



AValiação EXPERIMENTAL DA INFLUÊNCIA DAS TENSÕES RESIDUAIS SOBRE AS RESPOSTAS DINÂMICAS DE PLACAS SOLDADAS

Alberto B. Vieira Jr., Domingos A. Rade e Sebastião S. Cunha Jr.

Universidade Federal de Uberlândia - Faculdade de Engenharia Mecânica

Campus Santa Mônica – CEP 38400-902 – Uberlândia, MG

e-mail: abvieira@mecanica.ufu.br, domingos@ufu.br, simoes@mecanica.ufu.br

***Resumo.** Apresenta-se, neste trabalho, um estudo preliminar sobre a possibilidade de se avaliar os níveis de tensões residuais em placas soldadas a partir da análise das respostas dinâmicas destas placas. Investiga-se experimentalmente a influência do estado de tensões residuais sobre as frequências naturais de placas de aço e de policarbonato nas seguintes condições, quanto ao estado de tensões do material: como recebido de fábrica (no caso desta condição, apenas para o policarbonato), recozido e soldado. Os resultados obtidos mostram a ocorrência de variações significativas das frequências naturais em função do estado de tensões residuais. No caso do aço, empregou-se soldagem de topo com eletrodo revestido e na placa de policarbonato utilizou-se um simples passe de calor. Os resultados obtidos conduzem à perspectiva de se desenvolver uma nova técnica de avaliação de tensões residuais de mais amplo campo de aplicações, além de também se constituir em uma técnica não destrutiva própria para aplicações em controle de qualidade.*

***Palavras-chave:** tensões residuais, ensaios dinâmicos, vibrações de placas, soldagem.*

1. INTRODUÇÃO

Devido às dificuldades na determinação experimental de tensões residuais através dos métodos usualmente empregados (técnica do furo cego, seccionamento, raios-X, etc.), surge o interesse em se desenvolver uma técnica experimental não destrutiva de medição de tensões que não se restrinja a determinados tipos de materiais (a fotoelasticidade de transmissão, por exemplo, restringe-se aos materiais transparentes e que apresentam a propriedade da birrefringência) e cuja aplicação não se limite a poucos pontos e a determinadas regiões da estrutura, como é o caso da maioria das técnicas existentes.

Uma perspectiva de se desenvolver uma técnica com as características mencionadas surge com a consideração da influência que as tensões residuais apresentam sobre as respostas dinâmicas das estruturas. Kaldas e Dickinson (1981,a; 1981,b) realizaram estudos teóricos e experimentais em placas soldadas de várias dimensões e submetidas a diferentes condições de contorno, verificando mudanças de até 33% na frequência natural do primeiro modo de vibração. Alfredsson e Josefson (1992) fizeram simulações numéricas, usando o Método dos Elementos Finitos, de vigas tipo caixa soldadas pelo processo de solda a ponto por resistência, avaliando a influência das tensão residuais sobre os parâmetros modais destas estruturas.

Em casos mais simples, como placas finas, a literatura (Géradin e Rixen, 1997) apresenta a formulação básica necessária para a construção de modelos numéricos em que se considera o estado de tensões na previsão das freqüências naturais das placas. Surge então o interesse em utilizar tais modelos em procedimentos inversos, objetivando a obtenção de informações sobre o estado de tensões residuais a que está sujeita a estrutura, a partir de variações observadas nos valores das freqüências naturais. Contudo, o sucesso do procedimento inverso de identificação dependerá fundamentalmente da sensibilidade das características dinâmicas em relação aos parâmetros a serem identificados (no caso, as tensões residuais). Neste contexto, propõe-se, neste trabalho, avaliar a magnitude das variações das freqüências naturais de vibração de placas submetidas a diferentes estados de tensão residual. O estudo é conduzido com o emprego de dois materiais: aço e policarbonato (PC), nas seguintes situações, quanto à presença de tensões residuais: "como fabricado", "recozido" e "soldado". Dada sua característica de birrefringência, utiliza-se o PC devido à possibilidade de avaliar diretamente o estado de tensões residuais deste material pela técnica de fotoelasticidade.

2. TENSÕES RESIDUAIS DECORRENTES DA SOLDAGEM

Durante a soldagem, são produzidas deformações plásticas não uniformes que geram, no final do processo, as chamadas *tensões residuais*. O conhecimento deste estado de tensões é importante porque tem influência sobre o desempenho da estrutura soldada, em termos da resistência à fadiga, corrosão e resistência estrutural.

