

DETERMINAÇÃO DA ESPESSURA DA CAMADA ENDURECIDA EM AÇO POR MEIO DO RUÍDO BARKHAUSEN¹

Alessandra Drehmer²
Günther Johannes Lewczuk Gerhardt³
Frank Patrick Missell⁴

Resumo

O endurecimento da superfície de aços é utilizado para reduzir desgaste. O presente trabalho utiliza medições de ruído Barkhausen, como método de análise não-destrutivo, para determinar as espessuras de camadas endurecidas em aço SAE 1020. Nas análises de ruído Barkhausen, foram utilizados tanto o envelope RMS dos pulsos de Barkhausen como as transformadas rápidas de Fourier (FFT). A amplitude da FFT, uma função da frequência, foi associada com a distância a partir da superfície para cada amostra por meio da equação de distância de penetração de ondas eletromagnéticas (skin depth). Finalmente, um índice de potência normalizada (IPN) foi calculado e utilizado para relacionar com as espessuras endurecidas na superfície das amostras. O IPN é discutido em relação à microestrutura da camada endurecida e ao núcleo de amostra. As propriedades magnéticas obtidas mostraram-se consistentes com o teor de martensita na microestrutura. As limitações da técnica são discutidas.

Palavras-chave: Aço SAE1020; Ruído Barkhausen; Transformada de Fourier - FFT.

CASE DEPTH DETERMINATION IN STEEL USING BARKHAUSEN NOISE

Abstract

The surfaces of steels are hardened to reduce wear. The present paper utilizes Barkhausen noise measurements as a non-destructive evaluation technique to determine the thickness of hardened layers on SAE 1020 steel. In the Barkhausen noise analyses, both the RMS envelope of the Barkhausen pulses and the fast Fourier transforms (FFT) were utilized. The amplitude of the FFT, a function of frequency, was associated with distance from the sample surface through the skin depth equation. A normalized power index (IPN) was defined and related to the hardened surface layers on the samples. The IPN is discussed in relation to the microstructure of the surface layer and the core. The magnetic properties obtained are consistent with the microstructure. The limitations of the technique are discussed.

Key words: SAE1020 steel; Barkhausen noise; Fast Fourier Transform - FFT.

¹ *Contribuição técnica ao 68º Congresso Anual da ABM - Internacional, 30 de julho a 2 de agosto de 2013, Belo Horizonte, MG, Brasil.*

² *Engenheira de produção, Mestre, Universidade de Caxias do Sul (UCS), RS, Brasil.*

³ *Físico. Professor Dr., Universidade de Caxias do Sul (UCS), RS, Brasil.*

⁴ *Físico, Professor Dr., Universidade de Caxias do Sul (UCS), RS, Brasil; fmissell@yahoo.com.*

1 INTRODUÇÃO

O avanço tecnológico constante implica, cada vez mais, na obtenção de materiais com melhor desempenho e qualidade. Uma técnica muito comum no processamento de aços é o endurecimento da sua superfície por este proporcionar um aumento na resistência ao desgaste, com conseqüente maior vida útil do componente.⁽¹⁾

A determinação da espessura da camada endurecida na superfície de um aço é um fator importante para o controle da qualidade das peças e para um controle do processo de tratamento térmico. Além disso, a determinação da espessura dura que esteja sobrando numa peça é vantajosa para o planejamento do remodelamento dessa peça. A maneira tradicional de determinar um perfil de dureza utiliza medidas de microdureza, onde endentações são feitas da superfície até o núcleo da peça. Uma vez que a peça deve ser cortada e polida, este método é destrutivo e consome tempo. Assim, vários outros métodos vêm sendo desenvolvidos, dentre eles técnicas baseadas em propriedades magnéticas.⁽²⁾

Neste trabalho foi estudado um método magnético de determinar a espessura de camadas duras em amostras de aço SAE 1020. Ao final é feita uma breve discussão sobre os limites da técnica proposta e de que forma poderia ser utilizada em processos automatizados de fabricação.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

O material escolhido para este estudo foi o aço SAE 1020 cuja composição química é apresentada no Quadro 1. Com este aço foram produzidas três amostras planas, com 23 mm de altura, 48 mm de largura e 20 cm de comprimento cuja cementação foi feita na empresa Tecnohard e a têmpera na Universidade de Caxias do Sul e, duas amostras do mesmo aço cementadas e temperadas industrialmente na empresa Tecnohard.

Quadro 1. Composição Química do Aço SAE1020 – 27 de março de 2012

% C 0,192	% Si 0,171	% Mn 0,693	% P 0,03	% S 0,013	% Cr 0,029	% Mo 0,005
% Ni 0,005	% Al 0,009	% Co 0,05	% Cu 0,013	% Nb 0,005	% Ti 0,003	% V 0,005
% W 0,05	% Sn 0,006	% Fe 98,845				

A determinação da dureza e das espessuras das camadas endurecidas nas amostras, medidas de microdureza (método tradicional destrutivo), foram feitas a fim de se verificar a homogeneidade das camadas superficiais ao longo das amostras e para controle/comparativo com as medidas magnéticas de RB.

Para obtenção dos perfis de dureza utilizou-se um microdurômetro Shimadzu (HMV-2) com microscópio acoplado ao microcomputador e a uma câmara CCD, com carga de 300 g. Um exemplo de perfil de dureza é mostrado na Figura 1.

