



CARACTERIZAÇÃO MAGNÉTICA DE AÇO COM A SUPERFÍCIE ENDURECIDA¹

*Gustavo Rodrigues da Silva²
Ricardo Baiotto³
Rodrigo Panosso Zeilmann⁴
Frank Patrick Misselt⁴*

Resumo

Medidas da espessura da camada endurecida em aços é importante para o controle de qualidade das peças e para o controle do processo de tratamento térmico. O método tradicional, via medidas de microdureza, é destrutiva e consome tempo. Ensaio não-destrutivo empregando técnicas magnéticas (curva de histerese e ruído Barkhausen) oferecem uma alternativa rápida para solucionar este problema. Neste trabalho comparamos resultados magnéticos nos aços AISI 1045, 1050 e 1548 cujas superfícies foram endurecidas por indução e as respectivas medidas de microdureza.

Palavras-chave: Ensaio não-destrutivo; Aço-carbono; Curva de histerese; Ruído Barkhausen; Microdureza.

MAGNETIC CHARACTERIZATION OF STEEL WITH A HARDENED SURFACE

Abstract

Measurements of the thickness of the hardened surface layer on steel is important for quality control as well as for process control. The traditional method, via hardness measurements is destructive and time consuming. Non-destructive evaluations employing magnetic methods (hysteresis curves and Barkhausen noise) offer a rapid alternative for solving this problem. In this work we compare the results of a magnetic characterization of AISI 1045, 1050 and 1548 steels whose surface had been induction-hardened and the respective microhardness measurements.

Key words: Non-destructive evaluation; Carbon steel; Hysteresis curve; Barkhausen noise; Microhardness.

¹ *Contribuição técnica ao 65º Congresso Anual da ABM, 26 a 30 de julho de 2010, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.*

² *Bacharel, UCS-Universidade de Caxias do Sul.*

³ *Aluno, UCS-Universidade de Caxias do Sul.*

⁴ *Doutor, UCS-Universidade de Caxias do Sul.*

1 INTRODUÇÃO

Medidas da espessura da camada endurecida em aços são importantes para o controle da qualidade das peças e para o controle do processo de tratamento térmico. A maneira tradicional de proceder envolve medidas de microdureza em que indentações são feitas da superfície até o núcleo da peça para determinar o perfil da microdureza. Este método é destrutivo e consome tempo. Assim, vários outros métodos vem sendo desenvolvidos, inclusive técnicas eletromagnéticas. Neste trabalho pretendemos utilizar caracterizações magnéticas para examinar o problema de determinar a espessura de uma camada endurecida na superfície de um aço.

Medidas de ruído magnético de Barkhausen (RB) e análises de curvas de histerese tem sido usadas para determinar o estado de tensões residuais em aços.⁽¹⁾ Quando um material ferromagnético é sujeito a um campo magnético variável, mudanças abruptas na indução magnética induzem pulsos de voltagem numa bobina em torno do corpo de prova. Este fenômeno é conhecido como RB e é sensível à microestrutura do material. Bach *et al.*⁽²⁾ e Dubois e Fiset⁽³⁾ usaram RB para avaliar a espessura de uma camada superficial modificada de um aço. Bach *et al.*⁽²⁾ relacionaram a razão entre as alturas de dois picos de RB com a espessura da camada endurecida. Dubois e Fiset procuraram uma correlação entre a espessura e o espectro integrado de frequências de RB. Estes trabalhos foram criticados⁽⁴⁾ por não considerar as variações na microestrutura da camada endurecida. Vaidyanathan *et al.*⁽⁴⁾ consideraram cuidadosamente a microestrutura da camada endurecida para explicar pequenas variações nas posições dos dois picos no espectro de RB. Fizeram também uma correlação das amplitudes dos picos com a espessura da camada modificada. Jiles *et al.*⁽⁵⁾ estudaram a variação com frequência dos picos de RB para identificar a sua origem e comentar as modificações induzidas numa camada superficial por *shot peening*. Uma patente recente⁽⁶⁾ também utiliza a integração do sinal RB sobre uma faixa de frequências para tornar mais sensível um método para determinar a espessura da camada endurecida. Moorthy *et al.*⁽⁷⁾ estudaram o efeito de tensões aplicadas sobre os picos de RB para corpos de prova com espessuras endurecidas diferentes. Para o corpo de prova com a camada endurecida mais fina, onde era possível observar dois picos de RB, o pico em baixos campos, proveniente do interior do corpo de prova, era bem mais sensível à tensão aplicada do que o pico em altos campos magnéticos (superficial). A sistemática nas variações no comportamento de RB com tensão aplicada indicam uma redistribuição de tensão residual ocorrendo nas regiões próxima e abaixo da superfície devido a deformação plástica constrangida pela presença da camada endurecida.

