



ANÁLISE EXPERIMENTAL E ESTATÍSTICA DO ALÍVIO DAS TENSÕES RESIDUAIS POR VIBRAÇÃO E USO DE EMISSÃO ACÚSTICA EM JUNTAS SOLDADAS A PONTO

Paola Rodrigues Pereira¹; Daniel Alves Castello²; Fernando Castro Pinto²; Jose
Mauro Moraes Júnior¹; Hector Reynaldo Costa³; Maria Cindra Fonseca¹

1. Departamento de Engenharia Mecânica-PGMEC/UFF - Universidade Federal Fluminense, Rua Passo da Pátria, 156, CEP 24210-240, São Domingos, Niterói-RJ.
2. Departamento de Engenharia Mecânica - PEM/COPPE/UFRJ, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rua Fonseca Teles, 121, CEP 20940-90, São Cristóvão, Rio de Janeiro-RJ.
3. Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca-PPEMM-CEFET/RJ, Av. Maracanã, 229, CEP 20.271-110, Rio de Janeiro-RJ.

mariacindra@id.uff.br

RESUMO

Está bem estabelecido que tensões residuais de tração têm efeito prejudicial aos componentes, pois contribuem para a nucleação e propagação de trincas. No processo de soldagem elas são geradas devido aos fenômenos presentes, principalmente a contração e as transformações de fase. Novas técnicas de alívio de tensões têm sido desenvolvidas, como o alívio de tensão por vibração. Quando ocorre o alívio de tensões durante a vibração, emissões acústicas são detectadas. A soldagem por resistência elétrica por ponto e os Aços Avançados de Alta Resistência, como o *Complex Phase* (CP) e o *Dual Phase* (DP), dominam a aplicação na indústria automotiva. O objetivo deste trabalho foi analisar por difração de raios-X e estatisticamente o alívio de tensões residuais por vibração em juntas soldadas a ponto de aço CP1000 e DP1000, relacionando com as emissões acústicas. As tensões residuais foram relaxadas em cerca de 50% nas amostras analisadas.

Palavras-chave: *tensões residuais, difração de raios X, alívio de tensão por vibração, emissões acústicas, soldagem a ponto.*

INTRODUÇÃO

Tensões residuais são tensões auto equilibradas, geradas por todos os processos de fabricação e presentes mesmo na ausência de cargas externas, que são produzidas quando regiões de um material sofrem deformações plásticas ou elásticas de forma permanente (1).

A presença de tensões residuais representa um fator crítico que pode influenciar significativamente a vida útil da peça em serviço, favorecendo a nucleação e propagação de trincas e, até mesmo, a ruptura da mesma, particularmente na situação em que a tensão residual de tração está presente na superfície dos componentes, o que leva a uma redução da vida útil dos mesmos (2) (3).

A soldagem por resistência elétrica por pontos (*Resistance Spot Welding – RSW*) é uma técnica de soldagem eficaz amplamente utilizada na indústria automotiva para unir chapas metálicas de espessuras finas, devido à sua rapidez, bom custo-benefício e compatibilidade com automação (4).

O alívio de tensão por vibração (*Vibration Stress Relief – VSR*) tem sido usado como uma alternativa aos tratamentos térmicos para reduzir tensões residuais. A técnica mostra-se promissora como um método mais vantajoso para alívio de tensão residual devido ao seu baixo custo, alta eficiência e menor impacto ambiental (5) (6).

Emissão acústica (EA) é o nome do fenômeno físico que pode ser definido como as ondas elásticas transitórias geradas pela liberação rápida de energia de uma fonte localizada de concentração de tensão dentro de um material. A técnica de EA tem sido utilizada para monitoramento em tempo real de vários equipamentos de engenharia, como tanques, vasos de pressão, dutos, pontes, etc. No entanto, há poucos estudos relatados correlacionando sinais de EA com alívio de tensões residuais em componentes soldados (7).

Portanto, o objetivo do presente trabalho é investigar o alívio de tensões residuais em juntas soldadas por resistência a ponto de aços DP1000 e CP1000 usando a técnica de alívio de tensão por vibração. Para este propósito, as tensões residuais foram analisadas por difração de raios-X, com o método $\sin^2\psi$. As emissões acústicas geradas no processo de vibração foram averiguadas. Análises estatísticas, por meio de análise de variância (ANOVA), foram realizadas com o intuito de corroborar os resultados obtidos. Análises metalográficas por microscopia óptica e Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) dos aços estudados complementam o trabalho.

MATERIAIS E MÉTODOS

Os materiais utilizados neste estudo são o aço *Dual-Phase* (DP1000), fabricado pela CSN e recebido na forma de chapa laminada a frio de 1,5 mm de espessura, e o aço *Complex-Phase* (CP1000), fabricado pela Usiminas e também recebido como chapa laminada a frio de 1,2 mm de espessura. As propriedades mecânicas e composições químicas informadas pelos fabricantes de ambos os aços são mostradas nas Tabelas 1 a 4.

