de tratamento térmico, sendo também estudadas as microestruturas obtidas.

Os aços rápidos recebem esta denominação devido a sua capacidade de reter elevadas durezas (1000 HV ou 65-70 HRC) mesmo se utilizados no corte rápido de materiais (HOYLE, 1988). Além de elevada dureza, outra importante característica destes aços é a capacidade de manter durezas elevadas se submetidos a temperaturas de até 600°C (por exemplo, 48 HRC em temperaturas de 593°C). Este fato habilita os aços rápidos como matéria-prima para a confecção de ferramentas de corte (tais como fresas, brocas, ferramentas de torneamento, serras, e também machos e cossinetes para roscar, alargadores e escariadores), além de matrizes de estampagem, prensagem e forjamento que necessitem de elevada resistência ao desgaste (ROBERTS e CARY, 1980).

A microestrutura destes materiais é composta basicamente por carbonetos primários, cuja principal função é fornecer proteção contra desgaste abrasivo, e uma matriz de martensita revenida reforçada por carbonetos finamente dispersos (precipitados durante o revenido, num processo onde ocorre endurecimento secundário), cuja função é reter os carbonetos primários, mesmo sob as altas temperaturas e tensões cisalhantes criadas na interface entre a aresta de corte das ferramentas e o material que está sendo trabalhado na usinagem.

Elementos de liga. Molibdênio e tungstênio são de presença obrigatória para que um aço seja classificado como rápido. Adicionando-os, aumenta-se a resistência ao desgaste, a dureza a quente e a estabilidade térmica (BAYER e WALTON, 1990). Apesar de o molibdênio apresentar maior eficiência no aumento de dureza, tenacidade e temperabilidade, além de reduzir o custo inicial do aço, o seu uso substituindo totalmente o tungstênio não é tão vantajoso quanto a substituição parcial, pois este último fornece melhor proteção contra o crescimento de grão, descarbonetação e oxidação (ROBERTS e CARY, 1980). Apresentando forte afinidade pelo carbono, formam carbonetos de fórmula geral M_6C , sendo M ferro, tungstênio e molibdênio, sendo ainda capaz de dissolver cromo e vanádio em pequena quantidade, como substitutos do ferro. São estes os carbonetos que mais contribuem para a resistência a abrasão dos aços rápidos, devido a sua alta dureza. Muito estáveis, dissolvem-se apenas parcialmente durante austenitização em temperaturas acima de 980°C. No aço ABNT M2, o teor de tungstênio é de aproximadamente 6% e o de molibdênio é 5%, o que resulta numa fração volumétrica de 16% de carbonetos M_6C no estado recozido, que se reduz a 8% quando temperado.

O cromo, além de contribuir substancialmente para a temperabilidade, pelo fato de retardar outras transformações de fase, eleva o pico de dureza secundária por inibir a precipitação e coalescimento dos carbonetos secundários, melhorando a sua distribuição. O cromo também atua na redução da oxidação e formação de carepa nos tratamentos térmicos e operações de corte.

Sendo responsável pela formação de carbonetos $M_{23}C_6$ (e em alguns casos M_7C_3), presentes apenas no estado recozido, atua como reserva de carbono que será responsável pela dureza da matriz, uma vez que no estado temperado estes carbonetos encontram-se totalmente dissolvidos, com grande parte do carbono em solução sólida na martensita (HOYLE, 1988). Sua presença na matriz austenítica garante elevada temperabilidade, e no aço ABNT M2 está presente em teores de 4%, resultando na formação de 9% (em volume) de carbonetos $M_{23}C_6$ no estado recozido.

Já o vanádio é o elemento formador de carbonetos do tipo MC (sua fórmula é no entanto mais próxima de M_4C_3), que apresentam elevada dureza (o que favorece a resistência a abrasão) e estabilidade, fato este que os habilita a restringir o crescimento de grão por dificultar a movimentação dos contornos. Aumentos no teor de vanádio, em conjunto com aumentos no teor de carbono, causam maior estabilidade da austenita retida, tanto no estado temperado como no recozido. No aço ABNT M2, o teor de vanádio é próximo de 2%, levando a formação de 3% de carbonetos MC no estado recozido, que se reduz a 2% quando temperado (HOYLE, 1988).

