

ANÁLISE DO PROCESSO DE FADIGA EM AÇO AISI 4340 VIA ENSAIOS NÃO-DESTRUTIVOS MAGNÉTICOS¹

Ricardo Baiotto²
Rui Gustavo Lippert Schwanke²
Felipe Schiochet Bertoldo Giroto³
Eduardo Stimamiglio Bastos²
Alexandre Viecelli⁴
Frank Patrick Missell⁵

Resumo

O presente trabalho foi iniciado para examinar via ensaios não-destrutivos magnéticos o processo de falha em aço AISI 4340, largamente utilizado na construção mecânica. Foram usinadas amostras cilíndricas de acordo com a norma ISO 1143 em materiais já tratados termicamente para ter uma dureza de 39 HRC. Ensaios de fadiga foram realizados em uma máquina de flexão rotativa com $R = -1$. Foram determinadas a curva S/N bem como o limite de fadiga. Os resultados concordam bem com a literatura. Durante os ensaios, ao menos 50% das amostras sofreram interrupções periódicas a fim de serem realizadas medidas de ruído Barkhausen. As medidas de ruído Barkhausen forneceram o valor RMS global e a integral do envelope RMS, além da altura e posição do pico máximo deste envelope. Variações significativas nestes parâmetros ocorreram somente no final da vida das amostras ensaiadas.

Palavras-chave: Fadiga; Flexão rotativa; Aço AISI 4340; Ruído Barkhausen.

ANALYSIS OF FATIGUE IN AISI 4340 STEEL USING MAGNETIC NON-DESTRUCTIVE TECHNIQUES

Abstract

This work aims to follow, through Barkhausen noise non-destructive evaluation, the fatigue failure process in AISI 4340 steel, which is frequently used for mechanical parts. To achieve this, round samples made of 4340 steel, previously heat treated, were prepared according to instructions in the ISO 1143 international standard. The fatigue analyses were carried on at a fatigue analysis machine with load ratio, R , equal to -1 . We determined the S-N curve as well as the fatigue strength for 5×10^6 cycles. The results of the fatigue analysis agree well with the literature. During the fatigue analysis, at least 50% of the samples were subjected to periodic stops intended to allow measurements of the Barkhausen noise. From the Barkhausen noise measurements, it was possible to calculate the total RMS value of the signal and the integral of the envelope, as well as the amplitude and position of peak of the Barkhausen burst. Significant variations of these parameters were observed only near the end of the analyzed sample's life.

Key words: Fatigue; Rotating bending; AISI 4340 steel; Barkhausen noise.

¹ Contribuição técnica ao 67^o Congresso ABM - Internacional, 31 de julho a 3 de agosto de 2012, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

² Aluno, Engenharia Mecânica, Universidade de Caxias do Sul (UCS).

³ Aluno, Engenharia de Automação e Controle, Universidade de Caxias do Sul (UCS).

⁴ Formação, Professor, curso/ departamento, Universidade de Caxias do Sul.

⁵ Engenheiro Civil. Prof. Dr. Universidade de Caxias do Sul (UCS).

⁶ Físico. Prof. Dr. Universidade de Caxias do Sul (UCS). fmissell@yahoo.com

1 INTRODUÇÃO

O interesse por falha por fadiga surgiu com o desenvolvimento das máquinas a vapor e com o aumento do uso de dispositivos mecanizados que, por possuírem muitas peças sujeitas a carregamento variável, passaram a apresentar falhas por fadiga com frequência. Hoje em dia, mesmo depois de muitos progressos no entendimento do mecanismo de fadiga, ele ainda é um dos principais responsáveis por falhas em componentes metálicos.⁽¹⁾

O ruído Barkhausen foi observado pela primeira vez em 1919 por Heinrich Barkhausen.⁽²⁾ Sua descoberta foi a primeira confirmação da teoria dos domínios magnéticos proposta por Weiss em 1906. É sabido que tensões mecânicas aplicadas a um material ferromagnético afetam o comportamento do ruído Barkhausen.⁽²⁾ Várias propriedades microestruturais também exercem influência sobre o ruído Barkhausen, como o tamanho de grão,⁽³⁾ discordâncias,⁽⁴⁾ precipitados de segunda fase, cavidades e trincas.⁽⁵⁾ Durante a fadiga em materiais metálicos, o comportamento das discordâncias tem um papel fundamental. Visto que o ruído Barkhausen é afetado por variações na estrutura de discordâncias, deveria ser possível empregá-lo como um ensaio não destrutivo na avaliação de processo de fadiga em componentes de aço.⁽⁶⁾ Este é o objetivo deste trabalho: estudar fadiga em aço AISI 4340 usando o ruído Barkhausen⁽⁷⁾ como ensaio não-destrutivo.

