



ANÁLISES ESTATÍSTICA E EXPERIMENTAL DAS TENSÕES RESIDUAIS E DO RUÍDO MAGNÉTICO BARKHAUSEN EM JUNTAS SOLDADAS POR RESISTÊNCIA ELÉTRICA POR PONTO DE AÇO ARBL

Paola Rodrigues Pereira¹, Hector Reynaldo Costa², Juan Manuel Pardal¹, Leosdan Noris¹, Marília Diniz³, Maria Cindra Fonseca^{1*}

1 - Departamento de Engenharia Mecânica/PGMEC/ UFF – Universidade Federal Fluminense, Rua Passo da Pátria, 156, CEP 24210-240, São Domingos, Niterói – RJ.

2 - Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca – PPEMM – CEFET/RJ, Av. Maracanã, 229, CEP 20.271-110, Rio de Janeiro – RJ.

3 - Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rua Fonseca Teles, 121, CEP 20.940-90, São Cristóvão, Rio de Janeiro – RJ.

mariacindra@id.uff.br

RESUMO

O aço HC420LA é um aço ARBL (alta resistência e baixa liga) laminado a frio, aplicado na indústria automotiva, que possui baixo teor de elementos de liga e de carbono adicionados, garantindo boa tenacidade e soldabilidade. A soldagem por resistência elétrica por ponto (RSW – resistance spot welding) possui inúmeras vantagens, como rápida aplicação, baixo custo e facilidade de automação. Devido à ação combinada da contração, aporte térmico e transformações de fases, que ocorrem durante a operação de soldagem, tensões residuais são originadas na junta soldada. Estas tensões são geradas em todos os processos de fabricação e são produzidas quando as regiões de um material sofrem deformações plásticas ou elásticas heterogêneas de maneira permanente, sem a presença de quaisquer cargas externas. Está bem estabelecido que as tensões residuais tratativas têm efeito prejudicial, pois podem se somar aos carregamentos de serviço, contribuindo para a nucleação e a propagação de trincas de fadiga. Este trabalho tem o objetivo de realizar uma análise de variância, pelo método ANOVA, e correlacionar os resultados das tensões residuais e de RMB nas amostras soldadas a ponto. As tensões residuais foram analisadas por difração de raios-X, pelo método do $\sin^2\psi$ e as medidas de RMB foram realizadas nos mesmos locais. A análise de variância foi realizada com nível de significância de 0,05, de acordo com os diferentes tempos de soldagem (20, 30 e 40 ciclos), as faces da amostra (superior e inferior) e as regiões da amostra (centro e borda da pepita). Esta indicou que há diferença significativa nos resultados de tensões residuais e RMB, de acordo com os tempos de soldagem e a região de centro ou borda da pepita, sendo o valor-P menor que 0,05 para estes casos. Além disso, as análises também mostraram que não há diferença considerável em relação ao lado superior e inferior da amostra soldada, onde o valor-P foi 0,744 para tensões residuais e 0,586 para RMB. O teste de Correlação de Pearson, com nível de significância de 0,08 demonstrou coerência nos valores de tensões residuais e RMB, apesar da fraca relação, onde o coeficiente de correlação foi 0,261 e o valor-P foi 0,0733.

Palavras-chave: tensões residuais, soldagem a ponto, ruído magnético Barkhausen, difração de raios-X.

INTRODUÇÃO

Aços de alta resistência e baixa liga (ARBL) ou *high-strength low-alloy* (HSLA) em inglês, são definidos como a família de aços com composição química especialmente desenvolvida para proporcionar melhores propriedades mecânicas do que aquelas obtidas em aços carbono convencionais⁽¹⁾. O aço HC420LA é um aço ARBL, utilizado na indústria automobilística devido, principalmente, à sua resistência e boa soldabilidade. Este aço, produzido por laminação a frio, foi introduzido recentemente no mercado, sendo ainda pouco estudado⁽²⁾.

A soldagem por resistência elétrica por ponto ou soldagem a ponto, referenciada, em inglês, como *resistance spot welding* (RSW) é um método de soldagem comumente utilizado na indústria automotiva, que tem sido empregado para unir chapas metálicas desde a década de 1920⁽³⁾. Durante o processo o aquecimento localizado faz com que ocorra a fusão do material e um ponto soldado, denominado pepita, é criado após a solidificação⁽⁴⁾.

