

# PROPRIEDADES MAGNÉTICAS DO AÇO SAE 4340 NAS DIFERENTES CONDIÇÕES DE TÊMPERA E REVENIDO<sup>1</sup>

Sérgio Souto Maior Tavares<sup>2</sup>  
Sérgio Ricardo Bastos de Mello<sup>3</sup>  
Sheyla Santana de Carvalho<sup>4</sup>  
Manoel Ribeiro da Silva<sup>5</sup>  
Leiz Nunes Pereira da Silva<sup>6</sup>

## Resumo

As propriedades magnéticas (magnetização de saturação e força coerciva) de um aço SAE 4340 foram medidas em um magnetômetro de amostra vibrante, em diversas condições de tratamento. Quatro temperaturas de encharque foram investigadas: 860°C, 960°C, 1060°C e 1160°C. As amostras temperadas em óleo foram revenidas em diversas temperaturas no intervalo de 200°C a 650°C. O aumento da temperatura de têmpera provoca o decréscimo da magnetização de saturação, o que se deve principalmente ao aumento do teor de austenita retida no aço, a qual se transforma em bainita inferior no revenido entre 200°C e 300°C. A força coerciva do aço variou na faixa de 115 Oe a 133 Oe, dependendo da condição de tratamento.

**Palavras-chave:** Propriedades magnéticas; Austenita retida

## MAGNETIC PROPERTIES OF THE SAE 4340 STEEL TREATED BY QUENCHING AND TEMPERING AT DIFFERENT CONDITION

## Abstract

Magnetic properties (coercive force and magnetization saturation) of an SAE 4340 steel heat treated by different ways were measured in a vibrating sample magnetometer. Four soaking temperatures were investigated: 860°C, 960°C, 1060°C and 1160°C. The oil quenched samples were tempered at different temperatures in the 200°C to 650°C range. The increase of the tempering temperature promotes the decrease of the magnetization saturation, which is mainly due to the retained austenite in the steel. This austenite transforms into bainite during tempering between 200°C and 300°C. The coercive force of the steel varied from 115 Oe to 133 Oe, depending on the heat treatment condition.

**Key-words:** Magnetic properties; Retained austenite

---

<sup>1</sup> Contribuição técnica apresentada na 61º Congresso Anual da ABM, de 24 a 27 de julho de 2006, Rio de Janeiro – RJ

<sup>2</sup> D.Sc., Professor do Departamento de Engenharia Mecânica e do Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da UFF.

<sup>3</sup> Engenheiro Metalúrgico, mestrando do Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da UFF.

<sup>4</sup> M.Sc, Engenheira Mecânica, bolsista do NUTEC / CE.

<sup>5</sup> D.Sc., Professor do Instituto de Ciências da Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI).

<sup>6</sup> Aluno de graduação em engenharia mecânica da Universidade Federal Fluminense

## INTRODUÇÃO

Os materiais magnéticos, em especial as ligas metálicas, se dividem, de forma simplificada, em duros e moles. Os materiais magneticamente duros se caracterizam por um alto valor de força coerciva e indução residual, sendo aplicados em ímãs permanentes. Os materiais magneticamente moles, por outro lado, devem possuir alta permeabilidade, baixos valores de força coerciva e indução residual, o que resulta também em baixas perdas por histerese.

Para certas aplicações, existe uma demanda por materiais de alta resistência mecânica que, contrariando uma certa tendência, sejam magneticamente moles. Pode-se citar, portanto, a investigação das propriedades magnéticas dos aços maraging<sup>(1-2)</sup> temperados e envelhecidos, onde boas propriedades magnéticas são obtidas por têmpera e envelhecimento a 560°C por 1 hora.

O aço SAE 4340 é um aço de boa temperabilidade, que pode alcançar uma excelente combinação de propriedades mecânicas mediante têmpera e revenido. O interesse por suas propriedades magnéticas é motivado por essas boas propriedades mecânicas e pelo baixo custo. Em trabalho recente, Landgraf e colaboradores<sup>(3)</sup> avaliaram o comportamento do aço ABNT 4340 em diversas condições de revenido. Neste trabalho estudamos o comportamento da força coerciva e da magnetização de saturação em função da temperatura de encharque e da temperatura de revenido.