Além das medidas de RB, curvas de histerese magnética tem sido usado para determinar a espessura de camadas endurecidas em aço. Por exemplo, Zhang *et al.*⁽⁸⁾ utilizaram medidas da susceptibilidade magnética χ e da indução magnética B para estimar aquela espessura. Eles empregaram um modelo de duas camadas para descrever seu corpo de prova: uma camada uniforme e homogênea de material duro no exterior de um cilindro de material mole, também uniforme e homogênea. Medidas de B concordaram bem com o perfil de microdureza. Lo *et al.*⁽⁹⁾ encontraram boa concordância entre grandezas obtidas da curva de histerese e o perfil da microdureza. Johnson *et al.*⁽¹⁰⁾ investigaram uma ideia básica de todas essas tentativas: a correlação entre o perfil de microdureza e o perfil de uma grandeza eletromagnética. Encontraram que a condutividade elétrica e a coercividade magnética seguiram melhor o perfil da microdureza. O modelo de duas camadas tem sido usado extensivamente⁽¹¹⁾ para modelar um outro método para

determinar a espessura da camada endurecida: medidas da diferença de potencial ao longo de uma barra para correntes alternadas.

2 MATERIAL E MÉTODOS

Os corpos de prova foram fabricados na Susin Francescutti Ltda a partir de cilindros maciços (diâmetro = 50 mm) de aço AISI 1045, 1050 ou 1548. Foram aquecidos acima de 720°C por indução, com potências e durante tempos variáveis, e depois resfriados rapidamente em água, assim formando uma camada predominantemente martensítica na superfície. Discos (espessura de 10 mm) foram cortados dos cilindros e foram montados e polidos para medidas de microdureza. Para este fim, usamos um microdurômetro Shimadzu, modelo HMV-2, com uma carga de 1 kg., de acordo com a norma NBR NM 188-1. O perfil de dureza num corpo de prova típico é visto na Figura 1.

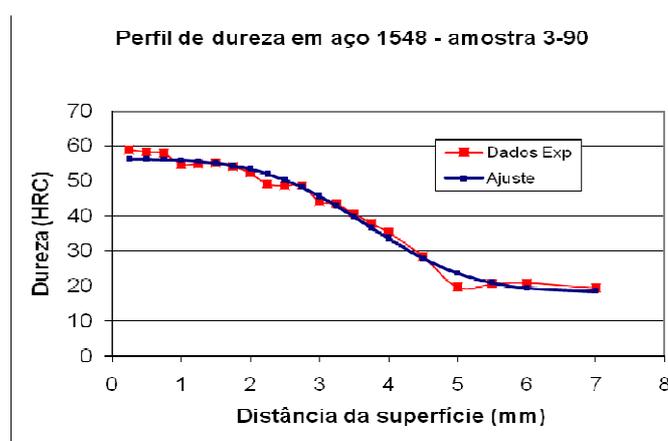


Figura 1. Perfil de microdureza (HRC) em aço 1548. Mostramos os pontos experimentais e um ajuste aos dados.

O perfil experimental foi aproximado por uma curva teórica da seguinte forma:⁽⁸⁾

$$y = c_1 \operatorname{erfc} \left\{ (t - \lambda_1) / \lambda_2 \right\} + c_2 \quad (1)$$

para extrair parâmetros como a dureza e a distância onde o incremento superficial da dureza cai a metade (λ_1). A função erro complementar $\operatorname{erfc}(x)$ tem a sua definição usual. Na equação acima, t representa a distância radial abaixo da superfície e y representa a dureza Rockwell HRC. A dureza da superfície é dada por $2c_1 + c_2$, enquanto c_2 representa a dureza do núcleo. λ_1 e λ_2 governam a largura da camada dura e a largura da transição. Para a curva teórica da figura 1, $\lambda_1 = 3,7$ mm e $\lambda_2 = 1,7$ mm.

Após as medidas de dureza, a parte central de alguns discos foi removida resultando em corpos de prova com forma de toroide com diâmetro externo de 50 mm e interno de 30 mm. Um primário ($N_1 = 100$ espiras de fio 24 AWG) e um secundário ($N_2 = 200$ espiras de fio 38 AWG) foram enrolados no toroide para as medidas magnéticas. Curvas de histerese magnética foram obtidas para frequências de 0,05-60 Hz com um Traçador de Curvas de Histerese (TCH) da Globalmag Ltda.