Tabela 1: Composição química do aço DP1000 (máx. % de peso).

C	Si	Mo	Nb	Mn	Cu	Sn	V
0,141	0,228	0,195	0,026	1,867	0,024	0,008	0,008
P	Ni	Al	Ti	Cr	S	N	
0,020	0,014	0,044	0,004	0,216	0,007	0,004	

Tabela 2: Propriedades mecânicas do aço DP1000.

σ_{LE} (MPa)	σ_{LR} (MPa)	Alongamento (%)
636	980	10

Tabela 3: Composição química do aço CP1000 (máx. % de peso).

C	Mn	Si	P	S
0,15	3,30	2,00	0,090	0,040

Tabela 4: Propriedades mecânicas do aço CP1000.

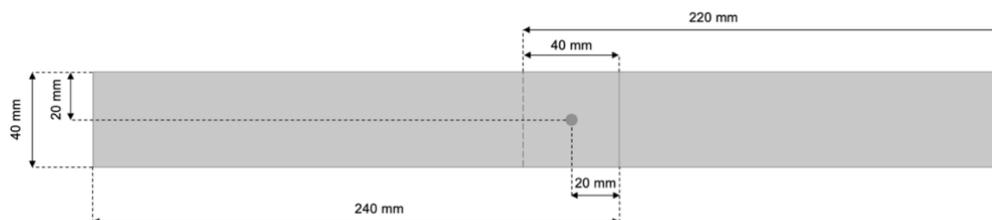
σ_{LE} (MPa)	σ_{LR} (MPa)	Alongamento (%)
700 ~ 950	980	6 ~ 8

Como estabelecido no planejamento de experimentos, quatro amostras de cada material foram soldadas por ponto com os parâmetros indicados na Tabela 5. O equipamento foi regulado com potência de 23 kVA e pressão de trabalho de 6 bar. A Figura 1 exibe as dimensões finais das amostras soldadas.

Tabela 5: Parâmetros de soldagem a ponto.

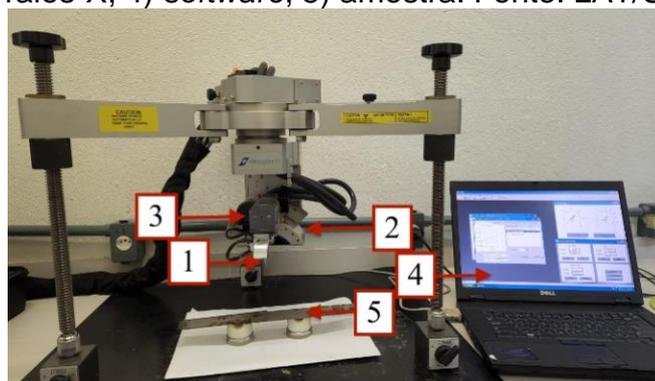
Tempo de aproximação (ciclos)	25	Tempo de manutenção (ciclos)	12
Tempo de pressão (ciclos)	1	Potência (%)	5
Tempo de subida (ciclos)	2	Corrente mínima (kA)	5,7
Tempo de soldagem (ciclos)	12	Corrente máxima (kA)	6,6
Tempo de resfriamento (ciclos)	1	Número de impulsos	3

Figura 1: Dimensões finais das amostras soldadas a ponto.



As tensões residuais foram medidas, antes e depois dos ensaios de vibração, no centro do ponto de solda, na direção longitudinal, por difração de raios-X usando o método de $\text{sen}^2\psi$, com radiação $\text{CrK}\alpha$ ($\lambda = 2,29092 \text{ \AA}$). O analisador de tensões, *XStress3000* da *Stresstech*, conforme mostrado na Figura 2, foi empregado para esta análise com precisão de aproximadamente 15 MPa. O *software XTronic V1-0 Standard* foi usado para o cálculo da tensão residual.

Figura 2: Analisador de tensões *XStress3000*: 1) colimador; 2) goniômetro; 3) tubo de raios-X; 4) *software*; 5) amostra. Fonte: LAT/UFF.



As amostras foram vibradas no LAVI/COPPE/UFRJ. Para implementar a técnica, as amostras foram fixadas em um *shaker*, que foi conectado a um gerador de funções, exibidos no desenho esquemático da Figura 3. Sensores foram estrategicamente colocados nas amostras para medir as emissões acústicas em três pontos distintos, como mostra a Figura 4.

Figura 3: Esquema do ensaio de vibração.

