

CAPÍTULO IV

CARACTERIZAÇÃO EXPERIMENTAL DO ENRIJECIMENTO POR TENSÃO DE COMPONENTES SOLDADOS

4.1. Considerações Iniciais

Neste capítulo, são descritos ensaios experimentais que foram realizados com diferentes estruturas. Inicialmente, tais estruturas têm seus estados iniciais caracterizados quanto ao comportamento dinâmico por meio de Funções de Resposta em Frequência (FRFs) pontuais, obtidas utilizando martelo de impacto instrumentado com célula de carga e acelerômetro piezoelétrico.

Em seguida, estas estruturas são submetidas a ciclos térmicos de soldagem, utilizando ou o processo MIG ou o processo TIG. O processo MIG tem por princípio a formação de um arco elétrico mantido entre um eletrodo consumível (material de adição) e a peça de trabalho, que é protegido do meio ambiente por um fluxo contínuo de um gás inerte. Já no processo TIG, o eletrodo é de tungstênio e não consumível, aplicando-se com ou sem material de adição, também protegido por um gás inerte.

Após a soldagem, as estruturas são novamente caracterizadas dinamicamente (pela obtenção das FRFs), a fim de se evidenciar alterações no comportamento dinâmico provenientes das tensões residuais remanescentes do processo soldagem, por meio da observação dos valores das frequências naturais, indicados pelos picos das amplitudes das FRFs.

Diferentes estruturas foram testadas, sendo que para cada uma destas estruturas é realizado um procedimento experimental particular.

Como a literatura já apresenta este tipo de estudo com estruturas esbeltas, especificamente placas retangulares finas (Kaldas e Dickinson, 1981b; Vieira Jr, 2003), iniciou-se este estudo buscando avaliar o efeito de enrijecimento por tensões residuais de soldagem em estruturas espessas (mais rígidas).

4.2. Placa com Enrijecedores

A estrutura utilizada neste caso está ilustrada na Fig. 4.1, a qual é composta por uma placa e três cantoneiras de aço carbono AISI 1020, estas últimas atuando como enrijecedores. Estes enrijecedores foram acoplados por meio de soldagem por eletrodo revestido e têm por objetivo minimizar a distorção da placa durante e após a introdução de tensões residuais de soldagem.

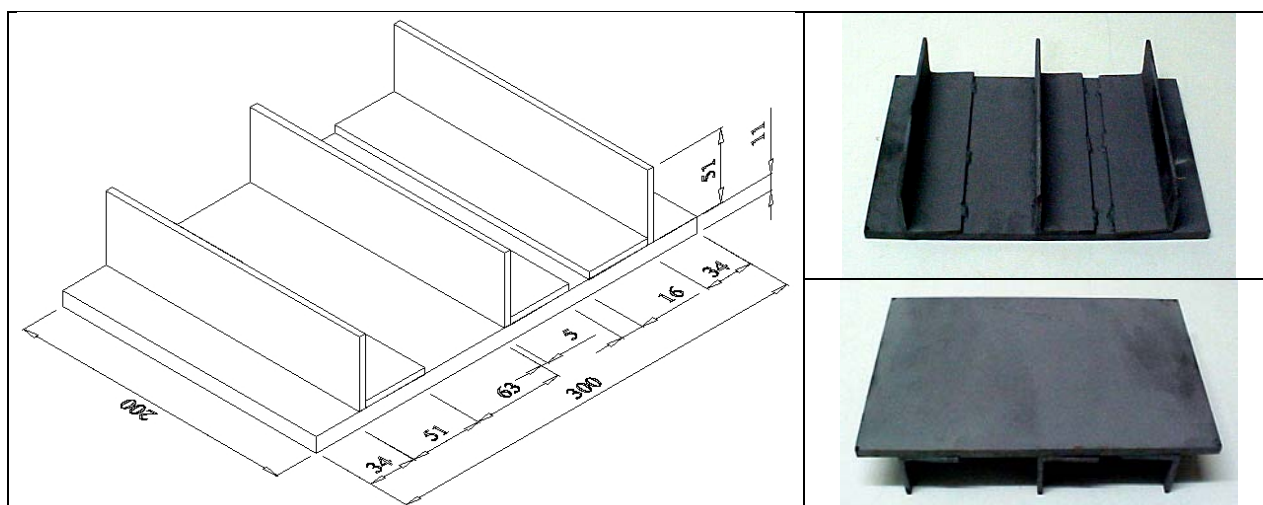


Figura 4.1. Vista esquemática e fotos da placa com enrijecedores (dimensões em mm).

Após a montagem, a estrutura foi submetida a um tratamento térmico de recozimento (em torno de 870°C durante 1 hora) para alívio de tensões. Para evitar a formação de óxido durante o tratamento, foi confeccionada uma caixa de aço inoxidável, onde a peça foi colocada coberta de areia fina e carvão. Depois de uma limpeza por jateamento de areia, a peça foi submetida a uma caracterização composta por:

- medição da massa total (utilizando-se uma balança de 21,100 kg de capacidade e resolução de 1 g);
- avaliação da integridade estrutural, através de um equipamento de ensaio não-destrutivo (END) por ultra-som, visando a detecção de vazios;
- obtenção das FRFs por meio de ensaios de vibração.

Após a caracterização do estado inicial da estrutura, realizaram-se as seguintes etapas:

1. usinagem de um chanfro de 3 mm de profundidade;
2. soldagem e retirada do reforço;

3. usinagem de um chanfro de 6 mm de profundidade;
4. soldagem e retirada do reforço;
5. usinagem de um chanfro de 7,5 mm de profundidade;
6. soldagem e retirada do reforço.

A retirada do reforço foi realizada utilizando-se uma plaina. Após cada uma das etapas listadas acima, realizou-se o mesmo procedimento de caracterização ao qual a peça foi submetida em seu estado inicial.

Os ensaios dinâmicos foram realizados de acordo com o esquema da Fig. 4.2. Note-se que a placa está essencialmente na condição livre, simulada pela suspensão composta por fios elásticos flexíveis. Os equipamentos utilizados foram: um analisador de sinal da Scientific Atlanta, SD380, com dois canais e resolução de 800 linhas; dois amplificadores de sinais da Brüel & Kjær tipo 2635; um martelo de impacto instrumentado com célula de carga da Brüel & Kjær tipo 8202; um acelerômetro piezoelétrico da Brüel & Kjær tipo 4367, sensibilidade de $1,92 \text{ pC/m s}^{-2}$ e um microcomputador.

A mesma figura mostra ainda a malha desenhada na placa para o posicionamento adequado do acelerômetro e para aplicação do impacto do martelo. A posição é especificada indicando uma coordenada (x,y). Cada unidade indicada na figura representa 25 mm. Os pontos utilizados foram: (1,5), (2,1), (3,4) e (5,4). Em todos os pontos testados, o acelerômetro foi posicionado na face da placa onde foram soldados os enrijecedores, enquanto que o impacto do martelo instrumentado foi aplicado na face oposta.

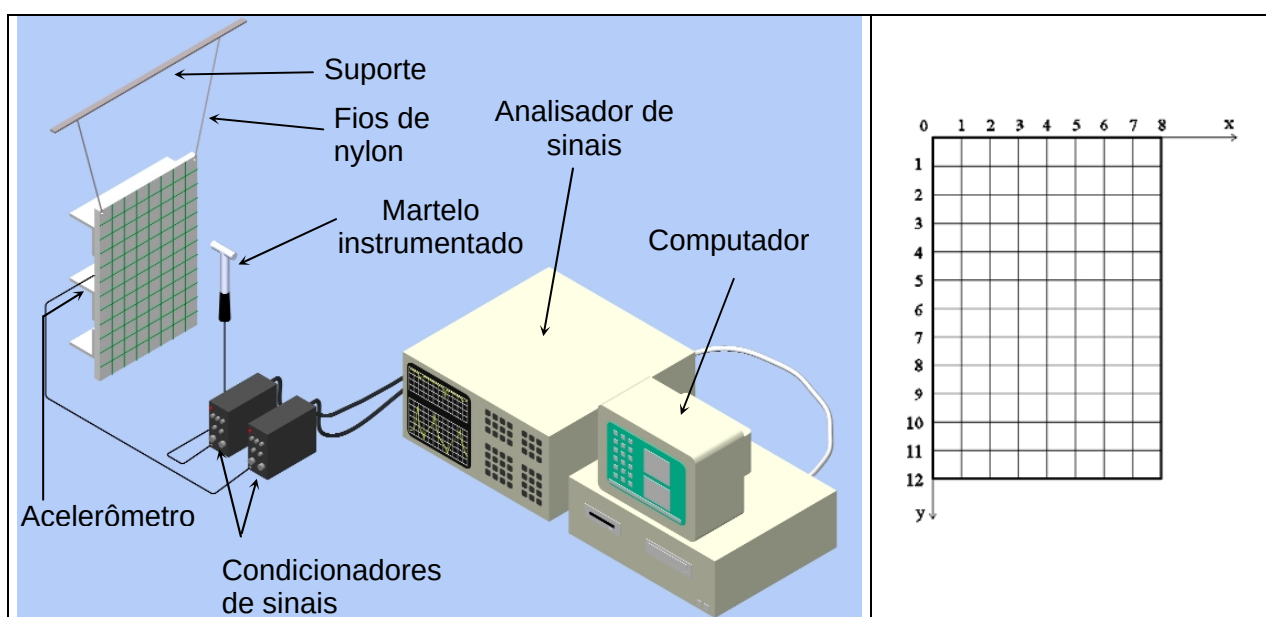


Figura 4.2. Vista esquemática do aparato experimental para o ensaio dinâmico e a malha desenhada na placa.

4.2.1. Estado Inicial

A massa da placa no estado inicial foi de 6,944 kg. A existência de falhas na peça foi verificada através de END, principalmente ao longo do eixo longitudinal central, onde seria usinado um chanfro e realizada a soldagem para introdução de tensões residuais. Nenhuma falha foi localizada.

4.2.2. Usinagem de um Chanfro de 3 mm

Foi usinado um chanfro de 3 mm de profundidade com um ângulo de aproximadamente 60° utilizando uma plaina na direção longitudinal da placa. O valor da massa da estrutura com este chanfro foi de 6,928 kg, significando a remoção de 16 g de material. Ensaios dinâmicos foram realizados para verificação do efeito do chanfro nas frequências naturais de vibração da estrutura.