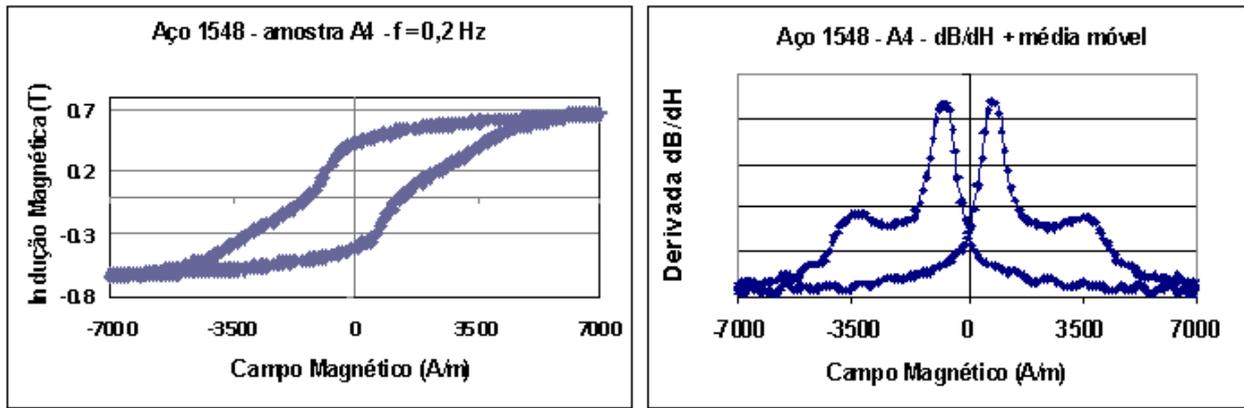


Figura 2. Curva de histerese para $f = 0,2$ Hz (esquerda) e derivada da mesma curva (direita).

Para frequências abaixo de 1 Hz, é possível observar a presença de duas transições. A derivada da curva de histerese mostra isto claramente. O pico maior, localizado em torno de $H \sim 800$ A/m, corresponde ao sinal proveniente do interior da peça, enquanto o pico menor, localizado em torno de $H \sim 3500$ A/m, vem da camada dura na superfície. O estudo de toroides permite controlar as proporções relativas dos materiais duro e mole no corpo de prova de medidas magnéticas. Além disso, permite determinar com certa precisão o campo coercivo associado com cada contribuição, uma vez que os campos magnéticos aplicados ao corpo de prova estão bem definidos.

Por outro lado, ensaios magnéticos não-destrutivos devem ser realizados a partir da superfície da peça. Neste caso, a grandeza preferida é o ruído magnético de Barkhausen (RB). O sistema usado para medir RB na Universidade de Caxias do Sul é mostrado no diagrama de blocos da Figura 3. Um gerador de sinais (Stanford modelo DS345) envia uma onda senoidal (em torno de $f = 1$ Hz) ao amplificador bipolar Kepco (BOP 36-6M) e depois para um filtro passa-baixo. Este sinal alimenta o enrolamento do *yoke* de ferrite (não mostrado) que magnetiza o corpo de prova no sentido circumferencial. O ruído Barkhausen é captado por um sensor (não mostrado) e depois amplificado e filtrado (5-100 kHz). Tanto o *yoke* como o sensor foram fabricados de ferrite de MnZn enrolados com fio de cobre. Para garantir um bom acoplamento magnético entre o *yoke*/sensor e o corpo de prova, as superfícies de contato do *yoke* e do sensor foram fabricadas com a mesma curvatura do que a do corpo de prova. Uma placa de aquisição de dados da IOTech (16 bits, 1 MHz) capta os sinais do sensor e armazena tudo num microcomputador. A voltagem rms do RB dos pontos num pequeno intervalo de campo magnético é calculado e depois o intervalo de integração é deslocado. Assim obtemos o envelope do RB em função do campo magnético. Resultados obtidos com este sistema serão apresentados em seguida.

