

CAPÍTULO VII

CARACTERIZAÇÃO EXPERIMENTAL DO ENRIJECIMENTO POR TENSÃO DE COMPONENTES SOLDADOS PELA TÉCNICA DA IMPEDÂNCIA ELETROMECÂNICA

No Capítulo 4, a influência das tensões residuais de soldagem sobre o comportamento dinâmico de componentes soldados foi examinada observando as variações das frequências naturais em bandas de baixa frequência (até 5000 Hz). Contudo, levantou-se a possibilidade de que, em determinados casos, as respostas dinâmicas em faixas de frequência mais altas (acima de 10 kHz) sejam mais influenciadas pelas tensões residuais de soldagem.

Uma técnica experimental capaz de operar nesta faixa de frequências é a técnica da impedância eletromecânica. Esta técnica consiste em instrumentar a estrutura com uma pastilha piezoelétrica colada à sua superfície e monitorar a impedância eletromecânica do conjunto, que é obtida excitando o elemento piezoelétrico com um sinal de voltagem e medindo a resposta vibratória resultante. Conforme será mostrado mais adiante, a impedância eletromecânica é uma propriedade que varia com a frequência, sendo dependente das características de inércia e rigidez da estrutura monitorada. A idéia explorada no estudo descrito neste capítulo é que, sob a presença de tensões residuais induzidas pela soldagem, a alteração resultante de rigidez possa ser relacionada com as variações observadas na impedância eletromecânica do componente soldado.

Atualmente, a técnica da impedância eletromecânica vem sendo largamente utilizada como um método de monitoramento da integridade de componentes estruturais, ou seja, para a identificação de danos estruturais (Raju, 1997; Park *et al.*, 2003; Moura Jr. e Steffen Jr., 2004; Moura Jr., 2004; Park *et al.*, 2005). Um estudo preliminar sobre a possibilidade de relacionar o estado de tensão com a impedância eletromecânica foi realizado por Pereira Jr. (2004).

Neste capítulo, a técnica da impedância eletromecânica é abordada, sendo primeiramente introduzidos os principais conceitos e sua fundamentação. Em seguida, o procedimento experimental adotado é descrito e os resultados são apresentados e discutidos.

7.1. Conceitos de Impedância Mecânica e Elétrica

Segundo Massoud (1985), a relação entre a força harmônica aplicada a um sistema mecânico e a velocidade com que o mesmo se desloca em um determinado ponto é chamada de impedância mecânica. Já a impedância elétrica é definida por Gibilisco (2002) como a oposição que um circuito oferece à passagem de corrente alternada, sendo dividida em duas partes: resistência, R , (parte real) e reatância, X , (parte imaginária). A resistência em circuitos de corrente alternada é a mesma que a equivalente em circuitos de corrente contínua, sendo expressa por um valor positivo, enquanto que a reatância pode ser indutiva (valor positivo) ou capacitiva (valor negativo).

Em um circuito de corrente contínua, a lei de Ohm mostra que a corrente é inversamente proporcional à resistência. Isto é válido também em circuitos de corrente alternada.

A reatância indutiva, assim como a resistência, afeta a corrente em um circuito de corrente alternada. No entanto, esta reatância depende da frequência da corrente alternada, sendo calculada pela expressão (Gibilisco, 2002):

$$X_L = 2\pi f L \quad (7.1)$$

onde f é a frequência da corrente alternada e L é a indutância.

Da mesma forma que a reatância indutiva, a reatância capacitiva também depende da frequência da corrente e é dada por (Gibilisco, 2002):

$$X_C = \frac{1}{2\pi f C} \quad (7.2)$$

onde C é a capacitância. Tanto as reatâncias indutiva e capacitiva como a resistência são dadas em ohms.

Como a resistência é expressa por um valor não-negativo, o plano R - X pode ser representado apenas pelo primeiro (reatância indutiva) e quarto (reatância capacitiva) quadrantes, de tal forma que a impedância elétrica pode ser obtida por (Gibilisco, 2002):

$$Z = R + jX \quad (7.3)$$

A admitância é uma medida que representa a facilidade com que um meio conduz corrente alternada e equivale à condutância no caso de uma corrente contínua. Assim como a impedância, este é um valor complexo (Gibilisco, 2002).