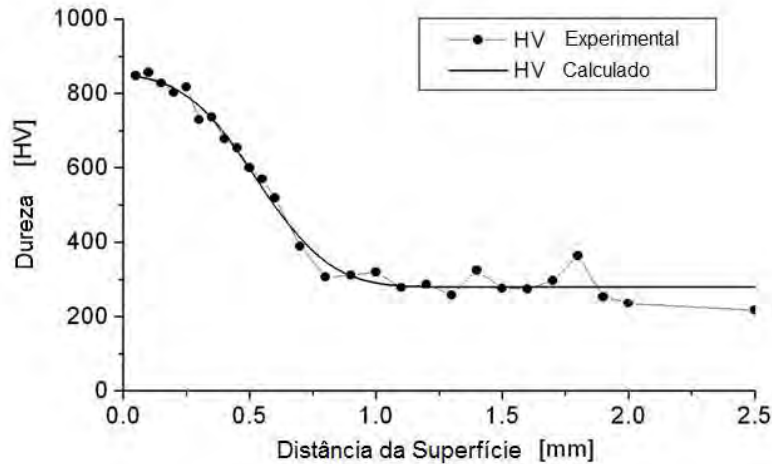


Figura 1. Exemplo de perfil de dureza (HV) - amostra 9510.

Os dados obtidos foram aproximados por uma curva teórica para extrair os parâmetros de dureza e média de dureza, de acordo com a equação (1) apresentada abaixo:

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

Onde t representa a profundidade radial sobre a superfície, y representa a dureza Vickers (HV), c_1 é um parâmetro linear, c_2 é a dureza do núcleo da amostra e λ_1 e λ_2 são respectivamente o ponto médio e a largura da transição.⁽³⁾

Para obtenção das imagens da microestrutura utilizou-se um microscópio ótico da marca Nikon modelo Epiphot 200, com câmera Nikon digital DXN 1200 F e software Nikon AC/71.

Para obtenção da curva de histerese dos aços estudados, toróides foram confeccionados utilizando as amostras como núcleo. As curvas de histerese foram geradas por um traçador de curva de histerese da Globalmag ajustado na frequência de 0,2 Hz. Um exemplo de uma curva de histerese e sua derivada é mostrado na Figuras 2a e 2b, respectivamente.

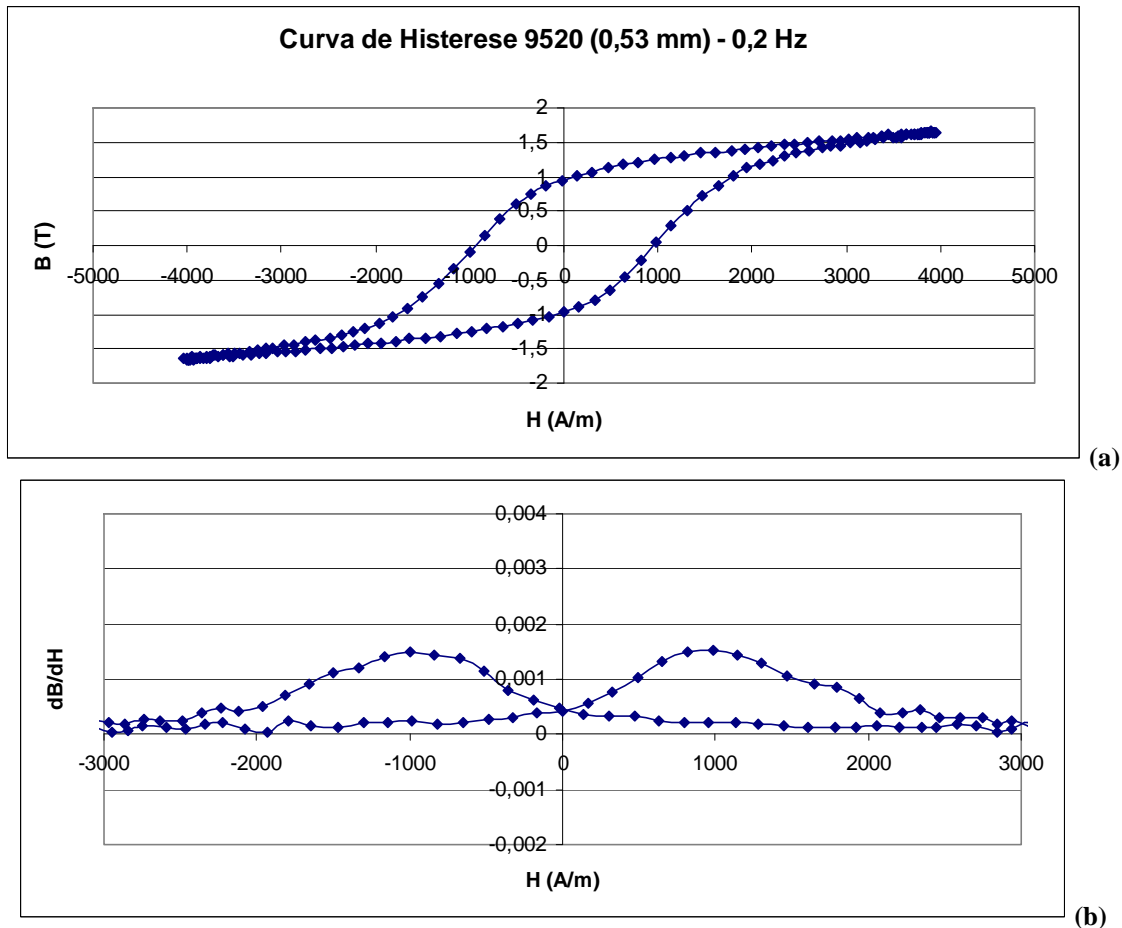


Figura 2. (a) Curva de histerese (b) Derivada da curva.