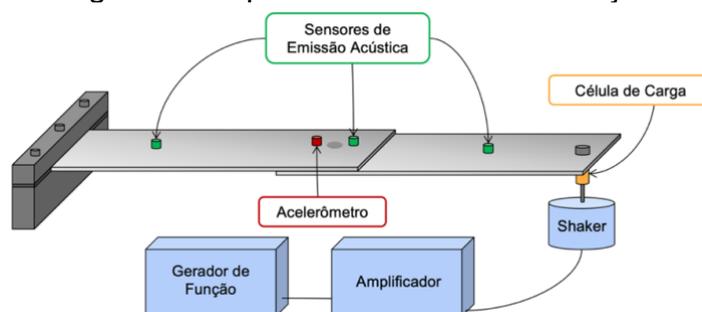
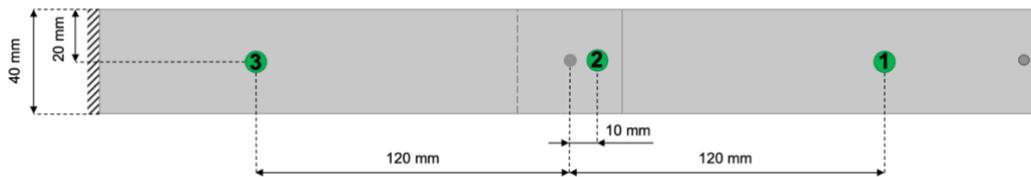
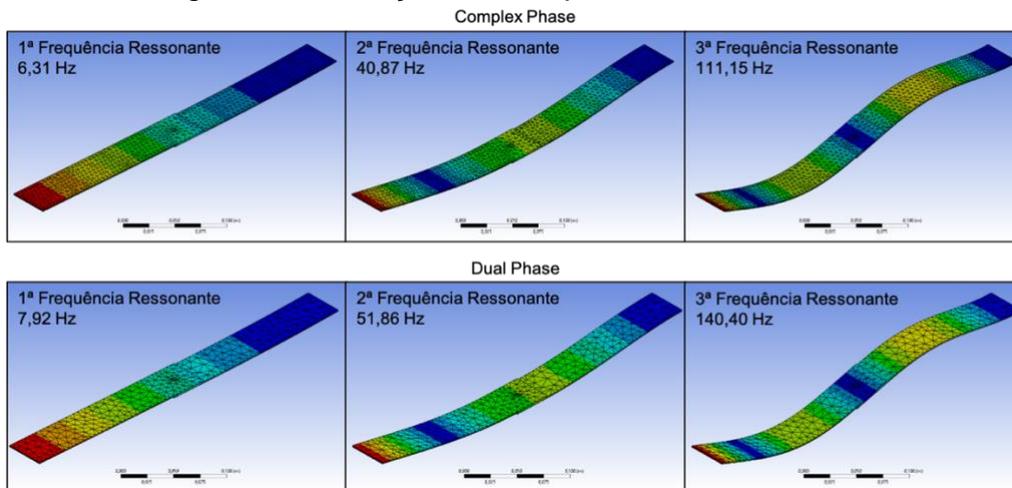


Figura 4: Distância dos sensores de emissão acústica.



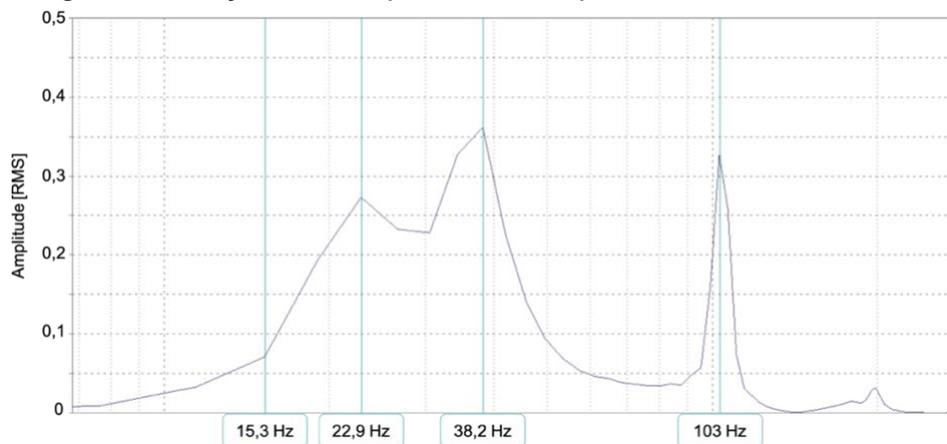
Antes do processo de vibração, frequências ressonantes foram estudadas por meio de simulações modais realizadas no *software Ansys*, onde se obteve o comportamento nas três primeiras frequências ressonantes. Os resultados são mostrados na Figura 5.

Figura 5: Simulações de frequências ressonantes.