Considerando-se uma placa fina soldada com o cordão de solda disposto na direção x (Fig. (1)), admitindo-se estado plano de tensões, o estado de tensões será determinado pelas componentes normais σ_x , σ_y e pela componente cisalhante τ_{xy} . Normalmente, os valores de σ_x são superiores aos das outras tensões na maior parte da placa. As freqüências naturais de alguns modos da placa são influenciadas principalmente por σ_x , ao passo que, para outros modos, a influência das componentes σ_y e τ_{xy} também é importante (Kaldas e Dickinson, 1981, b). Os aspectos típicos das distribuições das componentes de tensão podem ser vistos na Fig. (1).

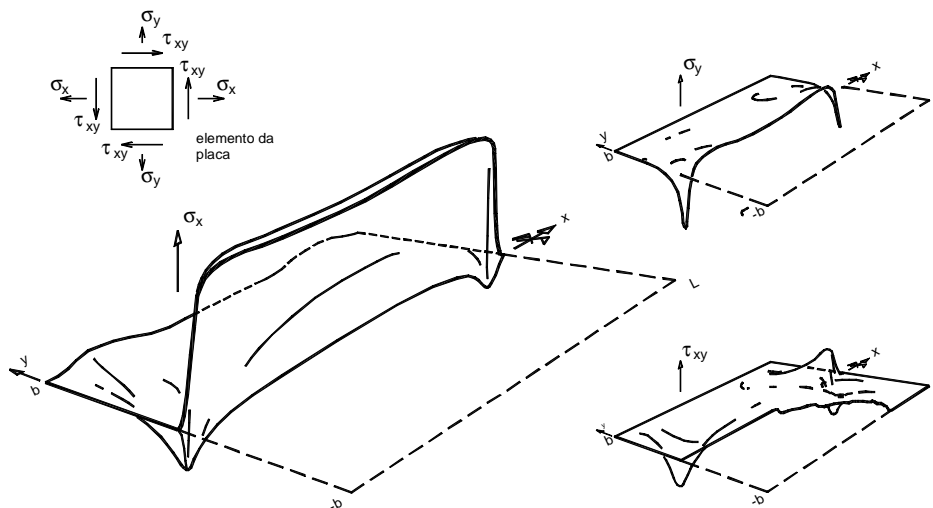


Figura 1. Aspectos típicos da distribuição das componentes de tensão σ_x , σ_y e τ_{xy} sobre uma placa soldada. O eixo x (eixo de simetria) coincide com a direção do cordão de solda.

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Ensaio dinâmicos foram realizados em laboratório visando a aquisição das funções de resposta em frequência (FRFs) das placas em condições de contorno livres, obtidas mediante o uso de suspensões flexíveis.

A excitação foi aplicada na direção perpendicular ao plano das placas com o uso de um martelo de impacto instrumentado com uma célula de carga piezoelétrica. As respostas vibratórias em aceleração, nesta mesma direção, foram adquiridas através de acelerômetros piezoelétricos. A Figura 2 ilustra os principais componentes do arranjo experimental empregado, cujas características são fornecidas na Tab. (1).

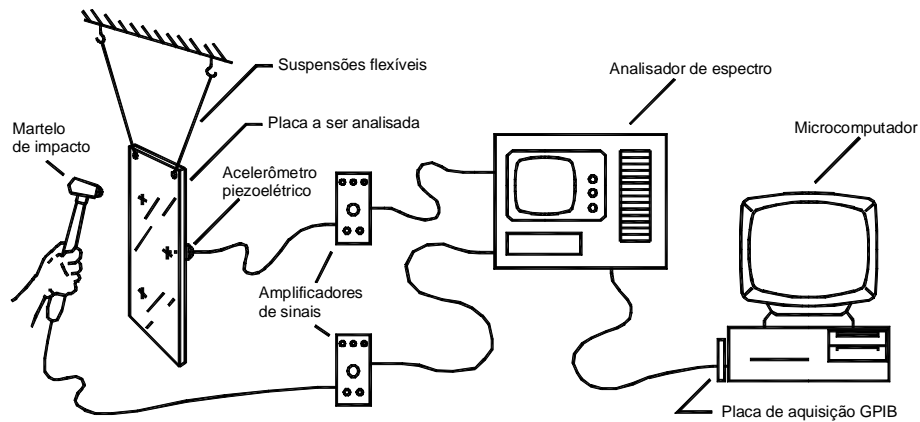


Figura 2. Arranjo experimental empregado nos ensaios dinâmicos

Tabela 1. Dispositivos utilizados nos ensaios dinâmicos e suas respectivas especificações

