

COMPORTAMENTO MAGNÉTICO DO AÇO ABNT 4340 TEMPERADO E REVENIDO ⁽¹⁾

Hugo Berti Neto ⁽²⁾
Fernando José Gomes Landgraf ⁽³⁾
Marcos Fukuhara ⁽³⁾
André P. Tschiptschin ⁽⁴⁾
Helio Goldenstein ⁽⁴⁾

RESUMO

Foi avaliado o efeito da temperatura de revenido nas propriedades magnéticas (magnetização de saturação, perdas, campo coercivo, B_{50}) e mecânicas (dureza) do aço ABNT 4340, com vistas a seu possível uso em peças de hidrogeradores. O aumento da temperatura de revenido levou a uma redução das perdas magnéticas e a um aumento da permeabilidade B_{50} . A polarização de saturação a 100° C é compatível com a expansão volumétrica prevista para a transformação martensítica, mas seu aumento durante o revenimento sugere que o volume de carbonetos precipitados é menor que os 6% previstos, mesmo a 600° C. A maior variação das propriedades magnéticas ocorreu entre 200 e 300° C, temperatura onde ocorre a formação de cementita.

Palavras chave: Propriedades magnéticas, aço 4340, têmpera, revenido.

E-mail: landgraf@ipt.br

⁽¹⁾ Trabalho submetido ao 60° Congresso Anual da ABM, 25 a 28 de julho de 2005, Belo Horizonte, MG.

⁽²⁾ Diretor da Fundesp. Mestrando do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Escola Politécnica da USP.

⁽³⁾ Pesquisador do Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), São Paulo. Professor Convidado do Programa de Pós Graduação do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Escola Politécnica da USP.

⁽⁴⁾ Professor do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Escola Politécnica da USP.

1. INTRODUÇÃO

A necessidade de um aumento constante na eficiência energética dos equipamentos elétricos tem orientado as pesquisas sobre o comportamento de diversos materiais empregados em sua construção. Além das chapas de aços baixo carbono e siliciosos, aplicados em rotores e estatores, há muito estudados, no caso dos hidrogeradores, outros materiais -- laminados em diferentes perfis, fundidos ou forjados -- têm sido pesquisados para aplicações em eixos de rotores e placas de pressão.

Os grandes hidrogeradores são máquinas rotativas que impõem esforços importantes nos materiais usados no diâmetro externo do rotor. O rotor tem vários componentes, dentre eles as chapas de aço baixo carbono que carregam grande parte do fluxo magnético contínuo. Essas chapas são suportadas por peças de aço temperado e revenido, chamadas "placas de pressão", que devem garantir propriedades magnéticas e mecânicas. A norma DIN 1681/1985, por exemplo, especifica propriedades mecânicas e magnéticas, conforme Tabela I.

Tabela I. Valores mínimos especificados pela norma DIN 1681/1985

código	Lim. Escoam.	Limite Resist.	along.	energia absorvida	B ₅₀
	MPa	MPa	%	J	T
GS-38	200	380	25	35	1,60
GS-45	230	450	22	27	1,55
GS-52	260	520	18	27	1,55
GS-60	300	600	15	27	1,50

Um dos caminhos para obter essa combinação de propriedades é por meio da têmpera e revenido. Como as peças são relativamente espessas, é necessário o uso de elementos de liga que garantam uma boa temperabilidade. Apesar da norma DIN acima mencionada referir-se a materiais fundidos, o presente trabalho propôs-se a investigar o efeito da temperatura de revenido nas propriedades mecânicas e magnéticas de um aço ABNT 4340 laminado, para evitar os efeitos complicadores dos defeitos de fundição nos corpos de prova de ensaio magnético.