Além disso, foram verificadas as Funções de Resposta de Frequência (FRF) de cada amostra, obtidas submetendo as mesmas à vibração em uma faixa de varredura de frequência de 10 a 200 Hz por 20 segundos em uma amplitude de aceleração de, aproximadamente, 1m/s^2 . A Figura 6 mostra a FRF para uma das amostras.

Figura 6: Função de Resposta de Frequência da amostra DP4.



O segundo modo ressonante foi aplicado a metade das amostras, bem como a frequência sub ressonante à outra metade. Para todas as amostras, o modo de vibração foi senoidal, com amplitude de 200 mVrms, tempo de duração do ensaio de 5 minutos e aceleração de, aproximadamente, 10 m/s² próximo ao ponto de solda. Os demais parâmetros utilizados são indicados na Tabela 6.

Tabela 6: Parâmetros do alívio de tensões por vibração.

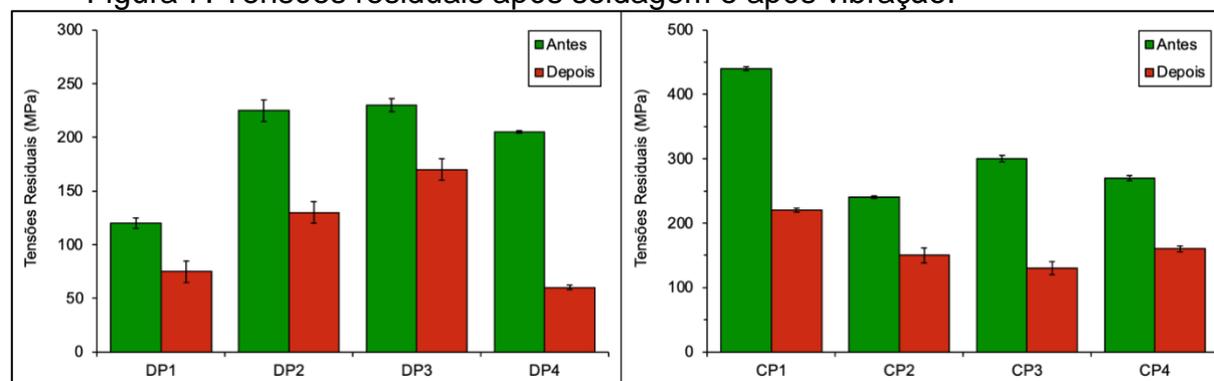
Amostras	Frequência (Hz)	Categoria	Amostras	Frequência (Hz)	Categoria
DP1	38	2 ^a Freq. Ressonante	CP1	34	2 ^a Freq. Ressonante
DP2	15	Freq. Sub Ressonante	CP2	30	
DP3	15		CP3	34	
DP4	15		CP4	15	Freq. Sub Ressonante

As análises metalográficas dos aços foram realizadas por microscopia óptica e Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), no LABMETT/UFF e LAMAR/UFF, respectivamente. Para preparação das amostras foi feito um corte transversal no ponto de solda e o Nital 3% foi usado para revelar a microestrutura.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

As tensões residuais obtidas após o processo de soldagem, antes e depois do alívio de tensões por vibração são mostradas na Figura 7.

Figura 7: Tensões residuais após soldagem e após vibração.



Os resultados obtidos mostram que as tensões residuais foram tratativas para todas as amostras. Houve uma relaxação considerável após o processo de vibração, onde

as tensões residuais diminuíram até 71% de sua magnitude após a soldagem a ponto. Estes resultados estão de acordo com o estudo de Song *et al.* (2024), que analisaram o alívio de tensões residuais por vibração, utilizando diferentes parâmetros, em aços de alta resistência, e concluíram que a frequência de excitação tem um impacto significativo no efeito da vibração (8).

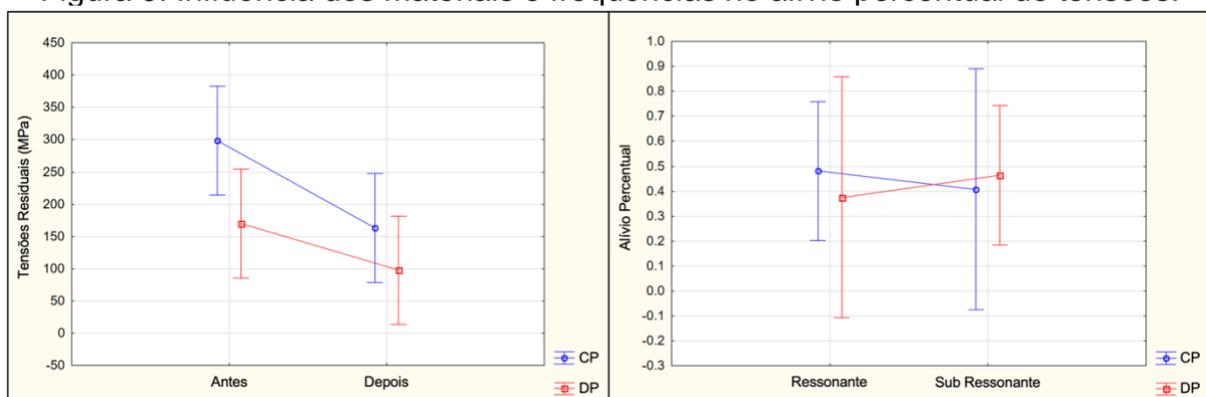
Segundo os testes de ANOVA, é possível confirmar que a redução das tensões residuais é significativa e estas são influenciadas pelo material estudado, como indica a Tabela 7, onde o valor P é menor que 0,05 para “Antes/Depois” e para “Material”.

