

ESTUDO DA INTERFERÊNCIA DOS PROCESSOS/PROJETOS DE SOLDA NA FABRICAÇÃO DE ESTRUTURAS METÁLICAS

M. Vidor¹, L. Vieira¹, T. Giacomelli¹, S. R. Kunst¹, G. J. L. Gerhardt¹

¹Universidade de Caxias do Sul – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de
Processos e Tecnologias (PGEPROTEC) - Rua Francisco Getúlio Vargas, 1130 CEP
95070-560 - Caxias do Sul
vidormatheus@gmail.com

RESUMO

O presente trabalho estuda e caracteriza o efeito das operações de solda em amostras de aço industrial fazendo uma comparação entre medidas não destrutivas utilizando ruído magnético Barkhausen (BN) e resultados de tração. Três grupos de corpos de prova foram testados, sendo dois grupos soldados com processos distintos, um mais rápido e com maior corrente e outro mais lento e com menor corrente. Essas peças, uma vez soldadas, foram mapeadas em sua superfície por meio de BN e a variância, na superfície, comparada com os resultados de teste padrão de tração. A variância da resistência a tração mostrou correlação com a variação da superfície mapeada com BN de forma que é possível esperar que esse teste não destrutivo possa ser utilizado para efeitos de controle de qualidade com baixo custo em peças soldadas onde a homogeneidade é um fator importante.

Palavras-chave: Excelência Operacional, Processo de Soldagem, Parâmetros de Soldagem, Tensões Residuais.

1. INTRODUÇÃO

A soldagem se destaca na indústria metalúrgica como um dos principais processos de fabricação, sendo vital para montagens de componentes [6]. Mesmo com um histórico de pesquisa longo, a soldagem ainda possui algumas desvantagens inerentes a sua natureza, tais como expansão e contração térmica, transformações microestruturais e introdução de tensões residuais desenvolvidas em função do elevado aporte de calor introduzido durante o processo [1-4]. Dado a característica estocástica desses problemas, um controle de qualidade não destrutivo que possa avaliar o estado de uma peça soldada é uma necessidade cada vez mais importante.

Um desses processos de controle não-destrutivos é o Ruído Magnético Barkhausen (BN). Em um trabalho recente, Vourna e colaboradores [4] avaliaram a possibilidade de utilizar BN a fim de determinar a distribuição de tensões residuais em amostras de aço elétrico soldadas com grão não-orientado. Os resultados foram verificados por DRX e exame da microestrutura, além de propriedades mecânicas tais como microdureza, verificando-se que o desvio entre os métodos ficava dentro de limites aceitáveis. Isso mostra alta potencialidade do BN em ensaios não destrutivos de materiais soldados.

Neste contexto, o objetivo do presente trabalho é analisar a interferência nos processos de solda quando ajustadas as variáveis essenciais de corrente e tensão na fabricação de estruturas metálicas comparando os resultados de análises não-destrutivas (BN) com análises destrutivas, visando uma ferramenta que ajude no controle de qualidade do produto final soldado. Sabe-se que a corrente de soldagem é de primordial importância na penetração da solda, sendo a penetração diretamente proporcional à corrente. Porém pequenas alterações na corrente podem não interferir na penetração, mas na maioria das vezes causam mudanças residuais ao redor da superfície soldada [11,12]. Nesse trabalho, mostra-se que a variância da resistência à tração apresenta correlação com a variação da superfície mapeada com BN, de forma que é possível esperar que esse teste não destrutivo possa ser utilizado para efeitos de

controle de qualidade com baixo custo em peças soldadas onde a homogeneidade é um fator importante.