7.2. Técnica da Impedância Eletromecânica

A técnica da impedância utiliza sensores para monitorar modificações na rigidez, no amortecimento e na massa da estrutura (Park e Inman, 2003). Estes sensores são pequenas pastilhas piezoelétricas coladas na superfície da estrutura e utilizadas para medir a resposta dinâmica local.

As pastilhas piezoelétricas possuem uma característica de gerar um campo elétrico quando sujeito a esforços mecânicos, e sofrer uma deformação mecânica quando um campo elétrico é imposto. Assim, o mesmo elemento pode ser utilizado como sensor e atuador, reduzindo o número de componentes (Park *et al*, 2003).

O método utiliza elevadas frequências aplicadas à pastilha de PZT coladas na superfície do componente para avaliação das modificações dos sinais que são capturados pelo sensor. As pastilhas de PZT utilizam uma diferença de potencial muito baixa, menores que 1 V, gerando uma alta frequência de excitação na estrutura (Park *et al*, 2003). Entretanto, de acordo com Raju (1997), o valor de 1 V produz bons resultados para identificação de mudanças estruturais.

A Figura 7.1 ilustra o modelo de um grau de liberdade do acoplamento eletromecânico utilizado pela técnica da impedância. Considera-se que um atuador de PZT seja posicionado em uma das extremidades do sistema, enquanto a outra permanece fixa. Liang *et al* (1994) demonstrou que a admitância $Y(\omega)$ do atuador PZT é uma função combinada da impedância mecânica do atuador PZT $Z_a(\omega)$ e da estrutura $Z(\omega)$, como mostra a Eq. (7.4).

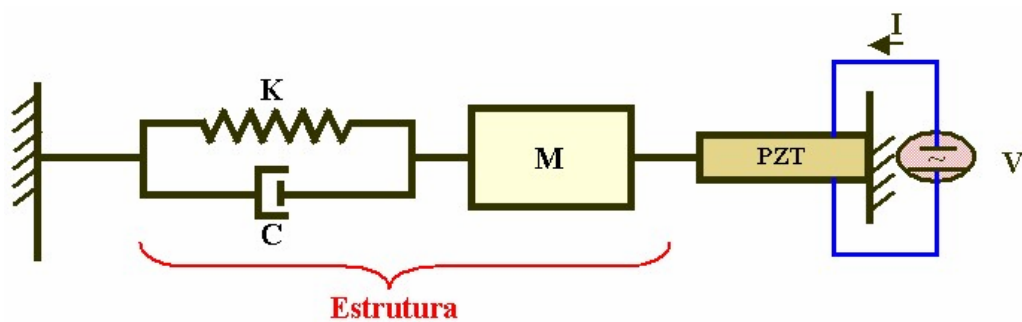


Figura 7.1 - Modelo unidimensional do acoplamento eletromecânico utilizado pelo método baseado em impedância (Moura Jr., 2004).

$$Y(\omega) = \frac{I}{V} = i_c \omega a_g \left(\bar{\varepsilon}_{33}^T - \frac{Z(\omega)}{Z(\omega) + Z_a(\omega)} d_{3x}^2 Y_{xx}^E \right) \quad (7.4)$$

onde ω é a frequência angular ($2\pi f$), V é a voltagem de entrada no atuador PZT, I é a corrente de saída do PZT, a é a constante geométrica, d_{3x} é a constante de acoplamento piezoelétrico, Y_{xx}^E é o módulo de Young, $\bar{\epsilon}_{33}^T$ é a constante dielétrica do PZT com tensão zero e i_c é a amplitude da corrente.

Supondo que as propriedades do PZT não variam durante os testes, a Eq. (7.4) mostra que a impedância elétrica do PZT é diretamente relacionada à impedância mecânica da estrutura, fato que justifica a utilização dos sinais de impedância elétrica do PZT para a avaliação mecânica da estrutura. Devido ao fato da parte imaginária ser mais sensível à variação de temperatura, a parte real do sinal de impedância é normalmente utilizada nas aplicações desta técnica (Raju, 1997).