Após o término da operação de soldagem, devido à distribuição não uniforme de temperatura, tensões residuais são originadas na junta soldada. Tensões residuais são geradas por todos os processos de fabricação e são produzidas quando as regiões de um material sofrem deformações plásticas ou elásticas heterogêneas de maneira permanente, sem a presença de cargas externas⁽⁵⁾. As tensões residuais podem se somar aos carregamentos de serviço e, dependendo de sua natureza, magnitude e distribuição, serão deletérias ou benéficas aos materiais. Está bem estabelecido que as tensões residuais trativas têm efeito prejudicial, pois contribuem para a nucleação e a propagação de trincas de fadiga e diminuem a resistência à corrosão sob tensão. Já as tensões residuais compressivas aumentam a vida em fadiga das estruturas⁽⁶⁾.

O método convencional de análise de tensões residuais por difração de raios-X é denominado método de $\sin^2\psi$, que envolve a medição do espaçamento interplanar e da deformação dos planos cristalinos do material⁽⁷⁾. É uma técnica bem estabelecida e largamente usada há mais de 60 anos. Outras técnicas não destrutivas estão sendo estudadas e desenvolvidas para avaliar as tensões residuais⁽⁸⁾. Dentre elas, o Ruído Magnético de Barkhausen (RMB), ou *Magnetic Barkhausen Noise*, que tem origem do processo de magnetização de materiais ferromagnéticos. Ao aplicar um campo magnético externo no material, ocorre a reorganização da estrutura magnética (paredes de Bloch e domínios de Weiss) à medida que o estado multidomínio é transformado em um estado de domínio único⁽⁹⁾. As tensões mecânicas e/ou descontinuidades microestruturais presentes no material exercem efeito no movimento das paredes dos domínios e daí surge a possibilidade de correlacionar as medidas do ruído com os campos de tensões.

Os avanços nos métodos analíticos observados durante as últimas décadas produziram um aumento na quantidade e complexidade de dados experimentais. A maneira mais comum de abordar essas questões é pela Análise de Variância (ANOVA), que permite explorar as relações entre fatores controlados em um experimento e uma única resposta⁽¹⁰⁾.

Assim sendo, o presente trabalho tem por objetivo o estudo das tensões residuais geradas na soldagem a ponto de aço ARBL por difração de raios-X (XRD), comparando com o ruído magnético Barkhausen (RMB) e correlacionando ambos com análises estatísticas.

MATERIAIS E MÉTODOS

O material selecionado para o presente estudo foi o aço HC420LA de 2,0 mm de espessura, fabricado conforme a norma DIN EN 10268. A Tabela 1 e a Tabela 2 apresentam a composição química e as propriedades mecânicas do aço.

Tabela 1: Composição química do aço HC420LA (máx. % de peso).

C	Si	Mn	P	S	Al	Ti	Nb
0,14	0,5	1,6	0,030	0,025	0,015	0,15	0,09

Tabela 2: Propriedades mecânicas do aço HC420LA.

σ_{LE} (MPa)	σ_{LR} (MPa)	Deformação (%)
420 – 520	470 – 600	17

Foram realizadas doze soldas pelo processo de soldagem por resistência elétrica por ponto, variando o tempo de soldagem como exibido na Tabela 3, no Laboratório de Soldagem (LASOL), do CEFET-RJ.

Tabela 3: Tempos de soldagem (ciclos).

Grupos	1ª compressão	2ª compressão	Tempo de soldagem	Retenção
I	25	10	20	5
II	25	10	30	5
III	25	10	40	5

As tensões residuais foram medidas por difração de raios-X, pelo método do $\sin^2\psi$, com radiação $CrK\alpha$ ($\lambda = 2,29092 \text{ \AA}$), no Laboratório de Análise de Tensões (LAT) da Universidade Federal Fluminense (UFF), utilizando o analisador de tensões XStress3000, da marca Stresstech, apresentado na Figura 1. Na face superior das juntas soldadas, foram analisadas as tensões residuais em três pontos (bordas e centro da pepita), conforme indicado na Figura 2, e na face inferior somente no centro da pepita.



Figura 1: Analisador de tensão XStress3000.