2. MATERIAIS E METODOS

2.1 Composição do Material e Parâmetros do Processo de Soldagem

O material utilizado foi o aço carbono NBR 6656 LNE- 38 com espessura de 4 mm, apresenta a seguinte configuração química (números em %): C: 0.12 máx.; Si: 0.35 máx.; Mn: 1.10 máx.; P: 0.025 máx.; e S: 0.015 máx.; Entre as principais propriedades mecânicas: Limite de Escoamento (MPa): 380 - 530; Limite de Ruptura (MPa): 460 - 600; e Alongamento de 23%. Este material foi selecionado por ser aplicado em larga escala na fabricação de estruturas de implementos rodoviários, apresentando como principais características, boa conformabilidade e soldabilidade. O processo de soldagem utilizado foi MAG semi-automático. O processo MAG semi-automático consiste em um processo de soldagem ao arco elétrico com gás de proteção (GMAW Gas Metal Arc Welding), o arco elétrico é estabelecido entre a peça e o consumível na forma de arame. O arco funde continuamente o arame a medida que este é alimentado a poça de fusão. O metal de solda é protegido da atmosfera pelo fluxo de um gás ou mistura de gases [11]. Os parâmetros utilizados para os ensaios são ilustrados na Tabela 1. As dimensões das peças, bem como as posições onde são efetuadas os testes desse trabalho encontram-se na Figura 1.

Tabela 1. Parâmetros de processo aplicados nos corpos de provas.

Parâmetros	Alternativa A	Alternativa B
Corrente (A)	286 - 292	202 - 208
Tensão (V)	28,6 - 29	22,2 - 22,6
Gás (10 -15 L/s)	Ar + 20% CO ₂	
Velocidade (cm/min)	38	
Metal de adição	ER70S-6 - 1,2 mm	
Passes	1	
Corrente	Contínua	
Polaridade	Positiva	

2.2 Macrografia

Realizou-se análises de macrografia através do instrumento Inspetor de Solda afim de verificar a penetração e fusão obtida no processo de soldagem. As amostras foram lixadas, polidas e posteriormente atacadas com a solução de ácido nítrico 10% durante 1 minuto.

2.3 Tração

Os ensaios de tração foram realizados na máquina universal de ensaios Wolpert. As análises seguiram as indicações da norma ASME IX - QW462 para confecção dos corpo de provas (CPs) e posterior avaliação. Os resultados coletados nos ensaios de tração têm a finalidade de validar ou reprovar os processos de soldagem, analisando a variância entre as alternativas A e B, comparando-os com os resultados obtidos no ensaio de ruído magnético Barkhausen (BN).

2.4 Ruído Magnético Barkhausen

O sistema usado para as medições de ruído de Barkhausen é composto por um gerador de função (Stanford Research Systems DS360), o qual emite um sinal senoidal com uma frequência de 1Hz. Este sinal dirige um amplificador bipolar (Kepco BOP 36-6M) que por sua vez aciona um *yoke* de laminas de FeSi (duas bobinas de 650 espiras de fio AWG16 Cu), que magnetiza a amostra. O Ruído Barkhausen é captado por uma bobina secundária (300 espiras, AWG32) enrolada em laminas de FeSi. O sinal de ruído é filtrado e amplificado com um filtro de passagem de banda (Stanford Research Systems SR640), cuja frequência passante está fixada em 0,35-99.9kHz. Dez conjuntos de dados são recolhidos para cada amostra, em 500.000 Hz, com uma placa de aquisição de dados (IOtech 16bit ADC 1 MHz) e armazenada em um computador para posterior análise.