4.2.3. Soldagem do Chanfro de 3 mm

Para a obtenção dos parâmetros de soldagem que melhor se adequassem ao chanfro usinado, corpos de prova foram confeccionados e soldados. A princípio, buscaram-se parâmetros para soldagem MIG/MAG no modo de transferência goticular (“spray”). No entanto, notou-se a presença de mordeduras. Sendo assim, passou-se para soldagem no modo de transferência por curto-circuito, com os seguintes parâmetros de regulagem:

- diâmetro do arame (AWS ER70S6) de 1,2 mm;
- velocidade de alimentação: $V_a = 6$ m/min;
- velocidade de soldagem: $V_s = 9,5$ mm/s = 57 cm/min;
- tensão: $U = 22$ V;
- gás Ar-20%CO₂: vazão = 15 L/min;
- distância bico de contato-peça: $DBCP = 12$ mm (em relação à superfície da placa).

A corrente monitorada para estes parâmetros foi de 230 A.

Foram fixados apêndices (“orelhas”) nas extremidades da placa para início e término do processo de soldagem, conforme ilustram as fotos da Fig. 4.3. Um destes apêndices foi

utilizado como “testemunho” para verificação da adequabilidade dos parâmetros usados, do ponto de vista geométrico do cordão.

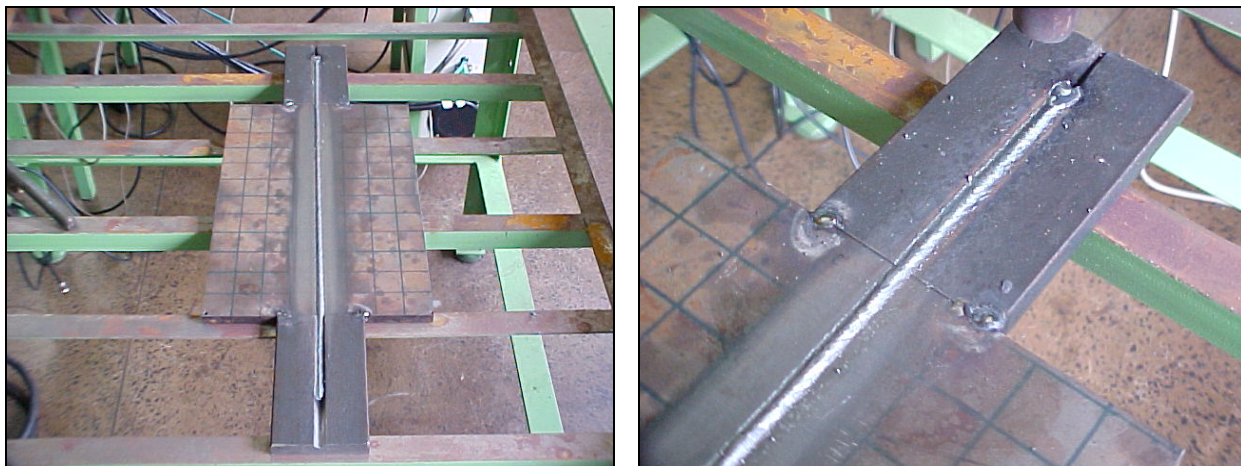


Figura 4.3. Fotos da placa enrijecida após a soldagem do chanfro de 3 mm, com destaque para os apêndices no início e fim da placa.

O testemunho (“orelha”) foi devidamente preparado para macrografia numa seção a aproximadamente 30 mm da aresta da placa. Verificou-se que houve boa penetração na soldagem realizada. A massa da estrutura sem as orelhas foi medida antes e após a retirada do reforço: 6,948 kg e 6,941 kg, respectivamente. Realizou-se uma avaliação da integridade estrutural da peça utilizando-se ensaio por ultra-som, com cabeçote de 70°, para verificar a presença de descontinuidades na soldagem (presença de vazios e falta de penetração). Nenhuma falha foi localizada.

4.2.4. Usinagem de um Chanfro de 6 mm

Foi usinado um chanfro de 6 mm de profundidade na estrutura com a solda de 3 mm anterior. O chanfro, usinado com uma fresadora por questão de praticidade, teve um ângulo de aproximadamente 45°. A estrutura com este chanfro teve sua massa medida, sendo esta igual a 6,879 kg. Redução de 62 g em relação à estrutura após a solda do chanfro de 3 mm sem o reforço.

4.2.5. Soldagem do Chanfro de 6 mm

A soldagem foi realizada utilizando os mesmos parâmetros do chanfro de 3 mm, exceto a velocidade de soldagem, a qual foi reduzida para $V_s = 3,6 \text{ mm/s} = 21,6 \text{ cm/min}$. Novamente,

testemunhos (“orelhas”) foram fixados nas extremidades da placa para início e término do processo de soldagem.

Verificou-se, a partir do testemunho (“orelha”), que houve penetração suficiente na soldagem realizada. A massa da estrutura foi medida antes e após a retirada do reforço: 6,948 kg e 6,943 kg, respectivamente. Realizou-se a avaliação da integridade estrutural da peça utilizando-se ultra-som. Foram verificadas descontinuidades ao longo do cordão em apenas um lado da solda, o que pode influenciar os resultados.

4.2.6. Usinagem de um Chanfro de 7,5 mm

Foi usinado um chanfro de 7,5 mm de profundidade na estrutura. O chanfro, que foi usinado utilizando uma plaina, tem a geometria mostrada esquematicamente na Fig. 4.4. A estrutura com o chanfro teve sua massa medida, sendo esta igual a 6,789 kg, apresentando uma redução de 154 g em relação à estrutura soldada anterior sem reforço.

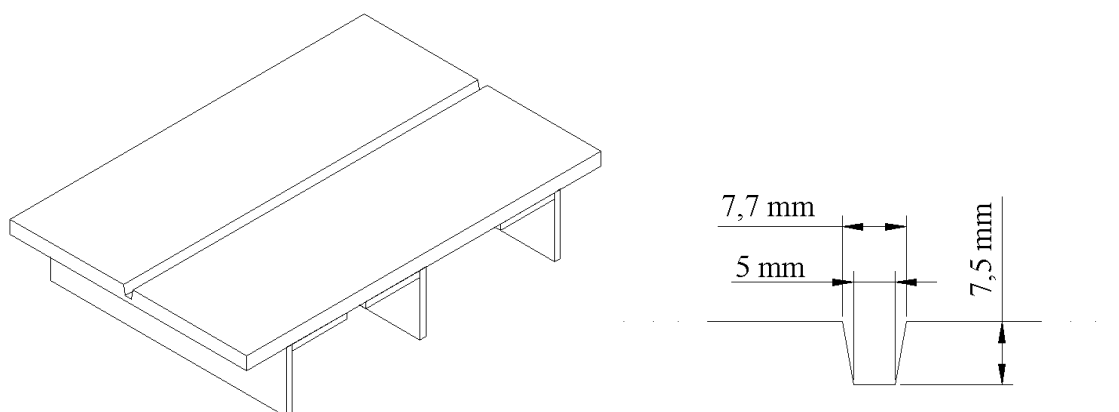


Figura 4.4. Desenho esquemático do chanfro de 7,5 mm.

4.2.7. Soldagem do Chanfro de 7,5 mm

Desta vez, a soldagem foi realizada em cinco passes, utilizando, em cada passe, os mesmos parâmetros utilizados nas soldagens anteriores, com exceção da velocidade de soldagem, que foi de 9,0 mm/s (54 cm/min). Novamente, “orelhas” foram fixadas nas extremidades da placa para início e término do processo de soldagem.

Verificou-se, a partir do testemunho (“orelha”) devidamente lixado, que houve penetração suficiente na soldagem realizada. A massa da estrutura foi medida antes e após a retirada do reforço: 6,949 kg e 6,940 kg, respectivamente. Realizou-se a avaliação da integridade

estrutural da peça utilizando-se o ultra-som. Não foi verificada nenhuma falha no cordão de solda.

4.2.8. Resultados e Discussão

Inicialmente, foi realizada uma avaliação da 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 de 3 mm (16 g mais leve), a qual está, em princípio, livre de tensões residuais. A Figura 4.5 mostra as FRFs para as duas situações, onde se pode notar uma tendência de redução das frequências naturais (média de 1,1 % de redução). Sendo assim, conclui-se que a perda de rigidez da estrutura devida à confecção do chanfro foi mais significativa do que a perda de massa, uma vez que esta última teria tendência a aumentar os valores das frequências naturais.

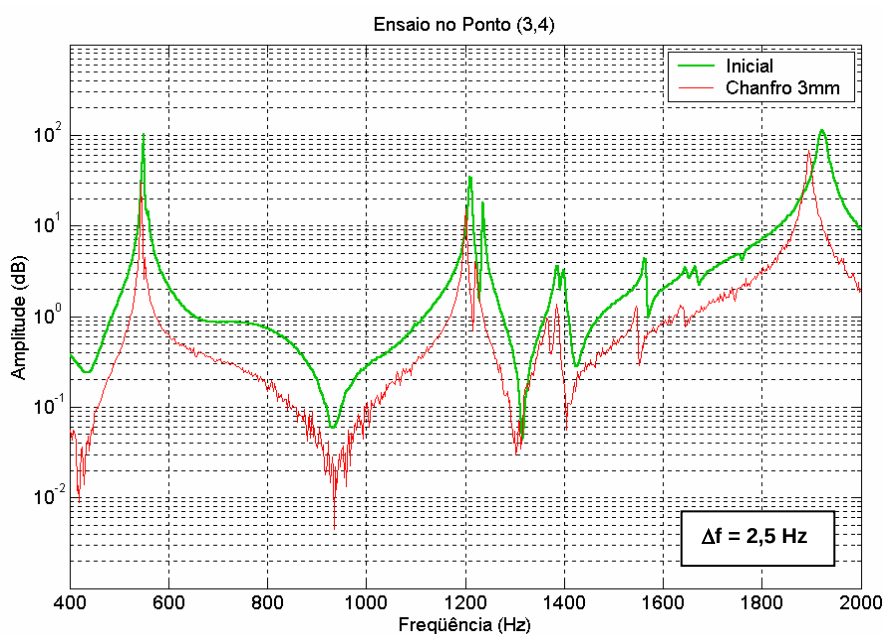


Figura 4.5. Comparação entre FRFs da placa no seu estado inicial e com chanfro de 3 mm.

Na Figura 4.6, após preenchimento do chanfro de 3 mm por soldagem, pode-se verificar 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 causado pela deposição do material. No entanto, as frequências naturais não retornaram aos seus valores no estado inicial. Considera-se, então, que esta parcela de alteração se deve às tensões residuais inseridas durante o processo de soldagem. Uma redução nos valores de frequência em relação ao estado inicial

era esperada devido ao fato de as tensões residuais de compressão exercerem maior influência do que as de tração, conforme verificado na literatura (Vieira, 2003).