A impedância eletromecânica pode ser medida experimentalmente com o auxílio de um analisador de impedância. Segundo Raju (1997), o analisador de impedância (impedancímetro) fornece ao PZT uma voltagem alternada constante numa determinada frequência. A magnitude e a fase em regime permanente (após o comportamento transiente) captadas pelo PZT são gravadas e convertidas em impedância real e imaginária. A frequência é então aumentada para o próximo passo e o processo é repetido sobre a faixa de frequência selecionada.

Deste modo, a técnica consiste essencialmente em obter funções de resposta em frequência (FRFs) da estrutura e avaliar as modificações destes sinais. Com relação à identificação de uma banda de frequência adequada a ser utilizada, geralmente é adotado um procedimento de tentativa e erro. Entretanto, existem alguns procedimentos como o proposto por Moura Jr. e Steffen Jr. (2004), o qual é baseado num procedimento estatístico.

7.3. Procedimento Experimental

As três placas de alumínio AA 5052-O, testadas e apresentadas no Capítulo 4, foram utilizadas para os testes com a técnica da impedância eletromecânica. Assim, ensaios de impedância foram realizados em paralelo em cada um dos passos descritos na seção 4.7.

A montagem experimental é semelhante à mostrada na seção 4.7, quando a placa permaneceu na condição livre, suspensa por fios elásticos flexíveis. Entretanto, desta vez utilizou-se o analisador de impedância HP 4194A e, ao invés de martelo de impacto e acelerômetro, utilizou-se apenas uma pastilha piezoelétrica devidamente colada na placa. Um microcomputador Pentium II com uma placa de aquisição de dados GP-IB foi utilizado para capturar e gravar os resultados. A Figura 7.2 ilustra o aparato experimental.

As pastilhas piezoelétricas fabricadas pela PiezoSystems (<http://www.piezo.com>) e metalizadas com níquel, tipo PSI-5A4E, foram cortadas nas dimensões 20 x 20 mm. A

espessura da pastilha para as placas 01 e 02 foi de 0,2 mm (0,0075"), enquanto que para a Placa 03 foi de 0,5 mm (0,020"). O uso de pastilhas de diferentes espessuras foi necessário devido à indisponibilidade de material.

Como pode ser visto na Fig. 7.2(b), o PZT foi colado próximo a uma das bordas da placa. Esta posição foi escolhida devido ao fato de o PZT não poder ser submetido a uma temperatura acima de um determinado nível (temperatura de Curie), sob pena do mesmo perder as suas propriedades piezoelétricas. No caso deste PZT especificamente, a temperatura de Curie é de 350°C. Assim, para garantir a manutenção das propriedades do PZT, este foi colado o mais longe possível do cordão de solda. Outro motivo é que neste ponto existe uma considerável tensão de compressão, conforme os resultados das simulações numéricas mostradas na seção 6.2. A Figura 7.3 mostra os detalhes do posicionamento do PZT na placa.