De presença obrigatória, o carbono deve ser suficiente para permitir a formação de carbonetos primários (responsáveis pela resistência ao desgaste e abrasão) e de uma matriz de elevada dureza após têmpera (BAYER e WALTON, 1990). O aumento no teor de carbono provoca aumento no pico de dureza secundária, na estabilidade térmica, e na quantidade de austenita retida; diminuição da temperatura das linhas *liquidus* e *solidus* (obrigando a redução na temperatura de austenitização do aço), da forjabilidade do aço e da tenacidade, além de contribuir para o refino de grão por aumentar a quantidade de carbonetos insolúveis, desde que o aumento do teor de carbono seja acompanhado por elevação nos teores de elementos fortes formadores de carbonetos, como o vanádio. O teor de carbono no aço ABNT M2 é de aproximadamente 0,8% (ROBERTS e CARY, 1980).

Revenimento de aços rápidos. Durante o revenimento, várias transformações ocorrem, conforme a revisão de CESCÓN (1990) No estado temperado, encontra-se como microconstituintes dos aços rápidos martensita (do tipo misto, ou seja, mistura de martensita escorregada e maclada), austenita retida (até 10% em volume) e carbonetos não dissolvidos no aquecimento (particularmente os do tipo M_6C e MC , ocupando aproximadamente 10% em volume). Entre 100 e 250°C ocorre precipitação de carbonetos de ferro, usualmente identificados como carboneto ϵ ; entre 250 e 500°C, a precipitação de carbonetos de ferro continua, havendo também a formação de cementita. A precipitação de carbonetos na austenita retida se inicia acima de 300-350°C; a quantidade de austenita retida se mantém até aproximadamente 530°C, e transforma-se em martensita no resfriamento subsequente. Contudo, entre 400 e 570°C a cementita é em parte dissolvida, havendo a precipitação de carbonetos do tipo M_2C e MC , tanto na estrutura de discordâncias herdada da martensita quanto na austenita retida. O fenômeno de dureza secundária, todavia, se manifesta de maneira mais acentuada na faixa dos 500 aos 570°C, onde ocorre maior precipitação de carbonetos dos elementos de liga, coerentes de início, preferencialmente na estrutura de discordâncias herdada da martensita (a estrutura cristalina predominante, agora, é cúbica de corpo centrado, uma vez que não há mais carbono em supersaturação, devido à precipitação de carbonetos). Considerando a pequena velocidade de difusão dos elementos de liga substitucionais, os precipitados encontram-se finamente dispersos e apresentam-se menores que os precipitados de cementita. Na faixa de 570 a 680°C, a matriz, agora ferrítica, empobrece-se ainda mais em elementos de liga, havendo também o coalescimento

dos carbonetos. Entre 680 e 760°C, o processo descrito acima continua, ocorrendo também a precipitação de carbonetos estáveis M_6C . Acima dos 760°C prossegue o coalescimento dos carbonetos, de maneira semelhante a que ocorre durante o recozimento destas ligas.

No resfriamento subsequente ao revenimento parte da austenita, condicionada pelas reações que ocorreram durante o revenimento, transforma-se em martensita. Assim, novo ciclo se faz necessário com o intuito de revenir a martensita então formada (chamada de martensita secundária). Como a quantidade de austenita retida após o primeiro ciclo de revenimento geralmente é alta, ter-se-á após o segundo ciclo quantidade apreciável de martensita não revenida (chamada agora de terciária). Tal fato levará a execução de novo ciclo de revenimento (ASM, 1991). Todavia, o revenimento duplo na maioria dos casos é satisfatório no condicionamento da estrutura.

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O aço em estudo apresenta a composição química dada pela Tabela 1, e foi fornecido na forma de barra de seção quadrada de 12,7 mm de espessura. Da barra foram retiradas 26 amostras de formato cúbico, que foram submetidas a diferentes tratamentos térmicos de têmpera e revenimento, para avaliar a influência destes parâmetros na dureza e microestrutura. Na Figura 1 tem-se a microestrutura do aço ABNT M2 recozido, mostrando grande quantidade de carbonetos em matriz ferrítica.

Foram executados tratamentos térmicos de austenitização em forno tubular, sob vácuo, em temperaturas variando de 900°C a 1220°C, por tempos de até 30 minutos, seguidos de têmpera em óleo. Revenimento seguiu-se a têmpera em temperaturas de 250°C a 700°C, por tempos variando de 1 hora a 120 horas, no mesmo forno tubular, sob vácuo.

