

# CORRELAÇÃO ENTRE MICROESTRUTURA E PROPRIEDADES MAGNÉTICAS EM AÇOS 1020 E 1045<sup>1</sup>

Leornardo Filipe de Toledo Costa<sup>2</sup> Felipe Schiochet Bertoldo Girotto<sup>3</sup> Ricardo Baiotto<sup>3</sup> Marcos Flavio de Campos<sup>4</sup> Frank Patrick Missell<sup>5</sup>

ANAIS

PROCEEDINGS

ISSN 1516-392X

#### Resumo

Atualmente existe um interesse muito grande em melhor compreender as relações entre microestrutura e propriedades magnéticas, principalmente no âmbito dos ensaios não-destrutivos. É aqui descrita a correlação entre microestrutura e propriedades magnéticas para aços 1020 e 1045, em diferentes condições de tratamento térmico. Os aços foram austenitizados a 910°C e depois: i) normalizados, ii) temperados em água, iii) temperados em óleo, ou então submetidos a tratamento isotérmico a iv) 500, v) 550, vi) 600, vii) 650 e viii) 700°C por 20 minutos. São discutidos os mecanismos de endurecimento mecânico e magnético nesses materiais.

Palavras-chave: Aços; Microestrutura; Histerese; Ensaios não-destrutivos.

### CORRELATION BETWEEN MICROSTRUCTURE AND MAGNETIC PROPERTIES IN 1020 AND 1045 STEELS

#### Abstract

There is large interest nowadays on a better understanding of the relationship between microstructure and magnetic properties, especially for non-destructive-testing. Here, it is described the relation between microstructure and magnetic properties for 1020 and 1045 steels, under different conditions of heat treatment. The steels were austenitized at 910°C and after: i) normalized, ii) water quenched, iii)oil quenched, or then submitted to an isothermal annealing at a iv) 500, v) 550, vi) 600, vii) 650 e viii) 700oC during 20 minutes. The mechanical and magnetic hardening mechanisms of these materials are discussed.

Key words: Steel; Microstructure; Hysteresis; Non-destructive testing.

<sup>3</sup> Aluno, UCS-Universidade de Caxias do Sul.

<sup>5</sup> Professor, Universidade de Caxias do Sul

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Contribuição técnica ao 65º Congresso Anual da ABM, 26 a 30 de julho de 2010, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Mestrando, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica UFF.

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup> *Professor Adjunto, EEIMVR-UFF* (mcampos@metal.eeimvr.uff.br)



## 1 INTRODUÇÃO

Ensaios não-destrutivos vem se tornando cada vez mais relevantes, atuando tanto no controle de qualidade na linha de produção como na checagem de equipamentos em operação.

Materiais ferromagnéticos – por exemplo, aços carbono em geral – podem ter suas características microestruturais inspecionadas por medidas magnéticas, por exemplo, curvas de histerese magnética ou o ruído Barkhausen. Nesse sentido, é essencial um melhor conhecimento da correlação entre microestrutura e propriedades magnéticas.

## 2 RELAÇÕES ENTRE MICROESTRUTURA E PROPRIEDADES NOS AÇOS

Ainda no século XIX percebeu-se que aços mais duros apresentavam em geral curva de histerese com maior campo coercivo (ou seja, com maior área). Assim, termos técnicos como *soft magnetic material* ou *hard magnetic material* refletem as propriedades mecânicas do material. No caso de materiais com baixa anisotropia magnetocristalina, essa relação mole/duro é verdadeira, pois os mesmos defeitos que bloqueiam movimentação de discordâncias também bloqueiam a movimentação de paredes de domínios. No século XIX não existia uma microscopia suficientemente desenvolvida e esses conceitos apenas foram demonstrados no século XX.

