

TRATAMENTO TÉRMICO DE UM AÇO 4340 PARA APLICAÇÃO EM MATERIAL BÉLICO ¹

*Augusto Cezar Gomes dos Santos*²

*Ricardo Pondé Weber*³

*João Carlos Miguez Suarez*⁴

Resumo

A tendência atual nos projetos de materiais de emprego militar (MEM) está direcionada para uma melhor relação desempenho/peso. O aço, que tem, em relação aos materiais cerâmicos e poliméricos, uma menor resistência específica é, ainda, o material mais utilizado na indústria de material bélico. O objetivo do presente trabalho foi determinar as condições de tratamento térmico de um aço 4340 para aplicação em MEM, em especial, tubos de canhões. Neste estudo amostras de um aço SAE 4340, de fabricação nacional, após têmpera e revenido em diversas temperaturas de tratamento, foram avaliadas por meio de exame metalográfico empregando-se microscopia eletrônica de varredura e ensaio de dureza Rockwell. Os resultados dos ensaios mostraram que o comportamento mecânico do aço é influenciado pelas condições de tratamento térmico e que a variação nas propriedades mecânicas depende da microestrutura do aço.

Palavras-chave: Tratamento térmico; Aço 4340; Aço de baixa liga; Tubos para canhões.

HEAT TREATING OF 4340 STEEL FOR ORDNANCE APPLICATION

Abstract

The actual tendency in the design of materials for military use is directed for a better performance / weight ratio. The steel, which has, in relation to the ceramic and polymeric materials, a lower specific resistance is, yet, the more used material in the ordnance industry. The objective of present work was to determine the heat treating conditions of 4340 steel for a military application, especially gun tubes. In this study samples of SAE 4340 steel, Brazilian production, quenched and tempering from several treating temperatures were evaluated by metallographic exam using scanning electron microscopy and Rockwell hardness test. The tests results showed that the mechanical behavior of the steel is influenced by the heat treating conditions and that the mechanical properties are depended of the steel microstructures.

Keywords: Heat treating; 4340 steel; Low alloy steel; Gun tubes.

¹ *Contribuição técnica ao 62º Congresso Anual da ABM – Internacional, 23 a 27 de julho de 2007, Vitória – ES, Brasil.*

² *Aluno do Curso de Engenharia de Materiais, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, RJ.*

³ *Engenheiro, Mestre em Ciências, Professor, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, RJ.*

⁴ *Sócio da ABM, Engenheiro e Doutor em Ciências, Professor Emérito, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, RJ.*

1 INTRODUÇÃO

O conceito “materiais de emprego militar” (MEM) inclui todos os equipamentos e componentes militares, tais como, viaturas (carros de combate e veículos operacionais), armamento pesado (canhões e foguetes), armamento leve (revolveres, pistolas e metralhadoras), munições diversas, equipamentos de engenharia e de comunicações etc., compreendendo uma grande variedade de materiais que tem diferentes funções e propriedades específicas. Em consequência, o campo dos materiais empregados na produção de MEM é muito vasto, pois, dependendo do emprego e do desempenho desejados, engloba materiais metálicos, não-metálicos (cerâmicos e polímeros) e compósitos.^[1-4]

A tendência atual nos projetos de MEM está direcionada para uma melhor relação desempenho/peso, observando-se que materiais não-metálicos vêm substituindo, com sucesso, diversos materiais metálicos, pois, em face de suas menores densidades, apresentam uma melhor resistência específica.^[5] Todavia, o aço é, ainda, o material mais utilizado na indústria de material bélico e diversos tipos de aços têm sido empregados na produção de equipamentos militares.