## MÉTODOS EXPERIMENTAIS

Um aço SAE 4340 (composição química mostrada na Tabela 1) foi usinado na forma de cilindros de 3,5 mm de diâmetro para serem temperados. Quatro temperaturas de encharque foram utilizadas: 860°C, 960°C, 1060°C e 1160°C. Em seguida os cilindros foram fatiados em discos de 0,3 mm de espessura por eletroerosão a fio. Os discos foram revenidos por 1 hora em diferentes temperaturas no intervalo de 200°C a 650°C. As medidas magnéticas foram realizadas em um magnetômetro de amostra vibrante com campo máximo de 5kOe (0,5T), tempo total de medida de 20 minutos e constante de tempo de 10 ms.

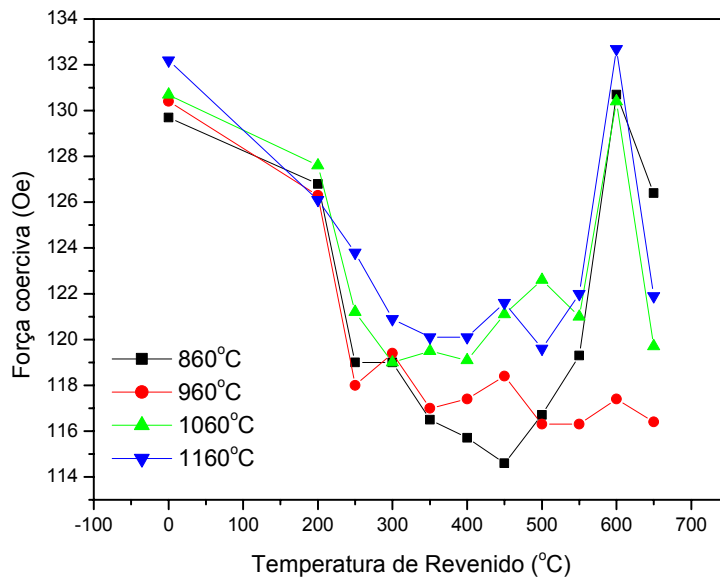
A microestrutura foi analisada por microscopia ótica com amostras preparadas com reagente de nital 2% ou reagente à base de ácido pícrico e cloreto férrico, próprio para revelar o contorno de grão da austenita prévia. Medidas de dureza Vickers e difração de raios de algumas amostras completam o estudo.

**Tabela 1.** Composição química do aço *maraging* estudado.

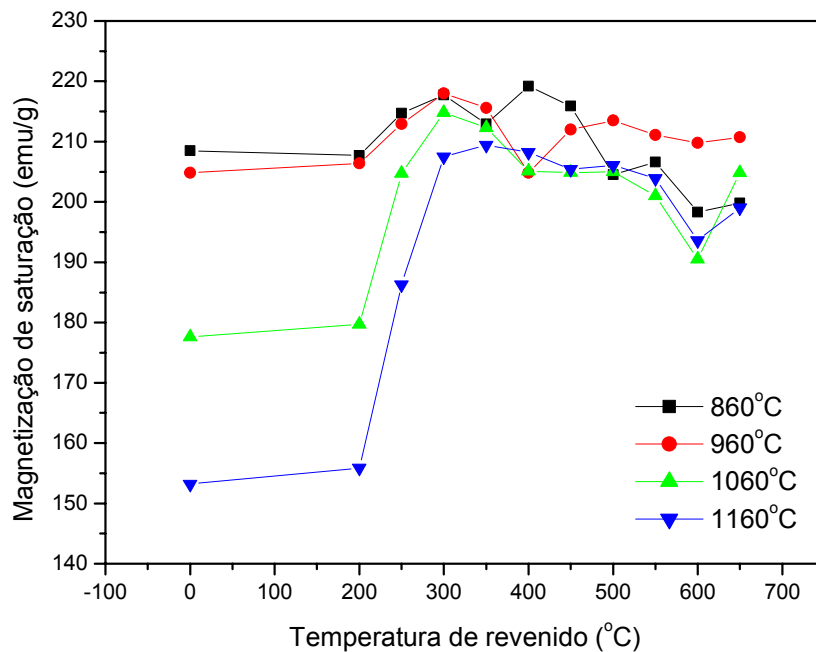
%C	%Si	%Mn	%S	%P	%Cr	%Ni	%Mo
0,410	0,240	0,620	0,016	0,019	0,740	1,670	0,270

## RESULTADOS

As Figuras 1 e 2 apresentam as variações da força coerciva e da magnetização de saturação com a temperatura de revenido para as quatro temperaturas de encharque utilizadas.