Os campos coercivos (H_c) são obtidos da derivada da curva de cada amostra tomando H_c na máxima da derivada da mesma. A permeabilidade magnética é obtida calculando a média de dB/dH sobre o intervalo de campo magnético aplicado. O sistema usado para captação do ruído Barkhausen (RB) (Figura 3), foi montado no Laboratório de Caracterização Magnética (LCM) da UCS.

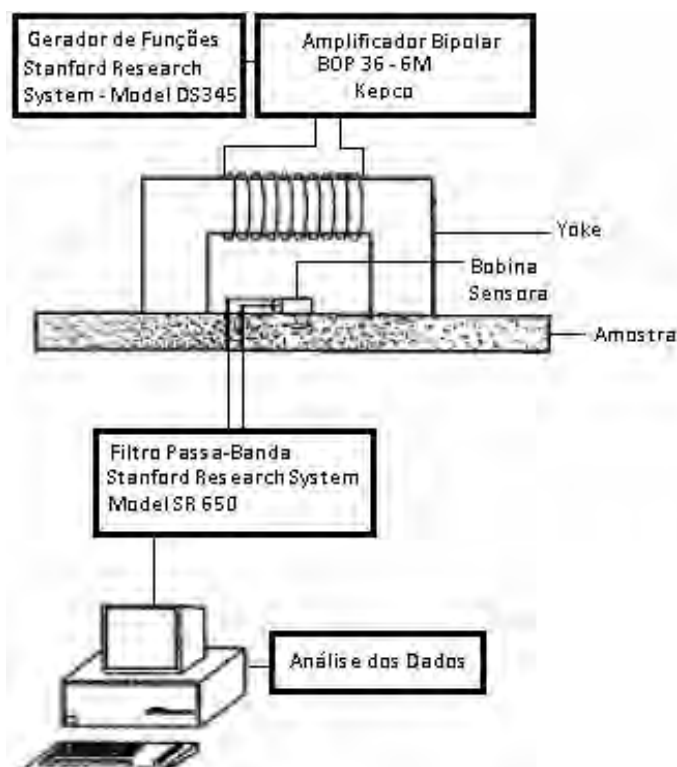


Figura 3. Esquema do equipamento utilizado para medir ruído Barkhausen.

Para medir o ruído Barkhausen, um gerador de funções (Stanford Research Systems DS345) emitiu um sinal triangular em uma baixa frequência, tipicamente 0,5 Hz. Este sinal foi amplificado por um amplificador bipolar (Kepeco BOP 36-6M) que, por sua vez, alimenta um yoke de MnZn com uma bobina (240 espiras de fio de cobre AWG 28) enrolada ao seu entorno que magnetizava a amostra. O campo magnético na superfície da amostra foi medido com uma sonda Hall (Lakeshore Cryotronics 475 DSP). O ruído Barkhausen foi capturado por um cilindro de MnZn enrolado com 400 espiras de fio de cobre AWG 42. O ruído foi filtrado e amplificado com um filtro passa banda (Stanford Research Systems SR640) cujo os limites de frequência são normalmente fixados em 300 Hz - 60 kHz. Doze conjuntos de dados foram recolhidos para cada amostra, com taxa de aquisição de 250 kHz, com uma placa de aquisição de dados (IOtech, 16 bits) e armazenadas em um computador para análise posterior.

Medidas de RB, em princípio, têm um alcance muito grande (entre 0,01 e 1,0 mm para frequências entre 0,5 kHz e 10 MHz). Estes valores podem ser calculados a partir da equação (2) clássica para a distância de penetração (*skin depth*) δ .⁽⁴⁾

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

Para aquisição dos dados, foi utilizado um sistema baseado no software Labview 8.6. Este sistema permite algumas análises preliminares do sinal, tais como RMS com janelas pré-definidas e FFT do sinal integral, permitindo que se tenha uma boa idéia, em tempo real, da qualidade do experimento.

A análise segue um paradigma de duas quantidades caracterizadoras com possível independência: as amplitudes e as frequências do sinal. Assim, cada uma das séries de RB, foi analisada da seguinte forma: inicialmente se calculou o valor RMS para

janelas de 1000 pontos usando-se uma janela de varredura (*moving window*) com passo de 10 pontos. Estas séries de RMS em função do campo aplicado (12 para cada amostra) foram utilizadas para se elaborar curvas médias de RMS em função do campo magnético aplicado.

Avaliando esses resultados para o RMS foi possível identificar duas regiões de sinal: uma referente ao centro do RB e uma segunda região de ruído de fundo. Empiricamente se pode verificar que o centro do RB ocupa em torno de 50000 pontos, de forma que esse valor foi utilizado para se definir duas regiões de comportamento distinto: a região do centro do RB e a região do ruído de fundo.

Para cada uma das séries foi calculada a FFT (transformada rápida de Fourier ou do inglês *Fast Fourier Transform*), de forma a que se possam mensurar as frequências predominantes na região do centro do RB e no ruído de fundo. Novamente foi feita uma média destas FFTs para cada uma das amostras, subtraindo-se alguns picos de ruído espúrios que eventualmente apareciam por contaminação externa (frequentemente 8 kHz).