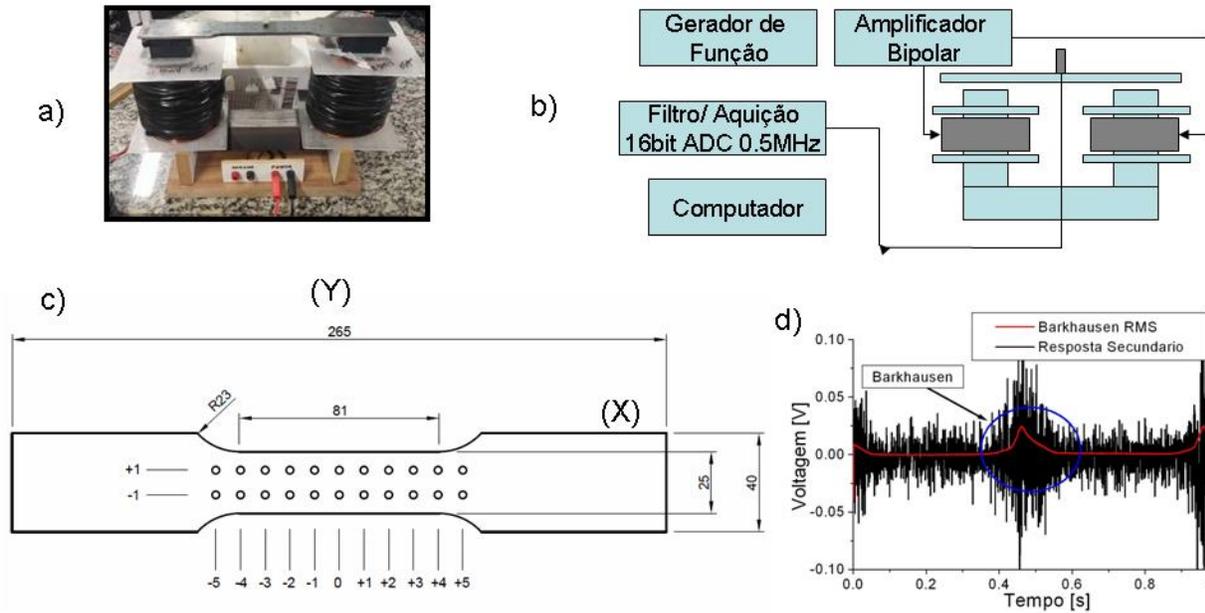


Figura 1. Sistema para avaliação do ruído Barkhausen. Em (a) é apresentado uma foto do experimento. Em (b) é mostrado um esquema de blocos com o gerador de funções e o yoke magnetizador. As amostras possuem as dimensões em mm apresentadas em (c) e os pontos analisados estão marcados sobre a peça, onde arbitramos a origem em 0 (essas dimensões estão em cm). O cordão de solda é passado nessa linha. O dado é coletado na bobina sensora por meio da placa de aquisição e posteriormente analisado. Um sinal exemplo com o RMS calculado sobre ele é apresentado em (d). O valor que será analisado é a área do RMS do pico central. Por meio desse valor é possível obter uma dispersão do valor sobre a superfície da amostra.

Calcula-se a voltagem RMS de todos os sinais e o envelope da voltagem RMS medida. Esse procedimento é tomado ao longo da peça. Um esquema é apresentado na figura 1. A Área da curva de RMS durante a sua ocorrência é uma medida da energia do sinal. Essa medida se modifica de acordo com alterações estruturais no material e será utilizada como quantificador do BN nesse trabalho. Sistema similar tem sido utilizado em vários outros trabalhos [3]. A figura 3 mostra, nos itens (a) e (b) dois exemplos da variabilidade dessa intensidade sobre as peças

2.5 Análise estatística

Quinze corpos de prova com geometria como apresentada a figura 1 foram avaliados, divididos em três grupos sendo que no grupo A foram empregados parâmetros de corrente e tensão elevados, e no grupo B parâmetros menos severos (corrente e tensão mais baixos). O grupo C, sem solda, é utilizado como controle conforme Tabela 1.

Será considerada a variabilidade ao longo da peça. Uma vez que se tratam de 22 medidas ao longo da superfície, deve-se considerar a variabilidade ao redor do centro da peça. Aqui se emprega um coeficiente de variabilidade (CV) para a área abaixo da curva do RMS do BN. Essa quantidade é o desvio padrão da área medida ao longo da peça dividido pela média na equação:

$$CF = \frac{\sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_i (H_i - \frac{1}{N} \sum_i H_i)^2}}{\frac{1}{N} \sum_i H_i} \quad (1)$$

onde A é a área da curva de RMS do BN como ilustrado na figura 1, e N é o número de posições medidas sobre as peças (aqui totalizando 22 posições).

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 MACROGRAFIA

A Figura 2 ilustra os resultados obtidos nas análises macrográficas, em relação a fusão e penetração do cordão de solda. Através da macrografia é possível observar uma constância na penetração e largura do cordão. Tal constatação é visualizada quando comparada a largura do cordão na Alternativa A (maior corrente) com a Alternativa B (menor corrente). Avaliando a penetração percebe-se que não há notável diferença em função da espessura do metal base soldado, sendo que ambas alternativas apresentaram penetração total [11].