Os canhões, cuja parte mais crítica é o tubo, é um dos equipamentos militares que emprega grande quantidade de aço. Os tubos de canhões mais antigos, que foram projetados para menores pressões, são fabricados com aços de média resistência e boa tenacidade na fratura, enquanto que, nos projetos mais modernos, os canhões trabalham sob pressões e temperaturas mais altas, exigindo que os tubos sejam produzidos com aços de elevada resistência mecânica, com a consequente redução na tenacidade e na vida em fadiga. Assim, a obtenção de tubos com estrutura uniforme e propriedades adequadas exige o uso de aços de alta temperabilidade, com um baixo nível de impurezas obtido por processos de refino, em especial refino sob escória condutora (ESR) e, normalmente, uma microestrutura de martensita revenida com pequenas proporções de bainita.^[6-9] Adicionalmente, os aços para a fabricação de tubos de canhões devem apresentar, também, além de alta resistência mecânica e boa tenacidade, uma adequada resistência ao desgaste.^[10-12] Em consequência, os tubos para canhões são fabricados por usinagem mecânica a partir de forjados de aços de alta ou ultra-alta resistência tratados termicamente (têmpera e revenido) e são especificados por meio de valores de dureza e de tenacidade.^[13]

O presente trabalho objetiva analisar quais são as condições mais adequadas de tratamento térmico para a fabricação de tubos de canhões empregando-se um aço 4340 de fabricação nacional.

2 MATERIAL E MÉTODOS

O material estudado foi um aço de alta resistência e baixa liga tipo SAE 4340 fabricado em forno elétrico e cuja composição está apresentada na Tabela 1. O aço foi recebido sob a forma de uma barra de seção redonda com 112 mm de diâmetro, forjada e tratada termicamente pela empresa Açoforja Indústria de Forjados S.A. (São Paulo, SP) e fornecida pelo Centro Tecnológico do Exército (CTEx).

Tabela 1 - Composição química do aço SAE 4340 “como recebido”

Elemento	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	Cu	Al	P	S
%	0,40	0,68	0,22	0,78	1,70	0,23	0,20	0,025	0,016	0,009

A barra “como recebida” foi dividida em discos cilíndricos com 20 mm de espessura que, por sua vez, foram subdivididos em corpos de prova para a realização do trabalho. A Figura 1 apresenta de uma maneira esquemática o plano de cortes realizado, onde se verifica que cada disco foi cortado ao meio e que cada metade foi, posteriormente, dividida em 6 corpos de prova.

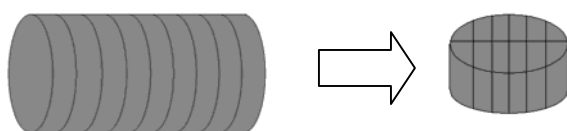


Figura 1 - Esquema de corte do material “como recebido”

Os corpos de prova “como recebido” foram normalizados a 1143K (870°C) com resfriamento ao ar até a temperatura ambiente, seguido de um duplo alívio de tensões a 853K (580°C) e a 813K (540°C), com resfriamento ao ar.

Os corpos de prova normalizados foram submetidos a tratamento térmico de têmpera e revenido, sendo utilizadas 3 (três) temperaturas de austenização, 1113K (840°C), 1143K (870°C) e 1173K (900°C), com resfriamento em óleo, e, para cada temperatura de têmpera, 4 (quatro) duplo revenimentos nos seguintes pares de temperaturas, 423K-473K (150°C-200°C), 523K-573K (250°C-300°C), 813K-853K (540°C-580°C) e 923K-973K (650°C-700°C), com resfriamento ao ar. A Figura 2 apresenta o esquema das temperaturas de têmpera e revenido utilizadas, tendo sido tratados 7 corpos de prova em cada combinação de tratamentos (têmpera e revenido). As temperaturas de tratamento foram selecionadas procurando-se evitar a faixa de temperaturas onde pode ocorrer fragilidade do revenido no aço 4340.^[10]

