

**DETERMINAÇÃO DE TENSÕES RESIDUAIS EM MATERIAIS**  
**FERROMAGNÉTICOS PELO EFEITO BARKHAUSEN**

Silvério Ferreira da Silva Júnior (\*)  
Tanius Rodrigues Mansur (\*)  
Ernani Sales Palma (\*\*)

(\*) Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear - CDTN/CNEN  
(\*\*) Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais - PUC-MG

**RESUMO**

A presença de tensões residuais em componentes estruturais exerce um papel de fundamental importância em seu desempenho. Elas se somam às tensões de trabalho e, dependendo de sua natureza, valor e distribuição podem levar o material a falhar por sobrecarga. Sua atuação em conjunto com agentes externos indutores de dano, como atmosferas agressivas ou campos de radiação, podem induzir um componente a falhar prematuramente. Neste trabalho descreve-se a utilização do Efeito Barkhausen como um método de ensaio não destrutivo para a determinação de tensões residuais em materiais ferromagnéticos. Os sinais magnéticos Barkhausen, emitidos por materiais ferromagnéticos quando excitados por um campo magnético variável, são sensíveis a variações microestruturais e ao estado de tensões presente no material. São abordados os aspectos referentes à calibração do sistema de ensaio e ao comportamento dos sinais Barkhausen para o aço ASTM A 515, sob diferentes condições de carregamento. Os resultados obtidos na determinação de tensões residuais são comparados com os determinados pelo método do furo central.

**1. INTRODUÇÃO**

Os materiais ferromagnéticos, como a maioria dos aços, são constituídos por pequenas regiões denominadas domínios magnéticos, nas quais o valor da magnetização é igual à magnetização de saturação do material. Na ausência de um campo magnético externo ou de tensões mecânicas aplicadas, as direções em que os domínios se encontram magnetizados estão aleatoriamente distribuídas no material, sendo nula a magnetização resultante. Sob a influência de um campo magnético alternado, a estrutura dos domínios magnéticos se

altera, de forma a atingir uma nova posição de equilíbrio devido à presença do campo "Bozorth, 1951".

Dois mecanismos atuam durante a magnetização. O movimento das fronteiras dos domínios e a rotação de domínios. O movimento das fronteiras é afetado pela presença de heterogeneidades estruturais e de tensões mecânicas no material. Elas atuam como barreiras de energia que se opõem ao seu movimento. Durante o processo de magnetização, a presença destas barreiras faz com que o movimento das fronteiras ocorra de forma descontínua, à medida em que se aumenta a intensidade do campo magnético aplicado ao material e se percorre a sua curva de magnetização. Estas mudanças descontínuas que ocorrem na curva de magnetização podem ser detectadas através de uma bobina posicionada próxima ao material, pois irão induzir pulsos elétricos na mesma "Krause e Atherton, 1994". Estes pulsos elétricos são denominados sinais Barkhausen.

Os materiais ferromagnéticos com magnetoestricção positiva apresentam um aumento na intensidade dos sinais Barkhausen quando submetidos a esforços de tração e uma diminuição em sua intensidade quando submetidos a esforços de compressão. Este efeito, após uma calibração adequada, pode ser utilizado para a determinação do estado de tensões presente no material.

**2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL**

**Material.** O material estudado foi o aço ASTM A 515 Grau 55, 515 Grau 55, devido a sua vasta aplicação como material estrutural. Os corpos-de-prova utilizados na calibração do sistema de ensaio e nos ensaios de tração foram submetidos a um tratamento térmico para alívio de tensões. O valor médio encontrado para a tensão de escoamento do material foi de 310 MPa.

**Instrumentação.** Os corpos-de-prova utilizados na calibração do sistema de ensaio foram instrumentados com extensômetros PL-10-11 (TML). Os ensaios para a determinação de tensões residuais pelo método do furo central foram realizados utilizando-se rosetas FRS-2-11 (TML). As rosetas e os extensômetros foram ligados em um circuito de ¼ de ponte, alimentados com uma tensão elétrica de 2 V. As leituras do desbalanceamento na ponte foram realizadas com um microvoltímetro.