2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Neste trabalho foi estudado o aço AISI 4340, largamente empregado na indústria metal-mecânica. Este material possui boas propriedades mecânicas e de resistência a esforços cíclicos.⁽⁸⁾ Todo o material usado neste trabalho é proveniente de duas barras laminadas redondas fabricada pela Gerdau. A composição química do material, fornecida pela Gerdau (Tabela 1).

Tabela 1. Composição química do aço AISI 4340

C (%)	Si (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)	Cr (%)	Ni (%)	Mo (%)	V (%)	Ti (%)	Al (%)	Sn (%)	Cu (%)
0,40	0,26	0,70	0,021	0,013	0,76	1,70	0,23	0,005	0,002	0,015	0,007	0,13

Para garantir a homogeneidade das amostras o material sofreu tratamento térmico de normalização onde ele foi colocado em um forno a 870°C por 30 min. Este período de tempo é necessário para garantir a homogeneização da temperatura ao longo do material. Em seguida as amostras foram resfriadas ao ar. Posteriormente, o material foi temperado em óleo após um novo aquecimento a 850°C. Para aliviar as tensões internas e produzir uma microestrutura magneticamente mole, facilitando as medidas de ruído Barkhausen, os corpos de prova foram revenidos a 540°C por duas horas. Com isso, obtivemos uma dureza de 39 HRC e microestrutura formada por martensita revenida com ferrita precipitada.

Neste trabalho, os ensaios de fadiga são do tipo flexão rotativa com $R = -1$ e foram realizados em uma máquina para ensaios de fadiga Veb Werkstoffprüfmaschinen Leipzig modelo UBM 520/70/9. Esta máquina é capaz de ensaiar quatro amostras com diferentes cargas simultaneamente. Para a obtenção da região de alto ciclo e vida finita da curva S-N do material estudado foram realizados ensaios em quatro níveis de tensão. Estes níveis ficaram entre o limite de resistência a fadiga estimado⁽⁹⁾ de acordo com a resistência a tração (1.209 MPa), e a tensão de

escoamento (1.141 MPa) obtida por ensaios de tração realizados no material. Nos ensaios de fadiga, foram utilizadas três amostras para cada nível de tensão empregado, totalizando doze amostras. Os ensaios foram conduzidos até a falha ou até atingir 5×10^6 ciclos (5×10^6 ciclos será considerada a vida útil do material). Além disso, foram utilizadas mais quinze amostras para determinar o limite de resistência à fadiga. A obtenção do limite de resistência à fadiga, foi feito pelo método *Up-And-Down* descrito por Alvarenga⁽¹⁰⁾ e Collins.⁽¹¹⁾ Este método consiste, em primeiro lugar, em estimar o limite de resistência a fadiga do material. Então um corpo de prova é ensaiado nesta tensão até 5×10^6 ciclos ou até que o corpo de prova falhe. Caso o corpo de prova falhe o nível de tensão é reduzido, para o segundo corpo de prova, por uma quantidade fixa, de 20 MPa. Porém, se a amostra não falhar é acrescido 20 MPa à tensão aplicada.

A preparação das amostras, utilizadas na determinação da curva S-N e do limite de resistência à fadiga, foi feita de acordo com a norma ISO 1143 e o desenho dos corpos de prova está apresentado na Figura 1. Após a usinagem, a região central do corpo de prova é lixada com lixa de grana 400 e, após, de grana 600. Então, foi realizado o polimento da região lixada com pasta de diamante de granulação progressivamente mais fina, inicialmente de 6 μm , depois de 3 μm e, por fim, de 1 μm . O polimento final foi feito na direção axial do corpo de prova, evitando que nenhum risco circunferencial esteja presente, pois um risco deste tipo pode agir como ponto de nucleação de trinca.