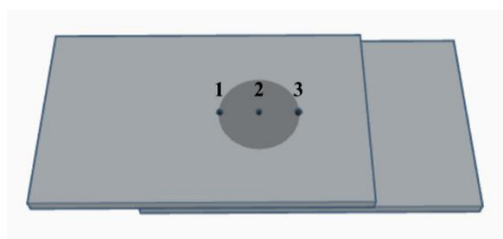


Figura 2: Pontos de medição de tensão residual.

Foi analisado o RMB no centro e na borda da pepita, em ambas as faces, na direção longitudinal, com frequência de excitação de 50 Hz. Os resultados foram tratados no *software* MATLAB para obter valores eficazes de RMS.

As análises estatísticas foram realizadas pelo *software* SigmaPlot, utilizando os métodos ANOVA (análise de variância), com o teste de normalidade de Shapiro-Wilk e o teste Tukey, e Correlação de Pearson.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A microestrutura, por microscopia óptica, da amostra como recebida está apresentada na Figura 3a. Após a soldagem, uma amostra do grupo II foi analisada na seção longitudinal da pepita.

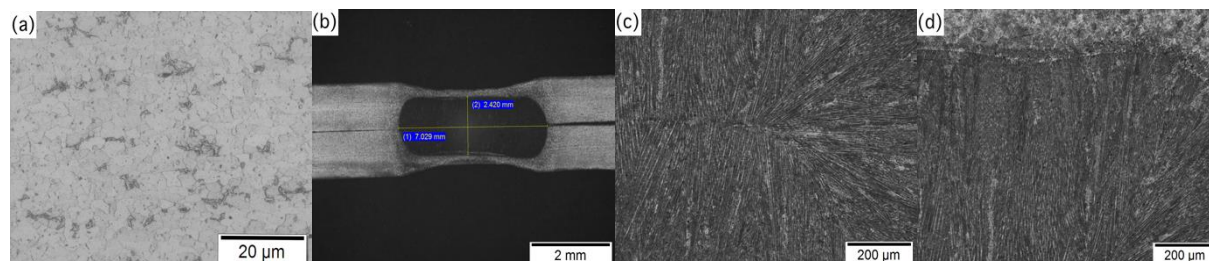


Figura 3: (a) Microestrutura do aço HC420LA, como recebido. (b) Pepita com dimensões. (c) Ponto de fusão das chapas. (d) Zona termicamente afetada.

O perfil de tensões residuais ao longo da pepita é exibido nos gráficos da Figura 4.

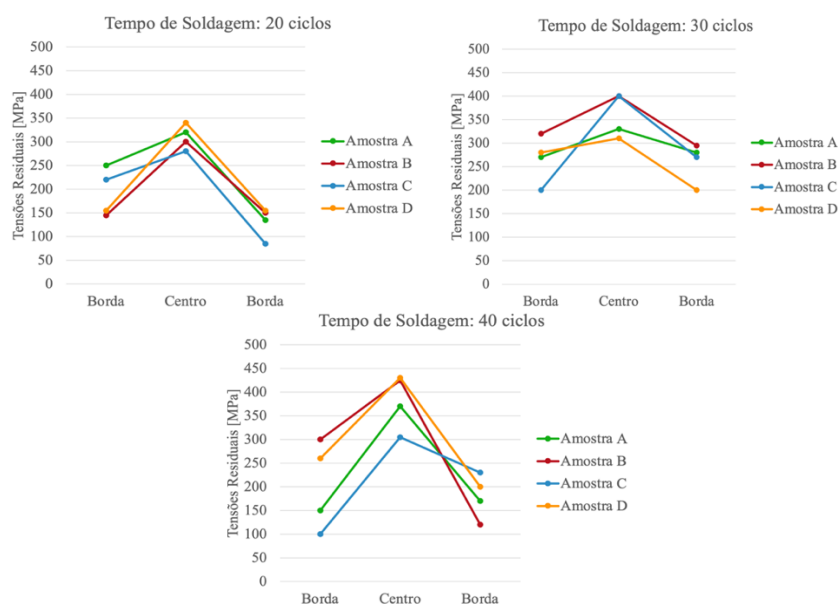


Figura 4: Perfis de tensões residuais ao longo da pepita de solda na superfície da face.

