



AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DO ENRIJECIMENTO POR TENSÃO EM COMPONENTES SOLDADOS

Alexandre Campos Bezerra

Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Av. João Naves de Ávila, 2121 – Campus Santa Mônica – Bloco 1M – Uberlândia/MG – CEP 38400-902

acbezerra@mecanica.ufu.br

Domingos Alves Rade

domingos@ufu.br

Américo Scotti

ascotti@mecanica.ufu.br

Resumo: *Sabe-se que o processo de soldagem induz a formação de tensões residuais, as quais, através do conhecido efeito de enrijecimento por tensões, influenciam o comportamento estático e dinâmico de componentes soldados. No entanto, poucos estudos abordam este tema, os quais evidenciam esta influência apenas para estruturas esbeltas, especificamente em placas retangulares finas. Apesar de o efeito de enrijecimento por tensão em estruturas espessas ser sabidamente menos intenso, é interessante avaliar também a sensibilidade destas com relação a este efeito. Desta forma, foi considerada inicialmente uma estrutura esbelta, a fim de confirmar tal influência. Em seguida, três estruturas mais espessas (placa enrijecida e tubos) foram testadas. Os testes consistiam em caracterizar, através de ensaios dinâmicos a baixa frequência, cada estrutura antes e após o procedimento de soldagem. As alterações de comportamento das estruturas foram observadas através das variações nas frequências naturais de vibração. Diferentes procedimentos foram adotados para as estruturas com o intuito de minimizar outros efeitos que não os causados pelas tensões residuais de soldagem. Os resultados obtidos confirmaram a grande influência das tensões residuais de soldagem sobre o comportamento dinâmico a baixa frequência de estruturas esbeltas. No entanto, as respostas dinâmicas de estruturas espessas se mostraram bem menos sensíveis ao efeito de enrijecimento por tensões residuais de soldagem.*

Palavras-chave: *tensões residuais, enrijecimento por tensão, soldagem.*

1. INTRODUÇÃO

O enrijecimento por tensão (*stress-stiffening*) é conhecido na literatura como a alteração da rigidez a flexão de componentes estruturais (cabos, vigas, tubos, placas, etc.) devido ao seu estado de tensão. As tensões normais e/ou cisalhantes possuem efeito predominante neste fenômeno, o qual pode ser verificado por meio de variações no comportamento estático e dinâmico. Estas tensões podem ser tanto provenientes de carregamentos externos como de tensões residuais, que podem ser oriundas de diferentes processos termomecânicos (soldagem, laminação, forjamento, etc.).

Diversos trabalhos evidenciam o efeito do enrijecimento por tensão, baseados em modificações no comportamento estático e dinâmico de componentes estruturais. Bassily e Dickinson (1972) utilizaram o método de Rayleigh-Ritz para derivar equações de frequência e flambagem aplicadas a placas retangulares com diferentes condições de contorno, sujeitas a tensões arbitrárias no plano da placa. Kaldas e Dickinson (1981) utilizaram o mesmo método para avaliar as variações das frequências naturais de placas retangulares finas soldadas. O efeito de tensões residuais térmicas devido à cura de compósitos laminados sobre o comportamento estrutural de placas foi estudado por Almeida e Hansen (1997). Donadon *et al.* (2002) estudaram o efeito de enrijecimento provocado por tensões geradas por atuadores piezoelétricos em placas. Mead (2003) estudou o efeito de tensões térmicas no comportamento vibratório e flambagem de placas retangulares finas. Em seu trabalho de tese, Vieira Jr. (2003) mostrou numericamente a influência das tensões residuais de soldagem em placas finas sobre as frequências naturais de vibração. Rade *et al.* (2005) utilizaram o método dos modos assumidos para modelar a vibração de placas retangulares finas sujeitas a tensões de membrana e um método clássico de otimização para desenvolver um algoritmo de identificação do estado de tensão da placa. A maioria destes trabalhos evidencia uma forte influência entre o estado de tensão e as características dinâmicas de elementos estruturais esbeltos. No que se trata de tensões residuais de soldagem, poucos trabalhos foram encontrados na literatura, os quais enfocam exclusivamente placas retangulares finas.

Este artigo tem por objetivo inicialmente confirmar experimentalmente a influência de tensões residuais de soldagem sobre as respostas vibratórias de estruturas esbeltas. Em seguida, avaliar-se-á o mesmo efeito em estruturas consideradas espessas.