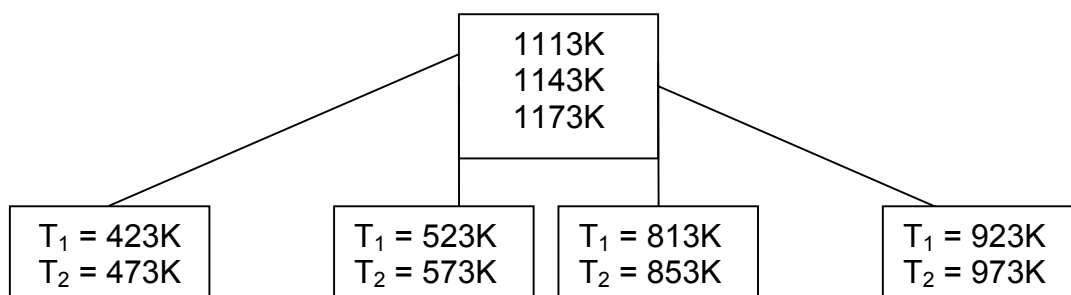


Figura 2 - Esquema das temperaturas de têmpera e revenido utilizadas

O material, antes e após os tratamentos térmicos, foi caracterizado por meio de exame metalográfico, macroscópico e microscópico, e por ensaio de dureza Rockwell, conforme o seguinte:

- a) **Exame macroscópico:** a seção transversal da barra de aço “como recebido” foi, após lixamento e ataque com uma solução de ácido nítrico a 25% em álcool etílico (Nital 25), examinada macroscopicamente.
- b) **Exame microscópico:** os corpos de prova tratados termicamente, após polimento e ataque com uma solução de ácido nítrico a 2% em álcool etílico (Nital 2), foram examinados em um microscópio eletrônico de varredura (MEV) marca JEOL modelo JSM 5800LV, procurando-se caracterizar a microestrutura obtida em cada tratamento térmico.

- c) **Ensaio de dureza Rockwell:** foi realizado, antes e após os tratamentos térmicos, segundo a norma ASTM E18 na escala C (120kg e cone de diamante).^[14] No ensaio foi empregado um durômetro marca Pantec, modelo RBS, tendo sido determinado o seguinte:
- 1) o perfil de dureza ao longo da seção transversal do aço “como recebido”;
 - 2) a dureza do aço após cada tratamento térmico. Foram feitas, no mínimo, 04 (quatro) impressões de dureza em cada corpo de prova, tendo sido calculado, por tratamento, um valor médio de dureza.

3 RESULTADOS

Exame Macroscópico

A Figura 3 mostra uma macrofotografia típica da seção transversal da barra de aço 4340 “como recebido”.

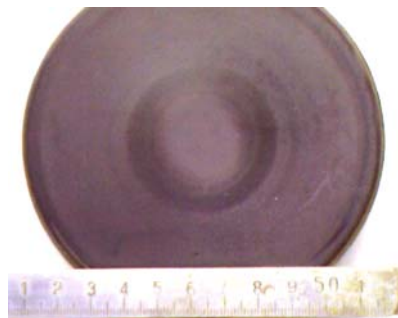


Figura 3 - Macrofotografia da seção transversal da barra de aço 4340 “como recebido”, após ataque químico com Nital 25

Verifica-se que o material apresenta um aspecto heterogêneo, com a ocorrência de regiões circulares mais escuras, principalmente na parte central da barra. Este aspecto indica, provavelmente, que a barra foi obtida a partir de um lingote de seção circular e que a redução obtida na operação de forjamento não foi suficiente para se eliminar completamente a estrutura original do material fundido. Adicionalmente, pode-se supor que na região central possa existir certa concentração de impurezas. Esta heterogeneidade sugere que a barra de aço 4340 pode estar apresentando diferentes microestruturas e propriedades mecânicas, o que poderá comprometer o comportamento em serviço do componente a ser fabricado com este material.