Além do interesse ligado à aplicação prática desse tipo de aço e processo, o trabalho também reveste-se de interesse acadêmico. Propriedades magnéticas podem oferecer uma nova "sonda" do estado microestrutural, pois as relações microestrutura – propriedades são diferentes. Já em 1937, Dean e Clayton chamavam atenção para a ausência de paralelismo entre o comportamento mecânico e magnético de materiais temperados e revenidos [1]. Mais recentemente, Bida e colaboradores [2] investigaram as propriedades de uma larga gama de aços, inclusive aços semelhantes ao 4340 (aço 40KhN2MA, com 0,38%C, 0,6%Mn, 0,2%Si, 1,3%Ni, 0,8%Cr e 0,17%Mn).

Por exemplo, estudos de envelhecimento mostraram que a temperatura de máximo endurecimento mecânico é significativamente inferior à temperatura de máximo envelhecimento magnético, provavelmente associado às diferenças entre as interações partículas-discordâncias e partículas-paredes de domínios magnéticos. As paredes de domínio, que têm espessura de aproximadamente 200 nm, interagem principalmente com partículas dessa mesma ordem de grandeza, resultando em que máximo campo coercivo ou máximas perdas ocorram quando predominam partículas de 200 nm.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Foi utilizada uma barra de aço 4340 laminada. Sua composição nominal é dada na Tabela II. Os corpos de provas para tratamento térmico e posterior ensaios magnéticos foram usinados das barras de diâmetro 89 mm, usinados em anéis que, após tratamento térmico, foram novamente usinados antes dos ensaios magnéticos, nas dimensões mencionadas na Tabela III.

Tabela II. Composição química nominal do aço SAE 4340.

C	Mn	Si	Ni	Cr	Mo
0,4	0,7	0,3	1,8	0,8	0,25

Tabela III. Dimensões dos anéis para tratamento térmico e para ensaio.

etapa	Ø externo	Ø interno	espessura
	mm	mm	mm
Trat. Térmico	85	65	10
Ensaio magn.	80	70	5

No tratamento térmico, as amostras foram austenitizadas a 870°C por 1h e resfriadas em óleo mineral usado de motor, com intensa agitação. Foram temperados anéis em número suficiente para resultar em 3 anéis para cada T revenido. Os revenidos foram executados em banho de sal classe 1, com exceção do revenido a 100°C, que foi feito em água fervente. Os anéis foram mantidos nas temperaturas de revenido por uma hora.

A dureza Rockwell foi medida em instrumento marca Galileu, na Fundesp. A polarização de saturação (J_{sat}) foi medida em Magnetômetro de Amostra Vibrante, usando como corpos de prova agulhas retiradas dos anéis por corte em serra diamantada. As demais propriedades magnéticas foram medidas nos anéis, usando integrador eletrônico para determinar a indução B e a polarização J. J_{50} é o valor da polarização magnética sob campo de 50 A/cm. O campo coercivo é o campo magnético necessário para retornar a indução magnética B a zero, partindo de 1,5T. A energia dissipada por ciclo é a área da curva de histerese traçada com B_{max} de 1,5T, numa frequência de 0,005 Hz. Todos os ensaios magnéticos foram feitos no Laboratório de Metalurgia do Pó e Materiais Magnéticos do IPT.

.Seções metalográficas foram preparadas por lixamento, polimento e ataque químico com reagente Nital 5%. A microestrutura foi examinada em microscópio Philips modelo XL30, da Escola Politécnica da USP.

3. RESULTADOS

As Fig.1, 2, 3 e 4 apresentam o efeito da temperatura de revenido na dureza, campo coercivo e energia dissipada por ciclo, indução J_{50} , polarização de saturação J_{sat} . A Figura 1 inclui também dados sobre o efeito do revenido por 2h na dureza, conforme Metals Handbook [3]. A Figura 2 inclui dados da literatura sobre o efeito do revenido no campo coercivo [2]. A Figura 1 mostra que a dureza cai suavemente com o aumento da temperatura de revenido, de acordo com os dados constantes do Metals Handbook. Os resultados deste trabalho estão 2 a 3 pontos de dureza HRC abaixo dos resultados da literatura. A Figura 2 mostra que o campo coercivo sofreu uma queda mais acentuada que a de dureza, entre 200 e 300° C. Foi observado também um ligeiro aumento do campo coercivo a 600° C. Os dois comportamentos foram observados tanto nos resultados aqui apresentados quanto nos resultados da literatura.