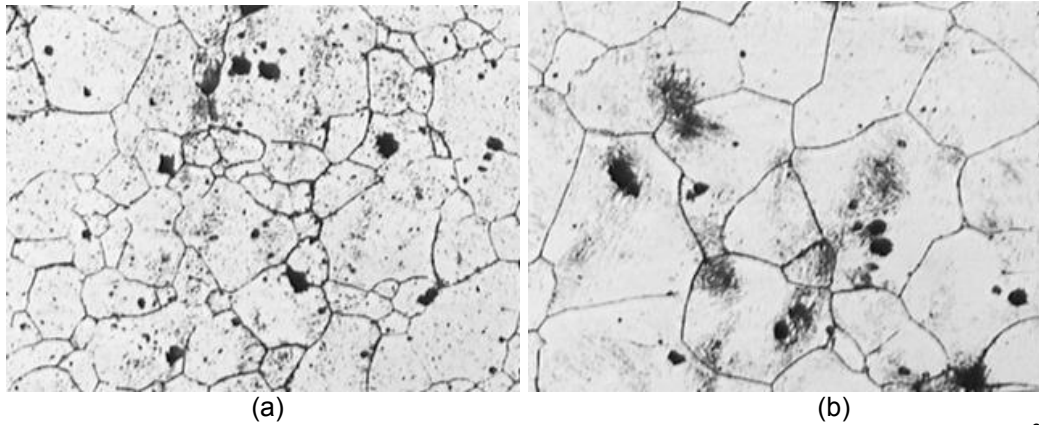


**Figura 1.** Comportamento da força coerciva em função da temperatura de revenido.



**Figura 2.** Comportamento da magnetização de saturação em função da temperatura de revenido.

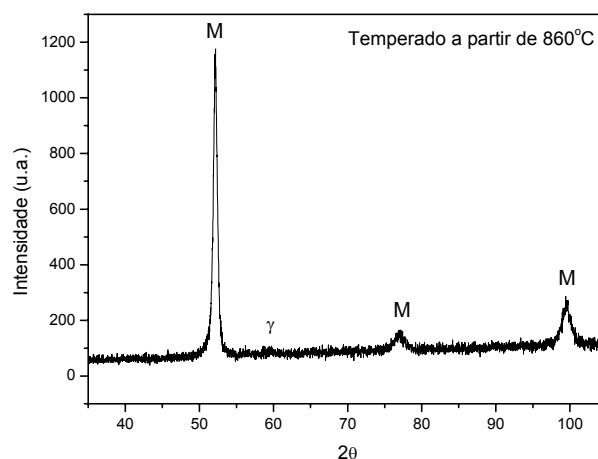
Analisando primeiramente o comportamento da força coerciva ( $H_c$ ), observa-se que nas amostras não revenidas  $H_c$  aumenta suavemente com a temperatura de encharque. As Figuras 3(a) e 4(b) mostram as microestruturas das amostras temperadas a 860°C e 1060°C, respectivamente. Os tamanhos de grão dessas amostras são 17,8  $\mu\text{m}$  (ASTM 8,6) e 39,1  $\mu\text{m}$  (ASTM 6,4). Conclui-se, portanto, que o tamanho de grão austenítico influi muito pouco no valor da força coerciva do material como temperado. Pode-se se dizer, entretanto, que valores ligeiramente mais altos de força coerciva foram obtidos nas amostras temperadas nas temperaturas mais altas. (1060°C e 1160°C).