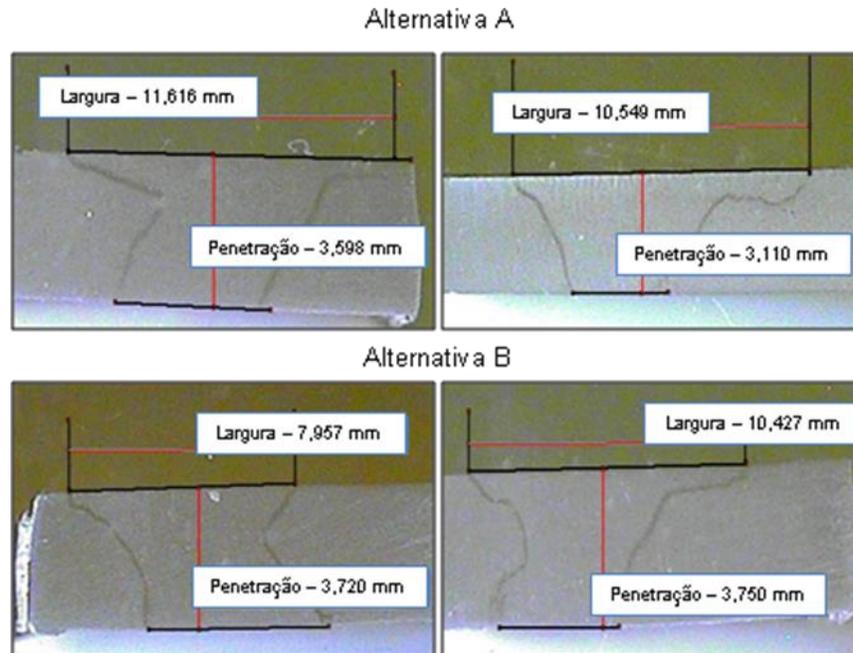


Figura 2. Análises de macrografia em duas peças de cada grupo. É possível observar uma constância na penetração e largura do cordão. Tanto grupo A como grupo B apresentaram penetração total.

3.2 Tração e Ruído Barkhausen

Os resultados do teste de tração estão mostrados na Tabela 3 e ilustrados na Figura 3, juntamente com dois exemplos do ensaio de BN. Aqui se compara a condição controle com as alternativas A e B. Na figura 3 é possível perceber que a variabilidade do teste de tração foi consistente com a variabilidade observada nas peças com ruído BN e medida com o coeficiente de variabilidade sobre a peça.

