

**DIOGO DE SOUZA RABELO**

**TÉCNICAS AVANÇADAS DE NORMALIZAÇÃO DE  
DADOS APLICADAS AO MÉTODO DE  
MONITORAMENTO DE INTEGRIDADE ESTRUTURAL  
BASEADO EM IMPEDÂNCIA ELETROMECÂNICA**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**2017**

**DIOGO DE SOUZA RABELO**

**TÉCNICAS AVANÇADAS DE NORMALIZAÇÃO DE DADOS  
APLICADAS AO MÉTODO DE MONITORAMENTO DE INTEGRIDADE  
ESTRUTURAL BASEADO EM IMPEDÂNCIA ELETROMECÂNICA**

**Tese** apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de **DOUTOR EM ENGENHARIA MECÂNICA**.

Área de concentração: Mecânica dos sólidos e vibrações.

Orientador: Prof. Dr. Valder Steffen Jr

Coorientador: Prof. Dr. Roberto Mendes Finzi Neto

**UBERLÂNDIA –MG**

**2017**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG, Brasil.

---

R114t  
2017

Rabelo, Diogo de Souza, 1986-

Técnicas avançadas de normalização de dados aplicadas ao método de monitoramento de integridade estrutural baseado em impedância eletromecânica / Diogo de Souza Rabelo. - 2017.

164 f. : il.

Orientador: Valder Steffen Júnior.

Coorientador: Roberto Mendes Finzi Neto.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

Disponível em: <http://dx.doi.org/10.14393/ufu.te.2017.1>

Inclui bibliografia.

1. Engenharia mecânica - Teses. 2. Aviões - Manutenção e reparos - Teses. 3. Espectroscopia de impedância - Teses. 4. Decisão estatística - Teses. I. Steffen Júnior, Valder. II. Finzi Neto, Roberto Mendes. III. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. IV. Título.

**DIOGO DE SOUZA RABELO**

**TÉCNICAS AVANÇADAS DE NORMALIZAÇÃO DE DADOS APLICADAS  
AO MÉTODO DE MONITORAMENTO DE INTEGRIDADE ESTRUTURAL  
BASEADO EM IMPEDÂNCIA ELETROMECÂNICA**

Tese **APROVADA** pelo Programa de  
Pós-graduação em Engenharia Mecânica da  
Universidade Federal de Uberlândia.

Área de concentração: Mecânica dos sólidos e  
vibrações.

**Uberlândia, outubro de 2017**

*Dedico este trabalho a toda minha família.*

*Em especial meus pais, que sempre me apoiaram, e minha tia Ione (em memória) por seu  
suporte inestimado em meus estudos.*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus pela força e pelo que está por vir. Agradeço a meus pais e irmãos, cujo apoio sempre obtive quando precisei.

Ao professor e orientador Valder Steffen Jr., por seu exemplo profissional e de pesquisador e por todas contribuições em minha pós-graduação. Ao professor e Coorientador Roberto Mendes Finzi Neto, por me auxiliar com seu conhecimento, pela confiança e todas contribuições nos trabalhos desta tese e também com minha formação.

A minha querida noiva Laiane Alves de Andrade pela parceria, motivação, dedicação e amor. Aos amigos da FEMEC: Prof. Aldemir, Prof. Helder, Karina, Denise, Carol, Lucas e todos os outros colegas do LMEst pelos momentos de descontração e amizade.

Aos servidores técnico-administrativos da UFU pelo apoio técnico fornecido.

Agradeço pela FAPEMIG pela bolsa de doutorado concedida e também ao CNPq e CAPES através do INCT- Estruturas Inteligentes em Engenharia.

Rabelo, D. S. **Técnicas avançadas de normalização de dados aplicadas ao método de monitoramento de integridade estrutural baseado em impedância eletromecânica.** 2017. 164 f. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

## RESUMO

Este trabalho dedica-se ao monitoramento de saúde estrutural (SHM), uma área em que se propõe a interrogar uma estrutura para fins de detectar, localizar e identificar danos estruturais. Atualmente, SHM representa uma das grandes áreas de interesse em engenharia, com o objetivo de aumentar a segurança das estruturas e ao mesmo tempo reduzir custos de manutenção, bem como o tempo de inatividade das máquinas e equipamentos. Para isso, a técnica de SHM baseada em impedância utiliza-se de transdutores piezelétricos que ao serem utilizados em altas faixas de frequência (tipicamente acima de 30 kHz), pode-se obter altas sensibilidades a danos incipientes. Entretanto, mudanças em condições ambientais ou operacionais podem causar alterações nos espectros de frequência adquiridos, levando assim o sistema a um falso diagnóstico acerca da integridade estrutural. Nesta tese, buscou-se desenvolver técnicas de normalização de dados que ao serem aplicadas aos sinais de impedância adquiridos, tais variações sejam compensadas sem grandes perdas de informação. Além disto, foi proposto um método para a determinação de um limiar discriminante através de um modelo estatístico, bem como técnicas avançadas de normalização de dados foram propostas, uma utilizando-se de métodos de otimização e outra baseada na minimização da distância euclidiana entre um ponto e uma curva. É importante ressaltar que, devido à ausência de modelos numéricos precisos, os estudos aqui apresentados partem de uma proposta experimental, utilizando-se de técnicas de inovação, métodos de otimização, análise e tratamento de sinais, estatística e programação dedicada. Finalmente, os resultados obtidos demonstram o grande potencial de uso da técnica SHM baseada em impedância em conjunto com as técnicas estatísticas e de normalização de dados aplicadas apropriadamente.

---

*Palavras-chave:* Monitoramento de integridade estrutural, Impedância eletromecânica, Normalização de dados, Limiar discriminante, Trinca de fadiga.

Rabelo, D. S. **Advanced data normalization techniques applied to the impedance-based structural health monitoring method.** 2017. 164 f. PhD. Thesis, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

## Abstract

This work is dedicated to the Structural Health Monitoring (SHM), an area that proposes to interrogate a structure with the purpose of detecting, locating and identifying structural damage. Currently, SHM represents one of the areas of great interest in engineering, with the goals of increasing safety while reducing maintenance costs, as well as decreasing downtime from machines and equipment. For this aim, the impedance-based SHM utilizes piezoelectric transducers that are used in high frequency ranges (typically above 30 kHz), providing high sensitivity to incipient type of damage. However, changes in environmental or operational conditions can cause changes in the frequency spectrum of the acquired signals, thus leading the system to a false diagnosis regarding the structural health. In this thesis, it was aimed to develop data normalization techniques that, when applied to the acquired impedance signals, the changes are compensated for without loss of important information. Furthermore, a method for threshold determination was proposed through the use of a statistical model, as well as advanced data normalization techniques were proposed, one of which has used optimization methods and the other is based on the minimization of the Euclidian distance between a point and a curve. It is important to point out that, despite the absence of precise numeric models, the studies presented here come from an experimental proposal, using innovative techniques, optimization methods, data treatment and analysis, statistics and dedicated programming. Finally, the results conveyed demonstrate the great potential of the use of the impedance-based SHM in conjunction with properly applied statistics and data normalization techniques.

---

**Keywords:** Structural Health Monitoring (SHM), Electromechanical impedance, Data normalization, Statistical threshold, Fatigue crack.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Modelo mecatrônico unidimensional do método de integridade estrutural baseado em impedância.....	11
Figura 2.2 – Modelo 1-D do sistema E/M considerando a camada de adesivo.....	13
Fonte: Xu e Liu (2002).....	13
Figura 2.3 – Exemplo do sinal obtido com o método de impedância eletromecânica.....	14
Figura 2.4 – Ilustração de várias aplicações da técnica de monitoramento de integridade estrutural baseada em impedância (Fontes: Moura e Steffen, 2005; Moura Jr., 2008). .....	16
Figura 2.5 – Exemplo de método para escolha da faixa de frequência. Fonte: (Palomino, 2012).....	17
Figura 2.6 – Efeito da integridade dos sensores na curva de susceptância.....	22
Fonte: (Grisso e Inman, 2010).....	22
Figura 3.1 - Para um PZT PSI 5-A livre, um aumento na temperatura leva a uma pequena mudança de magnitude na impedância resistiva (Fonte: Park <i>et al.</i> , 1999a).....	29
Figura 3.2 – Câmara climática utilizada para controle de temperatura e umidade.....	30
Figura 3.3 – Placa retangular de alumínio posicionada na câmara climática.....	31
Figura 3.4 – Assinaturas de impedância obtidas em diferentes temperaturas.....	31
Figura 3.5 – Curvas de impedância após compensação da Temperatura.....	36
Figura 3.6 – Métricas de dano antes e após compensação da Temperatura.....	36
Figura 3.7 – Busca do parâmetro ótimo de deslocamento em frequência.....	37
Figura 4.1 Configuração experimental: (a) Esquema para colagem dos sensores; (b) Painel de alumínio instrumentado com 4 pastilhas de PZT; (c) Corpos de prova posicionados na condição livre-livre dentro da câmara climática.....	43
Figura 4.2. Configuração experimental: (a) Dano em vista amplificada (corte de 10 mm inserido; (b) Ilustração do dispositivo de medição de impedância utilizado.....	44
Figura 4.3. Resultados de monitoramento: (a) Variações nos sinais de impedância devido a mudanças de temperatura; (b) Resultados do procedimento de compensação da temperatura.....	46
Fig. 4.4 Métricas de Dano CCD (s/ comp.) e CCD (c/ comp.) para o PZT#6; .....	47
Fig. 4.5 Índices CCD para cada condição de saúde estrutural obtidas a partir do PZT#6.....	47
Figura 4.6. Resultados globais para cada pastilha de PZT obtidos através de médias ao longo de toda faixa de temperatura.....	48
Figura 4.8 Resultados ilustrativos das 5.048 medições com o veredito acerto/erro (cada ponto vermelho “.” representa uma medição).....	56
Figura 4.9 Resultados ilustrativos das 5.048 medições com o veredito acerto/erro após o procedimento de depuração de dados.....	56
Figura 5.1. Curvas S/N de melhor ajuste para ligas de alumínio 6061-T6, vários materiais forjados. Fonte: (DOT/FAA/AR-MMPDS-01, 2003).....	63
Figura 5.2. Viga instrumentada com pastilha de PZT e fita refletora. Fonte: Elaborada pelo autor.....	66
Figura 5.3 (a): Esquemático do teste; (b): Bancada experimental utilizada.....	67
Figura 5.4 Fluxograma do experimento.....	68
Figura 5.5 Comparativo de <i>baselines</i> entre a vida em repouso e a viga em movimento: (a) sem filtro SG; (b) com filtro SG.....	71
Figura 5.6 Assinaturas de impedância com a viga em repouso: (a) faixa de frequência 29-40 kHz; (b) faixa de frequência 101-109 kHz. ....	72

Figura 5.7 Assinaturas de impedância com a viga em movimento oscilatório: (a) faixa de frequência 29-40 kHz; (b) faixa de frequência 101-109 kHz.....	73
Figura 5.8 (a): Localização da trinca na viga; (b): vista amplificada e filtrada.....	74
Figura 5.9 Índices de dano CCD em função do número de ciclos: (a) – em repouso (29-40 kHz); (b) – em repouso (101-109 kHz); (c) – em movimento (29-40 kHz); (d) – em movimento (101-109 kHz). ....	75
Figura 6.1 Fluxograma da técnica de normalização proposta.....	81
Figura 6.2 Pseudocódigo do algoritmo DE.....	84
Figura 6.3 Bancada experimental usada na aplicação do método ISHM.....	85
Figura 6.4 Posição dos sensores ao longo do eixo (distâncias em mm). ....	86
Figura 6.5 Pastilha de PZT e o transdutor MFC (atuador flexível) usado nesta aplicação. ....	87
Figura 6.6 Dispositivo de carregamento para nucleação de trinca (StrCnd-1) e (StrCnd-2)....	88
Figura 6.7 Detalhes do entalhe realizado no eixo (StrCnd-3). (a): Vista do entalhe; (b): posição do entalhe.....	89
Figura 6.8 Assinaturas de impedância compensadas considerando todas as condições estruturais. (a) PZT-1; (b) MFC-1; (c) PZT-2; (d) MFC-2.....	91
Figura 6.9 Resultados globais para o PZT-1: (a) Assinaturas de impedância compensadas para a condição intacta; (b) Índices RMSD não compensados e compensados para todas as condições estruturais. ....	92
Figura 6.10 Índices RMSD compensados e limiar de discriminação para o sensor PZT-1 após a depuração de dados. ....	93
Figura 6.11 Resultados globais para o sensor MFC-1: (a) Assinaturas de impedâncias compensadas para a condição intacta; (b) Índices RMSD não compensados e compensados. ....	94
Figura 6.12 Índices RMSD compensados e limiar de discriminação para o sensor MFC-1 após a depuração de dados. ....	95
Figure 6.13 Resultados globais para o sensor PZT-2: Assinaturas de impedância compensadas para a condição intacta; (b) Índices RMSD não compensados e compensados. ....	95
Figura 6.14 Índices RMSD compensados e limiar de discriminação para o sensor PZT-2 após a depuração de dados. ....	96
Figura 6.15 Resultados globais para o sensor MFC-2: (a) Assinaturas de impedância compensadas para a condição intacta; (b) Índices RMSD não compensados e compensados. ....	96
Figura 6.16 Índices RMSD compensados e limiar de discriminação para o sensor MFC-2 após a depuração de dados. ....	97
Figure 6.17 Resultados globais para o sensor PZT-1 usando a métrica de dano CCD: (a) Assinaturas de impedância compensadas para a condição intacta; (b) Índices CCD não compensados e compensados.....	98
Figure 6.18 Índices CCD compensados e limiar de discriminação para o PZT-1 após a depuração de dados. ....	99
Figura 7.1 Bancada experimental usada nos testes ISHM com o objetivo de detecção de dano com o rotor em diferentes condições operacionais. ....	103
Figura 7.2 Dimensões principais do rotor: posição dos transdutores no rotor. ....	104
Figura 7.3 (a) Anel deslizante; (b) Configuração da conexão do anel deslizante ao eixo; (c) Sistema de medição de impedâncias. ....	105
Figura 7.4 (a) Porca de aço; (b) Desbalanceamento nível UB <sub>2</sub> ; (c) Desbalanceamento nível UB <sub>3</sub> .....	105
Figura 7.5 (a) Sensor de proximidade (corrente de Foucault); (b) Posição do sensor sobre a bancada experimental do rotor. ....	106
Figura 7.6 Deslocamento (sensores de proximidade tipo corrente de Foucault): (a) direção x; (b) direção z. ....	108
Figura 7.7 Assinaturas de impedância para diferentes velocidades de rotação. (a) sem compensação; (b) com compensação.....	109

Figura 7.8 Assinaturas de impedância (PZT#1) considerando o efeito de massa adicionada. (a) Assinaturas de impedância compensadas; (b) Índices RMSD e limiar de discriminação.....	110
Figura 7.9 Índices RMSD e limiares de discriminação. (a) PZT#2; (b) PZT#3.....	111
Figura 7.10 Resultados globais para o PZT#1 com limiar de discriminação após a depuração de dados.....	112
Figura 7.11 Resultados globais para o PZT#2 com limiar de discriminação após a depuração de dados.....	112
Figura 7.12 Resultados globais para o PZT#3 com limiar de discriminação após a depuração de dados.....	113
Figura 8.1 Placa de alumínio (corpo de prova) instrumentada utilizada no experimento.....	118
Figura 8.2 Variações causadas nas assinaturas de impedância na condição intacta devido a mudanças na temperatura.....	119
Figura 8.3 Assinaturas de impedância corrigidas pelo método deslocamento efetivo em frequência por análise de correlação.....	119
Figura 8.4 Assinaturas de impedância corrigidas pelo algoritmo híbrido de otimização (DE e SQP) usando-se a métrica CCD como função objetivo.....	120
Figura 8.5 Índices de dano CCD antes e após a normalização de dados através do método deslocamento efetivo em frequência por análise de correlação.....	121
Figura 8.6 Índices de dano CCD antes e após a normalização de dados através do algoritmo híbrido de otimização usando a métrica CCD como função objetivo.....	121
Figura 8.7 Assinaturas de impedância: (a) Antes da compensação; (b) após a compensação obtidas com um gradiente de 30 °C entre <i>baseline</i> e medição de teste, usando-se uma faixa larga de frequência para o monitoramento. Fonte: Rabelo (2014). .....	123
Figura 8.9 Assinaturas de impedância (a): Não corrigidas; (b) Corrigidas pelo método de deslocamento efetivo em frequência por análise de correlação; (c) Corrigidas pela normalização de dados ponto a ponto baseado na minimização da distância euclidiana. ....	127
Figura 8.10 Índices de dano CCD comparando os métodos de deslocamento efetivo por análise de correlação (azul) e normalização ponto a ponto (amarelo).....	128
Figura 8.11 Assinaturas de impedância medidas na faixa de 20 kHz a 250 kHz (a): Não corrigidas; (b) Corrigidas pelo método de deslocamento efetivo em frequência por análise de correlação; (c) Corrigidas pela normalização de dados ponto a ponto baseado na minimização da distância euclidiana.....	129
Figura 8.12 Índices de dano CCD comparando os métodos de deslocamento efetivo por análise de correlação (azul) e normalização ponto a ponto (amarelo) – Faixa ampla. 130	130

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1. Comparação de métodos de END e SHM para detecção e caracterização de dano (Adaptado de Yuan, 2016).....	24
Tabela 4.1: Matriz de testes do experimento .....	44
Tabela 4.2: Faixa de frequência selecionada para os 12 sensores .....	44
Tabela 4.3: Resultados dos testes de normalidade para todos os sensores .....	51
Tabela 4.4: Resultados de taxa de acertos sem depuração de dados .....	54
Tabela 4.5: Resultados de taxa de acertos após a depuração de dados .....	55
Tabela 5.1: Propriedades mecânicas da liga de alumínio 6061-T6. ....	66
Tabela 5.2: Resultados do teste de normalidade para a amostra “sem dano”.....	76
Tabela 6.1 Faixas de frequência aplicadas aos transdutores. ....	87
Tabela 6.2 Resultados globais de detecção e quantidade de valores atípicos descartados. ....	97
Tabela 7.1 Configurações experimentais adotadas para obter-se as assinaturas de impedância do rotor.....	107
Tabela 7.2 Resultados globais de detecção de dano para todos os sensores. ....	113
Tabela 7.3 Resultados dos testes JB de normalidade para cada sensor . ....	113
Tabela 8.1 Resultados comparativos entre cada técnica de normalização de dados.....	122
Tabela 8.2 Resultados comparativos entre cada técnica de normalização de dados.....	129

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BW	Largura de Banda ( <i>Bandwidth</i> ).
CBM	<i>Condition-based Maintenance</i> (Manutenção baseada na condição atual)
CCD	Métrica de Dano: Desvio do Coeficiente de Correlação.
CCCD	Métrica CCD compensada.
CDF	Função de distribuição cumulativa
CEP	Controle Estatístico de Processos
CIMSS	<i>Center for Intelligent Material Systems and Structures</i> .
EA	Emissão acústica
EFS	<i>Effective Frequency Shift</i>
E/M	Eletromecânica
END	Ensaios não Destrutivos
FDP	Função de Densidade de Probabilidade
FEMEC	Faculdade de Engenharia Mecânica
FM	Faixa de monitoramento.
FIR	<i>Finite Impulse Response</i>
FRF	Função de Resposta em Frequência.
GDL	Graus de liberdade
IIR	<i>Infinite Impulse Response</i>
ISHM	Monitoramento de Integridade Estrutural baseado em Impedância.
JB	Teste de normalidade Jarque-Bera
KPCA	Análise de Componentes Principais – Kernel.
Labview®	Software de aplicações de teste, medição e controle
LCL	<i>Lower control limit</i> (Limite de controle inferior)
LDV	<i>Laser Doppler Vibrometer</i> (Vibrômetro a Laser)
LF	Teste de normalidade Lilliefors
LMEst	Laboratório de Mecânica de Estruturas Prof. José Eduardo Tannús Reis.
MATLAB®	Laboratório de matrizes
MD	Métrica de dano

MFC	Compósito de macro fibras.
OLM	<i>Operational Loads Monitoring</i> (Monitoramento de cargas operacionais)
PCA	Análise de Componentes Principais
PFP	Probabilidade de Falso Positivo
POD	<i>Probability of Detection</i> (Probabilidade de Detecção)
PVDF	Fluorido de Polivinilideno.
PZT	Titanato-zirconato de chumbo.
RMSD	Desvio Médio da Raiz Quadrada.
RNA	Redes Neurais Artificiais.
SCDF	Função de distribuição cumulativa empírica
SDD	Sistema de detecção de danos
SG	Savitzky-Golay
SHM	Monitoramento de Integridade Estrutural.
SQP	Programação Sequencial Quadrática
SySHM	Impedancímetro desenvolvido pelo time de SHM do LMEst.
UCL	<i>Upper Control Limit</i> (Limite de controle superior)
UFU	Universidade Federal de Uberlândia

## LISTA DE SÍMBOLOS

$A$	Vetor da aceleração da força de excitação
$B$	Vetor da aceleração da viga; Matriz auxiliar inicializada como identidade
$BW$	Largura de banda da faixa de monitoramento de integridade estrutural
$C$	Capacitância
$C_{ij}$	Solução candidata com índice de população $i$
$C_{ijk}$	j-ésima entrada na solução do vetor $C_{ij}$
$CDF$	Função de distribuição cumulativa
$C_m$	Flexibilidade mecânica
$CR$	Constante de cruzamento
$D$	Distância euclidiana entre dois pontos
$d_{max}$	desvio máximo padrão (Critério de Chauvenet)
$d_{ij}$	Matriz dos coeficientes piezelétricos
$d_{xi}$	Deslocamento individual em frequência
$d_{yi}$	Deslocamento individual em amplitude
$E$	Módulo de Elasticidade
$f$	Frequência
$f_{max}$	Frequência máxima
$F$	Força mecânica; Peso usado no esquema de mutação (algoritmo DE)
$F(X)$	Função a ser minimizada
$g_j$ e $h_k$	restrições linearizadas
$I_o$	Corrente elétrica de saída do PZT
$j$	Unidade imaginária
$JB$	Estatística do teste de normalidade Jarque-Bera
$K$	Rigidez mecânica
$K_t$	Curtose
$L$	Indutância
$l$	Comprimento
$LF$	Estatística do teste de normalidade Lilliefors

$M_m$	Massa mecânica
$m$	Matriz de constantes magneto-dielétricas
$N$	Tamanho da amostra
$N_{\min_{medicoes}}$	Número mínimo de medições
$n$	Número total de pontos freqüenciais
$NP$	Tamanho da população
$P$	População da geração atual
$P'$	População a ser construída para a próxima geração
$PZT_{threshold}$	Limiar discriminante obtido para o sensor
$r$	Número aleatório entre 0 e 1
$rand / 1$	Esquema de mutação escolhido para o algoritmo de evolução diferencial
$R_m$	Amortecimento mecânico
$\text{Re}(Z_{1,i})$	Parte real da impedância da medição <i>baseline</i> em uma frequência $i$
$\text{Re}(Z_{2,i})$	Parte real da impedância em uma frequência $i$ para uma nova configuração da estrutura
$\text{Re}(\bar{Z}_1)$	Média da parte real da impedância da medição <i>baseline</i>
$\text{Re}(\bar{Z}_2)$	Média da parte real da impedância para uma nova configuração da estrutura
$S$	Direção de busca
$s$	Matriz de flexibilidade; desvio padrão amostral
$SCDF$	Função de distribuição cumulativa empírica
$S_k$	Skewness
$S_{Z_1}$	Desvio padrão do sinal de impedância da referência
$S_{Z_2}$	Desvio Padrão do Sinal de Impedância a ser Comparado
$S_{Z_{1,i}}$	Desvio Padrão de cada Ponto freqüencial do Sinal de Referência
$t$	Espessura
$t_{v,\alpha/2}$	Variável padronizada da distribuição $t$ de Student
$V_i$	Tensão elétrica de excitação (entrada) ao transdutor de PZT
$X$	vetor de variáveis de projeto
$\bar{x}$	Média amostral
$x_{best}$	Solução com melhor nível de aptidão
$x_{r_i}$	i-ésima solução candidata
$X(t)$	Deslocamento da estrutura ao ser excitada pelo atuador

$\dot{X}(t)$	Velocidade da estrutura.
$X_c$	Reatância Capacitiva
$X_L$	Reatância Indutiva
$w_a, l_a$ e $h_a$	Constantes Geométricas do PZT
$y_{max}$	Máxima deflexão sofrida na ponta da viga
$Y(\omega)$	Admitância Elétrica
$\bar{Y}_{22}^E$	Módulo de Young do PZT com Campo Elétrico Nulo
$Z_a$	Impedância Mecânica do PZT
$Z_m$	Impedância Mecânica
$Z_s$	Impedância Mecânica da Estrutura
$z_{\alpha/2}$	Variável padronizada da distribuição Normal
$\alpha$	Nível de significância
$\Delta_v$	Fator de deslocamento vertical de correção de impedâncias
$\Delta f$	Fator de deslocamento horizontal de correção de impedâncias
$\delta$	Fator de Perda Dielétrica do PZT
$\delta_j$ e $\bar{\delta}$	Parâmetros para prevenir inconsistências entre as restrições $g_j$ e $h_k$ .
$\varepsilon$	Matriz de Permissividade dielétrica
$\eta$	Fator de Perda Mecânica do PZT
$\theta$	Coeficiente angular da reta
$\lambda$	Multiplicador de Lagrange
$\mu_x$	Média populacional
$\nu$	Número de graus de liberdade
$\sigma_{max}$	Máxima tensão mecânica
$\sigma_x$	desvio padrão populacional
$\Phi$	Ângulo de fase entre os vetores $A$ e $B$
$\varphi$	Função de penalidade exterior
$\chi^2_{v,\alpha/2}$	Variável padronizada da distribuição Qui-quadrado
$\omega$	Frequência angular

## SUMARIO

<b>CAPÍTULO I: INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
1.1. Introdução.....	1
1.2. Estrutura da Tese.....	4
<b>CAPÍTULO II: ESTADO DA ARTE DO MONITORAMENTO DA INTEGRIDADE ESTRUTURAL BASEADO EM IMPEDÂNCIA.....</b>	<b>6</b>
2.1. Introdução.....	6
2.2. Conceitos de Impedância Mecânica e Elétrica .....	6
2.2.1. Impedância Mecânica .....	6
2.2.2. Impedância Elétrica .....	8
2.3. Técnica do Monitoramento de Integridade Estrutural baseada na Impedância E/M ..	10
2.4. Parâmetros essenciais de projeto da técnica ISHM.....	17
2.5. Autodiagnóstico de sensores através da curva de susceptância .....	21
2.6. Monitoramento de integridade estrutural (SHM) e ensaios não-destrutivos (END)....	22
<b>CAPÍTULO III: NORMALIZAÇÃO DE DADOS APLICADA À TÉCNICA DE SHM BASEADA EM IMPEDÂNCIA .....</b>	<b>27</b>
3.1. Introdução.....	27
3.2. Problemas devidos à variação ambiental e/ou operacional.....	28
3.3. Influência da variação da temperatura para sistemas ISHM .....	28
3.4. Investigação do efeito da Temperatura em uma placa retangular de alumínio .....	30
3.5. Revisão bibliográfica de técnicas de normalização de dados para sistemas ISHM .....	32
3.6. Procedimento de Compensação da Temperatura – Método do Deslocamento Efetivo em Frequência por Análise de Correlação.....	34
<b>CAPÍTULO IV: MÉTODO ESTATÍSTICO PARA DETERMINAÇÃO DO LIMIAR DE DISCRIMINAÇÃO APLICADO EM PAINÉIS DE ALUMÍNIO AERONÁUTICO.....</b>	<b>39</b>
4.1. Resumo .....	39
4.2. Introdução .....	39
4.3. Planejamento e configuração do experimento .....	41
4.3.1. Preparação dos corpos de prova .....	41
4.3.2. Resultados de assinaturas de impedância e Métricas de Dano .....	45
4.4. Análise estatística dos dados e taxa de acertos .....	49
4.4.1. Detecção de valores atípicos e depuração de dados através do Critério de Chauvenet.	49
4.4.2. Critério de Chauvenet.....	50
4.4.3. Testes de normalidade.....	50
4.4.4. Testes de normalidade .....	52
4.5. Resultados e discussão.....	54
4.6. Conclusões do capítulo.....	57
<b>CAPÍTULO V: MONITORAMENTO DE INTEGRIDADE ESTRUTURAL EM TEMPO REAL DE TRINCA DE FADIGA EM UMA VIGA DE ALUMÍNIO USANDO UM DISPOSITIVO PORTÁTIL ...</b>	<b>59</b>

5.1. Resumo .....	59
5.2. Introdução.....	60
5.3. Falhas de fadiga causadas por carregamentos cílicos.....	62
5.4. Planejamento e configuração do experimento .....	64
5.4.1. Faixa de frequência .....	69
5.5. Resultados e discussão.....	70
5.5.1 <i>Análise estatística e determinação do limiar de discriminação</i> .....	74
5.6. Conclusões do capítulo.....	76
<b>CAPÍTULO VI: DETECÇÃO DE FALHAS EM UM EIXO ROTATIVO USANDO O MÉTODO DE MONITORAMENTO DE INTEGRIDADE BASEADO EM IMPEDÂNCIA E UMA NOVA ABORDAGEM DE NORMALIZAÇÃO DE DADOS .....</b>	<b>78</b>
6.1. Resumo .....	78
6.2. Introdução .....	78
6.3. Técnica de normalização de dados com procedimentos de otimização .....	80
6.4. Algoritmo de otimização híbrida.....	82
6.5. Aplicação Experimental.....	85
6.6. Resultados e Discussão .....	90
6.7. Conclusões do capítulo.....	99
<b>CAPÍTULO VII: DETECÇÃO DE FALHAS BASEADA NA IMPEDÂNCIA ELETROMECÂNICA EM UMA MÁQUINA ROTATIVA USANDO UMA ABORDAGEM DE COMPENSAÇÃO DE CONDIÇÃO OPERACIONAL .....</b>	<b>101</b>
7.1. Resumo .....	101
7.2. Introdução .....	101
7.3. Configuração experimental .....	103
7.4. Resultados experimentais .....	106
7.4.1. Análise #1: Massa adicionada (porca de 4,89 g):.....	109
7.4.2. Análise #2: Efeito de desbalanceamento e massa adicionada com desbalanceamento: .....	112
7.5. Conclusões do capítulo.....	114
<b>CAPÍTULO VIII: ESTUDO COMPARATIVO DE TÉCNICAS DE NORMALIZAÇÃO DE DADOS PARA SISTEMAS ISHM E PROPOSTA DE UMA NOVA TÉCNICA DE COMPENSAÇÃO .....</b>	<b>116</b>
8.1. Introdução.....	116
8.2. Estudo comparativo de técnicas de normalização de dados.....	117
8.3. Resultados e discussão.....	118
8.4. Normalização de dados ponto a ponto baseada na minimização da distância euclidiana .....	124
8.5. Resultados obtidos com a técnica de normalização de dados proposta .....	127
8.6. Conclusões do capítulo.....	130
<b>CAPÍTULO IX: CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>132</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>137</b>

# CAPÍTULO I: INTRODUÇÃO

## 1.1. Introdução

O monitoramento da integridade estrutural, em inglês, *Structural Health Monitoring* (SHM), torna possível a detecção e caracterização de falhas em uma estrutura ou componente estrutural que podem impactar em sua capacidade de desempenhar completamente e de modo seguro a função para a qual o sistema monitorado foi projetado. Farrar e Worden (2007) definiram dano como “mudanças introduzidas em um sistema que adversamente afetam seu desempenho atual ou futuro”. O objetivo do SHM é o de identificar estas mudanças o quanto antes, de modo que ações corretivas possam ser tomadas com a finalidade de minimizar o tempo de inatividade, custos operacionais e custos de manutenção. Além disto, pretende-se reduzir o risco de falhas catastróficas, ferimentos, ou até mesmo perda de vidas humanas, ou seja, há também uma preocupação com a segurança da estrutura em relação a seus usuários.

Para garantir a integridade estrutural e consequentemente manter a segurança, técnicas de monitoramento de integridade estrutural são empregadas em várias áreas da engenharia. A integridade estrutural está diretamente relacionada ao desempenho da estrutura e, neste contexto, o desempenho é um dos principais parâmetros relacionados à segurança operacional. Este assunto é relevante para várias estruturas utilizadas em nossa sociedade, principalmente as que possuem grande responsabilidade com relação à segurança de vidas humanas. Neste contexto, o monitoramento de integridade estrutural (SHM), é um quesito de extrema importância na engenharia atual.

Em um segundo contexto, mudanças na integridade estrutural podem afetar o desempenho do sistema ao ponto em que ações corretivas de manutenção tornam-se necessárias. Em estruturas aeronáuticas, por exemplo, reparos estruturais aumentam o custo de operação pelo menos de dois modos. No primeiro, o projeto e implementação de reparos implica custos diretos. Em segundo lugar, a execução de reparos geralmente requer

que a aeronave seja temporariamente retirada de serviço e isto induz custos indiretos devido à perda em termos do tempo de inatividade, ou como resultado de providências para comissionar uma aeronave substituta. Para reduzir custos de reparo e manutenção, uma tentativa tem a ver com a capacidade de se detectar uma falha estrutural em seu estágio incipiente, reduzindo assim os custos diretos. Alternativamente, pode-se decidir por adiar o reparo até que a aeronave seja retirada de serviço para revisões programadas para se reduzir custos indiretos. Neste contexto, SHM permite claramente a redução de custos de manutenção.

As metodologias de SHM podem ser consideradas como técnicas avançadas de manutenção, que até o momento não receberam aprovação definitiva devido à falta de conhecimento amplo sobre seu desempenho. Esta lacuna, entretanto, pode ser superada através da profunda investigação das aplicações, acompanhada de estudos de confiabilidade. Esta etapa seria seguida de certificação, para que haja transição das aplicações em laboratório e de eventuais protótipos para estruturas de engenharia testadas pelas empresas. Dentre as técnicas de SHM investigadas atualmente, a técnica de monitoramento de integridade estrutural baseado em impedância é o foco desta tese.

O método de monitoramento de integridade estrutural baseado em impedância, em inglês, *Impedance-based Structural Health Monitoring* (ISHM), tem sido desenvolvido como uma ferramenta promissora para identificação de falhas estruturais em tempo real. Trata-se de um método de avaliação não-destrutivo (Park et al, 2003). Neste método, pastilhas de PZT (Titanato-zirconato de chumbo) são utilizadas aproveitando sua propriedade de atuar, simultaneamente, como sensores e atuadores. Assim, beneficiando-se dos efeitos piezelétricos direto e inverso, qualquer alteração nas propriedades dinâmicas da estrutura monitorada (tais como as causadas por um dano) será refletida na impedância elétrica do sensor ligado à estrutura. Este método é aplicado em altas faixas de frequência (tipicamente acima de 30 kHz), o que permite alta sensibilidade a danos do tipo incipiente. Entretanto, a técnica ISHM também é sensível a variações nas condições ambientais, especialmente variações de temperatura, bem como mudanças nas condições operacionais da estrutura monitorada.

Os veículos aeroespaciais, assim como os automotivos, operam sob um amplo espectro de condições ambientais e operacionais de maneira que estão sujeitos a mudanças frequentes e muitas vezes imprevisíveis, fazendo com que seja extremamente difícil identificar-se todos os cenários nominais e extra-nominais de operação. Consequentemente, é muito mais difícil de se identificar dano sob estas condições, possivelmente resultando em falsas indicações de dano. Dada a complexidade do problema,

e sem uma forte confiança na precisão do diagnóstico, os benefícios econômicos do SHM são igualmente difíceis de se quantificar (Yuan, 2016).

O principal objetivo desta tese é o de propor melhorias ao método de ISHM, através de técnicas novas para normalização de dados, bem como técnicas estatísticas relacionadas à teoria da detecção, revelando as potencialidades que a técnica de ISHM possui em termos de aplicabilidade para detecção de falhas em estruturas de engenharia sujeitas a mudanças em suas condições ambientais e/ou operacionais.

Para isto, os problemas relacionados à normalização dos sinais de impedância foram amplamente estudados. Este é um dos passos fundamentais para se obter um diagnóstico bem sucedido, uma vez que os distúrbios causados por variações nas condições ambientais e/ou operacionais, podem levar o sistema de detecção de danos (SDD) a um falso diagnóstico. Para isto, problemas relacionados a variações nas condições ambientais e condições operacionais foram estudados nesta tese, a saber: variações na temperatura ambiente, influência de vibrações mecânicas nos sinais da impedância, influência da variação da velocidade de rotação de um rotor horizontal, e influência do desbalanceamento induzido em um rotor horizontal. Para compensar o efeito destas influências, técnicas de normalização de dados já existentes na literatura foram utilizadas, bem como novas técnicas são propostas. O objetivo das técnicas propostas nesta tese é o de melhorar a robustez quanto à aplicação da técnica de ISHM em estruturas de engenharia em condições reais de aplicação, bem como atenuar algumas limitações encontradas quanto à faixa de monitoramento usada por esta técnica, que, em geral, é determinada experimentalmente em uma faixa estreita, e ocasionalmente limitada.

Outro importante objetivo desta tese reside nas técnicas de processamento estatístico dos sinais para problemas de detecção. Neste sentido, uma técnica que busca definir um limiar de discriminação de estados estruturais (saudável x com dano) foi proposta usando-se conceitos de Controle Estatístico de Processos (CEP).

Vários experimentos puderam ser realizados ao longo deste trabalho de doutorado, proporcionando o uso da técnica de ISHM em aplicações de grande interesse. Tais aplicações serão brevemente ilustradas após a fundamentação teórica, seguida dos capítulos principais relativos aos objetivos principais desta tese, a saber: aplicações em painéis de alumínio aeronáutico, painéis de material composto usado em aeronaves, detecção de falhas em um eixo de um rotor horizontal e estruturas de construção civil. Novas aplicações encontram-se atualmente em desenvolvimento de modo a expandir a aplicação da técnica de ISHM para outras áreas.

## 1.2. Estrutura da Tese

O trabalho foi dividido em capítulos de tal forma que seja possível uma melhor compreensão dos itens necessários para as formulações das técnicas abordadas, assim como para um tratamento direto e modular de cada parte do problema.

No capítulo 1 são apresentados os principais problemas tratados no plano da tese e é feita uma explanação da problemática geral relacionada a SHM, assim como a definição da proposta, além de um sumário dos capítulos.

No capítulo 2 o estado da arte da técnica de monitoramento de integridade estrutural baseado em impedância é abordado, juntamente com os conceitos relacionados ao SDD. Neste sentido, é realizada uma revisão bibliográfica sobre o método ISHM, onde são apresentados os conceitos básicos sobre impedância mecânica e elétrica, os parâmetros essenciais de projeto, técnicas para aquisição de sinal, e métricas de dano. Ao final do capítulo, faz-se uma breve comparação dos métodos de monitoramento de integridade estrutural baseado na impedância com outras técnicas de Ensaio Não Destrutivo (END).

O capítulo 3 apresenta a metodologia de SHM, enfocando a normalização de dados, qual seja, o tema principal desta tese. As principais técnicas de normalização de dados para compensação de mudanças em condições ambientais ou operacionais são consideradas.

Os capítulos 4 a 7 relacionam-se a quatro artigos submetidos a periódicos internacionais que puderam ser desenvolvidos ao longo do presente trabalho de doutorado.

Assim, no capítulo 4 é proposta uma metodologia para determinação do limiar de discriminação, baseando-se em CEP, juntamente com intervalos de confiança. O CEP exige que as amostras se originem de uma distribuição normal (ou Gaussiana). Testes de normalidade foram implementados para garantir este quesito.

No capítulo 5 é investigado o efeito de vibrações mecânicas sobre as assinaturas de impedância, bem como o desempenho da técnica ISHM é avaliado. O primeiro estudo de caso trata da detecção de uma trinca incipiente de fadiga que foi induzida em uma viga esbelta com o auxílio de um excitador eletrodinâmico. No capítulo 6, um segundo estudo de caso trata da aplicação da técnica ISHM, trazendo medições realizadas em um rotor horizontal em condições de operação.

Na sequência, o capítulo 7 trata do processo de ISHM aplicado a um rotor com o objetivo de avaliar a capacidade de compensação da velocidade de rotação do eixo rotativo. Para tanto, uma metodologia baseada em um algoritmo híbrido de otimização foi utilizado, usando-se então o método de Evolução Diferencial (DE – *Differential Evolution*), seguida do método de programação quadrática sequencial (SQP - *Sequential Quadratic Programming*).