Dispositivo	Especificações
Martelo de impacto	Bruel & Kjaer, tipo 8202 - ponta de plástico transdutor de força Bruel & Kjaer, tipo 8200
Acelerômetro	Bruel & Kjaer, tipo 4375, sensibilidade: $0,359 \text{ pC/ m s}^{-2}$
Condicionadores de sinal	Bruel & Kjaer, tipo 2635, frequência de corte: 1 kHz
Analisador de espectro	Scientific Atlanta, SD 380, c/ ajuste para 800 pontos
Placa de aquisição do microcomputador	GPIB - 8 canais

Foram ensaiadas placas de aço e de policarbonato (PC), com diferentes estados de tensão de tensão residual. As características específicas dos ensaios de cada tipo de placa são apresentadas a seguir.

3.1. Placas de aço

Uma placa inteira de $200 \times 300 \times 4,756 \text{ mm}$ e duas placas componentes de $100 \times 300 \times 4,75 \text{ mm}$, todas de aço-carbono SAE 1010/1020, foram submetidas a um tratamento térmico para alívio de tensões à temperatura de aproximadamente $800 \text{ }^\circ\text{C}$ durante 1 hora, permanecendo no forno até o resfriamento. Após o recozimento, as placas componentes foram soldadas com o processo SMAW (Eletrodo Revestido), compondo assim uma placa com as mesmas dimensões da placa inteira. Ambas as placas, inteira e soldada, foram ensaiadas. Na Figura (3) são mostradas as posições em que foram aplicadas as forças de excitação e medidas as respostas em aceleração. As FRFs correspondentes a todas as combinações de pontos de excitação e de resposta foram adquiridas utilizando o analisador de espectro de dois canais, como resultado de 20 médias, na banda $[0 - 1 \text{ kHz}]$, com resolução de $2,5 \text{ Hz}$.

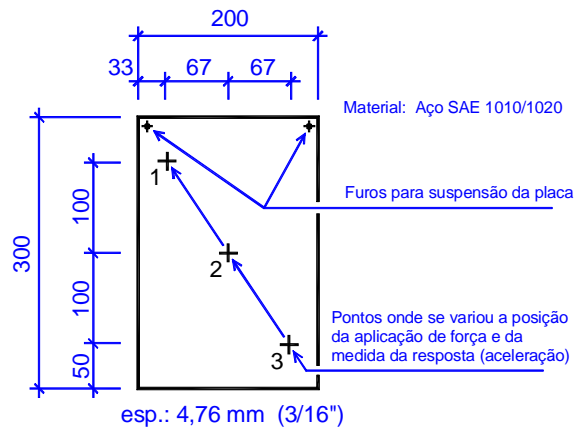


Figura 3. Placas de aço: dimensões e pontos de aplicação de força e medida de resposta

3.2. Placas de policarbonato

Nos ensaios das placas de policarbonato utilizou-se apenas uma única placa nas condições de material "como fabricado", "recozido" e "soldado". A soldagem, neste caso, é simulada pela passagem de uma fonte calor sobre a placa (em seu eixo longitudinal), utilizando uma pistola que projeta uma fluxo de ar quente a aproximadamente 400°C. Este procedimento é similar à soldagem "bead on plate" usual em pesquisas de soldagem de materiais metálicos. Contudo, não se trata de uma soldagem propriamente dita, pois não foram unidos elementos separados. Também não houve deposição de material de adição. Optou-se por este procedimento para que se pudesse garantir que as placas ensaiadas tivessem a mesma massa e a mesma geometria em todas as três condições. Assim, as variações que fossem verificadas nas respostas dinâmicas dever-se-iam apenas ao efeito das tensões residuais. No entanto, constatou-se que o material, depois de recozido, apresentou contração longitudinal devida ao alívio das tensões de laminação. Desta forma, a preservação das dimensões só pôde ser garantida entre as condições recozida e soldada. A Figura (4) mostra as dimensões da placa ensaiada, bem como os pontos escolhidos para aplicação de força e medidas de respostas. Cada FRF é resultado de 20 médias, na banda [0 – 250 Hz], com resolução de 0,625 Hz.