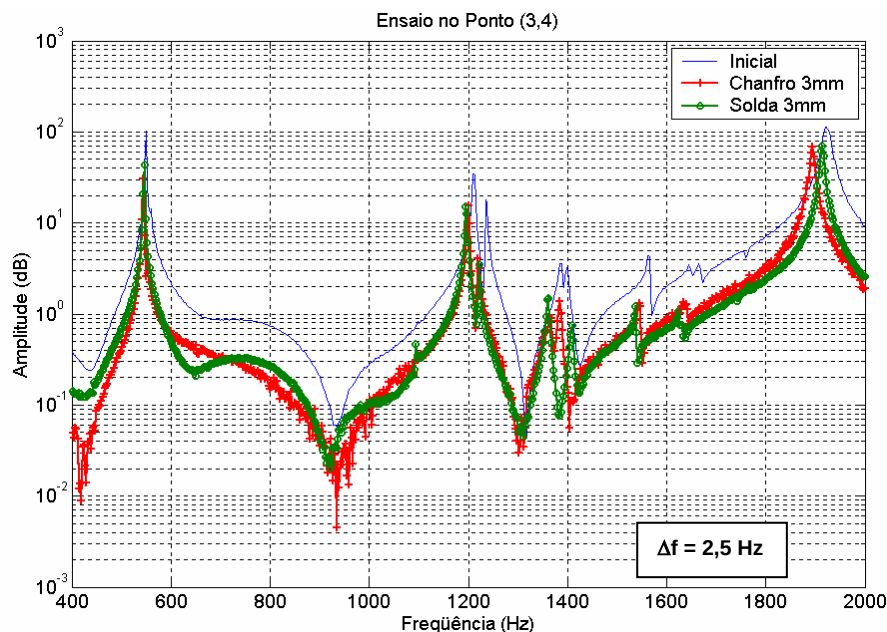


Figura 4.6. FRFs da placa no seu estado inicial, com chanfro de 3 mm e solda de 3 mm.

Para o chanfro e solda de 6 mm (Fig. 4.7a), observou-se comportamento semelhante, com exceção das frequências mais altas (acima de 1300 Hz), para as quais os picos de ressonância para a placa com o chanfro aberto tiveram uma tendência de ascensão em relação ao estado inicial. Provavelmente, para estes modos, a perda de massa foi mais significativa que a perda de rigidez ou houve uma influência das tensões residuais inseridas na primeira soldagem. No entanto, após a soldagem, todos as frequências naturais ficaram abaixo da referência inicial (após soldagem do chanfro de 3 mm). Mas as variações continuaram pequenas (inferiores a 1,5 %).

Com relação à placa com o chanfro de 7,5 mm aberto (Fig. 4.7b), ocorreu o mesmo descrito para o chanfro de 6 mm, só que em maior intensidade (máximo de 2,2 %). Já após a soldagem de cinco passes, os picos de ressonância tiveram uma tendência de aumento (máximo de 2,9 %) em relação ao estado de referência (após solda de 6 mm) e à placa com chanfro de 7,5 mm. É muito provável que as tensões residuais geradas em um determinado passe tenham sido aliviadas pelo passe subsequente, restando apenas as tensões do último passe.

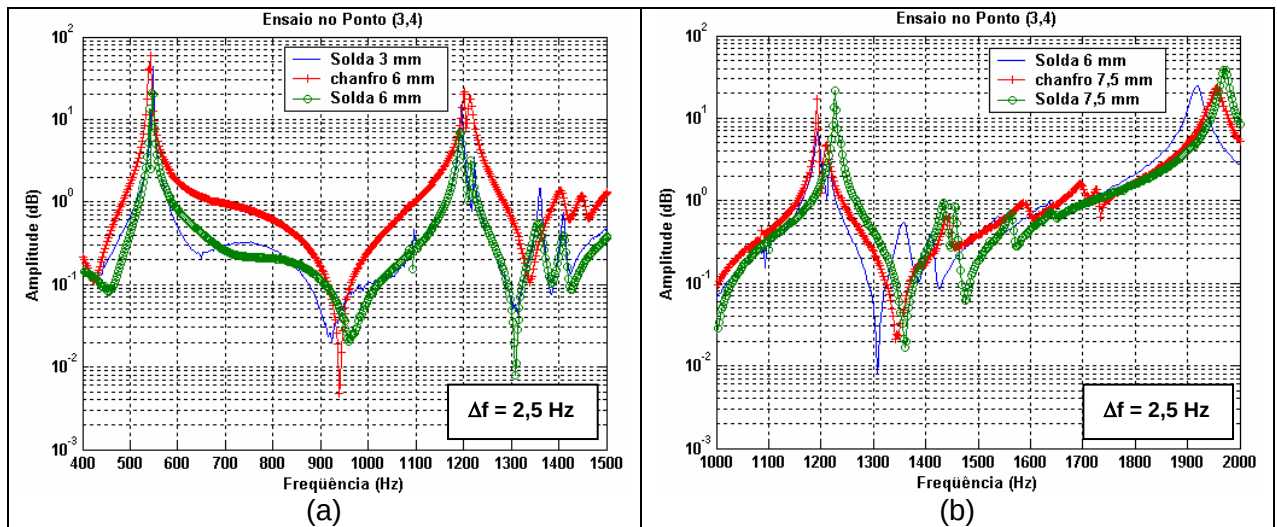


Figura 4.7. FRFs da placa para os chanfros de 6 mm (a) e 7,5 mm (b) e respectivas soldas.

Em todos os casos, observou-se claramente que a influência das tensões residuais de soldagem sobre o valor das frequências naturais de vibração foi pequena. Além disso, verificou-se a dificuldade em quantificar o efeito de cada fator (variação de massa e tensões residuais) sobre as frequências naturais de vibração. Sendo assim, concluiu-se que, para este estudo, seria melhor trabalhar sem a deposição de material. Um processo de soldagem que satisfaz esta condição é o TIG. Nos testes subsequentes, este processo é utilizado.

4.3. Tubo de 200 mm de Comprimento

Nesta etapa, foi utilizado um tubo de aço carbono AISI 1020 com as seguintes dimensões médias: 139 mm de diâmetro externo; 128,8 mm de diâmetro interno (5,1 mm de espessura); e comprimento de 200 mm. Foram confeccionados três furos de 5 mm de diâmetro, posicionados a 10 mm de uma extremidade do tubo, com a finalidade de fixação no dispositivo de soldagem circunferencial de tubos, mostrado na Fig. 4.8. A soldagem foi feita pelo processo TIG.

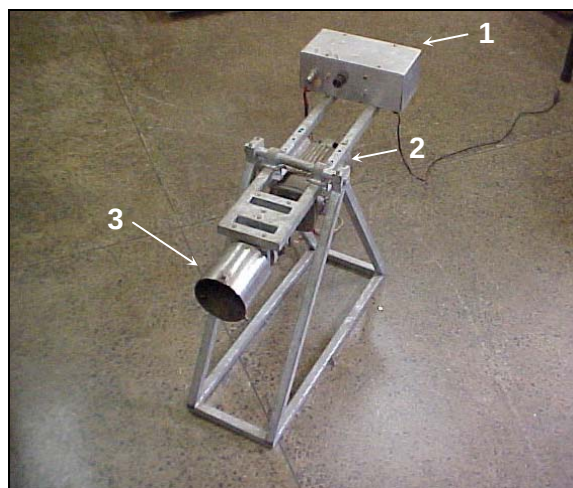


Figura 4.8. Dispositivo de soldagem circunferencial de tubos: 1 – controlador de velocidade; 2 – motor elétrico de indução; 3 – suporte para fixação do tubo.

Uma soldagem circunferencial foi realizada na posição correspondente à metade do comprimento do tubo. Um dispositivo para controle da voltagem AVC (*automatic voltage control*) foi acoplado ao sistema com o objetivo de manter o comprimento do arco (ou a distância eletrodo peça) constante, independente de algum desvio radial durante a fixação do tubo. Os parâmetros de soldagem ajustados foram:

- velocidade tangencial de soldagem: $V_s = 18 \text{ mm/s} = 108 \text{ cm/min}$;
- tensão: $U = 17 \text{ V}$ (controlado pelo AVC);
- corrente: $i = 300 \text{ A}$;
- eletrodo de tungstênio torinado de 3,2 mm de diâmetro com ângulo de ponta de 30° ;
- gás argônio: vazão = 15 L/min.

A Figura 4.9 mostra o tubo após a soldagem. O cordão de solda apresentou muitas falhas causadas pelo fato de a velocidade de soldagem ter sido muito alta. Isto ocorreu porque o dispositivo de soldagem circunferencial de tubo não possui um controle adequado de velocidade, possibilitando apenas uma velocidade angular mínima em torno de 2,5 rpm.

A obtenção das FRFs do tubo seguiu o mesmo procedimento descrito na Seção 4.2 para a placa enrijecida, sendo, portanto, o tubo testado na condição totalmente livre. A Figura 4.10 mostra os pontos utilizados para obtenção das respostas vibratórias do tubo.

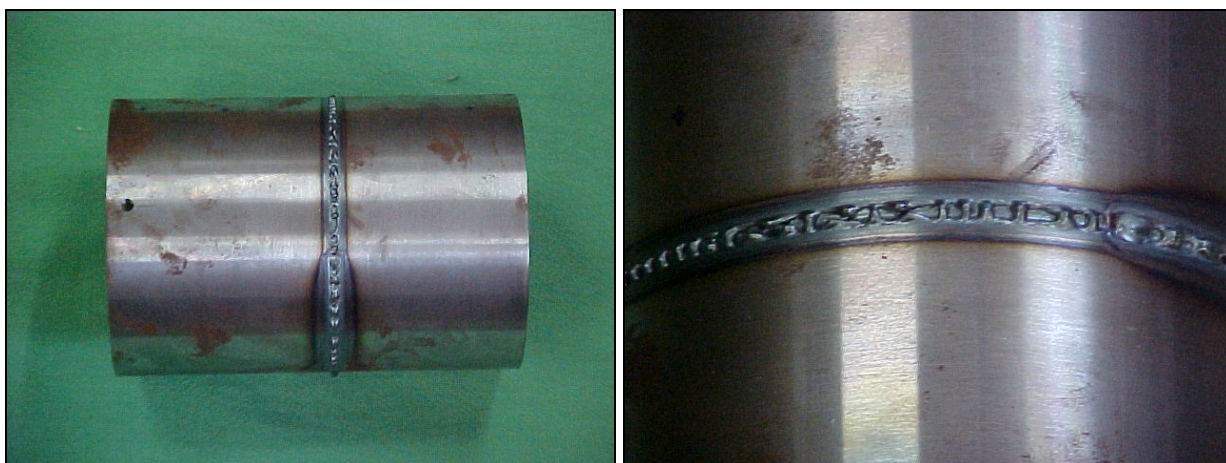


Figura 4.9. Foto do tubo de 200 mm (de aço carbono) após a soldagem.