O capítulo 8 consiste na apresentação de uma nova técnica de normalização de dados baseado na minimização da distância euclidiana. Esta técnica possui a vantagem de permitir que se utilize uma ampla faixa de frequência no processo de monitoramento, garantindo assim a detecção de uma gama mais ampla de tipos de dano.

O capítulo 9 encerra o trabalho, apresentando as principais conclusões obtidas. São também apresentadas perspectivas futuras para este campo de atuação.

## CAPÍTULO II: ESTADO DA ARTE DO MONITORAMENTO DA INTEGRIDADE ESTRUTURAL BASEADO EM IMPEDÂNCIA

### 2.1. Introdução

O método ISHM utiliza transdutores piezelétricos, tipicamente pastilhas de PZT ou mais recentemente o MFC (*macro-fiber-composite*). Estes agem como sensores e atuadores, simultaneamente, sendo colados ou embutidos em uma estrutura e fixados através de uma resina em geral feita à base de epoxy. Os transdutores, agindo conforme o efeito piezelétrico inverso (efeito atuador), recebem uma tensão elétrica e deformam-se, produzindo uma força que excita a estrutura monitorada. Esta por sua vez deforma-se, fazendo com que o transdutor no efeito piezelétrico direto (efeito sensor) gere uma corrente elétrica a partir da deformação mecânica induzida pela estrutura. A impedância elétrica do transdutor é então medida como sendo uma razão entre a tensão de excitação e a corrente de saída do mesmo. O princípio de detecção de falhas do método ISHM reside no fato de que qualquer alteração na impedância mecânica da estrutura monitorada irá resultar em uma mudança na impedância elétrica do transdutor a ela acoplado. Deste modo, inicia-se este capítulo conceituando-se as grandezas de impedância mecânica e elétrica.

Em seguida, os principais parâmetros da técnica de monitoramento de integridade estrutural baseado em impedância (ISHM) são apresentados. Detalha-se como é feita a aquisição dos sinais de impedância e as principais métricas de dano associadas. Ao final do capítulo, apresenta-se o estado da arte do método ISHM, acompanhado de uma revisão bibliográfica.

### 2.2. Conceitos de Impedância Mecânica e Elétrica

#### 2.2.1. Impedância Mecânica.

A impedância mecânica é dada pela razão entre a força aplicada num ponto e a velocidade resultante medida, conforme a Eq. (2.1) (Massoud, 1985).

$$Z_m = \frac{F}{\dot{X}(t)} \quad (2.1)$$

onde  $Z_m$  é a impedância mecânica,  $F$  é Força e  $\dot{X}(t)$  é a velocidade. A impedância mecânica é uma quantidade complexa e expressa o quanto a estrutura resiste ao movimento quando se aplica uma força, sendo o recíproco da mobilidade (ou admitância). A impedância mecânica de uma estrutura varia com a frequência. Nas frequências de ressonância, a impedância é baixa, o que significa que menos força é necessária para movimentar a estrutura com uma dada velocidade. Nos circuitos mecânicos translacionais, três grandezas básicas são relacionadas com a impedância mecânica (Palomino, 2008):

- Amortecimento Mecânico ( $R_m$ ): está associado à parte real da impedância, sendo responsável por dissipar toda a potência mecânica entregue ao sistema. Um dispositivo mecânico se comporta como uma resistência mecânica quando, ao ser acionado por uma força, esta é proporcional à velocidade que adquire, Eq (2.2).

$$f(t) = R_m \dot{X}(t) \quad (2.2)$$

No Sistema Internacional de Unidades, o amortecimento mecânico é dado por  $N.s/m$ .

- Massa Mecânica ( $M_m$ ): está associada com a parte imaginária positiva da impedância complexa. Um dispositivo mecânico comporta-se como uma massa mecânica quando, ao ser acionado por uma força, resulta uma aceleração diretamente proporcional à força, Eq.(2.3).

$$f(t) = M_m \frac{d\dot{X}(t)}{dt} \quad (2.3)$$

Sua unidade é o kg.

- Flexibilidade Mecânica ( $C_m$ ): está relacionada com a parte imaginária negativa da impedância complexa. Um dispositivo mecânico se comporta como uma flexibilidade mecânica quando, ao ser acionado por uma força, se desloca proporcionalmente à força, Eq. (2.4).

$$x(t) = C_m f(t) \quad (2.4)$$

Na maioria dos casos, entretanto, prefere-se não trabalhar com a flexibilidade, ou seja, usa-se seu inverso, a rigidez. Assim, define-se rigidez como o inverso da flexibilidade mecânica, Eq. (2.5).

$$K = \frac{1}{C_m} \quad (2.5)$$

Sua unidade é o  $N/m$ .

### 2.2.2. Impedância Elétrica

É denominada como impedância elétrica a oposição que um circuito ou componente eletroeletrônico oferece à passagem da corrente alternada. Trata-se de uma grandeza complexa, e, portanto, dividida em duas partes: a resistência (parte real) e a reatância (parte imaginária) elétrica. A resistência nos circuitos de corrente alternada se comporta de maneira similar à verificada nos circuitos de corrente contínua, sendo expressa como um valor ôhmico positivo. Já a reatância pode ser indutiva, ou seja, é dada por um valor ôhmico não-negativo, ou capacitiva, representada por um valor ôhmico não-positivo (Gibilisco, 2002).

A resistência é uma grandeza escalar, ou seja, é representada em uma escala unidimensional. Assim, para um circuito de corrente contínua, a corrente diminui conforme a resistência aumenta, obedecendo à conhecida Lei de Ohm. O mesmo comportamento é observado num circuito de corrente alternada. Já para a indutância ou capacidade, a situação não é tão simples quanto a observada para a resistência.

A reatância indutiva  $X_L$  de um indutor pode variar desde zero, para o caso de um curto circuito, para uma bobina pequena, chegando a kilohms ou megaohms conforme se vê nas grandes bobinas. Como resistência pura, a reatância indutiva afeta a corrente em um circuito de corrente alternada. Porém, não sendo uma resistência pura, a reatância muda de acordo com a frequência. Isto faz com que seja modificada a forma pela qual a corrente flui em relação à tensão.

Para uma fonte de corrente alternada, se a frequência é dada por  $f$  em Hertz e a indutância da bobina é  $L$  em Henrys, então a reatância indutiva  $X_L$  em ohms é dada pela Eq. (2.6):

$$X_L = 2\pi f L \quad (2.6)$$

A reatância indutiva tem sua contrapartida na forma de reatância capacitiva. Seja um capacitor alimentado por uma fonte de corrente alternada. A frequência da corrente alternada varia de alguns Hertz até muitos mega-hertz. Inicialmente, a tensão entre as duas placas do capacitor irá acompanhar quase que exatamente a reversão de polaridade condicionada pela corrente alternada. Ao se aumentar a frequência, a carga não ficará bem estabelecida em cada ciclo. Quando a frequência se torna muito elevada, o conjunto das placas irá se comportar como um curto-círcuito.

Desta forma, a oposição oferecida pelas duas placas para a corrente alternada é denominada por reatância capacitiva,  $X_C$ , que varia com a frequência. Assim como a reatância indutiva e a resistência, esta também possui sua escala em ohms. Entretanto, os valores são negativos ao invés de positivos e o valor de  $X_C$  aumenta de modo negativo conforme a frequência diminui.

Muitas vezes os valores da reatância capacitiva são descritos de forma absoluta, retirando-se o sinal negativo. Em cálculos de impedância complexa, entretanto, este valor é sempre considerado uma grandeza não-positiva, evitando confusão com a reatância indutiva.

Assim, a reatância capacitiva pode ser considerada como uma imagem espelhada da reatância indutiva, ou seja, é a sua extensão em valores negativos. Para uma dada fonte de corrente alternada de frequência  $f$  em Hertz, com um capacitor  $C$  cuja capacidade é expressa em Farads, a reatância capacitiva  $X_C$  em ohms é obtida pela Eq. (2.7):

$$X_C = \frac{1}{2\pi f C} \quad (2.7)$$

Seja um plano  $RX$  que descreve grandezas complexas. O eixo das abscissas caracteriza os valores para  $R$ , enquanto que, nas ordenadas, são representados os valores para  $X$ . Assim, o plano para  $RX_L$  é o quadrante superior à direita do plano. Similarmente, o plano para  $RX_C$  corresponde ao quadrante inferior à direita dos números complexos. As resistências são representadas por números reais não-negativos, enquanto que a reatância pode ser indutiva, ou seja, valores positivos, ou senão capacitativa, valores negativos, correspondendo aos valores sobre o eixo imaginário. Desta forma, é possível remover do plano complexo a metade esquerda do gráfico, podendo haver somente valores não-negativos para o eixo real.

Os valores descritos neste plano descrevem uma quantidade complexa genérica  $Z = R + jX$  que representa um valor também genérico para a impedância  $Z$  que é descrita por estas duas componentes. Uma impedância resistiva, ou impedância não-reativa, ou ainda

resistência ideal, é representada por um valor de impedância no qual não existe o termo imaginário.

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, esta é uma grandeza complexa.

Da mesma forma como ocorre em um circuito com corrente contínua, a condutância  $G$  aparece em um circuito de corrente alternada. A condutância elétrica é o inverso da resistência e sua unidade é medida em Siemens.

O inverso da reatância é a susceptância  $B$  que também pode ser capacitiva ou indutiva. Combinando a condutância e a susceptância, pode-se formar a admitância complexa  $Y$  que é descrita de forma similar à impedância por  $Y = G + jB$ , sendo o plano complexo desta entidade física semelhante ao da impedância (Gibilisco, 2002).

### **2.3. Técnica do Monitoramento de Integridade Estrutural baseada na Impedância E/M**

Danos que ocorrem normalmente nos equipamentos industriais e nas estruturas em geral podem estar associados a diferentes fatores, tais como atrito, fadiga, impacto, concentração de tensão, corrosão, crescimento de trinca, dentre outras razões. Para o funcionamento adequado do sistema, a falha deve ser localizada e reparada, oportunamente. Um dos processos mais ambiciosos da Engenharia atual é o monitoramento da integridade estrutural em tempo real de componentes de elevado custo ou de grande responsabilidade à vista de sua utilização e custo.

O método de monitoramento de integridade estrutural baseado na impedância tem sido desenvolvido como uma ferramenta promissora para identificação de falhas estruturais em tempo real e é considerado como um método prático de avaliação não destrutiva (Park et al, 2003).

A técnica utiliza transdutores piezelétricos para captar alterações em propriedades dinâmicas estruturais (rigidez, amortecimento e massa). Esta técnica se beneficia de ambos os efeitos piezelétricos, direto e inverso (sensor e atuador), simultaneamente, para obter uma Função de Resposta em frequência (FRF), denominada assinatura de impedância da estrutura. Quando uma pastilha de PZT colada (ou incorporada) a uma estrutura é acionada por um campo elétrico alternado com frequência de excitação elevada (tipicamente acima de 30 kHz), uma pequena deformação é produzida na pastilha e na estrutura monitorada. A resposta desta região às vibrações mecânicas de alta frequência é transferida de volta à pastilha de PZT na forma de uma resposta elétrica. Quando uma trinca ou dano causa uma mudança na resposta dinâmica (alteração de fase, frequência ou magnitude), isto se

manifesta na resposta elétrica do PZT. De modo geral, o tamanho do dano detectável em um material é inversamente proporcional à faixa de frequência do sinal adquirido. Portanto, esta técnica é recomendada para detecção de danos incipientes (Park e Inman, 2005).

O uso do mesmo elemento como sensor e atuador não somente reduz o número de componentes, assim como a quantidade de cabos associados a cada um. (Park *et al*, 2003).

O desenvolvimento teórico que propôs o uso da impedância como técnica para monitoramento estrutural foi inicialmente proposto por Liang; Sun; Rogers (1994) e posteriormente ampliado por Chaudhry *et al* (1995, 1996), Sun *et al* (1995), Park *et al* (1999a), Park; Cudney; Inman(1999b, 2000a, 2000b, 2001); Park *et al* (2003), Giurgiutiu e Zagrai (2000, 2002), Giurgiutiu; Zagrai; Bao (2002), Giurgiutiu *et al* (2003), Soh *et al* (2000), Bhalla; Naidu; Soh (2002), Bhalla *et al* (2002), Moura e Steffen (2004), Pears(2006), Moura(2008), Raghavan e Cesnik (2008), Liu e Paroubally (2009), Grisso e Inman (2010), Baptista; Vieira; Inman (2010), Finzi Neto *et al* (2011) e Palomino (2014).

O modelo que quantifica e descreve o processo de medição é visto na Figura 2.1 para um sistema de 1 g.d.l. As cerâmicas de PZT cujo tamanho é usualmente menor que 25x25x0,1mm, são coladas na estrutura a ser monitorada por meio de um adesivo de alta rigidez, podendo ser uma cola instantânea ou uma resina de epóxi, para garantir uma melhor interação mecânica. O PZT colado à estrutura (ou incorporado a ela) é considerado como uma barra fina em vibração axial devido a uma voltagem alternada aplicada. Uma extremidade da barra é considerada fixa, enquanto a outra extremidade é conectada à estrutura. Esta suposição a respeito da interação em dois pontos discretos é consistente com o mecanismo de transmissão de força do transdutor de PZT colado à estrutura.

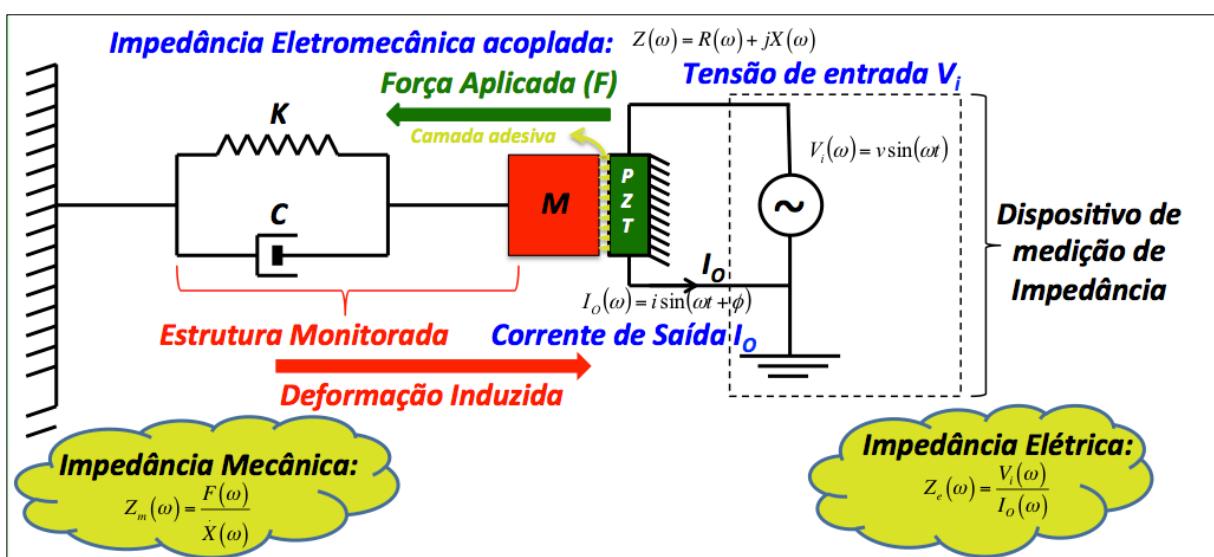


Figura 2.1 – Modelo mecatrônico unidimensional do método de integridade estrutural baseado em impedância.

Na Figura 2.1 as propriedades dinâmicas da estrutura monitorada são:  $M$ , a massa;  $K$ , a rigidez; e  $C$ , o coeficiente de amortecimento. O transdutor é excitado por uma fonte de tensão senoidal  $V_i(\omega)$  com amplitude  $v$  e frequência angular  $\omega$ . Pelo efeito atuador, o transdutor aplica uma força à estrutura que, em resposta, sofre uma deformação induzida. Pelo efeito sensor, esta deformação induzida produz uma corrente de saída  $I_o(\omega)$  com amplitude  $i$  e fase  $\phi$ . Considerando-se que as propriedades do transdutor sejam invariáveis no tempo, qualquer mudança na estrutura irá afetar o valor da impedância do sistema. A impedância mecânica da estrutura monitorada é dada pela razão entre a força aplicada na estrutura  $F(\omega)$  e a velocidade  $\dot{X}(\omega)$  com que a mesma se desloca. Numa analogia com um circuito elétrico, a força corresponde à tensão elétrica e a velocidade corresponde à corrente de saída, resultando assim na impedância elétrica correspondente. A impedância elétrica é então medida por um dispositivo de medição apropriado.

Supondo que as propriedades do PZT não variam com o tempo, pode-se demonstrar que a admitância  $Y(\omega)$  do sistema é uma função combinada da impedância mecânica do atuador,  $Z_a(\omega)$ , e da estrutura,  $Z_s(\omega)$ , sendo dada por (Liang; Sun; Rogers, 1994):

$$Y(\omega) = \frac{I_o(\omega)}{V_i(\omega)} = j\omega \frac{w_a l_a}{h_a} \left[ \varepsilon_{33}^{-T} (1 - j\delta) - \frac{Z_s(\omega)}{Z_s(\omega) + Z_a(\omega)} d_{3x}^2 \bar{Y}_{22}^E (1 + j\eta) \right] \quad (2.8)$$

onde,  $Y(\omega)$ : admitância eletromecânica acoplada (inverso da impedância);  $Z_a(\omega)$  e  $Z(\omega)$ : impedâncias mecânicas do PZT e da estrutura, respectivamente;  $V_i(\omega)$ : voltagem de entrada no atuador PZT;  $I_o(\omega)$ : corrente de saída do PZT;  $w_a$ ,  $l_a$  e  $h_a$ : largura, comprimento e espessura da pastilha de PZT;  $\bar{Y}_{22}^E$ : módulo de Young com campo elétrico nulo;  $d_{3x}$ : constante de acoplamento piezelétrico;  $\varepsilon_{33}^{-T}$  constante dielétrica do PZT com tensão mecânica nula;  $\delta$ : fator de perda dielétrica do PZT;  $\eta$ : fator de perda mecânica do PZT;  $j$  é a unidade imaginária  $\sqrt{-1}$ ;  $\omega$  é a frequência angular.

Logo, a impedância elétrica do transdutor acoplado é escrita como:

$$Z_E(\omega) = \frac{V_i(\omega)}{I_o(\omega)} = \frac{h_a}{j\omega w_a l_a} \left[ \varepsilon_{33}^{-T} (1 - j\delta) - \frac{Z_s(\omega)}{Z_s(\omega) + Z_a(\omega)} d_{3x}^2 \bar{Y}_{22}^E (1 + j\eta) \right]^{-1} \quad (2.9)$$

Cabe ressaltar que no modelo de 1g.d.l. proposto por Liang *et al.* (1994), a influência da camada de adesivo entre o transdutor e a estrutura não é considerada. Em contrapartida, Xu e Liu (2002) propõem um modelo de impedância E/M considerando a camada de adesivo (Figura 2.2). Neste modelo modificado, conclui-se que, com a queda da qualidade da adesão, pode-se notar um deslocamento na frequência de ressonância.

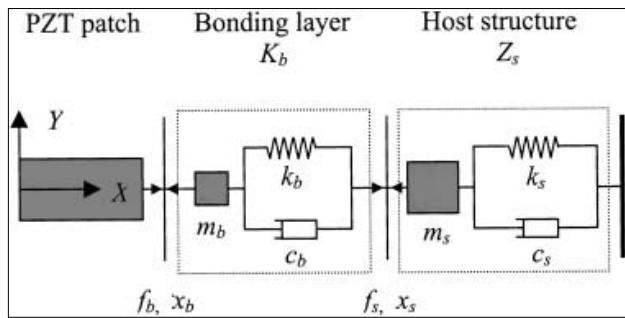


Figura 2.2 – Modelo 1-D do sistema E/M considerando a camada de adesivo.

Fonte: Xu e Liu (2002).

A Eq. 2.9 mostra que a impedância elétrica do PZT é diretamente relacionada com a impedância mecânica da estrutura. Danos eventuais ocasionam mudanças na impedância mecânica da estrutura, alterando características dinâmicas locais. Por isso, os sinais de impedância elétrica do PZT são utilizados para o monitoramento da integridade estrutural do sistema representado pela impedância mecânica da estrutura. Uma extensa investigação sobre os mecanismos de diversos tipos de danos estruturais e sua influência na resposta estática ou dinâmica pode ser encontrada em (Adams, D.E., 2007).

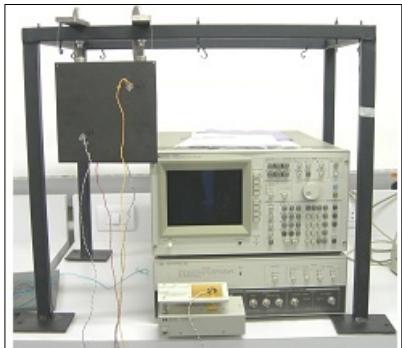
Assim, a função de impedância é uma função complexa da frequência. Sua aquisição é feita com o auxílio de equipamento denominado analisador de impedância ou impedancímetro, que gera o sinal de excitação, adquire o sinal de resposta (corrente elétrica do transdutor) e processa numericamente os dois sinais para a obtenção da função de impedância na faixa de frequências de interesse.

Os analisadores de impedância convencionais, no entanto, não são portáteis e são muito caros, além de serem grandes e pesados, o que impõe dificuldades tanto na pesquisa da técnica em condições de laboratório como em sua implementação prática. Para eliminar estes problemas, a equipe de pesquisa em SHM do *LMEst*, da FEMEC/UFU desenvolveu um impedancímetro com tecnologia inovadora, de baixo custo, versátil e de processamento rápido (Finzi Neto *et al.*, 2011). Trata-se do resultado de um projeto de desenvolvimento tecnológico e industrial realizado em parceria com uma grande empresa brasileira do setor aeronáutico. Deve-se destacar que as pesquisas com esta técnica de SHM realizadas hoje

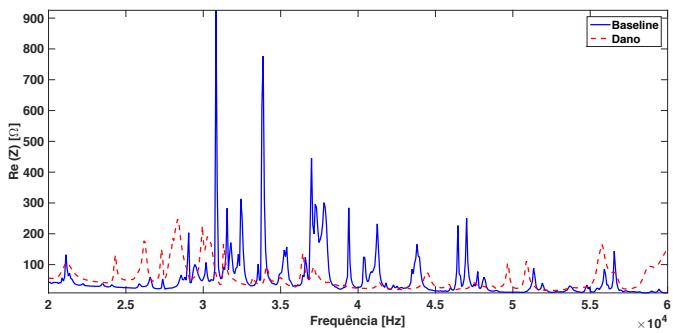
pelo LMEst foram iniciadas em 1999 através de uma cooperação com a *Virginia Polytechnic Institute (Virginia Tech)*, com o apoio do Prof. Dr. Daniel J. Inman, então diretor do CIMSS (*Center for Intelligent material Systems and Structures*) naquela ocasião.

O impedancímetro usado pela equipe SHM do LMEst é capaz de realizar um número muito maior de medidas para o cálculo de médias em um tempo total menor (aproximadamente 10k medições realizadas em 5 min) quando comparado a um analisador de impedância convencional. Detalhes sobre a arquitetura do *hardware* são explicados em Finzi Neto *et al.*, 2011. A magnitude dos sinais de excitação e resposta é medida e calculada diretamente pelo *hardware*, através de simples manipulações matemáticas. Assim, as características dos sinais são extraídas pelo *hardware* sem que seja necessário adquiri-los primeiramente no domínio do tempo.

A Figura 2.3 ilustra um resultado típico de medição do sinal da impedância quando a estrutura sofre alguma alteração estrutural, tal como um dano. O primeiro sinal, obtido na condição da estrutura intacta, é geralmente denominado de *baseline*, que servirá como referência para comparação com a assinatura adquirida na condição de teste.



(a) – Estrutura monitorada e analisador de impedância



(b) – Sinais de impedância adquiridos.

Figura 2.3 – Exemplo do sinal obtido com o método de impedância eletromecânica.

As assinaturas de impedância fornecem uma informação qualitativa acerca da integridade estrutural. Para se quantificar a diferença entre os sinais, convém utilizar as chamadas *métricas de dano* que serão detalhadas na próxima seção deste capítulo. A impedância do elemento de PZT é predominantemente capacitiva, conforme se verifica na parte imaginária do sinal de impedância. Este termo é muito mais sensível a variações de temperatura se comparado com a parte real do sinal (Raju, 1997). Assim sendo, a parte real do sinal é geralmente utilizada na maioria das aplicações. A influência da variação

temperatura na parte imaginária da impedância é discutida nos trabalhos de Raju (1997), Park *et al.* (1999a), Moura Jr. (2008) e Rabelo (2014).

Nas últimas duas décadas vários trabalhos têm sido desenvolvidos para demonstrar a potencialidade da técnica de monitoramento de integridade estrutural baseado na impedância eletromecânica. Vários exemplos de aplicações podem ser encontrados na literatura científica. Dentre esses, alguns trabalhos que revisam o estado da arte da técnica de SHM baseado em impedância podem ser encontrados em Park, *et al.* (2003), Gyekenyesi *et al.* (2005), e Annamdas e Soh (2010).

Algumas aplicações desenvolvidas na Faculdade de Engenharia Mecânica da UFU são ilustradas na Figura 2.4 a seguir. Vale destacar que algumas das aplicações abaixo foram desenvolvidas em parceria com o CIMSS, Virginia Tech, nos Estados Unidos da América.

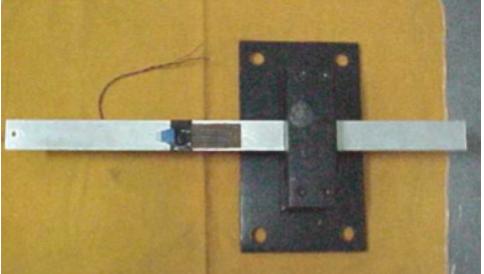
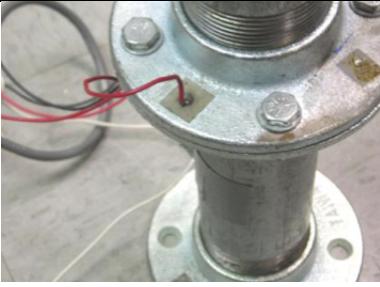
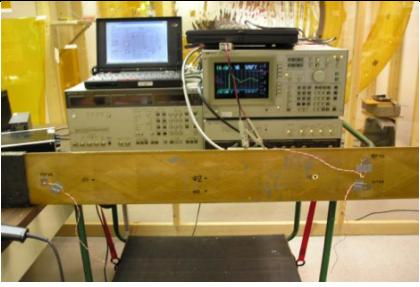
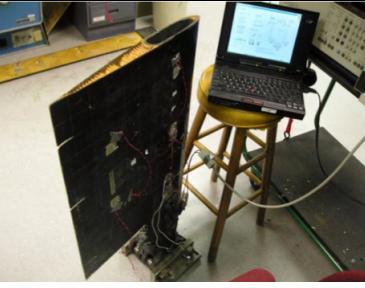
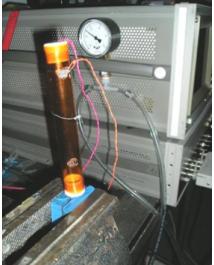
	
<p>(a) – Monitoramento de viga com fissuras.</p> 	<p>(b) – Monitoramento de adição de massas.</p> 
<p>(c) – Estrutura tubular flangeada para monitoramento de tensão.</p> 	<p>(d) – Detecção de furos em pá do rotor de um helicóptero civil.</p> 
<p>(e) – Detecção de furos e fissuras em pá de rotor de helicóptero militar.</p> 	<p>(f) – Monitoramento de fissuras e perda de rebites em painel aeronáutico.</p> 
<p>(g) – Monitoramento de um pilone de um F-15.</p> 	<p>(h) – Monitoramento de estrutura inflável de satélite.</p>

Figura 2.4 – Ilustração de várias aplicações da técnica de monitoramento de integridade estrutural baseada em impedância (Fontes: Moura e Steffen, 2005; Moura Jr., 2008).

## 2.4. Parâmetros essenciais de projeto da técnica ISHM

### 2.4.1. Frequência inicial

A sensibilidade da técnica em detectar danos estruturais está relacionada com a banda de frequência selecionada. Um dano muito pequeno na estrutura não provoca mudanças significativas de rigidez, massa e amortecimento da estrutura. Portanto, é necessário um comprimento de onda de excitação suficientemente pequeno, de forma que consiga detectar o dano. De modo geral, a faixa de frequência tipicamente usada no método de impedância varia de 20 kHz a 250 kHz.

### 2.4.2. Faixa de frequência e região de sensoriamento

A faixa de frequência a ser analisada depende de como a estrutura responde à excitação. Desta forma, ela é geralmente determinada experimentalmente, onde várias faixas são candidatas. São características desejáveis de uma faixa de frequência de análise a grande densidade de picos, baixa variação da curva em medidas sequenciais sem dano, e alta sensibilidade ao dano verificada pelo manuseio da peça.

Embora seja um método bastante eficaz, Moura e Steffen (2004) apresentam ainda um procedimento estatístico que pode ser utilizado para obtenção das melhores configurações para os ensaios de impedância eletromecânica. No método baseado em impedância, as faixas de frequência que contém de 20 a 30 picos são geralmente as escolhidas, pois o número de picos implica numa resposta dinâmica mais rica ao longo da faixa de frequência. Como exemplo, pode-se observar a Figura 2.5, onde se apresenta a resposta dinâmica na faixa de frequência entre 10 kHz e 250 kHz medida em uma viga de alumínio. Destacam-se duas faixas onde um maior número de picos é verificado (10 kHz a 45 kHz e 100 kHz a 175 kHz).

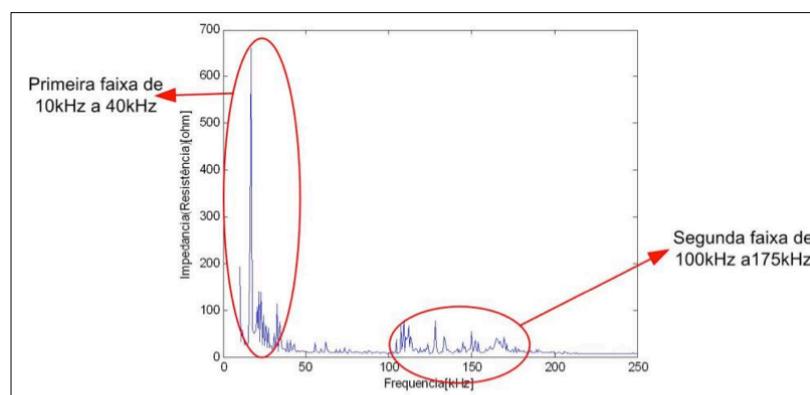


Figura 2.5 – Exemplo de método para escolha da faixa de frequência. Fonte: (Palomino, 2012)

As faixas de frequência mais baixas cobrem uma região de sensoriamento maior, enquanto que faixas de frequência mais altas podem localizar um dano (Sun *et al.*, 1995). Uma das vantagens da resposta em alta-frequência é que, nestas frequências, o comprimento de onda do sinal de excitação é suficiente para detectar até trincas pequenas ou incipientes, que podem potencialmente crescer e causar falhas catastróficas em estruturas aeronáuticas, por exemplo (Park e Inman, 2005). As experiências adquiridas com a técnica ISHM indicam que, nas frequências mais altas (acima de 100 kHz), a influência das condições de contorno é minimizada, priorizando as alterações localizadas. Por outro lado, as mudanças em condições de contorno geralmente são mais perceptíveis em faixas de frequência mais baixas (em torno de 20 kHz).

Quanto à região sensível para identificação de mudanças estruturais, Park *et al.* (2003) dizem que, para um simples PZT, o mesmo pode identificar uma falha localizada em até uma distância (radial) de 0,4 m em estruturas compósitas e até 2 m em simples vigas metálicas.

As medições da impedância elétrica não podem confundir os dois tipos de picos que aparecem no espectro de frequência, ou seja, um tipo tem a ver com as frequências de ressonância da estrutura; outro tipo é encontrado para a frequência de ressonância da pastilha de PZT. Para estruturas leves, é melhor evitar a ressonância da pastilha de PZT quando selecionar a faixa de frequência. Isso porque a magnitude da resposta é muito maior, quando comparada com a da ressonância da estrutura. (Park *et al.*, 2000b).

#### 2.4.3. Aquisição do sinal

O modo mais tradicional para medir a impedância eletromecânica de uma estrutura inteligente é empregando um analisador de impedâncias tal como o HP4194A. No entanto, como esse equipamento tem custo muito elevado e pesa cerca de 30 kg, pesquisadores têm buscado formas alternativas para se realizar esta tarefa. Por este motivo, um impedancímetro portátil e de baixo custo foi desenvolvido para as medições de impedância no laboratório LMEst da FEMEC/UFU, conforme mencionado anteriormente na seção 2.3.

Antes de se medir os sinais de resposta em frequência, deve-se informar ao sistema de medição alguns parâmetros de configuração, tais como:

- Número de Sensores: Definido conforme a quantidade de sensores que são utilizados.
- Frequência inicial e frequência final: Determinadas conforme a metodologia de escolha da faixa de frequências. Estes dois parâmetros definem a *Largura de Banda* (*BW: Bandwidth*) da medição.

- Número de pontos ( $n$ ): Define a resolução em frequência da assinatura de impedância. Assim, a resolução em frequência  $df$  é dada por:

$$df = \frac{BW}{n} \quad (2.10)$$

- Nível de oscilação: Geralmente em torno de 1V;
- Número de médias: Em um analisador de impedâncias como o HP4194A, pode-se configurar até 8 médias. No entanto, utilizando-se o circuito medidor de impedâncias desenvolvido pela equipe do LMEst, pode-se obter em curto tempo sinais com mais de 2 mil médias para cada ponto frequencial. Esta técnica é útil para reduzir níveis de ruído de medição ou ruído aleatório caso a estrutura esteja operando enquanto as medições são realizadas.

Caso a estrutura possua mais de um tipo de transdutor, pode-se configurar no software de aquisição diferentes níveis de excitação para cada tipo de transdutor, conforme suas características específicas de acoplamento eletromecânico.

#### 2.4.4. Avaliação de dano

Enquanto os gráficos das assinaturas de impedância servem para fornecer uma abordagem qualitativa para a análise, a avaliação quantitativa de dano é feita através do uso de *métricas de dano* escalares, também chamadas de *índices de dano*.

Para se quantificar um dano usando o método da impedância, os dados são adquiridos antes que qualquer dano tenha ocorrido numa estrutura. Esta medição é chamada de *baseline*. Periodicamente, a impedância do sensor é medida e então comparada com a impedância da *baseline* para determinar uma possível alteração estrutural na vizinhança deste sensor (Sun, et al., 1995). Esta determinação é quantificada em uma *métrica de dano*, frequentemente através de uma equação estatística. Desta forma, juntamente com um valor limiar para o dano previamente definido, pode-se afirmar se ocorreu ou não um dano estrutural.

No trabalho realizado por Palomino (2008) são encontradas várias métricas de dano, de forma comparativa. O presente trabalho utilizará as métricas de dano conhecidas como RMSD e algumas de suas variantes, bem como a CCD, por serem as mais utilizadas na literatura e por apresentarem resultados de interesse, especialmente no que diz respeito às influências de variação de temperatura na técnica de SHM baseada em impedância.

O modelo estatístico mais utilizado na literatura é o desvio médio da raiz quadrada (RMSD). Sua definição é descrita pela Eq. (2.11):

$$RMSD = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left\{ \frac{[\operatorname{Re}(Z_{1,i}) - \operatorname{Re}(Z_{2,i})]^2}{n} \right\}} \quad (2.11)$$

onde  $\operatorname{Re}(Z_{1,i})$  é a parte real da impedância da medição sem dano em uma frequência  $i$ ,  $\operatorname{Re}(Z_{2,i})$  é a parte real da impedância em uma frequência  $i$  para uma nova configuração da estrutura, e  $n$  é o número total de pontos freqüenciais usados na comparação. O cálculo é feito na faixa de frequência previamente definida. A métrica RMSD mede a variação da impedância em cada ponto freqüencial e em seguida procede a soma do resultado.

Uma outra métrica muito utilizada na literatura é o desvio do coeficiente de correlação (CCD). Sua definição, Eq. (2.12), envolve a diferença envolvendo o coeficiente de correlação entre uma medição e a referência (Giurgiutiu;Zagrai, 2002).

$$CCD = 1 - CC \quad (2.12)$$

onde  $CCD$  é o desvio do coeficiente de correlação e  $CC$  é o coeficiente de correlação, dado pela Eq. (2.13):

$$CC = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{[\operatorname{Re}(Z_{1,i}) - \operatorname{Re}(\bar{Z}_1)][\operatorname{Re}(Z_{2,i}) - \operatorname{Re}(\bar{Z}_2)]}{S_{Z_1} S_{Z_2}} \quad (2.13)$$

onde  $\operatorname{Re}(Z_{1,i})$  é a parte real da impedância da medição sem dano em uma frequência  $i$ ,  $\operatorname{Re}(Z_{2,i})$  é a parte real da impedância da medição de teste em uma frequência  $i$ ,  $n$  é o número total de pontos freqüenciais usados na comparação,  $\operatorname{Re}(\bar{Z}_1)$  e  $\operatorname{Re}(\bar{Z}_2)$  são as médias das medições para as duas condições analisadas;  $S_{Z_{1,i}}$  e  $S_{Z_{2,i}}$  são os desvios-padrão para cada ponto freqüencial das medições, para as duas condições.

Quando o coeficiente de correlação é igual a 1 os sinais têm total correlação. Quanto maior é a diferença entre os sinais, menor é o valor de CC.

## 2.5. Autodiagnóstico de sensores através da curva de susceptância

Os sensores incluídos em um sistema SHM são frequentemente afixados a estruturas com o objetivo de identificar falhas estruturais. Contudo, estes sensores também podem ser danificados quando do monitoramento estrutural. O diagnóstico de sensores é um campo de estudos direcionado à identificação de sensores com falha. Ao mesmo tempo em que o desenvolvimento de sistemas SHM é importante devido a fatores críticos tanto de segurança como econômicos, o desenvolvimento do diagnóstico da integridade dos sensores para estes SDD podem ser igualmente relevantes. Este campo de estudos permite que um sistema de SHM possa inferir sobre a integridade dos sensores, distinguindo os eventos relacionados a danos nos sensores, dos eventos relacionados a falhas estruturais propriamente ditas.

Grisso e Inman (2010), propuseram uma técnica para identificar a integridade dos sensores piezelétricos utilizados no método ISHM através das curvas de susceptância. Das expressões para a impedância e admitância apresentadas na seção 2.2, pode-se mostrar que a susceptância é obtida através da Eq. (2.14):

$$B(\omega) = \text{Im}[Y(\omega)] = -\frac{X(\omega)}{R(\omega)^2 + X(\omega)^2} \quad (2.14)$$

onde  $R(\omega)$  é a resistência (parte real da impedância) e  $X(\omega)$  é a reatânciá (parte imaginária da impedância).