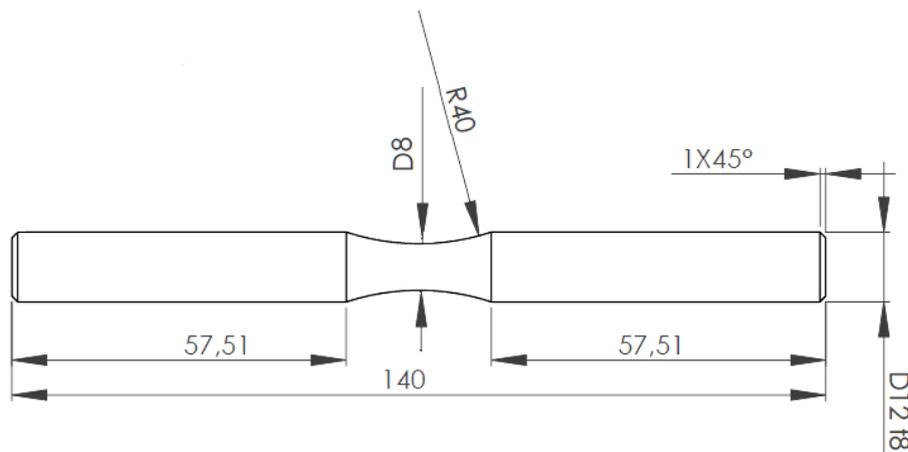


Figura 1. Desenho do corpo de prova empregado para os ensaios de fadiga e de ruído Barkhausen. As dimensões estão em milímetros e atendem a ISO 1143.

Para coletar os dados referentes ao ruído Barkhausen, foi utilizado um sistema que consiste, basicamente, em um *yoke* feito com lâminas de Fe-Si aonde uma bobina de 500 espiras (primário), em fio de cobre esmaltado AWG 24, foi enrolada. Esta bobina, juntamente com o *yoke*, serve para magnetizar a amostra através de um campo magnético variável. Para coletar o sinal proveniente da amostra, outra bobina de 2.000 espiras em fio de cobre esmaltado AWG 42 foi enrolada em torno de um carretel e posicionada em torno da amostra.

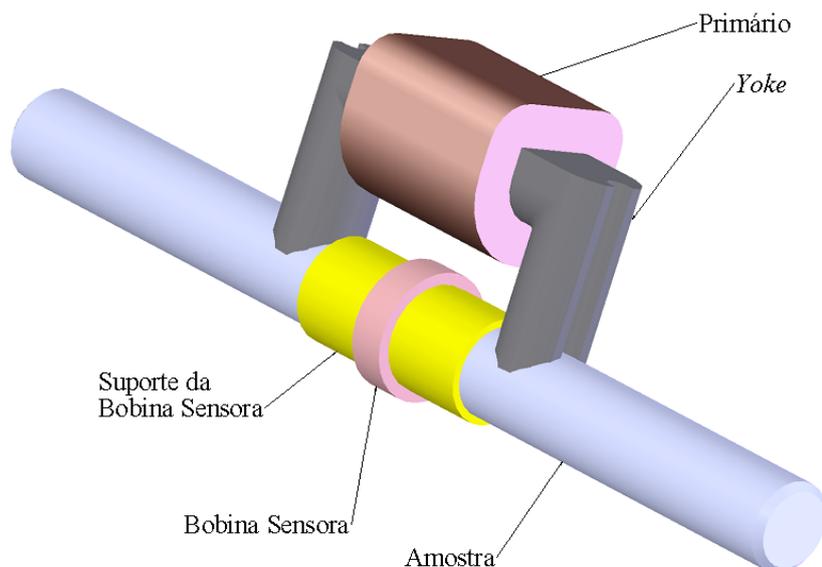


Figura 2. Desenho do yoke, primário, bobina sensora e suporte montados em uma amostra.

