



CIÊNCIA E TECNOLOGIA:  
IMPLICAÇÕES NO ENSINO, PESQUISA E EXTENSÃO

# FEPEG

F Ó R U M  
ENSINO • PESQUISA • EXTENSÃO • GESTÃO

REALIZAÇÃO:



APOIO:



ISSN: 1806-549X

## PROPOSTA DE ENSAIO DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA COMO TÉCNICA NÃO DESTRUTIVA PARA ESTIMATIVA DA DUREZA BRINELL DE LIGAS DE AÇO AO CARBONO.

**Autores:** MARIA HELENA TELES LOPES, ÁLVARO BARBOSA DE CARVALHO JÚNIOR, MICHÉLE SANTOS PIMENTEL

### Introdução

A dureza é uma propriedade mecânica que mede a resistência a uma deformação plástica localizada a partir de pequenas impressões ou riscos (CALLISTER, 2002). Outras propriedades podem ser relacionadas por meio de medidas de dureza e dos limites de resistência à tração, obtidos com ensaios mecânicos (SOUZA, 2014). Entretanto, existe uma dificuldade para caracterização de materiais metálicos com apenas um único ensaio.

Por outro lado, alguns trabalhos sugerem que a realização de medidas físicas, tais como, medidas de resistividade, podem ser associadas às mudanças na microestrutura provenientes de tratamentos térmicos (PADIAL, 2002). Além disso, sabe-se que os tratamentos térmicos alteram a dureza dos materiais, ocasionando mudanças nas propriedades mecânicas dos metais (BUBANI et al., 2007; ZHANG et al., 2013).

Os ensaios para a determinação das propriedades mecânicas dos materiais são geralmente destrutivos, e demandam altos custos com procedimentos de preparação de amostras e equipamentos (SOUZA, 2014; GARCIA; SPIM; SANTOS, 2012). Nesse sentido, o uso de ensaios não destrutivos, como por exemplo, líquidos penetrantes, partículas magnéticas, gamagrafia industrial, ensaio por ultrassom e correntes parasitas, entre outros, têm sido amplamente aplicados na indústria mecânica para caracterização das propriedades dos materiais (GARCIA; SPIM; SANTOS, 2012). Entre as maiores vantagens no uso dos ensaios não destrutivos em relação aos destrutivos, estão o baixo custo, a rapidez na aquisição dos resultados e a precisão nas medidas.

Nos últimos anos, medidas de resistividade elétrica têm sido feitas em ligas metálicas, visando o estudo de falhas nos materiais e as mudanças de fase ocasionadas por tratamentos térmicos (GIROTTI e SANTOS, 2002; TUPTA, 2011). Portanto, medidas de resistividade podem ser associadas à dureza das ligas metálicas, possibilitando a estimativa de outras propriedades mecânicas, sem que haja necessariamente a realização de ensaios destrutivos.

Com base nas informações relatadas acima, buscou-se relacionar medidas de resistividade e dureza a partir dos dados disponíveis na literatura, propondo o ensaio de resistividade como uma técnica não destrutiva para caracterização de aços ao carbono.

### Materiais e Métodos

A partir do banco de dados disponível na MatWeb para os aços ao carbono, tentou-se relacionar medidas físicas com características mecânicas, com intuito de estimar as propriedades que são normalmente obtidas por meio de ensaios mecânicos convencionais. Depois de investigar algumas propriedades dos aços, tais como, ponto de fusão, densidade, velocidade de propagação de ondas sônicas longitudinais, condutibilidade elétrica, resistividade e dureza Brinell, foi verificado por meio de resultados preliminares uma relação entre a resistividade elétrica e a dureza, sendo as demais propriedades descartadas para esse estudo. A Tabela 1 apresenta os valores de resistividade elétrica ( $\mu\text{W}\cdot\text{cm}$ ) e dureza (HB) para as ligas de aço SAE, com percentuais de carbono variando entre 0,1% e 0,8%.

Com os dados apresentados na Tabela 1 foi investigado o comportamento da dureza dos aços em função do teor de carbono (HB x %C). Para isso, foi utilizado como ferramenta de análise gráfica o software Origin®. De forma análoga, também foi investigado o comportamento da resistividade elétrica em função do teor de carbono ( $\mu\text{W}\cdot\text{cm}$  x %C). Em seguida, os valores calculados por meio da razão  $\mu\text{W}\cdot\text{cm} / \text{HB}$  foram utilizados como fator de correção da curva.

Para verificar a existência de correlação linear entre a resistividade e a dureza, um modelo de equação exponencial em função do quociente  $\mu\text{W}\cdot\text{cm} / \text{HB}$  e do percentual de carbono (%C) foi utilizado nesse estudo.