O próprio conceito de domínio e de parede de domínio, essencial para se compreender a relação entre propriedades mecânicas e magnéticas só foi evidenciado na década de 1930,<sup>(1)</sup> e apenas considerado definitivamente provado em 1949 por Williams e Shockley.<sup>(2)</sup> É curioso notar que Shockley também foi um dos pioneiros da teoria de discordâncias: ele é lembrado pelas discordâncias parciais de Shockley,<sup>(3)</sup> as quais separam defeitos de empilhamento em cristais CFC. Ou seja, esses trabalhos são contemporâneos, datando de finais dos 1940, e início dos anos 1950. Apenas em finais dos anos 1940 discordâncias foram observadas por MET (Microscópio Eletrônico de Transmissão), por Heidenreich, um colega de Shockley, nos Laboratórios Bell. Convém notar que discordâncias já tinham sido descritas em detalhe, de maneira teórica, por Volterra em 1907,<sup>(4)</sup> que inclusive publicou a equação que representa o campo de tensões em torno de discordâncias, que é encontrada nos livros-texto atuais (por exemplo, ver Hosford<sup>(5)</sup>). Assim, foi somente a partir de 1950 que o conhecimento existente permitiu elucidar a relação microestrutural mole/duro (*soft/hard*) para ambas as propriedades Mecânicas e Magnéticas em aços. Esse tema situa-se bem no âmago da metalurgia física.

Serão discutidos aqui os três microconstituintes principais nos aços analisados: ferrita, perlita e martensita. Também a martensita apenas foi melhor compreendida depois que MET tornou-se disponível após 1950.

## 2.1 Ferrita

Ferrita consiste em ferro alpha CCC. É uma material magneticamente mole, onde o endurecimento magnético, assim como o endurecimento mecânico, se dá por diminuição de tamanho de grão. Assim como a relação de Hall-Petch<sup>(6)</sup> prevê L.E.= c1 +c2 TG^{-1/2}, uma relação empírica<sup>(7)</sup> indica Hc = c3 + c4 TG<sup>-1</sup>, onde c1, c2, c3, c4 são constantes.

ANAIS

PROCEEDINGS

ISSN 1516-392X





## 2.2 Perlita

Perlita, vista em 2 dimensões, consiste em lamelas alternadas de ferrita (Fe-alpha) e cementita (Fe<sub>3</sub>C). Cementita também é uma fase ferromagnética, e sua fração volumétrica tem efeito sobre a magnetização de saturação. A grande quantidade de interfaces na ferrita presente na perlita provoca grande efeito de *pinning*. Observam-se lamelas em 2 dimensões (2D), mas em 3 dimensões, a perlita tem morfologia tipo "alface ou repolho".<sup>(8)</sup> Em um dado grão, a ferrita é um monocristal, e a cementita é um outro monocristal. Todas as lamelas de ferrita e cementita que parecem separadas em 2D estão interligadas. Cementita tem maior campo de anisotropia (K<sub>1</sub>) que ferrita. Perlita é mecanicamente mais dura que a fase ferrita, e isso também é válido para propriedades magnéticas.

## 2.3 Martensita

Uma transformação martensítica é definida como sendo uma transformação de fases que ocorre sem difusão. Esse dado explica muito sobre a natureza da martensita. Em duas dimensões, a martensita tem forma de agulhas, e isso é válido para os aços com muito elemento de liga e com alto carbono. Em aços de baixo carbono, sem elementos de liga, caso do 1020 analisado aqui, a martensita aparece na forma de ripas.<sup>(5)</sup> A verdadeira forma tridimensional da martensita é lenticular.<sup>(5)</sup>

A martensita surge quando austenita CFC (alta temperatura) é rapidamente resfriada, sem tempo para ocorrer difusão. Átomos de carbono ficam aprisionados, mas a estrutura CCC de baixa temperatura não tem espaço suficiente para abrigar esses átomos. Então, surge uma estrutura tetragonal de corpo centrado, derivada da estrutura CCC. Quanto maior o teor de carbono maior a tetragonalidade da martensita. Esse carbono gera fortíssimas tensões elásticas na rede; e nessa situação a movimentação de discordâncias é muito difícil, endurecendo muito o aço.