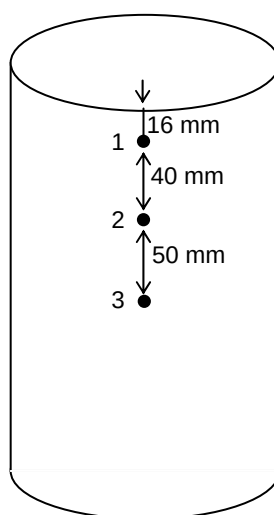


Figura. 4.10. Posição dos pontos de medição das FRFs.

Os resultados dos ensaios dinâmicos estão mostrados na Fig. 4.11. 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 Fig. 4.12. Fazendo uma analogia com uma placa, estes modos de “respiração” correspondem aos modos longitudinais de vibração da placa, os quais são pouco afetados por tensões em seu plano. 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. Sendo assim, faz-se necessário um tubo que apresente modos de vibração em flexão com frequências mais baixas.

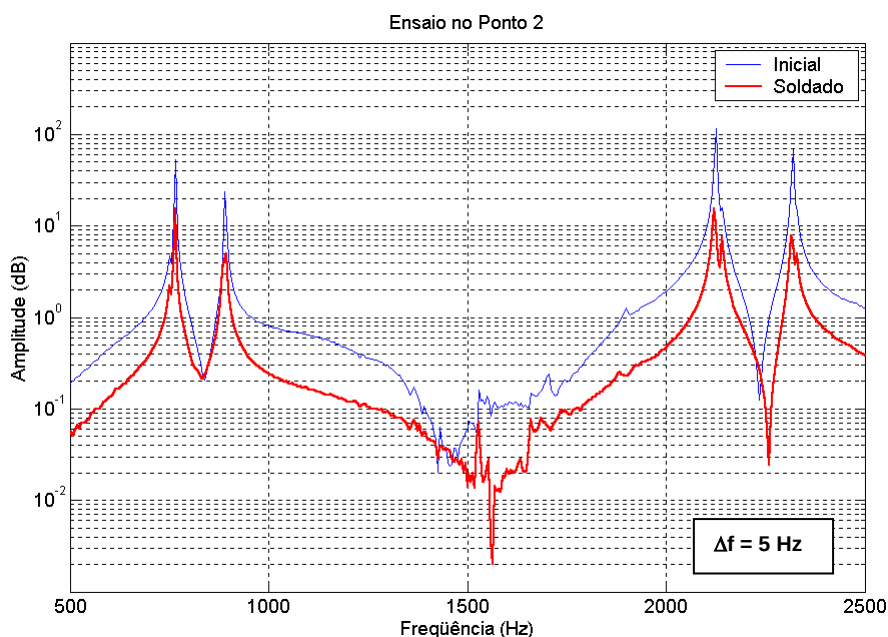


Figura 4.11. FRFs do tubo no estado inicial e soldado.

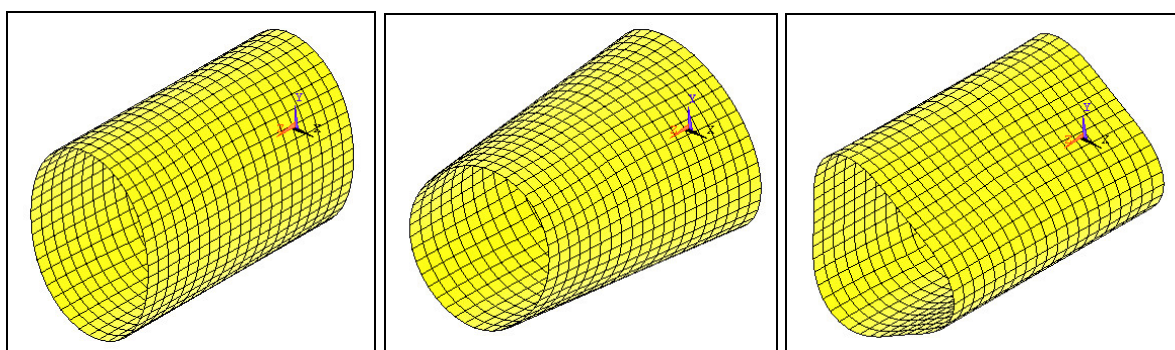


Figura 4.12. Modos de “respiração” do tubo obtido através de simulação numérica.

4.4. Tubo de 400 mm de Comprimento

Um outro tubo foi testado, feito de aço inoxidável austenítico AISI 316L com 155 mm de diâmetro interno, 5 mm de espessura e 400 mm de comprimento (dimensões aproximadas).

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 como sendo de 3676 Hz e 5455 Hz.

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 (regulados):

- velocidade de soldagem: $V_s = 4,67 \text{ mm/s} = 28 \text{ cm/min}$;
- corrente: $i = 300 \text{ A}$;
- gás argônio: vazão = 8 L/min ;
- eletrodo de tungstênio torinado de $3,2 \text{ mm}$ de diâmetro com ângulo de ponta de 30° ;
- distância eletrodo peça: $\text{DEP} = 3 \text{ mm}$.

A tensão monitorada para estes parâmetros foi de $16,3 \text{ V}$.

Três cordões de solda foram feitos. O segundo cordão foi feito a 90° do primeiro e o terceiro entre os dois primeiros, a 45° de cada (Figura 4.13a). Constatou-se que houve penetração total da solda pela observação do arco na parte interna do tubo durante a soldagem (Fig. 4.13b) e pelo aspecto da raiz após a soldagem (inspeção visual). Após cada uma das três soldagens, o tubo foi caracterizado por meio das respostas vibratórias (obtenção de FRFs).

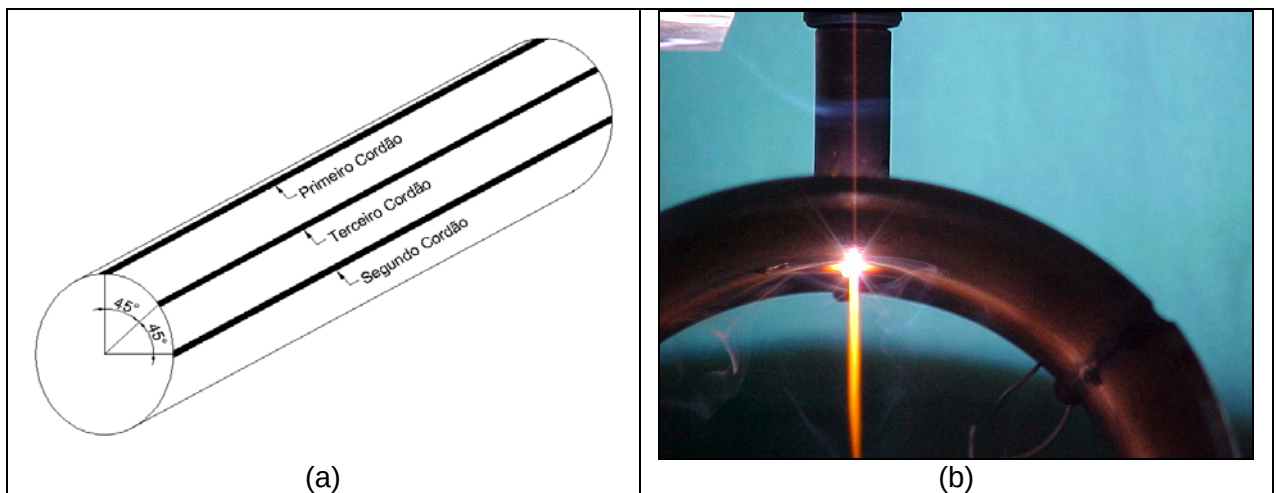


Figura 4.13. Disposição dos cordões de solda (a) e foto do tubo de 400 mm de comprimento durante a soldagem (b).

A obtenção das FRFs seguiu o mesmo procedimento empregado nos testes descritos na seção anterior. A Figura 4.14 mostra os pontos utilizados para obtenção das respostas vibratórias do tubo.

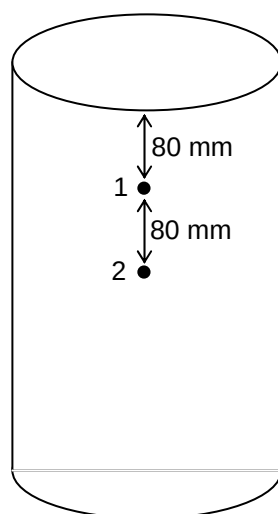


Figura. 4.14. Posição dos pontos de medição das FRFs.

A Figura 4.15 mostra as FRFs obtidas para o estado inicial do tubo e após a primeira solda, numa banda de frequência de 400 a 1400 Hz. Nota-se uma leve tendência de elevação das frequências dos modos de respiração.

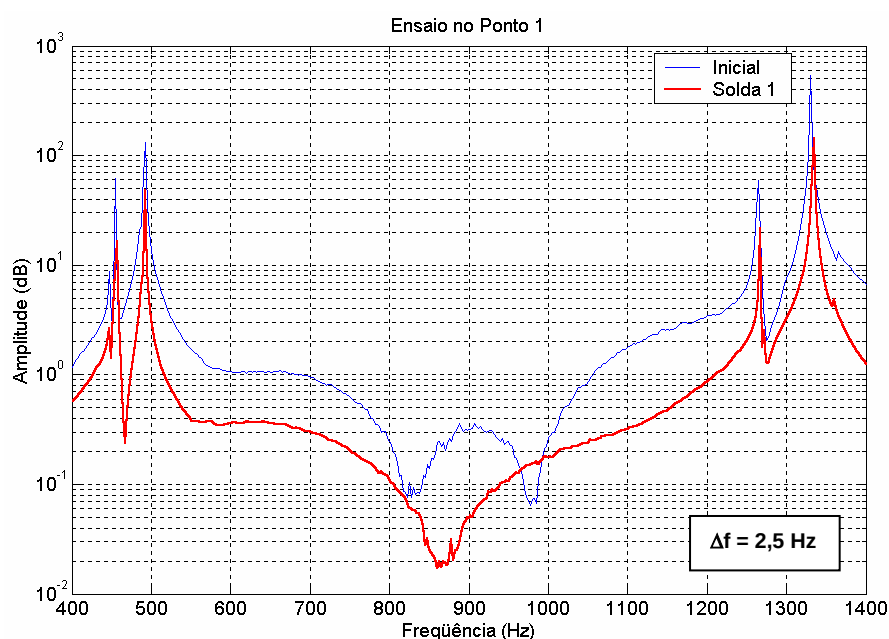


Figura 4.15. FRFs do tubo de 400 mm no estado inicial e após primeira solda.