### Resultados e Discussão

No resultado apresentado na Fig. 1A é possível observar um comportamento linear ( $R^2 = 0,991$ ) entre a dureza dos aços e o teor de carbono. O crescimento da dureza com o aumento do teor de carbono era esperado e está de acordo com os resultados previamente descritos na literatura (CALLISTER, 2002). Por outro lado, um comportamento diferente foi observado para a resistividade elétrica em função do teor de carbono, conforme apresenta a Fig. 1B. Nessa figura, embora exista uma tendência de crescimento da resistividade com o teor de carbono, o comportamento observado é semelhante a uma função exponencial.

Os valores encontrados com a razão entre  $\mu\text{W}\cdot\text{cm}$  e HB, apresentados nas Fig. 1B e 1A, favoreceu a aproximação dos pontos à curva de tendência, sugerindo a existência de uma relação entre dureza, resistividade e teor de carbono, como mostra a Fig. 1C. Nesse sentido, várias tentativas foram realizadas para verificar uma possível linearidade entre esses parâmetros, como por exemplo, a utilização da resistividade elétrica como função exponencial ou polinomial da dureza. Como resultado, um modelo exponencial que relaciona a razão  $\mu\text{W}\cdot\text{cm} / \text{HB}$  e o percentual de carbono (%C) foi encontrado, o qual está representado pela Equação 1:



CIÊNCIA E TECNOLOGIA:  
IMPLICAÇÕES NO ENSINO, PESQUISA E EXTENSÃO

# FEPEG

F Ó R U M  
ENSINO • PESQUISA • EXTENSÃO • GESTÃO

REALIZAÇÃO:



APOIO:



ISSN: 1806-549X

$$e^{\left(\frac{\rho}{HB}\right)} = -0,12548 x + 1,17149 \quad (1)$$

sendo,  $x$  = teor de carbono nos aços (%),

$\rho$  =  $\mu\text{W}\cdot\text{cm}$ ,

HB = dureza Brinell,

$e$  = constante de Euler.

A aplicação do modelo exponencial descrito na Equação 1 favoreceu um ajuste dos valores decrescentes apresentados na Fig. 1C. Nesse caso, o comportamento apresentado na Fig. 1C, semelhante a uma curva exponencial, passou a ser uma função linear decrescente, com fator de correlação  $R^2 = 0,943$ , como mostra a Fig. 1D.

## Conclusão

Os resultados desse trabalho permitiram a elaboração de um modelo exponencial que relaciona resistividade elétrica, dureza e teor de carbono. A partir do modelo encontrado é possível estimar a dureza de ligas de aços com valores intermediários de carbono. Além disso, outras propriedades mecânicas podem ser estimadas por meio das correlações existentes entre dureza, resistência de tração e fadiga. Isso mostra que o ensaio de resistividade elétrica pode ser utilizado como método não destrutivo para a caracterização mecânica dos aços. Contudo, outros estudos devem ser realizados para estimativas da dureza em outras ligas metálicas.

## Agradecimentos

O primeiro autor agradece à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), pela concessão da bolsa de iniciação científica.

## Referências

- BUBANI, F. C. et al. Efeitos da adição de níquel em ligas ferro-cromo. Parte 1: propriedades mecânicas. *Revista Escola de Minas*, Ouro Preto, vol. 60, n. 1, jan./mar. 2007.
- CALLISTER JR., W. D. *Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução*. 5 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2002.
- GARCIA, A.; SPIM, J. A.; SANTOS, C. A. *Ensaio dos Materiais*. 2 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.
- GIROTTI, E. M.; SANTOS, I. A. Medidas de resistividade elétrica DC em sólidos: como efetua-las corretamente. *Quím. Nova*, São Paulo, vol. 25, n.4, p. 639-647, 2002.
- PADIAL, A. G. F. *Caracterização microestrutural do aço Maraging de grau 400 de resistência mecânica ultra-elevada*. 2002. 102f. Tese de Doutorado – IPEN, São Paulo, 2002.
- PROPRIEDADES de Materiais. Disponível em: <www.matweb.com>. Acesso em: 15 de jun. de 2018.
- SOUZA, S. A. *Ensaio Mecânicos de Materiais Metálicos: Fundamentos teóricos e práticos*. 5 ed. São Paulo: Blucher, 2014.
- TUPTA, M. A. Measuring the resistivity of bulk materials. *Electronic Engineering Times*, Europe, jan. 2011.
- ZHANG, Y. et al. High-entropy Alloys with High Saturation Magnetization, Electrical Resistivity, and Malleability. *Sci. Rep.* 3, 1455; DOI:10.1038/srep01455, 2013.