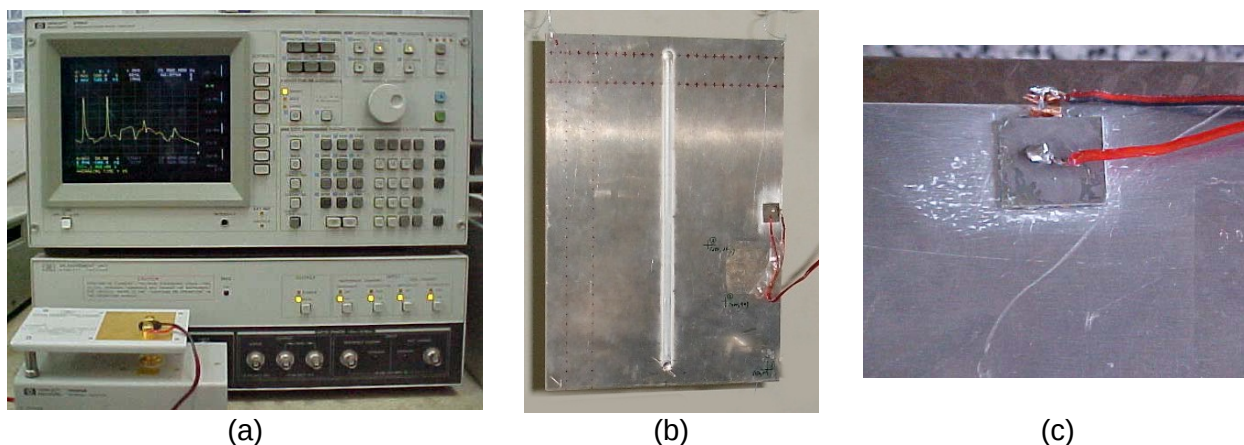


Figura 7.2 – (a) impedancímetro HP 4194A, (b) placa de alumínio e (c) detalhe do PZT colado na placa.

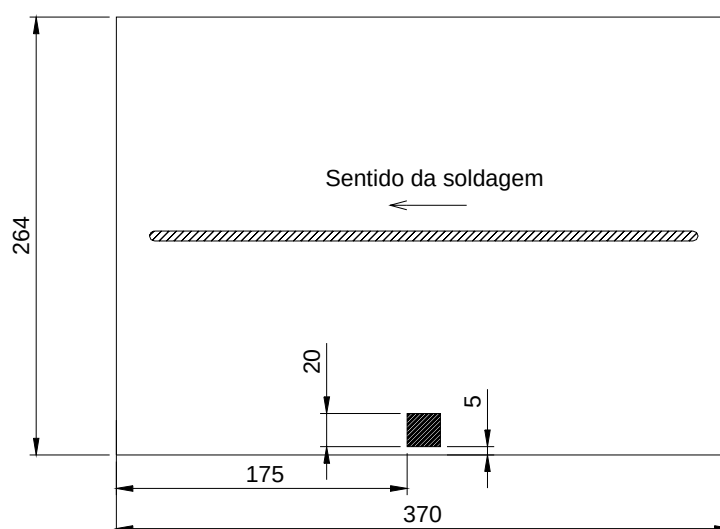


Figura 7.3 – Desenho esquemático da placa de alumínio ilustrando o posicionamento do PZT (dimensões em mm).

Os parâmetros ajustados no impedancímetro foram os seguintes: OSC Level de 1 V RMS; 64 médias; tempo de integração curto; e 401 linhas de resolução (sendo que Δf é dado pela divisão da banda de frequência utilizada por 400). Com relação à banda de frequência adotada, devido a ausência de informações para este caso da soldagem e a dificuldade em prever o efeito das tensões residuais sobre determinada banda, adotou-se para a *Placa 01* várias bandas, desde 8 kHz até 100 kHz. As bandas testadas foram de 8 a 10 kHz e passos de 2,5 kHz de 10 a 100 kHz. Após a soldagem da *Placa 01*, verificou-se que os sinais de impedância mostraram-se mais sensíveis às tensões residuais na banda de 10 a 12,5 kHz.

A descrição do processo e parâmetros de soldagem utilizados para cada placa está apresentada no capítulo 4 na seção 4.7.

7.4. Resultados

Inicialmente, da mesma forma que foi apresentado para os resultados dos testes de vibração a baixa frequência (seção 4.7), é interessante verificar a repetibilidade dos resultados obtidos para cada placa nos ensaios de impedância eletromecânica. A Figura 7.4 mostra os sinais da parte real da impedância obtidos para o estado inicial de cada placa. Verifica-se na Fig. 7.4(a) que o nível do espectro é diferente para cada placa, especialmente para a *Placa 03*, o que pode ser justificado pelo uso de um PZT mais espesso (0,5 mm). Outra causa desta diferença pode ser atribuída ao procedimento de colagem e a diferenças nas dimensões dos PZTs (durante o corte). A partir da Fig. 7.4(b), pode-se observar que as posições dos picos da placas *01* e *03* são bem próximas, enquanto que as da *Placa 02* têm um leve desvio para a esquerda. Isto confirma o que foi observado na Fig. 4.26 da seção 4.7. Assim, apesar destas variações, considera-se que houve uma boa repetibilidade em termos das posições dos picos.