Para comparar a FFT de qualquer amostra à da amostra normalizada (homogêneo), uma quantidade definida como o índice de potência normalizada (IPN) foi definida na forma da equação (3). O índice de potência normalizada é, portanto:

$$IPN = \frac{P_S(f) - P_N(f)}{P_N(f) - P_B(f)} \quad (3)$$

Onde $P_S(f)$ é o espectro de potência da amostra endurecida, $P_N(f)$ é o espectro de potência da amostra normalizada, e $P_B(f)$ é espectro de potência do ruído de fundo.⁽⁵⁾

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 1 são apresentados os dados dos perfis de dureza das amostras SAE 1020 planas.

Tabela 1. Dados dos perfis de dureza das amostras estudadas. Dezembro de 2012

Amostra	λ_1	λ_2	C_1	C_2	Dureza (HV)	
					Superfície	Núcleo
9200	0	0	0	0	120	120
9210	0,32	0,33	235	405	851	405
9230	0,67	0,57	255	375	851	335
9410	0,34	0,58	420	218	848	218
9510	0,52	0,33	312	203	824	203
9520	0,53	0,32	290	280	848	279

Com base nos perfis de dureza, observou-se que o tratamento termoquímico e térmico para todas as amostras gerou uma dureza superficial, em torno de 800 HV, dureza característica da microestrutura de martensita. No entanto, o núcleo de algumas amostras endureceu acima do valor esperado, pois para ferrita/perlita espera-se uma dureza abaixo de 200 HV. Vale salientar que, as amostras 9210, 9220 e 9230, cuja dureza de núcleo ficou acima de 335 HV, foram tratadas termicamente em ambiente industrial.

As micrografias permitiram identificar visualmente as diferenças microestruturais entre a camada e o núcleo. Observando-se a imagem da microestrutura presente na

camada dura da amostra 9230 (Figura 4a) nota-se que a mesma contém microestrutura martensítica. Já o núcleo da amostra 9230 (Figura 4 b) possui uma microestrutura diferente das amostras temperadas na Universidade de Caxias do Sul. No entanto, a microestrutura condiz com a dureza de núcleo encontrada (Tabela 1). A amostra 9210 possui a mesma microestrutura de camada e núcleo da amostra 9230.

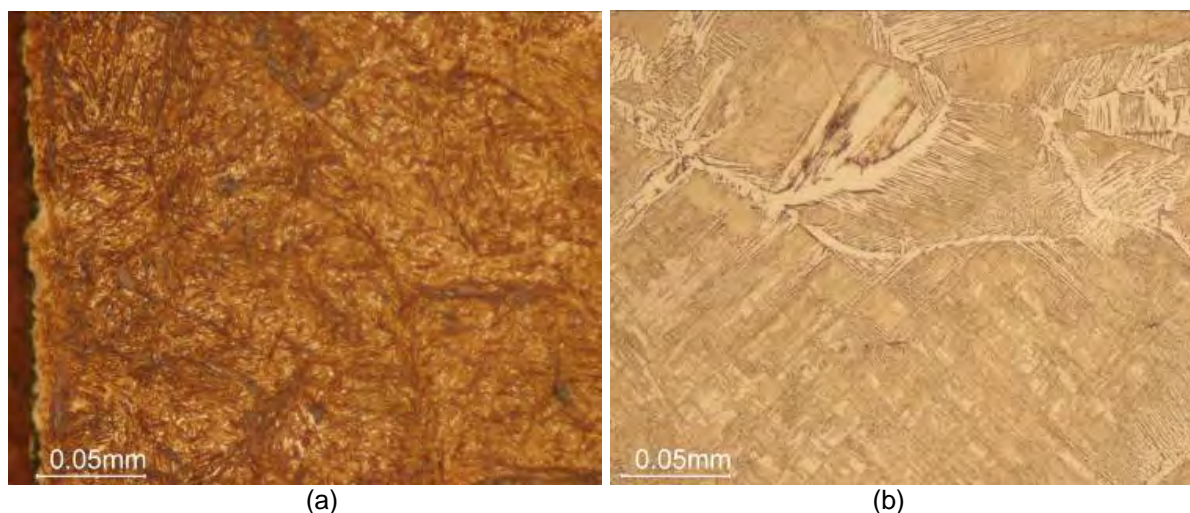


Figura 4. Micrografias da camada endurecida (a) e do núcleo (b) da amostra 9230 após a cementação e têmpera com aumento de 500 X por microscopia ótica.

As amostras 9410, 9510 e 9520 tiveram a cementação feita industrialmente pela empresa Tecnohard e tratamento térmico feito na Universidade de Caxias do Sul 10 minutos à temperatura de 870°C, seguida de resfriamento rápido em água.

Um exemplo da microestrutura encontrada na camada e núcleo da amostra 9410 é mostrado nas Figuras 5a e 5b, respectivamente.