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

2.1. Considerações Iniciais

A caracterização das estruturas foi realizada por meio de ensaios de vibrações. Estes ensaios consistiam na obtenção das funções de resposta em frequência (FRFs) de cada estrutura utilizando-se martelo de impacto e acelerômetro piezoelétrico. Em todos os casos, a estrutura foi ensaiada na condição livre (suspensa por fios de nylon).

2.2. Placa Retangular Fina

Uma placa retangular fina (esbelta) foi testada a fim de confirmar o efeito de enrijecimento por tensão devido à presença de tensões residuais de soldagem. Para tanto, uma placa de alumínio 5052-O de dimensões $370 \times 264 \times 6,35$ mm foi confeccionada e submetida a um tratamento térmico de recozimento. Este último com o intuito de aliviar as tensões eventualmente presentes no material, resultantes do processo de fabricação (laminação).

Após a caracterização do estado inicial da placa por meio de suas respostas vibratórias, procedeu-se à soldagem. O processo utilizado foi o TIG em corrente alternada com os seguintes parâmetros: corrente de positiva de 200 A; corrente negativa de -230 A; tempo positivo de 3 ms; tempo negativo de 22 ms; velocidade de soldagem de 200 mm/min; vazão de gás argônio de 10 L/min; distância bico de contato peça de 2 mm. Para este conjunto de parâmetros, obteve-se uma corrente eficaz de 218 A e uma tensão eficaz de 12,9 V. O cordão de solda foi realizado segundo a linha central longitudinal da placa e teve seu início e término a 20 mm das bordas. Ao iniciar a soldagem, a tocha foi mantida parada por 7 s. Isto porque, devido à alta condutividade térmica do alumínio, o calor tende a se propagar rapidamente, dificultando a fusão do material.

Concluída a soldagem da placa, uma nova caracterização de seu comportamento dinâmico foi realizada e comparada com o estado inicial.

2.3. Placa Retangular com Enrijecedores

Neste caso, foi confeccionada uma placa com três enrijecedores conforme a Figura 1, resultando numa estrutura considerada espessa.

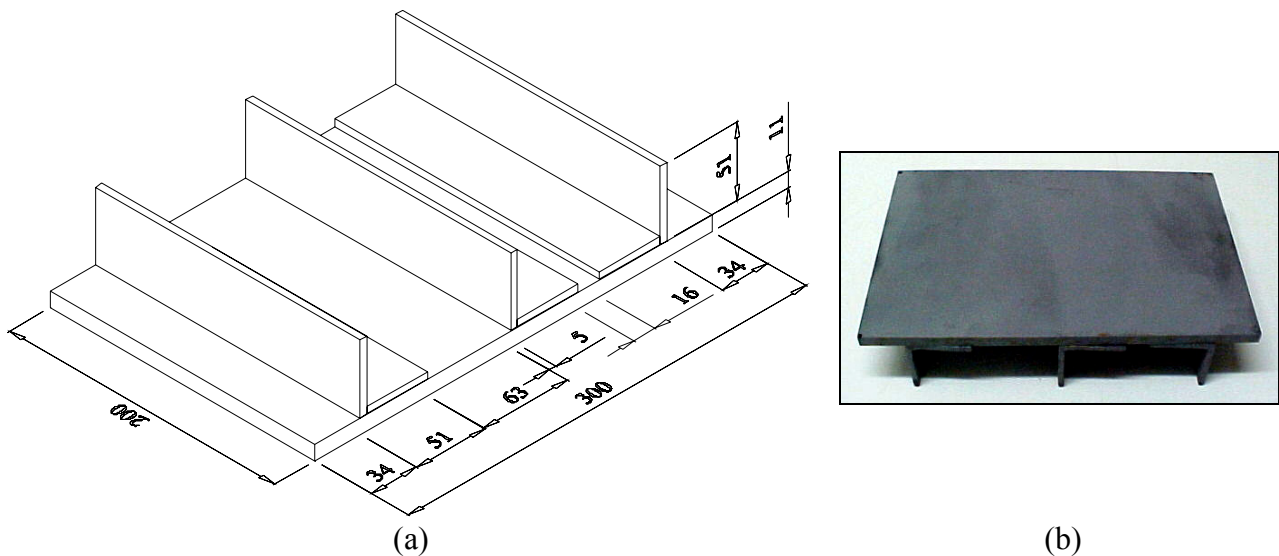


Figura 1. Placa retangular com enrijecedores (dimensões em mm).