As amostras foram caracterizadas por microscopia óptica e medições de dureza *Vickers* e *Rockwell*, escala C.

Tabela 1. Composição química do aço ABNT M2 em estudo.

Elemento	C	Cr	Mo	W	V
% em peso	0,84	4,32	5,20	6,36	1,85

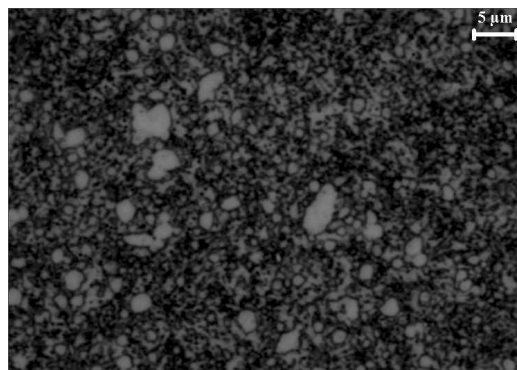


Figura 1. Microestrutura do aço ABNT M2 recozido. Carbonetos em matriz ferrítica. Nital 5%

3. RESULTADOS EXPERIMENTAIS E DISCUSSÃO

Nas Figuras 2 a 7 encontram-se as microestruturas características após o tratamento de austenitização e têmpera em óleo, e nas Figuras 8 e 9 encontram-se os valores de dureza obtidos. Nas Figuras 10 a 12 estão representadas as microestruturas após têmpera e revenimento, em função do tempo e temperatura de revenimento, e os valores de dureza, estão graficamente representados nas Figuras 13 e 14.

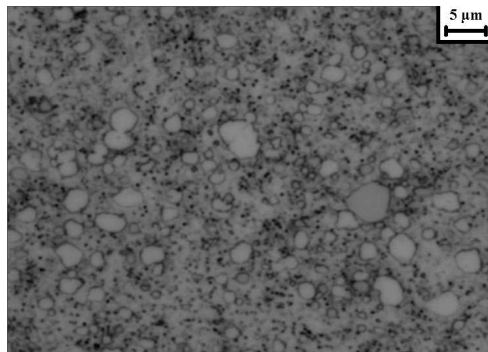


Figura 2. Microestrutura do aço ABNT M2 austenitizado a 900°C por 5 minutos e temperado em óleo. Carbonetos em matriz de martensita e austenita retida. Nital 5%

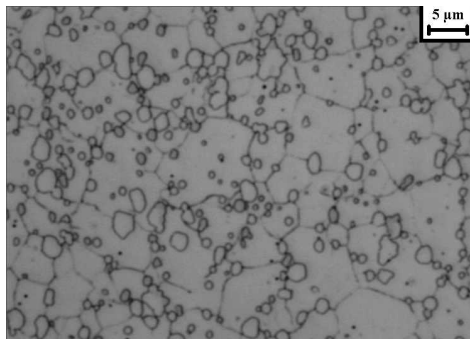


Figura 3. Microestrutura do aço ABNT M2 austenitizado a 1100°C por 5 minutos e temperado em óleo. Carbonetos em matriz de martensita e austenita retida. Notam-se os antigos contornos de grão da austenita. Nital 5%

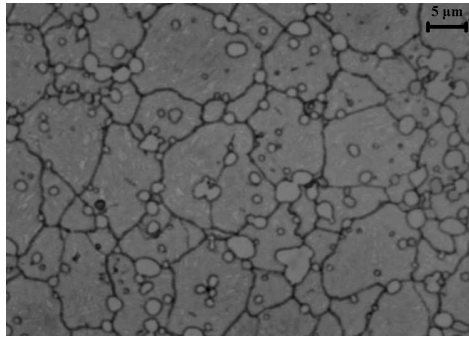


Figura 4. Microestrutura do aço ABNT M2 austenitizado a 1175°C por 5 minutos e temperado em óleo. Carbonetos em matriz de martensita e austenita retida. Notam-se os antigos contornos de grão da austenita. Nital 5%.