Após a soldagem da *Placa 02*, percebeu-se que o PZT havia fraturado, o que impossibilitou a realização do ensaio de impedância da placa com tensões residuais. Assim, a Fig. 7.5 apresenta apenas os sinais de impedância para os estados inicial e soldado das placas *01* e *03*. A Tabela 7.1 expõe os valores das frequências correspondentes aos picos observados na figura.

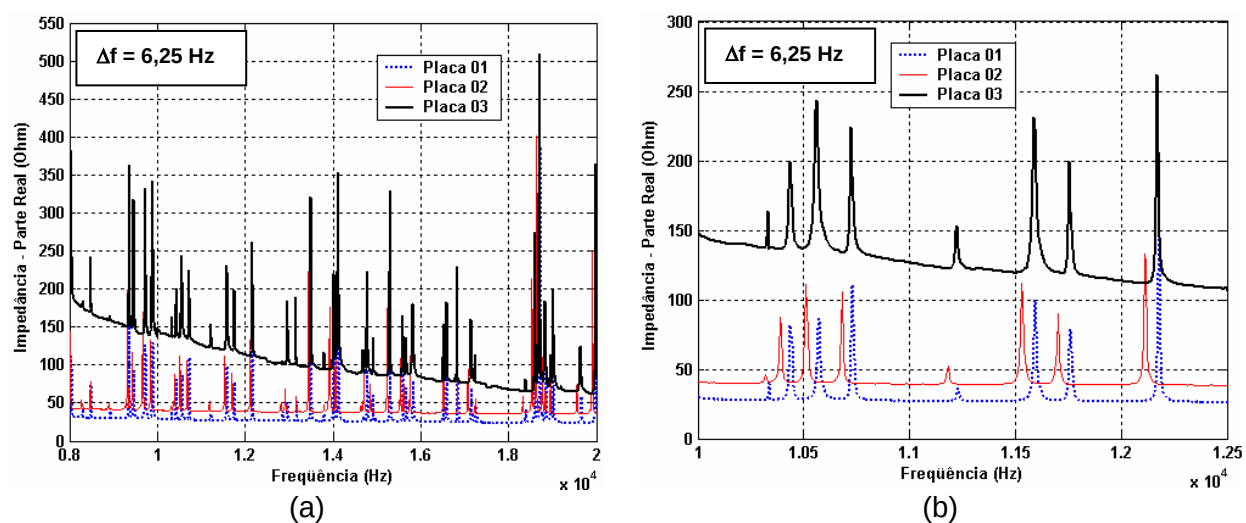


Figura 7.4 – Sinais de impedância obtidos para o estado inicial de cada placa: (a) de 8 a 20 kHz e (b) de 10 a 12,5 kHz.