Versão diferente da existente no CD da ABM,
Corrigindo a Figura 4 e parte substancial da discussão.

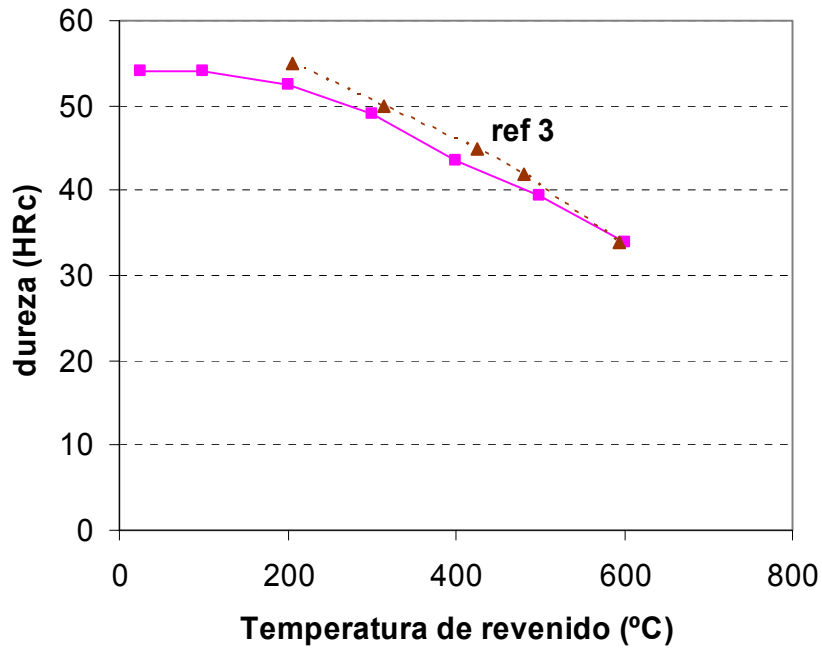


Figura 1. Evolução da dureza em função da temperatura de revenido.

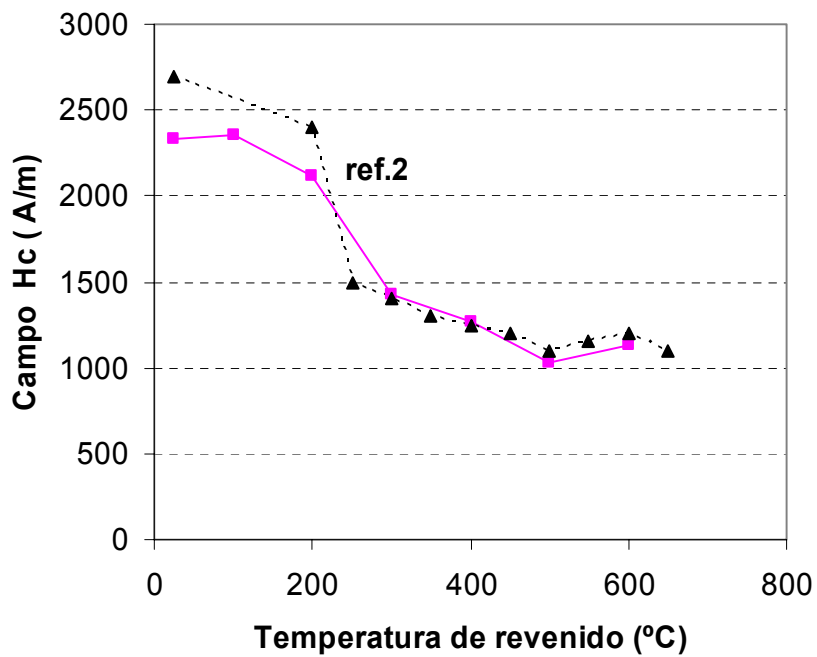


Figura 2. Evolução do campo coercivo em função da temperatura de revenido.