A transformação martensítica também gera uma enorme quantidade de discordâncias: as estruturas CFC e CCC são muito distintas, tem fator de empacotamento diferente, e muitas discordâncias são produzidas de forma a acomodar essa transformação. A grande quantidade de discordâncias é uma das razões para a grande dureza mecânica e magnética da martensita.

Muitas interfaces são produzidas na transformação martensítica; aqui deve ser lembrado que cada cristal de martensita assume forma lenticular. Essas pequenas lentes encostam uma nas outras, resultado da transformação. Assim, diversos cristais de martensita formam-se dentro de um único grão austenítico.

Sumarizando, a martensita é bastante dura por três razões principais:

- grande quantidade de interfaces;
- alta densidade de discordâncias (~10<sup>-12</sup> cm/cm<sup>3</sup>), muito maior por exemplo do que a de um material laminado a 90% (~10<sup>-10</sup> cm/cm<sup>3</sup>); e
- carbono em solução sólida gera tensões elásticas na rede.

Portanto, temos uma relação de dureza mecânica:

#### Martensita > Perlita > Ferrita

A qual deve se refletir também na dureza magnética (campo coercivo). O experimento descrito neste trabalho investiga essa questão.





## **3 MATERIAIS E MÉTODOS**

O formato das amostras (aços 1020 e 1045) foi cuidadosamente escolhido. Amostras em formato de anel eliminam efeito de campo desmagnetizante entreferro. Portanto a curva de histerese reflete apenas a microestrutura do material. O campo desmagnetizante 'e função do formato das amostras e altera a curva de histerese.

## 3.1 Tratamento Térmico

Anéis foram usinados e depois austenitizados na temperatura de 910°C (incerteza: 10°C). Após a austenitização, foram colocadas em outro forno a - 500°C, 550°C, 600°C, 650°C, 700°C, todas por 20 minutos. O tratamento de normalização consiste em austenitização completa, seguida de resfriamento ao ar. Os tratamentos estão detalhados na Tabela 1.

Número	TT
1	Normalizado
2	Têmpera em água
3	Têmpera em óleo
4	Resfriado de 700°C
5	Resfriado de 650°C
6	Resfriado de 600°C
7	Resfriado de 550 °C
8	Resfriado de 500°C

Tabela 1. Descrição dos tratamentos térmicos util	lizados
---	---------

#### 3.2 Preparação Metalografica e Observação

A preparação metalográfica foi realizada na seqüência indicada a seguir, em pano Trident e Microcloth (Buehler). Soluções de diamante em suspensão: 15, 9, 6, 3, 1 e 1/4 de micra monocristalino e policristalino Buehler. Microscópio óptico Zeis AX10 e Microscópio Eletrônico de Varredura Zeiss EVO 40. Ataque Nital.

#### 3.3 Medidas de Histerese Magnética

Após os tratamentos térmicos, os corpos de prova, em forma toroidal, foram enrolados com um primário (200 espiras de fio de cobre 24 AWG) e um secundário (100 espiras de fio de cobre 24 AWG). Curvas de histerese magnética foram obtidas com um Traçador de Curvas de Histerese (TCH) da Globalmag Ltda. O diagrama de blocos do TCH é mostrado na Figura 1. O sistema gera uma onda senoidal de frequência variável (f = 0,05 - 400 Hz) que é amplificada para alimentar o primário (e fornecendo o campo magnético H). O sinal do secundário é integrado e o resultado é proporcional à indução magnética B.





Figura 1. Diagrama de blocos do traçador de curvas de histerese magnética.

Por causa das correntes de Foucault geradas em altas frequências, o campo coercivo mostra uma forte variação com a frequência. Porém, os efeitos ligados às correntes de Foucault são irrelevantes para a discussão aqui e restringimos a discussão à baixas frequências (0,5 Hz).