O estado inicial da placa foi caracterizado por ensaios dinâmicos. Em seguida, foi usinado um chanfro de 3 mm de profundidade com um ângulo de aproximadamente 60° . Um novo ensaio dinâmico foi efetuado. Na sequência, a soldagem foi realizada utilizando o processo MIG com os seguintes parâmetros: diâmetro do arame de 1,2 mm; velocidade de alimentação de 6 m/min; velocidade de soldagem de 9,5 mm/s; tensão de 22 V; gás Ar-20%CO₂ com vazão de 15 L/min; distância bico de contato-peça de 12 mm. A corrente resultante foi de 230 A. Após a soldagem, o reforço foi retirado utilizando uma esmerilhadeira. Um novo ensaio dinâmico foi utilizado para caracterizar o estado final da placa. As três situações foram comparadas.

2.4. Tubo de 200 mm

O tubo utilizado nesta etapa é de aço carbono com as seguintes dimensões: 139 mm de diâmetro externo, 128,8 mm de diâmetro interno (5,1 mm de espessura) e comprimento de 200mm.

Da mesma forma que nos casos anteriores, ensaios dinâmicos foram realizados para caracterizar o tubo antes e após a soldagem. Foi realizada uma soldagem circunferencial na posição correspondente à metade do comprimento do tubo. Para tanto, um dispositivo de solda circunferencial foi utilizado. O processo de soldagem foi o TIG com os seguintes parâmetros: velocidade de soldagem de 18 mm/s; corrente de 302 A; gás argônio com vazão de 15 L/min; e distância eletrodo-peça de 3 mm. A tensão resultante foi de 17 V. Novamente, o resultado para o estado inicial foi comparado com o resultado do tubo soldado.

2.5. Tubo de 400 mm

Um tubo de aço inoxidável austenítico de diâmetro interno de 155mm, espessura de 5mm e comprimento de 400mm, foi utilizado neste último teste. A obtenção das funções de resposta em frequência seguiu o mesmo procedimento dos testes anteriores.

Neste caso, o cordão de solda foi feito na direção longitudinal do tubo, não sendo necessário o uso do dispositivo de solda circunferencial. O processo de soldagem TIG foi utilizado com os seguintes parâmetros: velocidade de soldagem de 4,67 mm/s; corrente de 300 A; gás argônio com vazão de 8 L/min; distância eletrodo-peça de 3 mm. A tensão resultante foi de 16,3 V.

3. RESULTADOS

3.1. Placa Retangular Fina

A Figura 2 ilustra os resultados obtidos para a placa em seu estado inicial e soldada, mostrando as quatro primeiras frequências naturais de vibração. É possível verificar uma grande variação destas frequências após a soldagem, observando-se que para as três primeiras houve redução (de aproximadamente 19%, 15% e 10%, nesta ordem) e aumento para a quarta frequência natural (aproximadamente 2%). Este resultado confirma a sensibilidade de estruturas esbeltas em relação ao efeito do enrijecimento por tensões causado por tensões residuais de soldagem. Além disso, o fato de a maioria das frequências naturais apresentarem uma tendência de redução demonstra que o efeito das tensões de compressão predomina sobre o das tensões de tração.