As medidas dos sinais Barkhausen foram realizadas com a unidade Strestest 20.04, que controla os parâmetros de teste e o processo de aquisição de dados durante o ensaio. Uma sonda/sensor excita o material com um campo magnético variável e detecta os sinais Barkhausen correspondentes através de uma bobina sensora. O material foi excitado por um campo magnético de 100 Hz e os sinais Barkhausen detectados nas profundidades de 0,8 mm; 0,4 mm; 0,2 mm; 0,1 mm e 0,05 mm.

**Calibração.** Devido à anisotropia magnetocristalina apresentada pelos materiais magnéticos, as propriedades magnéticas são fortemente dependentes da direção em que são medidas, o mesmo ocorrendo para os sinais Barkhausen. Em geral, as calibrações são realizadas aplicando-se o campo magnético de excitação nas direções paralela e perpendicular à direção de laminação do material, medindo-se o valor dos sinais Barkhausen emitidos pelo material nestas condições. Ao se realizar as medidas no componente de interesse, estas direções devem ser mantidas. A calibração foi realizada utilizando-se corpos-de-prova no formato de vigas de isoflexão, conforme indicado na Figura 1.

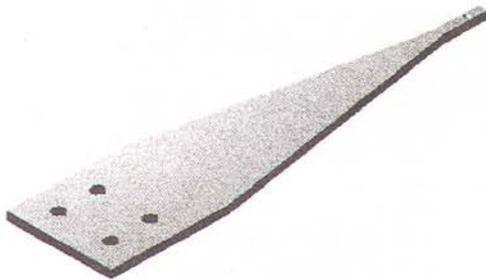


Figura 1. Viga de isoflexão utilizada na calibração do sistema de ensaio.

Foram fabricadas duas vigas, a partir de amostras do material. Uma das amostras foi retirada no sentido de laminação da chapa e a outra no sentido perpendicular ao mesmo, denominadas vigas de isoflexão A e B respectivamente. Cada uma das vigas foi instrumentada com um extensômetro PL-10-11, orientados segundo o eixo longitudinal das vigas.

O dispositivo utilizado na calibração permitiu a obtenção de tensões de tração e compressão na superfície da viga, por meio de uma carga aplicada em sua extremidade. A montagem experimental pode ser observada na Figura 2.

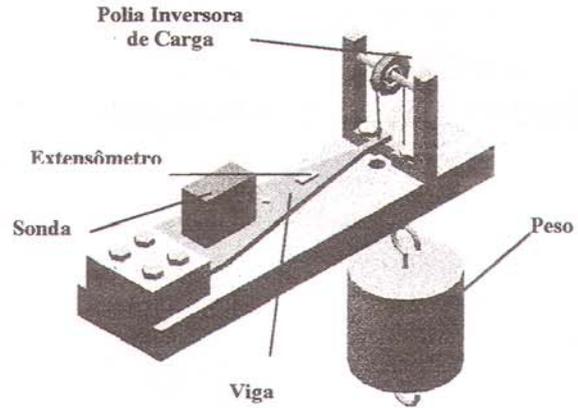


Figura 2. Montagem experimental utilizada para a calibração do sistema de ensaio.

A calibração consistiu em se submeter cada uma das vigas a uma série de carregamentos conhecidos, de forma a se produzirem estados de tensão definidos nas mesmas. Os diferentes carregamentos foram obtidos através da aplicação incremental de pesos em sua extremidade livre, gerando tensões de tração ou compressão na superfície das vigas. Para cada carregamento o sinal Barkhausen emitido pelo material foi medido e as tensões correspondentes calculadas a partir das variações nas leituras dos extensômetros. A sonda foi posicionada de forma que a direção do campo magnético de excitação permanecesse paralela ao eixo longitudinal das vigas. Este procedimento permitiu o registro das variações dos sinais Barkhausen emitidos pelo material nas direções de laminação do material (Viga A) e perpendicular à mesma (Viga B) sob condições de carregamento controladas “Silva Jr., 1998”. As curvas de calibração obtidas estão apresentadas nas Figuras 3 e 4.

As curvas de calibração representam o valor rms do sinal magnético Barkhausen em função do estado de tensões presente no material para as profundidades de 0,8; 0,4; 0,2, 0,1 e 0,05 mm. O valor ideal para o campo de excitação foi determinado experimentalmente, de maneira a aumentar a sensibilidade do ensaio.