Exame Microscópico

A Figura 4 mostra microfotografias típicas, por MEV, do aço 4340. Verifica-se que o aço apresenta uma estrutura predominantemente martensítica, que se torna mais grosseira com o aumento da temperatura de austenitização. Observa-se, ainda, que no aço temperado a partir das maiores temperaturas de austenitização aparecem regiões mais escuras que podem ser atribuídas a ocorrência de austenita retida. A obtenção de uma estrutura 100% martensítica exige que o aço seja resfriado com certa velocidade crítica que depende de diversos parâmetros de tratamento. Assim, considerando a curva TTT do aço 4340 onde as temperaturas de início e fim de formação da bainita, B_i e B_f , estão localizadas acima da temperatura ambiente, pode-se supor que a velocidade de resfriamento empregada não foi suficiente para a obtenção de uma têmpera completa devido ao aumento da temperatura de austenitização.^[15]

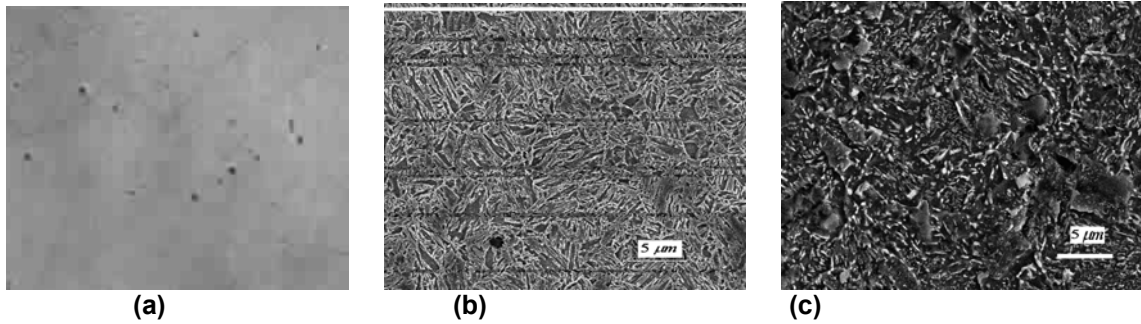


Figura 4 - Microfotografias típicas, por MEV, do aço 4340: (a) “como recebido” sem ataque químico (aumento original: 100x); (b) “como recebido” com ataque de Nital 2; (c) normalizado com ataque de Nital 2

Verifica-se que o aço apresenta inclusões globulares, tipo óxidos, distribuídas ao longo do material (Figura 4a). O aço “como recebido” apresenta uma microestrutura de martensita revenida (Figura 4b), enquanto que o aço normalizado (Figura 4c) é predominantemente bainítico.

Na Figura 5 estão mostradas microfotografias típicas do aço 4340, após têmpera a partir das diferentes temperaturas de austenitização.

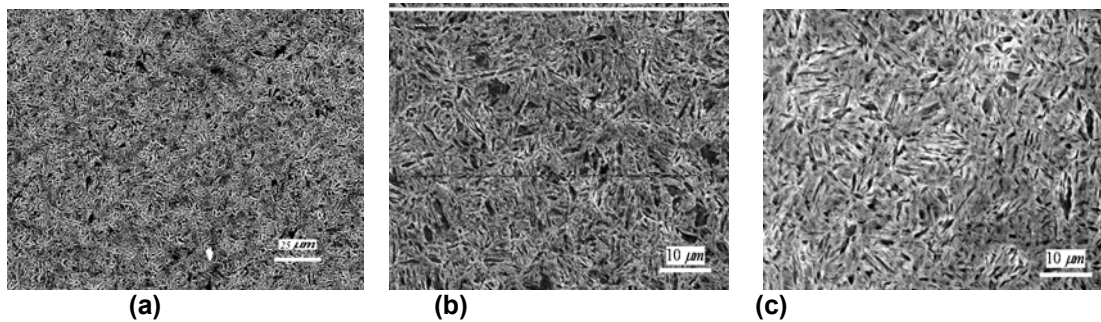


Figura 5 - Microfotografias típicas, por MEV, do aço 4340 temperado em diferentes temperaturas de austenitização, com ataque de Nital 2: (a) 1113K (840°C); (b) 1143K (870°C); (c) 1173K (900°C)

Nas Figuras 6 a 8 estão mostradas microfotografias típicas do aço 4340 após revenido e conforme a temperatura de têmpera (austenitização) empregada. A análise microscópica permite detectar as mudanças microestruturais ocorridas no aço 4340 temperado pelo emprego de crescentes temperaturas de revenimento. O material, independentemente da temperatura de revenimento, apresentou uma estrutura característica de martensita revenida com variações no aspecto típico resultantes do aumento da temperatura de tratamento.