Versão diferente da existente no CD da ABM,
Corrigindo a Figura 4 e parte substancial da discussão.

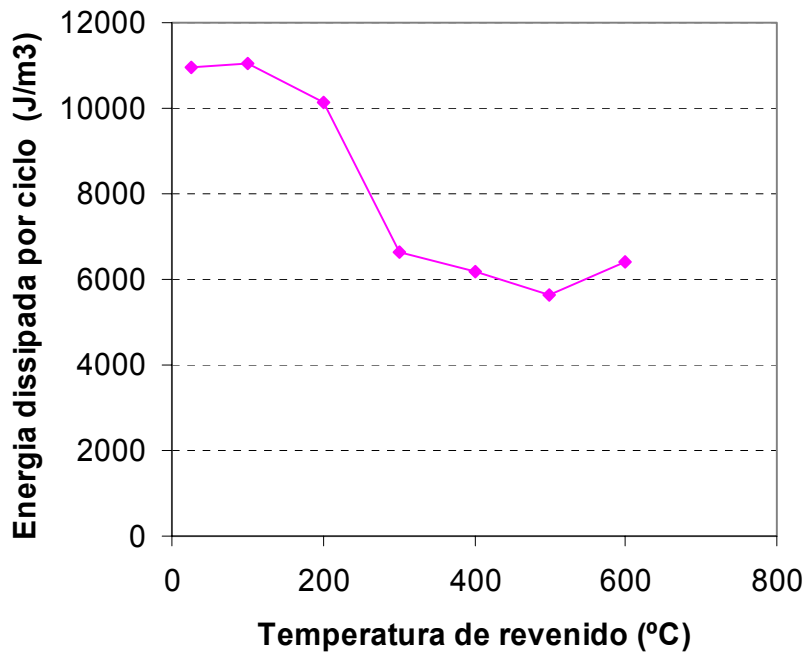


Figura 3. Evolução da energia dissipada por ciclo em função da temperatura de revenido.

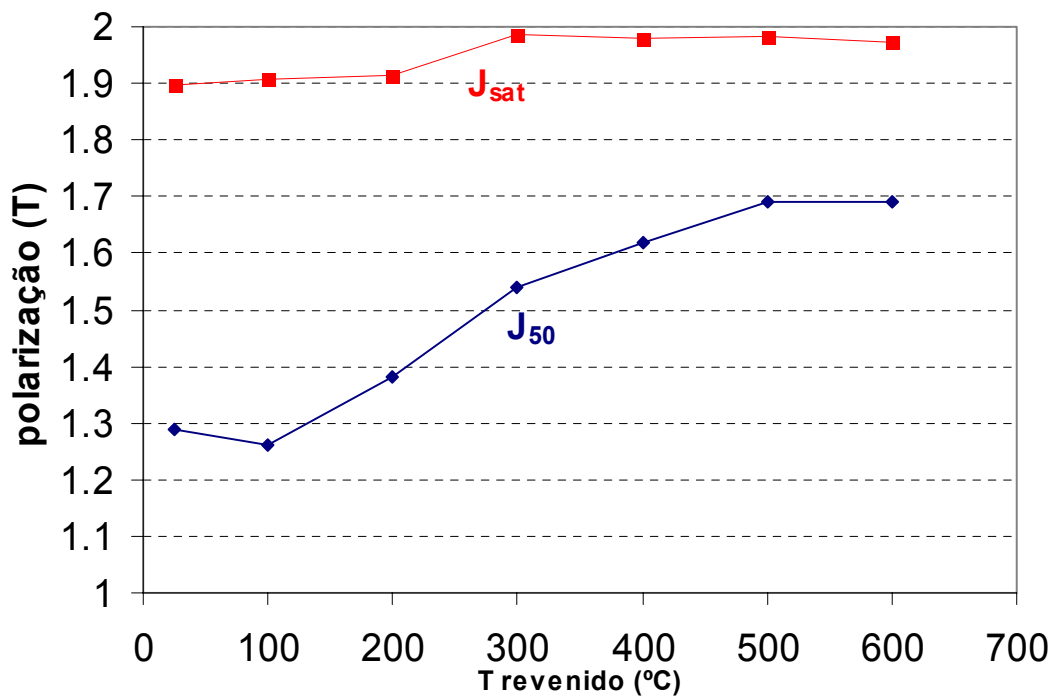


Figura 4. Polarização de saturação J_{sat} e polarização a 50A/cm.