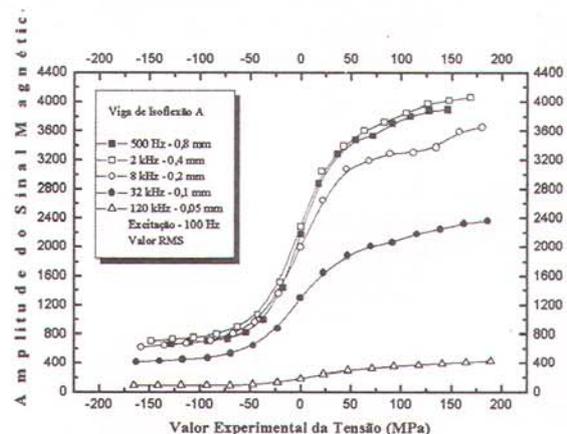


Figura 3. Valores rms dos sinais Barkhausen na viga de isoflexão A em função do carregamento aplicado.

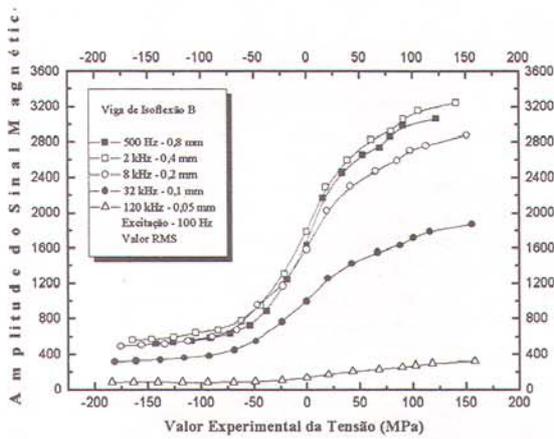


Figura 4. Valores rms dos sinais Barkhausen na viga de isoflexão B em função do carregamento aplicado.

**Ensaios de Tensões Residuais.** No primeiro experimento foi aplicado um carregamento conhecido na extremidade da viga de isoflexão B de forma a simular a presença de tensões residuais na mesma. A seguir foi realizada uma varredura em sua superfície para a detecção dos sinais Barkhausen emitidos pelo material. Em uma região da viga os sinais Barkhausen apresentaram valores acima do esperado para o carregamento aplicado. Nesta região foi instalada uma roseta FRS-2-11 e realizado o ensaio para a determinação das tensões residuais locais pelo método do furo central “ASTM E 837”. Os resultados obtidos estão apresentados na Figura 5.

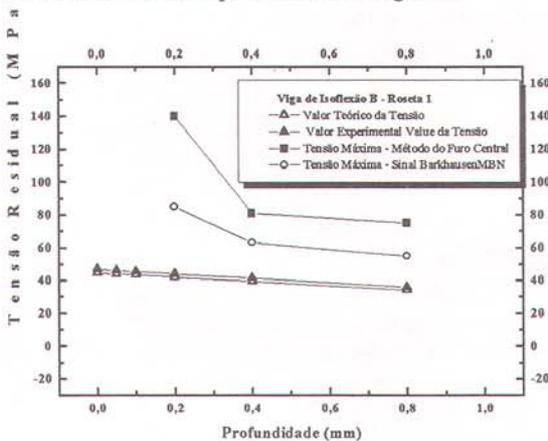


Figura 5. Resultados dos ensaios de tensões residuais para a viga de isoflexão B.

No segundo experimento, foram realizadas medidas de tensões residuais em um corpo de prova soldado pelo processo de eletrodo revestido, sendo a direção de laminação do material perpendicular ao cordão de solda. Os sinais Barkhausen foram medidos em duas regiões do corpo-de-prova. Em cada região foram realizadas duas medidas, uma na direção paralela e outra na direção perpendicular ao cordão de solda e o valor das tensões residuais correspondentes determinados por comparação com as curvas de calibração. A seguir o corpo-de-prova foi instrumentado com duas rosetas, instaladas com os extensômetros 1 e 3 posicionados nas direções perpendicular e paralela ao cordão de solda, ou seja, nas posições paralela e perpendicular à direção de laminação da chapa, conforme mostrado na Figura 6. A seguir, as tensões residuais nestas

regiões determinadas pelo método do furo central. Os resultados do ensaio estão apresentados nas Figuras 7 e 8.