A alimentação do primário foi provida por um gerador de funções da marca Stanford Research Systems modelo DS345, que é capaz de gerar ondas de diferentes formatos, porém com potência baixa. Sendo assim, é necessário um amplificador para o sinal proveniente do gerador de funções. Neste caso foi utilizado uma fonte de potência da marca Kepco modelo 36-6M. O sinal proveniente da amostra precisa ser condicionado, através de filtragem e amplificação, para poder ser coletado pela placa de aquisição de dados e armazenados em um computador. Para realizar a filtragem foi utilizado um filtro de sinais da marca Stanford Research Systems modelo SR650. Este filtro pode ser utilizado como filtro passa banda, onde um intervalo de frequências é selecionado e a parte do sinal com frequência acima e abaixo deste intervalo é eliminada. O filtro também possibilita a amplificação do sinal. A coleta dos sinais já condicionados foi feita por uma placa de aquisição de dados da marca I/O Tech modelo DaqBoard/3005 capaz de coletar até um milhão de pontos por segundo. Esta placa foi controlada pelo programa LabView, o qual armazenou os dados em um computador.

Utilizando o programa Matlab, para cada conjunto de dados, foi calculado o valor da voltagem RMS de todo o sinal e o envelope da voltagem RMS. Para o cálculo do envelope RMS utiliza-se a mesma equação, no entanto, ao invés de calcular um único valor global, calcula-se a voltagem RMS para um pequeno intervalo de pontos consecutivos. Então, coloca-se o valor obtido em um gráfico e a operação é repetida para o próximo intervalo de pontos até que todos os pontos sejam varridos. O número de pontos do intervalo utilizado, ou passo, foi escolhido de tal forma que seja igual ou inferior a 1% do número total de pontos. Essa precaução serve para evitar que a forma do envelope não represente corretamente os dados ruído Barkhausen. O envelope é útil, pois serve de base para o cálculo de outros parâmetros que são: a área sob o envelope, a posição do pico máximo do envelope em relação ao eixo horizontal e a altura do pico máximo. Então foi calculada a média e o desvio padrão entre os parâmetros obtidos nos dez conjuntos de dados para cada condição. Estes valores médios e seus desvios foram aqueles utilizados na correlação entre ruído Barkhausen e fadiga.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Fadiga

De posse da estimativa inicial do limite de resistência à fadiga e da tensão de escoamento, obtida pelos ensaios de tração, estipularam-se os quatro níveis de tensão onde os primeiros ensaios de fadiga ocorreram. Os ensaios nestes quatro níveis tiveram como objetivo determinar a região da curva S-N de alto ciclo e vida finita do material estudado. Estes níveis de tensão foram arbitrados como sendo 715 MPa, 790 MPa, 865 MPa e 940 MPa. Os ensaios de fadiga conduzidos neste trabalho são apresentados, na Figura 3. Neste gráfico é possível notar que os pontos obtidos em alto ciclo com carregamento superior ao limite de resistência à fadiga são bastante homogêneos e podem ser representados por uma reta, como esperado. A dispersão dos resultados encontrada pode ser atribuída ao caráter estocástico dos ensaios de fadiga. Estes resultados são compatíveis com aqueles obtidos por Padilha⁽⁸⁾ na mesma liga e em condições semelhantes de tratamento térmico.

Curva S-N

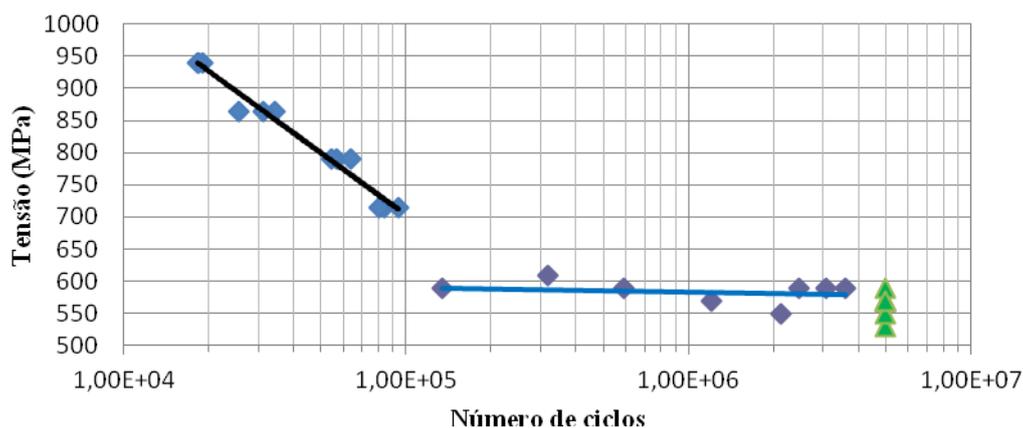


Figura 3. Curva S-N obtida a partir dos ensaios realizados nas amostras de aço AISI 4340.