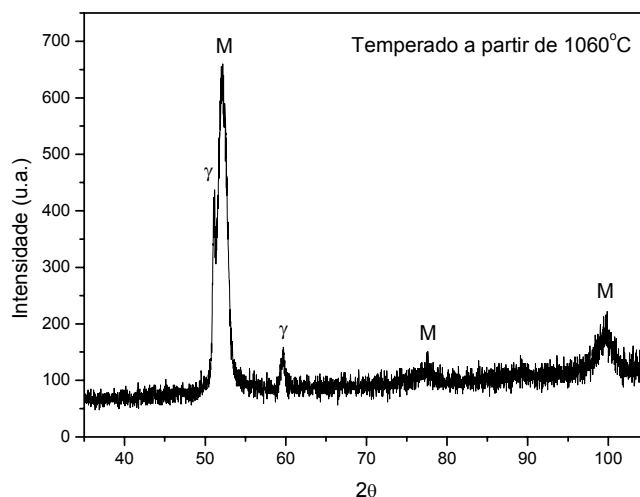
**Figura 3.** Contornos de grãos austeníticos do material temperado a partir de: (a) 860°C e (b) 1060°C. Aumento: 800X.

A força coerciva cai com a temperatura de revenido, atingindo os valores mais baixos entre 300°C e 500°C, dependendo da temperatura de encharque. O valor mínimo de  $H_c$  foi de 115 Oe, obtido na amostra temperada a 860°C e revenida a 450°C. Um aumento considerável de  $H_c$  foi observado nas amostras temperadas a 860°C, 1060°C e 1160°C durante o revenido a 600°C. Estes resultados apresentam algumas semelhanças com os apresentados por Landgraf,<sup>(3)</sup> que observou uma acentuada queda de  $H_c$  entre 200°C e 300°C, e um pequeno aumento a 600°C nas amostras temperadas com encharque a 870°C.

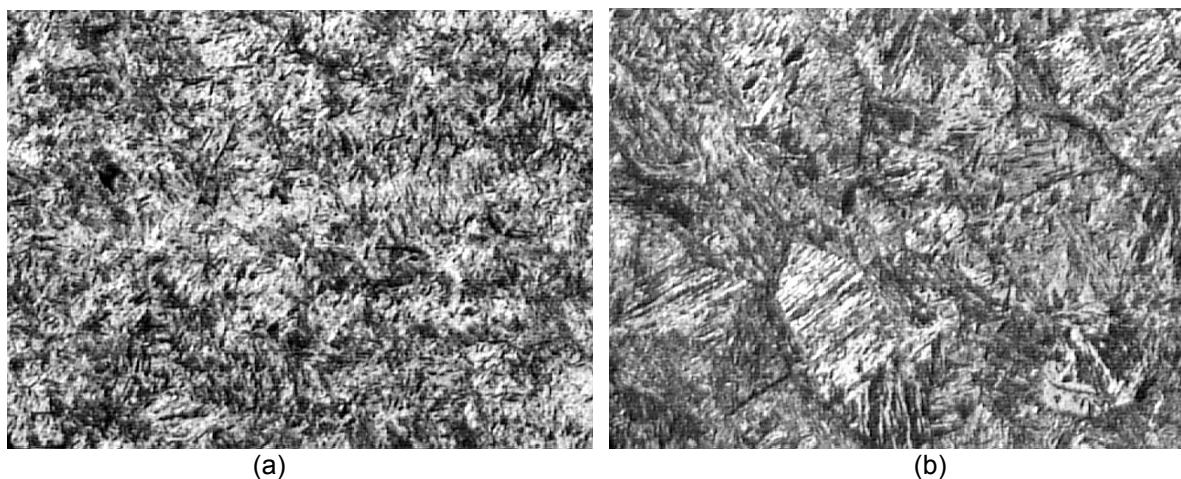
Agora analisando o comportamento da magnetização de saturação, observa-se nas amostras não revenidas que o aumento da temperatura de encharque provoca a diminuição da magnetização de saturação, devido ao aumento da quantidade de austenita retida. As Figuras 4 e 5 apresentam os difratogramas de raios-X das amostras temperadas a 860°C e 1060°C, onde se pode observar que mesmo com o encharque a 860°C o material apresenta uma pequena quantidade de austenita retida e que os picos desta fase crescem bastante na condição de têmpera a 1060°C. As Figuras 6(a) e 6(b) apresentam a microestrutura das amostras temperadas a 860°C e 1060°C, reveladas com nital 2%, onde se observam grandes regiões claras de austenita retida na amostra temperada a 1060°C. Por outro lado, a amostra temperada a 860°C apresenta uma martensita bem mais fina, onde não se pode distinguir nem quantificar a austenita retida.