A energia dissipada por ciclo, mostrada na Figura 3, tem comportamento muito semelhante ao campo coercivo, com a queda pronunciada a 300 °C e subida a 600 °C.

A Figura 4 junta duas informações diferentes, ainda que correlacionadas: conforme aumenta a temperatura de revenido, aumenta tanto a saturação magnética do material, medido com corpo de prova em agulha, quanto a polarização J_{50} medida em anel.

Análise difratométrica revelou aproximadamente 5% de austenita retida na amostra temperada, e sendo totalmente eliminada a 300° C.

4. DISCUSSÃO

É interessante iniciar a discussão pela polarização de saturação, da Figura 4, por ser uma propriedade intrínseca, que depende apenas da fração volumétrica e da polarização de saturação das fases presentes. Antes de discutir os resultados, é importante identificar alguns limites. A polarização de saturação é o resultado do valor médio volumétrico dos momentos magnéticos atômicos presentes no material.

Partindo-se da saturação do ferro puro como sendo 2,16T, deve-se descontar a presença de aproximadamente 4at% de elementos químicos substitucionais que não contribuem com a magnetização, o que nos leva a uma saturação de 2,074T.

No caso da martensita de ferro com 0,4% de carbono em solução, assumindo que o momento magnético atômico do ferro não seja significativamente afetado pela vizinhança dos intersticiais de carbono, ainda assim, o valor da polarização de saturação da martensita está diretamente associada com a expansão volumétrica à ela associada. Assumindo que os parâmetros de rede da martensita desse aço sejam $c=0,291$ e $a=0,285$ nm, pode-se prever uma polarização de saturação de 2,05 T, lembrando que ferro puro CCC tem $a=0,286$ nm e $J_s=2,15$ T na temperatura ambiente. Descontando os átomos substitucionais não magnéticos, a saturação deve cair para 1,97T. Entretanto, como a difração de raios X determinou 5% de austenita retida, a saturação deveria cair para 1,87T, valor muito próximo do determinado experimentalmente (1,90T).

O revenido traz a perda da tetragonalidade da martensita, ao longo do revenido, com a conseqüente contração volumétrica, deve contribuir para o aumento da saturação. Entretanto, a precipitação dos carbonetos leva à redução da saturação: um aço com 0,4 %C tem 6 % em volume de cementita. Mesmo levando em conta que a cementita é magnética, com $J_s=0,737$ T [4], o resultado seria uma saturação de 2,005 T, numa liga Fe-C. Descontando os elementos de liga, deve cair para 1,904T.

A saturação magnética pouco mudou, após revenido a 100 e 200° C, mas aumentou para 1,99T a 300° C, acompanhando a eliminação da austenita retida nessa temperatura. Esse valor é próximo do calculado acima para uma martensita pouco alterada. A tendência de queda de J_s com o aumento da temperatura de revenido parece indicar que até 500 °C a fração volumétrica de cementita precipitada é crescente, mas sem sinal de atingir um limite.

A interpretação da evolução da indução J_{50} , na Figura 4, é mais complexa. J_{50} depende da saturação e da presença de micro e macrotensões de tração no interior do material. A variação do J_{50} foi muito maior que a variação da saturação, indicando que o alívio das tensões da estrutura temperada é muito significativo. Infelizmente ainda não é possível estabelecer correlações quantitativas entre tensões e J_{50} , mas do ponto de vista prático os resultados mostram que, para atender as especificações magnéticas do material G38 da norma DIN 1681/1985, é necessário revenir a pelo menos 400° C (lembrando que J_{50} e B_{50} são praticamente iguais).