Foram utilizadas, ao todo, 16 amostras para determinar o limite de fadiga, sendo que 8 delas falharam e 8 não falharam. Com isto é indiferente utilizar um ou outro destes subconjuntos para os cálculos, pois os resultados seriam idênticos. Sendo assim, foram escolhidas as amostras que falharam para estes cálculos. A aplicação do método *up-and-down*, descrito por Collins⁽¹¹⁾ resultou em 574 MPa para a estimativa estatística do limite de resistência à fadiga, além de um desvio padrão igual a 7,4 MPa. Sendo assim, ao atribuir a confiabilidade de 95%, obteve-se como limites para o intervalo de confiança 559,5 MPa e 588,5 MPa. Os resultados obtidos com o método *up-and-down* podem ser visualizados na Figura 4.

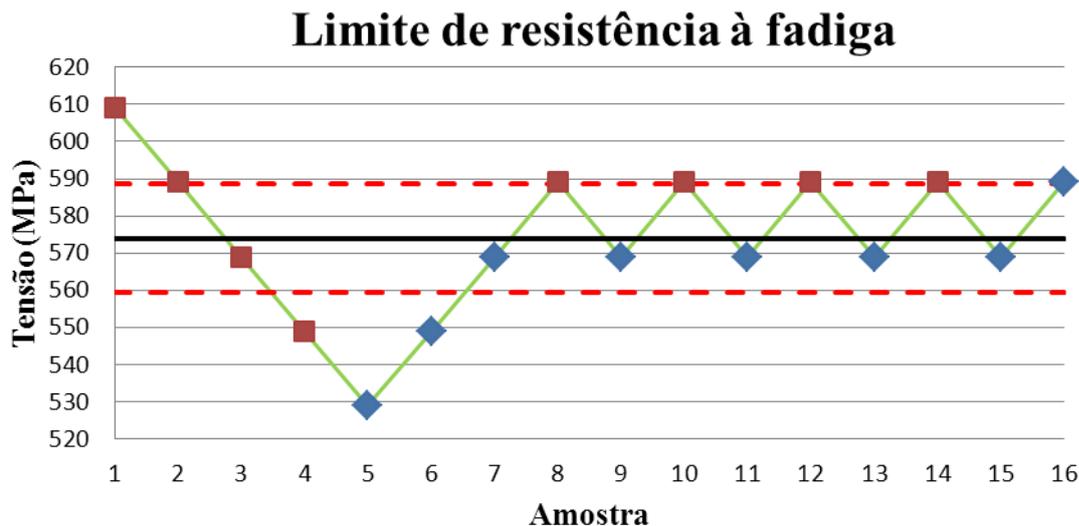


Figura 4. Gráfico dos resultados obtidos na determinação do limite de resistência à fadiga para 5×10^6 ciclos.

Ao comparar estes resultados com os resultados obtidos por Padilha⁽⁸⁾ nota-se que o material aqui estudado apresenta um limite de resistência à fadiga em torno de 100 MPa inferior àquele. Como no trabalho de Padilha,⁽⁸⁾ foram utilizadas poucas amostras no estudo desta região da curva S-N, não é possível afirmar a localização do limite de resistência à fadiga com segurança. Isto acaba por dificultar a comparação entre os resultados dos dois trabalhos. Esta diferença pode ser explicada pela variação normal da composição química do material para diferentes lotes, bem como por variações na microestrutura das amostras causadas pela disparidade de algum parâmetro do tratamento térmico.

3.2 Ruído Barkhausen

Foram ao todo, analisada a evolução do ruído Barkhausen, em vinte e cinco amostras das vinte e oito utilizadas nos ensaios de fadiga. Doze delas foram as amostras utilizadas na determinação da parte de alto ciclo e vida finita da curva S-N e as demais foram utilizadas na determinação do limite de resistência à fadiga. Devido a grande quantidade de dados são apresentados apenas parte deles, porém, o suficiente para compreender o comportamento desses resultados. Os resultados obtidos com os ensaios de ruído Barkhausen, para o valor RMS total do sinal, obtidos para todas as amostras ensaiadas apresentaram, de forma geral, variações ao longo dos ensaios de fadiga e dispersão pequena. Porém, na maioria dos casos, observou-se um comportamento levemente variável entre as amostras ensaiadas nos mesmos níveis de tensão, como está ilustrado no conjunto de amostras ensaiadas a 715 MPa da Figura 5.