Já a Fig. 4.16 mostra as FRFs para o estado inicial e após cada uma das três soldas, na faixa de frequência de 3400 a 4000 Hz. Note-se que, baseado no modelo de elementos finitos, muito provavelmente o pico de ressonância em torno de 3500 Hz é referente ao primeiro modo de flexão. Para este pico, a frequência cai após a primeira solda (queda de 15 Hz em relação ao estado inicial) e após a realização do segundo cordão cai um pouco mais (30 Hz em relação

ao estado inicial). No entanto, após a terceira solda, a frequência deste pico sobe em 10 Hz, levando a crer que este passe pode ter provocado um alívio de tensão. 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).

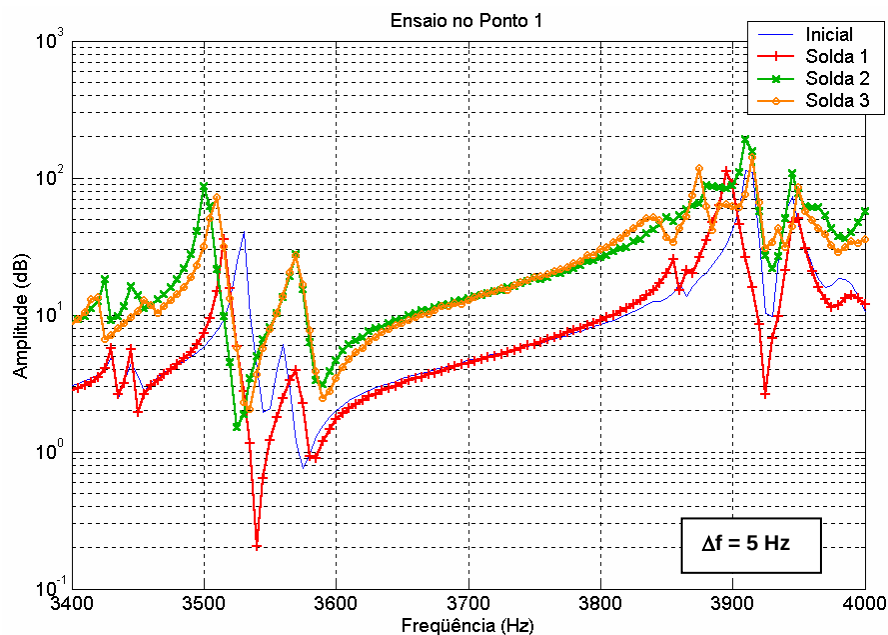


Figura 4.16. FRFs do tubo de 400 mm no estado inicial e após cada uma das três soldas.

Após a análise dos resultados obtidos neste caso, conclui-se que ainda existe a necessidade de reduzir ainda mais as frequências dos modos de flexão do tubo, a fim de uma melhor caracterização do efeito de enrijecimento por tensões residuais de soldagem. Isto porque, quanto menores forem os valores destas frequências, mais modos de flexão aparecerão numa banda de frequência mais baixa, possibilitando uma análise com resolução em frequência melhor.

4.5. Tubo de 800 mm de Comprimento

Foi utilizado um tubo de 797 mm de comprimento, feito de aço carbono AISI 1020, com 128 mm diâmetro interno e 5,2 mm de espessura (dimensões aproximadas).

Um modelo de elementos finitos foi gerado com o intuito de verificar os modos e frequências naturais de vibração. Constatou-se que existiam seis modos de “respiração” antes do primeiro modo de flexão (~ 1140 Hz). Assim, como uma forma de aumentar as frequências dos modos de “respiração”, foram soldadas duas barras (132 × 25,4 × 7,7 mm) nas duas extremidades do tubo. Ao serem soldadas, as barras não ficaram na mesma direção,

apresentando um ângulo de aproximadamente 5° de uma em relação à outra, conforme mostrado na Fig. 4.17. Um novo modelo de elementos finitos foi desenvolvido acrescentando as duas barras. Verificou-se que o primeiro modo de flexão (~ 1082 Hz) aparecia após quatro modos de “respiração”, tendo, portanto, dois modos de “respiração” a menos (antes do modo de flexão) em relação ao caso sem as barras.

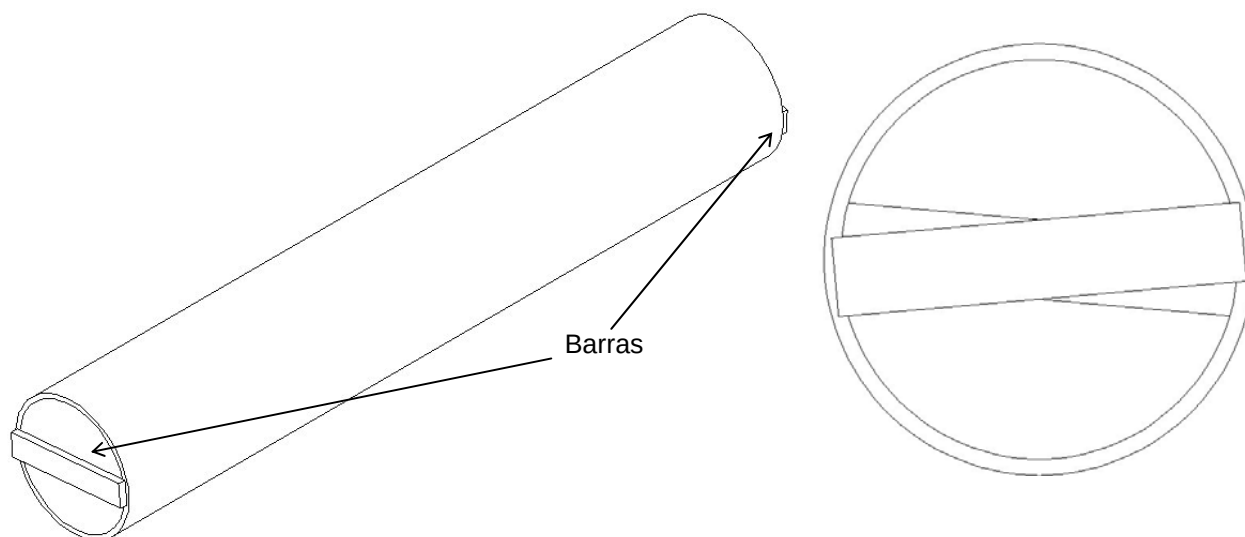


Figura 4.17. Montagem das barras no tubo de 800 mm.

Os cinco primeiros modos de vibração, obtidos numericamente na análise modal realizada através do modelo de elementos finitos, estão apresentados na Fig. 4.18.

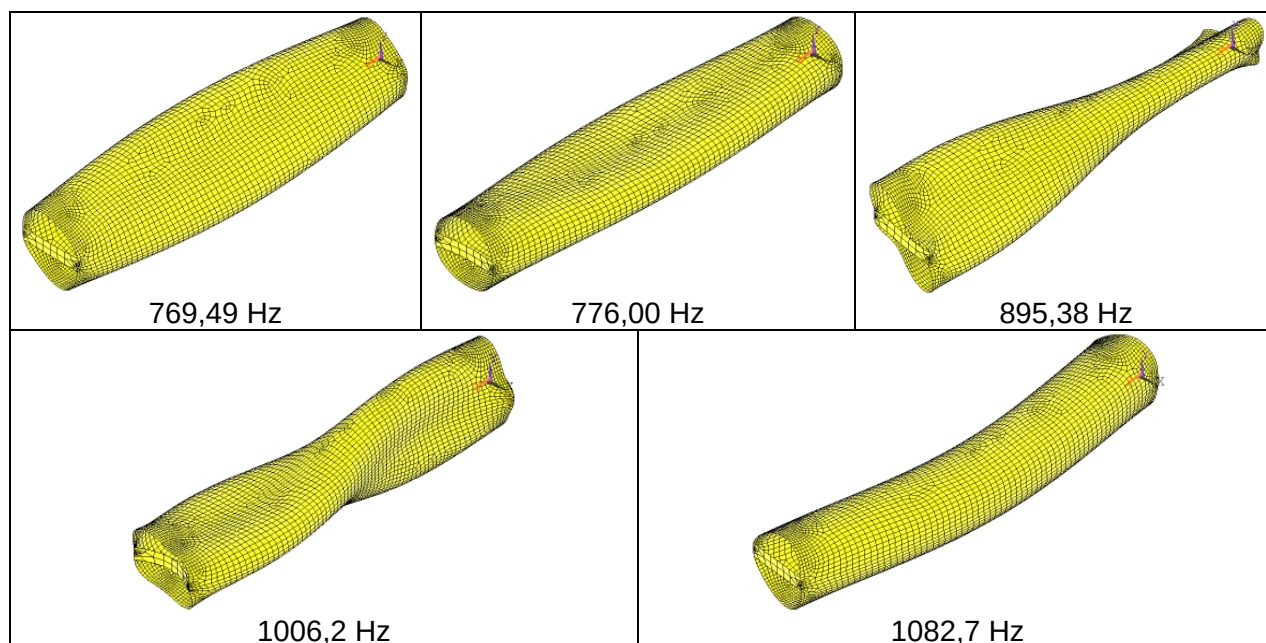


Figura 4.18. Cinco primeiros modos de vibrar obtidos numericamente.

O cordão de solda foi feito na direção longitudinal do tubo. O processo de soldagem TIG foi utilizado com os seguintes parâmetros:

- velocidade de soldagem: $V_s = 3,83 \text{ mm/s} = 23 \text{ cm/min}$;
- corrente: $i = 300 \text{ A}$;
- gás argônio: vazão = 8 L/min ;
- eletrodo de tungstênio torinado de $3,2 \text{ mm}$ de diâmetro com ângulo de ponta de 30° ;
- distância eletrodo peça: $\text{DEP} = 3 \text{ mm}$.