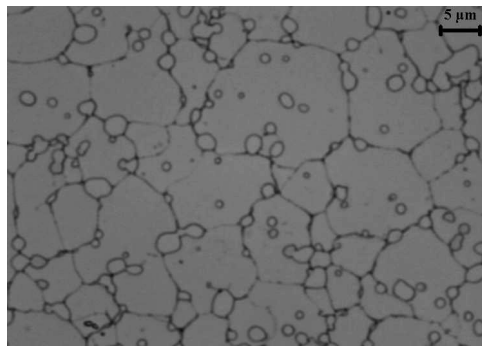


Figura 5. Microestrutura do aço ABNT M2 austenitizado a 1175°C por 30 minutos e temperado em óleo. Carbonetos em matriz de martensita e austenita retida. Notam-se os antigos contornos de grão da austenita. Nital 5%.

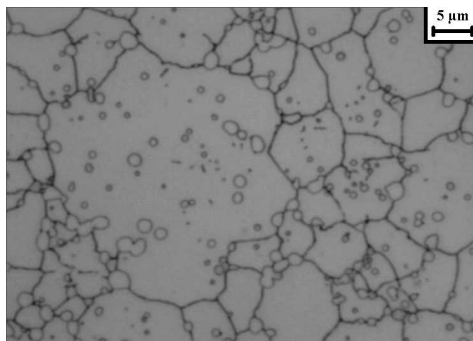


Figura 6. Microestrutura do aço ABNT M2 austenitizado a 1220°C por 5 minutos e temperado em óleo. Carbonetos em matriz de martensita e austenita retida. Notam-se os antigos contornos de grão da austenita. Observa-se ainda crescimento anormal de grãos. Nital 5%.

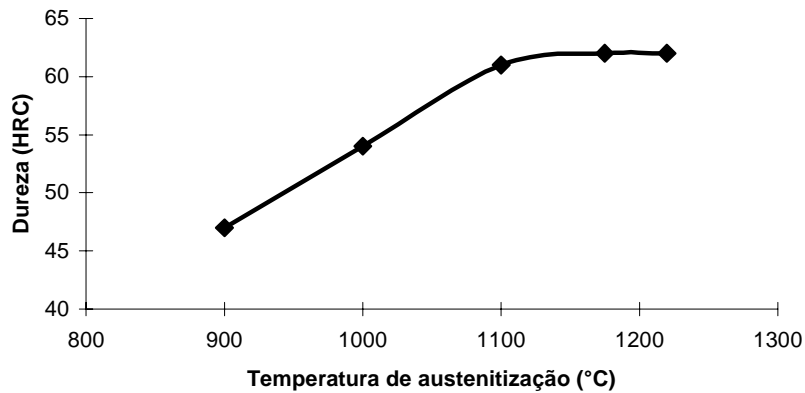


Figura 7. Dureza de amostras temperadas em óleo, em função da temperatura de austenitização por 5 minutos.

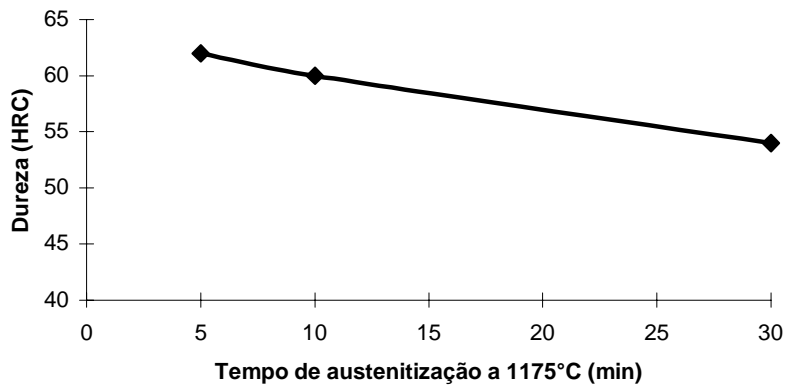


Figura 8. Dureza de amostras temperadas em óleo, em função do tempo de austenitização a 1175°C.