**Figura 4.** Difratograma da amostra temperada a 960°C. Radiação  $CuK\alpha$ .



**Figura 5.** Difratograma da amostra temperada a 1060°C. Radiação CuK $\alpha$ .



**Figura 6.** Microestruturas das amostras temperadas a partir de: (a) 860°C e (b) 1060°C. Aumento: 800X.

A austenita retida se converte em bainita inferior principalmente na faixa de 200 a 300°C, fazendo com que a magnetização de saturação cresça e atinja valores máximos. A partir daí  $m_s$  segue uma tendência de declínio que se acentua um pouco nas amostras temperadas a 860°C, 1060°C e 1160°C revenidas a 600°C.

O valor máximo de  $m_s$  foi de 218 emu/g nas amostras temperadas a 860°C e 960°C revenidas a 300°C. Nestas condições toda a austenita paramagnética foi transformada e a precipitação de carbonetos a partir da martensita supersaturada ainda é muito incipiente. Dessa forma, considerando-se que a magnetização intrínseca da martensita seja 218 emu/g, a fração volumétrica de austenita retida neste aço, nas amostras temperadas e revenidas até 300°C, pode ser calculada em função da magnetização de saturação através da expressão:

$$C_\gamma = 1 - \frac{m_s}{218} \quad (1)$$

A equação (1) pode ser utilizada para quantificação da fração volumétrica de austenita no aço SAE 4340. O valor da magnetização de saturação intrínseca da

martensita é bastante sensível à composição química do aço. Em trabalho recente (4) determinamos a magnetização de saturação intrínseca de saturação de um aço com 0,95%Cr ligado ao Cr e Mo como sendo 206,4 emu/g.

## CONCLUSÕES

O presente estudo permitiu concluir que:

- No estado temperado o aço SAE 4340 apresenta valores elevados de força coerciva, na faixa de 130 Oe. Com o revenido os valores desta propriedade tendem a ficar menores e atingem valores mínimos com o revenido na faixa de 300°C a 500°C. O aumento da temperatura de encharque para têmpera tende a aumentar suavemente os valores da força coerciva.

- O menor valor de força coerciva foi de 115 Oe, obtido na amostra tratada a 860°C e revenida a 450°C.

- O aumento da temperatura de encharque implica em um aumento da quantidade de austenita retida no aço temperado, e uma conseqüente queda na magnetização de saturação.

- A austenita se converte em bainita inferior na faixa de 200°C a 300°C, provocando o aumento da magnetização de saturação.

- A fração volumétrica de austenita retida do aço SAE 4340 temperado e revenido até 300°C pode ser calculada pela expressão:

$$C_{\gamma} = 1 - \frac{m_s}{218}$$

## Agradecimentos

Ao CNPq e à FAPERJ pelo apoio financeiro.

## REFERÊNCIAS

- 1 S. S. M. TAVARES, M. R. DA SILVA, J.M. NETO, J.M. PARDAL, M. P. CINDRA FONSECA and H. F. G. ABREU, J. of Alloys and Compounds 373 (2004) 304.
- 2 S. S. M. TAVARES, M. R. DA SILVA, J. M. NETO, H. F. G. ABREU and I. POPA, J. of Magnetism and Magnetic Materials 272-276 (2004) 785.
- 3 H. B. NETO, F. J. G. LANDGRAF, M. FUKUHARA, A. P. Tschiptschin, H. GOLDENSTEIN, "Comportamento magnético do aço ABNT 4340 temperado e revenido", 60º Congresso Anual da ABEM, Belo Horizonte, 2005.
- 4 S.S.M. TAVARES, M. R. SILVA, J. MARIA NETO, S. R. MELLO, A. M. GOMES, J. M. PARDAL, "X-ray diffraction and magnetic characterization of the retained austenite in a chromium alloyed high carbon steel", aceito para publicação no Journal of Materials Science em 2005.