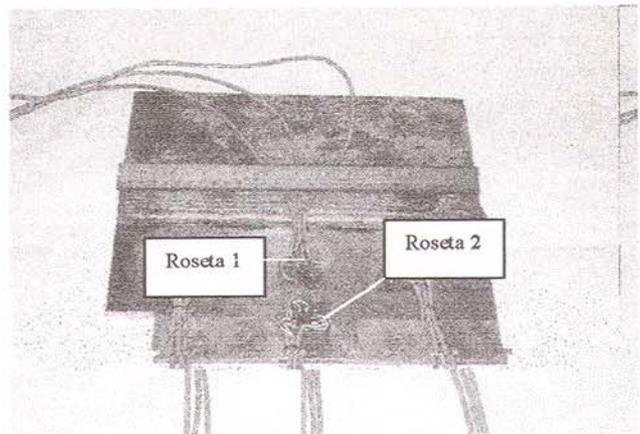


Figura 6. Corpo-de-prova soldado utilizado nos ensaios de tensões residuais.

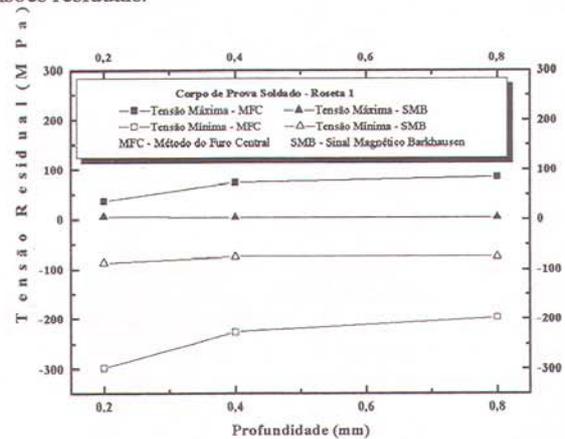


Figura 7. Resultados dos ensaios de tensões residuais na região da roseta 1.

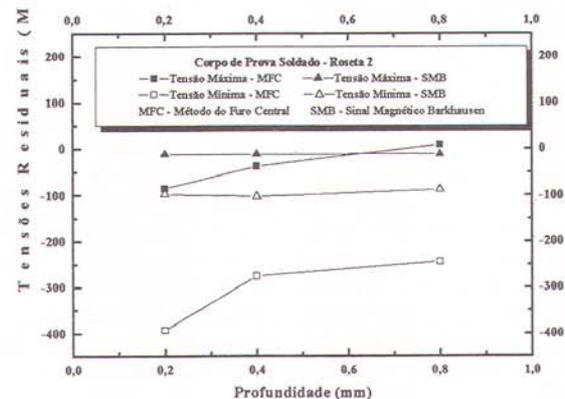


Figura 8. Resultados dos ensaios de tensões residuais na região da roseta 2.

## 2. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

As curvas de calibração obtidas para as vigas de isoflexão A e B, apresentadas nas Figuras 3 e 4, apresentam trechos lineares e não lineares. Para baixos valores das tensões, nas regiões de tração e compressão, a variação dos sinais Barkhausen com a

tensão é praticamente linear. A partir de um determinado nível, eles passam a sofrer variações cada vez menores, até um ponto em que praticamente não variam, ocorrendo uma saturação. Analisando-se as Figuras 3 e 4 observa-se que a saturação ocorre para valores próximos à metade do limite de escoamento à tração e um terço do limite de escoamento à compressão, para este material.

Os sinais Barkhausen gerados no material apresentaram valores mais elevados para a viga de isoflexão A, para um mesmo carregamento aplicado. Estes resultados eram esperados, pelo fato da viga A ter sido fabricada a partir de uma amostra retirada na direção de laminação do material. Devido à orientação da estrutura nesta direção, a intensidade dos sinais Barkhausen é mais elevada.