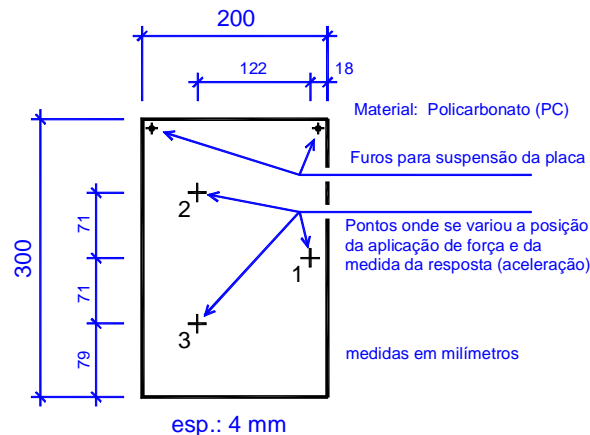


Figura 4. Placas de policarbonato: dimensões e pontos de aplicação de força medida de respostas

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Placas de aço

Na Figura (5) são mostradas a coerência, a fase e a amplitude das FRFs obtidas através dos ensaios dinâmicos realizados com a placas de aço recozida e soldada. Na Tabela (2) são apresentados, para comparação, os valores encontrados para as cinco primeiras freqüências naturais das placas ensaiadas. De uma maneira geral, as tensões geradas no processo de soldagem conduzem a uma redução nas freqüências naturais das placas. Verificou-se, por exemplo, uma variação de -6,33 % na freqüência natural do primeiro modo de vibração. Kaldas e Dickinson (1982) citam reduções ainda maiores (da ordem de -33%) no caso da soldagem de placas de aço de $508 \times 254 \times 4,76$ mm.

As tensões residuais são auto-equilibradas. Para uma determinada seção transversal da placa soldada, as tensões longitudinais σ_x de compressão (de menor valor, mas distribuídas sobre áreas maiores) são equilibradas por elevadas tensões de tração que atuam sobre o cordão de solda e pequenas áreas adjacentes. Estas tensões de tração geralmente atingem o valor da tensão de escoamento do aço na temperatura ambiente. Sabe-se que as tensões de compressão levam à redução das freqüências naturais (Simons e Leissa, 1975). Conclui-se, então, que as tensões de compressão, atuando sobre áreas maiores, influem mais sobre a variação das freqüências naturais que as tensões de tração, apesar de estas atingirem valores mais elevados.