A tensão monitorada para estes parâmetros foi de 16 V .

A obtenção das FRFs seguiu o mesmo procedimento realizado nos dois tubos anteriores. A Figura 4.19 mostra os pontos utilizados para obtenção das respostas vibratórias.

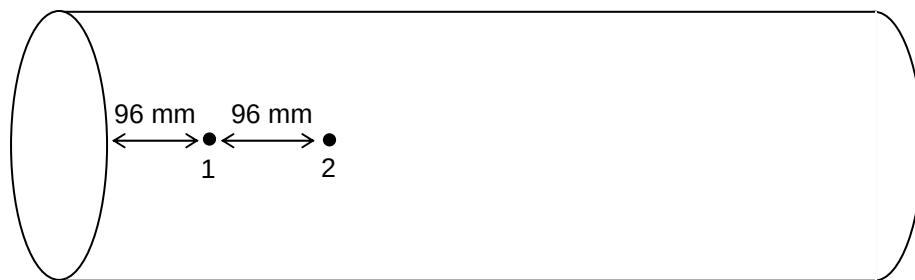


Figura 4.19. Posição dos pontos de medição das FRFs.

A Figura 4.20 ilustra as FRFs obtidas para o estado inicial e após a soldagem, numa banda de 700 a 1100 Hz (cinco primeiros modos). Analisando este resultado e fazendo uso dos resultados obtidos numericamente, verifica-se que os dois primeiros modos, os quais são de “respiração”, não sofreram alterações significativas. No entanto, o terceiro e quarto modos, os quais, segundo o modelo de elementos finitos, são de “respiração”, sofreram alterações consideráveis ($\sim 2 \%$). Desta forma, considerando-se que o modelo gerado está coerente, é possível que alguns modos de “respiração” sejam sensíveis ao enrijecimento por tensões residuais de soldagem. Já o quinto modo, considerado o primeiro de flexão, também sofreu uma variação perceptível ($\sim 1,5 \%$).

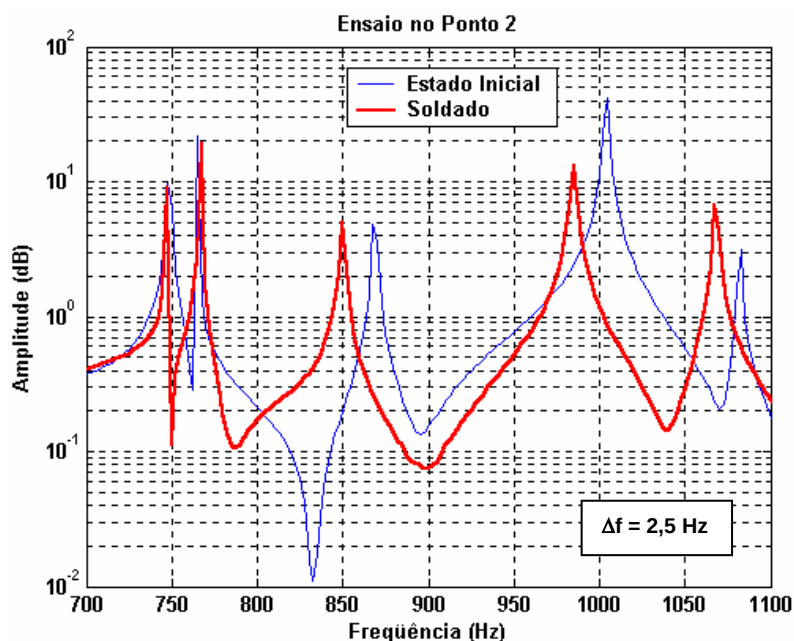


Figura 4.20. FRFs do tubo de 800 mm de comprimento no estado inicial e após soldagem.

Em valores absolutos, as variações ficaram em torno de 15 a 20 Hz, mantendo-se bem parecidas com as observadas no teste anterior com o tubo de 400 mm. Conclui-se, então, que as alterações das frequências naturais de vibração em valores absolutos são próximas. Tornou-se necessário verificar se estas variações são sensíveis a modificações na energia de soldagem e, conseqüentemente, nas tensões residuais. Isto será avaliado nas seções subseqüentes.

4.6. Tubos Espessos de 400 mm de Comprimento

A fim de avaliar a sensibilidade do enrijecimento por tensão à energia de soldagem, dois novos tubos de aço inoxidável austenítico AISI 316L foram testados.

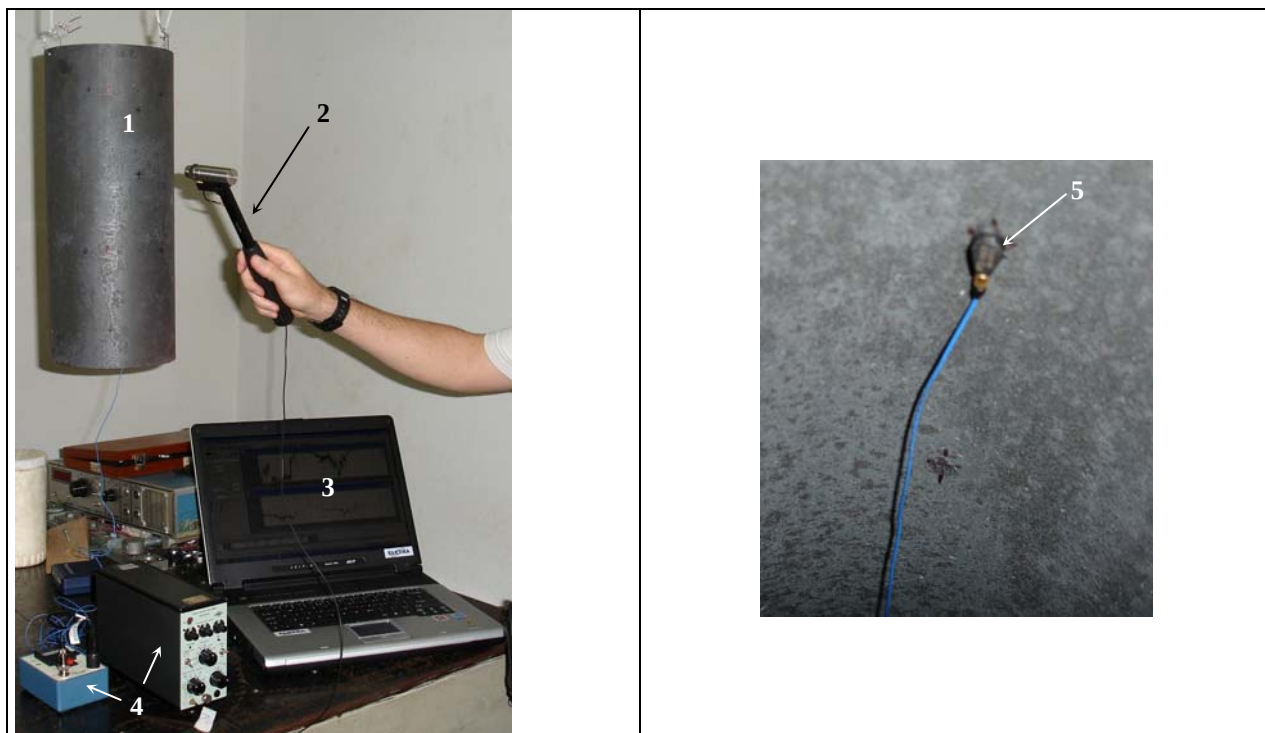
As dimensões médias destes dois tubos estão mostradas na Tab. 4.1. Observe que a espessura destes tubos é diferente da do tubo de 400 mm de comprimento da seção 4.4. Os dois tubos passaram por um tratamento de recozimento a 1050°C para alívio de tensões.

Tabela 4.1. Dimensões dos tubos de aço inoxidável austenítico AISI 316L.

	Comprimento (mm)	Diâmetro interno (mm)	Espessura (mm)
Tubo 01	398,6	154,3	7,1
Tubo 02	403,1	154,5	7,1

Para a obtenção das FRFs foi utilizado um microcomputador equipado com um analisador dinâmico de dois canais SignalCalc ACE da Data Physics Corporation, de 1600

linhas de resolução, e um acelerômetro da PCB Piezotronics modelo 352C22 com amplificador de sinal da PCB Piezotronics modelo 480C02. O martelo de impacto e seu amplificador de sinal foram os mesmos utilizados nos ensaios anteriores. A montagem experimental está ilustrada na Fig. 4.21. A Figura 4.22 ilustra os pontos do tubo utilizados para os ensaios dinâmicos.



1 – Tubo; 2 – Martelo de impacto; 3 – Microcomputador com analisador dinâmico;
4 – Amplificadores de sinal; 5 – Acelerômetro piezoelétrico.

Figura 4.21 – Montagem experimental para os testes dinâmicos nos tubos espessos.

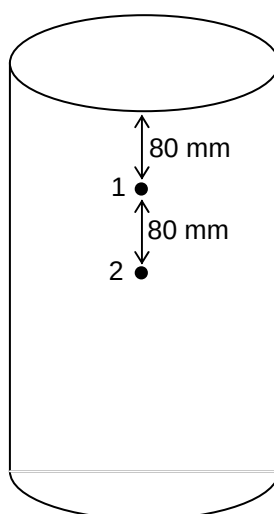


Figura 4.22. Pontos utilizados para obtenção das FRFs para os dois tubos.

A Figura 4.23 mostra as FRFs obtidas para o estado inicial dos dois tubos. Verifica-se que estas FRFs não são tão semelhantes quanto se esperava. Observe-se inicialmente que os modos de vibração nas frequências de aproximadamente 690 Hz, 730 Hz e 1920 Hz apresentaram dois picos para o *Tubo 01* e apenas um pico para o *Tubo 02*. Os picos duplos denotam a existência de duas frequências naturais múltiplas, que ocorrem tipicamente no caso de estruturas simétricas. Além disso, dois outros modos, em torno de 1800 Hz e 2300 Hz, apresentaram diferenças claramente visíveis (de aproximadamente 2,3 % e 0,6 % respectivamente). Todas estas disparidades devem ser devidas a diferentes distorções iniciais causadas por diferentes motivos, desde o processo de fabricação até a forma de empilhamento para transporte, além da pequena diferença no comprimento dos dois tubos.