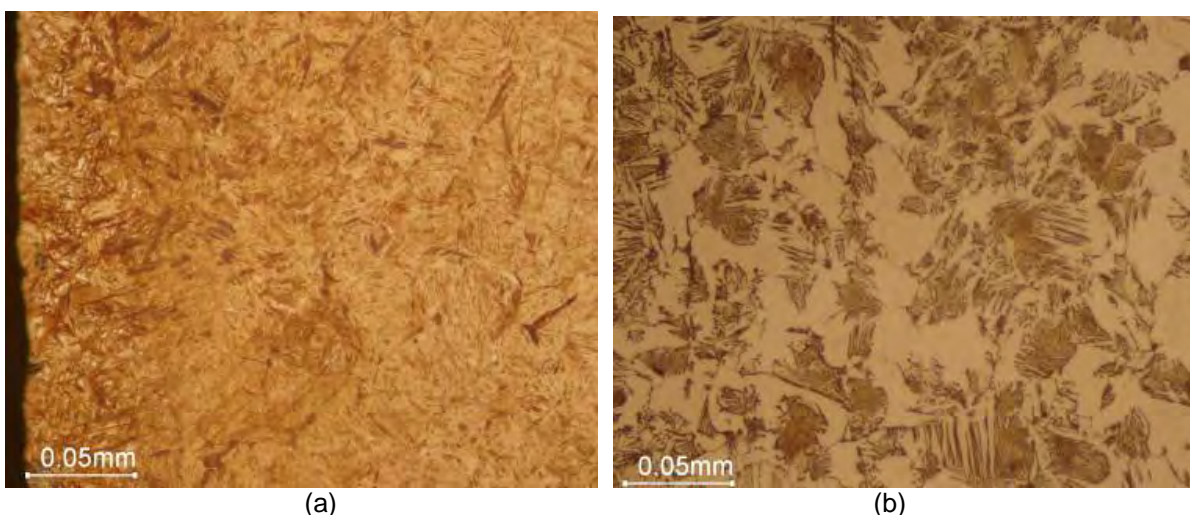


Figura 5. Exemplo de imagem da microestrutura da camada da amostra (a) e do núcleo (b) da amostra 9410 com aumento de 500 X.

Para determinar a permeabilidade magnética foi feita uma média dos valores obtidos da curva de histerese no intervalo de campo aplicado. Por exemplo, a permeabilidade relativa média para a amostra 9520, em um intervalo de campo de $-4000 \text{ A/m} < H < 4000 \text{ A/m}$ resulta em 223. Valores maiores resultam do uso de um intervalo de campo menor.

Para cada amostra, 12 conjuntos de dados foram coletados. A média dos valores de RMS dos 12 conjuntos são apresentados na Figura 6 para a amostra normalizada, o núcleo, e para três amostras designadas pelos valores do ponto médio de transição dureza.

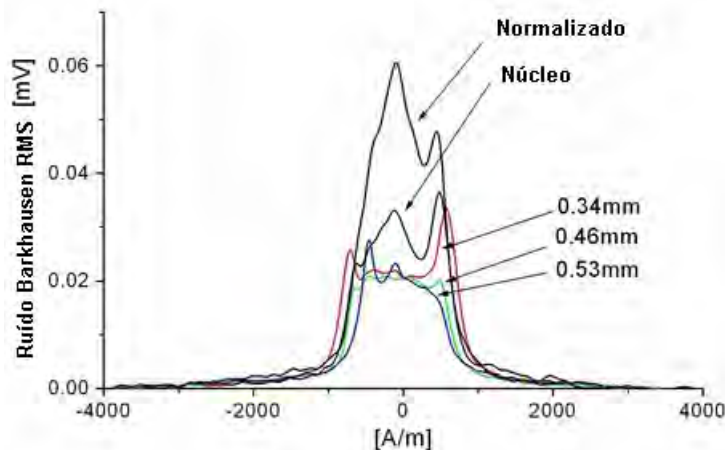


Figura 6. RMS dos envelopes de ruído Barkhausen para a amostra normalizada, o núcleo e três amostras em função do campo externo aplicado.

Como pode ser observado na Figura 6, o formato destes envelopes de RMS são bem irregulares, mas servem para definir duas regiões com respeito à energia do sinal. Uma região central com maior energia e uma região limítrofe de maior campo e com menor energia.

A existência de uma dependência do sinal de RB com a frequência pode ser evidenciada quando se analisa a equação para distância de penetração (Equação 2). Utilizando a equação de distância de penetração, *skin depth*, determina-se a distância de penetração de ondas eletromagnéticas e, assim, à medida que se tem interesse de se observar as contribuições tanto da camada como do núcleo torna-se necessário o uso de baixas frequências.

A dependência do RB com a frequência foi evidenciada por alguns trabalhos, como por exemplo, Bach, Goebbels e Theiner,⁽⁷⁾ que utilizaram baixas frequências de excitação no *yoke* a fim de observar as contribuições tanto da camada como do núcleo, Dubois e Fiset⁽⁸⁾ que utilizaram frequências em torno de 50 a 250 kHz porém sem terem obtido bons resultados possivelmente por terem utilizado frequências altas, Numilla, Seppä e Varpula⁽⁹⁾ que enfatizam em sua patente o uso de baixas frequências e Lo⁽⁵⁾ que mostra experimentalmente a importância das baixas frequências para determinação de espessuras de camadas endurecidas em aços.

Neste trabalho, para se estudar esta dependência do ruído Barkhausen com a frequência, transformadas de Fourier (FFT) foram calculadas numericamente a partir dos dados experimentais (Figura 7). Como apresentado na Figura 8, cada série de Barkhausen foi dividida em dois segmentos, ruído de fundo e ruído Barkhausen, cada uma contendo 50.000 pontos.