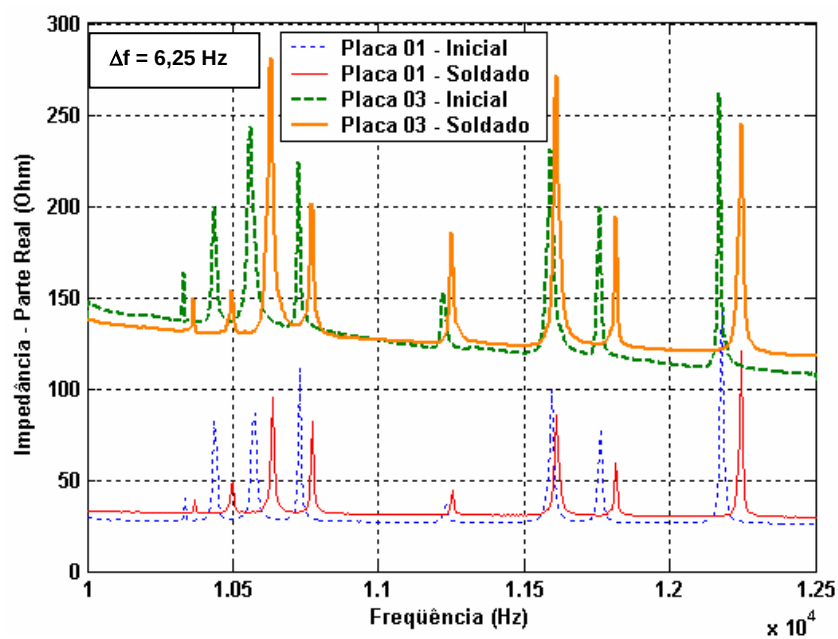


Figura 7.5 - Sinais de impedância obtidos para os estados inicial e soldado das placas 01 e 03.

Tabela 7.1 – Valores de frequência correspondentes aos picos do sinal de impedância para as placas 01 e 03.

Pico	Placa 01					Placa 03				
	Inicial (Hz)	Soldado (Hz)	Var. abs.	Var. (%)	Nº. de Δf	Inicial (Hz)	Soldado (Hz)	Var. abs.	Var. (%)	Nº. de Δf
1	10337,50	10368,75	31,25	0,30	5	10331,25	10362,50	31,25	0,30	5
2	10437,50	10500,00	62,50	0,60	10	10437,50	10493,75	56,25	0,54	9
3	10575,00	10637,50	62,50	0,59	10	10562,50	10631,25	68,75	0,65	11
4	10731,25	10775,00	43,75	0,41	7	10725,00	10768,75	43,75	0,41	7
5	11231,25	11256,25	25,00	0,22	4	11225,00	11250,00	25,00	0,22	4
6	11593,75	11612,50	18,75	0,16	3	11587,50	11612,50	25,00	0,22	4
7	11762,50	11812,50	50,00	0,43	8	11756,25	11812,50	56,25	0,48	9
8	12181,25	12243,75	62,50	0,51	10	12168,75	12243,75	75,00	0,62	12

Observe-se que, ao contrário do que foi verificado nos resultados dos ensaios de vibração a baixa frequência, houve uma tendência de elevação dos picos de frequência após a soldagem, com exceção de poucos casos (em outras bandas de frequência não apresentadas). Percebe-se que a maior variação apresentada pela *Placa 01* foi de 62,5 Hz, o que corresponde a $10 \times \Delta f$, enquanto que para a *Placa 02* está variação foi de 75 Hz ($12 \times \Delta f$). É conveniente ressaltar que, apesar das variações relativas serem bem pequenas quando comparadas com as observadas nos resultados a baixa frequência, as variações absolutas são razoáveis. Note-se ainda que, ao aumentar a energia de soldagem (da *Placa 01* para *03*) o comportamento varia de pico para pico. Os picos 1, 4 e 5 não se mostraram sensíveis à variação da energia. Já o segundo pico sofreu uma redução de $1 \Delta f$, os picos 3, 6 e 7 sofreram um aumento de $1 \Delta f$ e o oitavo pico, um aumento de $2 \Delta f$. Este último seria, portanto, o mais adequado para fazer um estudo de sensibilidade do método.

7.5. Considerações Finais

Infelizmente, o PZT da *Placa 02* rompeu, impedindo uma avaliação melhor da influência do enrijecimento por tensão residual de soldagem sobre o sinal de impedância eletromecânica. Contudo, os resultados mostraram que esta influência existe e que há picos com uma certa sensibilidade à variação da energia de soldagem. Isto sugere a possibilidade de utilizar esta técnica para formulação de um método inverso de identificação e/ou um método de controle de qualidade de componentes soldados. Entretanto, mais testes são necessários para comprovar a eficiência deste procedimento e a aplicabilidade em estruturas de geometria diferentes (tubos, por exemplo). Além disso, é possível que uma alteração no posicionamento do PZT na estrutura aumente a sensibilidade às tensões residuais e variações na energia de soldagem.

Da mesma forma que verificado pelas simulações numéricas do efeito do enrijecimento por tensão, espera-se que as distorções de soldagem tenham pequeno efeito quando comparado com o efeito das tensões residuais. Porém, novos testes devem ser realizados para fins de comprovação.