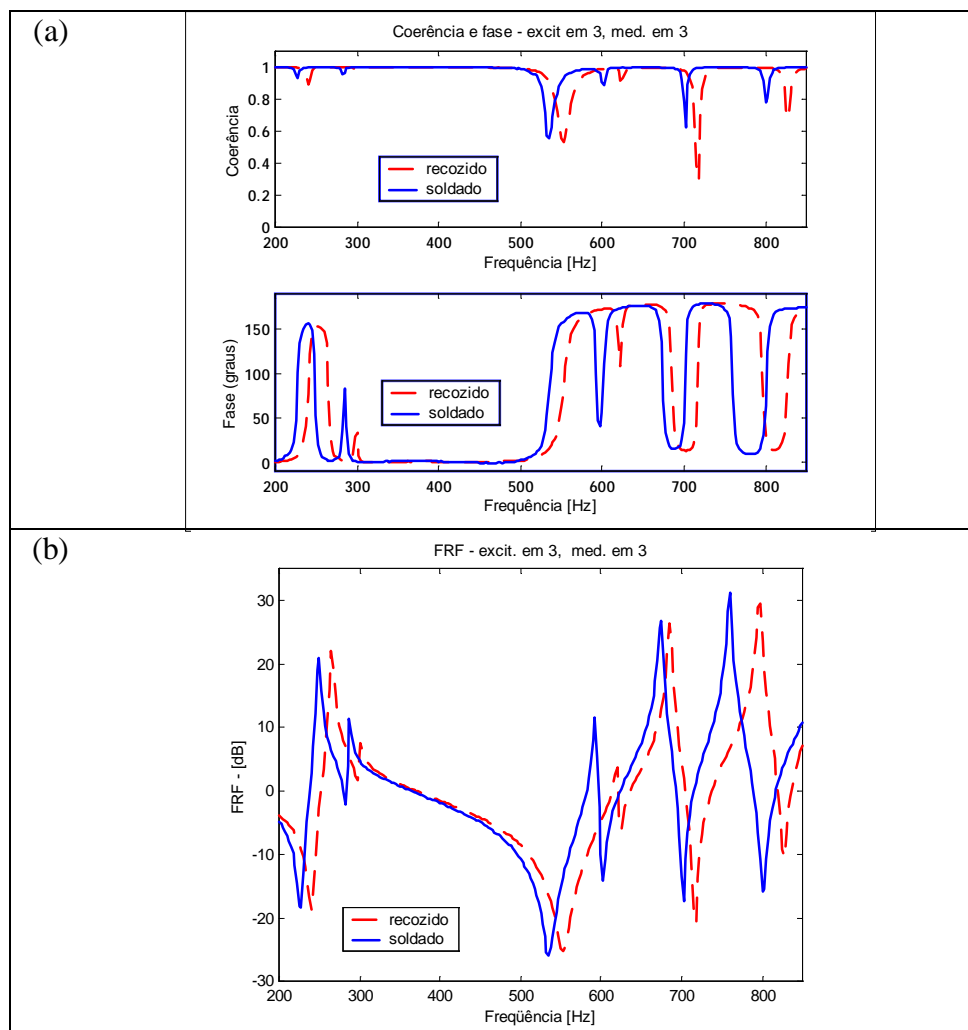


Figura 5. FRFs experimentais das placas de aço: (a) coerência e fase; (b) amplitude

Tabela 2. Valores das frequências naturais das placas de aço recozida e soldada

		Frequência [Hz]		Variação (%)
		Recozido	Soldado	
Modo de vibração	1	265,5	248,7	-6,33
	2	300,7	287,4	-4,42
	3	619,9	592,4	-4,44
	4	684,9	673,6	-1,65
	5	796,3	759,2	-4,66

Com o intuito de avaliar qualitativamente a influência das tensões residuais sobre as diferentes frequências naturais são mostrados graficamente, na Fig. (6), os campos de deslocamentos correspondentes aos cinco primeiros modos de vibração de uma placa livre de tensões, com dimensões similares às da placa ensaiada. Estes gráficos dos modos de vibração foram obtidos a partir de simulação numérica (análise modal), método dos elementos finitos, utilizando o programa ANSYS[®]. Como tendência geral, espera-se que a influência de uma dada componente de tensão seja tanto maior quanto maior for a deformação (ou a curvatura) da placa na direção daquela componente. Observa-se que a maioria dos modos apresenta uma distribuição deformações combinadas nas diferentes direções, não sendo possível identificar alguma preponderância. Analisando-se os aspectos dos modos, juntamente com a FRF da Fig. (5,b), verifica-se que o quarto modo de vibração é o que apresenta menos deformações semelhantes a flexão na direção do cordão de solda. A frequência natural deste modo também é a menos afetada pela soldagem, o que é coerente, pois as tensões resultantes da soldagem são predominantemente paralelas ao cordão de solda.