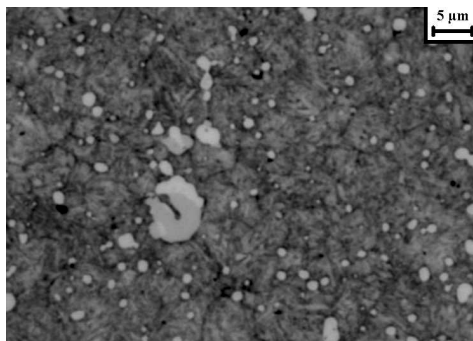


Figura 9. Microestrutura do aço ABNT M2 austenitizado a 1175°C por 5 minutos, temperado em óleo e revenido a 550°C por 2,5 horas. Carbonetos não dissolvidos durante a austenitização em matriz de martensita revenida (carbonetos precipitados em matriz metálica de estrutura CCC, não visíveis). Nital 5%

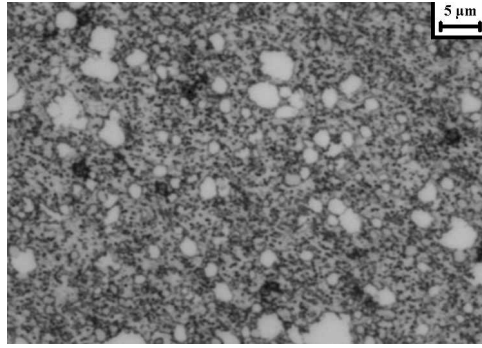


Figura 10. Microestrutura do aço ABNT M2 austenitizado a 1175°C por 5 minutos, temperado em óleo e revenido a 650°C por 120 horas. Carbonetos não dissolvidos em matriz de martensita revenida (carbonetos precipitados em matriz metálica de estrutura CCC, não visíveis). Nital 5%

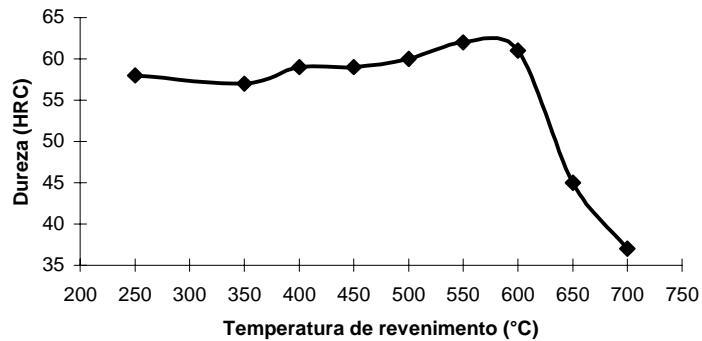


Figura 11. Dureza de amostras temperadas em óleo e revenidas por 2,5 horas, em função da temperatura de revenimento.

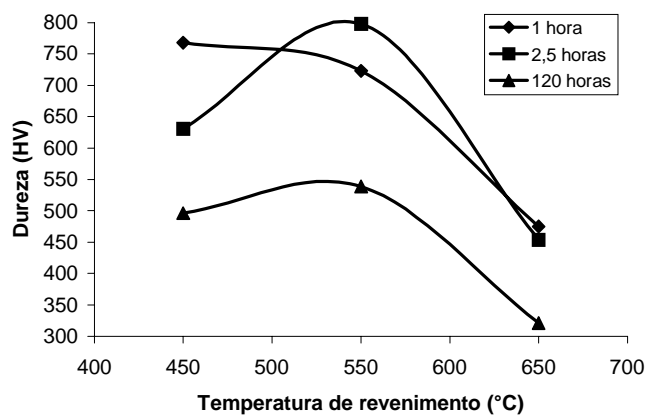


Figura 12. Dureza de amostras temperadas em óleo e revenidas, em função da temperatura e do tempo de revenimento.

Como pode ser observado na Fig. 7, a dureza máxima após têmpera é obtida quando a austenitização se dá a 1175°C, onde a estrutura é formada por carbonetos não dissolvidos em

matriz de martensita e austenita retida (Fig. 4). Estrutura semelhante é observada na Fig. 3; contudo, a menor dissolução de carbonetos leva a menor teor de carbono na martensita, o que impossibilita a obtenção de dureza tão alta como na austenitização a 1175°C. Através da Fig. 2 pode-se perceber que a temperatura de 900°C não é suficiente para a correta formação de austenita e a dissolução da fração ideal de carbonetos, resultando em estruturas de pouca dureza. O mesmo resultado foi obtido da têmpera a partir de 1000°C.