Deste modo, ao testar diferentes condições de descolamento de sensores e quebra de sensores, foi obtido o seguinte resultado, ilustrado na Figura 2.6:

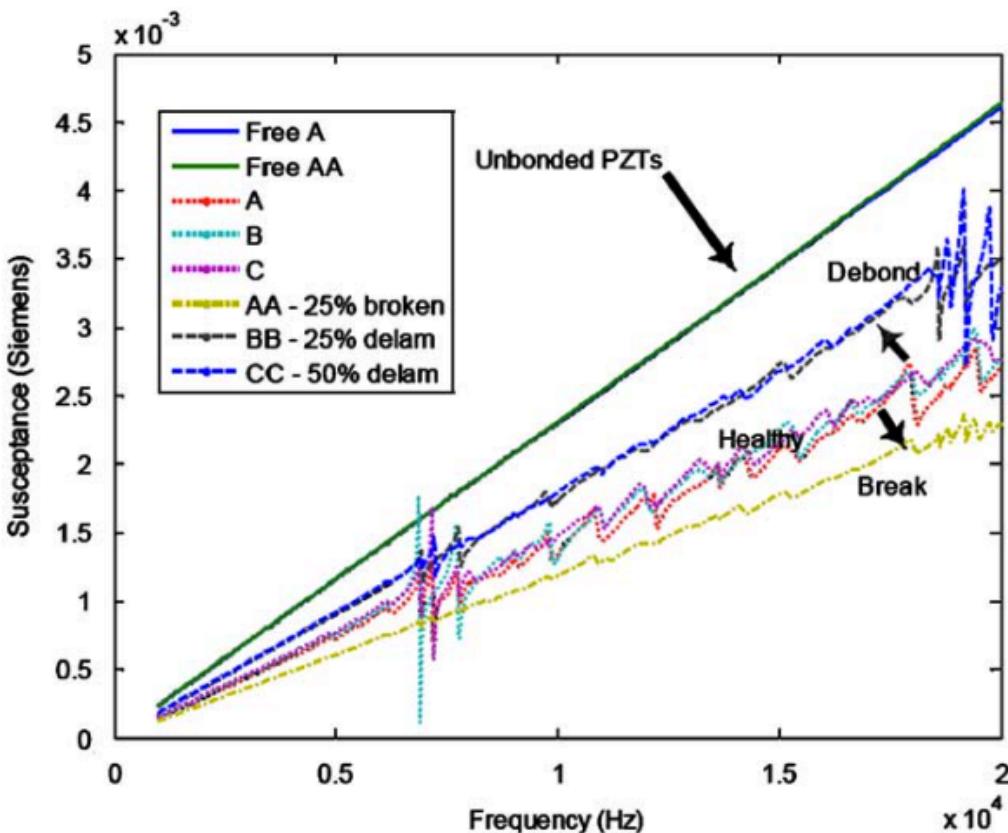


Figura 2.6 – Efeito da integridade dos sensores na curva de susceptância.

Fonte: (Grisso e Inman, 2010)

Observa-se que a integridade dos sensores afeta o coeficiente angular da curva de susceptância medida. Propõe-se no trabalho de Grisso e Inman (2010), uma técnica de compensação do efeito da variação da temperatura para o sucesso da implementação deste método, uma vez que a susceptância também é afetada pela variação da temperatura.

Deste modo, mostra-se também que é possível implementar o autodiagnóstico dos sensores com o método de monitoramento de integridade estrutural baseado na impedância.

## 2.6. Monitoramento de integridade estrutural (SHM) e ensaios não-destrutivos (END)

Métodos de ensaios não-destrutivos (END) têm sido usados tradicionalmente para avaliar a integridade de uma estrutura. A Sociedade Americana de Ensaios Não-Destrutivos (*American Society of Nondestructive Testing*) define um END como “o exame de um objeto usando tecnologia que não afete sua utilidade futura”. Estas técnicas de END incluem

inspeção visual, inspeção ultrassônica, métodos que envolvem corrente parasita, emissão acústica e técnicas de imagem, tais como a radiografia por raio-X e a termografia (Boller e Staszewski, 2004). Estes métodos não requerem sensores embarcados e podem fornecer uma avaliação mais completa da integridade estrutural quando comparados aos métodos que usam sensores de SHM embarcados. Entretanto, estes métodos são frequentemente trabalhosos e podem requerer desmontagem parcial ou remoção de componentes aeronáuticos e dificilmente poderiam ser embarcados. Para reduzir custos de manutenção e maximizar a disponibilidade da aeronave, o uso de métodos de END é geralmente limitado para períodos de inspeção programada, ou quando suspeita-se de um dano ou degradação estrutural (Yuan, 2016).

Tais como os métodos de END empregados em solo, os métodos de SHM são usados para avaliar a segurança e confiabilidade de veículos aeroespaciais. Entretanto, tecnologias de SHM embarcadas permitem inspeções periódicas ou contínuas, mesmo quando o veículo se encontra em operação, reduzindo custos de manutenção e tempo de inatividade. Métodos de SHM avaliam a capacidade de um componente ou estrutura desempenhar sua função pretendida, fornecendo uma avaliação da integridade estrutural e, ao mesmo tempo, requerendo uma compreensão de sua condição ambiental e seu uso ao longo do tempo. O monitoramento contínuo tem a vantagem de detectar eventos discretos, tais como impactos, e pode monitorar a progressão de um dano, porém, tipicamente requer uma rede de sensores. Embora isto possa ser uma restrição para implementação em veículos aeroespaciais, considerando que há restrições de peso, custo e energia, o método ISHM utiliza sensores leves, pouco intrusivos e que requerem pouca energia para operarem, podendo inclusive ser alimentados por uma bateria de 16,8 Volts (Corrente Contínua – CC) de capacidade máxima de carga.

A Tabela 2.1 apresenta um comparativo entre as tecnologias de END e SHM. A inspeção ultrassônica permite a interrogação da estrutura baseada em mudanças na propagação de onda devido ao dano. Métodos ultrassônicos (tais como o método ISHM e das ondas de Lamb) usam uma fonte de excitação de alta frequência. No método das ondas de Lamb, estas são acopladas a um ou mais receptores que medem alterações no sinal devido a atenuação, reflexão, ou outras características. Estes métodos podem detectar precisamente o dano dentro da região de cobertura dos sensores (Rocha, 2017).

Tabela 2.1. Comparação de métodos de END e SHM para detecção e caracterização de dano (Adaptado de Yuan, 2016).

Atributo	END	SHM
Aplicação	Localizar e quantificar dano	Localizar e quantificar dano, monitorar componentes críticos, reduzir custos operacionais e de manutenção, melhorar desempenho e eficiência, prolongar a vida útil
Posicionamento	Locais fixos em laboratórios ou portátil para uso no campo	Embarcado, frequentemente usado em locais de difícil acesso
Intervalos de inspeção	Pouco frequente; dados adquiridos durante inspeções periódicas	Dados adquiridos continuamente ou sob demanda
Armazenamento de dados	Dados salvos durante inspeção	Dados salvos em nuvem para posterior recuperação, ou salvos localmente
Nível de automação	Geralmente manual; intervenção humana requerida	Geralmente automatizado
Cobertura	Dano localizado próximo ao sensor, ou escaneado para uma cobertura mais ampla	Dano localizado usando um sensor ou rede de sensores para uma cobertura mais ampla
Precisão	Altamente preciso	Moderadamente a altamente preciso; depende da faixa de frequência utilizada
Tamanho do equipamento	Moderado (pegado à mão) a grande (equipamento de ensaio em laboratório)	Sensores e hardware de sistema de detecção de danos pequenos
Portabilidade	Portátil ou de local fixo	No local ( <i>In situ</i> )
Peso	Moderado a pesado	Leve a moderado
Custo de hardware	Moderado a alto	Baixo a moderado
Custo operacional	Moderado a alto; depende dos intervalos de inspeção periódica.	Baixo a moderado; não vinculado a inspeções periódicas.

Os END de corrente parasita usam uma corrente alternada que passa através de uma bobina para gerar um campo magnético que induz uma corrente parasita no material sob inspeção. Esta corrente opõe-se ao campo magnético alternado, e o sistema mede como resultado a mudança na impedância da bobina. Como as correntes parasitas são afetadas por dano no material, este método fornece um meio eficaz para detecção de danos. Entretanto, este método é apenas eficiente para detectar danos próximos ao núcleo; portanto, a bobina deve ser movimentada para detectar um dano através de uma superfície maior.

Métodos de imagem, tais como radiografia e termografia, usam raios-X e raios- $\gamma$  para identificar o dano, baseando-se na absorção e transmissão destas ondas. Estes métodos permitem que amplas superfícies sejam observadas rapidamente, porém são caros e menos sensíveis que outros métodos de detecção de danos (Boller e Staszewski, 2004).

Métodos de Emissão Acústica (EA) são usados para detectar mudanças em um material resultantes de forças mecânicas, gradientes de temperatura, ou propagação de trincas. Sensores de EA detectam ondas elásticas transientes geradas pela rápida dispersão de energia no material. A EA é um método passivo que é efetivo na detecção de condições transientes e pode ser útil na detecção e localização de impactos ou progressão de dano em materiais. Contudo, os sensores de EA devem estar em operação quando o evento ocorre. (Beattie, 2013)

Finalmente, os custos relativos à técnica da impedância são muito inferiores aos outros métodos que utilizam altas frequências como o ultrassom, além de serem capazes de monitorar uma área maior, devido a sua sensibilidade (Park *et al*, 2003).

As principais vantagens do método de impedância eletromecânica são a seguir listados:

- A técnica não é baseada em nenhum modelo, por isso pode ser usada em estruturas complexas;
- A técnica usa pequenos atuadores para monitorar locais de difícil acesso;
- Os transdutores de PZT mostram excelentes características em condições normais de trabalho: têm uma ampla faixa de linearidade, resposta rápida, pouco peso, alta eficiência de conversão de energia e boa estabilidade a longo prazo;
- Por operar em altas frequências, a técnica é muito sensível a pequenas alterações locais (danos incipientes);
- Os dados de saída do SDD são de fácil interpretação;
- A técnica pode ser implementada para o monitoramento de integridade *on-line*;
- A técnica é adaptada para o monitoramento contínuo, que pode reduzir o número de paradas para manutenção.

Em um trabalho recente, Palomino *et al.*, (2012) investigaram a influência de parâmetros geométricos e ambientais na técnica da impedância eletromecânica. Neste estudo, investigou-se a influência da geometria dos sensores utilizados, a influência do campo magnético, meio iônico, temperatura e pressão. Dentre os aspectos investigados, aqueles que mostraram influência significativa sobre a técnica são a temperatura e o meio iônico. Já a pressão, a geometria dos sensores e o campo magnético mostraram pouca influência nas assinaturas de impedância. Para compensar o efeito do meio iônico, pode-se aplicar uma camada isolante para fornecer uma proteção ao sensor. Já para o efeito da temperatura, faz-se necessário o uso de técnicas de compensação para evitar a ocorrência de falsos diagnósticos. Isto evidencia uma limitação atual da técnica da impedância eletromecânica, motivando o tema central desta tese.

Em resumo, a técnica baseada na impedância eletromecânica, embora requeira técnicas de normalização de dados, é capaz de fornecer meios eficientes de detectar danos incipientes em estruturas complexas. Enquanto cada uma das técnicas de identificação de dano existentes tem seu valor e mérito, a técnica baseada na impedância é considerada promissora; sendo assim, a pesquisa descrita nesta tese vai no sentido de explorar seu potencial à vista de um sistema de monitoramento completamente autônomo e robusto.

## CAPÍTULO III: NORMALIZAÇÃO DE DADOS APLICADA À TÉCNICA DE SHM BASEADA EM IMPEDÂNCIA

### 3.1. Introdução

O monitoramento de integridade estrutural (SHM) é o processo de implementação de uma estratégia de detecção de danos para estruturas aeroespaciais, civis e mecânicas. Sua implementação depende de atributos específicos da aplicação, por exemplo, relacionados a diferenças da escala do tempo na qual o dano evolui.

A longo prazo, a saída do processo de SHM é informação periodicamente atualizada com relação à capacidade da estrutura desempenhar a função (para a qual foi projetada), à luz do inevitável envelhecimento e degradação resultante das condições operacionais. Em curto prazo, caso ocorra um evento extremo, tal como um terremoto ou carregamento explosivo, o SHM é usado para rápido escaneamento estrutural e busca fornecer, quase em tempo real, informações confiáveis acerca da integridade da estrutura.

O processo de SHM é composto dos seguintes passos (Farrar e Worden, 2012):

- 1. Avaliação operacional:** Definem-se o(s) dano(s) a ser(em) detectado(s) e passa-se a responder perguntas acerca de problemas relacionados à implementação do Sistema de Detecção de Danos (SDD) acoplado à estrutura.
- 2. Aquisição e pré-processamento dos dados:** Definem-se o hardware e software envolvidos desde o dispositivo de medição até a escolha dos sensores usados no processo de extração de características.
- 3. Seleção e extração de características:** Trata-se do processo de identificar as características sensíveis ao dano a partir dos dados adquiridos.
- 4. Tomada de decisões probabilística:** Uso de métodos estatísticos para transformar características extraídas em decisões de nível de desempenho atualizadas.

Conforme se definem as condições operacionais e ambientais nas quais a estrutura estará sujeita no passo 1, torna-se fundamental a aplicação de técnicas de depuração de dados, normalização de dados, fusão de dados e condensação de informação para que os passos 2 a 4 sejam executados com sucesso.

A normalização de dados diz respeito às técnicas de processamento dos sinais do SDD necessárias para distinguir influências externas, causadas por variações ambientais e/ou operacionais, dos efeitos causados pela ocorrência de danos estruturais.

### 3.2. Problemas devidos à variação ambiental e/ou operacional

As mudanças ambientais e/ou operacionais às quais as estruturas que se deseja monitorar estão sujeitas podem causar mudanças na resposta medida, obtida a partir do sistema de aquisição de dados do sistema de SHM. Desta forma, torna-se imperativo o uso de técnicas de pós-processamento que permitam ao SDD distinguir mudanças nas leituras dos sensores causadas por dano das mudanças causadas por condições ambientais. Define-se o processo de discriminação de mudanças nas respostas causadas por dano daquelas causadas pela variação de condições ambientais e/ou operacionais como “**normalização de dados**”. Sem esta discriminação, o processo de SHM irá produzir indicações falsas de ocorrência de danos (falsos-positivos).

### 3.3. Influência da variação da temperatura para sistemas ISHM

Os efeitos da variação da temperatura têm sido reportados na literatura como um dos problemas práticos mais críticos e desafiadores da técnica de SHM baseado na impedância eletromecânica (Palomino *et al.*, 2012). Daí surge a necessidade de implementar-se um método para compensação destes efeitos, garantindo a obtenção de sistemas de SHM mais robustos, com capacidade de emissão de diagnósticos mais confiáveis.

Sabe-se que os materiais piezelétricos dependem fortemente da temperatura com relação a suas propriedades básicas. Dentre as constantes relacionadas a propriedades dependentes da temperatura em materiais piezelétricos, a constante dielétrica,  $\epsilon_{33}^T$ , exibe o efeito mais significativo na impedância elétrica. Esta modifica o primeiro termo da Eq. 2.9, a impedância capacitiva, causando um deslocamento do *baseline* da impedância elétrica. Além desta constante, a constante de acoplamento piezelétrico,  $d_{3x}$ , também sofre influência significativa com a variação da temperatura. Um estudo mais aprofundado sobre as limitações dos materiais piezelétricos (envelhecimento natural, instabilidade das propriedades em função de variações de temperatura e limites de excitação elétricos e mecânicos) pode ser encontrado em (ATCP Engenharia Física, 2004).

Os transdutores piezelétricos também são dispositivos piroelétricos e magnetoelétricos (Baptista *et al.*, 2014), isto é, o deslocamento elétrico  $D$  do efeito piezelétrico direto e a deformação mecânica  $S$  do efeito piezelétrico inverso são dependentes tanto do campo magnético  $H$  como da temperatura  $\theta$ . Embora seja seguro desprezar o efeito do campo magnético, os materiais piezelétricos também são significativamente piroelétricos, isto é, a

distribuição das cargas elétricas nesses materiais depende não só da deformação mecânica, mas também da temperatura. Assim, mudanças de temperatura causam variações correspondentes na impedância elétrica do sensor (Palomino *et al.*, 2012).

Em um dos primeiros trabalhos relacionados a este assunto, Park *et al.*, (1999a) mostram que a parte real da impedância elétrica é mais reativa a um dano estrutural, além de ser menos influenciada por variações de temperatura, quando comparada ao módulo ou parte imaginária da impedância elétrica. Assim, a parte real da impedância (impedância resistiva) é em geral mais utilizada na detecção de danos. A Figura 3.1 mostra a mudança da parte real da impedância resistiva de um PZT PSI 5A livre com a mudança de temperatura. Assim, como as alterações na parte real da impedância são menos sensíveis às variações de temperatura, o método de monitoramento de integridade estrutural baseado na impedância utiliza em geral a impedância resistiva para a detecção de danos, buscando assim minimizar os efeitos da temperatura nos sinais medidos.

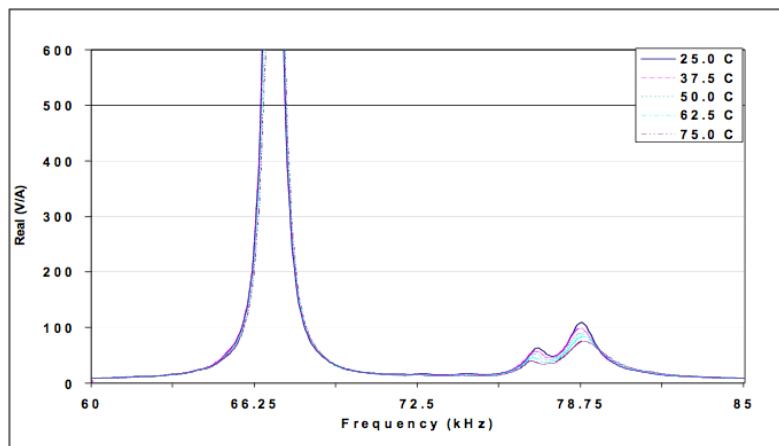


Figura 3.1 - Para um PZT PSI 5-A livre, um aumento na temperatura leva a uma pequena mudança de magnitude na impedância resistiva (Fonte: Park *et al.*, 1999a).

No caso de um transdutor piezelétrico conectado à estrutura a ser monitorada, o módulo de Young da estrutura, e consequentemente a impedância da estrutura, variam levemente com a temperatura e a expansão térmica do material irá induzir tensões nas estruturas restritas. Em estruturas complexas, a modelagem analítica dos efeitos da temperatura em alta frequência seria uma tarefa árdua devido aos cálculos de impedância mecânica e devido à complexidade dos modelos termoeletromecânicos constitutivos da interação estrutura-PZT. Por esta razão, uma abordagem empírica é geralmente utilizada no método da impedância para estudar o efeito da temperatura (Krishnamurthy; Lalande; Rogers 1996).

Quanto à camada de cola, trata-se da única interface para transferência de deformação mecânica entre a pastilha de PZT e a estrutura. A variação da temperatura implica na alteração da rigidez da camada de cola. Estudos analíticos e experimentais sugerem que, caso a espessura da camada de cola seja mais fina do que um-terço da espessura da pastilha de PZT, seu efeito pode ser desprezado. Além disso, caso a camada de cola exceda esse critério, frequências de excitação acima de 100 kHz deveriam ser evitadas (Yang; Lim; Soh, 2008). Na assinatura da impedância elétrica medida em uma estrutura monitorada isto se manifesta como um deslocamento dos picos de ressonância.

Felizmente, existe uma diferença importante entre o efeito causado pela variação da temperatura e o efeito causado por um dano estrutural na impedância. Mudanças de temperatura causam, ao mesmo tempo, um deslocamento horizontal nas frequências de ressonância, bem como um deslocamento vertical na assinatura de impedância. Além disto, existe variação nas amplitudes dos picos de ressonância. Por outro lado, a variação na impedância causada por um dano estrutural é de certa forma “local e abrupta”, mudando a forma da assinatura. Esta característica permite isolar e reduzir o efeito da temperatura, através de modificações nas lógicas de pós-processamento (Sun *et al.*, 1995).

Neste trabalho, para investigar o efeito da variação da temperatura na técnica de SHM baseada na impedância, foi utilizada uma câmara climática capaz de controlar tanto a temperatura como a umidade (ESPEC, modelo EPL-4H), ilustrada na Fig. 3.2:



Figura 3.2 – Câmara climática utilizada para controle de temperatura e umidade.

### **3.4. Investigação do efeito da temperatura em uma placa retangular de alumínio**

Nesta seção, o efeito da temperatura sobre a impedância elétrica de uma cerâmica de PZT colada em uma placa de alumínio é investigado experimentalmente. A Figura 3.3

mostra a placa de dimensões (305 mm x 305 mm x 3 mm), com uma cerâmica de PZT 5H colada em sua superfície (diâmetro 15 mm x 1 mm de espessura), devidamente posicionada em seu centro. O adesivo utilizado para colagem do transdutor (Hysol EA 9320NA) possui desempenho aprovado para uso industrial na faixa de temperatura de -55°C a +82°C. A placa foi instalada de modo que ficasse suspensa no interior da mesma, numa condição livre-livre. As medições foram realizadas com 2048 médias por ponto frequencial, realizadas internamente no *hardware* do impedancímetro.

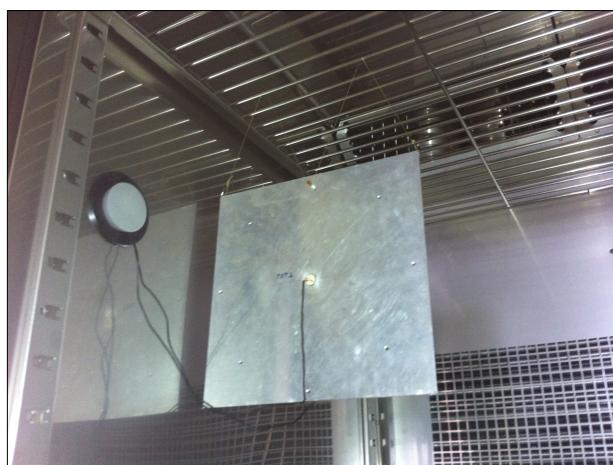


Figura 3.3 – Placa retangular de alumínio posicionada na câmara climática.

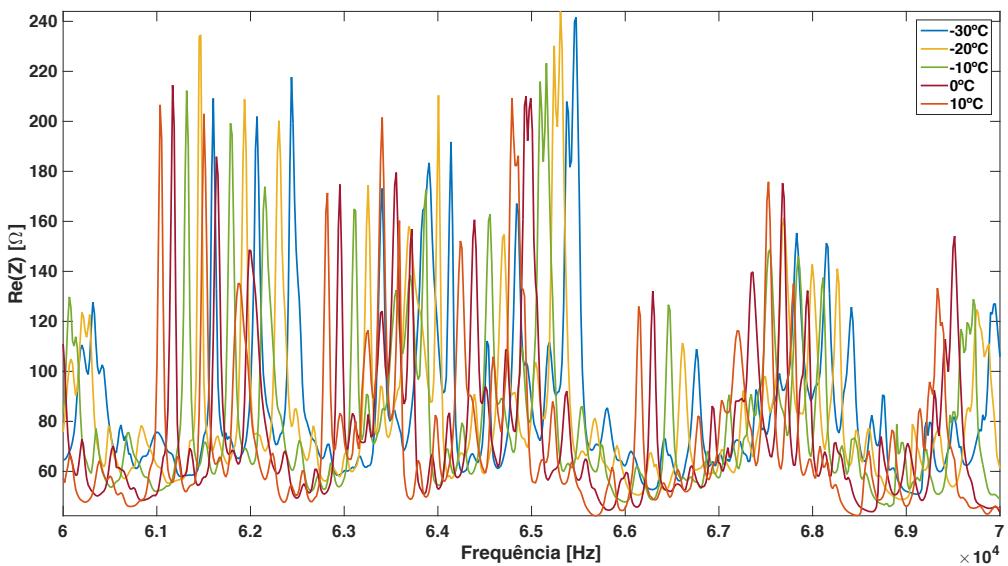


Figura 3.4 – Assinaturas de impedância obtidas em diferentes temperaturas.

De acordo com a Fig. 3.4, nota-se um deslocamento vertical do *baseline* (-30 °C), em parte devido à mudança da capacidade do sensor piezelétrico, bem como um

deslocamento horizontal dos picos de impedância devido à mudança na frequência de ressonância do sistema estrutura-PZT. Caso a temperatura aumente, este deslocamento horizontal será para a esquerda no eixo das frequências; de modo análogo, se a temperatura diminuir, o deslocamento será para a direita. Além disso, a maioria dos picos têm sua amplitude reduzida à medida que a temperatura aumenta, porém alguns picos não seguem esta tendência.

Assim, é aconselhável que um sistema de SHM possa medir a temperatura local com vistas à compensação do efeito da temperatura, evitando que falsos diagnósticos ocorram e, consequentemente, que as aplicações práticas da técnica possam ser implementadas com sucesso. Existem dois tipos principais de falsos diagnósticos, conhecidos como falso positivo e o falso negativo. O falso positivo é aquele em que o sistema acusa a presença de dano estrutural, embora esse não exista na realidade. Já o falso negativo corresponde ao caso em que existe dano, no entanto o sistema falha em detectar o problema, sendo portanto mais grave que o anterior, ao se considerar as decisões tomadas a partir do falso diagnóstico.

### **3.5. Revisão bibliográfica de técnicas de normalização de dados para sistemas ISHM**

Vários estudos têm sido reportados sobre métodos de normalização de dados para sistemas ISHM.

Krishnamurthy *et al.*, (1996) sugeriram uma técnica de correção que busca eliminar os efeitos da temperatura no sensor de PZT livre. Porém esta técnica, além de requerer várias medições de impedância do sensor livre, não considera os efeitos da temperatura na estrutura monitorada.

Bhala *et al.*, (2002) investigaram a influência das interações estrutura-transdutor com a temperatura nas assinaturas de impedância, propondo o uso da chamada *impedância ativa*.

Park *et al.*, (2008) propuseram o uso da análise de componentes principais (PCA – *Principal Component Analysis*), juntamente com o algoritmo de agrupamentos *k-means* como alternativa de pré-processamento dos dados. A PCA é usada com o objetivo de se extrair características que sejam sensíveis às vibrações essenciais da estrutura, porém eliminando ruídos indesejáveis através de uma compressão de dados, melhorando assim a capacidade de detecção de danos do sistema de SHM. Já o algoritmo de agrupamentos *k-means* é usado com o objetivo de reconhecimento de padrões para o diagnóstico final. O algoritmo *k-means* usa as componentes principais identificadas como as mais sensíveis para a avaliação do dano na estrutura.

Zhou *et al.*, (2009) usaram um conjunto de *baselines* em algumas temperaturas e estimaram assinaturas de impedância para uma dada temperatura através de técnicas de interpolação matemática.

Sepehry *et al.*, (2011) propõem o uso de redes neurais artificiais (RNAs) como estratégia para se estimar o *baseline* a ser comparado com a temperatura medida da estrutura monitorada. Lim *et al.*, (2011) desenvolveram uma técnica de detecção de dano também usando normalização de dados baseado em uma análise de componentes principais não linear (KPCA – *Kernel Principal Component Analysis*). Entretanto, da mesma forma, assim como as RNAs, a técnica desenvolvida requer uma enorme quantidade de dados de treinamento para funcionamento satisfatório. Caso contrário, falsos diagnósticos podem ocorrer se os dados de treinamento não incluírem uma condição específica ou faixa de temperatura.

Bastani *et al.*, (2012) desenvolveram uma técnica de compensação usando uma matriz de sensores. Neste método, uma matriz de sensores e parâmetros estatísticos são usados para identificar mudanças causadas por dano, variação de temperatura e vibrações mecânicas. A frequência de excitação é muito alta, portanto, o dano estrutural tem um efeito significativo sobre o sensor mais próximo, diferentemente de mudanças de condições ambientais que afetam todos os sensores quase que de maneira uniforme independentemente de onde estejam localizados ao longo da estrutura. Assim, os efeitos de dano podem ser separados dos efeitos ambientais nas assinaturas de impedância. Porém, este método requer uma grande quantidade de sensores para uma operação eficaz, e o dano estrutural deve estar perto de um dos sensores. Hong *et al.*, (2012) desenvolveram uma técnica similar usando um esquema de detecção de dano híbrido, onde acelerômetros foram usados para fazer o monitoramento global de dano (que foi associado a efeitos de temperatura), sendo que o monitoramento local de dano era feito pelo método convencional de SHM baseado na impedância.

Assim, pode-se dizer que as técnicas apresentadas acima são particularmente eficientes para aplicações e condições específicas. Sun *et al.*, (1995) usaram a correlação cruzada entre o *baseline* e a medição de teste para compensar deslocamentos freqüenciais. Park *et al.*, (1999a) compensaram tanto os deslocamentos freqüenciais como os de amplitude usando uma métrica RMSD modificada. Koo *et al.*, (2009) modificaram o método desenvolvido por Park *et al.*, (1999a) para desenvolver um deslocamento efetivo em freqüência para compensar os efeitos da temperatura. O método é baseado no deslocamento das assinaturas de impedância com relação ao *baseline* de modo a maximizar o coeficiente de correlação entre a assinatura de medição e a assinatura *baseline*. Este método tem sido continuamente usado em estudos recentes (Baptista *et al.*,

2014). Por esse motivo, optou-se por utilizar a princípio este método para entender seu funcionamento e, oportunamente, desenvolver técnicas avançadas de normalização de dados de modo a incorporar melhorias na técnica ISHM, à vista das aplicações pretendidas.

### **3.6. Procedimento de Compensação da Temperatura – Método do Deslocamento Efetivo em Frequência por Análise de Correlação.**

Baseando-se nas observações do experimento anterior, os deslocamentos verticais e horizontais do padrão de impedância devidos às variações na temperatura podem ser considerados uniformes para uma faixa de frequência estreita. Por outro lado, a variação de impedância devido à ocorrência de um dano estrutural é de certa forma irregular. Esta característica nos permite reduzir os efeitos da temperatura.

Inicialmente, o deslocamento vertical é feito simplesmente corrigindo a diferença média global dos valores dos dois padrões de impedância analisados, conforme a Eq. (3.1):

$$\Delta_v = \frac{1}{n} \left[ \sum_{i=1}^n \operatorname{Re}(Z_{2,i}) - \sum_{i=1}^n \operatorname{Re}(Z_{1,i}) \right] \quad (3.1)$$

onde  $\Delta_v$  é o deslocamento vertical,  $\operatorname{Re}(Z_{1,i})$  é a parte real da impedância da medição do *baseline* em uma frequência  $i$ ,  $\operatorname{Re}(Z_{2,i})$  é a parte real da impedância da medição de teste em uma frequência  $i$ , e  $n$  é o número de pontos de medição.

Em seguida, para se determinar matematicamente a extensão do deslocamento horizontal da assinatura de impedância, usa-se o coeficiente de correlação, que é obtido através da Eq. (3.2):

$$CC_{Z_1Z_2} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left\{ \frac{[\operatorname{Re}(Z_{1,i}) - \operatorname{Re}(\bar{Z}_1)][\operatorname{Re}(Z_{2,i}) - \operatorname{Re}(\bar{Z}_2)]}{S_{Z_{1,i}} S_{Z_{2,i}}} \right\} \quad (3.2)$$

onde  $\operatorname{Re}(Z_{1,i})$  é a parte real da impedância da medição sem dano em uma frequência  $i$ ,  $\operatorname{Re}(Z_{2,i})$  é a parte real da impedância da medição de teste em uma frequência  $i$ ,  $n$  é o número total de pontos freqüenciais usados na comparação,  $\operatorname{Re}(\bar{Z}_1)$  e  $\operatorname{Re}(\bar{Z}_2)$  são as

médias das medições para as duas condições analisadas;  $S_{Z_{1,i}}$  e  $S_{Z_{2,i}}$  são os desvios-padrão para cada ponto frequencial das medições, para as duas condições.

Caso a impedância de teste  $Z_2$  seja proveniente de um estado saudável  $Z_1$ , porém defasada por  $n$  pontos de dados, então seu coeficiente de correlação atingirá um valor máximo quando  $Z_2$  for deslocada de  $n$  pontos. Quando a impedância da medição de teste é deslocada de  $n$  pontos, os dois padrões de assinatura deveriam coincidir, exceto pela porção resultante de um dano estrutural, caso exista. O valor do número de pontos  $n$  que estão defasados, juntamente com a resolução em frequência da medição, fornecem o deslocamento horizontal  $\Delta f$ . Assim, esta técnica busca encontrar o parâmetro  $\Delta f$  na Eq.

3.3:

$$\text{Re}(Z_{corr,i}) = \text{Re}(Z_{medida,i \pm \Delta f}) \quad (3.3)$$

onde  $\text{Re}(Z_{corr,i})$  é a parte real da impedância corrigida em uma frequência  $i$ ,  $\text{Re}(Z_{medida,i \pm \Delta f})$  é a parte real da impedância medida defasada pelo parâmetro  $\Delta f$ . O deslocamento será para a direita caso a temperatura da medição de teste seja maior do que a temperatura da medição do sinal original (*baseline*); caso contrário o deslocamento será para a esquerda.

Finalmente, a métrica de dano é calculada com a assinatura de impedância corrigida. Assim, valores ótimos de  $\Delta_v$  e  $\Delta f$  que minimizam o efeito da temperatura podem ser obtidos. O propósito desta seção é demonstrar que o procedimento de compensação da temperatura propostos por Park *et al.*, (1999a) e Koo *et al.*, (2009) podem ser extrapolados para uma ampla faixa de temperatura. O método de deslocamento em frequência é demonstrado usando dados coletados na câmara climática e efetivado usando a técnica de otimização proposta por Koo *et al.*, (2009).

Esta técnica de compensação de temperatura pode ser assim resumida:

- ✓ Adquirir a FRF da impedância do *baseline* e salvar a temperatura de medição;
- ✓ Adquirir medições de impedância e de temperatura da estrutura monitorada;
- ✓ Calcular o gradiente de temperatura;
- ✓ Determinar o parâmetro de deslocamento ótimo em frequência;
- ✓ Aplicar a correção horizontal e vertical da impedância medida com relação ao *baseline*;
- ✓ Utilização do modelo estatístico e métricas de dano para determinar o diagnóstico de integridade da estrutura monitorada.

Se estes deslocamentos devido à temperatura puderem ser calculados a partir das medições, então, quando uma medição de impedância for adquirida após o surgimento de um dano estrutural, espera-se que ocorra uma diferença significativa da métrica de dano entre as condições sem dano e com dano nesta temperatura específica, mesmo após a aplicação da técnica de compensação.

A Figura 3.5 e a Figura 3.6 mostram o resultado do caso da aplicação desta técnica de compensação de temperatura aplicada à placa de alumínio da Figura 3.3, considerando a medição em  $-30^{\circ}\text{C}$  como a referência (*baseline*).

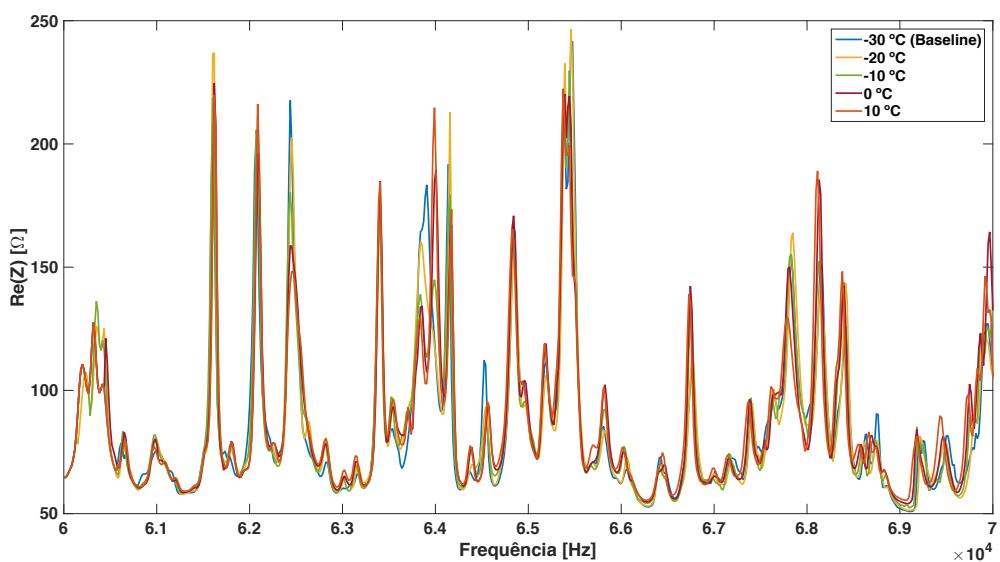


Figura 3.5 – Curvas de impedância apóas compensação da Temperatura.

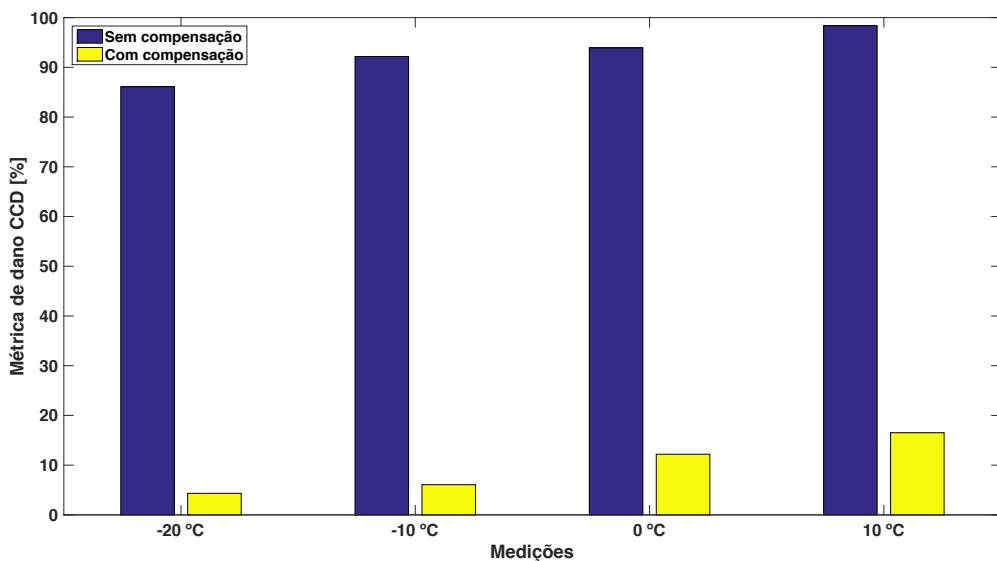


Figura 3.6 – Métricas de dano antes e apóas compensação da Temperatura.

Comparando-se as Figuras 3.4 e 3.5, nota-se que esta técnica de compensação baseada na maximização do coeficiente de correlação faz com que as assinaturas de impedância tornem-se mais correlacionadas ao *baseline*. Isto se vê também na diferença entre as métricas de dano na Figura 3.6. Entretanto, nota-se que o índice de dano compensado tende a aumentar à medida em que a diferença de temperatura entre a medição e o *baseline* também aumenta. Desta forma, recomenda-se que, se possível, seja utilizado um grupo de *baselines* ao longo da faixa de temperatura desejada para a utilização da estrutura a ser monitorada. Isto fará com que o processo de compensação tenha maiores chances de sucesso na tarefa de normalização de dados (Rabelo; Neto; Steffen Jr., 2015).

Para entender o processo de otimização realizado na busca do parâmetro ótimo de deslocamento em frequência, a Figura 3.7 apresenta o cálculo dos deslocamentos em frequência (defasagem em número de pontos) em função do coeficiente de correlação.

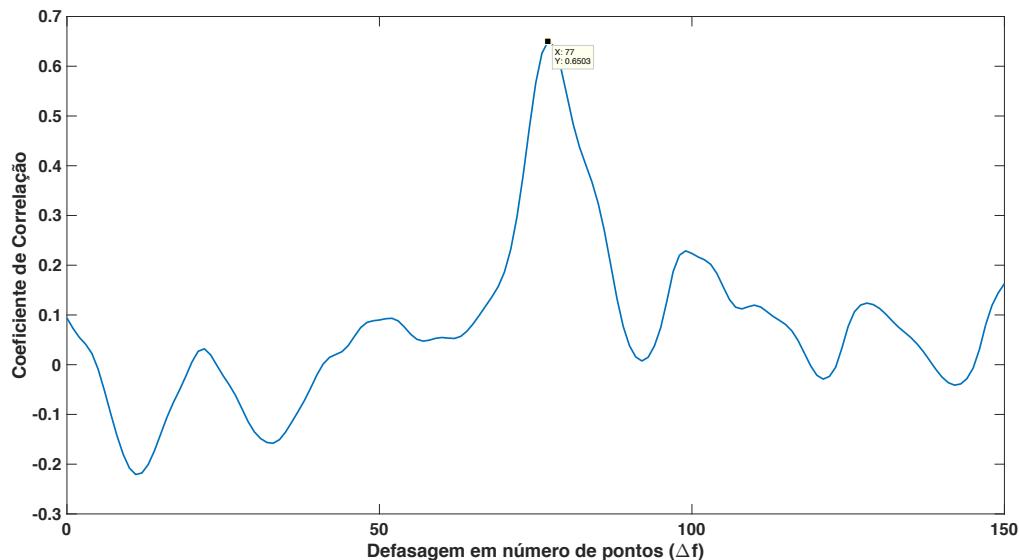


Figura 3.7 – Busca do parâmetro ótimo de deslocamento em frequência.