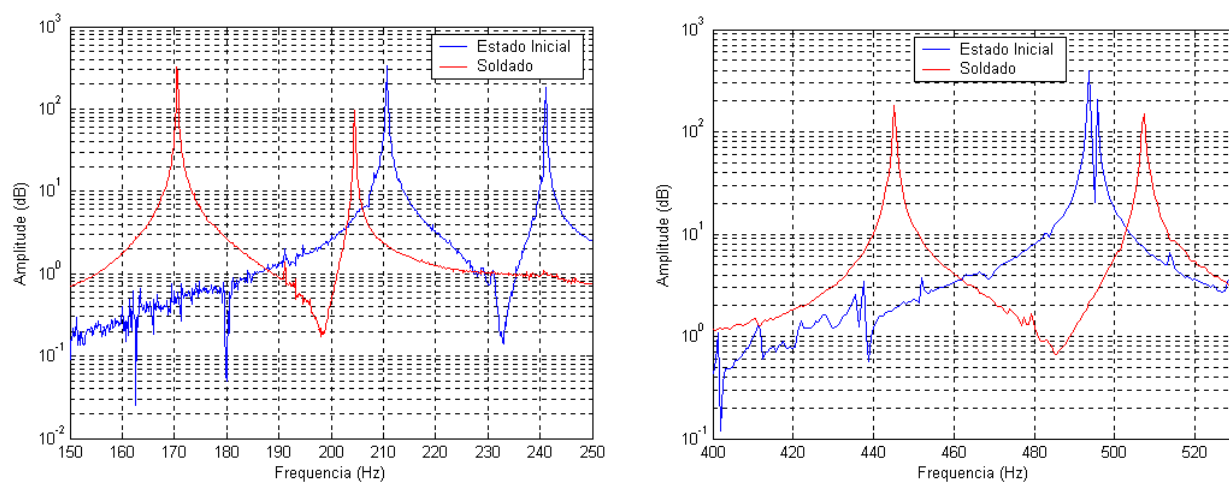


Figura 2. Resultados para a placa retangular fina antes e após a soldagem.

3.2. Placa Retangular com Enrijecedores

A Figura 3 mostra as funções de resposta em frequência obtidas para o estado inicial, após a confecção do chanfro e após a soldagem.

Inicialmente, pode-se avaliar a influência da retirada de massa da estrutura sobre as frequências naturais de vibração. Esta avaliação foi feita através da comparação das FRFs obtidas para o estado inicial da placa e para a placa com o chanfro, a qual está, em princípio, livre de tensões residuais. Através da figura, observa-se uma tendência de redução das frequências naturais (média de 1,13% de redução). Sendo assim, conclui-se que a perda de rigidez da estrutura devido à confecção do chanfro foi mais significativa do que a perda de massa.

Já após a soldagem, verifica-se que a tendência de redução em relação ao estado inicial continua. No entanto, a maioria das frequências naturais sofreu um aumento em relação à placa com o chanfro aberto. Isto provavelmente se deve ao aumento da rigidez devido ao material que foi depositado. No entanto, as frequências naturais não retornaram aos seus valores no estado inicial. Considera-se, pois, que esta parcela de alteração se deve às tensões residuais inseridas durante o processo de soldagem.

Observa-se claramente que a influência das tensões residuais de soldagem sobre o valor das frequências naturais de vibração foi muito pequena, sendo verificado variações inferiores a 1%.

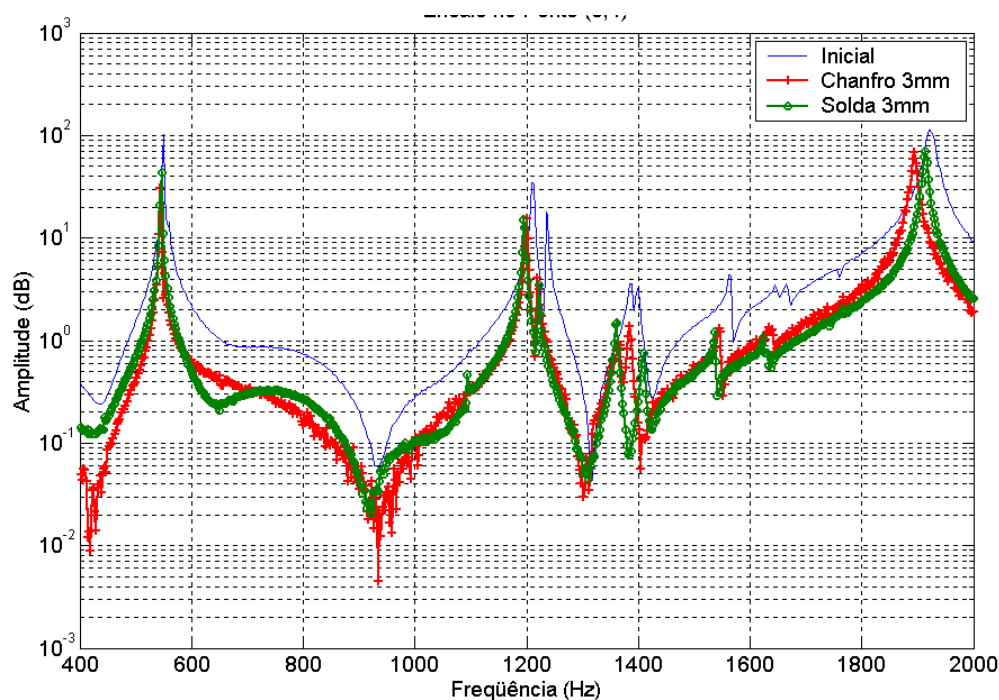


Figura 3. Resultados para a placa retangular com enrijecedores.