Amostras ensaiadas a 715 MPa

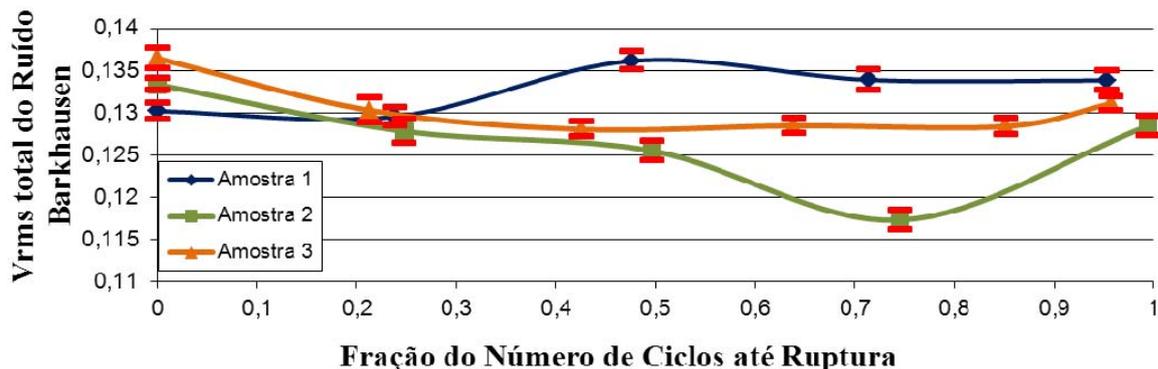


Figura 5. Evolução da voltagem RMS total do ruído Barkhausen durante os ensaios de fadiga das amostras sujeitas a 715 MPa. As barras vermelhas representam a dispersão de um desvio padrão.

No entanto, em alguns casos, como no da Figura 6 é possível notar que o RMS total do sinal Barkhausen tende a aumentar no fim da vida da amostra. Isto provavelmente se deve a transição entre o estágio I e II da propagação da trinca por fadiga. Estes resultados lembram aqueles mostrados no trabalho de Sagar et al.⁽¹²⁾ para a região próxima à fratura da amostra. Porém era necessário investigar melhor o comportamento do ruído Barkhausen nos últimos ciclos antes da quebra das amostras. Também seria importante investigar o comportamento das discordâncias através de microscopia eletrônica de transmissão para acompanhar a evolução das discordâncias e tentar explicar qual é a razão desse aumento no sinal Barkhausen. Para investigar mais detalhadamente o comportamento do ruído Barkhausen a partir da região de transição entre os estágios I e II do crescimento da trinca, deve-se interromper mais frequentemente o ensaio de fadiga a fim de analisá-lo. Estas interrupções devem ser concentradas no fim da vida da amostra, onde a transição ocorre. No entanto, é difícil saber quando a amostra irá falhar, especialmente com carregamentos próximos ao limite de resistência à fadiga, o que aumenta ainda mais o número de interrupções necessário durante os ensaios.

Amostras ensaiadas a 790 MPa

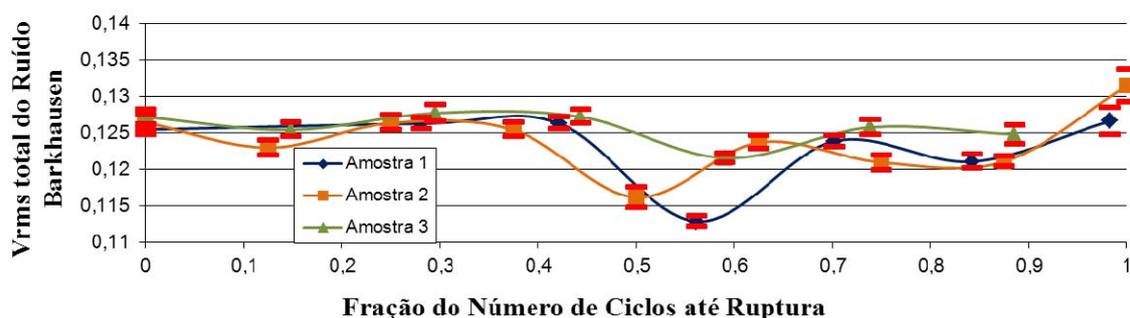


Figura 6. Evolução da voltagem RMS total do ruído Barkhausen durante os ensaios de fadiga das amostras sujeitas a 790 MPa. As barras vermelhas representam a dispersão de um desvio padrão.