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Curvas típicas para o material resfriado de 650°C são mostradas na Figura 2 para um campo magnético variando com frequência de 0,5 Hz. Para os dois aços,  $H_c \sim 1.100$  A/m, quase independente do teor de carbono. Os campos coercivos aumentam substancialmente nos aços temperados. Na Figura 3, são mostradas curvas de histerese para aços 1020 e 1045 que foram temperados em óleo. Observa-se  $H_c \sim 2.810$  A/m para o aço 1045, maior do que o valor de  $H_c \sim 1.730$  A/m do aço 1020, preparado na mesma maneira, refletindo a maior quantia de martensita presente neste material. Na Figura 4, é apresentado um resumo dos efeitos dos tratamentos térmicos sobre o campo coercivo dos dois aços.







Figura 2. Curvas de histerese magnética para aços 1020 e 1045, resfriados de 650°C.



Figura 3. Curvas de histerese para uma têmpera em óleo.

Os resultados são em geral bastante consistentes e refletem diretamente a microestrutura dos materiais. Por exemplo, espera-se menor Hc na amostra 1020 temperada em óleo do que a temperada em água, pois têmpera em óleo extrai menos calor do que tempera em água. Portanto, o 1020 temperado em água deve conter mais martensita.

As amostras na condição normalizada (número 1) não apresentam martensita, devendo conter perlita e ferrita apenas. Porém, aços hipoeutetóides normalizados em geral apresentam menos ferrita pró-eutetóide e perlita mais fina que seus correspondentes austenitizados e tratados isotermicamente (os quais são as amostras de numero 4 a 8). Assim, pela microestrutura esperava-se que o Hc talvez fosse um pouco maior para as amostras normalizadas (número 1) do que as demais amostras austenitizadas e tratadas (número 4 a 8). Entretanto, apresentam Hc muito semelhante às amostras tratadas entre 500°C a 700 °C, o que é confirmado na Figura. 4.



Ainda, comparando-se as amostras de numero 4 a 8, nota-se que 1045 sempre apresenta Hc maior do que o 1020, pois tem mais perlita. Isso é em geral observado, mas para amostras de numero 6 e 7 os pontos saíram muito próximos, talvez devido a incertezas na medida magnetica.

Confirma-se portanto a correlação (dureza magnética, ou campo coercivo):

Martensita > Perlita > Ferrita

Amostras com maior teor de carbono tendem a apresentar maior quantidade de martensita quando temperadas; e maior quantidade de perlita em outros tipos de tratamentos (Figura 4). Microestruturas para os dois tipos de amostras (1020 e 1045) para tratamento de número 3, 1, 4 e 8 são apresentadas respectivamente nas Figuras 5 e 6, 7 e 8, 9 e 10 e 11 e 12. O ataque Nital mantém a fase ferrita branca. Nas Figuras de 7 a 12, a perlita quando muito fina, aparece com cor amarronzada, em nuances que vão desde o amarelo-claro até o marrom escuro. As Figuras 5 e 6 mostram uma matriz que deve consistir de martensita (mais escura) e ferrita (branca), sendo que a martensita pode ser identificada pelo seu formato em ripas, conseqüência de sua forma lenticular em três dimensões.

As amostras resfriadas de 500°C apresentam distância intermelar na perlita um pouco menor do que as amostras resfriadas de 700°C. A distância interlamelar pode ser estimada pela equação de Zener.<sup>(9,10)</sup> Talvez, por causa disso, as amostras de numero 8 tenham um Hc menor do que as de número 4, mas aparentemente esse efeito é muito pequeno. Convém notar que é reportado que esse efeito existe: Byeon e Kuwn<sup>(11)</sup> mencionam que observaram diminuição de Hc quando a distância interlamelar aumenta.