3.3. Tubo de 200 mm

A Figura 4 ilustra o tubo após a soldagem. O cordão de solda apresentou muitas falhas devidas ao fato de a velocidade de soldagem ter sido muito alta. Isto ocorreu porque o dispositivo de soldagem de tubo utilizado não possui um controle preciso de velocidade, além de possibilitar apenas uma velocidade angular mínima de aproximadamente 2,5 rpm.

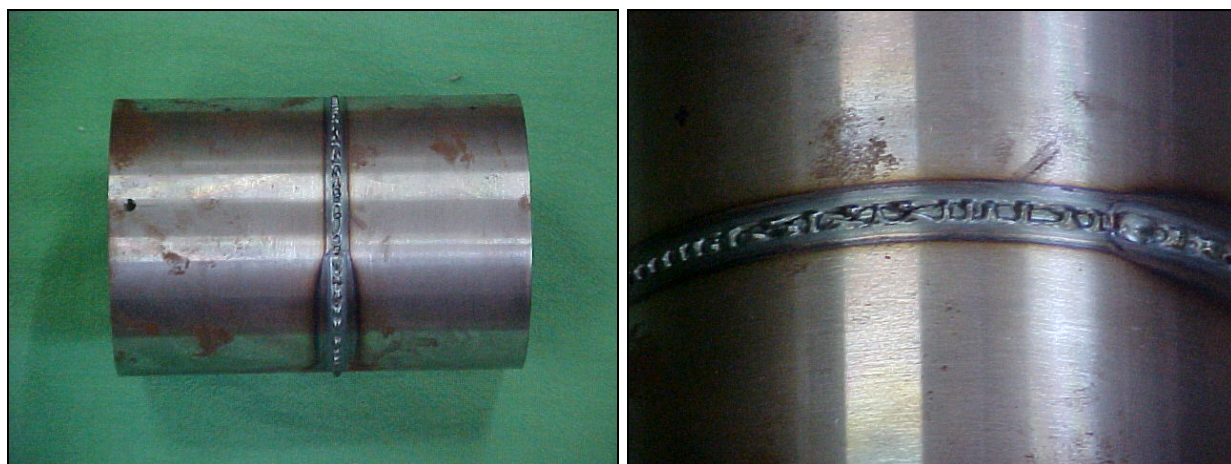


Figura 4. Foto do tubo de 200 mm após a soldagem.

Os resultados dos ensaios dinâmicos estão mostrados na Figura 5. Verifica-se que praticamente não houve variações na posição dos picos de ressonância. Para explicar este resultado, um modelo de elementos finitos do tubo foi gerado com o intuito de avaliar os modos de vibração em questão. Constatou-se que, até frequências da ordem de 8000 Hz, só há modos de “respiração”, conforme exemplos mostrados na Figura 6. Fazendo uma analogia com uma placa, estes modos de “respiração” correspondem aos modos de vibração longitudinais da placa, os quais são pouco afetados por tensões no plano da placa. Sendo assim, espera-se que apenas os modos de flexão sofram alterações significativas. No entanto, para um tubo com estas dimensões, as frequências naturais dos modos de flexão são muito altas (acima de 8300 Hz), impossibilitando a avaliação proposta neste trabalho.

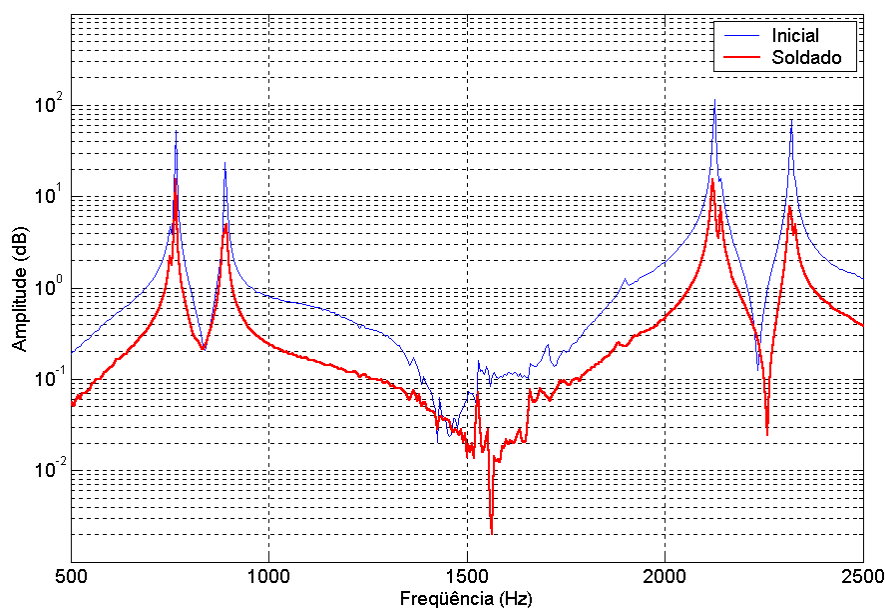


Figura 5. FRFs do tubo de 200 mm no estado inicial e soldado.