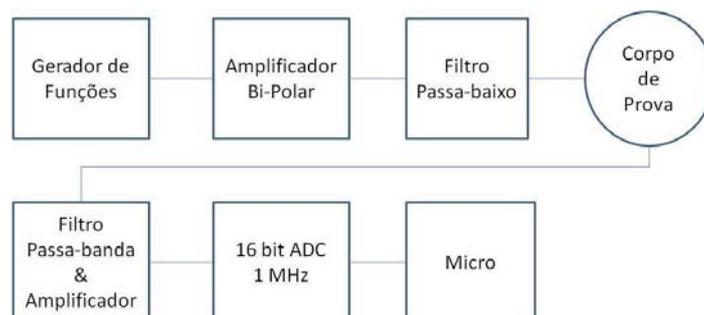


Figura 3. Diagrama de blocos do sistema para medir ruído de Barkhausen.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção começamos apresentando resultados para os perfis de dureza em cilindros de aço 1045 e 1050. Para cada tipo de aço, corpos de prova foram preparados em dois cilindros maciços via indução. A potência e os tempos de tratamento foram escolhidos para produzir no cilindro de aço 1050 quatro regiões endurecidas com espessuras variadas. Um cilindro foi mantido intacto para as medidas magnéticas, enquanto o outro foi cortado para as medidas de dureza. Como pode ser visto no lado direito da Figura 4, onde apresentamos medidas ao longo de quatro direções ortogonais, a camada superficial possui boa uniformidade. Os dados de aço 1050 podem ser bem representados pela equação (1) apresentada acima. Ajustando os dados da figura à equação 1, encontramos $\lambda_1 = 4,0$ mm e $\lambda_2 = 0,7$ mm, enquanto $c_1 = 17$ HRC e $c_2 = 24$ HRC.

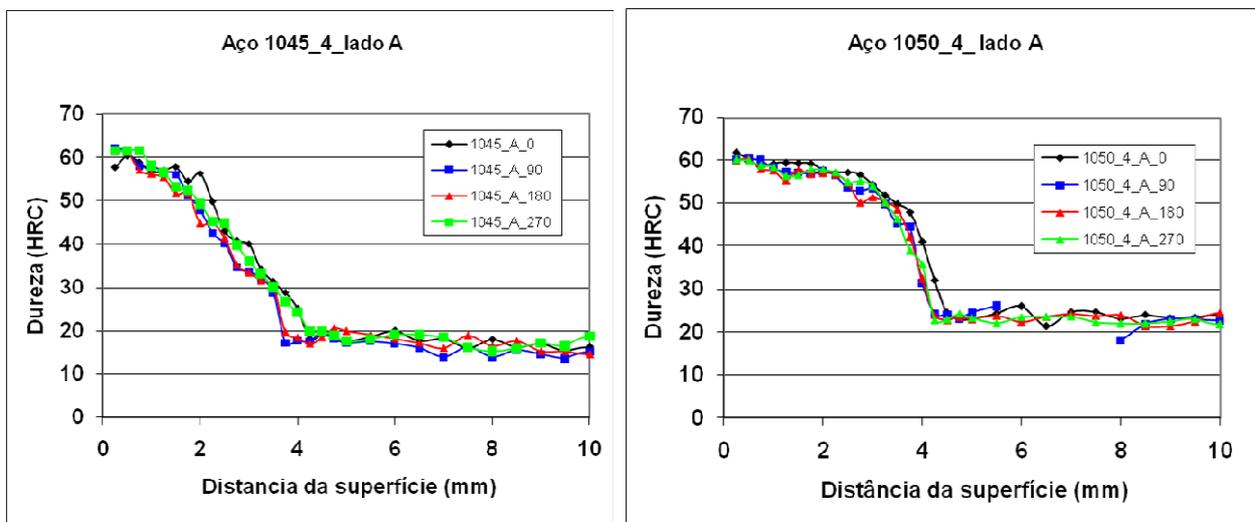


Figura 4. Perfis de dureza ao longo de quatro direções ortogonais, produzidos por indução em cilindros de aço 1045 e 1050.

Para o aço 1045, parâmetros semelhantes (potência e tempo) foram usados para produzir regiões endurecidas ao longo de dois cilindros. Um cilindro foi preservado para medidas magnéticas e o outro foi cortado para medidas de dureza. Encontramos a mesma uniformidade nos perfis de dureza do aço 1045, também mostrados na Figura 4. As transições são mais largas e a camada dura é mais fina. Neste caso, o melhor ajuste da equação (1) aos dados experimentais é dado por $\lambda_1 = 3,0$ mm e $\lambda_2 = 1,2$ mm, enquanto $c_1 = 20$ HRC e $c_2 = 18$ HRC.