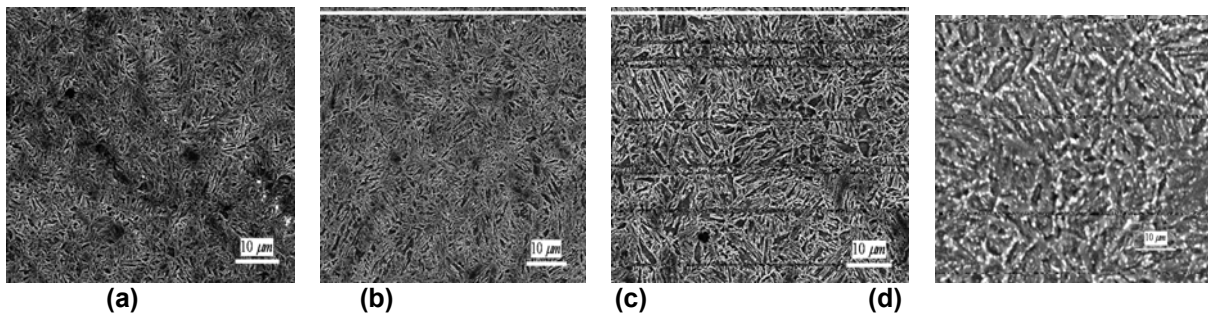


Figura 6 - Microfotografias típicas, por MEV, com ataque químico de Nital 2, do aço 4340 temperado de 1113K e revenido em: (a) 423K-473K (150°C-200°C); (b) 523K-573K (250°C-300°C); (c) 813K-853K(540°C-580°C); (d) 923K-973K (650°C-700°C)

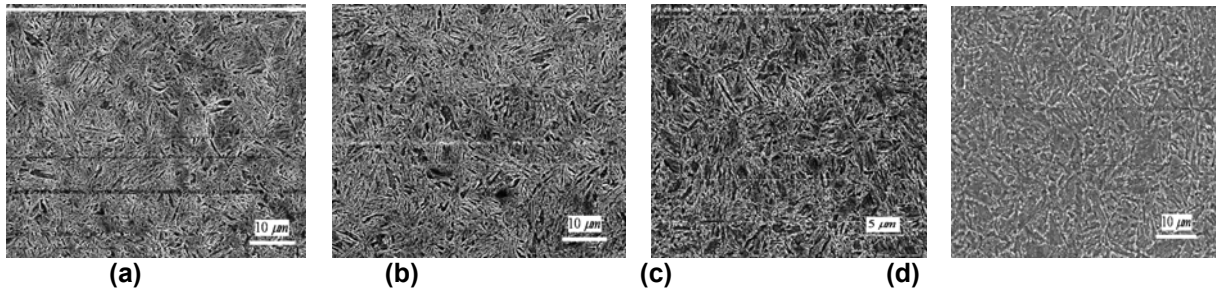


Figura 7 - Microfotografias típicas, por MEV, com ataque químico de Nital 2, do aço 4340 temperado em 1143K e revenido em: (a) 423K-473K (150°C-200°C); (b) 523K-573K (250°C-300°C); (c) 813K-853K(540°C-580°C); (d) 923K-973K (650°C-700°C)