Do ponto de vista metalúrgico, a comparação entre as figuras 1 e 2 é a mais instigante. Confirma-se aqui o comentário de Dean e Clayton [1] de que não há uma boa

correlação entre propriedades mecânicas e magnéticas, e isso pode ser útil para entender melhor a evolução microestrutural. Os dois pontos divergentes mais importantes são a queda mais pronunciada de H_c do que da dureza, por volta de 300 °C, e a ligeira subida do H_c a 600 °C. Ambos comportamentos são confirmados pela literatura [2,3]. O problema é interpretá-los. Até o momento, a análise microestrutural de maior resolução aplicada às amostras foi a microscopia de varredura. As Figuras 5 e 6 mostram a microestrutura das amostras revenidas a 200 e 300 °C, com ampliação de 12.000 X, correspondentes a estruturas onde ocorreu a maior variação de propriedades. É possível afirmar que a Figura 6 revela a presença de carbonetos com dimensões próximas a 100 nm, que seria a dimensão acima da qual o H_c aumentaria. Com certeza não há partículas acima de 1 μ m, que seria a dimensão correspondente ao superenvelhecimento. Assim, deve-se supor que a queda mais acentuada do H_c do que da dureza deva ser creditada a outros fatores. A fração volumétrica de carbonetos e sua distribuição espacial são variáveis importantes a influenciar o campo coercivo.

Segundo Speich e Leslie [5], as ligas Fe-C com 0,4% de carbono apresentam uma mistura de martensita em forma de ripas e em forma de plaquetas, com predomínio da primeira. A presença de elementos de liga contribui para diminuir a temperatura M_s , o que favorece a formação de plaquetas para menores teores de carbono [3]. O valor do M_s foi calculado como sendo 305° C. As ripas, predominantes, compridas e com largura da ordem de 0,5 μ m, têm altas densidades de discordâncias em sua subestrutura. A maior parte do aumento da resistência verificada nos aços temperados deve-se ao forte endurecimento por solução sólida intersticial, porém há igualmente uma contribuição da elevada densidade de discordâncias [5]. As martensitas de ligas de ferro com baixo e médio teor de carbono têm uma densidade de discordâncias da ordem de 10^{11} e 10^{12} cm/cm³, comparável a ligas fortemente deformadas. O revenido da martensita nos aços envolve fenômenos de segregação do carbono, de precipitação de carbonetos, de decomposição da austenita retida, recuperação e recristalização da estrutura. O chamada “estágio 3” do revenido, que ocorre em torno de 300° C, envolve a precipitação de cementita, na forma de bastonetes. O “estágio 5”, que ocorre entre 600 e 700° C, já prevê a recristalização da matriz [5].

Hoffmann e co-autores [6] determinaram a evolução da densidade de discordâncias em função do revenido para vários aços carbono, usando o alargamento de pico na difração de raios-X. Eles mostraram que a densidade de discordâncias não se altera até 100° C (da ordem de 5×10^{11} cm/cm³), mantendo uma queda quase linear com o aumento da temperatura, a partir de 200° C. A 600° C a densidade de discordâncias já teria se reduzido para 3×10^9 cm/cm³, valores que foram validados por medidas feitas em MET. O comportamento se assemelha mais ao comportamento da dureza. Não é possível atribuir à variação da densidade de discordâncias o comportamento do H_c . Essa é uma questão que permanece em aberto.

Versão diferente da existente no CD da ABM,
Corrigindo a Figura 4 e parte substancial da discussão.