Medidas de RB foram realizadas ao longo do cilindro de aço 1050 em posições separadas por 1 cm.. Os resultados são mostrados na figura abaixo onde mostramos, em função da distância ao longo da barra de aço, o envelope da voltagem rms associado ao primeiro pico de RB, aquele correspondendo ao sinal que vem do núcleo mole do cilindro. Os mínimos de voltagem correspondem às regiões que sofreram o tratamento superficial. Nestas regiões o sinal do núcleo mole da barra é reduzida.

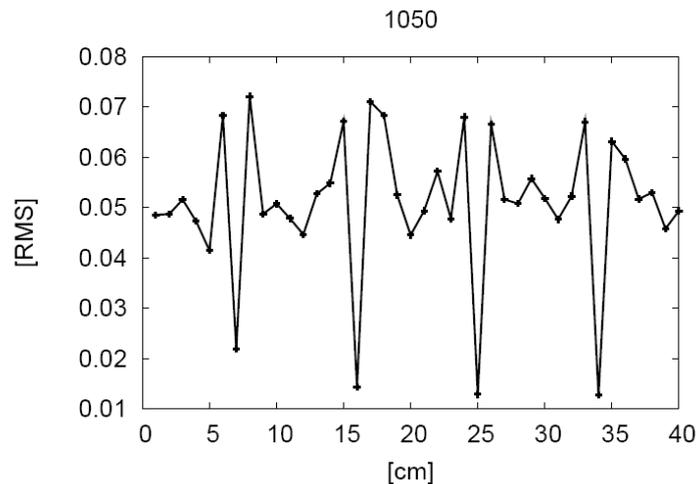


Figura 5. Voltagem rms do RB em função da posição ao longo do cilindro. Os mínimos de voltagem correspondem às regiões que sofreram o tratamento superficial. Nestas regiões o sinal do núcleo mole da barra é reduzida.

Podemos fazer um gráfico dos valores da voltagem RB em função da espessura medida da camada dura, obtendo o resultado apresentado na figura 6. A linha ligando os pontos está presente apenas para guiar o olho.

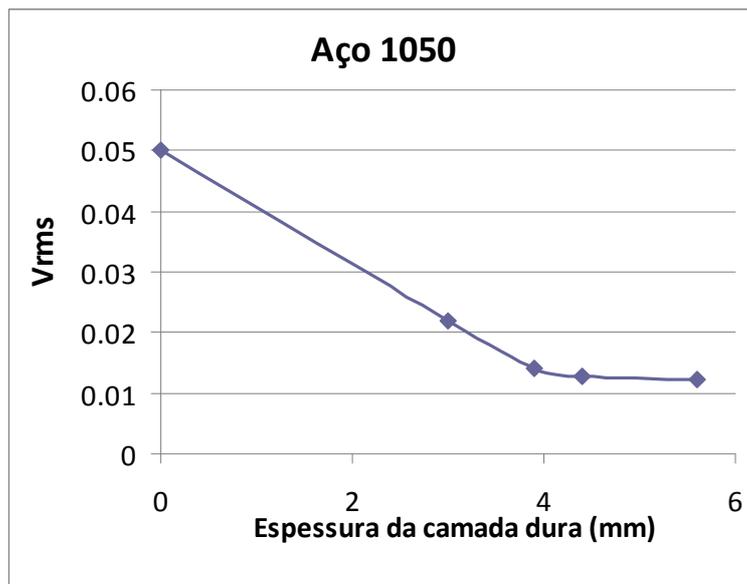


Figura 6. Sinal Barkhausen vs. espessura da camada dura.

Para ter uma curva de calibração para usar, por exemplo, numa linha de produção seria conveniente ter resultados para camadas duras com espessuras mais finas. Mas este resultado demonstra a possibilidade de aplicar medidas de RB para determinar a espessura de uma camada dura na superfície de um cilindro de aço 1050. Para melhorar este resultado, uma série de medidas devem ser tomadas para aumentar o sinal proveniente do núcleo mole da peça e reduzir o ruído associado à camada dura.

O uso de RB para medir a espessura de uma camada na superfície de um aço depende da possibilidade de observar sinais RB da superfície, mas principalmente do núcleo do material. Medidas de RB, em princípio, tem um alcance muito grande, talvez entre 0,01 e 1,0 mm para frequências entre 0,5 kHz e 10 MHz.