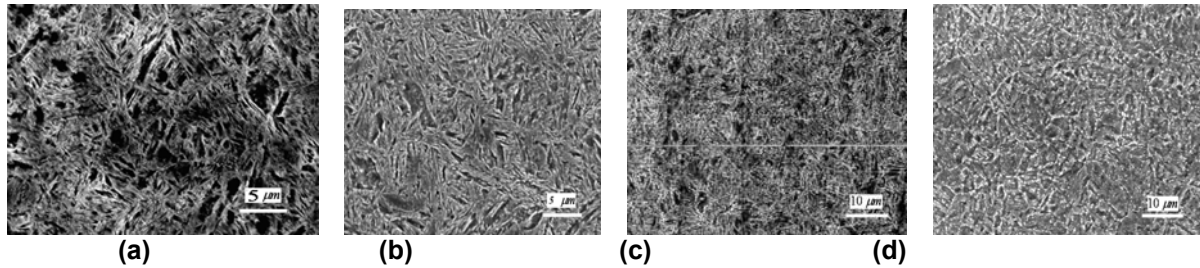


Figura 8 - Microfotografias típicas, por MEV, com ataque químico de Nital 2, do aço 4340 temperado em 1173K e revenido em: (a) 423K-473K (150°C-200°C); (b) 523K-573K (250°C-300°C); (c) 813K-853K(540°C-580°C); (d) 923K-973K (650°C-700°C)

Após o revenido realizado na menor faixa de temperaturas, 423K-473K (150°C-200°C), observa-se que o aço apresenta um aspecto microestrutural bastante semelhante ao do material somente temperado, mostrando que, praticamente, não ocorrem transformações neste nível de temperaturas. Na faixa de 523K-573K (250°C-300°C) a austenita retida se transforma em martensita revenida tornando a microestrutura bem mais homogênea. Aumentando-se a temperatura para 813K-853K (540°C-580°C) pode-se identificar, no entorno das áreas de martensita revenida, regiões mais escuras com diferentes tonalidades, que podem ser atribuídas a formação de uma rede de bainita, ferrita e cementita. No revenido a 923K-973K (650°C-700°C) tem início o processo de esferoidização da cementita; as menores partículas se dissolvem na matriz fornecendo carbono para um crescimento seletivo de partículas maiores, conforme indicado pela ocorrência de uma pequena quantidade de carbonetos precipitados na matriz de martensita revenida.

Ensaio de Dureza Rockwell

A Figura 9 mostra a variação da dureza no aço 4340, antes e após os tratamentos térmicos.

A Figura 9a apresenta o perfil de dureza determinado na seção transversal da barra de aço “como recebido”, podendo-se observar que a dureza varia entre 46R_C e 42R_C. A parte central da barra apresenta, em relação à região superficial, uma menor dureza, cerca de 8%, que pode ser atribuída a uma variação na microestrutura conforme sugerido pelo resultado do exame macroscópico. Todavia, esta possível variação de propriedades não deverá influenciar o desempenho futuro dos tubos de canhão, pois, na fabricação dos mesmos, a parte central da barra é extraída por furação profunda.

Na Figura 9b, onde estão mostrados os valores de dureza dos corpos de prova após os tratamentos térmicos de têmpera e revenido, pode-se observar que a dureza do aço 4340 é influenciada pelas temperaturas de austenização e de revenido.