Estes resultados são coerentes com os resultados de Colombo *et al.* (2019) em sua pesquisa sobre soldagem a ponto do aço TWIP, onde os gradientes de tensão residual do centro em direção à borda dos pontos de solda diminuíram gradativamente.

Duas análises de variância ANOVA foram realizadas, para o centro das amostras, com variáveis dependentes sendo tensões residuais (TR) e valores de RMS_{RMB} e as variáveis independentes tempo de soldagem e faces da amostra. O teste de normalidade, para $P < 0,05$, falhou em ambos os casos, indicando que a diferença nos valores das faces é aleatória. Os resultados são indicados na Tabela 4 e podem ser verificados nos gráficos exibidos na Figura 5.

Tabela 4: Resultados da análise de variância para TR e RMS_{RMB} , em relação às faces das amostras.

Variáveis	Faces		Tempos de soldagem			Faces vs. tempos de soldagem					
P (TR)	0,744		0,310			0,328					
P (RMB)	0,586		<0,001			0,093					
Níveis	Sup.	Inf.	20	30	40	Sup. x 20	Sup. x 30	Sup. x 40	Inf. x 20	Inf. x 30	Inf. x 40
MMQ* (TR)	350,8	357,9	330,6	368,7	363,7	310,0	360,0	382,5	351,2	377,5	345,0
MMQ (RMB)	0,583	0,592	0,646	0,547	0,569	0,647	0,517	0,584	0,645	0,576	0,554

(*) MMQ: Média dos Mínimos Quadrados.

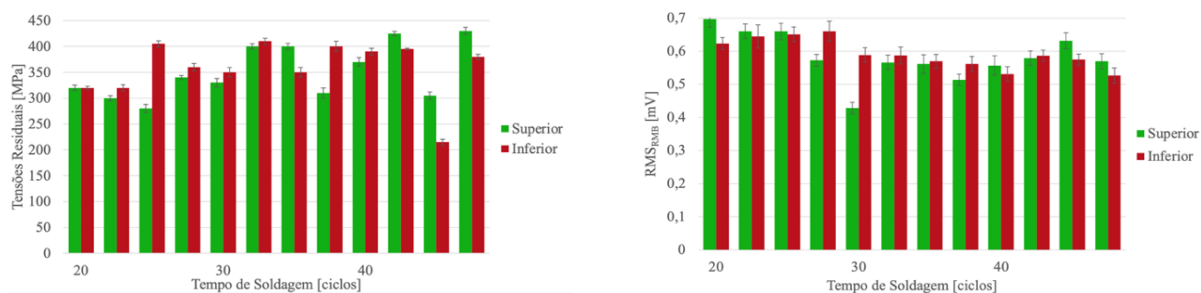


Figura 5: Tensões residuais e RMS_{RMB} em relação às faces das amostras.

A segunda análise de variância foi realizada em relação às regiões das amostras, desconsiderando as faces. Como esperado, o teste de normalidade para $P < 0,05$ foi satisfatório em ambos os casos, garantindo que há diferença significativa. Todavia, o efeito das TRs nas diferentes regiões não depende do tempo de soldagem. A Tabela 5 e a Figura 6 exibem estes resultados.

Tabela 5: Resultados da análise de variância para TR e RMS_{RMB} , em relação às faces das amostras.

Variáveis	Regiões		Tempos de soldagem			Regiões x tempos de soldagem					
P (TR)	<0,001		0,003			0,144					
P (RMB)	<0,001		<0,001			0,035					
Níveis	Borda	Centro	20	30	40	Bord. x 20	Bord. x 30	Bord. x 40	Cent. x 20	Cent. x 30	Cent. x 40
MMQ (TR)	205,8	354,3	246,2	316,5	277,5	161,8	264,3	191,2	330,6	368,7	363,7
MMQ (RMB)	0,436	0,587	0,597	0,439	0,498	0,548	0,331	0,428	0,646	0,547	0,569