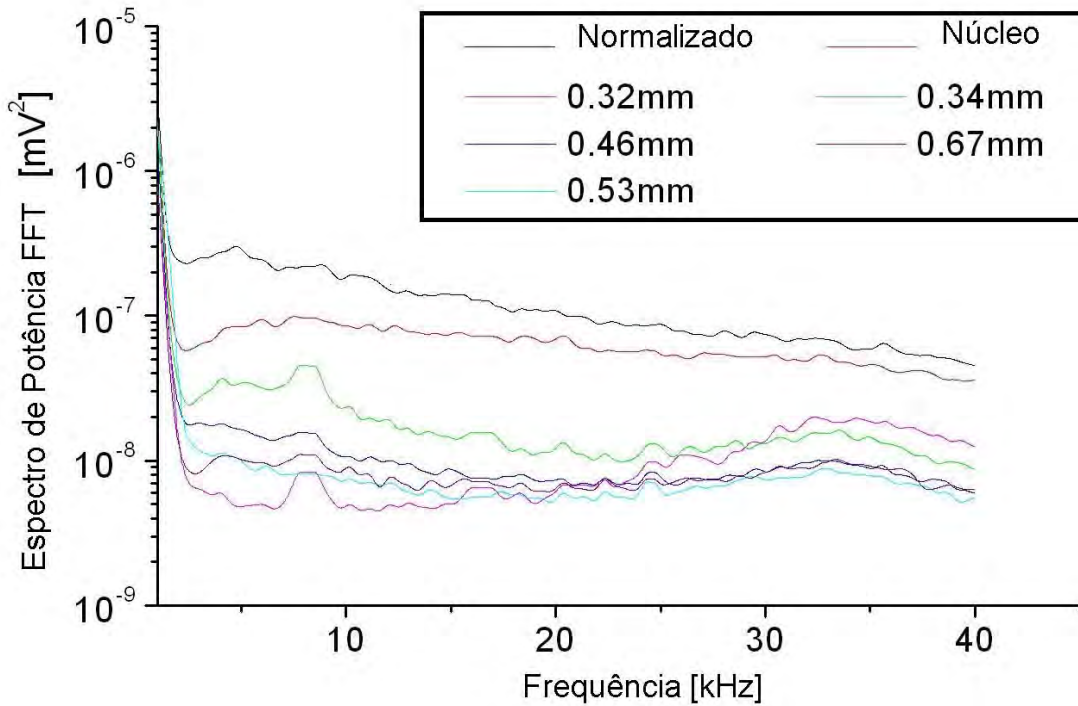


Figura 7. Dependência da frequência da FFT para várias amostras.

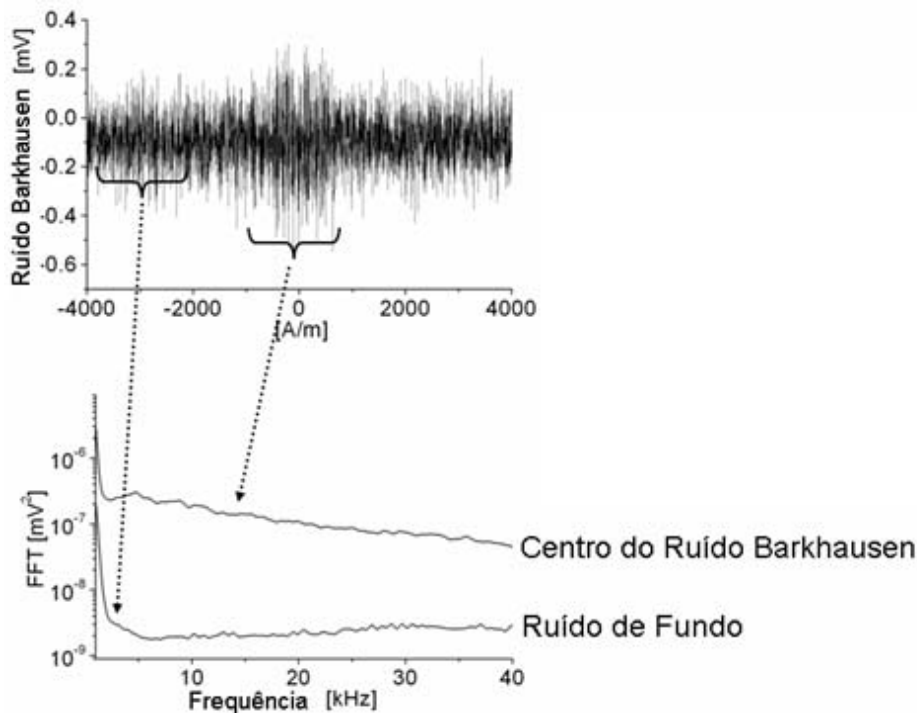


Figura 8. Ilustração do cálculo da FFT associado com o Ruído Barkhausen e o fundo.

Com o objetivo de comparar as FFTs das amostras à da amostra normalizada (homogênea), foi definido um índice de potência normalizada (IPN). O IPN é mostrado como uma função da frequência na Figura 9. A curva superior, correspondente ao núcleo de uma amostra, não mostra nenhuma estrutura, como seria de se esperar, uma vez que é homogênea, embora não seja igual à amostra normalizada. As cinco curvas correspondentes às amostras endurecidas apresentam

estrutura no IPN. Nota-se que há um pequeno pico em cada curva, correspondendo ao intervalo de frequências de 30-40 kHz. Este pico será discutido abaixo.