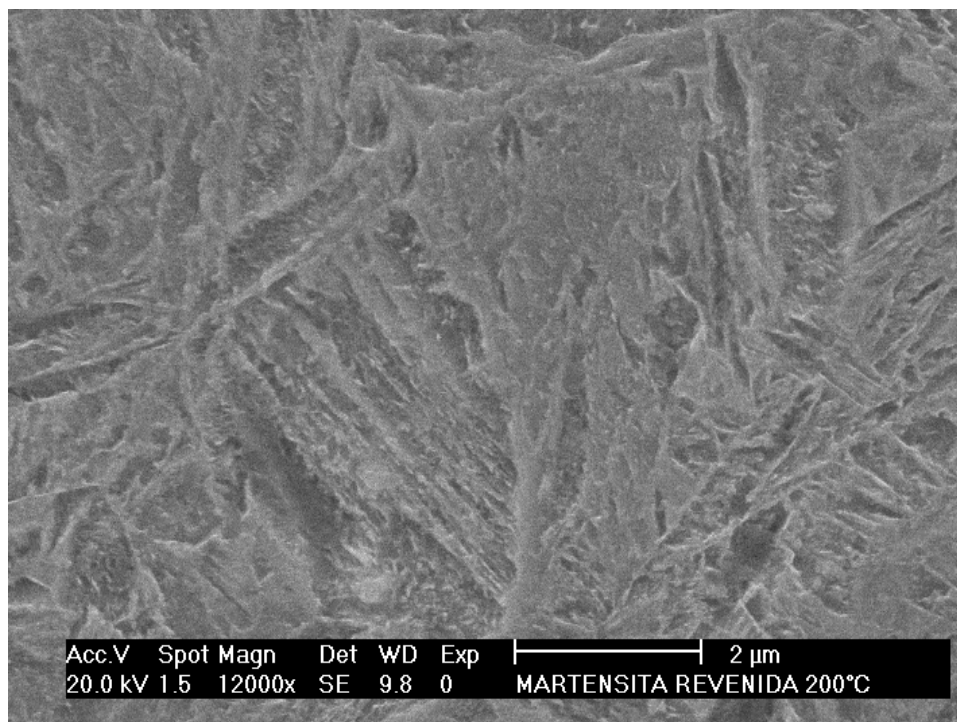


Figura 5. Imagem de microscopia eletrônica de varredura de aço 4340 revenido a 200° C.

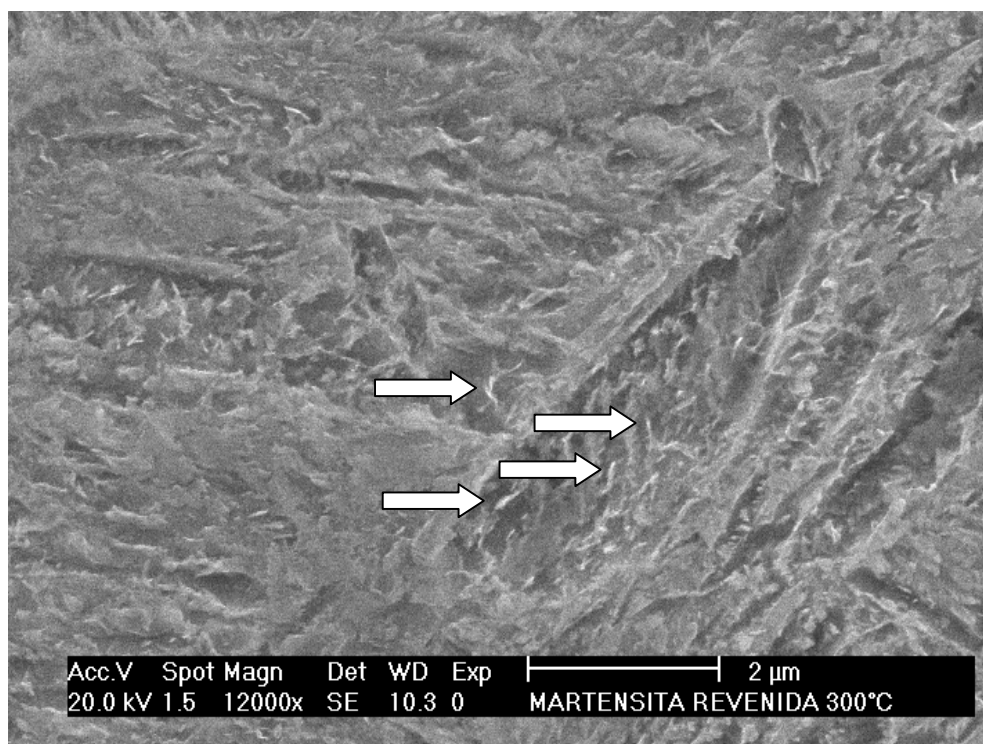


Figura 6. Imagem de microscopia eletrônica de varredura de aço 4340 revenido a 300° C.