Tabela 7: ANOVA para alívio percentual de tensões residuais.

Efeito	SS	Grau de liberdade	MS	F	P-value
Intercepção	398763	1	398763	99,43182	0,000009
Antes/Depois	32292,2	1	32292,2	8,05208	0,021892
Frequência	1250,5	1	1250,5	0,31182	0,591848
Material	28275,5	1	28275,5	7,05052	0,029017
Frequência x Antes/Depois	4,7	1	4,7	0,00117	0,973565
Frequência x Material	8138,01	1	8138,01	2,02922	0,192118
Antes/Depois x Material	2929,71	1	2929,71	0,73052	0,417574
Freq. x A/D x Material	2067,2	1	2067,2	0,51545	0,493217
Erro	32083,3	8	4010,4		

A Figura 9 apresenta o gráfico das tensões residuais antes e depois do alívio para ambos os materiais e o gráfico da combinação dos dois fatores (material e frequência), indicando que, as tensões residuais são de maior magnitude para os aços CP e, para aliviar as amostras de CP, a frequência ressonante foi mais eficiente do que a frequência sub ressonante. Por outro lado, as amostras de aço DP apresentaram tensões residuais de menor magnitude, que foram melhor aliviadas com o uso da frequência sub ressonante.

Figura 9: Influência dos materiais e frequências no alívio percentual de tensões.



As emissões acústicas obtidas durante os ensaios de vibração apresentaram características típicas de alívio de tensões residuais, como mostra a Figura 10, sendo coerentes com os resultados obtidos por Chai *et al.* (2018), que concluíram que o sinal devido à relaxação de tensão residual se propaga na forma de onda rápida com menor duração.

Figura 10: Emissão acústica em uma das amostras vibradas.