Trata-se de um problema de otimização de um único objetivo (maximizar o coeficiente de correlação). Como o procedimento de cálculo é relativamente rápido, esta tarefa é feita sem a necessidade de técnicas heurísticas, bastando calcular os coeficientes de correlação dentro de um intervalo de busca definido para o deslocamento em frequência. Finalmente, o deslocamento vertical é aplicado após sua determinação através da Eq. 3.1.

Assim, conclui-se que a técnica de compensação da temperatura utilizando o deslocamento em frequência por análise de correlação pode ser utilizada para variações de

temperatura até de 15 °C em magnitude, uma vez que seu desempenho é deteriorado à medida que a variação de temperatura é incrementada. Desta forma, recomenda-se que seja feito o armazenamento de mais de um *baseline* na memória do SDD, para que um diagnóstico mais confiável possa ser obtido, uma vez que a ausência de um número maior de *baselines* faz com que as métricas de dano compensadas aumentem, podendo levar o SDD a um incorreto diagnóstico (falso negativo), pois estas métricas levariam a um limiar discriminante maior, tornando mais difícil a detecção de danos pelo SDD.

Na teoria de detecção de danos, um falso positivo corresponde à situação em que o SDD indica erroneamente a presença de um dano estrutural. Por outro lado, um falso negativo corresponde à situação em que o SDD falha em indicar a presença de um dano estrutural. Estes erros são denominados na estatística, respectivamente como erros do tipo I e do tipo II.

Em segundo lugar, esta técnica é considerada rápida, por não depender de extensos treinamentos de dados ou da execução de rotinas de busca heurísticas de otimização.

Assim, ao se estabelecer qual será a faixa de temperatura de operação em que o sistema deve operar, o SDD deve ser capaz de distinguir efeitos da temperatura de danos estruturais reais. Para isto, um valor limiar de discriminação (*threshold*) deve ser definido através de métodos estatísticos. Neste trabalho de doutorado, uma técnica para determinação do limiar de discriminação foi proposta, utilizando conceitos de Controle Estatístico de Processos (CEP). Esta técnica é foco do próximo capítulo.

## **CAPÍTULO IV: MÉTODO ESTATÍSTICO PARA DETERMINAÇÃO DO LIMIAR DE DISCRIMINAÇÃO APLICADO EM PAINÉIS DE ALUMÍNIO AERONÁUTICO**

### **4.1. Resumo**

O método ISHM tornou-se uma ferramenta atrativa e promissora para identificação de danos estruturais incipientes. Contudo, estudos convencionais da técnica ISHM têm focado principalmente no processo de identificação de dano estrutural mas não tanto em abordagens de modelagem estatística para determinação do limiar de discriminação para a tomada de decisões do sistema de detecção de danos (SDD). Neste capítulo, a técnica ISHM é usada em um problema de detecção de dano considerando efeitos de variação de temperatura. Para isto, três placas de alumínio aeronáutico (2024-T3) fornecidas pela EMBRAER foram instrumentadas com pequenas pastilhas de PZT, posicionadas próximas aos cantos de cada placa. O dano estrutural foi introduzido na posição central das placas, considerando uma faixa de temperatura de -10 °C a 60 °C. Neste trabalho, um método para se determinar estatisticamente um limiar de discriminação (*threshold*) para o propósito de identificação de dano sob influência da variação da temperatura é proposto. Este método usa conceitos de Controle Estatístico de Processos (CEP), assim como intervalos de confiança e testes de normalidade, de modo a obter um diagnóstico com um nível de confiança pré-determinado. Então, apresenta-se uma avaliação da sensibilidade da técnica ISHM aplicada em placas de alumínio aeronáutico sob variação da temperatura. Com a técnica proposta, os limiares de discriminação de dano foram determinados de modo que pastilhas de PZT, distanciadas aproximadamente a 280 mm do dano inserido, foram capazes de determinar cortes de serra (*sawcuts*) de aproximadamente 7 mm de comprimento, com 95 % de confiabilidade, considerando a faixa de temperatura previamente mencionada (Rabelo *et al.*, 2016).

### **4.2. Introdução**

Uma vez que o mundo atual é fortemente dependente de estruturas aeroespaciais, de construção civil e mecânicas, existem crescentes demandas quanto ao desenvolvimento de tecnologia para detecção de dano estrutural ainda no estágio incipiente e o mais cedo possível. Estratégias para tecnologias de Monitoramento de Integridade Estrutural (SHM) e

Ensaios Não Destrutivos (NDE) são o foco de inúmeros trabalhos de pesquisa ao longo dos últimos 20 anos. Exige-se que as tecnologias futuras de SHM sejam autônomas e que monitorem a integridade estrutural em tempo real. O objetivo principal destas tecnologias é o de melhorar a segurança e reduzir custos de manutenção ao substituir a tradicional manutenção programada pela manutenção baseada na condição estrutural monitorada em tempo real.

Na indústria aeroespacial, particularmente, além do envelhecimento da atual frota de aeronaves, atualizações tecnológicas tais como o aumento da capacidade e maior utilização de materiais compostos motivam o desenvolvimento de sistemas de SHM. Além disto, vantagens econômicas adicionais podem ser ganhas se o sistema de SHM puder evitar, de modo confiável, a desmontagem desnecessária de componentes estruturais. Alguns tipos de dano são de interesse neste setor por serem motivo de preocupação, especialmente em componentes de material composto. Dentre os tipos mais comuns de dano cita-se a corrosão e o surgimento e crescimento de trincas de fadiga em componentes metálicos, assim como a delaminação e a descolagem em componentes compósitos. Para aeronaves comerciais, trincas de fadiga que se formam ao redor de rebites na fuselagem requerem muita atenção (Farrar *et al.*, 2012).

O processo probabilístico de tomada de decisões é um dos principais passos de um sistema de SHM. Embora a técnica ISHM seja comumente usada para identificação de dano, a maioria dos estudos fazem uso limitado de modelos estatísticos rigorosos. Os modelos estatísticos são construídos de modo a minimizar falsos diagnósticos. Falsos diagnósticos podem ser um falso positivo, quando há uma indicação de dano mas nenhum dano existe, ou um falso negativo, quando não há uma indicação de dano, porém este existe na realidade.

Neste capítulo, realiza-se uma avaliação dos sensores de PZT para detectar um corte de serra inserido em três placas de alumínio 2024-T3, material frequentemente usado em aeronaves, considerando uma faixa de temperatura de -10 °C a 60 °C. A escolha desta faixa de temperatura não corresponde a toda faixa de temperatura que uma superfície da asa de um avião experimenta (-55 °C a 80 °C); contudo, esta faixa permite ilustrar a metodologia desenvolvida. O tamanho do corte foi sequencialmente aumentado. A técnica de deslocamento efetivo em frequência por análise de correlação (apresentada no Capítulo 3) foi utilizada para compensação dos efeitos da variação da temperatura.

Em seguida, um modelo estatístico foi desenvolvido para estabelecer índices de limiares de discriminação conforme um nível de confiança pré-determinado. Assim, uma avaliação da sensibilidade é fornecida para a técnica ISHM considerando a taxa de sucesso de modo a detectar o dano inserido nas placas de alumínio sob variação de temperatura.

### **4.3. Planejamento e configuração do experimento**

Segundo a norma MIL-HDBK-1823A (*Nondestructive evaluation system reliability assessment*), o objetivo de uma demonstração de confiabilidade de um ensaio não destrutivo (END) não é o de determinar qual é o menor tamanho de dano detectável. Mais precisamente, o objetivo é determinar qual é o maior tamanho de dano que o sistema pode falhar em detectar. A probabilidade de falsos positivos para cada sensor foi determinada dentro da faixa de temperatura considerada nos testes. Obter a taxa de falsos positivos é um passo importante, pois caso o sistema de detecção de danos (SDD) forneça uma taxa inaceitável (muito alta), isto poderia levar a um aumento nos custos de manutenção da estrutura de engenharia, devido às consequentes inspeções desnecessárias.

A incerteza na decisão de um SDD envolve atributos físicos dos corpos de prova sob teste, assim como as variáveis de processo do END, as configurações do SDD, e o protocolo do teste. No caso da técnica ISHM, exemplos de variáveis de processo são: a largura da faixa de frequência utilizada no processo de monitoramento, os transdutores piezelétricos, o dispositivo de medição, o procedimento de colagem dos sensores, condições ambientais e operacionais, e assim por diante.

A incerteza causada por diferenças entre corpos de prova distintos é contabilizada ao utilizar corpos de prova representativos com danos a serem detectados de tamanho (ou intensidade) conhecido. A incerteza causada pelo processo do END é contabilizada por uma matriz de testes de diferentes inspeções a serem realizadas em todos os corpos de prova (MIL-HDBK-1823A, 2009).

#### *4.3.1. Preparação dos corpos de prova.*

Três corpos de prova (placas) de alumínio 2024-T3 com dimensões de 500 mm x 500 mm x 1,6 mm e massa de 1,120 kg foram instrumentados com quatro pastilhas de PZT tipo 5H (diâmetro de 15 mm x espessura de 1,0 mm) cada um. As pastilhas de PZT foram coladas com um adesivo à base de resina epoxy (Hysol EA9320NA) e posteriormente as pastilhas foram protegidas com um selante. Um peso de 5 N foi aplicado em cada sensor de modo a minimizar/uniformizar a camada de cola, levando a uma distribuição uniforme do adesivo ao longo da superfície de contato. A espessura da camada de cola foi de aproximadamente 0,21 mm. Embora o adesivo Hysol tenha uma resistência a altas temperaturas, é importante notar que variações em suas propriedades mecânicas poderiam também afetar as medições de impedância. Cada corpo de prova foi preparado por um operador diferente, seguindo as dimensões indicadas conforme a Fig. 4.1(a). Para inserir

dano, uma fresadora portátil (Dremel Trio®) foi usada. A fresa utilizada é de titânio, com 0,55 mm de diâmetro.

O analisador de impedância utilizado foi o descrito por Finzi Neto *et al.* (2011), cuja resolução é de  $0,1 \Omega$ . Este equipamento foi configurado com 2048 médias, 800 pontos freqüenciais com uma varredura de freqüência de acordo com a faixa selecionada para cada sensor. As faixas de freqüência foram determinadas experimentalmente, com largura de 5 kHz. Este dispositivo foi desenvolvido especificamente para fins de monitoramento com a técnica ISHM, sendo capaz de adquirir dados de até 13 sensores de PZT e 2 sensores de temperatura. A ideia é fazer uma sub-rede de sensores para cada área de monitoramento, de modo que as áreas mais susceptíveis a dano sejam contempladas no processo. Os experimentos foram conduzidos na câmara climática ESPEC previamente especificada, configurando ciclos de -10 °C a 60 °C, com incrementos para aquisição de dados a cada 5 °C. Em cada ponto de temperatura, cinco medições foram realizadas, e um tempo de estabilização de 30 minutos foi aguardado antes de iniciar as aquisições. Os comprimentos dos cortes (“trincas”) introduzidos foram de 3 mm, 5 mm, 7 mm e 10 mm, sendo inseridos no centro dos corpos de prova. Embora o procedimento para inserir o corte tenha sido manual, o avanço da ferramenta de corte foi medido com um relógio comparador com resolução de 0,001 mm para verificar o tamanho real do corte.

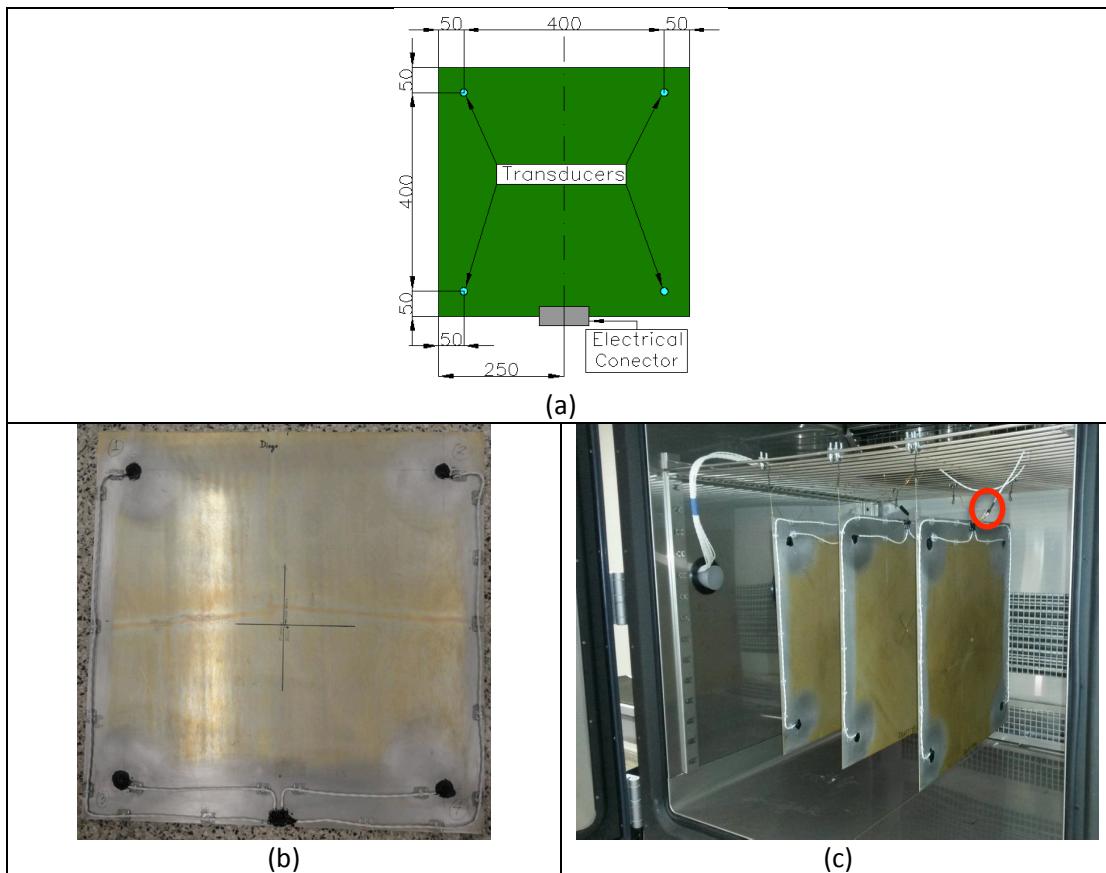


Figura 4.1 Configuração experimental: (a) Esquema para colagem dos sensores; (b) Painel de alumínio instrumentado com 4 pastilhas de PZT; (c) Corpos de prova posicionados na condição livre-livre dentro da câmara climática.

O círculo vermelho mostrado na Fig. 4.1(c) retrata o sensor de temperatura AD590KF, da Analog Devices. Este sensor de temperatura foi posicionado próximo aos corpos de prova, dentro da câmara climática. Ele foi usado para indicar a temperatura dos sinais de impedância adquiridos para o processo de compensação realizado.

A Figura 4.2(a) retrata a configuração experimental para a placa com dano e o analisador de impedância utilizado é ilustrado na Fig. 4.2(b). A matriz de testes determinada durante o planejamento dos experimentos é mostrada na Tab. 4.1, e as faixas de frequência selecionadas para as 12 pastilhas de PZT são mostradas na Tab. 4.2.

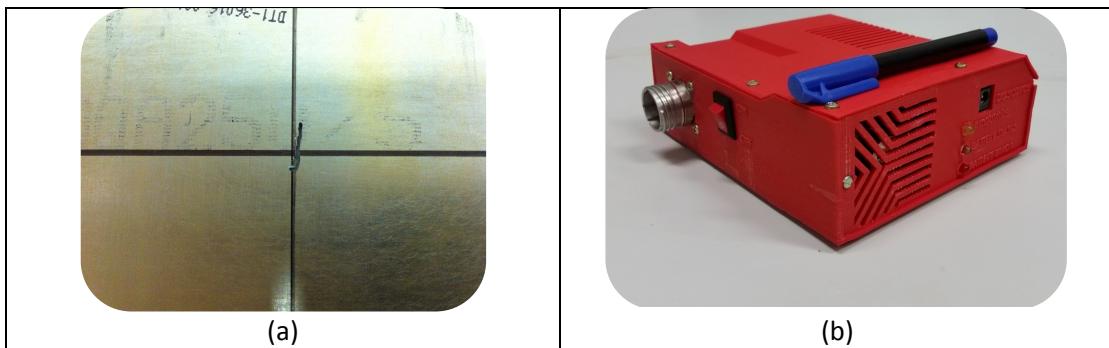


Figura 4.2. Configuração experimental: (a) Dano em vista amplificada (corte de 10 mm) inserido; (b) Ilustração do dispositivo de medição de impedância utilizado.

Tabela 4.1: Matriz de testes do experimento

Experimento	Faixa de temperatura [°C]	Comprimento do corte [mm]
<b>Gravação de Baselines</b>	-5 a +55	0
<b>Execução #1</b>	-10 a +60	0
<b>Execução #2</b>	-10 a +60	3
<b>Execução #3</b>	-10 a +60	5
<b>Execução #4</b>	-10 a +60	7
<b>Execução #5</b>	-10 to +60	10

Tabela 4.2: Faixa de frequência selecionada para os 12 sensores

Corpo de prova	PZT #	Faixa de frequência [kHz]
<b>A</b>	1	125 – 130
	2	125 – 130
	3	125 – 130
	4	125 – 130
<b>B</b>	5	125 – 130
	6	125 – 130
	7	120 – 125
	8	120 – 125
<b>C</b>	9	125 – 130
	10	130 – 135
	11	125 – 130
	12	125 – 130

A etapa de gravação de *baselines* mostrada na Tabela 4.1 consiste do primeiro grupo de medições realizadas. Um total de sete *baselines* foram salvos nas seguintes temperaturas: -5 °C, 5 °C, 15 °C, 25 °C, 35 °C, 45 °C e 55 °C. O procedimento de compensação de temperatura usou o *baseline* que se encontrava mais próximo da temperatura de teste em termos de gradiente de temperatura. Ressalta-se que no contexto do presente trabalho, o termo “gradiente de temperatura” foi utilizado para indicar a diferença de temperatura entre uma condição de teste e a referência. Além disto, cada

execução dos experimentos (#1 - #5) compreendeu 75 medições para cada transdutor, uma vez que havia um total de 15 pontos de temperatura, com 5 repetições para cada um destes pontos. Para auxiliar com o processo de medição, um algoritmo temporizador foi usado para sincronizar as medições com o ciclo de temperaturas de cada experimento, considerando que cada execução da Tabela 4.1 levou aproximadamente 8 horas para ser concluída seguindo um procedimento contínuo e automatizado de medições.

Na Tabela 4.2, é importante ressaltar que cada corpo de prova foi preparado por um operador diferente, uma vez que o procedimento de colagem dos sensores pode impactar no acoplamento eletromecânico de cada sensor (Yaowen; Lim; Soh, 2008). Considerando as faixas de frequências da Tab. 4.2 e a velocidade de propagação transversal para a placa de material (Al. 2024-T3), que foi estimado por Sikorska e Pan (2004) como sendo igual a 3,1 mm/μs, o comprimento de onda variou de 25,83 mm (com frequência de excitação de 120 kHz) a 22,96 mm (com frequência de excitação de 135 kHz). Ao final do processo de medição, um total de 5.048 medidas foram tomadas, lembrando que havia 12 sensores, 15 pontos de temperatura, 5 repetições e 5 condições estruturais incluindo a condição intacta, bem como 548 repetições extras que foram necessárias durante o experimento devido a problemas de falha na rede elétrica.

#### *4.3.2. Resultados de assinaturas de impedância e Métricas de Dano*

Os resultados de monitoramento do sistema ISHM são mostrados na Fig. 4.3. O efeito da temperatura é apresentado na Fig. 4.3(a), onde um total de 15 aquisições do PZT#6 foram isoladas: três grupos de assinatura podem ser distinguidos uma vez que cinco medições foram obtidas em -10 °C, -5 °C e 0 °C, respectivamente. A compensação da temperatura para o caso da Fig. 4.3(a) é mostrada na Fig. 4.3(b), utilizando-se o *baseline* mais próximo em termos de temperatura. Neste caso, o *baseline* foi gravado a -4,1 °C.

A leitura das temperaturas por um sensor de temperatura foi levemente diferente do valor configurado na câmara climática, embora para cada ponto de temperatura um período de 30 minutos foi definido como o tempo para se chegar ao regime permanente dentro da câmara. A Figura 4.4 mostra os valores médios da métrica de dano CCD sem compensação e compensação do PZT#6 para cada temperatura e condição estrutural. Pode-se observar que sem o procedimento de compensação de temperatura o sistema tomaria várias decisões erradas. Para se refinar os resultados relevantes, a Figura 4.5 mostra os valores CCCD(métrica CCD compensada) para cada condição estrutural, conforme obtidas pelo PZT#6.

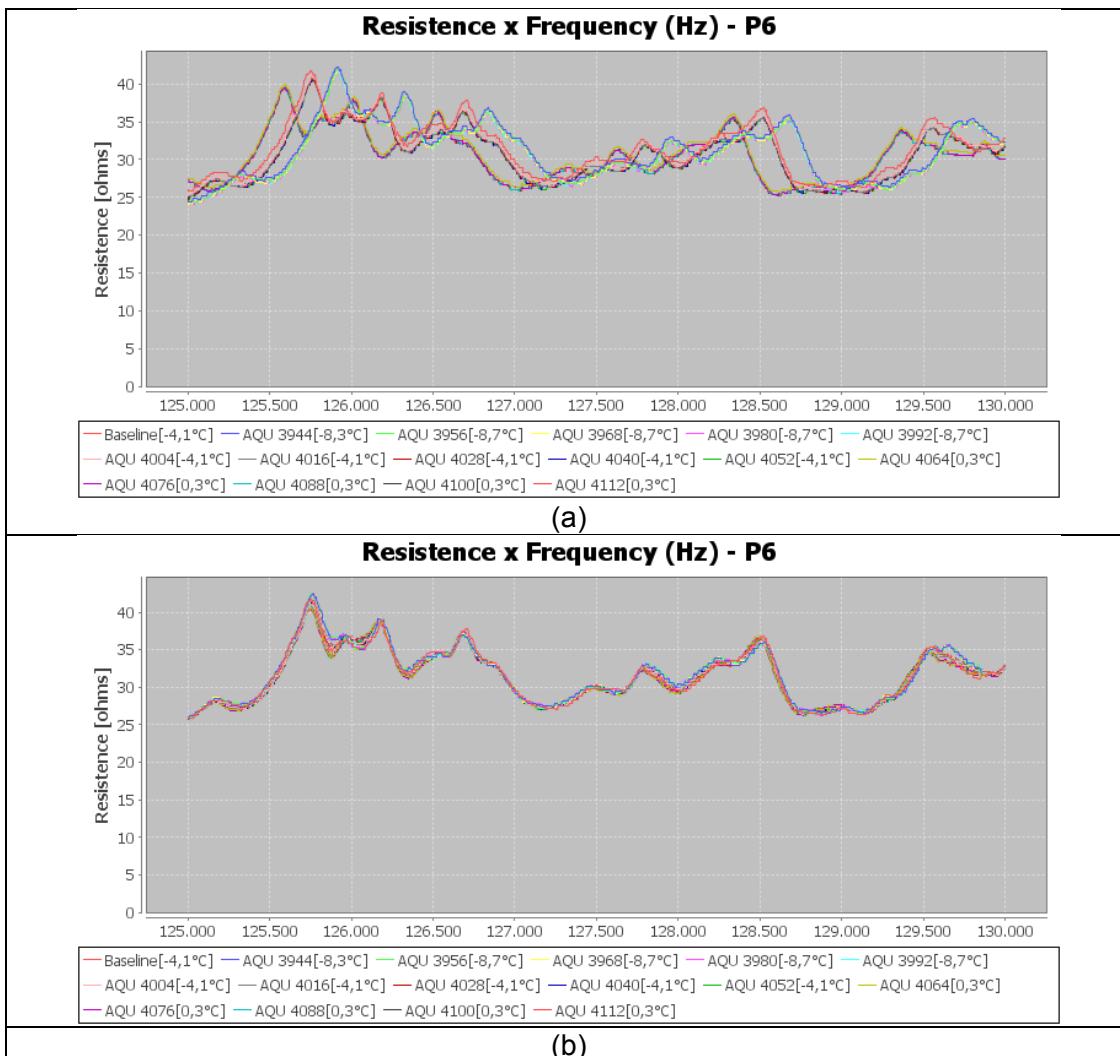


Figura 4.3. Resultados de monitoramento: (a) Variações nos sinais de impedância devido a mudanças de temperatura; (b) Resultados do procedimento de compensação da temperatura.

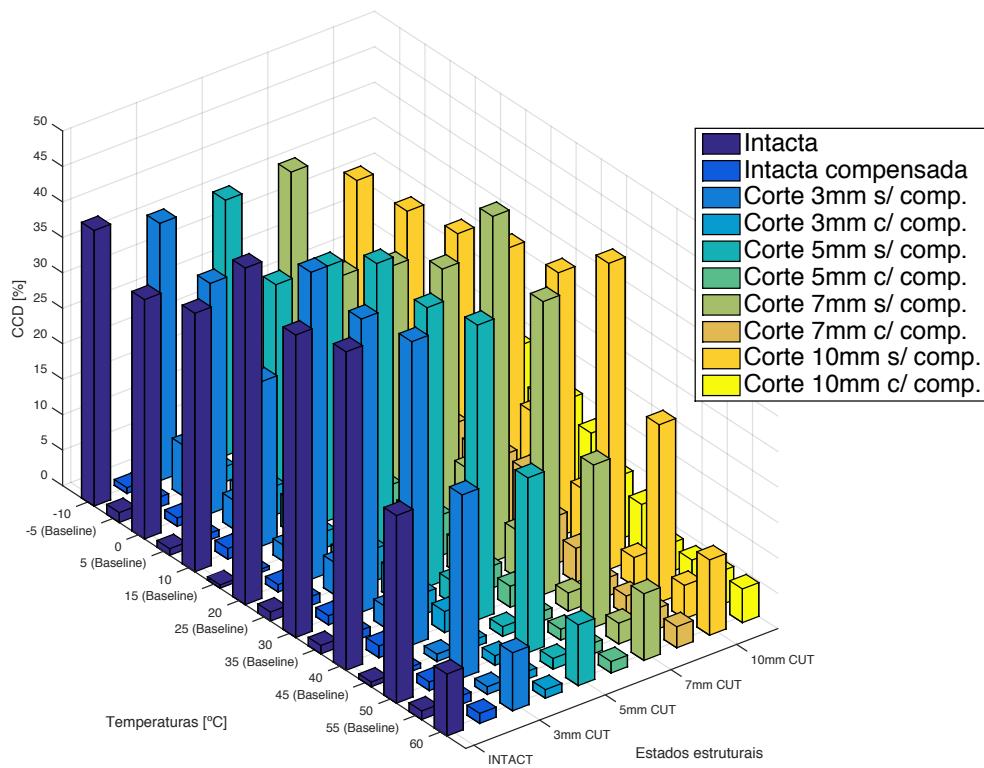


Fig. 4.4 Métricas de Dano CCD (sem compensação) e CCD (com compensação) para o PZT#6;

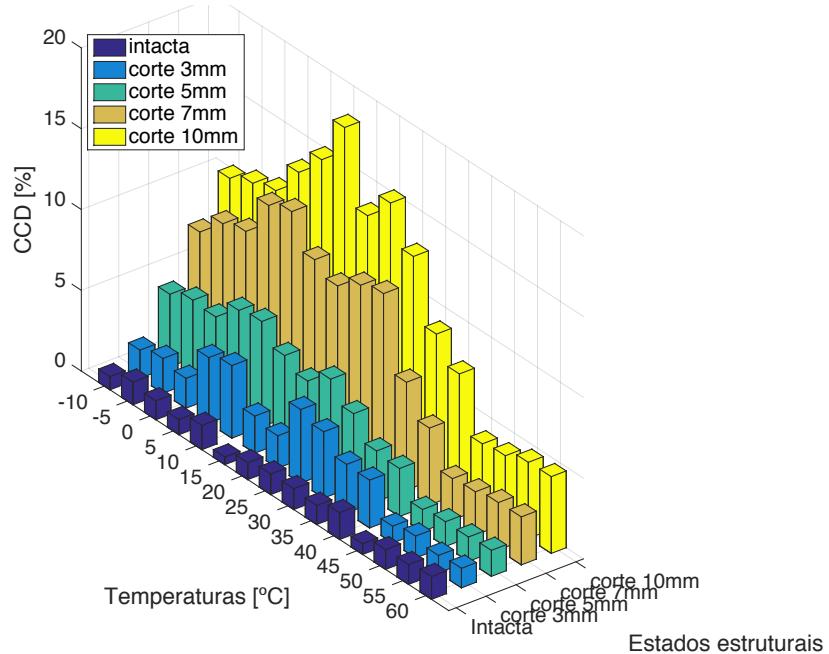


Fig. 4.5 Índices CCD compensados para cada condição de saúde estrutural obtidas a partir do PZT#6.

Para simplificar os resultados dos 12 sensores-atuadores de PZT, uma média de cada valor de CCD compensado foi obtida, resultando na Fig. 4.6, onde a média de 15 condições de temperatura para cada pastilha de PZT foram agrupadas, conforme sua temperatura e estado estrutural. Pode-se notar que, com o procedimento de compensação de temperatura, os resultados mostram uma certa tendência crescente nos valores das métricas de dano para todos os sensores de PZT à medida que o nível de dano é aumentado.

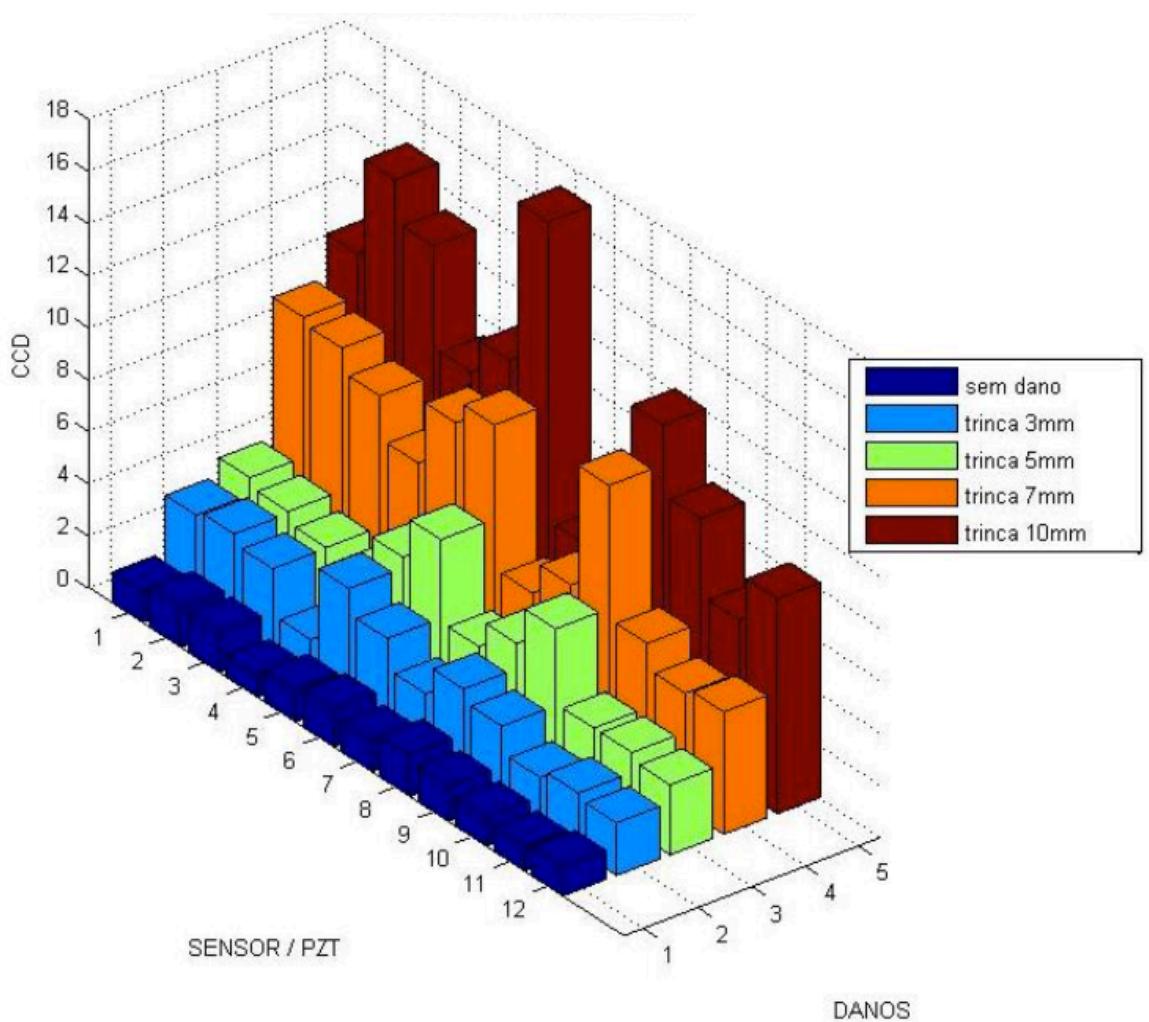


Figura 4.6. Resultados globais para cada pastilha de PZT obtidos através de médias ao longo de toda faixa de temperatura.

Estes resultados mostram que é possível se determinar, a partir de técnicas estatísticas, um limiar de discriminação que leva o SDD a indicar corretamente a presença de dano mesmo com variações de temperatura. A próxima seção contém o procedimento de análise estatística utilizado para determinar o nível do limiar de discriminação para cada pastilha de PZT, de modo que o SDD seja capaz de distinguir um estado íntegro de um estado com falha.

#### **4.4. Análise estatística dos dados e taxa de acertos**

Em sistemas de SHM, é altamente desejável que um limiar de discriminação confiável possa ser estimado com base nas informações adquiridas a partir da condição intacta da estrutura. Depois que os dados são adquiridos e processados, o próximo passo é a preparação dos dados brutos para análise. A primeira operação é a edição dos dados. Isto se refere às operações de análise prévia, que são designadas para detectar e eliminar sinais de dados falsos ou degradados que podem ser resultado de processos de aquisição e gravação em casos de ruídos excessivos, quedas de sinal, ou mesmo causas externas como as falhas de rede elétrica (Bendat e Piersol, 2000).

##### *4.4.1. Detecção de valores atípicos e depuração de dados através do Critério de Chauvenet.*

Algumas vezes, uma medição dentro de uma série de medições parece muito diferente, surpreendentemente, de todas as outras. Quando isto ocorre, o experimentador deve decidir se a medição anômala resultou de algum erro e deveria ser descartada ou se foi de fato uma medição genuína que deveria ser usada junto com as outras. Ao se realizar um procedimento de depuração de dados, alguns parâmetros estatísticos, bem como o limiar de discriminação, não serão afetados por possíveis valores atípicos.

Deve-se destacar que embora o fato de se descartar uma medição pode soar injustificado, as medições são repetidas várias vezes. Se a anomalia aparece mais de uma vez, este procedimento permite rastrear a causa da anomalia como um erro ou como resultante de um efeito físico real. Todas amostras analisadas neste estudo têm tamanho mínimo de 75 medições, sendo que cada ponto de frequência foi obtido a partir de 2.048 médias realizadas internamente no hardware do SDD (Finzi Neto et. al, 2011). O uso do critério de Chauvenet é mostrado na próxima seção como um meio de melhorar a taxa de acertos, melhor, a Probabilidade de Detecção (*Probability of Detection – POD*) do sistema ISHM. O critério de Chauvenet foi selecionado neste estudo devido a sua simplicidade computacional e bom desempenho.

#### 4.4.2. Critério de Chauvenet

O objetivo do critério de Chauvenet é remover valores da amostra que tenham uma dispersão com relação à média maior do que um desvio relativo padrão. Este critério presume que os erros são normalmente distribuídos e têm variância constante e especifica que qualquer leitura de uma amostra com  $N$  componentes deve ser rejeitada se a magnitude de seu desvio for maior do que um desvio máximo padrão  $d_{max}$ . A Equação 4.1 fornece o desvio máximo padrão:

$$\frac{d_{max}}{s} = 0.819 + 0.544 \times \ln(N) - 0.02346 \times \ln(N^2) \quad (4.1)$$

onde  $s$  é o desvio padrão amostral da amostra de tamanho  $N$ . Recomendações da literatura (Reddy, 2011) estabelecem que o critério de Chauvenet não deveria ser aplicado uma segunda vez; deste modo, tal recomendação foi estritamente seguida. Além disto, a hipótese de que a amostra se origina de uma distribuição normal ou Gaussiana foi testada através de testes de normalidade.

#### 4.4.3. Testes de normalidade

Dentre os testes de normalidade existentes na literatura, dois foram escolhidos para verificar as amostras. Para ser sucinto, na próxima seção, os resultados são apresentados para o PZT#6, embora todos os sensores tenham sido testados de modo similar. Os testes de Jarque-Bera (JB) e Lilliefors (LF) foram escolhidos uma vez que são testes considerados estatisticamente mais rigorosos. O teste de ajuste Qui-quadrado foi descartado, uma vez que apresenta resultados diferentes conforme se varia a largura das barras dos histogramas gerados. Quanto ao teste Komolgorov-Smirnov, este apresenta a desvantagem de depender de valores de média e variância populacionais e não amostrais, ou seja, os valores que se obtém na prática. De modo contrário, o teste LF depende dos valores amostrais que são facilmente determinados. O teste JB utiliza os momentos estatísticos de *skewness* e *kurtose* (assimetria e agudez) para determinar a Função de Densidade de Probabilidade (FDP) da amostra. Neste trabalho, a plataforma MATLAB® foi utilizada com as ferramentas de estatística disponibilizadas.

Os testes JB e LF são testes de qualidade de ajustes de duas caudas quando uma distribuição é desconhecida, e seus parâmetros podem ser estimados. A Equação 4.2 define a estatística do teste JB:

$$JB = \frac{N}{6} \left[ S_k^2 + \frac{(K_t - 3)^2}{4} \right] \quad (4.2)$$

onde N é o tamanho amostral,  $S_k$  é o *Skewness* da amostra, e  $K_t$  é o *kurtose* da amostra. A Equação 4.3 define a estatística do teste LF:

$$LF = \max_x |SCDF(x) - CDF(x)| \quad (4.3)$$

onde SCDF é a função de distribuição cumulativa empírica (CDF) obtida a partir da amostra e CDF é a função de distribuição cumulativa obtida a partir de uma distribuição normal com média e desvio padrão iguais aos parâmetros da amostra de teste.

Para estes dois testes de normalidade, tamanhos amostrais menores que 1000 e níveis de significância entre 0,001 e 0,50, o teste usa uma tabela de valores críticos computados usando uma simulação de Monte-Carlo. A Tabela 4.3 sumariza os resultados dos testes de normalidade.

Tabela 4.3: Resultados dos testes de normalidade para todos os sensores

PZT#	Skewness	Kurtosis	JB: valor $p$ [%]	LF: valor $p$ [%]
1	-0,6228	2,8933	5,81	0,98
2	0,0824	3,4907	50,00	8,70
3	0,1484	2,8480	50,00	0,69
4	-0,5102	3,6927	6,19	11,96
5	0,5196	2,6924	10,26	0,64
6	0,6083	2,6546	5,45	8,05
7	1,1558	4,4533	0,32	0,10
8	1,5268	5,1889	0,10	0,10
9	0,7134	3,1976	3,52	0,10
10	0,7151	2,4513	2,85	0,10
11	-0,1691	1,7955	5,65	3,60
12	-0,2498	3,2625	50,00	7,97

Na Tabela 4.3, *skewness* e *kurtose* são momentos estatísticos da amostra de cada sensor. O teste de hipóteses é detalhado a seguir. A hipótese nula neste caso significa, “a amostra se origina de uma distribuição normal”. O valor  $p$  indica o resultado do teste de hipóteses. Se o valor de  $p$  é menor do que o nível de significância,  $\alpha$ , (neste caso,  $\alpha = 5\%$ ), significa que a hipótese nula deve ser rejeitada. Estes resultados seguem a notação usada no pacote de ferramentas estatísticas do MATLAB®. Assim, os resultados indicam que as amostras dos sensores #1 a #6 e #11 a #12 poderiam se originar de uma distribuição Gaussiana com 95% de confiança, com a exceção dos sensores #7 a #10, que não

passaram no teste de normalidade. Não obstante, o limiar de discriminação foi calculado para estes sensores da mesma maneira, para fins de comparação.