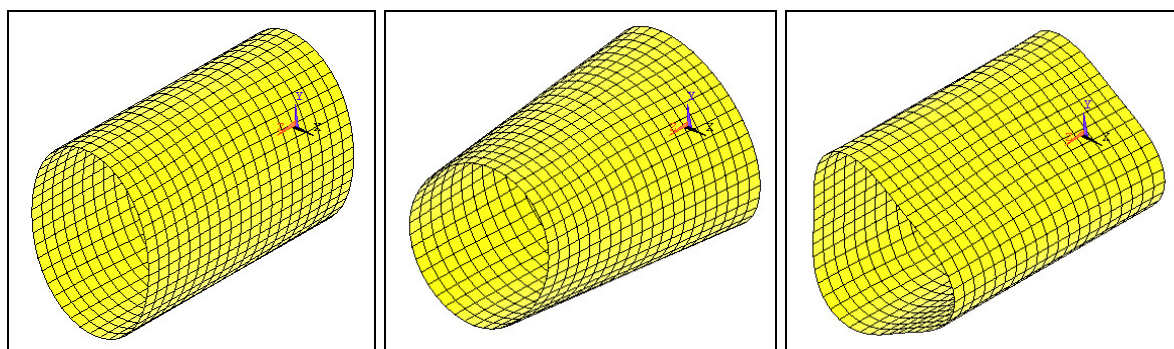


Figura 6. Modos de “respiração” do tubo obtido através de simulação numérica.

3.4. Tubo de 400 mm

Inicialmente, um modelo de elementos finitos do tubo livre de tensões foi gerado a fim de determinar as frequências naturais dos primeiros modos de flexão, os quais, conforme discutido no teste anterior, são os mais afetados pelas tensões residuais de soldagem. Após a execução de uma análise modal estas frequências foram calculadas: 3676Hz e 5455Hz.

Constatou-se que houve penetração total da solda pela observação do vazamento do arco durante a soldagem e pelo aspecto da raiz após a soldagem (inspeção visual), conforme ilustrado na Figura 7.

A Figura 8 apresenta as FRFs obtidas, numa banda de frequência de 400 a 1400 Hz, para o estado inicial e após a solda. Nota-se uma leve tendência de elevação das frequências dos modos de respiração. Já a Figura 9 mostra as FRFs na faixa de frequência de 3400 a 4000Hz. Note-se que muito provavelmente, baseado no modelo de elementos finitos, o pico de ressonância próximo a 3500 Hz é referente ao primeiro modo de flexão. Para este pico, a frequência cai após a soldagem (queda de 15 Hz). O segundo modo de flexão não foi avaliado devido ao fato de o martelo de impacto utilizado excitar a estrutura até o máximo de 5000 Hz (com ponta de metal).

Novamente, verificou-se a baixa influência das tensões residuais de soldagem sobre o valor das frequências naturais de vibração (variações inferiores a 1%).