Para a realização do ensaio de tensões residuais a viga de isoflexão B foi carregada de forma a que a tensão principal máxima ocorresse paralela ao seu eixo longitudinal, o que foi constatado após o ensaio pelo método do furo central. O valor teórico da tensão indicado na Figura 5 representa o valor da tensão em função da profundidade calculado a partir da equação "Nash, 1981".

$$\sigma = \frac{M}{J} \cdot y \quad (1)$$

M é o momento fletor atuante na seção considerada da viga, J o momento de inércia e y a distância do eixo neutro à fibra considerada

O valor experimental da tensão representa o valor da tensão em função da profundidade calculado a partir do valor da tensão na superfície da viga, determinado através da roseta antes de se iniciar o ensaio pelo método do furo central. Pode-se observar que os dois valores estão bem próximos. As tensões residuais determinadas para as diferentes profundidades, por ambos os métodos, foram bem maiores que as esperadas devido ao carregamento aplicado, sugerindo a existência de tensões residuais no local de medida, além das simuladas pelo carregamento.

Para o corpo-de-prova soldado, as rosetas 1 e 2 apresentaram as tensões principais máximas praticamente na mesma direção dos extensômetros nº 1 das rosetas. Assim, os valores obtidos para as tensões principais pelo método do furo central, nas direções dos extensômetros 1 e 3, puderam ser diretamente comparados com os obtidos pela medida dos sinais Barkhausen nestas direções.

Os resultados das medidas obtidos pelo sistema de ensaio pelo efeito Barkhausen nas regiões onde foram instaladas as duas rosetas indicam que o método foi sensível às variações no estados de tensão que ocorrem no material. Entretanto, para valores altos de tensões de compressão o método sofre restrições, devido à saturação rápida que ocorre na região de compressão das curvas de calibração.

### 3. CONCLUSÕES

O sistema de ensaio foi sensível às variações de tensão produzidas no material sob teste, mostrando limitações quanto à detecção de tensões de tração acima de cerca de 50% do limite de escoamento à tração e abaixo de 30% do limite de escoamento à compressão.

Os resultados obtidos para a viga de isoflexão B demonstram que o método de ensaio foi sensível à presença de tensões residuais no local. Embora apresentando resultados distintos dos determinados pelo método do furo central, mostrou uma mesma tendência, indicando níveis de tensão mais elevados do que os esperados devido ao carregamento aplicado.

O sistema de ensaio pode ser aplicado à realização de testes de carregamento em materiais ferromagnéticos, dentro de limites que devem ser estabelecidos experimentalmente para cada material. Para a determinação do valor de tensões residuais, embora os resultados obtidos demonstrem que o método de teste é sensível à variações de tensões internas nos materiais, é necessário que seja realizado um maior número de experimentos, tanto com o material testado como em outros materiais de interesse industrial, de forma a possibilitar o acúmulo de dados suficientes que permita estabelecer os limites de aplicação deste método de teste. Testes utilizando sensores com dimensões menores podem contribuir para resultados quantitativos mais precisos. Uma das aplicações possíveis no atual estágio é a avaliação qualitativa do nível de tensões presente em um material devido a diferentes condições de fabricação, como a comparação entre soldagens feitas com diferentes parâmetros ou diferenças devidas a tratamentos térmicos.

### 5. REFERÊNCIAS

- ASTM E 837-94a; "Standard Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain-Gage Method" 1994
- Bozorth, R. M., "Ferromagnetism" Editora D. Van Nostrand Company Inc., New York, 1951.
- Krause, T. W., Atherton, D. L., "High resolution magnetic Barkhausen noise measurements". *NDT & E International*, 27 (4), pp. 201-207, 1994.
- Nash, W. A., "Resistência dos Materiais". Editora Mc Graw Hill, 1981.
- Silva Jr., S. F., "Determinação de Tensões Residuais em Materiais Ferromagnéticos pelo Efeito Barkhausen" Tese de Mestrado, Dpto. Eng. Mecânica, UFMG, 1998.

### 6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FINEP – Financiadora de Estudos e Projetos – pelo suporte financeiro dado a este trabalho sob o contrato RECOPE 7798031700, REFERÊNCIA 1567/96.

### SUMMARY

Residual stresses have great influence on in service behavior of structural components. Depending on their magnitude and nature, they can contribute for increasing the expected life of the component or for its premature failure. This work presents a study on the use of Barkhausen effect in detection and measurement of residual stresses and applied stresses in ferromagnetic materials, including the development of devices to make possible the performance of tests under standard conditions. Results obtained are compared with the ones obtained from the central hole drilling method, an ASTM standard test method for determining residual stresses in materials, the most used actually for this purpose.