#### 4.4.4. Testes de normalidade

Com a normalidade verificada, um conceito de Controle Estatístico de Processos (CEP) foi usado para determinar o limite de controle superior (*Upper Control Limit-UCL*) e o limite de controle inferior (*Lower Control Limit-LCL*) dos índices de dano (CCD). Isto é necessário pois as técnicas baseadas em CEP assumem que os desvios sucessivos formam uma função normalmente distribuída. Um gráfico de controle é mostrado na Fig. 4.7 para os índices de dano compensados a partir do PZT#6 para os casos intactos com apenas variações de temperatura. Nesta figura, CCCD indicam os valores da métrica CCD compensados.

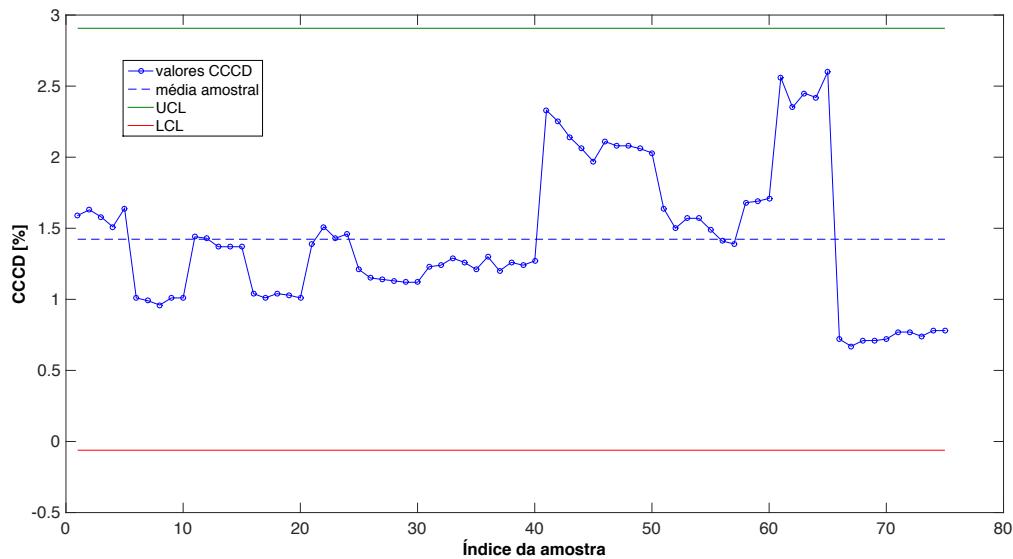


Figura 4.7 Gráfico de controle para o caso intacto obtido a partir do PZT#6.

A Figura 4.7 mostra que nenhuma anomalia foi detectada. A linha central corresponde à média amostral, que neste caso é de 1,42%. As outras duas linhas estão situadas a três desvios padrão amostrais acima e abaixo da média. Entre estes dois limites, de acordo com a FDP normal, 99,73% de todas observações devem estar contidas, caso tudo esteja perfeitamente controlado no processo. Como este nem sempre é o caso e para aplicações de SHM interessa-se apenas no limite superior para determinar-se um limiar de discriminação. Assim, propõe-se neste trabalho uma metodologia para determinação do limiar de discriminação usando o conceito de intervalos de confiança.

Um procedimento mais significativo para inferência de parâmetros estatísticos de variáveis aleatórias envolve a estimação de um intervalo, ao contrário de um único valor pontual, que irá incluir o parâmetro que está sendo estimado com um determinado grau de incerteza. Para o caso da estimativa do valor da média, um intervalo de confiança pode ser estabelecido para o valor da média populacional  $\mu_x$  baseado na média amostral  $\bar{x}$  conforme a Eq. 4.4 (Bendat e Piersol, 2000):

$$\left[ \bar{x} - \frac{\sigma_x z_{\alpha/2}}{\sqrt{N}} \leq \mu_x < \bar{x} + \frac{\sigma_x z_{\alpha/2}}{\sqrt{N}} \right], v = N - 1 \quad (4.4)$$

onde  $\mu_x$  e  $\sigma_x$  correspondem à média populacional e desvio padrão populacional, respectivamente,  $\bar{x}$  é a média amostral,  $N$  é o tamanho amostral,  $v$  é o número de graus de liberdade (GDL), e  $z_{\alpha/2}$  é a variável padronizada dada pela Eq. 4.5 associada com o nível de significância  $\alpha$ :

$$z = \frac{x - \mu_x}{\sigma_x} \quad (4.5)$$

Como  $\sigma_x$  é desconhecido, os intervalos de confiança para a média  $\mu_x$  e variância  $\sigma_x^2$  podem ser determinados.

Para um tamanho amostral  $N$ , pode-se mostrar que as Eqs. 4.6 - 4.7 (Bendat e Piersol, 2000) fornecem os intervalos de confiança para os valores da média e variância, respectivamente:

$$\left[ \bar{x} - \frac{st_{v;\alpha/2}}{\sqrt{N}} \leq \mu_x < \bar{x} + \frac{st_{v;\alpha/2}}{\sqrt{N}} \right], v = N - 1 \quad (4.6)$$

$$\left[ \frac{vs^2}{\chi_{v;\alpha/2}^2} \leq \sigma_x^2 < \frac{vs^2}{\chi_{v;1-\alpha/2}^2} \right], v = N - 1 \quad (4.7)$$

onde  $s^2$  é a variância amostral,  $t_{v;\alpha/2}$  é uma variável  $t$  da distribuição  $T$  de student com  $v$  GDL e  $\chi_{v;\alpha/2}^2$  é uma variável da distribuição Qui-quadrado com  $v$  GDL.

Portanto, estes intervalos foram obtidos e o limiar de discriminação (*threshold*) foi determinado conforme a equação 4.8:

$$PZT_{threshold} = \mu_{x_{max}} + 3 \cdot \sigma_{x_{max}} \quad (4.8)$$

onde  $\mu_{x_{max}}$  é o limite superior para a média populacional e  $\sigma_{x_{max}}$  é o limite superior para o desvio padrão populacional, ambos obtidos usando um nível de significância  $\alpha = 5\%$  aplicados às Eqs. 4.6-4.7. É importante salientar que a escolha do limiar de discriminação

influencia tanto o tamanho detectável quanto a probabilidade de falsos positivos. Além disto, o intervalo de confiança obtido com a Eq. 4.6 é geralmente mais amplo do que o obtido com a Eq. 4.4, embora esta diferença diminua à medida que o tamanho da amostra aumente. Entretanto, cabe ressaltar que o uso da Eq. 4.4 fornece um intervalo de confiança para a média assumindo que a variância amostral é igual à variância populacional.

#### 4.5. Resultados e discussão

Uma comparação envolvendo todos os 5.048 valores dos índices de dano CCCD com os limiares de cada sensor resultou num veredito sobre a sensibilidade do SDD: um dano foi encontrado (acerto); caso contrário, um dano não foi encontrado (erro). Esta metodologia é denominada *hit/miss* na norma MIL-HDBK-1823A. Esta comparação foi feita inclusive para os casos em que a estrutura estava intacta, de modo a realizar uma análise da taxa de falsos positivos.

As Tabelas 4.4 e 4.5 mostram os resultados das taxas de acerto assim como as taxas de probabilidade de falso-positivo (PFP) para cada PZT de cada condição de integridade estrutural, onde POD é dada pela razão do número de acertos pelo número total de avaliações (neste caso, igual a 75). Para se avaliar a eficácia do procedimento de depuração de dados através do critério de Chauvenet, a Tab. 4.4 contém todas as taxas de acerto sem a depuração de dados, e a Tab. 4.5 contém todas as taxas de acerto após a depuração de dados, obtendo-se consequentemente um novo valor de limiar de discriminação.

Tabela 4.4: Resultados de taxa de acertos sem depuração de dados

Sensor #	PFP	Corte – 3 mm	Corte – 5 mm	Corte – 7 mm	Corte – 10 mm
PZT1	0%	49,41%	73,33%	100%	100%
PZT2	0%	35,29%	80%	100%	100%
PZT3	0%	10,59%	30,67%	100%	100%
PZT4	0%	25,88%	100%	100%	100%
PZT5	6,67%	22,35%	38,67%	83%	100%
PZT6	0%	49,41%	80%	90%	100%
PZT7	2,67%	0%	18,67%	44%	76,74%
PZT8	2,67%	7,06%	42,67%	57%	65,12%
PZT9	0%	51,76%	92%	100%	100%
PZT10	0%	0%	66,67%	100%	100%
PZT11	0%	48,24%	69,33%	90%	100%
PZT12	0%	29,41%	73,33%	100%	100%

Tabela 4.5: Resultados de taxa de acertos após a depuração de dados

Sensor #	PFP	Corte – 3 mm	Corte – 5 mm	Corte – 7 mm	Corte – 10 mm
PZT1	0%	49,41%	73,33%	100%	100%
PZT2	0%	37,65%	86,67%	100%	100%
PZT3	0%	10,59%	30,67%	100%	100%
PZT4	0%	29,41%	100%	100%	100%
PZT5	0%	29,41%	73,33%	95%	100%
PZT6	0%	49,41%	80%	90%	100%
PZT7	0%	9,41%	77,33%	70%	82,56%
PZT8	0%	29,41%	46,67%	65%	76,74%
PZT9	0%	51,76	92%	100%	100%
PZT10	0%	0%	66,67%	100%	100%
PZT11	0%	48,25%	69,33%	90%	100%
PZT12	0%	29,41%	74,67%	100%	100%

Os resultados da Tab. 4.5 mostram que, com a técnica de depuração de dados, a maioria dos sensores pôde detectar um corte de 7 mm a uma distância de aproximadamente 280 mm, com uma taxa de acertos igual ou maior que 90 %, com a exceção dos sensores #7 e #8; além disto, o critério de Chauvenet permitiu completa remoção de 20 falsos-positivos não desejados. É importante notar que para o Corpo de Prova B (Tab. 4.2), que contém os sensores #5 - #8, como os sensores #7 e #8 falharam nos testes de normalidade, considera-se que seu desempenho não foi satisfatório quando comparado aos demais sensores. Acredita-se que a razão para este desempenho mais pobre se deve ao procedimento de colagem dos sensores, além disto, estes sensores tiveram as menores faixas de frequência utilizadas no processo de monitoramento; entretanto, as medições para estes sensores não foram descartadas por propósitos de investigação. As Figuras 4.8 e 4.9 apresentam os resultados de modo qualitativo, para os casos sem depuração de dados e com depuração de dados, respectivamente, onde no eixo vertical, 0 significa que o SDD não percebeu dano e 1 significa que o SDD detectou um dano naquela medição. No eixo horizontal, os resultados foram agrupados aleatoriamente (a função *rand* no MATLAB foi utilizada) em retângulos em volta dos comprimentos dos cortes em milímetros.

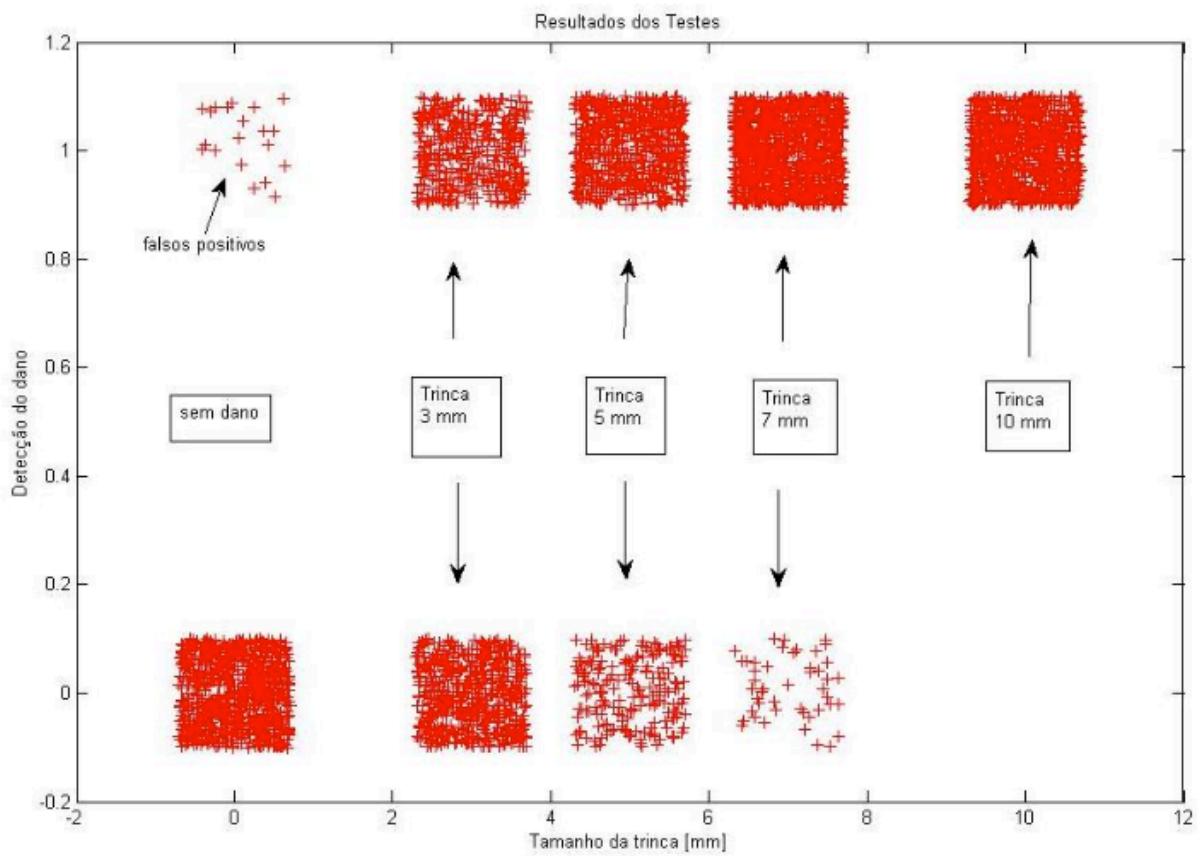


Figura 4.8 Resultados ilustrativos das 5.048 medições com o veredito acerto/erro (cada ponto vermelho “.” representa uma medição).

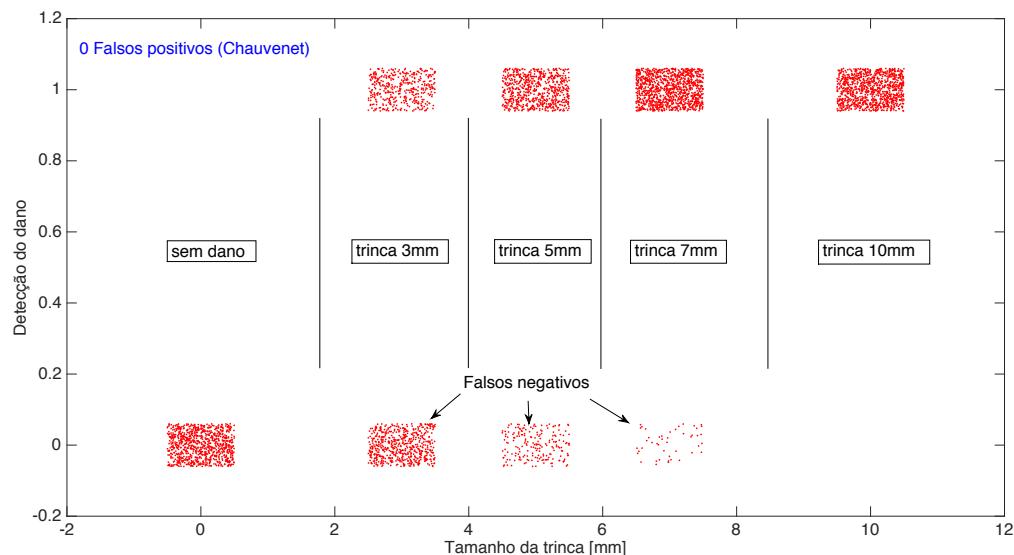


Figura 4.9 Resultados ilustrativos das 5.048 medições com o veredito acerto/erro após o procedimento de depuração de dados.

Como se pode observar na Fig. 4.9, os falsos negativos são gradativamente reduzidos à medida que a severidade do dano foi incrementada, demonstrando a maior taxa de detecção do dano pelo sistema de monitoramento de integridade estrutural.

#### **4.6. Conclusões do capítulo**

Neste capítulo, apresentou-se um método estatístico que foi projetado para determinar um nível de limiar de discriminação para um sistema de ISHM, tendo também sido realizada uma análise de sensibilidade da técnica ISHM. O método leva em conta conceitos de Controle Estatístico de Processos (CEP) e intervalos de confiança. O limiar de discriminação obtido com o método proposto foi usado para realizar uma análise de sensibilidade através da taxa de acertos (ou POD) conforme o SDD pôde com sucesso detectar o dano introduzido. Os testes foram realizados utilizando dados experimentais aplicados em painéis de alumínio aeronáutico (Al. 2024-T3) sob variação de temperatura.

Ademais, um método para realizar depuração de dados com o critério de Chauvenet foi apresentado para eliminar falsos-positivos, com o objetivo de melhorar os resultados de POD do SDD. Para isso, utilizou-se uma técnica de compensação de temperatura conhecida como deslocamento efetivo em frequência baseado em análise de correlação. Este procedimento mostrou bons resultados para a faixa de temperatura analisada neste trabalho (-10 °C a 60 °C), utilizando-se de sete curvas de assinaturas de impedância como referência (*baseline*). A análise estatística incluiu testes de normalidade de modo a conformar os dados com as hipóteses assumidas na teoria de CEP.

Os resultados mostraram que o método ISHM pode fornecer uma medida do nível do dano uma vez que os índices de dano mostraram-se com tendência de crescimento à medida que o nível de dano foi aumentando. A Tab. 4.5 da taxa de acertos pôde ser obtida após a análise estatística e a depuração de dados, mostrando que para esta inspeção do sistema ISHM, um corte de 7 mm de comprimento cuja distância até os sensores é de aproximadamente 280 mm, pôde ser detectado com uma confiança de 95 % para 9 de 12 sensores usados no experimento. Notavelmente, os comprimentos de onda usados com a técnica ISHM são maiores do que a extensão do dano detectável, mostrando que a técnica ainda pode detectar dano nesta condição, embora a sensibilidade seria melhor usando comprimentos de onda menores (*i.e.* faixas de frequência mais altas).

É importante mencionar que os cortes inseridos nos corpos de prova não são iguais a trincas de fadiga, que correspondem à ocorrência de dano localizado e progressivo devido a variações contínuas de tensões mecânicas. Na sequência, a detecção de uma trinca real de fadiga incipiente foi realizada no âmbito deste trabalho de doutorado e este tópico será

tratado no capítulo seguinte (capítulo 5). Em seguida, de modo a contemplar um estudo de caso em uma estrutura complexa, no capítulo 6, a técnica de ISHM é testada em uma estrutura de um rotor horizontal em operação, com o propósito de fazer a detecção de falhas relacionadas a efeitos de desbalanceamento, bem como o próprio efeito das vibrações induzidas aos movimentos rotativos inerentes.

## CAPÍTULO V: MONITORAMENTO DE INTEGRIDADE ESTRUTURAL EM TEMPO REAL DE TRINCA DE FADIGA EM UMA VIGA DE ALUMÍNIO USANDO UM DISPOSITIVO PORTÁTIL

### 5.1. Resumo

Um problema recorrente na manutenção de aeronaves é o desenvolvimento e a detecção de trincas de fadiga em componentes estruturais caracterizadas pela concentração localizada de altas tensões mecânicas. Métodos tradicionais de END são eficientes para inspecionar trincas de maneira *off-line*; entretanto, a implementação em tempo real destes métodos não é comum. Neste capítulo, um procedimento para monitorar a evolução de trincas em vigas de alumínio sob carregamento dinâmico é apresentado. Para isto, utilizou-se do método de SHM baseado na impedância eletromecânica. Um carregamento dinâmico em níveis pré-determinados foi obtido com um excitador eletrodinâmico. Uma rotina de controle foi usada para manter a frequência de acionamento e a aceleração de acionamento na condição de ressonância do primeiro modo de vibração. Durante os testes, medições de impedância foram obtidas usando um dispositivo de impedância portátil e de baixo custo. Índices de dano foram correlacionados com números específicos de ciclos até que mudanças na frequência natural causadas pela propagação de trincas alcançassem um limite crítico. Finalmente, um método estatístico é proposto para a obtenção do limiar de discriminação de dano. Baseando-se em curvas S/N, o limiar obtido foi comparado aos índices de dano, de modo que a detecção tenha sido possível antes ainda do aparecimento de uma trinca visível.

Destaca-se que os experimentos realizados no primeiro estudo de caso foram feitos no âmbito do período de doutorado “sanduíche”, realizado na University of Michigan (EUA), no departamento de Engenharia Aeroespacial, sob a co-orientação do prof. Daniel J. Inman. Os experimentos realizados no segundo estudo de caso (apresentado no capítulo 6) foram realizados na sala de máquinas rotativas do Laboratório de Mecânica de Estruturas (LMEst) da UFU/FEMEC, em parceria com o prof. Aldemir A. Cavalini Jr.

## 5.2. Introdução.

A propagação de trincas em estruturas metálicas é um problema recorrente em muitas estruturas de engenharia e uma das tarefas mais críticas em análise de fadiga é a de identificar com confiança uma trinca em seu estágio inicial (trinca incipiente). Além disto, o prognóstico de um dano e seu diagnóstico pode ser de suma importância em aplicações militares e civis tais como em fuselagem de aeronaves, conexões de dutos e tubulações, máquinas rotativas, plataformas *offshore*, e outros tipos de estrutura que operam em condições ambientais adversas ou críticas como, por exemplo, as construções civis. As falhas devem ser localizadas e reparadas oportunamente de modo a minimizar custos de manutenção, enquanto se maximiza o desempenho do sistema, a segurança e a confiabilidade. Assim, a melhoria de técnicas que garantem a precisão e confiabilidade do processo de SHM é altamente desejável e é assunto de vários estudos tanto no contexto acadêmico como no industrial (Farrar; Lieven; Bement, 2005).

Danos associados com fadiga produzem mudanças permanentes, progressivas e localizadas. Este processo ocorre enquanto o material é sujeito a condições que produzem tensões dinâmicas em um ou mais pontos que podem potencialmente produzir trincas ou, em alguns casos, uma falha catastrófica após um determinado número de ciclos de carga (Branco, 1994). A fratura causada por fadiga se deve à nucleação e propagação de micro-trincas que aparecem em amostras sujeitas a carregamento cíclico. Esta fratura ocorre repentinamente sem a emissão de nenhum sinal de alerta. Lembra-se, ainda, que a trinca não é inicialmente visível durante o teste dinâmico (Palomino *et al.*, 2011).

Muitos métodos têm sido implementados na busca de se detectar trincas incipientes de fadiga. Para estimar indiretamente o dano de fadiga acumulado, um método tradicional é o monitoramento de cargas ou de sequências de cargas. Esta abordagem é comumente conhecida como monitoramento de cargas operacionais (*Operational Loads Monitoring – OLM*). Em estruturas aeroespaciais, alguns destes métodos incluem o monitoramento de cargas baseadas em parâmetros de voo e o monitoramento de cargas baseado em dados provenientes de extensômetros elétricos (*strain-gages*). Entretanto, a experiência acumulada ao longo dos últimos anos leva à conclusão de que a vasta quantidade de informações coletadas requer um gerenciamento de dados cada vez mais eficiente. Este problema se torna especificamente relevante ao observar o tempo de serviço crescente de aeronaves comerciais. O sistema OLM pode fornecer um banco de dados para se determinar analiticamente quando um dano pode ocorrer. Entretanto, existe uma distância entre o dano previsto e o dano real que pode ser de duas a três vezes maior do que valores previstos analiticamente. Esta diferença se torna ainda maior quando se trata de materiais

compósitos onde os métodos de análise de fadiga e mecânica da fratura são relativamente menos conhecidos quando comparados aos materiais metálicos (Boller e Staszewski, 2004).

Uma outra forma de realizar a tarefa de detecção de trincas incipientes de fadiga é através de métodos de SHM, dentre os quais se enquadra a técnica ISHM que é a estudada no contexto desta tese.

Estudos anteriores têm demonstrado a possibilidade de usar pastilhas de PZT para o monitoramento de trincas de fadiga. Em materiais metálicos, usando técnicas de ISHM, Palomino *et al.* (2011) mostram uma correlação obtida entre o número de ciclos e os sinais de impedância utilizando meta-modelos. Abordagens baseadas em ondas ultrassônicas guiadas têm sido implementadas com sucesso para monitorar o crescimento de trincas de fadiga (Cho e Lissenden, 2012; Fromme e Sayir, 2002; Massarey e Fromme, 2013) embora o processo de monitoramento seja geralmente realizado com a estrutura em uma condição estática, após um certo número de ciclos de carga.

Para materiais compósitos, Grisso; Peairs e Inman (2004) obtiveram uma correlação quase linear entre a quantidade de trincas presentes e as métricas de dano, realizando um ensaio de tração quase-estático de modo a detectar o início da formação de trincas na matriz de um material composto de grafite/epóxi. Entretanto, as medições foram tomadas em uma condição estática. Em outra abordagem de SHM, Lamberti *et al.* (2016) usaram sensores ópticos FBG (*Fiber Bragg Grating*) e técnicas de análise modal para monitorar a propagação de delaminações induzidas em compósitos laminados. Contudo, o método não pode ser utilizado para fins de localização do dano.

A capacidade de monitorar a integridade estrutural sob condições operacionais pode ser muito útil em problemas de engenharia. Neste estudo, o sistema ISHM será testado para detectar a inicialização de trincas utilizando leituras de impedância enquanto o corpo de prova sofre carregamentos cíclicos contínuos. Para isto, uma viga de alumínio foi presa a um excitador eletrodinâmico e as medições foram tomadas em tempo quase real. O objetivo deste trabalho é o de investigar as condições sob as quais o método ISHM poderia ser utilizado para monitorar uma trinca de fadiga induzida e seus estágios de propagação, a partir de condições contínuas de medição (sem interrupção do carregamento cíclico). Além disto, um método para determinar o limiar de detecção foi proposto com o uso de curvas S/N. Uma análise de sensibilidade associada com o limiar de discriminação é realizada usando os dados experimentais. Para fins de comparação, os resultados também são apresentados para uma viga de alumínio similar onde as medições foram tomadas em uma condição estática (com interrupção do carregamento cíclico) em um número de ciclos aproximadamente igual, e com a mesma especificação de carregamento dinâmico.

### 5.3. Falhas de fadiga causadas por carregamentos cílicos

Muitos materiais que experimentam carregamento cíclico com elevados níveis de tensão eventualmente desenvolvem trincas. Trincas microscópicas geradas nos grãos de um metal se propagam no respectivo componente durante sua vida em serviço sob condições variáveis de carregamento. As trincas e corrosões são os mecanismos mais comuns de falhas induzidas por fadiga em estruturas aeroespaciais. A importância da falha por fadiga levou à diferenciação de tipos de falha por fadiga, conforme reportado por Suresh (1998). Uma sequência de cargas variáveis em conjunção com altas temperaturas resulta em deformações do tipo fluência. Cargas cílicas com contatos deslizantes e de rolamento levam a fadiga de contato deslizante ou de rolamento, respectivamente. Fadiga por desgaste é outra forma de falha devido a tensões cílicas e movimento de fricção oscilatório entre componentes.

A Sociedade Americana para Metais (*American Society for Metals – ASM*) (1975) definiu a fadiga como “a mudança estrutural progressiva, localizada e permanente que ocorre em um material sujeito a deformações repetitivas ou flutuantes em tensões, tendo um valor máximo menor que a resistência à tração do material”. Para carregamentos axiais, a resistência à tração é a quantidade máxima de tensão de tração que um material pode suportar antes de se romper.

Três estágios de desenvolvimento de trinca de fadiga são comumente definidos na literatura (Budynas e Nisbett, 2011). O **estágio I** é a iniciação de uma ou mais micro-trincas devido a deformações plásticas e cílicas seguidas de propagação cristalográfica. Trincas do **estágio I** não são discerníveis a olho nu. O **estágio II** progride de micro-trincas para macro-trincas formando superfícies de fraturas paralelas separadas por cumes longitudinais. Estas superfícies são geralmente suaves e perpendiculares à direção de máxima tensão de tração. Durante o carregamento dinâmico, estas superfícies de trincas se abrem e fecham, com fricção. O **estágio III** ocorre durante o ciclo final de tensão quando o material remanescente não consegue suportar as cargas, resultando em uma fratura repentina. Uma vez que uma trinca tenha se iniciado em qualquer superfície, esta se propaga rapidamente devido à alta concentração de tensões localizadas.

Os principais tipos de ciclos de tensão aplicados em testes de fadiga podem ser categorizados como um dos dois grupos principais: ciclos de tensão com amplitude constante, e ciclos de tensão com amplitude variável. No primeiro caso, o componente é sujeito ao mesmo ciclo de tensão, mantendo a amplitude da força constante. Os ciclos de tensão com amplitude variável representam os mais frequentes e também complexos de se analisar, uma vez que sua amplitude de excitação varia ao longo do ensaio (Souza, 2000).

Os ciclos de tensão usados no experimento deste trabalho são ciclos com amplitude aproximadamente constante. Para isto, uma rotina de controle em malha fechada foi utilizada. Esta rotina será detalhada na seção 5.4.

Em ensaios convencionais de fadiga, os resultados são apresentados na forma de gráficos da tensão mecânica (tensão alternada aplicada de módulo  $\sigma$ ) contra o número de ciclos de tensão  $N_c$  requeridos para causar fratura. Este gráfico é comumente referido na literatura como curva ou diagrama S/N (S relacionado à tensão mecânica, em inglês *stress*, e  $N$  relacionado ao número de ciclos de carga). Neste estudo, as vigas usadas no experimento são feitas de alumínio 6061-T6, tratando-se de um material que não exibe um limite à fadiga bem definido (Boresi e Schmidt, 2003). Neste caso, costuma-se definir a tensão necessária para causar falha para um dado número de ciclos como o limite de resistência à fadiga (*endurance limit*)  $\sigma_L$ . Um manual da *Federal Aviation Agency – FAA* (DOT/FAA/AR-MMPDS-01, 2003) fornece curvas de melhor ajuste para ligas de alumínio 6061-T6 de vários produtos forjados (veja a Fig. 5.1).

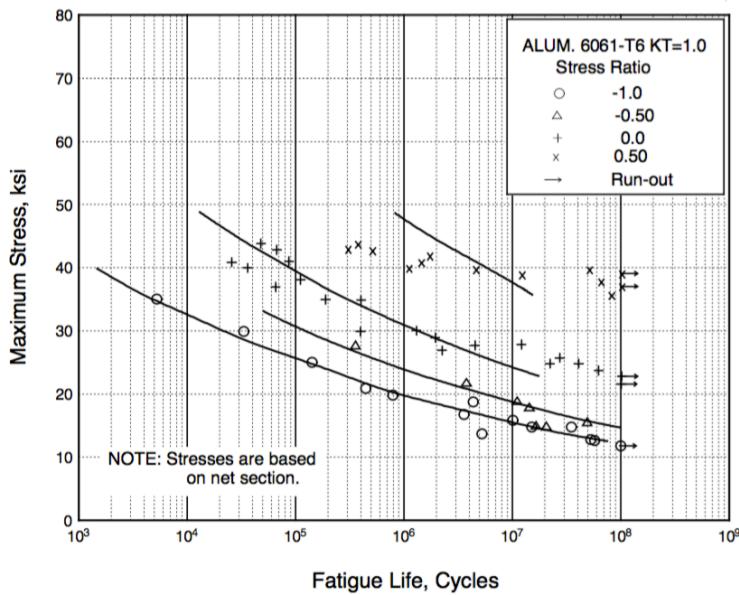


Figura 5.1. Curvas S/N de melhor ajuste para ligas de alumínio 6061-T6, vários materiais forjados. Fonte: (DOT/FAA/AR-MMPDS-01, 2003).

A curva S/N é frequentemente usada para representar uma curva de 50 % de probabilidade de falha. Isto significa que, se um número elevado de corpos de prova fosse testado a um dado nível de tensão, pode-se esperar que aproximadamente 50 % dos corpos de prova falhem antes de  $N_c$  números de ciclos de carga correspondentes ao mesmo nível de tensão. O comportamento dos materiais devido à fadiga depende de muitos fatores, tais como as condições de superfície, tamanho e geometria do corpo de prova, nível de

concentração de tensão, estado plano de tensão, temperatura, tipo do material, tratamento térmico, dentre outros (Palomino *et al.*, 2011). As condições de carregamento (tração, compressão, torção, flexão e suas combinações) também são particularmente importantes para a influência global destes parâmetros.

#### **5.4. Planejamento e configuração do experimento**

Um excitador eletrodinâmico (*shaker*) foi usado para induzir trincas de fadiga na viga de alumínio. Um acelerômetro (modelo: 352C67) da *PCB Piezotronics Inc.* foi anexado à base do excitador eletrodinâmico para fornecer a aceleração da força de excitação. Este acelerômetro possui uma sensibilidade de 9,94 mV/m/s<sup>2</sup>. A aceleração da viga foi medida usando-se um vibrômetro a laser (*Laser Doppler Vibrometer-LDV*) da *Politec Inc.* (modelo: OFV-5000) com uma sensibilidade de 500 mm/s/V. O excitador eletrodinâmico é acionado por tensão elétrica através de um controlador amplificador com um computador, através de um cartão de aquisição de dados NI USB-6211 (NI DAQ).

O tipo de excitação induzida foi o primeiro modo de vibração, uma vez que através deste modo pode-se obter maiores concentrações de tensão na base (lado engastado da viga), onde se espera que uma trinca de fadiga seja iniciada. O objetivo deste experimento é testar se o sensor de pastilha de PZT consegue detectar a trinca de fadiga em seu estágio inicial de desenvolvimento, usando a metodologia de ISHM para uma estrutura sob condições operacionais.

Ao se excitar a viga em seu primeiro modo de vibração e controlando a deflexão da ponta, pode-se prescrever a máxima tensão de deflexão desejada  $\sigma_{max}$  na viga. A máxima tensão está localizada na base da viga, região onde se espera que o dano ocorra (Budynas e Nisbett, 2011). Assumindo que o corpo de prova da viga é longo, delgado, e possui propriedades de massa e rigidez uniformes, esta viga pode ser tratada como uma viga de Euler-Bernoulli. A forma modal correspondente ao primeiro modo de vibração para a viga foi estimado usando a deflexão de uma viga em balanço (engastada-livre) sujeita a uma carga uniformemente distribuída ao longo de seu comprimento. Assumindo esta forma modal, é possível determinar a deflexão da ponta  $y_{max}$  medindo-se a deflexão em qualquer ponto ao longo da viga com a exceção da localização engastada. Ao se combinar as expressões para a deflexão e o momento fletor, pode-se obter a seguinte relação entre a máxima deflexão da ponta e a máxima tensão mecânica:

$$y_{max} = -\frac{1}{2} \frac{l^2 \sigma_{max}}{Et} \quad (5.1)$$

onde  $l$  é o comprimento da viga,  $E$  é o módulo de elasticidade e  $t$  é a espessura.

O ângulo de fase entre os vetores da aceleração da força de excitação ( $A$ ) e da aceleração da viga ( $B$ ) pode ser expresso como:

$$\Phi = \arccos\left(\frac{A \cdot B}{\|A\| \cdot \|B\|}\right) \quad (5.2)$$

levando-se em conta a lei dos cossenos onde ( $\bullet$ ) denota o produto escalar e o par vertical de linhas denota o módulo do vetor correspondente.

Os sinais de aceleração da excitação da base da viga foram usados para se controlar os seguintes parâmetros do excitador eletrodinâmico: frequência de excitação, aceleração da força de excitação (base do *shaker*) e amplitude de excitação. A rotina de controle foi definida com o auxílio de um programa desenvolvido na plataforma Labview®, com dois controladores PID implementados. A tarefa do PID#1 é manter a fase entre a aceleração da força de excitação e a aceleração da viga em 90 °, enquanto que a tarefa do PID#2 é manter a tensão mecânica na base da viga em um nível desejado pré-determinado (o limite de resistência  $\sigma_L$ , conforme determinado em testes preliminares).

A viga de alumínio possui largura, espessura e comprimento livre de 1" (25,4 mm), 0,1226" (3,1140 mm) e 12" (304,8 mm), respectivamente. A liga de alumínio usada foi a 6061-T6 e algumas de suas propriedades mecânicas de interesse são mostradas na Tab. 5.1. A pastilha de PZT foi colada a 8" (203,2 mm) do engaste (isto é, próxima ao lado livre da viga) de modo a se evitar a área de maior concentração de tensões. Esta localização foi escolhida uma vez que, se a pastilha de PZT fosse colada na área de mais alta concentração de tensão, haveria a possibilidade de quebra do sensor e/ou problemas de descolagem do mesmo, o que implicaria em outras influências indesejáveis nos sinais de impedância medidos.

Um pedaço circular de fita refletora foi posicionado a 3" (76,2 mm) do engaste, de modo que o LDV pudesse realizar medições precisas da aceleração da viga. Um desenho esquemático da configuração do corpo de prova é mostrado na Fig. 5.2a e sua foto é mostrada na Fig. 5.2b.

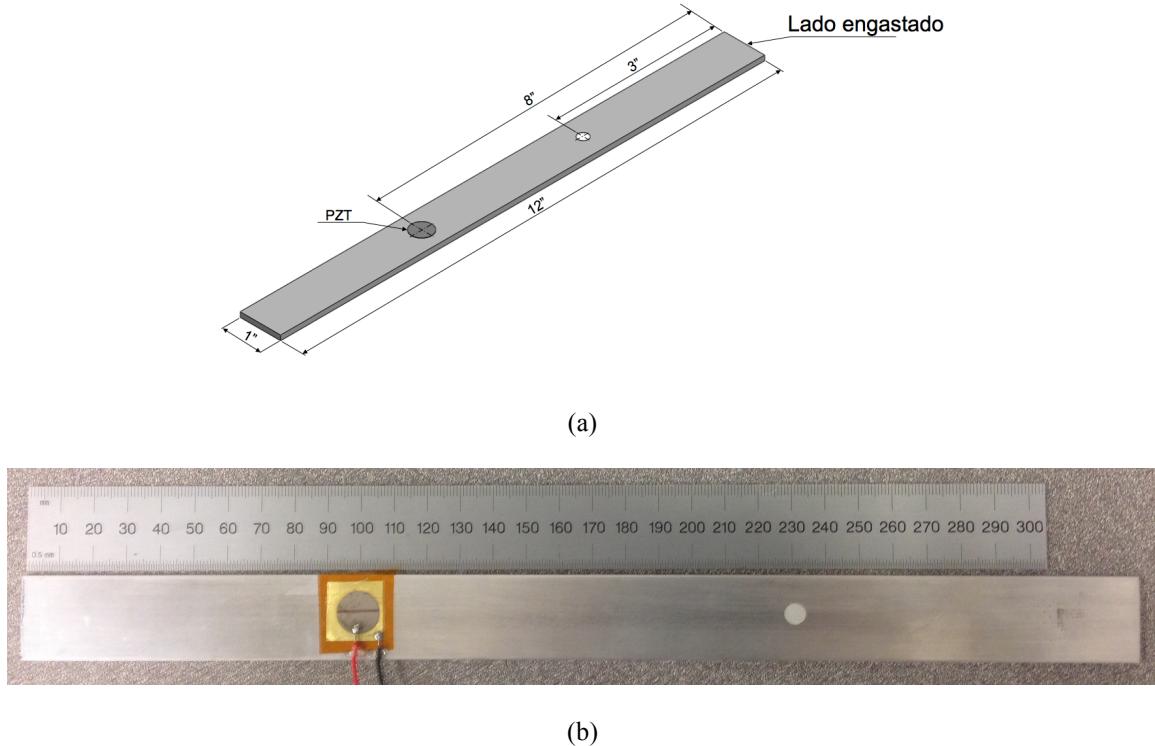


Figura 5.2. Viga instrumentada com pastilha de PZT e fita refletora. Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 5.1: Propriedades da liga de alumínio 6061-T6. Fonte: Matweb, 2016.