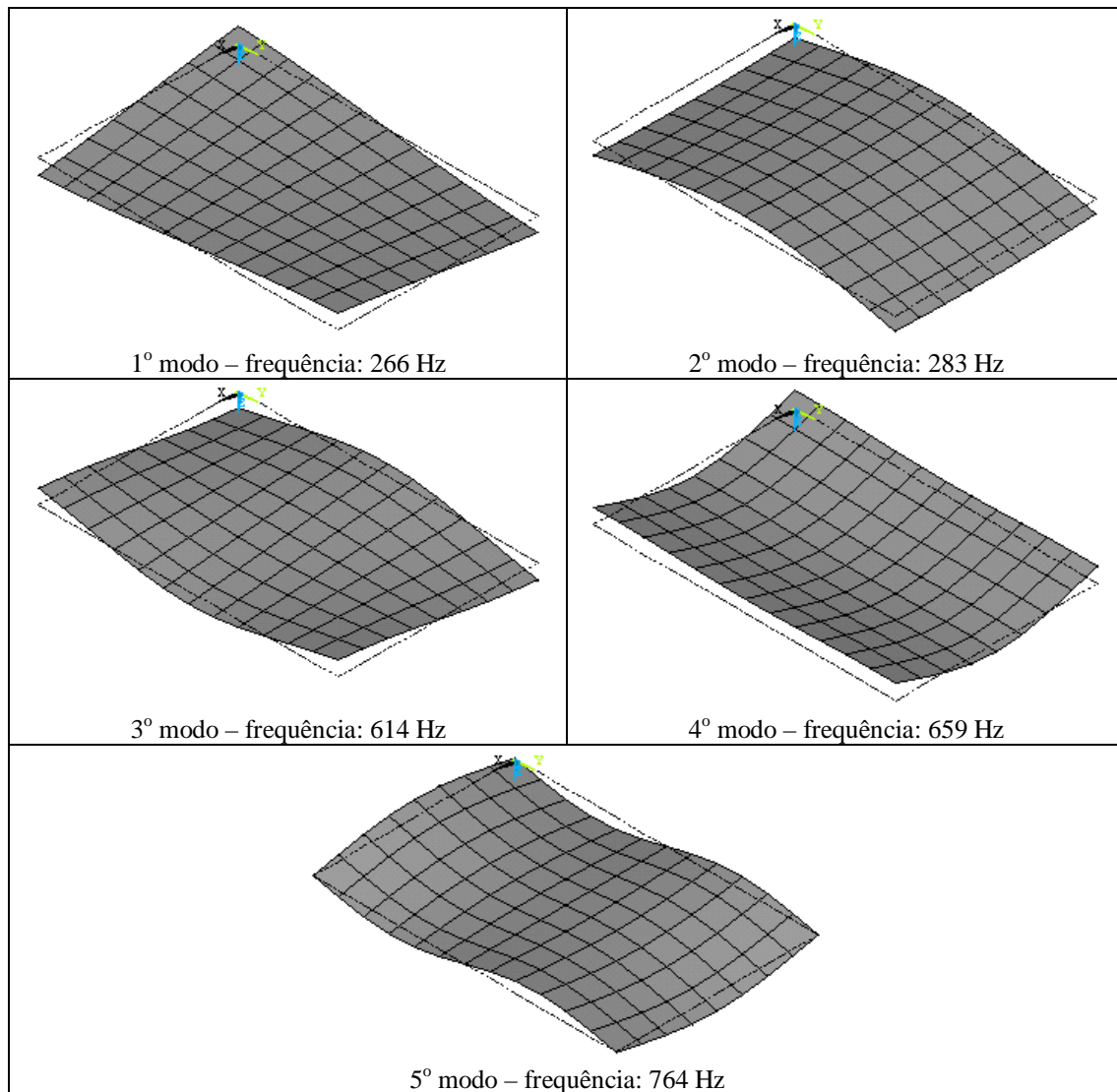


Figura 6. Ilustração dos 5 primeiros modos de vibração de uma placa livre de tensões, na condição "livre-livre". Resultados referentes à placa de aço, obtidos a partir da utilização do programa ANSYS® (método dos elementos finitos).

4.2. Placas de policarbonato(PC)

Na Figura (7) são mostradas as variações nas FRFs para a placa de PC nas condições recozido e soldado. Os valores das cinco primeiras frequências naturais são fornecidos na Tab. (3). Pode-se verificar, comparando as Tabs. (2) e (3), que as variações das frequências naturais devidas às tensões residuais são maiores para a placa de aço do que para a placa de policarbonato (PC). Deve-se considerar, no entanto, que a condição de "soldagem" por simples passe de calor pode não ser a mais adequada para o estudo das variações das frequências naturais no caso do PC. Este material apresenta baixa condutividade térmica e as tensões produzidas com o simples passe de calor são menores que as produzidas na soldagem de topo. Isto se deve ao fato de que, no caso do simples passe de calor, a área exposta ao ar quente é menor. Na soldagem de topo, o ar quente aquece a

vareta de material de adição, além das faces da junta chanfrada (cuja área exposta já é maior que a projeção horizontal). O calor efetivo, então, é maior no caso da soldagem de topo, para um mesmo ajuste de potência do aparelho de ar quente.