CIÊNCIA E TECNOLOGIA:  
IMPLICAÇÕES NO ENSINO, PESQUISA E EXTENSÃO

# FEPEG

F Ó R U M  
ENSINO • PESQUISA • EXTENSÃO • GESTÃO

REALIZAÇÃO:



APOIO:

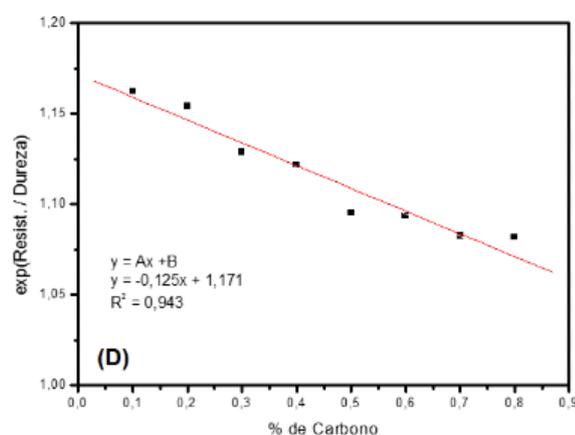
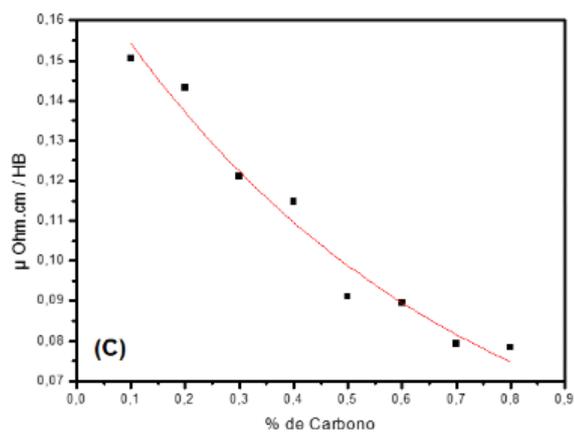
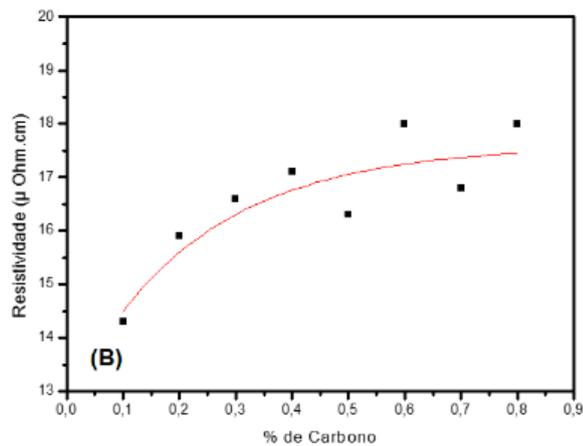
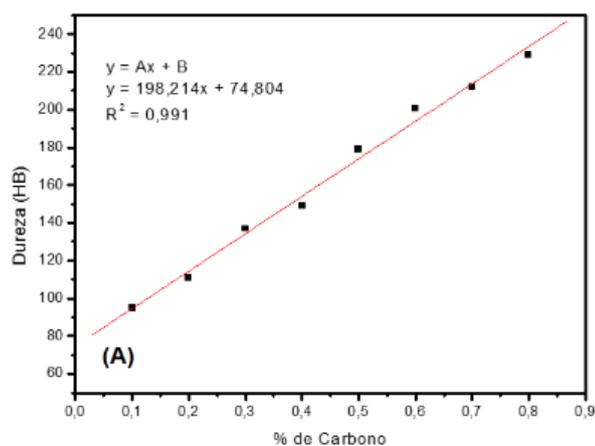


ISSN: 1806-549X

Tabela 1. Propriedades dos Aços ao Carbono.

AÇO	DUREZA (HB)	RESISTIVIDADE ( $\mu\text{W}\cdot\text{cm}$ )
1010	95	14,3
1020	111	15,9
1030	137	16,6
1040	149	17,1
1050	179	16,3
1060	201	18,0
1070	212	16,8
1080	229	18,0

Disponível em: <[www.matweb.com](http://www.matweb.com)>.





CIÊNCIA E TECNOLOGIA:  
IMPLICAÇÕES NO ENSINO, PESQUISA E EXTENSÃO

# FEPEG

F Ó R U M  
ENSINO • PESQUISA • EXTENSÃO • GESTÃO

REALIZAÇÃO:



APOIO:



ISSN: 1806-549X

**Figura 1.** Curvas de comportamento entre as propriedades de resistividade e dureza em função do teor de carbono no aço: curva de dureza em função da porcentagem de carbono (A); curva de resistividade em função da porcentagem de carbono (B); curva resultante da relação entre a razão resistividade / dureza, em função do teor de carbono (C); relação entre resistividade, dureza e teor de carbono, calculada por meio do modelo exponencial (D).