<b>Limite de escoamento</b>	276 MPa a 24 °C
<b>Limite de resistência à tração (LRT)</b>	310 MPa a 24 °C
<b>Elongação na ruptura</b>	17 %
<b>Módulo de Elasticidade</b>	68.9 GPa

Baseando-se em curvas S/N típicas para o alumínio 6061-T6 (Fig. 5.1), a resistência à fadiga escolhida para o experimento foi de 150 MPa, nível no qual se espera que o dano inicie após aproximadamente 500.000 ciclos de carga. Ensaios preliminares foram realizados de modo a se determinar a tensão requerida para causar falha para um dado número de ciclos, isto é, o limite de resistência à fadiga  $\sigma_L$ . Estes ensaios iniciais também foram úteis para testar e aperfeiçoar a rotina de controle automatizada que foi programada no software Labview®. Após configurar o controlador, a amplitude de tensão mecânica desejada e número de ciclos foram determinados como 150 MPa e 500 k ciclos de carga, respectivamente. As medições de impedância foram feitas a partir de um disco de piezocerâmica redondo, com 0,5" (12,7 mm) de diâmetro, e 0,0075" (0,1905 mm) de

espessura (modelo: PSI-5A4E), da *Piezosystems Inc.* O disco de PZT foi colado em um dos lados do corpo de prova usando-se uma resina de composto duplo a base de epóxy (tipo: DP460) da *3M Inc.* O dispositivo de medição de impedância utilizado foi o mesmo descrito nos capítulos 3 e 4.

Um desenho esquemático do teste é mostrado na Fig. 5.3(a) enquanto que uma foto da bancada de teste real é mostrada na Fig. 5.3(b). Uma mesa do excitador eletrodinâmico foi posicionada em seu topo de modo que a viga pudesse ser posicionada também no topo, com as forças de excitação sendo aplicadas apenas em sua base. As faixas de frequência utilizadas neste ensaio foram de 28 a 48 kHz e 101 a 109 kHz. Estas duas faixas de frequência foram escolhidas experimentalmente, tendo como critério de seleção uma boa densidade de picos observada nas assinaturas de impedância correspondentes.

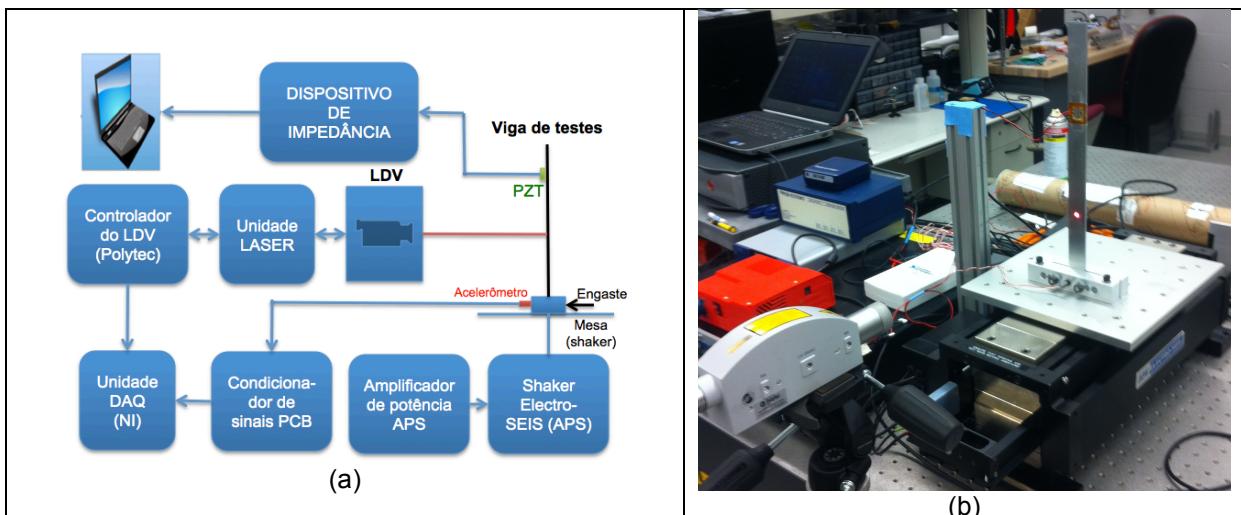


Figura 5.3 (a): Esquemático do teste; (b): Bancada experimental utilizada.

O fluxograma mostrado na Fig. 5.4 ilustra vários passos do procedimento experimental.

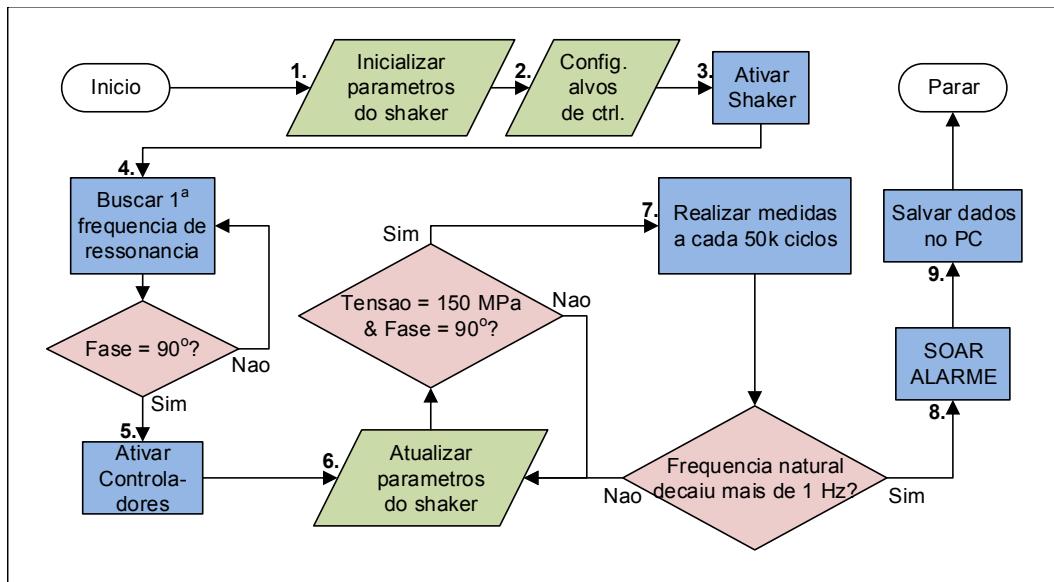


Figura 5.4 Fluxograma do experimento.

Abaixo cada passo do fluxograma é detalhado:

- 1) Inicializar parâmetros do *shaker*: configuração da frequência de excitação e aceleração da força de excitação. Neste passo, um sinal senoidal é gerado e enviado à placa de aquisição (NI DAQ). O sinal é amplificado e então aplicado pelo *shaker*.
- 2) Configurar alvos de controle: busca ajustar os parâmetros de controle (ou *setpoints*) como ganho de frequência, ganho de tensão mecânica e o ganho de amplitude da tensão elétrica do *shaker*.
- 3) Ativação do *shaker*: *Shaker* (Excitador eletrodinâmico) é acionado.
- 4) Busca pela 1ª frequência de ressonância: a frequência é encontrada primeiramente com uma baixa amplitude de vibração através da busca pelo ponto em que a fase entre a aceleração da força de excitação e a aceleração da viga é 90º, isto é, alcançou a ressonância. Neste momento, a assinatura do *baseline* é salva. A 1ª frequência de ressonância é configurada e um critério de parada é configurado de modo que se a frequência de excitação diminuir mais do que 1 Hz (efeito da trinca), um alarme é ativado (Critério de parada).
- 5) Ativar controladores: neste passo, a fase alvo (90º) e a tensão mecânica alvo (150 MPa) são buscadas como *setpoints* nos controladores.
- 6) Atualizar parâmetros do *shaker*: ajusta a frequência de excitação, a aceleração da excitação e a amplitude da excitação de modo a manter a viga sob ressonância (fase=90º) e no nível desejado de tensão mecânica.

Enquanto isto, os valores de tensão mecânica são salvos juntamente com a fase, frequência de acionamento e número de ciclos. Este passo fica constantemente ativo até que o critério de parada seja atingido.

- 7) Realizar medições a cada 50 k ciclos: inicia a gravação dos dados de impedância a cada 50.000 ciclos.
- 8) Soar alarme: Após a frequência natural ter diminuído mais do que 1 Hz em módulo devido à perda de rigidez, um alarme de segurança é acionado e as leituras finais de impedância são adquiridas.
- 9) Salvar dados no PC: salva os dados para pós-processamento dos sinais em ambiente MATLAB.

Deve-se destacar que, como se espera que o dano se inicie a cerca de 500 k ciclos, os carregamentos foram interrompidos após as medições serem tomadas de modo a verificar o aparecimento de qualquer trinca visível. Este procedimento foi interrompido quando o critério de parada foi atingido, ou seja, aos 638 k ciclos. Além disto, embora as assinaturas de impedância sejam geralmente sensíveis a variações de temperatura, neste experimento considerou-se que a temperatura se manteve constante durante os ensaios, mantendo-se o laboratório climatizado durante toda a execução dos testes.

Para fins de comparação, outra viga de alumínio também foi testada, com condições similares de ensaio, exceto que as medições de impedância foram tomadas quando a viga se encontrava em repouso.

#### *5.4.1. Faixa de frequência*

À medida que a frequência de excitação aumenta, a sensibilidade também aumenta (Park *et al.*, 2003). O inconveniente ao se aumentar demasiadamente a faixa de frequência é que geralmente as amplitudes de pico tendem a diminuir em altas frequências, tendo como consequência a diminuição da distância sensível entre o sensor ao dano. Este compromisso é importante no desempenho geral do SDD ao se escolher a faixa de frequência apropriada para uma implementação bem sucedida. Tendo isto em vista, neste trabalho duas faixas de frequência com boas densidades de pico foram selecionadas de modo a observar o desempenho global do sistema.

## 5.5. Resultados e discussão

O tempo de aquisição para cada medição de impedância levou aproximadamente 28 s devido ao processo de médias e ao número de pontos de frequência necessários para fornecer uma resolução em frequência de 8 Hz para todos sinais de impedância. Consequentemente, cada condição de teste corresponde ao momento em que o número de ciclos de carga atingiu a marca de 50 k ciclos. A primeira frequência de ressonância do corpo de prova foi encontrada como sendo 25,03 Hz e o número resultante de ciclos foi salvo à medida que os controladores atualizavam os parâmetros do *shaker*.

Cabe ressaltar que o *baseline* foi salvo enquanto o corpo de prova permanecia sob carregamento dinâmico, sujeito ao primeiro modo de ressonância, e com um nível de tensão mecânica configurado em 20 MPa. Este procedimento foi adotado tendo em vista que há variações significativas entre os sinais de impedância adquiridos sob a condição de repouso quando comparados com os sinais adquiridos sob a condição de carregamento dinâmico, conforme se pode observar através da Fig. 5.5(a). Além disto, um filtro FIR (*Finite Impulse Response*) de 3<sup>a</sup> ordem do tipo Savitzky-Golay (SG) foi aplicado aos dados de modo a remover parcialmente o ruído inerente e também para suavizar as curvas de impedância, conforme a Fig. 5.5(b). Nenhuma conclusão significativa poderia ser obtida usando-se o *baseline* correspondente à viga em repouso, considerando os dados de teste da viga em movimento. As assinaturas de impedância obtidas na condição da viga em movimento apresentaram comportamento oscilatório em volta dos picos, conforme se pode observar na Fig. 5.5(a).

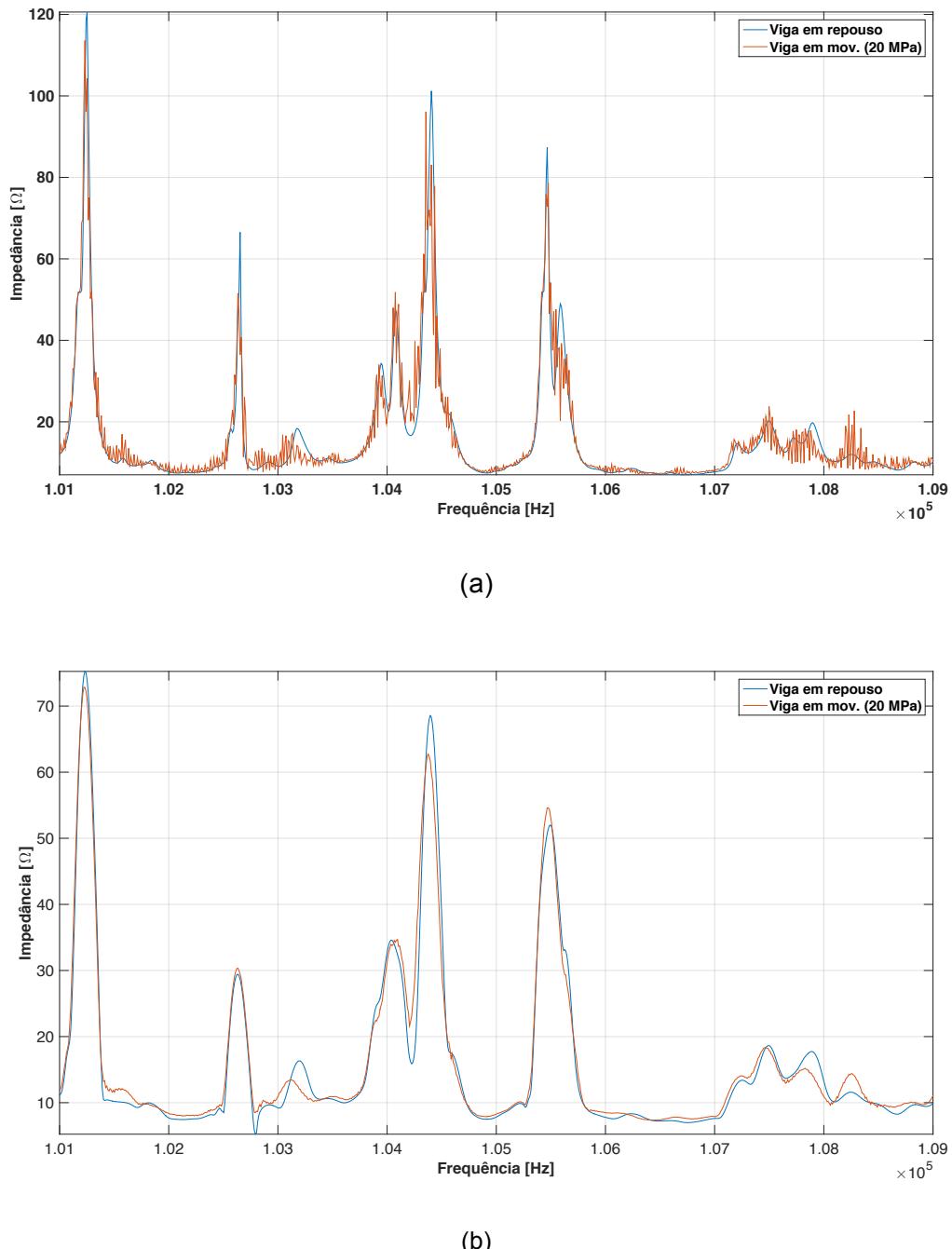


Figura 5.5 Comparativo de *baselines* entre a vida em repouso e a viga em movimento: (a) sem filtro SG; (b) com filtro SG.

Uma avaliação qualitativa do ensaio de fadiga fornecida pelo método ISHM é mostrada na Fig. 5.6 usando apenas medições de impedância com o corpo de prova em repouso, enquanto a Fig. 5.7 apresenta as medições de impedância com o corpo de prova em movimento oscilatório.

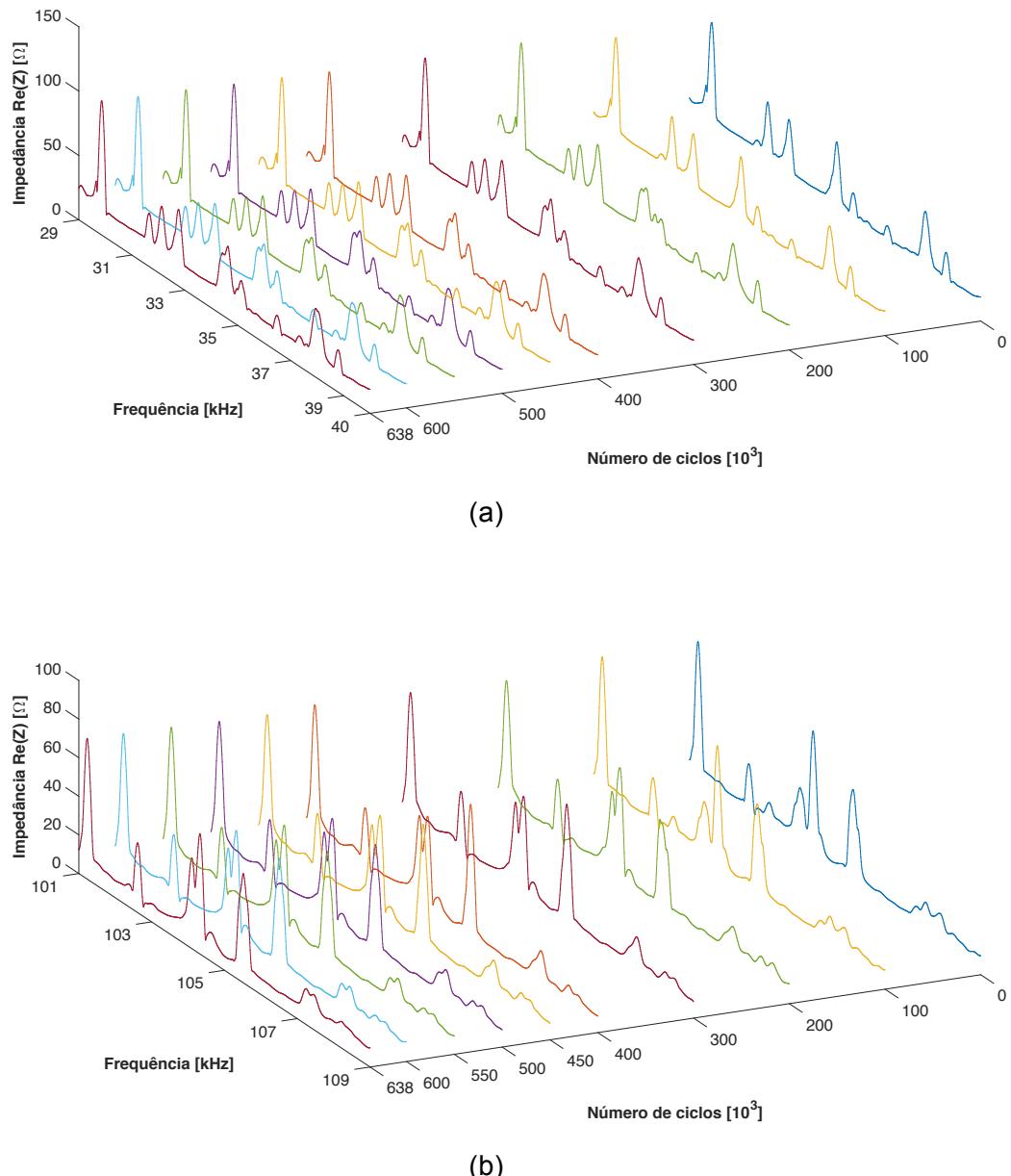


Figura 5.6 Assinaturas de impedância com a viga em repouso: (a) faixa de frequência 29-40 kHz; (b) faixa de frequência 101-109 kHz.

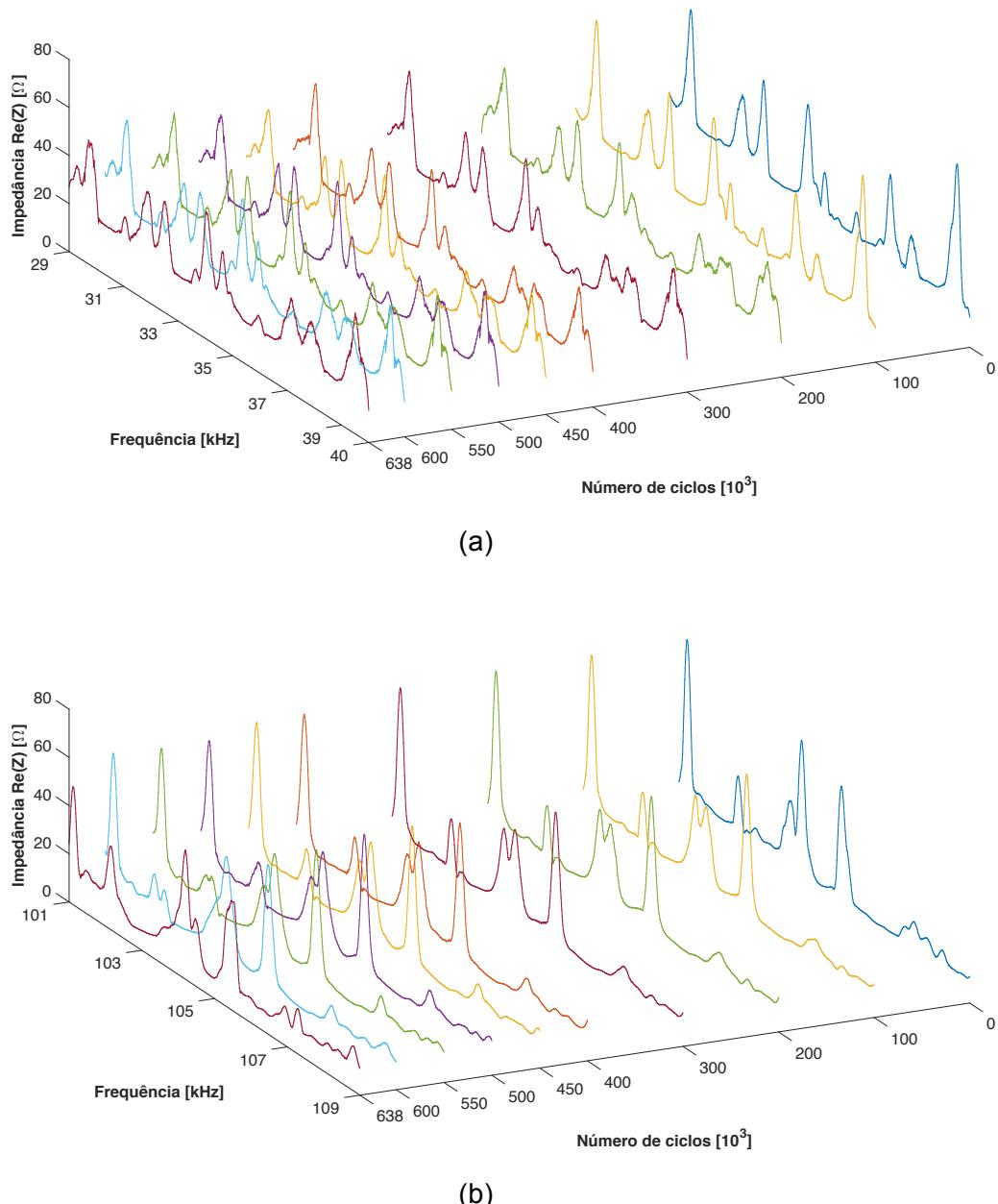


Figura 5.7 Assinaturas de impedância com a viga em movimento oscilatório: (a) faixa de frequência 29-40 kHz; (b) faixa de frequência 101-109 kHz.

As Figuras 5.6 e 5.7 mostram que, à medida que o número de ciclos progride, as assinaturas de impedância tornam-se mais diferentes do *baseline* (referência para a qual o número de ciclos é zero), tanto para a viga em repouso como para a viga em movimento, respectivamente. Estas mudanças serão usadas para determinar a severidade do dano (ou propagação da trinca) que ocorre no corpo de prova testado. Cabe ressaltar que algumas

respostas de impedância (para os ciclos de 50 k, 150 k e 350 k) foram omitidas das Figs. 5.6 e 5.7 para manter a clareza.

### 5.5.1 Análise estatística e determinação do limiar de discriminação

Conforme previamente mencionado, o ciclo de carga foi interrompido após as medições nos pontos de 500 k, 550 k e 600 k ciclos para inspeção visual. O alarme foi ativado no ponto de aproximadamente 638 k ciclos, instante em que a frequência natural caiu a mais de 1 Hz em magnitude. Neste momento, uma medição final da impedância foi coletada e, ao fazer uma inspeção visual, uma trinca visível pôde ser observada na superfície oposta da viga, ao lado do local onde o sensor foi colado. A posição da trinca ao longo de seu comprimento se deu a aproximadamente 14 mm distante do lado engastado, conforme mostrado na Fig. 5.8.

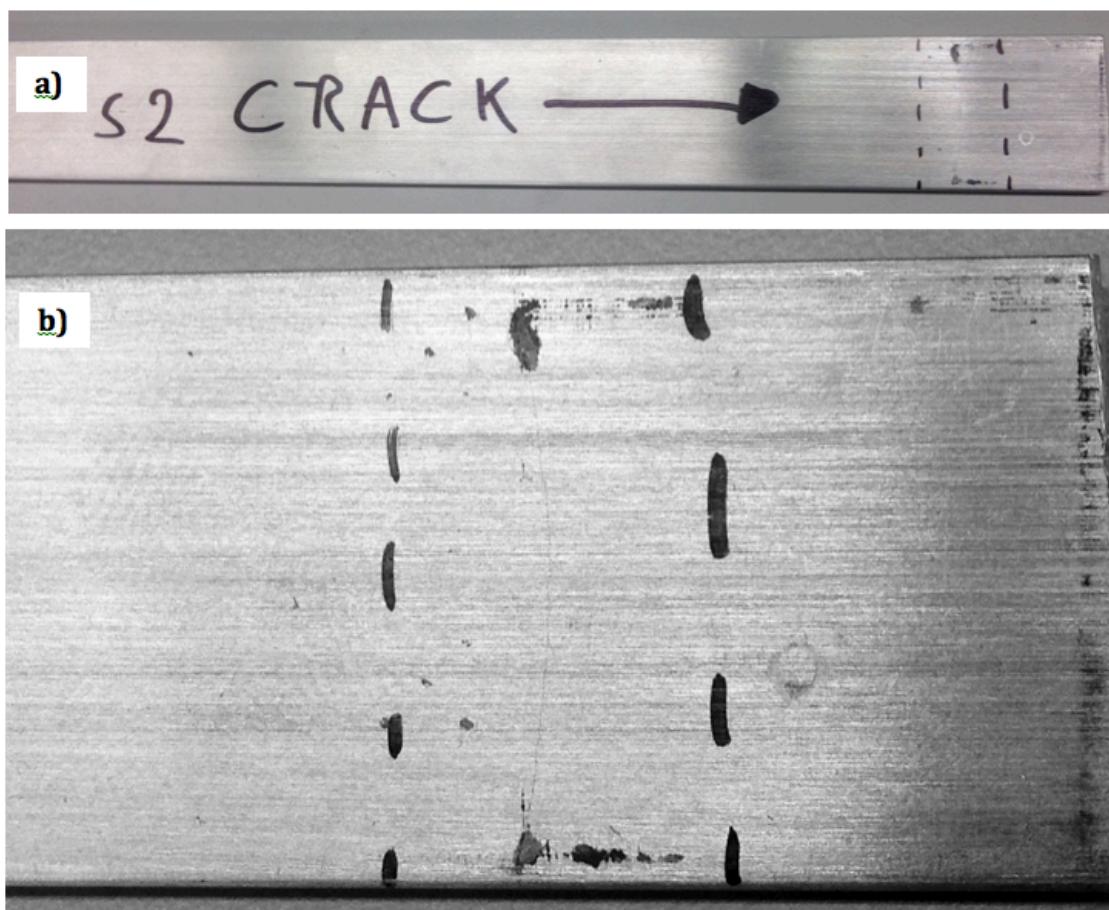


Figura 5.8 (a): Localização da trinca na viga; (b): vista amplificada e filtrada.

Métricas de dano CCD foram obtidas tomando-se como referência as assinaturas de impedância das Figs. 5.6 e 5.7, para cada condição estrutural, isto é, para cada número de ciclos de carga atingido. Um conjunto de histogramas mostrando as métricas de dano é apresentado nas Fig. 5.9(a) e Fig. 5.9(b) para a viga em repouso, e nas Fig. 5.9(c) e Fig. 5.9(d) para a viga em movimento oscilatório.

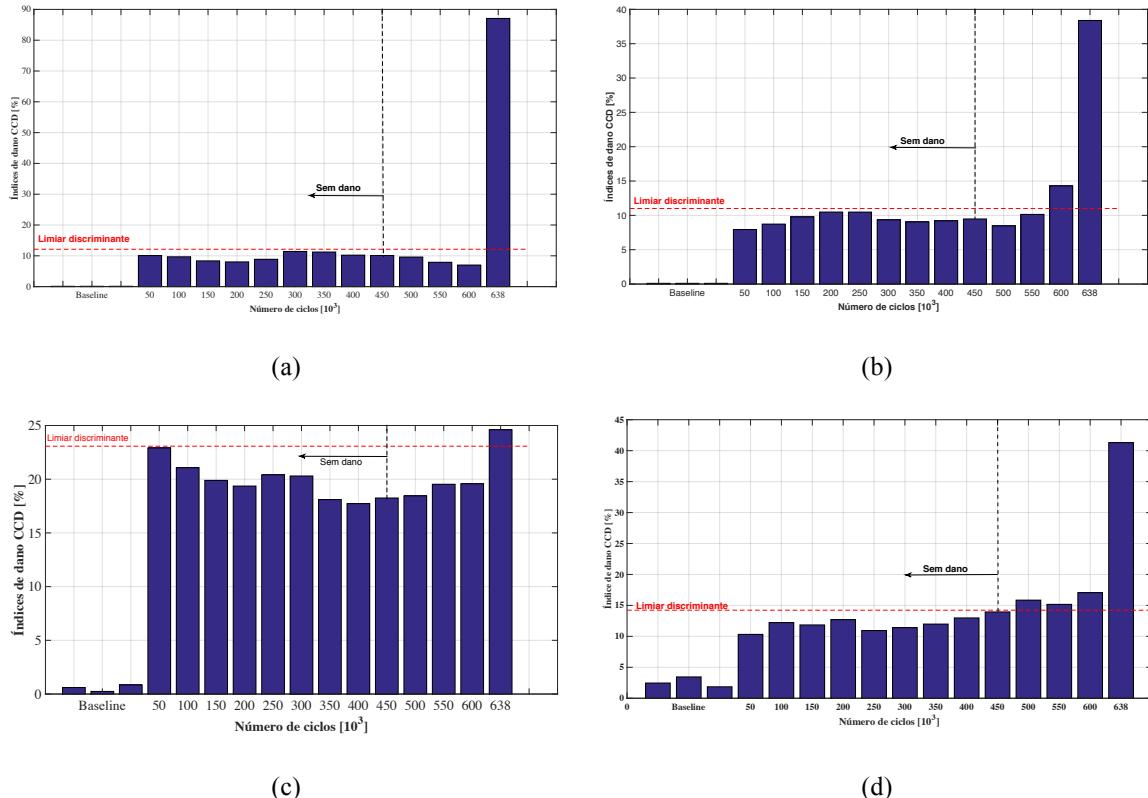


Figura 5.9 Índices de dano CCD em função do número de ciclos: (a) – em repouso (29-40 kHz); (b) – em repouso (101-109 kHz); (c) – em movimento (29-40 kHz); (d) – em movimento (101-109 kHz).

As primeiras três barras dos histogramas da Fig. 5.9 comparam as condições sem dano com os respectivos *baselines*. Os limiares de discriminação estatísticos na Fig. 5.9 foram determinados a partir da curva S/N para o alumínio 6061-T6. Como as curvas S/N indicam (com 50 % de probabilidade de falha) o número de ciclos de falha a ser atingido, adotou-se como procedimento para determinar o limiar de discriminação que os índices de dano de 50 k ciclos até 450 k ciclos seriam considerados parte da amostra “sem dano”. Foi assumido que estes dados tinham natureza aleatória, uma vez que, baseando-se na curva S/N, nenhum dano havia ocorrido até este ponto e portanto os índices de dano não deveriam ter variações significativas. Os resultados dos índices de dano até 450 k ciclos indicam que a nucleação da trinca não foi completamente desenvolvida neste estágio, uma

vez que não foram observadas variações bruscas nestes índices de dano. O teste de normalidade JB foi utilizado neste caso e os resultados correspondentes são apresentados na Tab. 5.2.

Tabela 5.2: Resultados do teste de normalidade para a amostra “sem dano”.

Nível de confiança	valor-p	JB	Val. Crit.	H
99%	0.5	0.1675	5.0988	0

O valor  $H$  igual a zero na Tab. 5.2 significa que a hipótese nula não deveria ser rejeitada com um nível de confiança de 99%. Cabe salientar que a hipótese de que a amostra “sem dano” é aleatória e normalmente distribuída é importante, considerando que se trata de uma amostra pequena contendo apenas nove valores.

Como pode ser observado nas Fig. 5.9(a) e Fig. 5.9(c), a faixa de frequência de 29-40 kHz foi capaz de detectar apenas o dano em seu estágio final, quando a frequência natural diminuiu de mais de 1 Hz em magnitude, aos 638 k ciclos. Contudo, a faixa de frequência de 101-109 kHz forneceu resultados melhores, conforme se pode observar nas Fig. 5.9(b) e Fig. 5.9(d), considerando que os índices de dano a partir de 500 k ciclos a 638 k ciclos possuem uma tendência crescente e estão todos acima do limiar de discriminação obtido com o método proposto no capítulo 4, combinado com o uso da curva S/N. Estes resultados indicam que a nucleação da trinca foi detectada e que a faixa de frequência mais alta foi a mais apropriada para a detecção deste dano incipiente. Nenhuma trinca visível na face observada foi constatada no corpo de prova antes que a frequência natural tivesse mudado significativamente. O “salto” repentino no índice de dano entre 600 k ciclos e 638 k ciclos indica o estado de transição entre micro-trincas para macro-trincas visíveis.

## 5.6. Conclusões do capítulo

Um método estatístico foi proposto para se determinar um limiar de discriminação para trinca de fadiga em estruturas metálicas usando o método ISHM. Este método utiliza-se da curva S/N para o material e leva em conta o nível de tensão mecânica de fadiga e o número de ciclos esperados para a incipiência do dano. Assinaturas de impedância foram adquiridas continuamente enquanto a estrutura foi submetida a ciclos dinâmicos de carga, ininterruptamente. Além disto, o trabalho deste capítulo mostra que, embora duas faixas de frequência tenham apresentado boas densidades de pico, a faixa de frequência mais alta

apresentou resultados melhores para a detecção de um dano incipiente. Um compromisso que está presente, entretanto, reside no fato que as amplitudes dos picos tendem a diminuir à medida que a faixa de frequência se torna mais alta. Este efeito poderia diminuir de forma geral a distância sensível (entre o dano e o sensor de PZT). Isto é particularmente verdadeiro quando se avaliam mudanças nas condições de contorno, onde as faixas de frequência mais baixas são notavelmente mais sensíveis a estas mudanças.

Com o limiar de discriminação obtido, uma trinca de fadiga pôde ser detectada com sucesso antes de se tornar visível a olho nu, usando uma faixa de frequência mais alta. Cabe ressaltar que as assinaturas de impedância deste trabalho foram obtidas sob condições dinâmicas, característica necessária para o monitoramento de integridade estrutural em tempo real sob condições de operação da estrutura monitorada.

Entretanto, o ensaio de fadiga realizado foi feito em condições de laboratório e em um corpo de prova relativamente simples (viga esbelta em balanço). Por este motivo, no capítulo seguinte (capítulo 6), será estudado o desempenho do método ISHM aplicado a uma bancada de rotor horizontal, com o propósito de identificar falhas enquanto o rotor está em operação.

# CAPÍTULO VI: DETECÇÃO DE FALHAS EM UM EIXO ROTATIVO USANDO O MÉTODO DE MONITORAMENTO DE INTEGRIDADE BASEADO EM IMPEDÂNCIA E UMA NOVA ABORDAGEM DE NORMALIZAÇÃO DE DADOS

## 6.1. Resumo

Sistemas de manutenção baseada na condição atual da estrutura (CBM) (*Condition-Based Maintenance*) que utilizam redes de sensores para a detecção de danos em máquinas rotativas têm observado evolução constante. Tais estratégias buscam detectar a presença e severidade do dano a partir de uma base estatística. O objetivo deste capítulo reside na correta detecção de falhas incipientes em eixos rotativos pelo método ISHM em tempo real, usando um sistema de aquisição de dados de impedância portátil e de baixo custo. Embora esta técnica apresente alta sensibilidade a danos incipientes, as FRFs resultantes do método são susceptíveis a condições ambientais e operacionais que devem ser levadas em conta, de modo a evitar a ocorrência de falsos diagnósticos. Consequentemente, uma técnica de normalização de dados é proposta com base em um método de otimização híbrido associado a diferentes métricas de dano. Além disto, o modelo estatístico proposto para determinação do valor do limiar de discriminação foi utilizado neste trabalho para aumentar a confiabilidade do processo de monitoramento. Os resultados experimentais mostram que uma trinca incipiente de fadiga associada ao desgaste de mancais foi detectada com sucesso, considerando uma confiança de 95 % para a maioria dos sensores utilizados. (Rabelo *et al.*, 2017a).

## 6.2. Introdução

O monitoramento da condição atual de máquinas rotativas tem amadurecido de tal forma que esta tecnologia vem sendo usada como parte dos procedimentos de manutenção preditiva para uma ampla variedade de sistemas, alguns dos quais desempenhando funções de alta responsabilidade em termos de segurança de vidas humanas ou de impacto econômico. Reatores nucleares e sistemas de propulsão encontrados em algumas classes de navios são exemplos de aplicações onde sistemas CBM são empregados (Farrar e Worden, 2012). Métodos existentes de END incluem inspeção visual, ensaios radiográficos, ensaios ultrassônicos e inspeção por líquido penetrante. Estes métodos são reconhecidos

por serem caros, uma vez que resultados satisfatórios necessitam de inspeções detalhadas e periódicas (Saavedra e Cuitiño, 2002). Técnicas de monitoramento de integridade baseadas em vibrações são consideradas práticas convencionais em máquinas rotativas. Nos últimos 20 anos, houve um esforço significativo de pesquisa orientada para o desenvolvimento de técnicas de SHM (tanto do ponto de vista qualitativo como quantitativo) para detectar, localizar e estimar a severidade de dano, através de um número de técnicas baseadas em acústica ou em vibrações mecânicas (Doebling; Farrar; Prime, 1998; Baydar e Ball, 2003; Bently e Hatch, 2003; Darpe; Gupta; Chawla, 2004; Bachsmid; Pennachi; Tanzi, 2010; Cavalini Jr., Finzi Neto; Steffen Jr., 2014; Cavalini *et al.*, 2015; Rabelo *et al.*, 2016).

Duas tarefas convencionais são necessárias para se realizar SHM baseado em vibrações em sistemas mecânicos, a saber: (i) extração de características e, (ii) modelagem estatística. Muitas frequências comumente usadas para máquinas rotativas são baseadas na presença de picos em espectros de aceleração em certos múltiplos da velocidade de rotação do eixo e suas mudanças com o tempo. Momentos estatísticos também podem ser usados como métodos de extração de características. Métodos no domínio da frequência tipicamente caracterizam mudanças no espectro de vibrações de máquina resultantes de danos estruturais. Abordagens no domínio da frequência dedicadas à detecção de falhas em mancais de rolamento incluem o histórico temporal do espectro de Fourier de médias sincronizadas, análise *cepstrum* (Randall, 2011), análise freqüencial de soma e diferenças, a técnica de alta frequência de ressonância, e processamento de sinais de curto tempo (Ma e Li, 1993). Avaliações quantitativas de falhas em engrenagens também podem ser detectadas usando picos no *cepstrum* como indicadores de harmônicos (Tang; Chand; Wang, 1991). Abordagens do tipo *cepstral* têm também sido utilizadas para detecção de falhas em caixas de transmissão de helicópteros (Keremait, 1987).

O uso de modelagem estatística no processo de SHM consiste em inferir sobre a existência, o tipo, e possivelmente a severidade do dano. O reconhecimento estatístico de padrões é um aspecto importante da modelagem estatística, podendo criar a capacidade de categorizar o tipo de dano, a partir de uma ampla base de dados da vida da estrutura (desde que esta seja disponível). As técnicas de classificação reportadas na literatura de máquinas rotativas incluem: classificação Bayesiana, regras do  $k$ -ésimo vizinho mais próximo, classificadores de redes neurais artificiais, máquinas de vetores de suporte (Widolo e Yang, 2007) e, mais recentemente, o método ISHM.