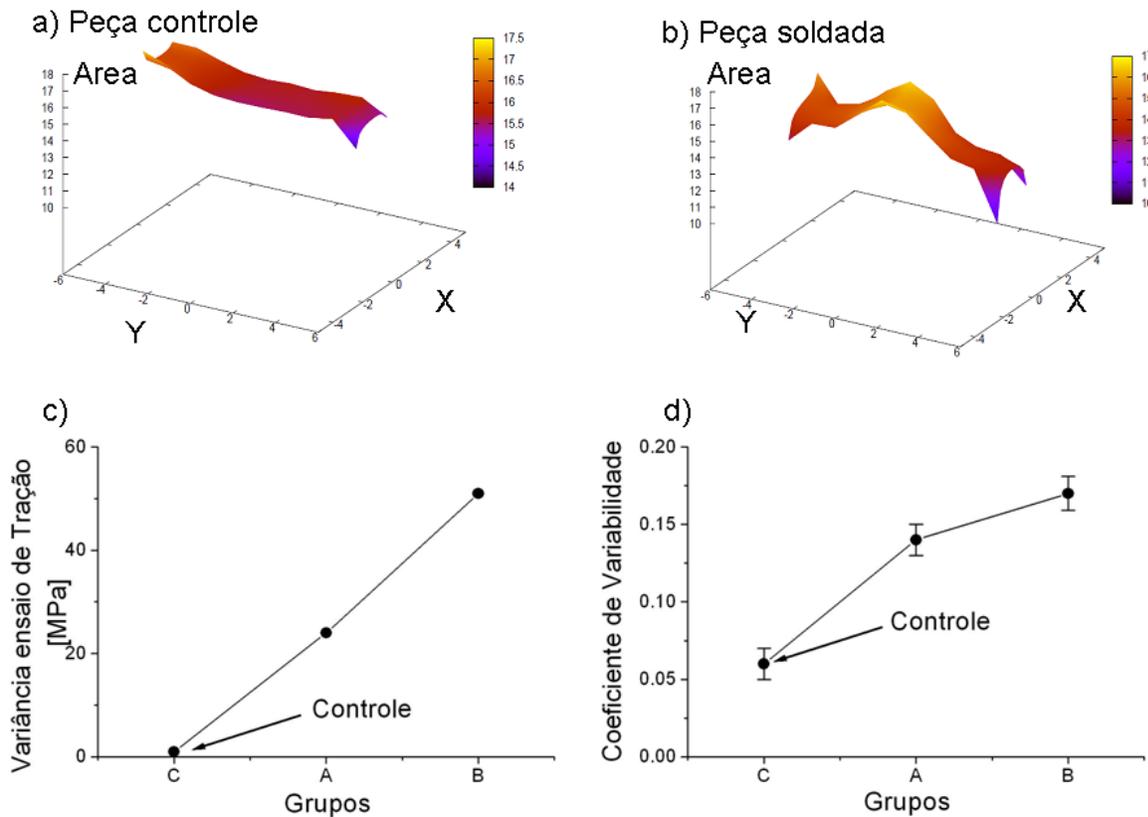


Figura 3. Dois exemplos da variação da área do BN ao longo de uma peça são apresentados em (a) e (b), com uma peça controle (não soldada) e uma peça soldada para comparação. A cor é proporcional a intensidade da variável. Em (c) é apresentado a variância do ensaio de tração para os grupos (conforme tabela 3) e em (d) o resultado do coeficiente de variabilidade (equação 1) para os mesmos grupos de peças. É possível verificar que existe correlação entre o ensaio destrutivo de tração e o ensaio de BN.

Tabela 3. Resultados obtidos nos ensaios de tração.

Processo	Alongamento Final (%)	Alongamento Elástico (%)	Força Máxima (N)	Resistência a Tração (Mpa)	Tensão de Escoamento (Mpa)
Controle	31,9	8,71	38089,42	401,78	276,09
	30,32	8,86	37907,7	400,79	274,72
Alternativa A	15,91	12,22	38780,05	412,96	306,78
	13,51	12	36744,73	388,83	292,82
Alternativa B	19,31	9,66	36199,48	384,13	272,38
	20,93	10,45	41142,43	435,91	316,63

4. Conclusões

A correlação entre BN e tensão residual em ações é bem conhecida. Em trabalhos recentes [7,8,9] foi possível verificar que, quando se compara o BN em aços com e sem alívio de tensão residual, o aço sem alívio sempre apresenta maior variabilidade. Esses resultados foram atestados por ensaio de R-X e furo cego [9]. Em outro trabalho [10] foi possível estudar o BN em um cordão de solda em aço, mostrando claramente que os parâmetros do BN formam um perfil que varia de acordo com a distância medida a partir do cordão de soldadura. Esse tipo de ferramenta pode proporcionar uma determinação precisa não-destrutiva do estado do material afetado próximo do cordão de solda.

Nas peças analisadas, o BN se mostrou um bom preditor do comportamento da peça soldada. Nesse trabalho o que se procurou avaliar foi a homogeneidade das peças soldadas. No caso do grupo A foi utilizada uma tensão e uma corrente mais alta, de forma a que a solda foi efetivada de forma mais rápida, diminuindo os efeitos de dispersão de calor e produzindo uma peça final com menos inhomogeneidades ao longo de sua superfície. No grupo B foram empregados parâmetros mais conservadores, de forma que houve um tempo para a dispersão do calor na peça e adicional gradiente de tensão residual. Esse efeito acaba aparecendo no teste de tração, quando a peça com maior irregularidade termina possuindo uma variância maior da resistência a tração que o outro grupo de peças.