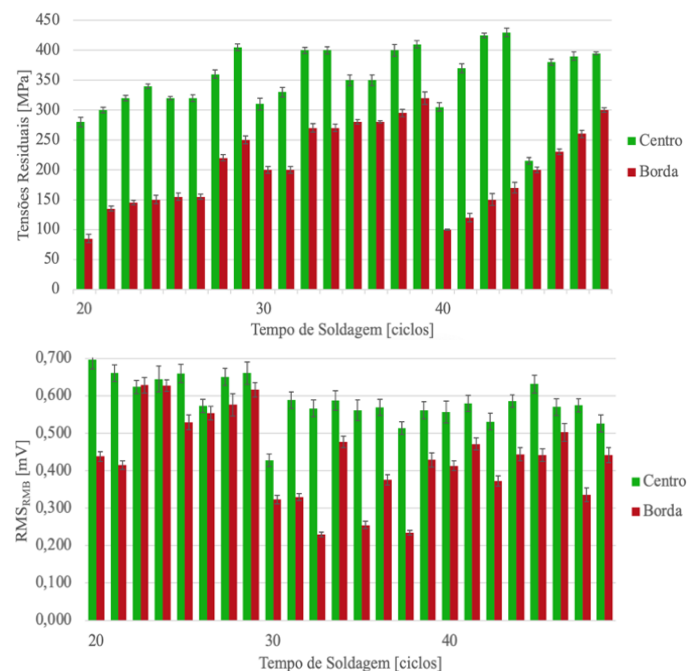


Figura 6: Tensões residuais e RMS_{RMB} em relação às regiões das amostras.

Complementando o estudo, foi obtida a Correlação de Pearson, que indicou a existência de uma relação, apesar de fraca, entre TR e o sinal de RMB. Considerando o valor mínimo $P < 0,08$, o teste indicou um valor $P = 0,0733$. Ademais, o coeficiente de correlação, que estabelece se a correlação é inversamente ou diretamente proporcional, foi 0,261, indicando que quanto maior for a TR, maior será o valor de RMS_{RMB} . Estes resultados são observados na Figura 7, notando-se as linhas de tendência lineares para cada variável.

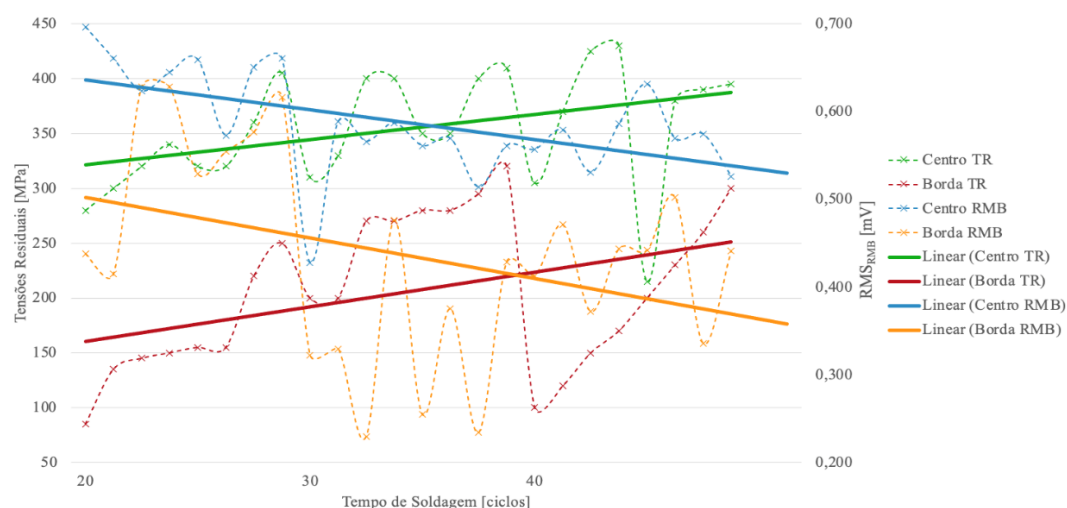


Figura 6: Correlação ente os resultados de tensões residuais e RMS_{RMB} .

CONCLUSÕES

O estudo realizado permite concluir que a soldagem por ponto do aço HC420LA gerou tensões residuais predominantemente trativas e elevadas, tendo seu máximo próximo ao centro da pepita, o que poderá afetar a vida em fadiga do material, devendo ser consideradas no projeto da junta. Os resultados mostram que o tempo de soldagem não afeta a geração de tensões residuais e de sinal de RMB e que estes variam em relação às regiões do ponto de solda sem, entretanto, variar em relação às faces da junta. O resultado da correlação enfatizou que os valores de tensões residuais obtidos por difração de raios-X são diretamente proporcionais aos valores eficazes de ruído magnético Barkhausen.