Para diminuir um pouco a incerteza em relação a como escolher a região perto da fratura, utilizamos amostras carregadas como as usadas para determinar a curva S-N da Figura 3. Conhecendo aproximadamente o número N' de ciclos que resultaria em fratura, examinamos cuidadosamente a região acima de $0,6 N'$,

utilizando passos de 500 ciclos para depois parar e fazer medidas de ruído Barkhausen. Um resultado típico é mostrado na Figura 7. O valor de V_{rms} começou a aumentar, tipicamente quando o número de ciclos chegou perto de $0,7 N'$. Após atingir um valor máximo, V_{rms} caiu abruptamente e depois reiniciou a sua subida para valores altos. Neste momento ocorreu a fratura da peça. Fizemos um exame cuidadoso do final da curva em três amostras carregadas a 865 MPa, bem como em três amostras carregadas em 715 MPa e 790 MPa. Na maioria dos casos, foi observado uma queda brusca em V_{rms} logo antes da fratura da peça.

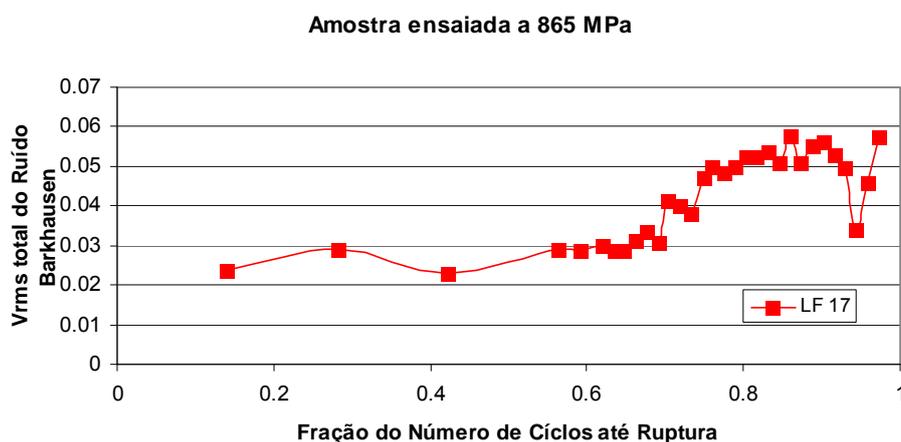


Figura 7. V_{rms} em função do número de ciclos para uma amostra carregada a 865 MPa.

Curvas semelhantes, com um mínimo profundo aparecendo logo antes da ruptura, foram apresentadas pelo Sagar et al.⁽¹²⁾ que estudaram ruído Barkhausen e microestrutura em dois aços de baixo carbono. Sagar et al. discutiram o mínimo em termos de intrusões formadas em bandas de escorregamento persistentes (persistent slip bands – PSB). A localização de uma deformação plástica cíclica num volume específico resulta na formação de um PSB e a alta concentração de tensão na ponta da PSB pode resultar na nucleação de uma trinca. O modelo de Essmann, Goesele e Mughrabi⁽¹³⁾ mostrou que uma camada de discordâncias forma na fronteira entre a PSB e a matriz e que as discordâncias resultam em tensões compressivas na PSB. A presença de tensões compressivas poderia causar uma redução na amplitude do ruído Barkhausen e a formação de uma intrusão, resultando em variações nas tensões superficiais na peça. Com a iniciação de uma trinca, ocorre a relaxação da tensão e a amplitude do ruído Barkhausen aumenta. Portanto, a estrutura em torno do mínimo corresponde a formação de uma intrusão e a nucleação de uma trinca.