É importante salientar que ambos os processos tiveram um resultado bem satisfatório para efeitos práticos industriais em termos de resistência e ambos os casos podem ser considerados como aprovados. A macrografia mostra que a penetração de ambos foi similar, porém ainda assim a peça com maior inhomogeneidade superficial acaba por apresentar um resultado mais irregular no teste de tração. Dentro desse contexto, esse trabalho mostra que o BN pode ser utilizado como uma medida bem fina da qualidade da solda que está sendo aplicada. Adicionalmente essas amostras devem ser testadas com outras técnicas, como raio X, furo cego e micrografia, e os resultados comparados com o BN para se determinar quais fatores são melhor identificados pelo teste.

5. Referencias Bibliográficas

[1] CHEN, H., ZHU., Z., Surface treatment to reduce and redistribute residual-stresses in A7N01 weld by micro-arc oxidation. *Journal of Materials Processing Technology*. v.231, p.248-253, 2016.

[2] KARTAL, M. E., KANG, Y. H., The influence of welding procedure and plate geometry on residual stresses in thick components. *International Journal of Solids and Structures*. v 80, p. 420-429, 2016.

[3] KTENA, APHRODITE, EVANGELOS HRISTOFOROU, GUNTHER JL GERHARDT, FRANK P. MISSELL, FERNANDO JG LANDGRAF, DANIEL L. RODRIGUES, and M. ALBERTERIS-CAMPOS. "Barkhausen noise as a microstructure characterization tool." *Physica B: Condensed Matter* 435 (2014): 109-112.

[4] VOURNA, POLYKSENI, APHRODITE KTENA, ATHANASIOS G. MAMALIS, EVANGELOS HRISTOFOROU, PENG WAN CHEN, and QIANG ZHOU. "Magnetic Barkhausen measurements for determining residual stress distribution in welded electrical steels." In *Materials Science Forum*, vol. 856, pp. 147-152. Trans Tech Publications, 2016.

[5] WERMAN, K. *Welding Processes Handbook*. CRC Press, New York, 2003

- [6] WITHERS, P. J., Residual stress and its role in failure. Rep. Prog. Phys. v70, p. 2211-2264, 2007.
- [7] YELBAY HI, CAM I, GÜR CH. Non-destructive determination of residual stress state in steel weldments by Magnetic Barkhausen Noise technique. NDT & E International. 2010 Jan 31;43(1):29-33.
- [8] LACHMANN C, NITSCHKE-PAGEL T, WOHLFAHRT H. Characterisation of residual stress relaxation in fatigue loaded welded joints by X-ray diffraction and Barkhausen noise method. In Materials Science Forum 2000 (Vol. 347, pp. 374-381). Trans Tech Publications.
- [9] LINDGREN M, LEPISTÖ T. Application of Barkhausen noise to biaxial residual stress measurements in welded steel tubes. Materials science and technology. 2002 Nov 1;18(11):1369-76.
- [10] SWALLEM M, BLAOW MM, ADARRAT AM. Optimizing detection parameters of magnetic Barkhausen noise using heat affected zone in welded ship steel plate. Advanced Materials Research. 2015 Apr 29;1119.
- [11] MODENESI, PAULO J., PAULO V. MARQUES, and DAGOBERTO B. SANTOS. "Introdução à metalurgia da soldagem." *Belo Horizonte: UFMG* (2012).
- [12] SANTOS, C. *Processos de Soldagem - Conceitos, Equipamentos e Normas de Segurança*. Érica, 06/2015. VitalSource Bookshelf Online.

**ANALYSIS OF PARAMETER INTERFERENCE IN WELDING PROCESS FOR
MANUFACTURING STRUCTURES IN STEEL**

Abstract

This work studies and characterizes the effect of welding operations on industrial steel samples making a comparison between a non-destructive measurement (magnetic Barkhausen noise (BN) and traction tests. Three groups of samples were tested: two welded groups with distinct processes (faster and slower) and a control without welding. Welded and control samples were mapped onto its surface using BN and the BN variance along the surface was compared to the traction test results. The variation in tensile traction showed correlation with the variation of the BN mapped surface so that it is possible to expect that this non-destructive test can be used for quality control purposes at low cost in welding processes, where homogeneity plays a fundamental role.

Key-words: Operational Excellence, Welding Process, Welding Parameters, Residual Stress.