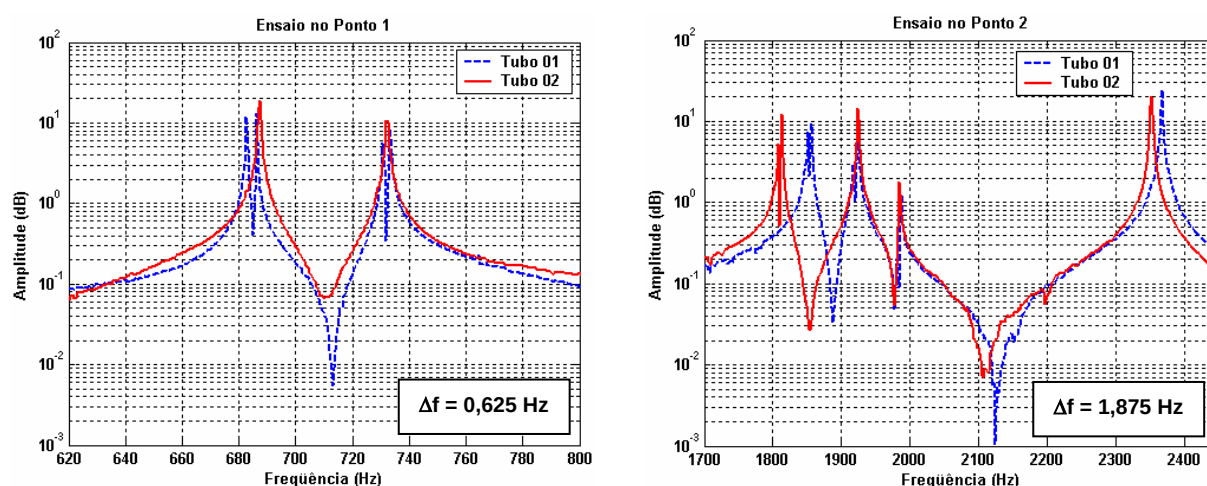


Figura 4.23. FRFs obtidas para o estado inicial de cada tubo.

Os dois tubos foram soldados com o processo TIG em corrente contínua. O cordão de solda foi realizado na direção longitudinal do tubo, iniciando e terminando a 10 mm das respectivas bordas. Usou-se um eletrodo de tungstênio torinado de 3,2 mm de diâmetro, distância eletrodo-peça (DEP) de 3 mm e gás de proteção (argônio) a 14 L/min. Os parâmetros de soldagem para os tubos estão mostrados na Tab. 4.2.

Tabela 4.2. Parâmetros de soldagem ajustados e monitorados para cada tubo.

	Tubo 01	Tubo 02
Velocidade de soldagem (cm/min)	28	20
Corrente ajustada (A)	300	300
Corrente monitorada (A)	296	298
Tensão monitorada (V)	17,8	17,4
Energia total (J/mm)	1129	1556

A Figura 4.24 apresenta as FRFs obtidas para os dois tubos no estado inicial e após a soldagem. A Tabela 4.3 mostra os valores das frequências naturais de vibração dos oito primeiros modos para os estados inicial e soldado, além da variação percentual.

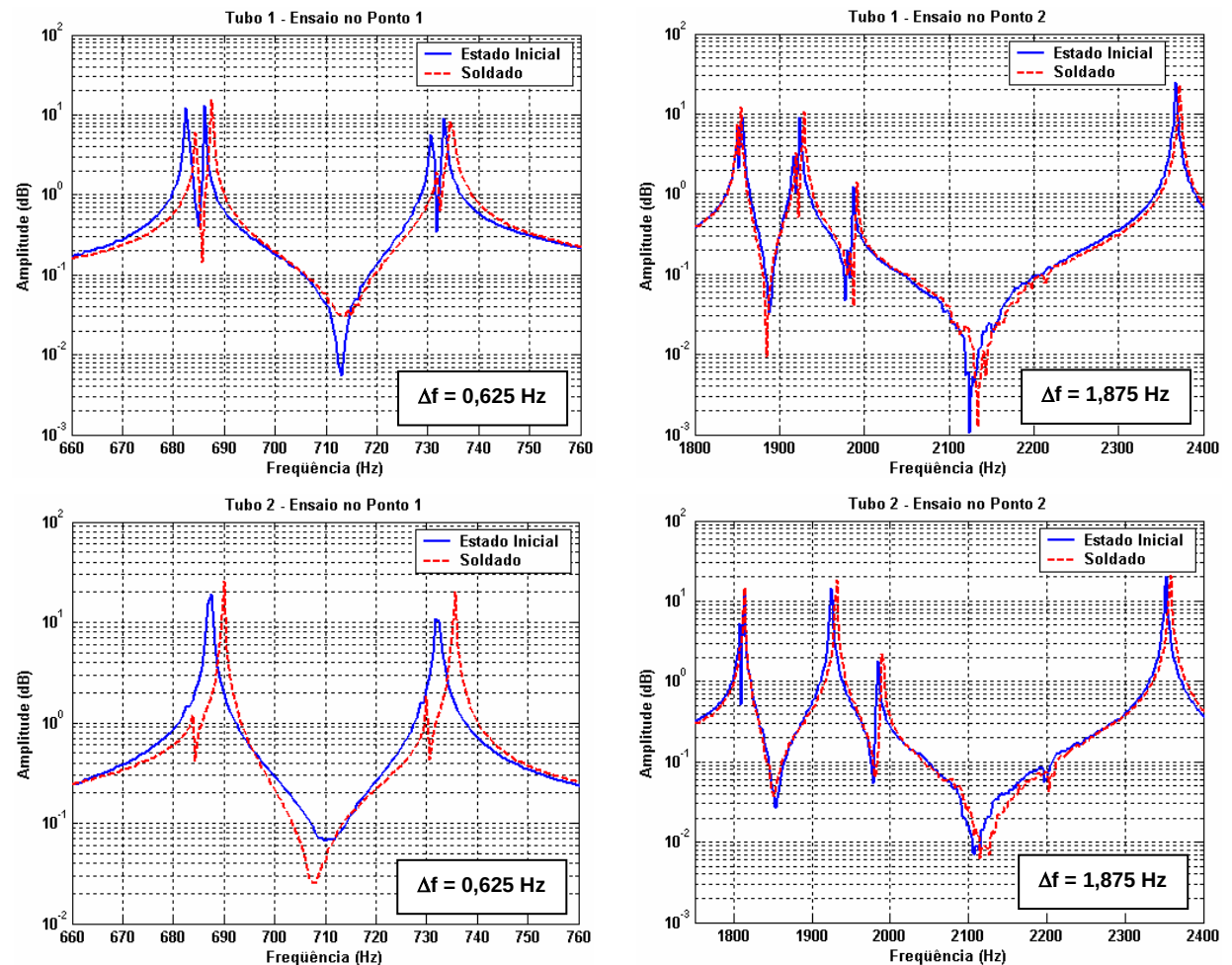


Figura 4.24. FRFs dos dois tubos antes e após a soldagem.

Tabela 4.3. Frequências naturais para os tubos nas condições inicial e soldada.

Modo	Tubo 01			Tubo 02		
	Inicial	Soldada	%	Inicial	Soldada	%
1	682.50	684.38	0.27	682.50	683.75	0.18
2	686.25	687.50	0.18	687.50	690.00	0.36
3	730.63	731.88	0.17	728.75	730.00	0.17
4	733.13	734.38	0.17	731.88	735.63	0.51
5	1850.00	1850.00	0.00	1807.50	1808.75	0.07
6	1855.00	1855.00	0.00	1812.50	1813.75	0.07
7	1917.50	1920.00	0.13	1925.00	1931.25	0.32
8	1923.75	1928.75	0.26	-	-	-

Neste caso, ao contrário do que ocorreu com o tubo de 800 mm de comprimento, houve uma tendência de elevação dos valores das frequências naturais após a soldagem, o que

significa que o tubo se torna mais rígido à flexão. Isto mostra que existe um predomínio do efeito das tensões trativas sobre esses modos de vibrar. Além disso, é possível constatar que a intensidade das alterações das frequências varia de um modo para o outro.

Analisando os resultados, acredita-se que um aumento na energia de soldagem pode levar a um aumento na magnitude da variação das frequências. Para avaliar melhor esta relação, tornou-se interessante utilizar uma estrutura mais sensível ao efeito do enrijecimento por tensão residual de soldagem (placa, por exemplo), como está abordado na seção seguinte.

4.7. Placas de Alumínio

Três placas de alumínio AA 5052-O foram confeccionadas de tal forma que as dimensões eram nominalmente idênticas: 370 mm de comprimento, 264 mm de largura e 6,35 mm de espessura. As três placas passaram por um tratamento térmico de recozimento a 343°C para alívio de tensões (obtido em www.matweb.com em agosto de 2005).

Segundo Ugural (1981), uma placa pode ser considerada fina quando a relação entre a espessura e a outra menor dimensão for inferior a 1/20. Para as placas ensaiadas, esta relação é de aproximadamente 1/41, de tal forma que são consideradas finas. Assim, segundo evidências expostas na literatura (Vieira Jr, 2003; Kaldas e Dickinson, 1981-b), espera-se que as frequências naturais de vibração destas placas tenham grande sensibilidade ao enrijecimento por tensões residuais de soldagem.

A obtenção das FRFs seguiu procedimento similar ao dos tubos espessos de 400 mm de comprimento, utilizando os mesmos equipamentos e aparato experimental. A Figura 4.25 ilustra os pontos da placa utilizados para os ensaios dinâmicos.

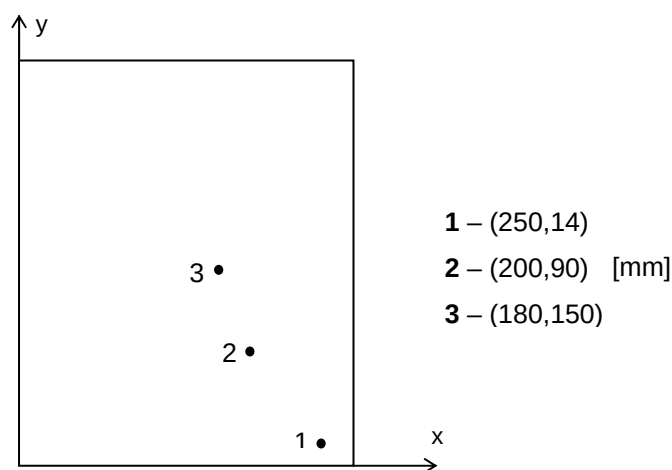


Figura 4.25. Pontos utilizados para obtenção das FRFs para placas de alumínio.

A fim de avaliar a repetibilidade em relação às dimensões e à uniformidade das placas, as FRFs obtidas para o estado inicial de cada placa estão plotadas na Fig. 4.26. Verifica-se que, apesar da pequena alteração apresentada pela *Placa 02*, houve uma boa repetibilidade entre os resultados, confirmando uma boa semelhança entre as placas.