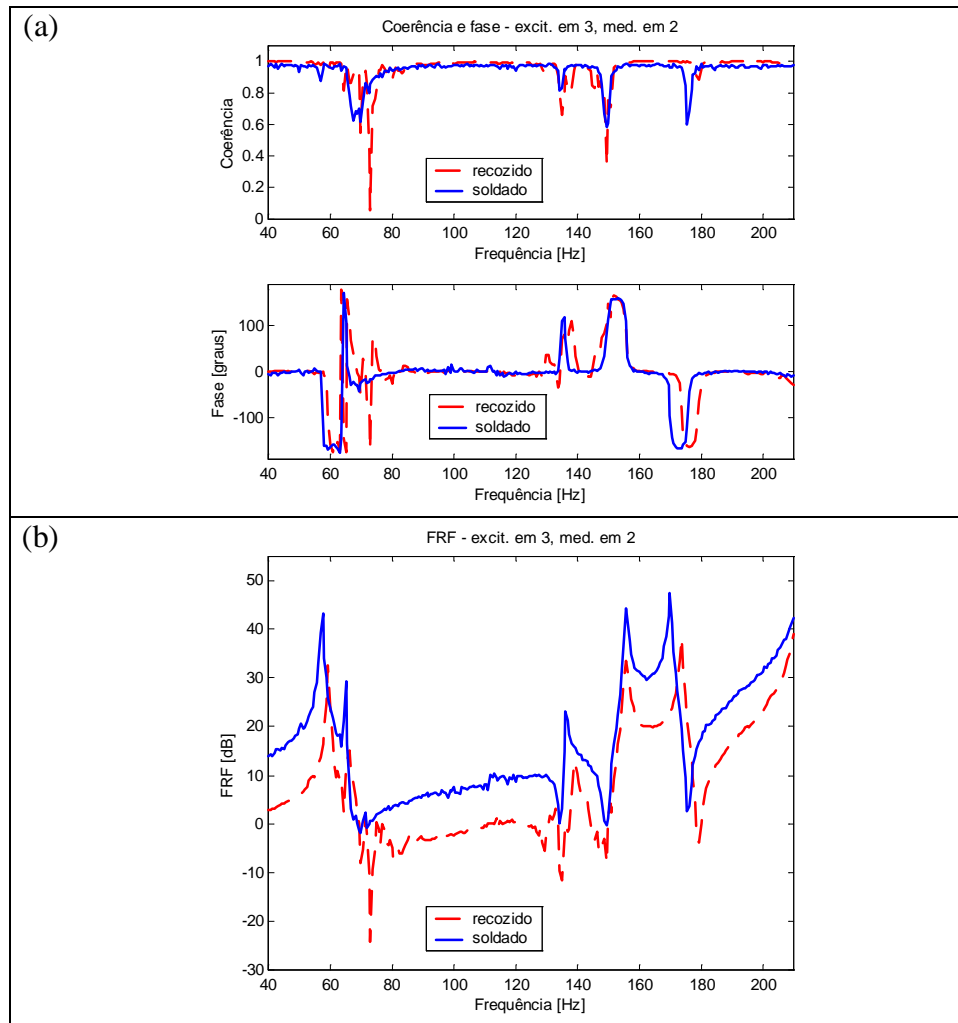


Figura 7. FRFs experimentais das placas de de policarbonato: (a) coerência e fase; (b) amplitude

Tabela 3. Frequências naturais da placa de policarbonato nas condições "recozido" e "soldado"

		Frequência [Hz]		Variação
		Recozido	Soldado	(%)
Modo de vibração	1	59,3	57,3	-3,37
	2	66,0	65,0	-1,52
	3	138,8	136,3	-1,80
	4	155,7	155,7	0,00
	5	173,7	170,0	-2,13

Como já foi mencionado, no caso da placa de policarbonato, determinou-se, inicialmente, estudar também o efeito das tensões de fabricação nas respostas dinâmicas, antes de se proceder ao recozimento. No entanto, a contração longitudinal devida ao recozimento comprometeu a análise, pois as variações que ocorreram nas frequências naturais com o recozimento são da mesma ordem de grandeza que as variações esperadas com a mudança nas dimensões da placa. Estas variações relativas nas frequências, devidas apenas às alterações geométricas foram estudadas com o emprego do método de Rayleigh-Ritz, que fornece valores aproximados para as frequências naturais. Neste caso, foram calculadas as frequências naturais de uma placa com $296 \times 200 \times 4,054$ mm (contração longitudinal de 4 mm, com a espessura calculada em função da preservação do volume). Os valores das frequências naturais medidas experimentalmente nas condições "como fabricado" e "recozido", bem como a variação esperada nas frequências por efeito apenas da contração longitudinal podem ser vistos na Tab.(4).