Apesar da dureza obtida após austenitização a 1220°C e têmpera assemelhar-se à da amostra tratada a 1175°C, como mostra a Fig. 7, é claro o aumento do tamanho de grão (inclusive com crescimento anormal destes) e da fração volumétrica de carbonetos dissolvidos (Fig. 6), o que leva a maior fragilidade e perda na resistência a abrasão. O mesmo ocorre com as amostras austenitizadas a 1175°C por tempos superiores a 5 minutos (Fig. 5), levando até mesmo a reduções drásticas de dureza como as mostradas na Fig. 8.

Através da Fig. 11 pode-se descrever todas as etapas de revenimento do aço rápido ABNT M2. Até 350°C há redução de dureza pela pouca eficiência da precipitação de carbonetos de ferro em provocar endurecimento. A partir de 400°C, no entanto, a dureza começa a aumentar como resultado da precipitação de carbonetos do tipo M_2C e MC onde M é tungstênio ou molibdênio, atingindo valores máximos a 550°C. À medida em que se eleva a temperatura de revenimento há o aumento do tamanho médio dos precipitados, com conseqüente diminuição de dureza. O máximo de dureza obtido pela precipitação de carbonetos durante o revenimento, chamado de endurecimento secundário, é melhor detalhado na Fig. 12, onde se verifica que o melhor ajuste para as variáveis de revenimento se dá a 550°C por 2,5 horas.

Diferenças após o revenimento só podem ser constatadas por microscopia óptica após elevados tempos e temperaturas de revenimento. Nota-se claramente a inexistência de diferenças significativas entre as amostras revenidas a 450°C por 1 hora e a 550°C por 2,5 horas (Fig. 9), enquanto que a amostra revenida a 650°C por 120 horas (Fig. 10) assemelha-se a amostra recozida (Fig. 1).

4. CONCLUSÕES

- (1) A dureza máxima após têmpera é obtida quando a austenitização se dá a 1175°C por 5 minutos.
- (2) Austenitização a temperaturas de 900°C e 1000°C não são suficientes para a correta formação de austenita e a dissolução da fração ideal de carbonetos, resultando em estruturas de dureza inferior a 55 HRC.
- (3) Austenitização a 1220°C, ou por tempos superiores a 5 minutos, leva a aumento do tamanho de grão (inclusive com crescimento anormal destes) e da fração volumétrica de carbonetos dissolvidos.
- (4) O máximo de dureza obtido pela precipitação de carbonetos durante o revenimento, chamado de endurecimento secundário, se dá a 550°C por 2,5 horas.
- (5) Diferenças após o revenimento só podem ser constatadas por microscopia óptica após elevados tempos e temperaturas de revenimento.

REFERÊNCIAS

- HOYLE, G. *High speed steels*. London : Butterworth & Co, 1988.
- ROBERTS, G.A.; CARY, R. A. *Tool steels*. Metals Park : ASM, 4. ed., 1980, p.627-772.
- BAYER, A. M.; WALTON, L. R. *Wrought tool steels*. IN: ASM Handbook Metals Park : ASM, 1990. v. 1 p. 757-79.
- CESCON, T. *Desenvolvimento e caracterização de aço rápido contendo nióbio a partir da matriz do aço M2*. 237p. Tese (Doutorado em engenharia) - Departamento de Engenharia Metalúrgica, Universidade de São Paulo, 1990.
- Heat treating of specific classes of tool steels*. IN: ASM Handbook Metals Park : ASM, 1991. v. 4 p. 734-60.

ABNT M2 HIGH SPEED STEEL HEAT TREATMENT.

Abstract. *This paper describes the austenitizing and tempering conditions influence in ABNT M2 microstructure and hardness. The austenitization temperatures used changed from 900°C to 1200°C for periods up to 30 minutes; at tempering, temperature was changed between 250°C and 700°C, for periods up to 120 hours. It was found that maximum hardness is achieved when austenitization were conducted at 1175°C for 5 minutes, and austenitization at 900°C and 1000°C are not sufficient to give the correct austenite formation and carbide dissolution, giving structures of low hardness. Austenitizing at 1220°C, or for time periods bigger than 5 minutes, results in excessive grain growing and the lowest undissolved carbide fraction, resulting in higher britleness and poor abrasion resistance. In tempering, the maximum hardness resulting from carbide precipitation (called secondary hardening) occurs at 550°C for 2,5 hours, and microstructure differences could only be observed with optical microscopy after the highest time and temperature used.*

Key words: *high speed steel, ABNT M2, heat treatment.*