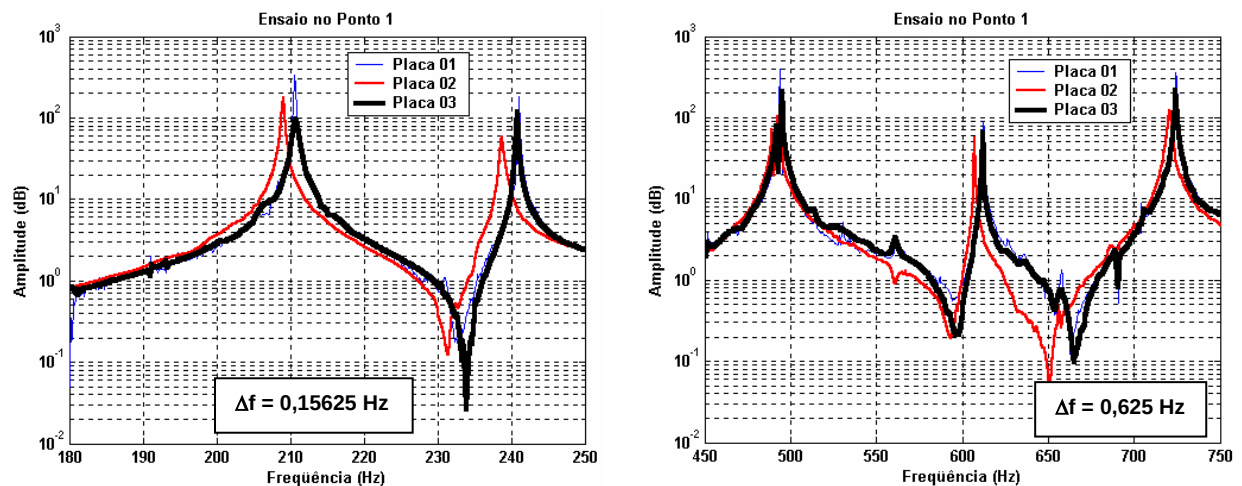


Figura 4.26. FRFs obtidas para as placas no estado inicial.

As três placas foram soldadas com o processo TIG em corrente alternada. Apenas um cordão de solda foi realizado em cada placa, o qual foi feito na direção longitudinal no centro da placa, iniciando e terminando a 20 mm de cada borda.

A soldagem das placas foi conduzida utilizando um eletrodo de tungstênio torinado de 3,2 mm de diâmetro, distância eletrodo-peça (DEP) de 2 mm e gás de proteção (argônio) a 10 L/min. O objetivo era soldar as três placas com os mesmos parâmetros, alterando apenas a velocidade de soldagem e, conseqüentemente, a energia. No entanto, para a soldagem da *Placa 03*, a fonte de soldagem apresentou problemas, não reproduzindo os tempos de pulso e de base ajustados. Os parâmetros de soldagem para as três placas estão mostrados na Tab. 4.4.

Tabela 4.4. Parâmetros de soldagem ajustados e monitorados para cada placa.

	Placa 01	Placa 02	Placa 03
Velocidade de soldagem (cm/min)	20	17	15
Corrente de pulso (A)	200	200	200
Tempo de pulso monitorado (ms)	3	3	4
Corrente de base (A)	-230	-230	-230
Tempo de base monitorado (ms)	22	22	21
Tempo parado¹ (s)	7	10	10
Corrente eficaz monitorada (A)	218	220	209
Tensão eficaz monitorada (V)	12,9	13,6	13,3
Energia de soldagem (J/mm)	844	1056	1112

¹ Tempo que a tocha permaneceu parada com o arco aberto no início da soldagem.

A Figura 4.27 apresenta as FRFs obtidas para as três placas na condição após a soldagem. Para facilitar a visualização das alterações geradas, apenas a FRF obtida para o estado inicial da *Placa 01* foi plotada como referência de estado inicial. A Tabela 4.5 expõe os valores das frequências naturais de vibração referentes aos oito primeiros modos, para os estados inicial e soldado, além da variação percentual.

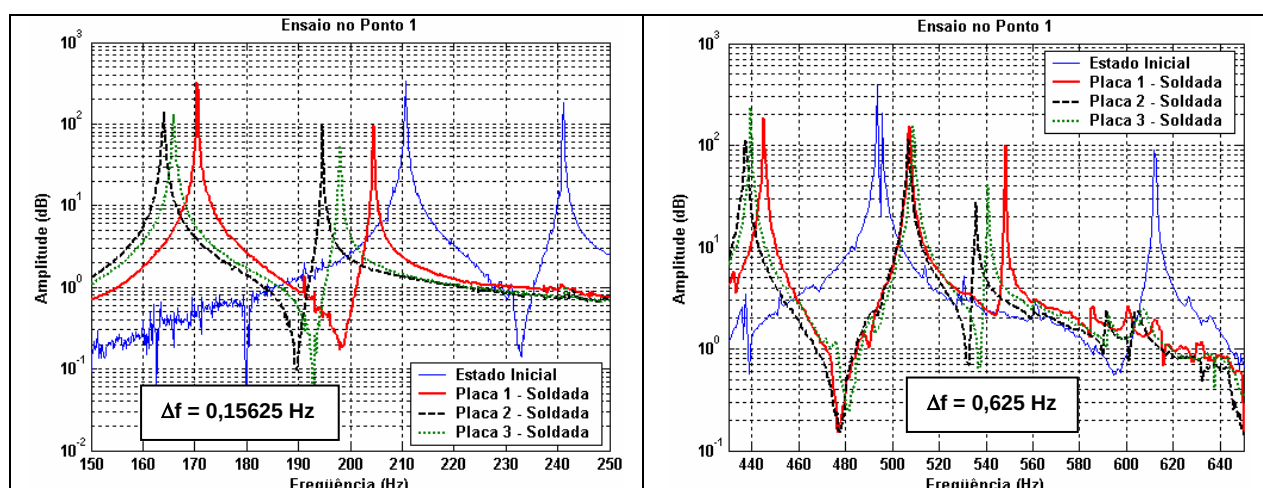


Figura 4.27. FRFs das três placas de alumínio após a soldagem.

Tabela 4.5. Frequências naturais para as três placas nas condições inicial e soldada.

Modo	Placa 01			Placa 02			Placa 03		
	Inicial	Soldada	%	Inicial	Soldada	%	Inicial	Soldada	%
1	210.63	170.47	-19.07	209.06	164.06	-21.52	210.78	165.94	-21.27
2	241.09	204.53	-15.17	238.75	194.69	-18.46	240.94	197.97	-17.83
3	493.75	445.00	-9.87	489.38	437.50	-10.60	491.88	439.38	-10.67
4	495.63	507.50	2.40	492.50	506.88	2.92	495.00	508.75	2.78
5	611.88	548.13	-10.42	607.50	535.63	-11.83	611.88	540.63	-11.64
6	724.38	755.63	4.31	720.63	755.00	4.77	724.38	758.13	4.66
7	931.25	878.13	-5.70	924.36	865.63	-6.35	930.63	871.88	-6.31
8	1023.75	1005.00	-1.83	1017.50	1000.00	-1.72	1021.25	1001.25	-1.96

Mais uma vez, pode ser observado que existe uma tendência de redução dos valores das frequências naturais após a soldagem, o que significa que a placa se torna menos rígida em flexão. Isto sugere novamente que há um predomínio de tensões de compressão ao longo da placa, observação que confirma as conclusões de Vieira Jr. (2003). Verifica-se ainda que as variações das frequências para a *Placa 02* foram maiores que para a *Placa 01* (com exceção do oitavo modo, cujas variações foram pequenas), o que levaria a crer que um aumento na energia de soldagem causaria maiores variações, em virtude da maior intensidade das tensões residuais produzidas. No entanto, ao aumentar mais a energia (*Placa 03*), verificou-se que essa tendência não foi mantida, fazendo acreditar que deve existir um limite para a energia de

soldagem, acima do qual as variações das frequências naturais tendem a se reduzir. Entretanto, esta afirmação não é conclusiva, pois houve também um problema com a fonte durante a soldagem da terceira placa, quando a relação tempo de pulso (t_p) e tempo de base (t_b) aumentou. É conhecido que esta relação afeta o calor imposto e, principalmente, a distribuição do calor (como poderá ser constatado na seção 6.2). Acredita-se que uma relação t_p/t_b maior, para uma mesma energia de soldagem, deixa o arco menos concentrado (conforme comunicação verbal do professor Américo Scotti).

Além disso, é possível constatar novamente que a intensidade das alterações das frequências varia de um modo para o outro.

4.8. Considerações Finais

Os resultados aqui obtidos confirmam a influência das tensões residuais de soldagem sobre o comportamento dinâmico de componentes. Verificou-se ainda que a intensidade desta influência depende da estrutura (maior em estruturas delgadas) e da energia de soldagem. Isto comprova que há uma relação entre a energia de soldagem e o enrijecimento por tensões, tornando viável a possibilidade de utilização das variações no comportamento dinâmico para o controle de qualidade de componentes soldados.

Foi observado também que as alterações verificadas variam de um pico de frequência para outro. Isto pode ser explicado pelo fato de cada pico de frequência corresponder a uma forma modal diferente, notadamente para os tubos com os modos de respiração e de flexão (sendo este último mais sensível ao enrijecimento por tensão).

É importante destacar a dificuldade em separar os efeitos das tensões residuais de soldagem de outras influências, como distorções e variação de massa, sobre o comportamento dinâmico de componentes soldados. Assim, notou-se que, para fins de avaliação, é interessante estudar um processo de soldagem sem material de deposição, evitando portanto os efeitos da variação de massa. O texto do capítulo 6 deste trabalho, o qual trata da avaliação numérica do enrijecimento por tensão, ajuda a confirmar as tendências aqui observadas, bem como analisar melhor o efeito das distorções sobre as respostas vibratórias de componentes estruturais.

Por fim, é conveniente ressaltar que, em alguns casos, bandas de frequência baixa (até 5000 Hz) não são suficientes para detectar picos sensíveis ao enrijecimento por tensão (notadamente para o tubo de 200 mm de comprimento). Deste modo, torna-se interessante avaliar se o enrijecimento por tensão é evidente em picos de alta frequência (acima de 10 kHz), utilizando, por exemplo, a técnica da impedância eletro-mecânica. Este tópico está abordado no capítulo 7.