5. CONCLUSÕES

O valor da saturação magnética após têmpera foi de 1,9 T, que é compatível com a expansão volumétrica associada à transformação martensítica. O revenido a 300° C resultou num aumento da saturação para 1,99T, compatível com a eliminação de 5% de austenita retida. O aumento da temperatura e revenido até 600° C levou a uma diminuição contínua da saturação, comportamento que pode ser explicado pelo contínuo aumento da fração volumétrica de carbonetos precipitados.

O aumento da temperatura de revenido reduz a dureza e aumenta a indução B_{50} . Para atender as especificações magnéticas do material G38 da norma DIN 1681/1985, é necessário revenir a pelo menos 400° C.

Observando a variação das propriedades magnéticas com o aumento da temperatura de revenido, nota-se uma queda mais acentuada de campo coercivo do que de dureza, entre 200 e 300° C, e um pequeno aumento do H_c a 600° C. Ainda não foi possível identificar os mecanismos microestruturais que explicariam esse comportamento.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho contou com o apoio do CNPq em forma de bolsa produtividade.

REFERÊNCIAS

1. Dean, R.S. E Clayton, C.Y. *The mechanism of steel hardening and tempering as indicated by coercive force measurement*. Preprint ASM, 1937, p.1-17
2. Bida, G.V, Nichipuruk, A.P, Tsar'kova, T.P, *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 200, Vol. 37, No. 2, , p.100-115.
3. Metals Handbook vol.2 - *Heat Treating of Steel* , *Tempering of Steel* ,p.70-84, 1964
4. SAITÔ, S. Sci. Repts. Tôhoku Imp. Univ., vol. 9, 1920, pp. 319-322; Proc. Phys. Math. Soc. Japan, vol. 2, No. 3, 1920, p. 91; Chem. Abs., vol. 15, 1921, p. 1650. acessado em : <http://jpsj.ipap.jp/link?JPSJ/37/940/>
5. Speich G.R, Leslie W.C. *Metallurgical Transactions*, 1972, vol.3, 1043-1054
6. Hofmann, B.; Vöhringer, O.; Macherauch, E. *Mat Science & Eng.* , 1997 , v. A234-236, p. 707-710

MAGNETIC BEHAVIOR OF ABNT 4340 STEEL AFTER QUENCHING AND TEMPERING ⁽¹⁾

Hugo Berti Neto ⁽²⁾
Fernando José Gomes Landgraf ⁽³⁾
Marcos Fukuhara ⁽³⁾
André P. Tschiptschin ⁽⁴⁾
Helio Goldenstein ⁽⁴⁾

ABSTRACT

The effect of tempering temperature on the magnetic properties (saturation magnetization, induction B₅₀, coercive force, dissipated energy) and mechanical properties (hardness) was analysed, aiming at its use in hydrogenerators. The increase in tempering temperature promoted a reduction in dissipated energy and coercive force, and an increase in permeability. Saturation Polarization at 100° C was consistent with the volume expansion of the martensítica transformation, but its increase during tempering suggests that the volume fraction of precipitated cementite is smaller than the expected 6volume%, even at 600° C. The largest variation occurred between 200 and 300° C, temperature where cementite formation is settled.

Key words: Magnetic properties, 4340 steel, quenching, tempering.

⁽¹⁾ Paper submitted for presentation at the 60th Annual Congress of ABM, Belo Horizonte, MG, July 25-28, 2005.

⁽²⁾ Director da Fundesp. Mestrando do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Escola Politécnica da USP.

⁽³⁾ Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), São Paulo. Professor Convidado do Programa de Pós Graduação do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de materiais da Escola Politécnica da USP.

⁽⁴⁾ Professor do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Escola Politécnica da USP.