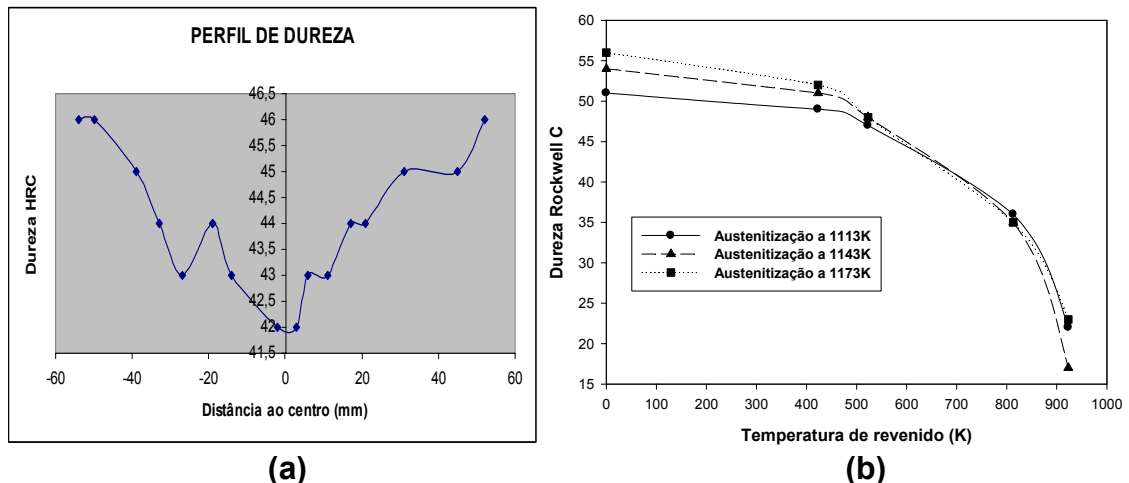


Figura 9 - Variação da dureza Rockwell C na barra de aço 4340: (a) seção transversal do aço “como recebido”; (b) após tratamento térmico.

Observação: temperatura de revenido 0 (zero) = material somente temperado)

Tendo em vista os resultados do ensaio de dureza e considerando que nos aços existe uma correlação direta entre a resistência mecânica e a dureza, pode-se afirmar que o aço 4340 temperado a partir da mais alta temperatura de austenitização (1173 K) deve apresentar a maior resistência mecânica. Todavia, nesta faixa de dureza, o aço apresenta menores valores de plasticidade e de tenacidade, quando avaliados, respectivamente, por meio do alongamento em tração e da resistência ao impacto.^[16]

Verifica-se que o revenido do aço nas temperaturas de 523K-573K (250°C-300°C) e 813K-853K (540°C-580°C), independentemente da temperatura de austenitização empregada na têmpera, produz no aço, do ponto de vista prático, os mesmos valores de dureza. Observa-se, ainda, que acontece uma queda acentuada no valor da dureza do aço 4340 após revenimento nas temperaturas mais altas ($T \geq \sim 600\text{K}$), mostrando que o comportamento mecânico do material é bastante sensível ao aumento da temperatura de tratamento.

As microestruturas observadas no exame micrográfico são as esperadas serem encontradas em um aço de alta temperabilidade. Os resultados do ensaio de dureza mostram uma boa correlação com os dados disponíveis na literatura para o aço SAE 4340 e estão consistentes com as microestruturas resultantes dos tratamentos térmicos aplicados.^[17-20]

4 CONCLUSÕES

A microestrutura do aço 4340 varia com as condições de tratamento térmico e a morfologia resultante é determinante para a obtenção das melhores propriedades para a aplicação desejada. A partir dos resultados dos ensaios podem ser apresentadas as seguintes conclusões:

- 1) a dureza final do aço após revenido independe da temperatura de austenitização, na faixa de valores estudados no presente trabalho;
- 2) ocorre uma diminuição na resistência mecânica do aço quando revenido em temperaturas mais elevadas;
- 3) foi estabelecida uma metodologia para se selecionar o tratamento térmico mais adequado para o aço SAE 4340 em estudo tendo em vista a sua aplicação na fabricação de tubos para canhões; e

- 4) o aço 4340 em estudo, para ser utilizado na fabricação de tubos de canhões, deve ser submetido ao seguinte tratamento térmico: têmpera a partir da temperatura de 1113K (840°C) com resfriamento em óleo e duplo revenimento nas temperaturas de 523K-573K (250°C-300°C) com resfriamento ao ar.

Agradecimentos

Os autores agradecem à FAPERJ, CAPES e CNPq pelo apoio financeiro, ao Centro Tecnológico do Exército (CTEx) pelo fornecimento do material e à Temperação Tratamentos Térmicos Ltda. - Rio pela realização dos tratamentos térmicos do aço.