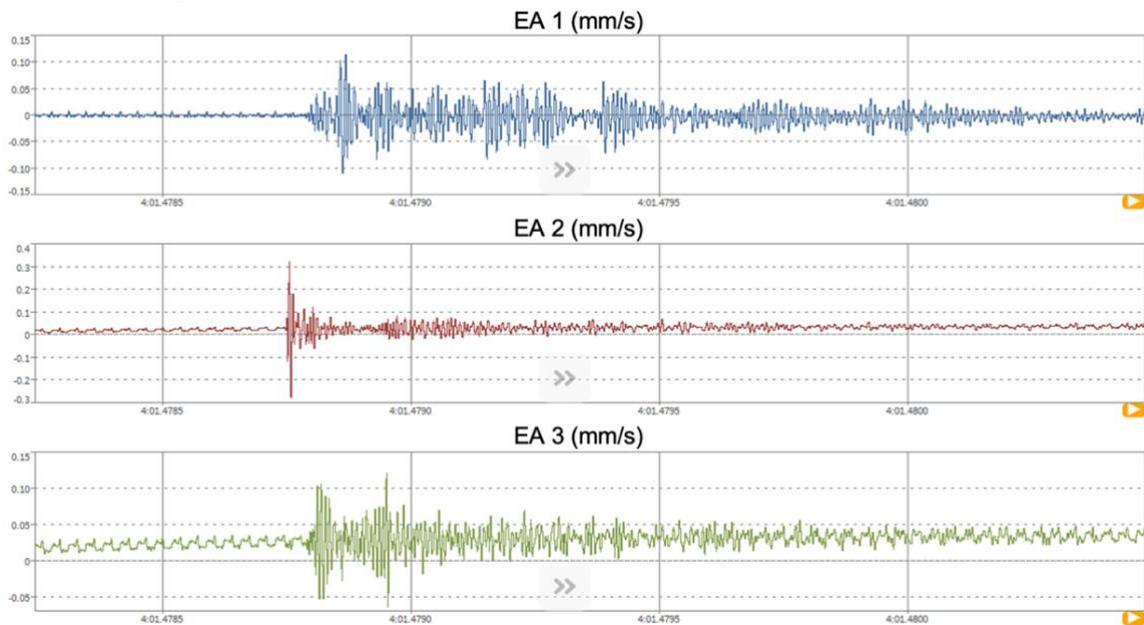
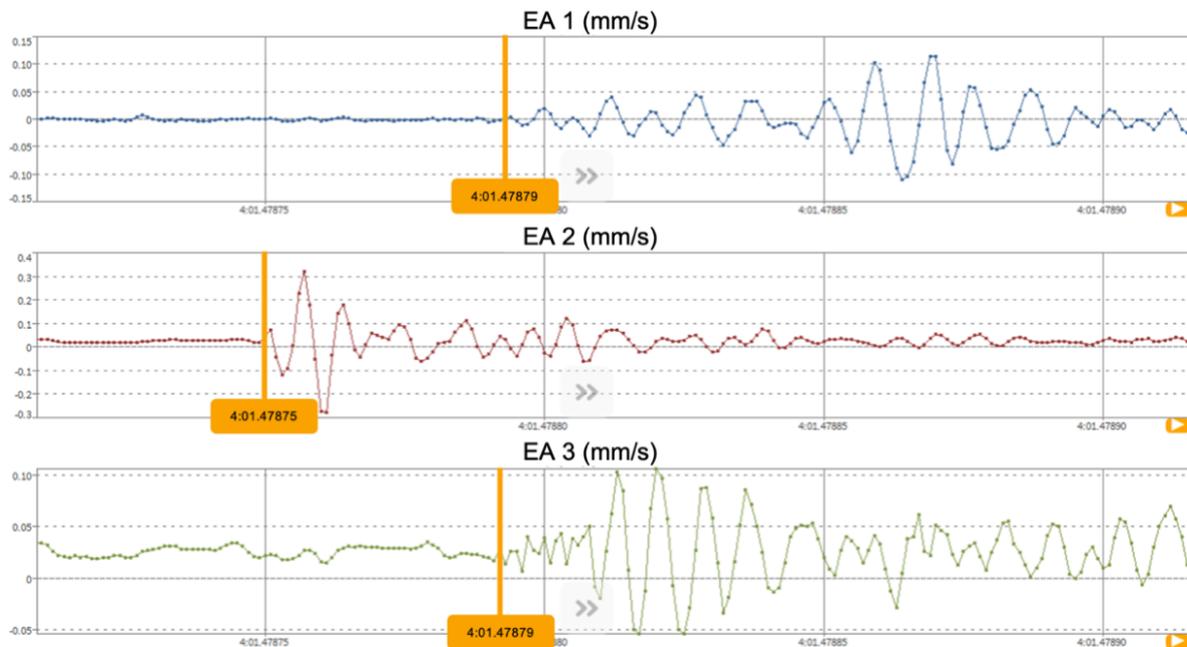


Figura 11: Diferença de tempo do início da propagação de onda para cada sensor.



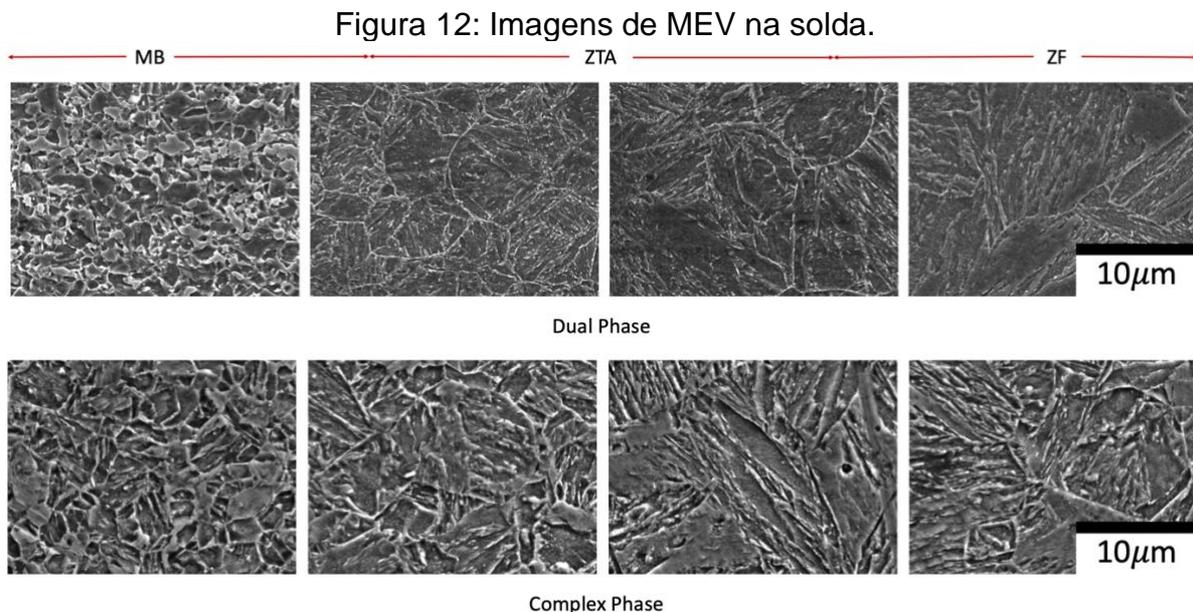
A diferença de tempo de chegada da onda para cada sensor comprova que a onda se origina no ponto de solda. Segundo Li *et al.* (2024), o cálculo para localização de origem de onda é:

$$d = \frac{1}{2}(D - \Delta T \cdot v)$$

Onde: d é a distância do sensor até a origem; D é a distância entre os sensores; ΔT é a diferença de tempo de chegada; v é a velocidade de propagação da onda, que para aços é 3230 m/s (9).

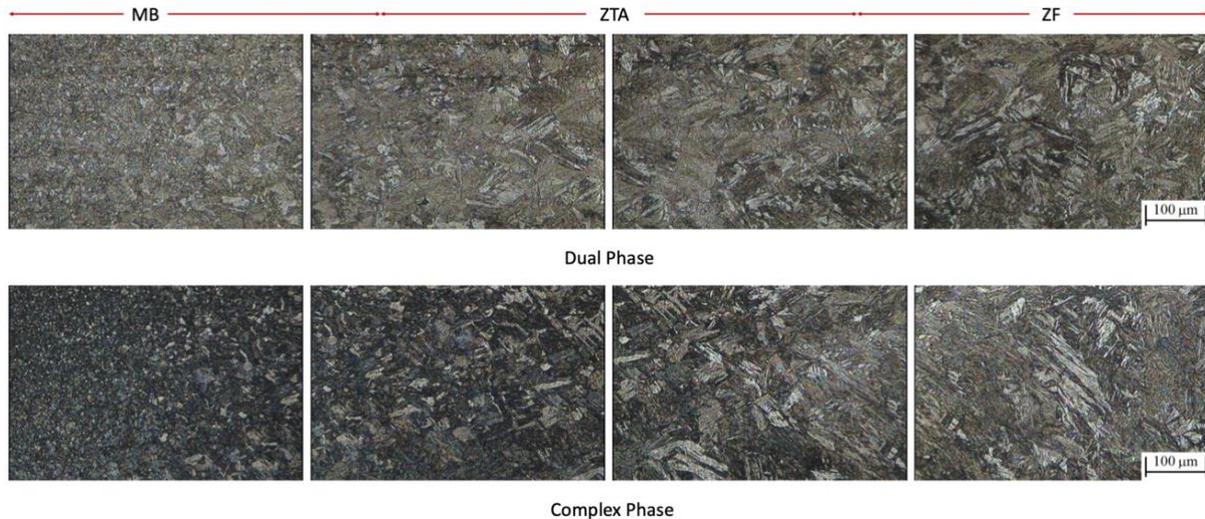
Dessa forma, levando em consideração que a diferença de tempo é em torno de $35 \mu\text{s}$, é possível garantir que a distância d é de $8,5 \text{ mm}$, que é aproximadamente a distância da solda para o sensor mais próximo.

Os resultados da metalografia por MEV são exibidos na Figura 12. É notável que, em ambos os materiais, houve crescimento de grão devido a soldagem, que aumentam gradativamente na zona termicamente afetada (ZTA) e apresentam seu maior tamanho na zona fundida.



Além disso, pode-se verificar que o material DP1000 possui microestrutura ferrítica e martensítica no metal de base. Já na zona fundida e na ZTA, foi possível observar o surgimento de bainitas, o que é explicado pelo aporte térmico gerado durante o processo de soldagem. A Figura 13 mostra os resultados de microscopia óptica para os dois aços.

Figura 13: Imagens de microscopia óptica para as soldas nos aços DP e CP.



Por outro lado, o material CP1000 possui em sua microestrutura ferrita, martensita e bainita no metal de base, na zona fundida e na ZTA, o que garante melhor resistência e tenacidade para este aço, em comparação ao DP.

CONCLUSÕES

O presente trabalho que avaliou, por experimentos, simulações e estatística, o alívio das tensões residuais por vibração e as emissões acústicas do processo, em soldas a ponto de aço CP1000 e DP1000, permite as seguintes conclusões:

1. As tensões residuais obtidas na soldagem a ponto dos aços CP1000 e DP1000 são trativas e apresentaram maior magnitude nos aços CP1000 em comparação aos aços DP1000, devendo ser consideradas em projetos mecânicos.
2. A técnica de alívio de tensões residuais por vibração apresentou resultados satisfatórios com relaxação das tensões de até 71%, sendo em média 43%.
3. Os parâmetros aplicados de frequência ressonante e sub ressonante no processo de vibração geraram alívios diferentes para cada aço, onde para o aço DP1000 a frequência sub ressonante foi mais eficiente e, para o aço CP1000, a frequência ressonante apresentou melhores resultados.
4. O estudo de emissões acústicas no processo de vibração indicou que houve emissões durante todo o tempo de aplicação da vibração devido ao alívio das tensões residuais, originadas no ponto de solda, onde as tensões residuais eram maiores.