No método ISHM, um meio de se realizar a extração de características sensíveis baseia-se na análise das diferenças entre as assinaturas de impedância, normalmente envolvendo o *baseline* e a resposta de uma medição de teste. O método ISHM pode também utilizar-se de RNAs para fins de classificação de danos, sendo este um método de

reconhecimento de padrões poderoso (Palomino, 2014). Nesta tese, a discriminação entre estados estruturais (saudável x com falha) é considerado como um método de aprendizagem sem supervisão. Isto significa que os dados são disponibilizados sem saber previamente a quais condições estruturais cada sinal pertence. Daí, um teste de hipóteses é realizado para fins de discriminação.

Sabe-se que assinaturas de impedância são susceptíveis a mudanças na temperatura ambiental ou da própria máquina monitorada. Um grande número de estudos usando o método ISHM com técnicas de compensação servem-se da técnica denominada deslocamento efetivo em frequência através da análise de correlação (método apresentado no capítulo 3). Embora uma boa conformidade é obtida usando-se tal método, existem limitações com relação à faixa de frequência utilizada (Rabelo *et al.*, 2015a). Isto também é verdade quando o gradiente de temperatura entre a medição de teste e o *baseline* é extremamente amplo, o que poderia implicar em um processo de compensação precário (Rabelo *et al.*, 2015b).

Buscando superar estas limitações, uma nova técnica de normalização de dados é proposta neste capítulo. Os deslocamentos ótimos de frequência e de amplitude são determinados através da solução de um problema inverso típico. A métrica de dano é minimizada usando-se uma metodologia híbrida de otimização. A técnica evolucionária denominada “Evolução Diferencial” (em inglês, *Differential Evolution – DE*) (Storn e Price, 1995) dedica-se à busca global. O otimizador heurístico é seguido pela aplicação do método direto denominado “Programação sequencial quadrática” (em inglês, *Sequential Quadratic Programming – SQP*) para garantir uma busca local bem sucedida (Vanderplaats, 2007). Nesta investigação, danos incipientes foram detectados em um eixo rotativo horizontal através da técnica ISHM. Dois tipos de transdutores foram utilizados nos experimentos, a saber, pastilhas rígidas (e planas) de PZT e pastilhas de MFC foram coladas sobre o eixo para os propósitos de atuação/sensoriamento. Condições estruturais distintas do eixo do rotor foram então avaliadas na sequência.

### **6.3. Técnica de normalização de dados com procedimentos de otimização**

Os efeitos de variação da temperatura são conhecidos por causarem deslocamentos horizontais (no eixo da frequência) e verticais (no eixo da amplitude) nas assinaturas de impedância, conforme previamente demonstrado na Fig. 3.4. A Figura 6.1 mostra um fluxograma para ilustrar a metodologia de normalização de dados proposta nesta tese. O método inicia obtendo-se as assinaturas de impedância da estrutura a ser monitorada em

sua condição saudável ou intacta ( $Imp_{baseline}$ ). As assinaturas de impedância da estrutura a ser monitorada para uma condição de teste ( $Imp_{teste}$ ) são também necessárias, de modo que o otimizador fique responsável pela determinação dos deslocamentos ótimos capazes de garantir a compensação.

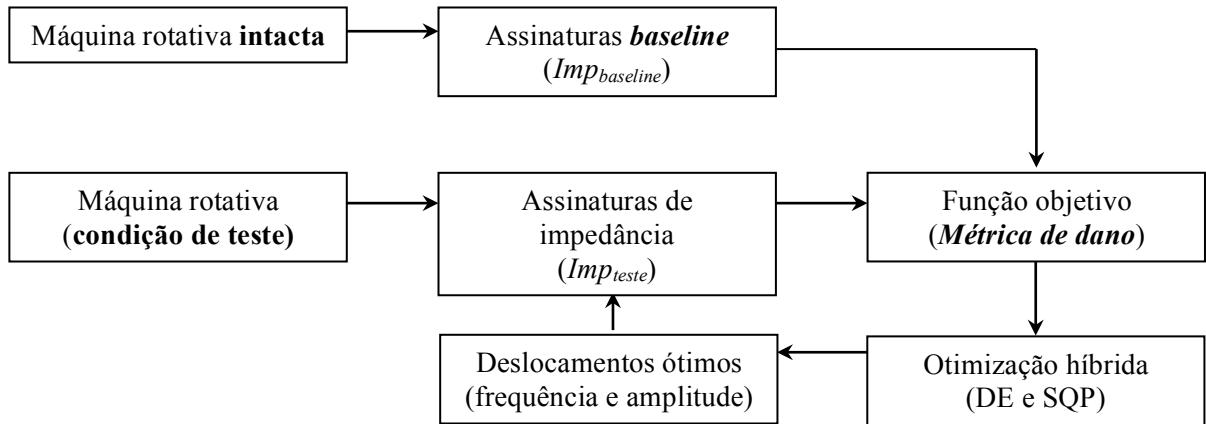


Figura 6.1 Fluxograma da técnica de normalização proposta

Os sinais  $Imp_{teste}$  são comparados aos sinais  $Imp_{baseline}$  através de uma dada função objetivo, qual seja, uma métrica de dano, que pode ser uma RMSD ou CCD, conforme indicado pela Eq. 2.11 e Eq. 2.12, respectivamente, onde  $Imp_{baseline} = Z_1$  e  $Imp_{teste} = Z_2$ .

Na Fig. 6.1, se o procedimento convergir a um valor mínimo da função objetivo, os efeitos de variação de temperatura são então compensados através dos deslocamentos ótimos em frequência e amplitude, que são as variáveis de projeto do problema de otimização. Se este não for o caso, o procedimento de otimização continua a busca com os novos deslocamentos de frequência e amplitude, e assim sucessivamente. Assim, o processo de otimização continua iterativamente até que a convergência seja garantida, o que pode levar à compensação da temperatura (caso a função objetivo seja próxima de zero, numa situação sem dano, com temperatura distinta daquela em que o *baseline* foi adquirido) ou então tem-se convergência para uma métrica de dano compensada.

No presente trabalho, a técnica de otimização híbrida proposta é primariamente aplicada para minimizar os efeitos de variações de temperatura sofrida pela estrutura ao longo dos ensaios. Na próxima seção será descrito o algoritmo de otimização híbrida com mais detalhes.

#### 6.4. Algoritmo de otimização híbrida

Como mencionado previamente, a técnica de normalização de dados proposta é baseada na solução de um problema inverso típico, em que os deslocamentos ótimos de frequência e amplitude são determinados pela minimização da métrica de dano associada com dois sinais de impedância. Assim, a técnica evolucionária “Evolução Diferencial” realiza uma busca global pela solução (*i.e.*, os deslocamentos ótimos em frequência e amplitude). Cabe mencionar que o algoritmo DE deve ser aplicado  $n$  vezes, de modo a evitar mínimos locais. O melhor resultado obtido pelo DE é usado como ponto inicial para inicializar o método direto SQP, de modo a se obter a solução local e refinada.

O algoritmo DE é uma técnica de otimização que pertence à família de computação evolucionária, que difere de outros algoritmos evolucionários nos esquemas de mutação e recombinação. Como mencionado previamente, o DE executa sua operação de mutação adicionando-se um vetor de diferenças com pesos entre dois indivíduos a um terceiro indivíduo. Então, os indivíduos em mutação irão realizar um cruzamento (*crossover*) discreto e seleção com os indivíduos correspondentes a partir da última geração para produzir a descendência (nova geração). Os parâmetros chave de controle para o DE são o tamanho da população ( $NP$ ), a constante de cruzamento ( $CR$ ), e o peso associado ( $F$ ).

O pseudocódigo do algoritmo DE é apresentado na Fig. 6.2, em que  $P$  é a população da geração atual, e  $P'$  é a população a ser construída para a próxima geração,  $C_{[i]}$  é a solução candidata com índice de população  $i$ .  $C_{[i][j]}$  é a  $j$ -ésima entrada na solução do vetor  $C_{[i]}$ , e  $r$  é um número aleatório entre 0 e 1. Storn e Price (1995) fornecem regras simples para a escolha dos parâmetros chave do DE para aplicações gerais. Normalmente,  $NP$  deveria ser cerca de 5 a 10 vezes a dimensão do problema (*i.e.*, o número de variáveis de projeto). Quanto ao valor de  $F$ , este fica na faixa entre 0,4 e 1,0. Inicialmente,  $F = 0,5$  pode ser testado, e então  $F$  e/ou  $NP$  podem ser incrementados caso a população sofra convergência prematura. Storn *et al.*, (2005) propõem vários esquemas de mutação para a geração de novas soluções candidatas ao se combinar vetores que são aleatoriamente escolhidos a partir da população atual, conforme mostrado na Eq. 6.1. Nas aplicações deste trabalho, o esquema *rand / 1* foi utilizado.

$$\begin{aligned}
rand / 1 \rightarrow x &= x_{r1} + F(x_{r2} - x_{r3}) \\
rand / 2 \rightarrow x &= x_{r1} + F(x_{r2} - x_{r3} + x_{r4} - x_{r5}) \\
best / 1 \rightarrow x &= x_{best} + F(x_{r2} - x_{r3}) \\
best / 2 \rightarrow x &= x_{best} + F(x_{r2} - x_{r3} + x_{r4} - x_{r5}) \\
rand / best / 1 \rightarrow x &= x_{r1} + F(x_{best} - x_{r1} + x_{r1} - x_{r2}) \\
rand / best / 2 \rightarrow x &= x_{r1} + F(x_{best} - x_{r1}) + F(x_{r1} - x_{r2} + x_{r3} - x_{r4})
\end{aligned} \tag{6.1}$$

onde  $x_{r1}$ ,  $x_{r2}$ ,  $x_{r3}$ ,  $x_{r4}$  e  $x_{r5}$  são soluções candidatas escolhidas aleatoriamente e  $x_{best}$  é a solução candidata associada com o melhor valor de adaptação; todos eles são encontrados na população da geração atual (denotada por C na Fig. 6.2). O vetor  $x$  é denotado por  $C'$  na Fig. 6.2.

De acordo com Vanderplaats (2007), o algoritmo SQP é um método direto usado para operar com problemas de minimização com restrição nos quais a direção de busca  $S$  é encontrada resolvendo-se um subproblema com restrições objetivas lineares e quadráticas. Para isto, a direção de busca é determinada criando-se uma aproximação quadrática da função objetivo aumentada (*i.e.*, a partir da associação dos multiplicadores de Lagrange  $\lambda$  com uma técnica de penalidade exterior) e uma aproximação linear para restrições, conforme mostrado na Eq. 6.2.

$$\begin{aligned}
\text{Minimizar: } Q(S) &= F(X) + \nabla F(X)^T S + \frac{1}{2} S^T B S \\
\text{Sujeito a: } \nabla g_j(X)^T S + \delta_j g_j(X) &\leq 0 \quad j = 1, m \\
\nabla h_k(X)^T S + \bar{\delta}_k h_k(X) &\leq 0 \quad k = 1, l
\end{aligned} \tag{6.2}$$

onde  $F(X)$  é a função a ser minimizada,  $X$  é o vetor de variáveis de projeto,  $\nabla F$  é o gradiente de  $F$ ,  $S$  é o vetor de direção de busca, e  $B$  é inicialmente uma matriz identidade que será atualizada em iterações subsequentes. Os parâmetros  $\delta_j$  e  $\bar{\delta}_k$  são usados para prevenir inconsistências entre as restrições linearizadas  $g_j$  e  $h_k$ , respectivamente. O parâmetro  $\delta_j$  é definido conforme mostrado na Eq. 6.3.

### Evolução Diferencial

Iniciarizar e avaliar população  $P$

**while** (não feito ainda) {

**for** ( $i=0; i < N; i++$ ) {

        Criar candidato  $C_{[i]}$

        Avaliar  $C_{[i]}$

**if** ( $C_{[i]}$  é melhor que  $P_{[i]}$ )

$P_{0[i]} = C_{[i]}$

**else**

$P_{0[i]} = P_{[i]}$  }

$P = P_0$

}

    Criar candidato  $C_{[i]}$

    Aleatoriamente selecionar pais  $P_{[i1]}, P_{[i2]}$  e  $P_{[i3]}$ ,

    onde  $i, i_1, i_2$  e  $i_3$  são diferentes.

    Criar candidato inicial

$$C'_{[i]} = P_{[i1]} + F(P_{[i2]} - P_{[i3]}).$$

    Criar candidato final  $C_{[i]}$  cruzando-se os genes de  $P_{[i]}$  e  $C'_{[i]}$  conforme a

seguir:

**for** ( $j = 0; j < N; j++$ ) {

**if** ( $r < CR$ )

$C_{[i][j]} = C'_{[i][j]}$

**else**

$C_{[i][j]} = P_{[i][j]}$

}

Figura 6.2 Pseudocódigo do algoritmo DE.

$$\begin{aligned} \delta_j &= 1 \quad se \quad g_j(X) < 0 \\ \delta_j &= \bar{\delta} \quad se \quad g_j(X) \geq 0 \end{aligned} \tag{6.3}$$

O problema de encontrar a direção de busca descrito pela Eq. 6.2 é na realidade um problema de programação quadrática e várias técnicas estão disponíveis para sua solução. A busca unidimensional associada é escrita a partir da direção de busca  $S$  determinada e uma função de penalidade exterior  $\varphi$ , está fornecida pela Eq. 6.4.

$$\varphi = F(X) + \sum_{j=1}^n u_j \left\{ \max \left[ 0, g_j(X) \right] \right\} + \sum_{k=1}^l u_{m+k} |h_k(X)| \quad (6.4)$$

onde  $X = X^{q-1} + \alpha_p S$ ,  $u_j = |\lambda_j| (j=1, m+l)$  na primeira iteração,  $u_j = \max [|\lambda_j|, 0.5(u_j + |\lambda_j|)]$  para as iterações subsequentes, e  $u_j^+ = u_j^-$  a partir da iteração precedente. Neste caso, o parâmetro do comprimento do passo é definido como  $\alpha_p = 1$  (i.e., parâmetro de convergência).

## 6.5. Aplicação Experimental

A Figura 6.3 mostra a bancada experimental usada nesta aplicação do método ISHM.

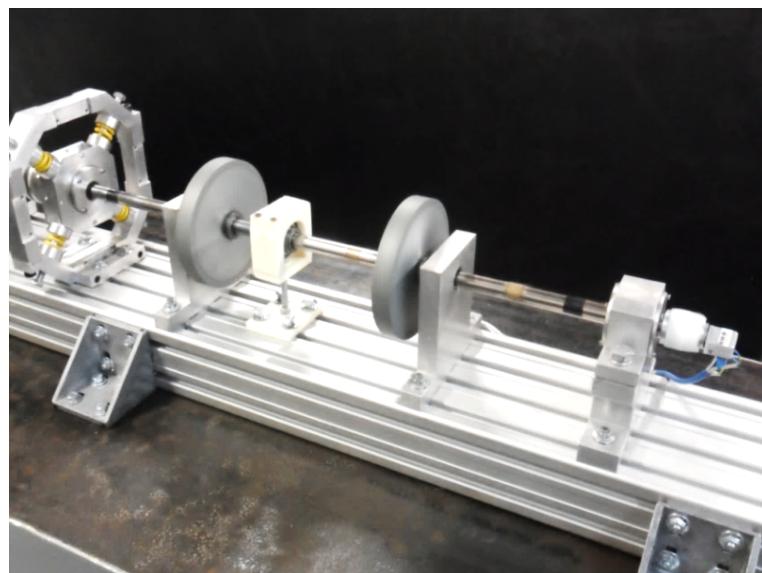


Figura 6.3 Bancada experimental usada na aplicação do método ISHM.

Esta máquina de teste é composta de um eixo de aço flexível com 860 mm de comprimento e 17 mm de diâmetro, e dois discos rígidos, ambos de aço, com 150 mm de

diâmetro e 20 mm de espessura (aproximadamente 2,65 kg cada). O eixo é suportado por dois mancais de rolamento. O sistema é acionado por um motor elétrico CC de 0,5 CV (*Varimot®* modelo BN90M). A interação entre o motor elétrico e o eixo é feita através de um acoplamento especial *Lami-Torq* (*Acoplast®* modelo GTG 402 100). A partir de um modelo representativo do rotor (modelo de elementos finitos), as duas primeiras velocidades críticas foram determinadas, sendo aproximadamente 1.685 rev/min (28,1 Hz) e 5.430 rev/min (90,5 Hz).

Nesta aplicação, duas pastilhas de PZT (12 mm de comprimento, 3 mm de largura e 0,5 mm de espessura) e dois MFCs (*Macro Fiber Composite*) foram distribuídos ao longo do eixo em dois planos de medição para cobrir a maior superfície possível para o processo de detecção (*i.e.*, 1 pastilha de PZT, 1 MFC e 1 termopar formam cada plano de medição; veja a Fig. 6.5). Estes dois tipos de sensores foram escolhidos com o objetivo de comparar o desempenho de cada um dos sensores quando posicionados em uma superfície curva (eixo do rotor). A Figura 6.4 mostra um arranjo esquemático com cada um dos quatro transdutores colados ao sistema rotor, a saber, PZT-1, MFC-1, PZT-2 e MFC-2 (numerados começando do mancal  $B_1$ , da Fig. 6.4).

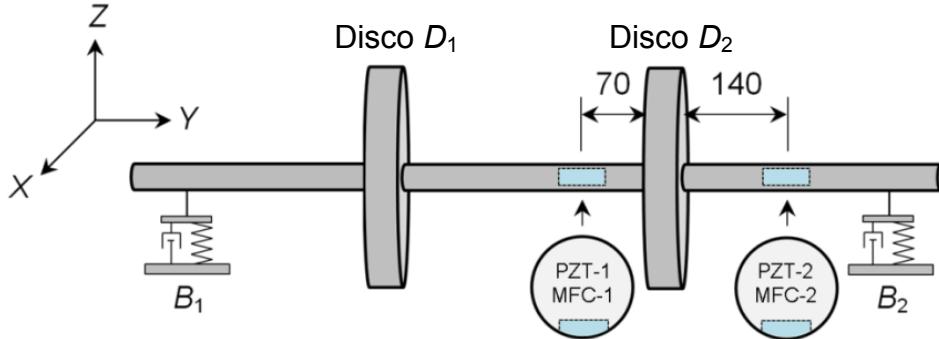


Figura 6.4 Posição dos sensores ao longo do eixo (distâncias em mm).

A Figura 6.5 mostra a pastilha rígida de PZT (lado esquerdo; *Sparkler®* modelo SP4), o transdutor flexível MFC (lado direito; *Smart Material®* modelo M0714-P2), e o termopar usado nesta aplicação. Ambos os transdutores foram colados ao eixo com um adesivo a base de resina epóxy (Hysol EA9320NA). Uma cola a base de cianoacrilato foi usada para colar o termopar à superfície do eixo.

Sinais de excitação foram enviados aos transdutores e suas respostas foram adquiridas através do uso de um anel deslizante (*slip ring*) (*MOOG®* modelo EC3848-10). Este dispositivo permite a transferência de sinais elétricos a partir de uma posição fixa até uma posição rotativa (e vice-versa) com baixa interferência ruidosa, mesmo com o rotor

operando a altas velocidades (de acordo com os fabricantes, o dispositivo é capaz de transferir sinais elétricos de acelerômetros com o rotor operando na faixa de 0 a 10.000 rev/min).

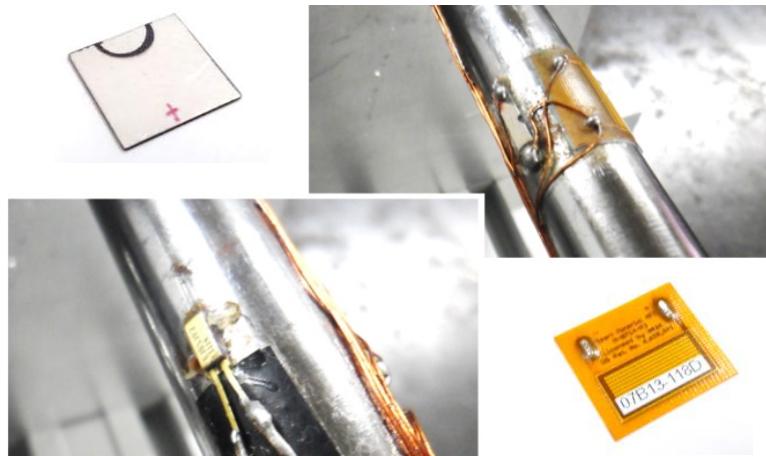


Figura 6.5 Pastilha de PZT e o transdutor MFC (atuador flexível) usado nesta aplicação.

Usando-se um dispositivo portátil e de baixo custo para medição de impedâncias (Finzi Neto *et al.*, 2011), com o rotor em repouso uma varredura em frequência foi aplicada em cada transdutor na faixa entre 20 kHz e 200 kHz, de modo a se determinar experimentalmente a melhor faixa de frequência, isto é, aquela que melhor expressa o acoplamento dinâmico entre os transdutores e a estrutura monitorada. A Tabela 6.1 mostra as faixas de frequência resultantes, onde cada medição foi adquirida com 1.000 pontos freqüenciais. Tendo em vista a detecção de danos incipientes, altas faixas de frequência foram escolhidas para se alcançar este objetivo.

Tabela 6.1 Faixas de frequência aplicadas aos transdutores.

Faixa de frequência (kHz)		
Transdutor	De	a
PZT-1	140	170
MFC-1	140	170
PZT-2	150	180
MFC-2	140	170

Os testes com a metodologia proposta incluíram a análise de quatro cenários estruturais. No primeiro (amostra sem dano – *pristine*), a máquina foi mantida sob operação contínua por 24 horas após a configuração final da bancada experimental; então, as

assinaturas de impedância foram adquiridas. Para a introdução de dano, um pequeno desgaste foi induzido no mancal através de um dispositivo de carregamento para iniciação de trinca localizado a aproximadamente 70 mm do disco  $D_1$  (veja a Fig. 6.4). É importante salientar que o mancal de rolamento usado como dispositivo de carregamento (veja a Fig. 6.6) não foi utilizado anteriormente (novo).

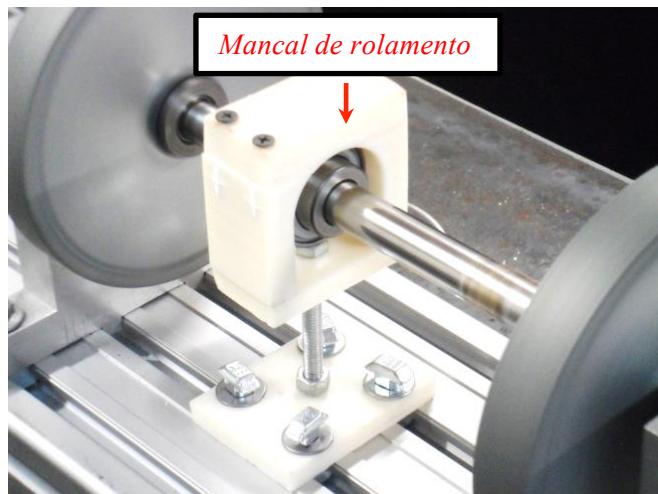


Figura 6.6 Dispositivo de carregamento para nucleação de trinca (StrCnd-1) e (StrCnd-2).

Além disto, uma análise de elementos finitos foi realizada de modo a determinar a força requerida para induzir uma deflexão de 1 mm ao eixo, o que produz uma tensão mecânica equivalente de 148 MPa, sem causar nenhuma deformação plástica no eixo de aço 1045. Após esta etapa, a máquina foi mantida em operação com o dispositivo de carregamento por 24 h e, após este período, medições de impedância foram adquiridas no segundo cenário (StrCnd-1). Em seguida, a máquina foi mantida em operação por mais 24 h de modo a avaliar o desgaste do mancal correspondente a 48 h de operação com o dispositivo de carregamento funcionando. Medições de impedância foram então adquiridas no terceiro cenário (StrCnd-2) para avaliação.

O quarto cenário para o rotor (StrCnd-3) consiste de um dano destrutivo. Neste caso, um entalhe (*notch*) foi realizado ao longo da seção transversal do eixo. Isto foi feito em uma posição a cerca de 140 mm do disco  $D_2$  (i.e., a 70 mm dos PZT-1 e MFC-1; região delimitada pelos discos). O trabalho de usinagem provocou um entalhe de aproximadamente 2,5 mm de profundidade (cerca de 15% sobre o diâmetro do eixo), conforme ilustrado na Fig. 6.7.

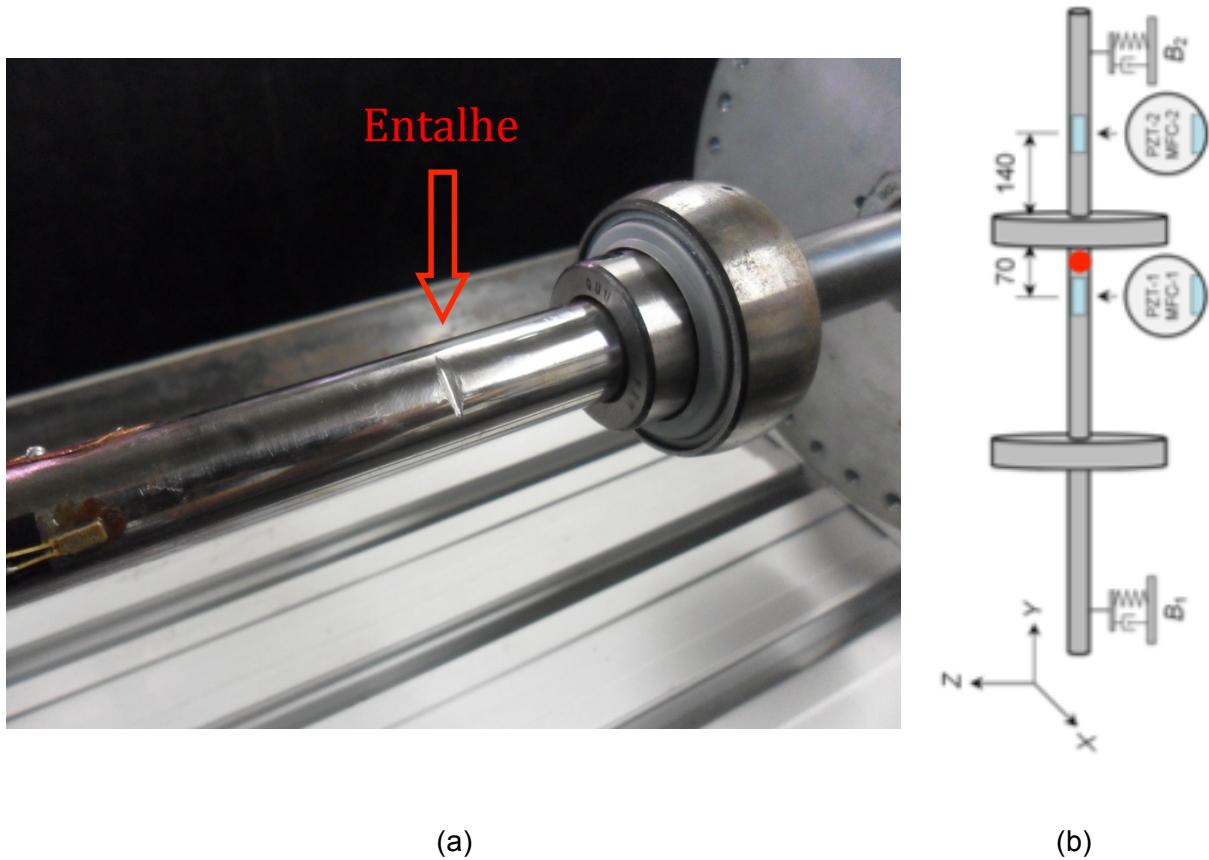


Figura 6.7 Detalhes do entalhe realizado no eixo (StrCnd-3). (a): Vista do entalhe; (b): posição do entalhe.

Durante este experimento, o rotor foi mantido em operação a 1.200 rpm (rotor balanceado; balanceamento realizado pelo método sem fase de quatro rodadas). Esta velocidade de rotação pode ser convertida como sendo 20 Hz (frequência máxima  $f_{max}$ ). A taxa de amostragem do dispositivo de medição de impedância é de 250.000 amostras por segundo. Segundo o teorema de Nyquist, foi estimado que seria seguro adquirir os sinais de impedância a partir de uma média de 10.000 medições por ponto frequencial, uma vez que o número mínimo de amostras seria 6.250, conforme determinado pela Eq. 6.5.

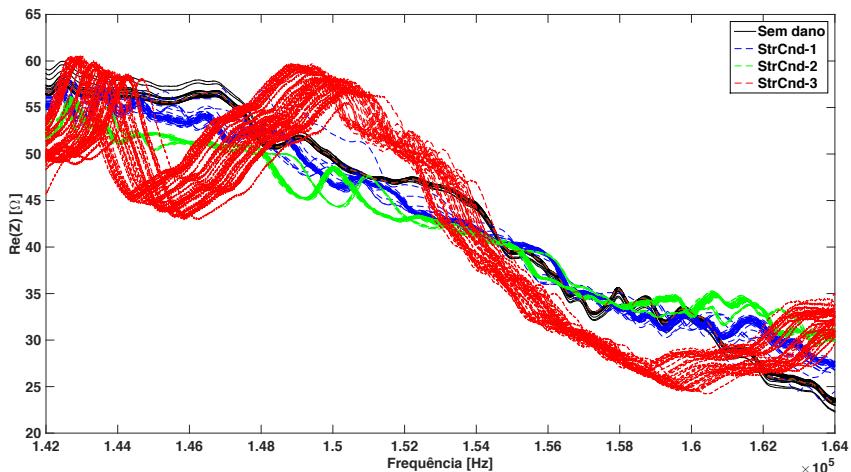
$$N_{min\_medições} = \frac{\text{Taxa de amostragem}}{2f_{max}} = 6250 \text{ medições} \quad (6.5)$$

Este número alto de medições foi destinado a aumentar a intensidade do sinal com relação ao ruído aleatório que emerge a partir do comportamento dinâmico do rotor, juntamente com algum ruído de instrumentação (Montgomery; Peck; Vining, 2012). Além disto, 40 medições foram realizadas para cada condição/cenário estrutural (*i.e.*, *pristine*, *StrCnd-1*, *StrCnd-2*, *StrCnd-3*). A temperatura do sistema variou na faixa de aproximadamente 19,5 °C a 24,5 °C.

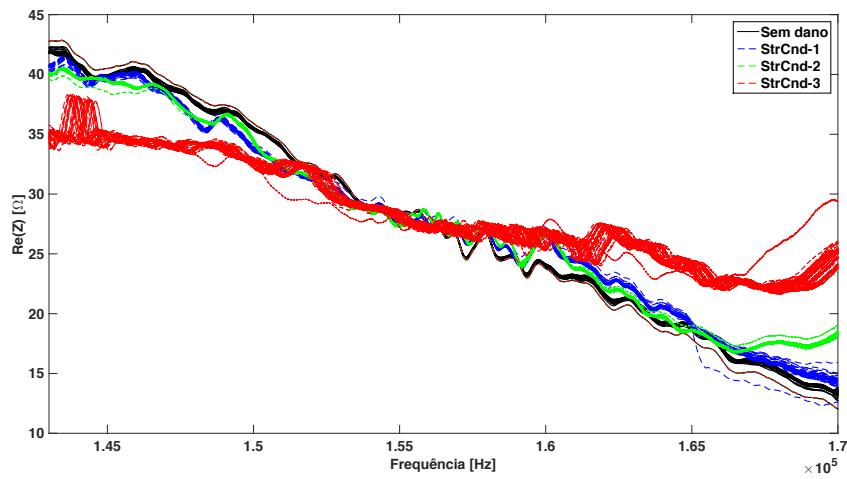
## 6.6. Resultados e Discussão

Com relação à técnica de normalização de dados proposta, o processo de minimização evolutivo foi executado por 5 vezes, considerando 10 indivíduos na população inicial do algoritmo DE. Como mencionado anteriormente, o algoritmo direto SQP foi associado com a técnica DE para melhorar o processo de busca (abordagem híbrida). Cabe ressaltar que todas assinaturas de impedância foram medidas considerando o rotor balanceado operando a 1.200 rev/min. Os sinais adquiridos foram digitalmente filtrados com um filtro passa-baixa (Filtro Butterworth de 7<sup>a</sup> ordem tipo IIR – *Infinite Impulse Response*).

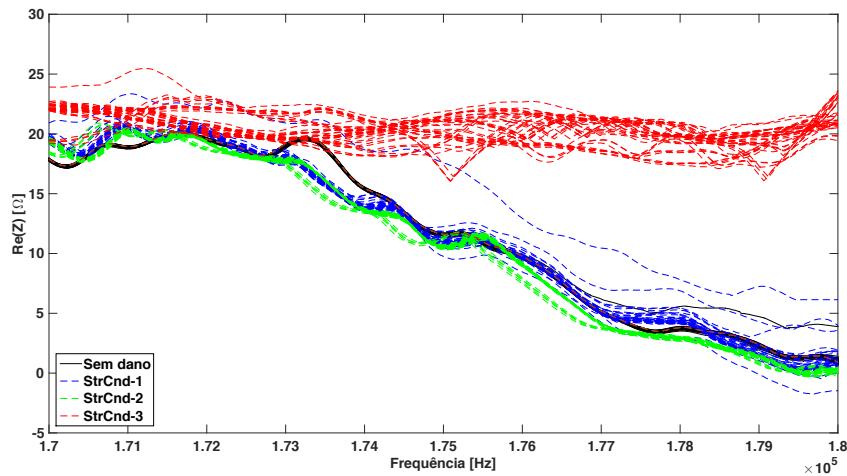
A Figura 6.8 mostra todas as assinaturas de impedância compensadas usando a minimização da métrica de dano RMSD como função objetivo, onde uma variação qualitativa pode ser observada para cada sensor ao mudar-se a condição estrutural da máquina rotativa.



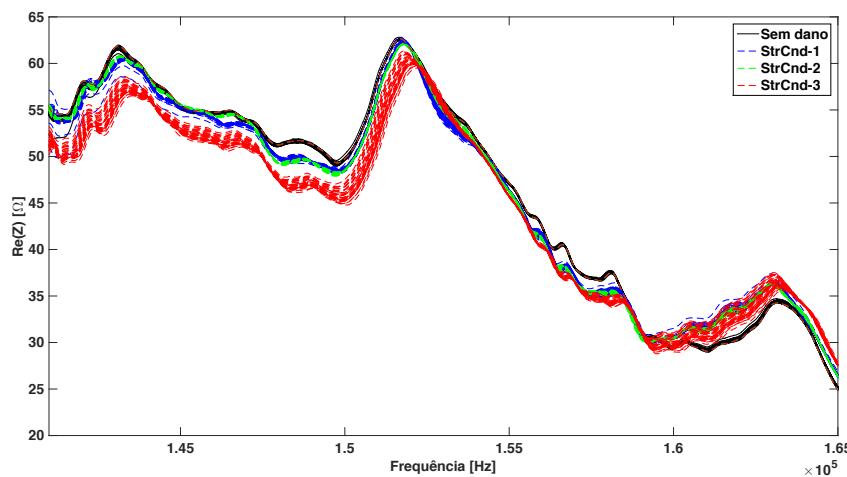
(a) Assinaturas de impedância: PZT-1



(b) Assinaturas de impedância: MFC-1



(c) Assinaturas de impedância: PZT-2



(d) Assinaturas de impedância: MFC-2

Figura 6.8 Assinaturas de impedância compensadas considerando todas as condições estruturais. (a) PZT-1; (b) MFC-1; (c) PZT-2; (d) MFC-2.

A Figura 6.9(a) mostra as assinaturas de impedância para a condição intacta (*Pristine*), em que as curvas pretas indicam as assinaturas compensadas através da minimização da métrica de dano RMSD. A Figura 6.9(b) mostra os índices RMSD não compensados e compensados, obtidos usando-se o PZT-1 e considerando todas as condições estruturais analisadas juntamente com o limiar de discriminação (*threshold*) obtido com o método proposto no capítulo 4. Nota-se que, com o procedimento de normalização, um limiar de discriminação confiável pode ser estabelecido para a identificação de dano (veja a Fig. 6.9b). Cabe ressaltar que a Fig. 6.9(b) mostra todos os índices RMSD antes do processamento do critério de Chauvenet.

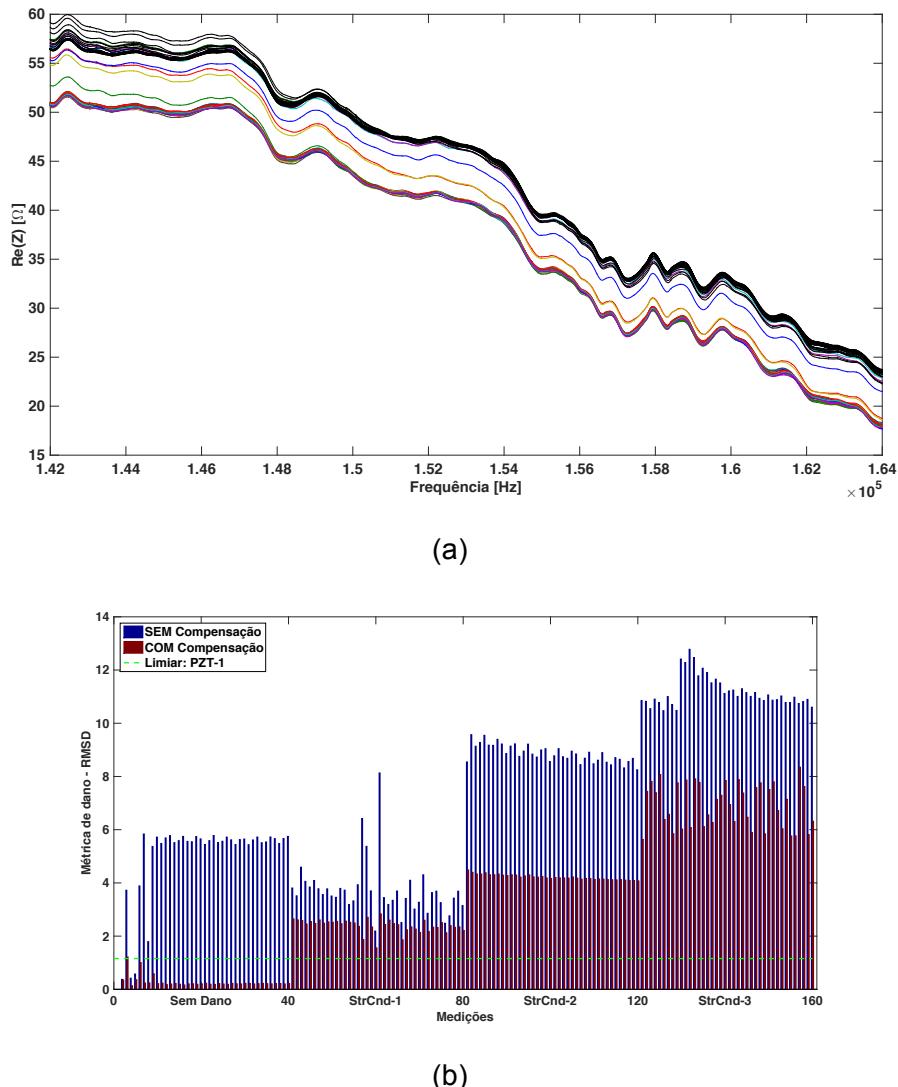


Figura 6.9 Resultados globais para o PZT-1: (a) Assinaturas de impedância compensadas para a condição intacta; (b) Índices RMSD não compensados e compensados para todas as condições estruturais.

A Figura 6.10 mostra os índices RMSD compensados usando-se o PZT-1 após a remoção de valores atípicos através do critério de Chauvenet. Nota-se que o PZT-1 foi capaz de detectar com sucesso todos os danos estruturais considerados. Com relação aos dados de condição intacta (*pristine*), dois valores atípicos foram descartados. Não obstante, um falso positivo apareceu para o PZT-1 após o procedimento de depuração de dados, como pode ser observado em destaque na Fig. 6.10. Isto se deve ao fato de que o critério de Chauvenet foi aplicado somente uma vez, pois caso a depuração fosse executada uma segunda vez, informações importantes inerentes aos dados poderiam ser perdidas. Apesar disso, este resultado ainda apresenta uma taxa de falsos positivos aceitável de 2,7%, com uma taxa de acertos (POD) de 100%.