Estes são os valores calculados a partir da equação clássica para a distância de penetração (skin depth):

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \sigma \mu}} \quad (2)$$

onde f é a frequência, σ é a condutividade, e μ é a permeabilidade do material em questão. De fato, as grandezas nesta equação frequentemente são difíceis de determinar, especialmente num corpo de prova multifásico. De qualquer forma, uma primeira providência a ser tomada seria examinar ruído Barkhausen correspondendo a frequências mais baixas. A utilização de uma baixa frequência também foi enfatizada na Ref. 6. Aquela referência também insistiu na necessidade de otimizar o valor do campo magnético usado para a medida para minimizar o ruído associado à camada dura. Finalmente, é importante reconhecer que a curva da figura 6 vale somente para as condições daquela medida. Para um caso particular, é necessário construir uma curva de calibração para o material e processo em questão.

4 CONCLUSÃO

Neste trabalho, camadas duras foram produzidas por aquecimento indutivo na superfície de cilindros de aço 1045, 1050, e 1548. Medidas de microdureza mostraram que as espessuras das camadas eram bem uniformes. Medidas de curvas de histerese mostram duas transições magnéticas. O pico maior na susceptibilidade magnética, localizado em torno de $H \sim 800$ A/m, corresponde ao sinal proveniente do interior da peça, enquanto o pico menor, localizado em torno de $H \sim 3500$ A/m, vem da camada dura na superfície. Utilizando um yoke/sensor em bom contato com a superfície do cilindro, foi possível observar ruído magnético de Barkhausen proveniente do núcleo mole do cilindro. Observamos uma relação aproximadamente linear entre a amplitude do sinal Barkhausen e a espessura medida da camada dura, para camadas mais finas. Finalmente, comentamos a necessidade de aumentar a razão sinal/ruído para tornar este método mais sensível e possibilitar seu uso com camadas mais espessas.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq e à FINEP pelo apoio financeiro. Os corpos de prova foram fornecidos por Paulo Braghini da Susin-Francescutti Ltda. Mariana C. Zanotto fez as medidas de microdureza e Gunther Gerhardt ajudou com as análises numéricas.

REFERÊNCIAS

- 1 JILES, D. C. Review of magnetic methods for non-destructive evaluation. *NDT International* v. 21, pp. 311-319, 1988.
- 2 BACH, G., GOEBBELS, K., e THEINER, W. A. Characterization of hardening depth by Barkhausen noise measurement. *Mater. Eval.* v. 46, pp. 1576-1580, 1988.
- 3 DUBOIS, M. e FISET, M. Evaluation of case depth on steels by Barkhausen noise measurement *Mater. Sci. Technol.* v. 11, pp. 264-267, 1995.
- 4 VAIDYANATHAN, S., MOORTHY, V., JAYAKUMAR, T., RAJ, B. Evaluation of induction hardened case depth through microstructural characterization using magnetic Barkhausen emission techniques. *Mater. Sci. Technol.* v. 16, pp. 202-208, 2000.
- 5 JILES, D. C., KERN, R., THEINER, W. A. Evaluation of surface modifications in high strength steels. *Nondestructive Testing & Evaluation* v. 10, pp. 317-331, 1993.

- 6 NUMMILA, K., SEPPÄ, H., VARPULA, T. Method for determining the hardening depth of steel. US Patent 7259555, August 21, 2007.
- 7 MOORTHY, V., SHAW, B.A., DAY, S. Evaluation of applied and residual stresses in case-carburised En-36 steel subjected to bending using the magnetic Barkhausen technique. *Acta Materialia* v. 52, pp.1927–1936, 2004.
- 8 ZHANG, C., BOWLER, N., LO, C. Magnetic characterization of surface-hardened steel. *J. Magn. Magn. Mater.* v. 321, pp. 3878-3887, 2009.
- 9 LO, C. C. H., KINSER, E. R., MELIKHOV, Y., JILES, D. C. Magnetic non-destructive characterization of case depth in surface-hardened steel components. *AIP Conf. Proc.* v. 820, pp. 1253-1260, 2006.
- 10 JOHNSON, M., LO, C., HENTSCHER, S., KINSER, E. Analysis of conductivity and permeability profiles in hardened steel. *Electromagnetic Nondestructive Evaluation (IX)*, eds. UDPA, L. e BOWLER, N. (IOS Press, 2005) pp. 135-142.
- 11 BOWLER, J. R., HUANG, Y., SUN, H., BROWN, J., BOWLER, N. Alternating current potential-drop measurement of the depth of case hardening in steel rods. *Meas. Sci. Technol.* v. 19, 075204 (8pp), 2008.