REFERÊNCIAS

1. JANAKIRAM S, GAUTAM JP. Recrystallization texture evolution in HSLA steel. Lecture Notes in Mechanical Engineering. 2018.
2. LEDERMUELLER C, PRATIWI HI, WEBSTER RF, EIZADJOU M, RINGER SP, PRIMIG S. Microalloying effects of Mo versus Cr in HSLA steels with ultrafine-grained ferrite microstructures. Materials and Design. 2020.
3. REN S, MA Y, SAEKI S, IWAMOTO Y, MA N. Numerical analysis on coaxial one-side resistance spot welding of Al5052 and CFRP dissimilar materials. Materials and Design. 2020.
4. SHAH U, LIU X. Effects of ultrasonic vibration on resistance spot welding of transformation induced plasticity steel 780 to aluminum alloy AA6061. Materials and Design. 2019.
5. VALÍČEK J, CZÁN A, HARNIČÁROVÁ M, ŠAJGALÍK M, KUŠNEROVÁ M, CZÁNOVÁ T, A new way of identifying, predicting and regulating residual stress after chip-forming machining. International Journal of Mechanical Sciences. 2019.
6. TOTTEN GE, HOWES MAH, INOUE T. Handbook of residual stress and deformation of steel. ASM International; 2002. 499 p.
7. SHUKLA S. Rapid in-line residual stress analysis from a portable two-dimensional X-ray diffractometer. Measurement: Journal of the International Measurement Confederation. 2020
8. FAGAN P, DUCHARNE B, DANIEL L, SKARLATOS A, DOMENJOUR M, REBOUD C. Effect of stress on the magnetic Barkhausen noise energy cycles: A route for stress evaluation in ferromagnetic materials. Materials Science and Engineering B: 2022.
9. NEBAIR H, HELIFA B, BENSALD S, ZIDELMEL S, KHALDOUN LEFKAIER I. Martensite morphology and volume fraction evaluation of dual-phase X70 steel using magnetic Barkhausen noise technique. Journal of Magnetism and Magnetic Materials [Internet]. 2022.
10. BERTINETTO C, ENGEL J, JANSEN J. ANOVA simultaneous component analysis: A tutorial review. Vol. 6, Analytica Chimica Acta: X. Elsevier B.V.; 2020.

STATISTICAL AND EXPERIMENTAL ANALYSIS OF RESIDUAL STRESS AND BARKHAUSEN MAGNETIC NOISE IN RESISTANCE SPOT WELDING OF HSLA STEEL

ABSTRACT

HC420LA steel is a cold-rolled HSLA (high strength and low alloy) steel, applied in the automotive industry, which has a low content of added alloy and carbon elements, ensuring good toughness and weldability. Resistance spot welding (RSW) has numerous advantages, such as rapid application, low cost and ease of automation. Due to the combined action of shrinkage, heat input and phase transformations that occur during the welding operation, residual stresses are generated in the welded joint. These stresses are generated in all manufacturing processes and are produced when regions of a material undergo permanent heterogeneous plastic or elastic deformation, without the presence of any external loads. It is well established that residual tensile stresses have a detrimental effect, as they can add to service loads, contributing to the nucleation and propagation of fatigue cracks. This work aims to carry out an analysis of variance, using the ANOVA method, and to correlate the results of residual stresses and MBN in the spot welded samples. Residual stresses were analyzed by X-ray diffraction, by the $\sin^2\psi$ method and MBN measurements were performed at the same locations. The analysis of variance was performed with a significance level of 0.05, according to the different welding times (20, 30 and 40 cycles), the sample faces (top and bottom) and the sample regions (center and edge of the nugget). This indicated that there is a significant difference in the results of residual stresses and MBN, according to the welding times and the center or edge region of the nugget, with the P -value lower than 0.05 for these cases. Furthermore, the analyzes also showed that there is no considerable difference in relation to the upper and lower side of the welded sample, where the P -value was 0.744 for residual stresses and 0.586 for MBN. Pearson's Correlation test, with a significance level of 0.08, showed consistency in the values of residual stresses and MBN, despite the weak relationship, where the correlation coefficient was 0.261 and the P -value was 0.0733.

Keywords: residual stresses, spot welding, Barkhausen magnetic noise, X-ray diffraction.