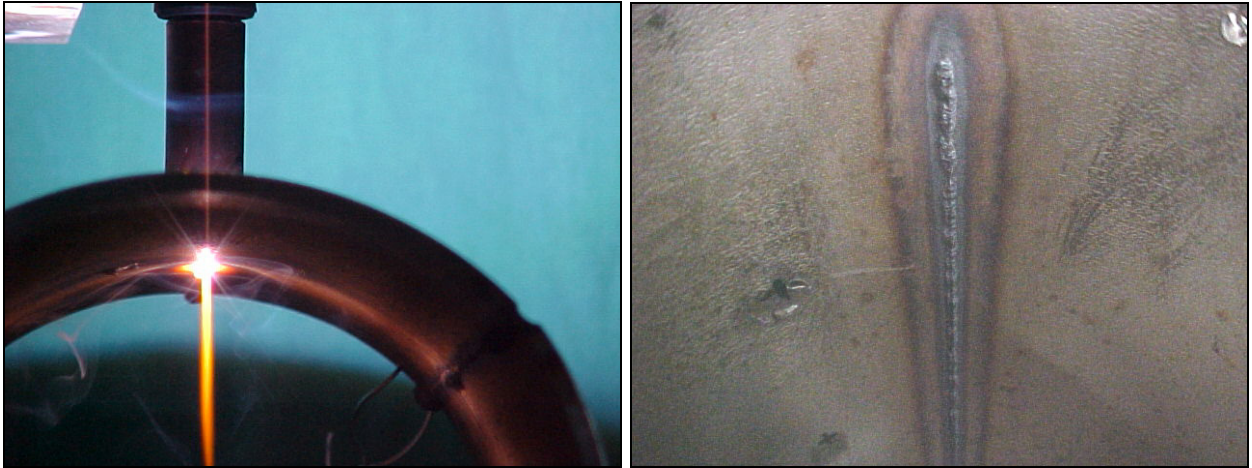


Figura 7. Fotos do tubo de 400 mm durante e após a solda.

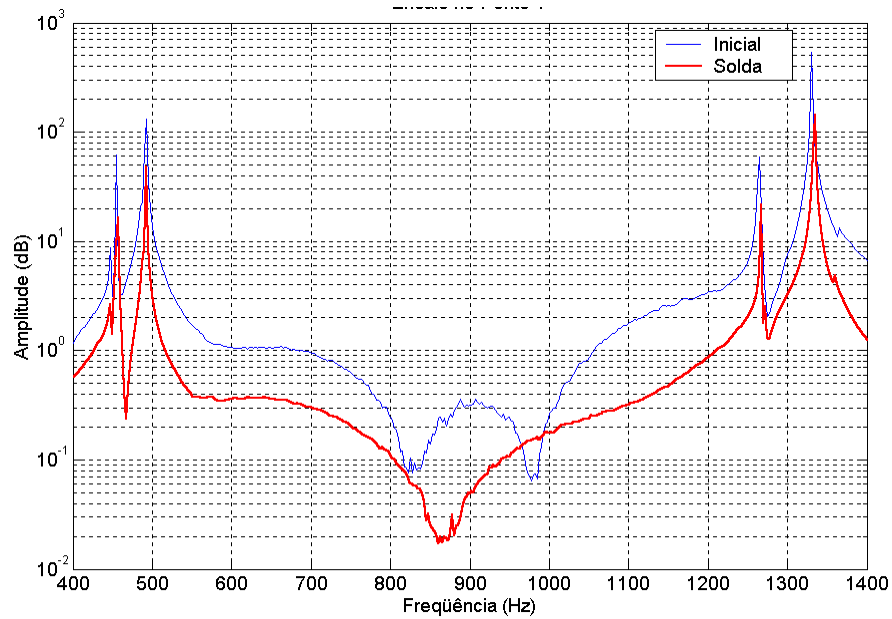


Figura 8. FRFs do tubo de 400 mm no estado inicial e após primeira solda (400 a 1400 Hz).

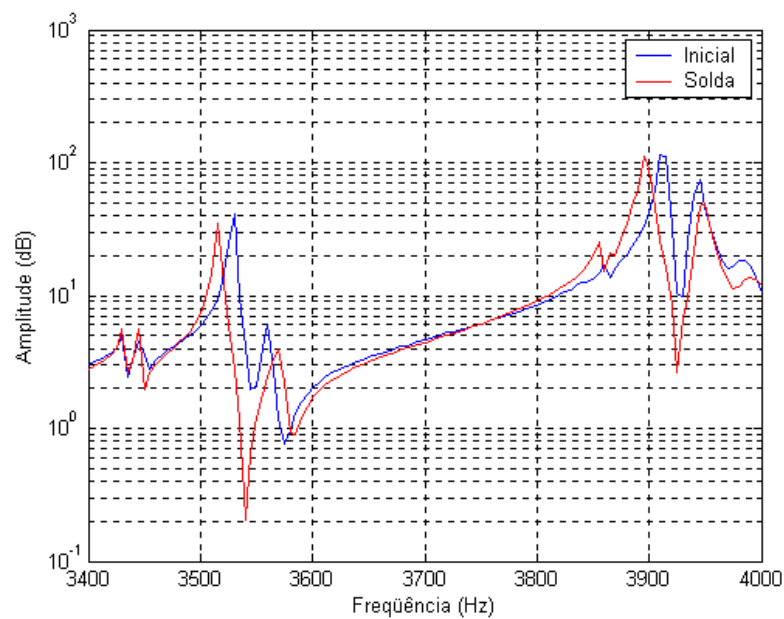


Figura 9. FRFs do tubo de 400 mm no estado inicial e após primeira solda (3400 a 4000 Hz).