4 CONCLUSÕES

O presente trabalho foi motivado pelo desejo de examinar a possibilidade de usar medidas de ruído Barkhausen como um ensaio não-destrutivo magnético para estudar o processo de fadiga em aço AISI 4340, largamente utilizado na construção mecânica. Foram usinadas amostras cilíndricas de acordo com a norma ISO 1143 em materiais já tratados termicamente para ter uma dureza de 39 HRC. Ensaios de fadiga foram realizados em uma máquina de flexão rotativa com $R = -1$. Foram determinadas a curva S/N bem como o limite de fadiga (574 MPa). Os resultados concordam bem com aqueles apresentados por Padilha. Durante os ensaios, ao menos 50% das amostras sofreram interrupções periódicas a fim de serem

realizadas medidas de ruído Barkhausen. Cálculos forneceram o valor RMS global do ruído Barkhausen. Variações significativas neste parâmetro ocorreram somente no final da vida das amostras ensaiadas. Medidas detalhadas mostraram uma assinatura característica antes da falha da amostra, semelhante àquela observada por Sagar et al. em aço de baixo carbono. Sagar et al. associaram a estrutura em torno do mínimo à formação de uma intrusão e à nucleação de uma trinca.

Os resultados obtidos neste trabalho indicam que o controle de peças sujeitas a cargas dinâmicas por meio de medidas de ruído Barkhausen pode ser promissor para a detecção da aproximação de falha por fadiga.

Agradecimentos

Este trabalho foi apoiado pela Fundação de Apoio à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul – Fapergs. F. P. Missell, R. Baiotto, R. G. L. Schwanke, F. S. B. Giroto e E. S. Bastos receberam apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq.

REFERÊNCIAS

- 1 L. Pook, **Metal Fatigue: What It Is, Why It Matters**. 1ed. Dordrecht: Springer, 2007.
- 2 D. Jiles. **Introduction to Magnetism and Magnetic Materials**. London: Chapman & Hall, 1991.
- 3 J. A Pérez-Benitez, L. R. Padovese, J. Capó-Sánchez, J. Anglada-Rivera, “Investigation of the magnetic Barkhausen noise using elementary signals parameters in 1000 commercial steel”. *J. Magn. Magn. Mater.*, v. 263, pp. 72-77, 2003.
- 4 R. Baiotto, G. Gerhard, M. Fukuhara, T. Yonamine, F. P. Missell, “Barkhausen noise and magnetic properties of plastically deformed silicon steels”, *IEEE Trans. Magn.* v. 46, pp. 294 – 297, 2010.
- 5 V. Moorthy, B. K. Choudhary, S. Vaidyanathan, T. Jayakumar, K. Bhanu Sankara Rao, Baldev Raj. “An assessment of low cycle fatigue damage using magnetic Barkhausen emission in 9Cr-1Mo ferritic steel”, *Int. J. Fatigue* v. 21, pp. 263-269, 1999.
- 6 E. S. Palma, T. R. Mansur, S. F. da Silva Jr, A. Alvarenga Jr. “Fatigue damage assessment in AISI 8620 steel using Barkhausen noise”, *Int. J. Fatigue* v. 27, pp. 659–665, 2005.
- 7 R. Baiotto, “O ruído Barkhausen como ferramenta não destrutiva para análise do processo de fadiga em aço AISI 4340”, Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Mecânica, defendido na Universidade de Caxias do Sul, 2011.
- 8 R. Q. Padilha, **Influência na Vida em Fadiga da Espessura das Camadas de Níquel e Cromo Duro em Aço ABNT 4340**. Guaratinguetá: 2004. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual Paulista.
- 9 J. E. Shigley, C. R. Mischke, R. G. Budynas, **Projeto De Engenharia Mecânica**. 7 ed. Porto Alegre: Bookman, 2004.
- 10 A. Alvarenga, **Acumulo de danos por fadiga no aço SAE 8620**. Belo Horizonte: 2001. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Mecânica) – Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais.
- 11 J. A. Collins, **Failure of Materials in Mechanical Design**, 2nd Ed. New York: John Wiley & Sons, 1993.
- 12 S. P. Sagar, N. Parida, S. Das, G. Dobmann, D. K. Bhattacharya, “Magnetic Barkhausen emission to evaluate fatigue damage in a low carbon structural steel”, *Int. J. Fatigue* v.27, pp. 317–322, 2005.
- 13 U. Essmann, U. Goesele, H. Mughrabi, “A model of extrusions and intrusions in fatigued metals, I. Point defect production and growth of extrusions” *Philos Mag. A* v. 44, p. 405, 1981.