REFERÊNCIAS

- 1 BEDFORD, A.J.; BARNES, R.C.; WOODWARD, R.L.; WALSH, B.E. Armament materials. *Metals Forum*, v.8, n.4, p. 218-236, 1985.
- 2 MIGUEZ SUAREZ, J.C. Materiais para uso em blindagens de carros de combate e em proteção individual. *Revista Militar de Ciência e Tecnologia*, v.3, n.4, p.46-60, 1986.
- 3 MIGUEZ SUAREZ, J.C. Materiais para emprego na indústria de armamento. *Revista Militar de Ciência e Tecnologia*, v.6, n.1, p.90-96, 1989.
- 4 MIGUEZ SUAREZ, J.C. Materiais metálicos para a indústria bélica. *Metalurgia e Materiais*, v.46, n.386, p.51-58, 1990.
- 5 CHIN, E.S.C. Army focused research team on functionally graded armor composites. *Mater. Sci. Engng.*, v.A259, p.155-161, 1999.
- 6 DMIC Memorandum 239, Fracture toughness of high-strength steels for military applications. Columbus, Ohio: Defense Metals Information Center, Battelle Memorial Institute, 1968.
- 7 RITTER, J.C.; MORTON, M.E. Fracture mechanics of gun barrels. *The Journal of Australasian Institute of Metals*, v.22, n.1, p.51-55, 1977.
- 8 TERRY, T.W.; JACKSON, S.R.; RILEY, C.E.S.; JONES, B.G.; WORMELL, P.J.H. Fighting vehicles. In: *Land Warfare. Brassey's New Battlefield Weapons Systems and Technologies Series*, Vol. 7, 1991.
- 9 ADACHI, J. A survey of fracture design practices for ordnance structures. Monograph Series. Watertown, Massachusetts: Applied Mechanics Research Laboratory, Army Materials and Mechanics Research Center, 1968.
- 10 SAMUELS, L.E.; LAMBORN, I.R. Failure analysis of armament hardware. In: *Metallography in failures analysis*, ed. by L.L. McCall, International Metallurgical Society, 1978.
- 11 LAWTON, B. Thermo-chemical erosion in gun barrels. *Wear*, v.251, p.827-838, 2001.
- 12 BÉJAR, M.A.; MORENO, E. Abrasive wear resistance of boronized carbon and low-alloy steels. *J. Mater. Processing Tech.*, v.173, p. 352-358, 2006.
- 13 Norma MIL-S-46119 (MR). Gun barrels. Washington, DC: Department of Defense, 1988.
- 14 Norma ASTM E18. Rockwell hardness and Rockwell superficial of metallic materials - Standard test method for. Philadelphia: American Society for Testing and Materials, 1974.
- 15 CHIAVERINI, V. Tratamentos térmicos das ligas ferrosas. São Paulo: Associação Brasileira de Metais, 2ª Edição, 1987.

- 16 CHIAVERINI, V. Aços e ferros fundidos. São Paulo: Associação Brasileira de Metais, 3ª Edição, 1971.
- 17 Atlas of microstructures of industrial alloys. In: Metals Handbook, Volume 7. Metals Park, Ohio: American Society for Metals, 8th Edition, 1972.
- 18 THOMAS, T.S.; ANCTIL, A.A. Characterization of electroslag remelted and ladle refined, electric furnace melted 4340 steel armor. J. Heat Treating, v.4, n.4, p.317-327, 1986.
- 19 Heat treatment. In: Metals Handbook, Volume 4. Central Park, Ohio: American Society for Metals, 9th Edition, 1991.
- 20 TOMITA, Y. Effect of continuous-cooling transformation structure on mechanical properties of 0.4C-Cr-Mo-Ni steel. J. Mater. Sci., v.29, n.6, p.1612-1616, 1994.