AGRADECIMENTOS

Este estudo foi financiado em parte pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código Financeiro 001. Os autores gostariam de agradecer às agências de pesquisa brasileiras CNPq, CAPES e FAPERJ, pelo apoio financeiro.

REFERÊNCIAS

1. VALÍČEK, J.; CZÁN, A.; HARNIČÁROVÁ, M.; ŠAJGALÍK, M.; KUŠNEROVÁ, M.; CZÁNOVÁ, T.; KOPAL, I.; GOMBÁR, M.; KMEC, J.; ŠAFÁŘ, M. A new way of identifying, predicting and regulating residual stress after chip-forming machining. *INTERNATIONAL JOURNAL OF MECHANICAL SCIENCES*, v. 155, p. 343-59, 2019. doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2019.03.007
2. WENSRICH, C. M.; LUZIN, V.; HENDRIKS, J. N.; PANT, P.; GREGG, A. W. T. Residual stress in additively manufactured Inconel cubes; Selective Laser Melting versus Electron Beam Melting and a comparison of modelling techniques. *MATERIALS & DESIGN*, v. 244, p. 113108, 2024. doi.org/10.1016/j.matdes.2024.113108
3. SUN, J.; DILGER, K. Influence of initial residual stresses on welding residual stresses in ultra-high strength steel S960. *JOURNAL OF MANUFACTURING PROCESSES*, v. 101, p. 259-68, 2023. doi.org/10.1016/j.jmapro.2023.06.011
4. YANG, B.; PENG, Q.; ZHANG, Z.; ZHANG, Y.; LI, Y.; XI, Z. An offset-transformer hierarchical model for point cloud-based resistance spot welding quality classification. *COMPUTERS IN INDUSTRY*, v. 161, p. 104134, 2024. doi.org/10.1016/j.compind.2024.104134
5. SERVAK, H. M.; VARDANJANI, M. J.; YOUSEFZADEH, S. Analysis of the effect of vibrational stress relief process parameters on 2024Aluminium alloy. *HELIYON*, v. 10, 2024. doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e32052
6. ZHANG, Q.; YU, L.; SHANG, X.; ZHAO, S. Residual stress relief of welded aluminum alloy plate using ultrasonic vibration. *ULTRASONICS*, v. 107, 2020. doi.org/10.1016/j.ultras.2020.106164
7. CHAI, M.; QIN, M.; ZHENG, Y.; HOU, X.; ZHANG, Z.; CHENG, G.; DUAN, Q. Acoustic Emission Detection during Welding Residual Stresses Release in 2.25Cr1Mo0.25V Steel Welds. *MATERIALS TODAY: PROCEEDINGS*, v. 5, p. 13759-13766, 2018.
8. SONG, H.; GAO, Z.; ZHOU, X.; ZHANG, Q.; ZHANG, B. Research on the evolution law and control mechanism of residual stress under vibration stress relief. *MATERIALS TODAY COMMUNICATIONS*, v. 40, 2024. doi.org/10.1016/j.mtcomm.2024.110072
9. LI, S. L.; ZHAO, Y. Q.; KANG, Z. Z.; WANG, C. Acoustic emission technology-based waveguide localization method for damaged internal tendons of in-service post-tensioned hollow slab bridges. *MEASUREMENT*, v. 237, 2024. doi.org/10.1016/j.measurement.2024.114919

EXPERIMENTAL AND STATISTICAL ANALYSIS OF RESIDUAL STRESS RELIEF BY VIBRATION AND USE OF ACOUSTIC EMISSION IN SPOT WELDED JOINTS

ABSTRACT

Tensile residual stresses have a detrimental effect on components, as they contribute to the nucleation and propagation of cracks. In the welding process, they are generated due to the phenomena present, mainly contraction and phase transformations. New stress relief techniques have been developed, such as vibration stress relief. When stress relief occurs during vibration, acoustic emissions can be detected. Resistance Spot Welding and Advanced High Strength Steels, such as Complex Phase (CP) and Dual Phase (DP), dominate the application in the automotive industry. The objective of this work was to analyze by X-ray diffraction and statistically the relief of residual stresses by vibration in spot welded joints of CP1000 and DP1000 steel, relating them to acoustic emissions. The residual stresses were relaxed by approximately 40% in the analyzed samples.

Keywords: *residual stresses, X-ray diffraction, vibration stress relief, acoustic emissions, resistance spot welding.*