4. CONCLUSÕES

O presente trabalho apresenta uma avaliação experimental da influência das tensões residuais inseridas durante a soldagem de um componente estrutural sobre o seu comportamento dinâmico (através do efeito de enrijecimento por tensão). Quatro testes foram realizados, sendo um com uma estrutura esbelta e três com estruturas espessas.

Inicialmente, a grande influência do enrijecimento por tensões residuais de soldagem em estruturas esbeltas foi confirmada através de alterações no comportamento dinâmico, sendo verificado variações de até 19% no valor das frequências naturais de vibração.

No entanto, para os três casos em que estruturas espessas foram testadas, constatou-se que a influência das tensões residuais de soldagem sobre as respostas vibratórias de tais estruturas foi pequena, apresentando variações das frequências naturais de vibração inferiores a 1%.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à CAPES e ao CNPq pelas concessão de bolsas de doutorado e produtividade em pesquisa, e ao suporte da agência FAPEMIG através do projeto TEC1634/04.

6. REFERÊNCIAS

- Almeida, S.F.M. e Hansen, J.S., 1997, “Enhanced Elastic Buckling Loads of Composite Plates with Tailored Thermal Residual Stresses”, Transactions of the ASME, vol. 64, pp. 772-780.
- Bassily, S.F. e Dickinson, S.M., 1972, “Buckling and Lateral Vibration of Rectangular Plates Subject to Inplane Loads – A Ritz Approach”, Journal of Sound and Vibration, vol. 24, n. 2, pp. 219-239.
- Donadon, M.V., Almeida, S.F.M. e Faria, A.R., 2002, “Stiffening Effects on Natural Frequencies of Laminated Plates with Piezoelectric Actuators”, Composites: Part B, vol. 33, pp. 335-342.
- Kaldas, M.M. e Dickinson, S.M., 1981-b, “The Flexural Vibration of Welded Rectangular Plates”, Journal of Sound and Vibration, vol. 75, n. 2, pp. 163-178.
- Mead, D.J., 2003, “Vibration and Buckling of Flat Free-Free Plates under non-Uniform in-Plane Thermal Stresses”, Journal of Sound and Vibration, vol. 260, pp. 141-165.
- Rade, D. A., Vieira Jr., A. B., Rojas, J. E. e Bezerra, A. C., 2005, “Influence of Stress-Stiffening on the Dynamic Behaviour of Plates: Direct and Inverse Problems”, Proceedings of the XI International Symposium on Dynamic Problems of Mechanics – DINAME, Ouro Preto – MG.
- Vieira Jr, A.B., 2003, “Identificação de Tensões em Placas Retangulares a partir de Respostas Vibratórias, com aplicação a Tensões Residuais de Soldagem”, Tese de Doutorado, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia.

7. DIREITOS AUTORAIS

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

EXPERIMENTAL ASSESSMENT OF STRESS-STIFFENING IN WELDED COMPONENTS

Alexandre Campos Bezerra

Federal University of Uberlândia – School of Mechanical Engineering, 2121 João Naves de Ávila Av. – Santa Mônica – Uberlândia/MG - Brazil

acbezerra@mecanica.ufu.br

Domingos Alves Rade

domingos@ufu.br

Américo Scotti

ascotti@mecanica.ufu.br

Abstract: *It is well known that welding process induces the formation of residual stresses, which, through the so called stress-stiffening effect, modify the static and dynamic behavior of welded components. Nevertheless, a limited number of studies discuss this subject, where this influence is evidenced only for thin structures, specifically for rectangular plates. Despite stress-stiffening effect is less intense in thick components, it becomes interesting to quantify it. Thus, it was initially considered a thin structure. Thereafter, three structures considered thick were tested. This investigation consists in characterizing, through low-frequency dynamic tests, each structure before and after welding. Changes in the structure's behavior were observed through the variation of the values of the vibration natural frequencies. Different procedures were adopted to minimize other effects than those caused by residual stresses. The results obtained confirm the large influence of welding residual stresses over the dynamic behavior of thin structures. However, the dynamic responses of thick structures are shown to be less sensitive to welding residual stresses.*

Keywords: *residual stresses, stress-stiffening, welding.*