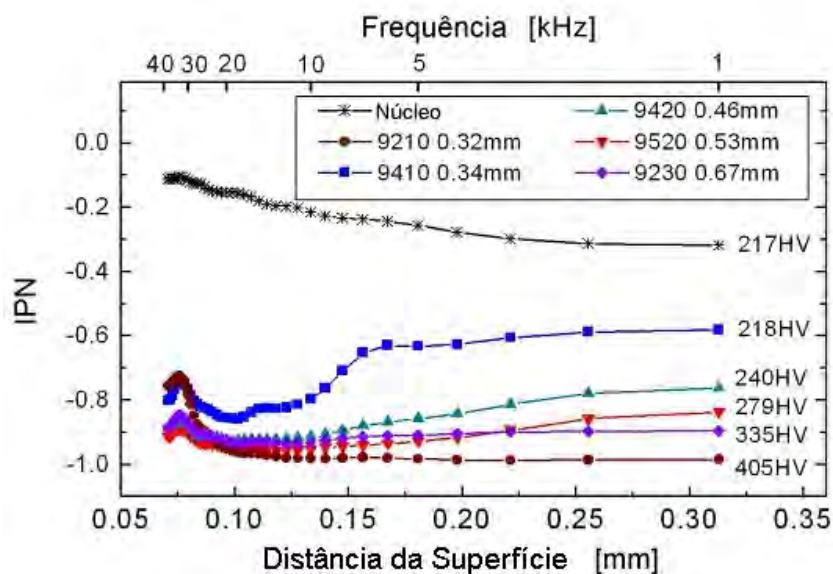


Figura 9. Índice de Potência Normalizada (IPN) versus frequência para várias amostras. A escala inferior (espessura da camada) relaciona a dependência do IPN à frequência e à espessura da camada por meio da equação (4) de distância de penetração.

O cálculo da dependência da espessura da camada dura com a frequência e do IPN, bem como análise dos dados medidos, foram elaborados em sintonia com o trabalho de Lo.⁽⁵⁾ Porém, aqui, se está usando uma comparação com intervalos contínuos de frequência (de 1kHz), o que difere de Lo, que usa intervalos logarítmicos de bandas de frequências.

Numa tentativa de utilizar estes valores de IPN para estimar a espessura da camada, os valores de IPN foram relacionados com distâncias nas amostras por meio da Equação 2.⁽⁵⁾ Ainda que se espere que a condutividade seja relativamente independente da frequência nestas baixas frequências, a permeabilidade magnética representa um problema mais complexo. Para construir a escala inferior na Figura 9, foi utilizada uma permeabilidade relativa $\mu_r = 223$. Usando a Equação 2, os valores da distância foram obtidos como função de frequência e colocados sobre o eixo horizontal inferior, o que fornece uma idéia de como o IPN varia com a distância. Ainda assim essa escala deve ser visualizada como um referencial de variabilidade ao longo da profundidade mais do que valores absolutos de distancias.

Outro fator importante a ser observado é a relação direta da dureza e microestrutura das amostras e a distinção magnética obtida de acordo com ambas. Tomando a amostra 9410 (Figura 9) por exemplo, para a frequência de 1 kHz (núcleo da amostra), tem-se um IPN de aproximadamente -0,6, enquanto para frequências no intervalo de 20 kHz até 30 kHz, o IPN é de aproximadamente -0,8 passando por uma região de transição em torno da frequência de 10 kHz. Esta diminuição no IPN está associada às mudanças microestruturais da superfície ao núcleo. Na superfície da amostra tem-se uma região endurecida cuja microestrutura presente é martensita e no núcleo da amostra tem-se ferrita e perlita (Figura 10b). Magneticamente a ferrita e perlita tem sinais de RB maiores em amplitude do que os sinais gerados pela martensita.

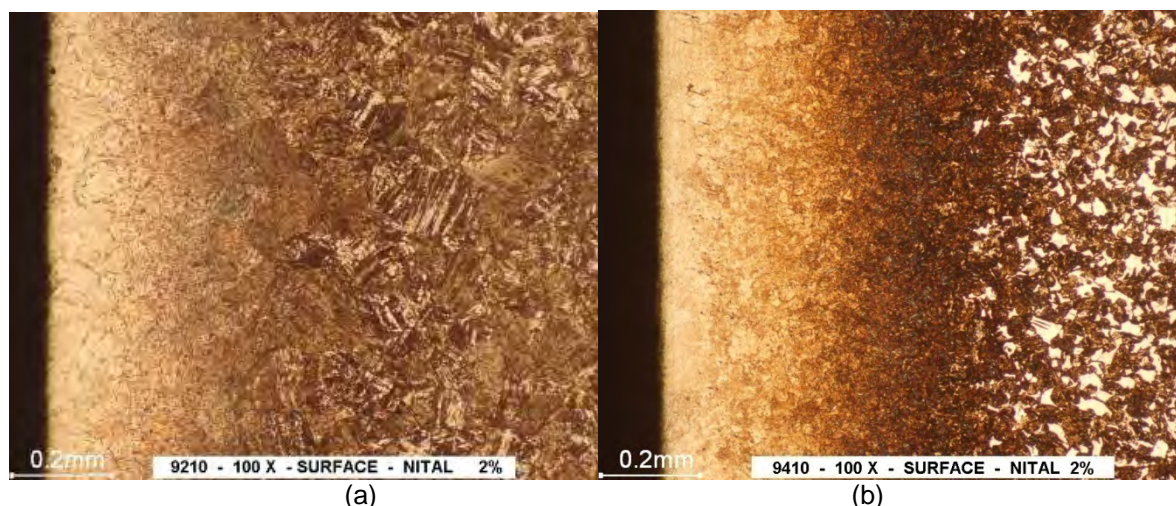


Figura 10. Micrografias para duas amostras. As amostras endurecidas perderam carbono durante o tratamento térmico. A região descarbonetada é mostrada como uma região esbranquiçada.