Tabela 4. Frequências naturais da placa de policarbonato nas condições "como fabricado" e "recozido"

		Frequência [Hz]		Variação %	Dev. à contraç. %
		Como fabric.	Recozido		
Modo de vibração	1	58,0	59,3	2,24	2,68
	2	64,0	66,0	3,13	3,95
	3	135,1	138,8	2,74	3,07
	4	152,5	155,7	2,10	1,40
	5	168,1	173,7	3,30	3,29

5. CONCLUSÕES

Foi verificada experimentalmente a influência das tensões residuais de soldagem sobre as respostas dinâmicas (frequências naturais) de placas retangulares constituídas de dois materiais diferentes: aço e policarbonato. Em ambos os casos foram observadas reduções nos valores das frequências naturais, devidas à preponderância de tensões residuais de compressão. Os níveis de variações observados são superiores aos erros usualmente resultantes dos procedimentos experimentais, podendo, portanto, ser utilizados como um indicador dos níveis de tensões residuais presentes. Com base nesta constatação, os autores estão desenvolvendo procedimentos de controle de qualidade de estruturas soldadas baseados na observação de suas respostas dinâmicas.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq - Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, pelo suporte financeiro proporcionado através de bolsas de doutorado concedidas a A.B.Vieira Jr. e S.S.Cunha Jr. e de bolsa de produtividade em pesquisa concedida a D.A. Rade.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alfredsson, K.S. e Josefson, B.L., 1992, "Harmonic Response of a Spot Welded Box Beam – Influence of Welding Residual Stresses and Deformations", *Welding in the World*, IIW-IIS, Vol. 30, No. 9/10, pp.229-235.
- Ewins, D.J., 1984, *Modal Testing: Theory and Practice*, John Wiley and Sons, UK, 269 p.
- Géradin, M. e Rixen, D., 1997, *Mechanical Vibrations – Theory and Application to Structural*

- Dynamics, John Wiley & Sons, U.K., 425 p.
- Kaldas, M.M. e Dickinson, S.M., 1981a, "Vibration and Buckling Calculations for Rectangular Plates Subject to Complicated In-Plane Stress Distributions by Using Numerical Integration in a Rayleigh-Ritz Analysis", Journal of Sound and Vibration, Vol. 75, Num. 2, Academic Press, UK, pp. 151-152.
- Kaldas, M.M. e Dickinson, S.M., 1981b, "The Flexural Vibration of Welded Rectangular Plates", Journal of Sound and Vibration, Vol. 75, Num. 2, Academic Press, UK, pp. 163-178.
- Simons, D.A. e Leissa, A.W., 1971, "Vibrations of Rectangular Cantilever Plates Subjected to In-Plane Acceleration Loads", Journal of Sound and Vibration, Vol. 17, Num. 3, Academic Press, UK, pp. 407-422.

8. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído neste trabalho

EXPERIMENTAL ASSESSMENT OF THE INFLUENCE OF RESIDUAL STRESSES ON THE DINAMIC RESPONSES OF WELDED PLATES

Alberto B. Vieira Jr., Domingos A. Rade e Sebastião S. Cunha Jr.

Universidade Federal de Uberlândia - Faculdade de Engenharia Mecânica

Campus Santa Mônica – CEP 38400-902 – Uberlândia, MG

e-mail: abvieira@mecanica.ufu.br, domingos@ufu.br, simoes@mecanica.ufu.br

***Abstract.** It is presented a preliminary study on the possibility of assessing welding-induced residual stresses in plates through the analysis of the dynamic responses. Results of experimental vibration tests of steel and polycarbonate (PC) plates at various conditions (as manufactured, annealed and welded) are presented. These results show significant changes of the values of the natural frequencies of the plates as a function of the mentioned conditions. In the case of steel, it was used SMAW butt welding. The PC plate received heat pass only, with hot gas welding equipment. The obtained results lead to the perspective of developing a more comprehensive, nondestructive experimental technique for evaluating residual stresses that could be used as part of a quality control procedure.*

***Keywords.** residual stresses,, vibration tests, vibration of plates, welding.*