Jiles<sup>(12)</sup> também mediu campo coercivo de aços 1020 e 1045 normalizados, porém encontrando uma diferença entre eles (6.5 Oe e 10.5 Oe, respectivamente) maior do que a observada na Figura 4.



Figura 3 . Efeito do tratamento térmico sobre o campo coercivo dos aços. Ver tabela I para explicação sobre número e tipo de tratamento.

ANAIS

PROCEEDINGS

ISSN 1516-392X





Figura 5. Amostra 1020 temperada a óleo. Microscopia Óptica.



Figura 6. Amostra 1045 temperada a óleo. Microscopia Óptica.



ANAIS PROCEEDINGS ISSN 1516-392X



Figura 7. Amostra 1020 normalizada. Microscopia Óptica.







Figura 9. Amostra 1020 austenitizada e tratada a 500°C. Microscopia Óptica.



Figura 10. Amostra 1045 austenitizada e tratada a 500°C. Micro scopia Óptica.



ANAIS PROCEEDINGS



Figura 11. Amostra 1020 austenitizada e tratada a 700°C. Micro scopia Óptica.



Figura 12. Amostra 1045 austenitizada e tratada a 700°C. Micro scopia Óptica.





## 5 CONCLUSÃO

É evidenciada a forte correlação entre microestrutura e propriedades magnéticas. Confirma-se a seguinte correlação quanto a fração volumétrica de fases presentes e dureza magnética: Martensita > Perlita > Ferrita. Amostras com maior teor de carbono tendem a apresentar maior quantidade de martensita quando temperadas; e maior quantidade de perlita em outros tipos de tratamentos. Portanto, o aço 1045 apresentou em geral maior campo coercivo do que o aço 1020 em todos os tipos de tratamentos térmicos estudados.

## Agradecimentos

MF de Campos, F P Missell, e R. Baiotto agradecem CNPq. MF de Campos agradece CNPq 480891/2008-7. FSB Girotto agradece a bolsa da UCS. LF de T Costa agradece CEPEL pelo uso do laboratorio metalografico. LF de T Costa agradece CAPES pela bolsa de mestrado.

## REFERÊNCIAS

- 1 W. C. Elmore Phys. Rev. 53, 757–764, 1938.
- 2 H. J. Williams and W. Shockley Phys. Rev. 75, 178–183. 1949.
- 3 Heidenreich, R. D.;, Shockley, W., Bristol Conf. on Strength of Solids (Phys. Soc.), 57 (1948).
- 4 V. Volterra .Ann. scient. Ec. norm. sup. Paris 24 400-517, 1907.
- 5 W.F. Hosford. Physical Metallurgy. Taylor and Francis, Boca Raton, FL, 2005.
- 6 G. Dieter. Mechanical Metallurgy,. 3rd Edition. 1986.
- 7 B. D. Cullity; C. D.Graham Jr Introduction to Magnetic Materials. Wiley-IEEE Press; 2nd edition (December 10, 2008)
- 8 M. De Graef, M.V. Kral M.Hillert. A modern 3-D view of an "old" pearlite colony . JOM Journal of the Minerals, Metals and Materials Society. Volume 58, Number 12 / December, 2006, pp.25-28.
- 9 Mats Hillert. Impact of Clarence Zener upon metallurgy. J. Appl. Phys. 60, 1868 (1986).
- 10 F.G. Caballero, C. Capdevila, C. Garcıa de Andres. Modeling of the interlamellar spacing of isothermally formed pearlite in a eutectoid steel. Scripta Materialia, Volume 42, Issue 6, 2000, Pages 537-542.
- 11 Jai Won Byeon; S. I. Kwun. Evaluation of microstructures of variously heat treated carbon steel by magnetic coercivity measurement. phys. stat. sol. (b) 241, No. 7, 1697–1700 (2004).
- 12 D.C. Jiles Magnetic properties and microstructure of AISI 1000 series carbon steels", , J. Phys. D (Applied Physics), 21, 1186, 1988.