Para amostra 9210, a distinção magnética diminui como pode ser observado na Figura 10a. A diminuição da distinção magnética visto pelo IPN mostrado para esta amostra na superfície e núcleo deve-se ao fato de que a microestrutura presente em ambas é praticamente a mesma, pois na superfície tem-se martensita dura e no núcleo martensita de baixo carbono. Este efeito pode ser também associado à dureza de núcleo desta amostra que está em torno de 405 HV. Uma das limitações no uso do método proposto é que ele serve para amostras que possuam fases/microestrutura distintas entre camada e núcleo. Assim, para utilização deste método a microestrutura presente na camada superficial preferencialmente deve ser martensita e no núcleo ferrita e perlita.

Vale salientar que os pequenos picos no IPN para o intervalo de frequências de 30 kHz - 40 kHz, correspondem à superfície da amostra, ou regiões perto da superfície. Micrografias para duas amostras são apresentadas nas Figuras 10a e 10b. As amostras perderam carbono a partir da superfície, a região mais clara a esquerda em ambas as amostras. Isto pode significar que a região descarbonetada teve seu sinal de RB aumentado nas altas frequências – 30 kHz a 40 kHz (Figura 9).

4 CONCLUSÃO

As amostras de aço SAE 1020 foram produzidas pela difusão de carbono na superfície, obtendo-se espessuras distintas de acordo com as condições de cementação e tratamento térmico. Têmperas feitas em curtos tempos resultaram em uma camada de superfície martensítica em cima de um núcleo de ferrite / perlite para algumas amostras de aço SAE 1020.

A espessura de camada dura foi medida por técnicas tradicionais destrutivas (perfil de dureza) de forma a determinar a espessura de camada endurecida nas amostras estudadas e comparar com as medições de ruído Barkhausen. As imagens obtidas por microscopia ótica possibilitaram a comparação com os dados obtidos nas medições de ruído Barkhausen e perfil de dureza auxiliando na compreensão dos resultados.

Tanto o envelope RMS do pulso de Barkhausen e da transformação rápida de Fourier (FFT) foram obtidos por cálculo numérico. As amplitudes das FFTs foram obtidas em função da frequência, e foram associadas com a distância da superfície da amostra através da equação clássica de distância de penetração. As espessuras

das camadas duras foram estimadas a partir de um índice de potência normalizada, uma grandeza que apresenta estrutura em acordo com os detalhes da microestrutura.

Com base nos resultados obtidos neste trabalho, conclui-se que a técnica proposta (medições de ruído Barkhausen) é uma alternativa para a determinação de espessuras de camadas endurecidas em aços. No entanto, o método possui como limitação que somente poderá ser utilizado em amostras que possuam distintas microestruturas entre superfície e núcleo. Microestruturas deste tipo são encontradas em materiais endurecidos por indução. O método proposto acusou a presença de uma região descarbonetada na superfície e poderia ser aplicado para esta finalidade.

Agradecimentos

Este trabalho recebeu apoio financeiro da Fundação de Apoio à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul e da Secretaria de Ciência, Inovação, e Desenvolvimento Tecnológico do Estado do Rio Grande do Sul. Alessandra Drehmer foi apoiada em parte pela Universidade de Caxias do Sul. Frank P. Missell foi apoiado em parte pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico.

REFERÊNCIAS

- 1 HUTCHINGS, I. M. Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials. Edward Arnold, London, 1992.
- 2 JILES, D. C. Review of magnetic methods for non-destructive evaluation. *NDT International*. v. 21. pp. 311-319, 1988.
- 3 ZHANG, C., BOWLER, N., LO, C. Magnetic characterization of surface-hardened steel. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 321. 3878, 2009.
- 4 CORSON, D., LORRAIN, P. Introduction to Electromagnetic Fields and Waves. San Francisco and London: W. H. Freeman and Company, 1962.
- 5 LO, C.H.C. – Depth profiling of magnetic properties of surface-modified materials by model-assisted multi frequency analysis of Barkhausen effect signals. *Journal of Applied Physics*. 103. 07E918, 2008.
- 6 LO, C.C.H., KINSER, E. R., JILES, D. C. Analysis of Barkhausen effect signals in surface-modified magnetic materials using a hysteretic-stochastic model. *Journal Applied Physics*. 99. 08B705, 2006.
- 7 BACH, G., GOEBBELS, K., e THEINER, W. A. Characterization of hardening depth by Barkhausen noise measurement. *Materials Evaluation*. v. 46, pp. 1576-1580, 1988.
- 8 DUBOIS, M. e FISET, M. Evaluation of case depth on steels by Barkhausen noise measurement. *Materials Science and Technology*. v. 11, pp. 264-267, 1995.
- 9 NUMMILA, K., SEPPÄ, H., VARPULA, T. Method for determining the hardening depth of steel. US Patent 7259555. August 21, 2007.