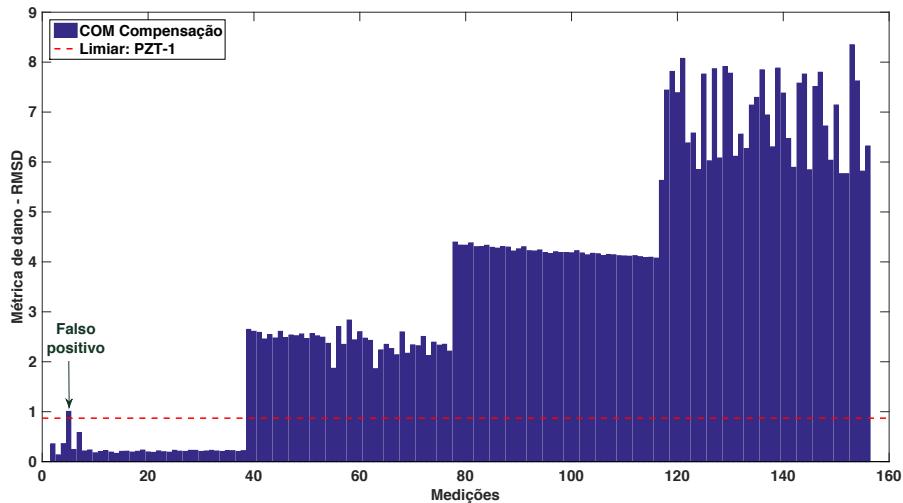


Figura 6.10 Índices RMSD compensados e limiar de discriminação para o sensor PZT-1 após a depuração de dados.

Similarmente, as Figs. 6.11, 6.12, 6.13, 6.14, 6.15 e 6.16 mostram os resultados globais com a métrica de dano RMSD usando os sensores MFC-1, PZT-2 e MFC-2, respectivamente. Pode ser observado que os efeitos indesejáveis advindos de condições ambientais ou operacionais foram minimizados após utilizar-se da técnica de normalização de dados proposta nesta tese. Além disto, o método ISHM obteve sucesso ao detectar dano incipiente conforme mostrado nos testes. A Tabela 6.2 resume os resultados globais de detecção com relação à taxa de falsos positivos (alarmes falsos) e a probabilidade de detecção (POD) ou taxa de acertos. Além do mais, a Tab. 6.2 contém informação sobre os valores atípicos descartados após o procedimento de depuração de dados.

Nota-se que na Tab. 6.2 o critério de Chauvenet tem o efeito de melhorar a probabilidade de falsos positivos (PFP) uma vez que este remove valores atípicos e assim o

desvio padrão amostral é reduzido, fazendo com que o limiar de discriminação seja também reduzido.

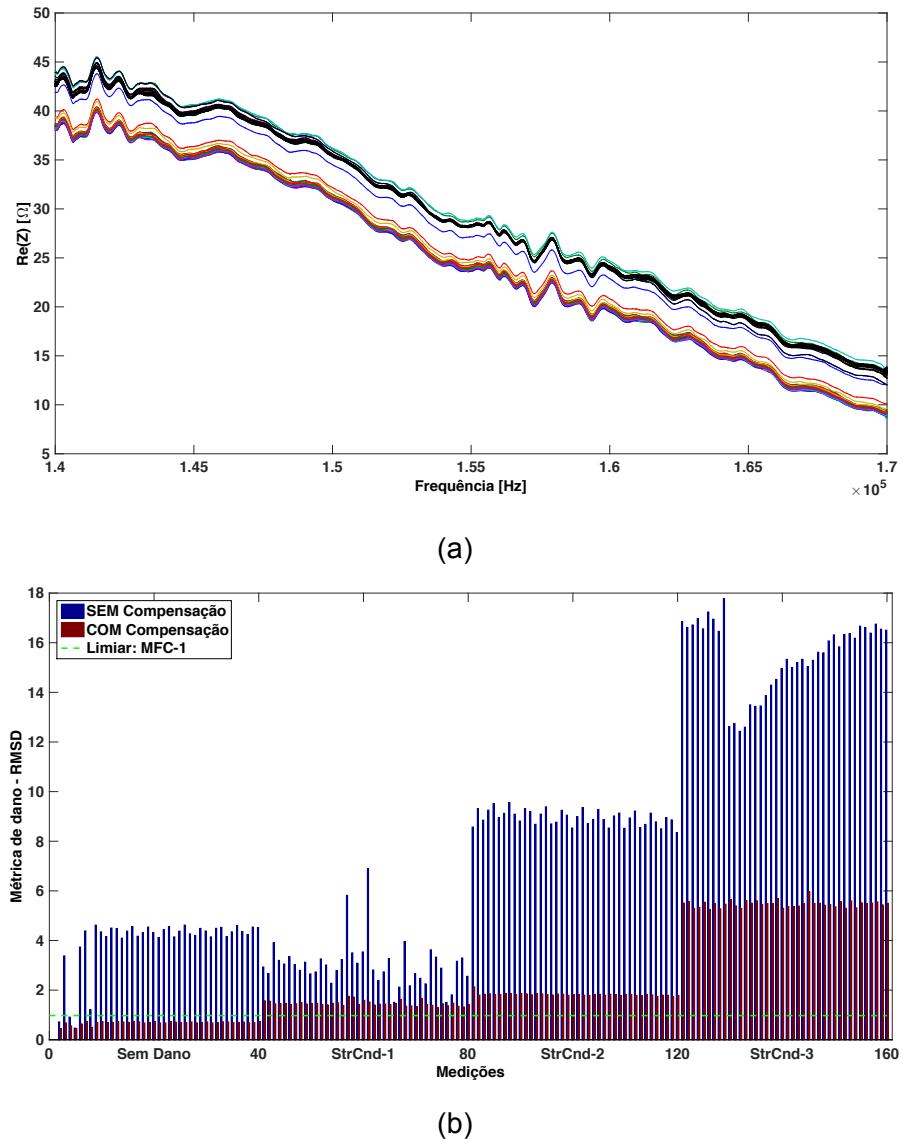


Figura 6.11 Resultados globais para o sensor MFC-1: (a) Assinaturas de impedâncias compensadas para a condição intacta; (b) Índices RMSD não compensados e compensados.

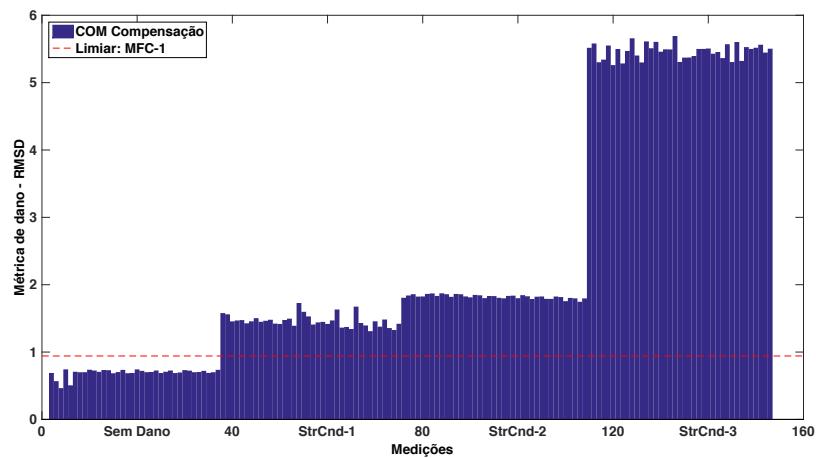


Figura 6.12 Índices RMSD compensados e limiar de discriminação para o sensor MFC-1 após a depuração de dados.

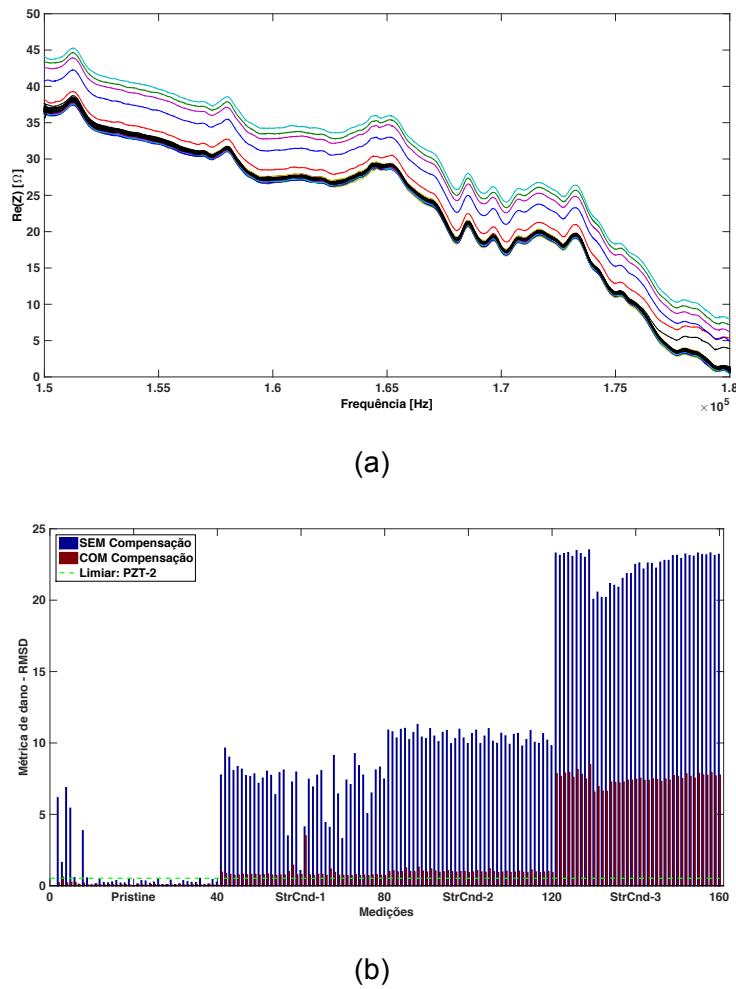


Figure 6.13 Resultados globais para o sensor PZT-2: Assinaturas de impedância compensadas para a condição intacta; (b) Índices RMSD não compensados e compensados.

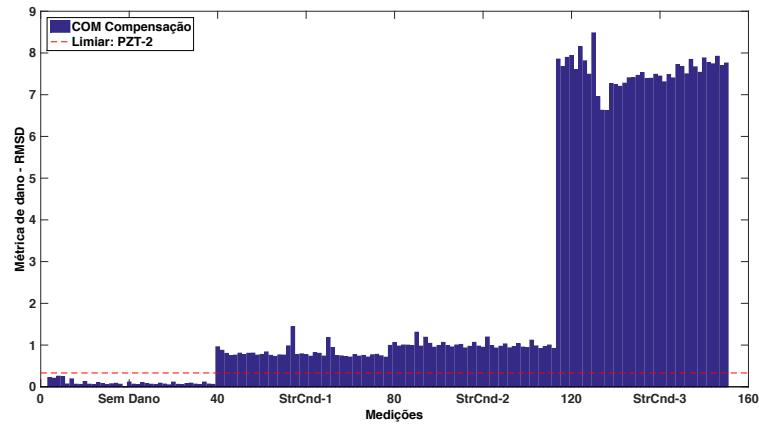


Figura 6.14 Índices RMSD compensados e limiar de discriminação para o sensor PZT-2 após a depuração de dados.

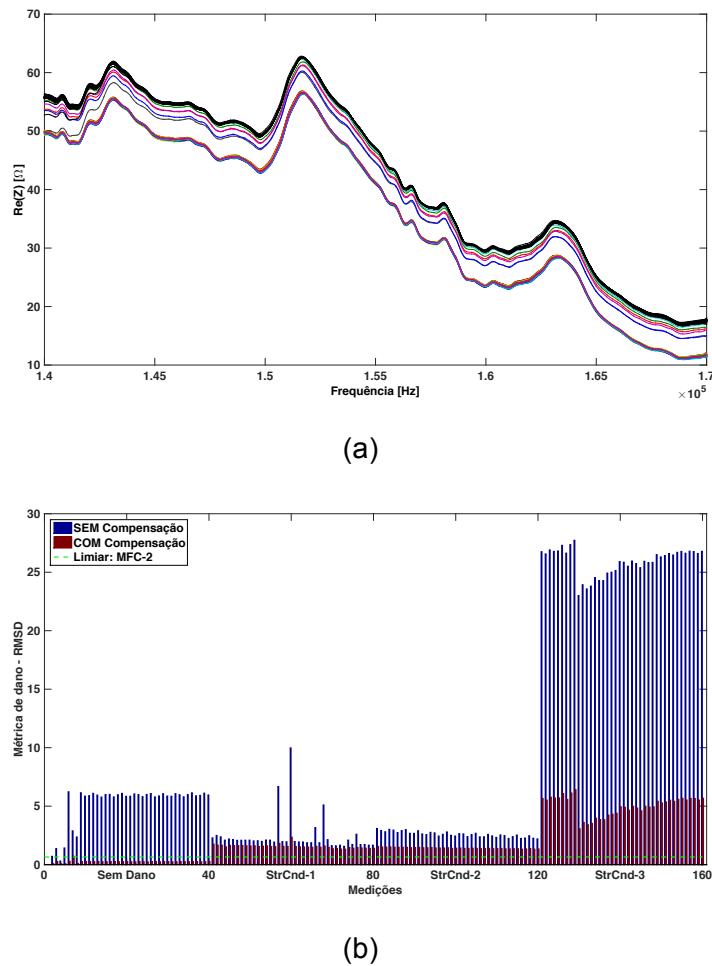


Figura 6.15 Resultados globais para o sensor MFC-2: (a) Assinaturas de impedância compensadas para a condição intacta; (b) Índices RMSD não compensados e compensados.

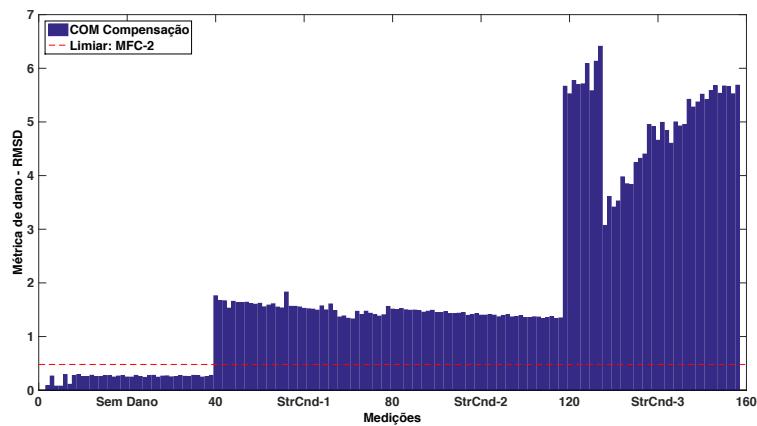


Figura 6.16 Índices RMSD compensados e limiar de discriminação para o sensor MFC-2 após a depuração de dados.

Tabela 6.2 Resultados globais de detecção e quantidade de valores atípicos descartados.

Transdutores	Valores atípicos*	PFP-a**	PFP-d***	POD (StrCnd-1)	POD (StrCnd-2)	POD (StrCnd-3)
PZT-1	4	5%	2,7%	100%	100%	100%
MFC-1	7	0%	0%	100%	100%	100%
PZT-2	5	2,7%	0%	100%	100%	100%
MFC-2	2	2,7%	0%	100%	100%	100%

\* Número total de valores atípicos descartados; \*\* PFP antes da depuração de dados; \*\*\* PFP após a depuração de dados.

Uma análise subsequente foi realizada configurando-se a função objetivo para minimizar a métrica de dano CCD. A Figura 6.17(a) mostra as assinaturas de impedância para a condição intacta, em que as curvas pretas indicam as assinaturas compensadas obtidas através do sensor PZT-1. A Figura 6.17(b) mostra os índices CCD não compensados e compensados considerando todas as condições estruturais analisadas juntamente com o limiar de discriminação obtido.

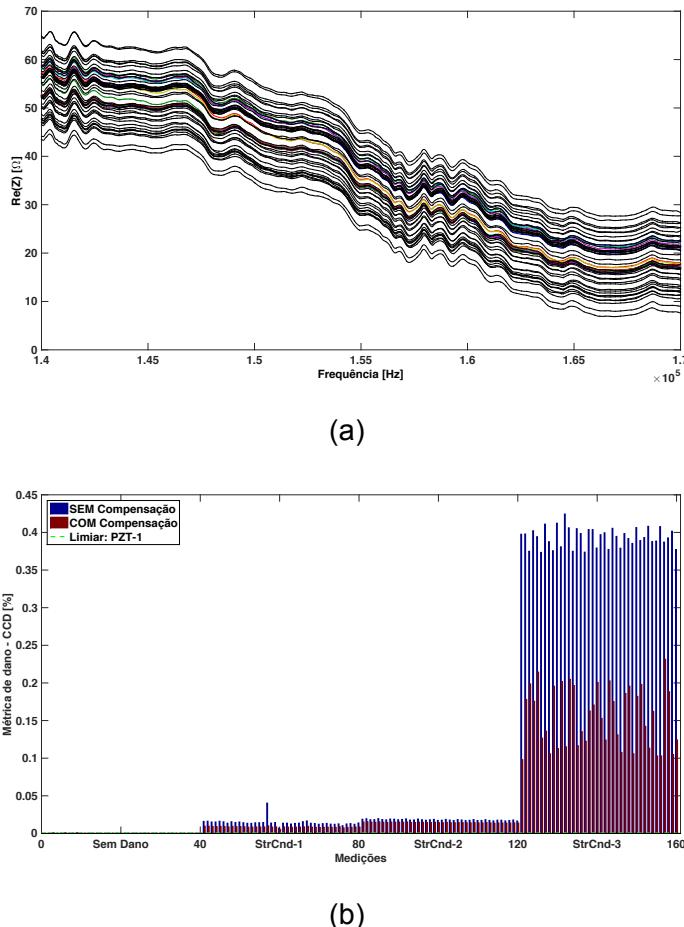


Figure 6.17 Resultados globais para o sensor PZT-1 usando a métrica de dano CCD: (a) Assinaturas de impedância compensadas para a condição intacta; (b) Índices CCD não compensados e compensados.

Nota-se que, com o procedimento de normalização de dados realizado, um limiar de discriminação confiável também pode ser estabelecido para a identificação de dano. A Fig. 6.17(b) mostra todos os índices CCD antes do processo de depuração de dados.

Finalmente, a Fig. 6.18 mostra os valores CCD obtidos usando-se o PZT-1 após a remoção de valores atípicos com o critério de Chauvenet.

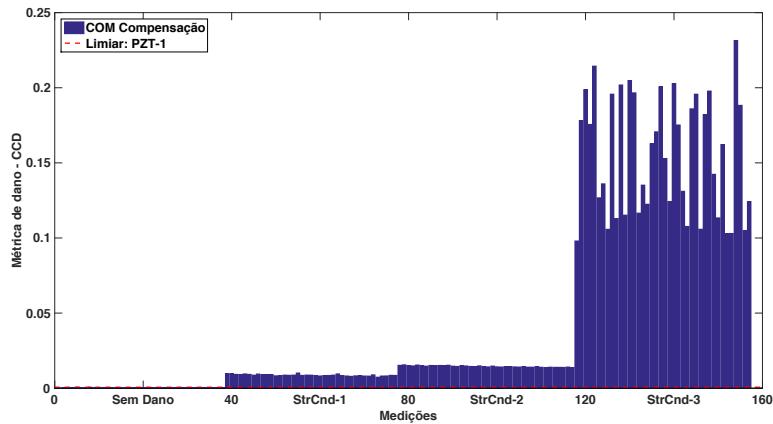


Figure 6.18 Índices CCD compensados e limiar de discriminação para o PZT-1 após a depuração de dados.

Todos os índices CCD compensados mantiveram-se significativamente acima do limiar de discriminação, de modo que o procedimento para detecção de danos foi realizado com sucesso. Resultados similares foram obtidos para os outros sensores.

## 6.7. Conclusões do capítulo

Os resultados mostrados no presente trabalho demonstram a eficiência do método ISHM associado com uma técnica de normalização de dados para detecção de falhas em eixos de máquinas rotativas. Conforme foi visto, a técnica foi avaliada em um rotor em operação, levando a resultados satisfatórios. Cabe mencionar que neste trabalho a temperatura ambiente não foi controlada. Como resultado, uma faixa de temperatura relativamente estreita foi percebida. Para faixas de temperatura maiores, um estudo de caso anterior foi realizado em placas de alumínio (vide capítulo 4), onde faixas mais largas de temperatura foram investigadas usando uma técnica de compensação da temperatura. As aplicações com rotores em rotação foram possíveis com o uso de um dispositivo especial, a saber o anel deslizante. A alta faixa de frequência proporcionada pelo método ISHM é vantajosa por permitir a detecção de dano mesmo em casos onde este não está próximo do transdutor.

Ao comparar os resultados dos dois tipos diferentes de sensores/atuadores usados neste trabalho (*i.e.*, pastilha de PZT e MFC), ambos provaram ser capazes de detectar os danos inseridos no eixo rotativo. Todavia, vale ressaltar que as pastilhas de PZT mostraram-se muito mais difíceis de serem coladas no eixo (superfície curva) devido à sua fragilidade. Além disto, como a estrutura monitorada apresenta curvatura, pequenos sensores tiveram

que ser precisamente cortados de modo a caber em uma área mais plana do eixo. Isto tem como consequência o efeito negativo de reduzir a capacidade de atuação do transdutor. Os compósitos MFCs, entretanto, mostram-se adequados para estruturas curvilíneas, tais como as encontradas em eixos de máquinas rotativas, tornando-os mais convenientes para este tipo de aplicação. Deve-se notar que uma quantidade significativa de médias, além de um filtro digital, foram requisitos para medir com sucesso as impedâncias associadas ao comportamento dinâmico dos sinais originados da estrutura monitorada.

Neste trabalho, a variação nos sinais de impedância obtidos devido aos efeitos de temperatura foram minimizados usando-se um método de otimização híbrido. Duas métricas de dano foram usadas como função objetivo do problema de minimização associado, a saber, a RMSD e a CCD. Ambas foram capazes de mitigar a influência da temperatura nos sinais de impedância medidos (fornecendo resultados similares).

## CAPÍTULO VII: DETECÇÃO DE FALHAS BASEADA NA IMPEDÂNCIA ELETROMECÂNICA EM UMA MÁQUINA ROTATIVA USANDO UMA ABORDAGEM DE COMPENSAÇÃO DE CONDIÇÃO OPERACIONAL

### 7.1. Resumo

A técnica da impedância eletromecânica é uma metodologia baseada na condição atual da estrutura (CBM) e que usa uma rede de sensores para avaliar a condição da integridade estrutural de sistemas mecânicos. Conforme discutido anteriormente, os sinais de impedância são susceptíveis a mudanças ambientais e/ou operacionais do sistema monitorado. Tais mudanças devem ser levadas em conta na etapa de pós-processamento dos sinais para evitar a ocorrência de falsos diagnósticos. Assim, o objetivo do trabalho descrito neste capítulo reside na correta detecção de falhas incipientes em eixos rotativos sob a variação da condição operacional usando-se o método ISHM. Para este propósito, um procedimento de normalização de dados para compensação de mudanças ambientais e operacionais é utilizado para minimizar as mudanças sofridas pelos sinais de impedância resultantes destas influências externas. Mudanças no carregamento dinâmico foram provocadas através da alteração da velocidade de rotação, bem como do nível de desbalanceamento do rotor, enquanto que as mudanças de temperatura resultam simplesmente da variação sofrida ao longo do dia no laboratório. A técnica de compensação utilizada é aquela apresentada no capítulo 6, porém agora testada com o propósito de verificar se a mesma pode ser usada para a compensação de variações na condição operacional da estrutura monitorada. Além disto, limiares de discriminação foram obtidos utilizando o método descrito no capítulo 4. Os resultados experimentais mostram que um dano incipiente associado com efeitos de carregamento dinâmico combinado a variações de temperatura foi detectado com uma probabilidade de detecção acima de 92% de confiança para a maioria dos sensores utilizados.

### 7.2. Introdução

Estruturas mecânicas, aeroespaciais e civis são sujeitas a carregamentos dinâmicos e condições ambientais que podem causar danos estruturais, o que compromete tanto a eficiência operacional como a segurança destas estruturas, levando a falhas e, caso reparos não sejam feitos no tempo certo, a estrutura pode ser levada ao colapso de forma repentina.

Deste modo, para se melhorar a segurança e evitar perdas econômicas, tecnologias emergentes estão sendo direcionadas ao desenvolvimento de sistemas de SHM como uma ferramenta importante para a detecção de danos incipientes (Farrar e Worden, 2013).

A capacidade de detectar trincas de fadiga ainda em seu estágio incipiente pode ser muito útil para fins de monitoramento da integridade de estrutural. A importância atribuída a este problema tem a ver com as sérias consequências quando trincas não são tempestivamente identificadas em máquinas rotativas. Dentre as técnicas de SHM dedicadas à detecção de trincas em dinâmica de rotores, as baseadas em medições de vibração são reconhecidas como ferramentas úteis, uma vez que levam a resultados satisfatórios mesmo quando a localização ao dano não é acessível. Contudo, embora sejam amplamente utilizadas na indústria, quando aplicadas em condições não-ideais, tais técnicas podem detectar trincas que eventualmente já tenham se propagado significativamente ao longo da seção transversal do eixo, geralmente acima de 40% de seu diâmetro (Bently e Hatch, 2002).

Portanto, atualmente, a atenção dos pesquisadores está se voltando a métodos mais sofisticados que sejam capazes de identificar trincas incipientes (trincas que se propagaram a até 25% do diâmetro do eixo), que representam tipos de danos que são dificilmente observáveis por meio da análise de vibração tradicional (Cavalini *et al.*, 2014).

Segundo Lim *et al.* (2011), a técnica ISHM possui algumas vantagens sobre outras técnicas de SHM. Um modelo matemático da estrutura não é requisitado, o que permite a aplicação da técnica proposta em estruturas complexas. Além disto, os resultados de pós-processamento gerados pela técnica são de fácil interpretação e são adequados para serem adaptados ao monitoramento contínuo e em tempo real (ou aproximadamente real). Para garantir uma alta sensibilidade a danos incipientes, a impedância elétrica é medida em altas frequências (tipicamente acima de 30 kHz). As pastilhas de PZT possuem uma faixa de linearidade bastante ampla, sendo leves, duráveis e pouco invasivas.

Neste contexto, o objetivo do trabalho descrito neste capítulo é desenvolver uma metodologia para detecção de danos para eixos de máquinas rotativas sob condição de operação usando o método ISHM. Uma técnica de compensação é aplicada para minimizar as influências externas devidas a variações de temperatura ambiente, velocidade de rotação e condição de desbalanceamento. Embora o ISHM possa fornecer alta sensibilidade a danos incipientes, os sinais de impedância medidos podem se deslocar significativamente devido a mudanças de temperatura e carregamentos dinâmicos (Park *et al.*, 1999; Grisso e Inman, 2009; Rabelo *et al.*, 2016). Estas influências, caso não sejam compensadas, irão afetar os índices de dano finais, fornecendo uma indicação falsa acerca da condição atual da estrutura monitorada.

Para estes experimentos, foram consideradas três condições distintas de desbalanceamento ( $UB_1$ ,  $UB_2$  e  $UB_3$ ) e três velocidades de rotação (600 RPM, 900 RPM e 1.200 RPM). A temperatura ambiente variou de 17 °C a 26 °C durante os ensaios. A temperatura foi medida através de um termopar (AD590 – Analog Devices). A técnica de normalização de dados é baseada em um método de otimização híbrida (conforme apresentado no capítulo 6) associada a uma métrica de dano (RMSD). Além disto, um modelo estatístico proposto por Rabelo *et al.* (2016) foi utilizado para a determinação dos limiares de discriminação baseando-se em CEP. Os resultados experimentais mostram que foi possível detectar com sucesso um dano incipiente considerando os efeitos de variação de temperatura e condições operacionais estudadas neste trabalho. Uma probabilidade de detecção acima de 95% foi atingida para a maioria dos sensores utilizados.

### 7.3. Configuração experimental

A Figura 7.1 mostra a bancada experimental usada para avaliar o método ISHM para detectar danos no eixo do rotor para diferentes condições operacionais. Este rotor é composto de um eixo de aço flexível com 800 mm de comprimento e diâmetro de 17 mm, dois discos rígidos, ambos com 150 mm de diâmetro e 20 mm de espessura (aproximadamente 2,6 kg), e uma polia de alumínio com 140 mm de diâmetro e 220 mm de espessura (aproximadamente 0,48 kg). O eixo é suportado por dois mancais de rolamento. O sistema é acionado por um motor de corrente contínua (CC) de 0,5 HP (Varimot® modelo BN90M). A interação entre o motor elétrico e o eixo é minimizada através de um dispositivo especial, a saber, o Lami-Torq (Acoplast® modelo GTG 402 100). Um desenho esquemático do rotor é mostrado na Fig. 7.2.

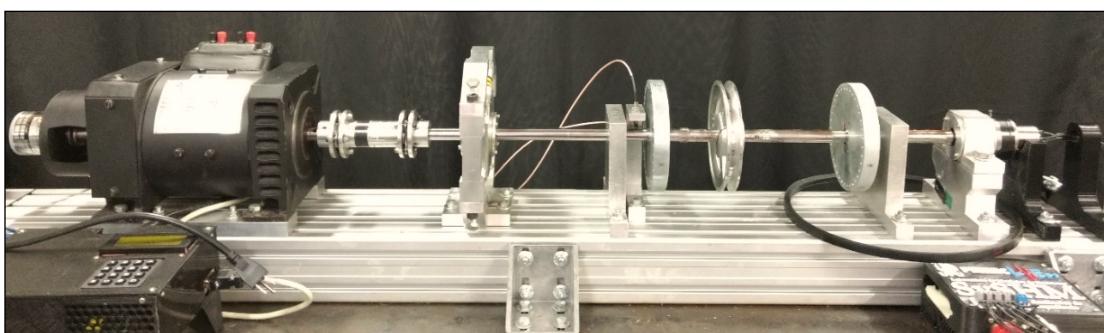


Figura 7.1 Bancada experimental usada nos testes ISHM com o objetivo de detecção de dano com o rotor em diferentes condições operacionais.

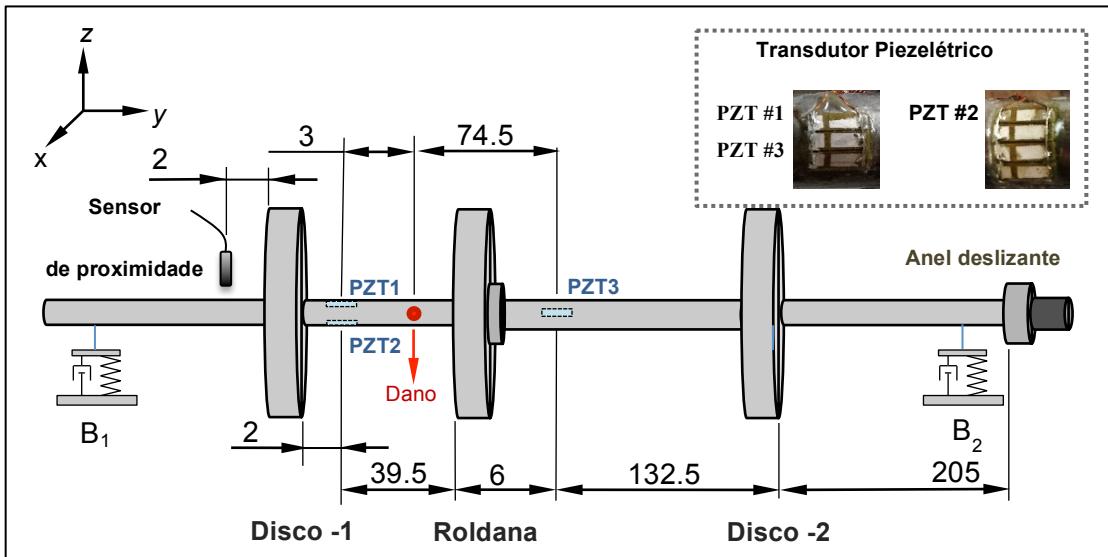


Figura 7.2 Dimensões principais do rotor: posição dos transdutores no rotor.

Na Fig. 7.2, as dimensões principais (em mm) entre os transdutores e os sensores sobre o eixo do rotor são mostradas. As pastilhas de PZT foram nomeadas como PZT#1, PZT#2 e PZT#3. Os três transdutores piezelétricos foram distribuídos sobre a superfície do eixo a 90° um do outro. Cada transdutor é composto por três pastilhas de PZT eletricamente conectadas em paralelo, exceto o PZT#2 que possuiu quatro pastilhas de PZT. Esta configuração foi escolhida devido à fragilidade da cerâmica de PZT e também devido à otimização da área de contato das pastilhas de PZT com o eixo do rotor. As pastilhas de PZT têm a seguinte geometria: 10 mm de comprimento, 3 mm de largura e 1 mm de espessura. A posição dos transdutores foi decidida com base em resultados preliminares obtidos a partir de análise modal. Um adesivo de epóxi foi utilizado para colar as pastilhas de PZT ao eixo.

Um anel deslizante com dez conexões de circuito (Michigan Scientifics' S-Series Slip Ring – C556019) foi usado para transmitir os sinais elétricos dos transdutores para a bancada experimental em operação (ver Fig. 7.3a). A Figura 7.3(b) mostra a configuração usada para conectar o anel deslizante ao eixo. A Figura 7.3(c) mostra o sistema de medição de impedâncias utilizado, que possui uma resolução igual a  $0,01 \Omega$ , ampliada em relação ao dispositivo utilizado nos trabalhos precedentes (resolução de  $0,1 \Omega$ ) a este capítulo. A faixa de frequência foi determinada experimentalmente baseando-se na densidade de picos: 230 kHz – 270 kHz para todos os sensores. Cabe mencionar que a alta faixa de frequência selecionada permite a detecção de danos incipientes em uma região localizada (Rabelo et al., 2016).

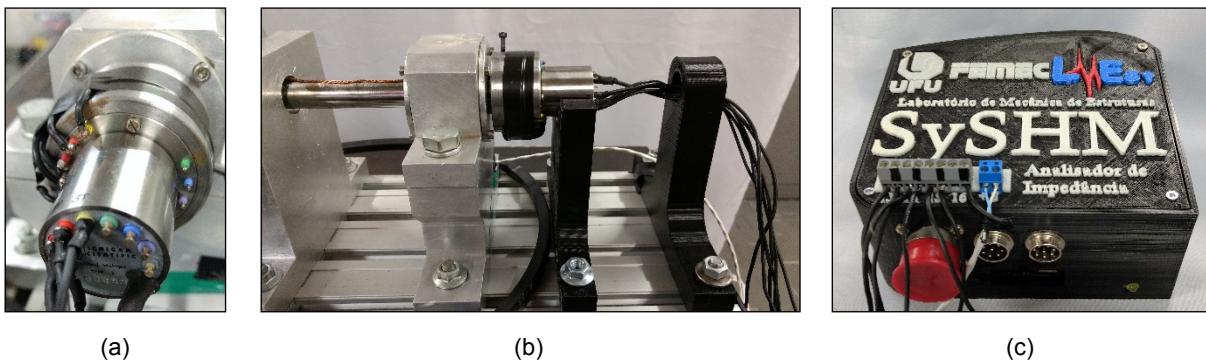


Figura 7.3 (a) Anel deslizante; (b) Configuração da conexão do anel deslizante ao eixo; (c) Sistema de medição de impedâncias.

Os testes com a metodologia proposta incluíram a análise de um dano incipiente com o rotor em operação. Para o primeiro teste, uma massa adicionada (porca de parafuso de 4,89 g) foi colada próximo à polia do rotor (a 30 mm dos PZTs#1 e #2). Esta configuração foi denominada como (c/ massa). A Figura 7.4(a) mostra a posição do dano. Em seguida, o rotor foi avaliado sob três condições operacionais distintas. Três velocidades de rotação foram consideradas (600 RPM, 900 RPM e 1.200 RPM), para três níveis de desbalanceamento (as massas de desbalanceamento foram adicionadas ao Disco -1). A Figura 7.4(b) mostra a massa utilizada para induzir a condição de desbalanceamento 2 ( $UB_2$ ) no rotor. A Figura 7.4(c) mostra a massa associada com a condição de desbalanceamento 3 ( $UB_3$ ). Ambas as massas de desbalanceamento foram anexadas ao Disco-1 (ver Fig. 7.2). Cabe mencionar que a condição  $UB_1$  foi determinada a partir da distribuição de desbalanceamento residual do rotor.

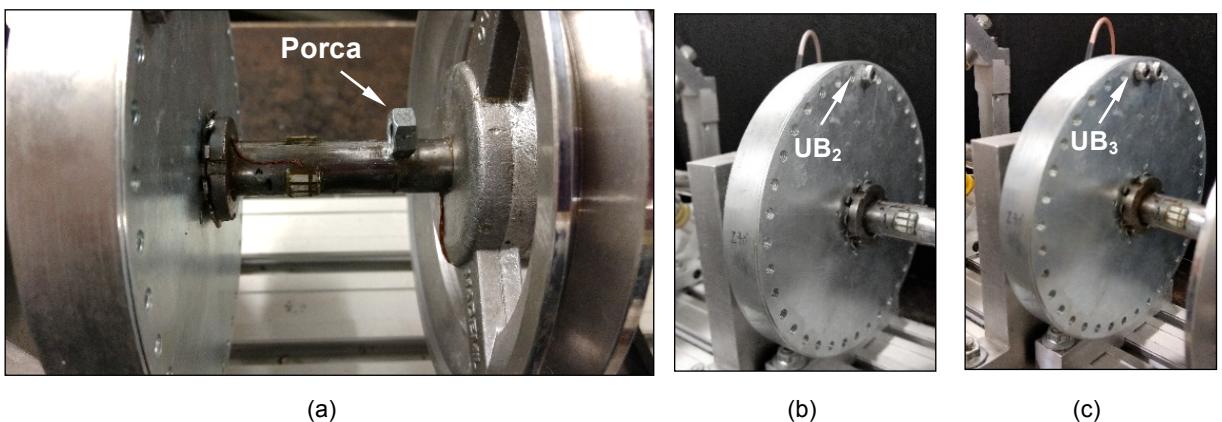


Figura 7.4 (a) Porca de aço; (b) Desbalanceamento nível  $UB_2$ ; (c) Desbalanceamento nível  $UB_3$ .

A Figura 7.5(a) mostra o tipo de sensor de proximidade (corrente de Foucault) usado para medir o deslocamento lateral do eixo. As Figuras 7.5(b) e Fig. 7.2 mostram a posição dos sensores.

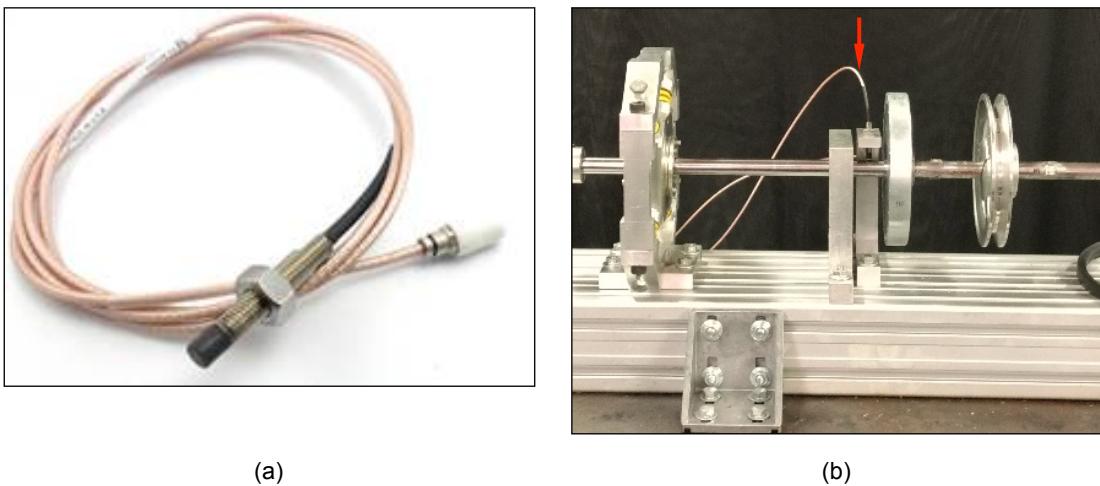


Figura 7.5 (a) Sensor de proximidade (corrente de Foucault); (b) Posição do sensor sobre a bancada experimental do rotor.

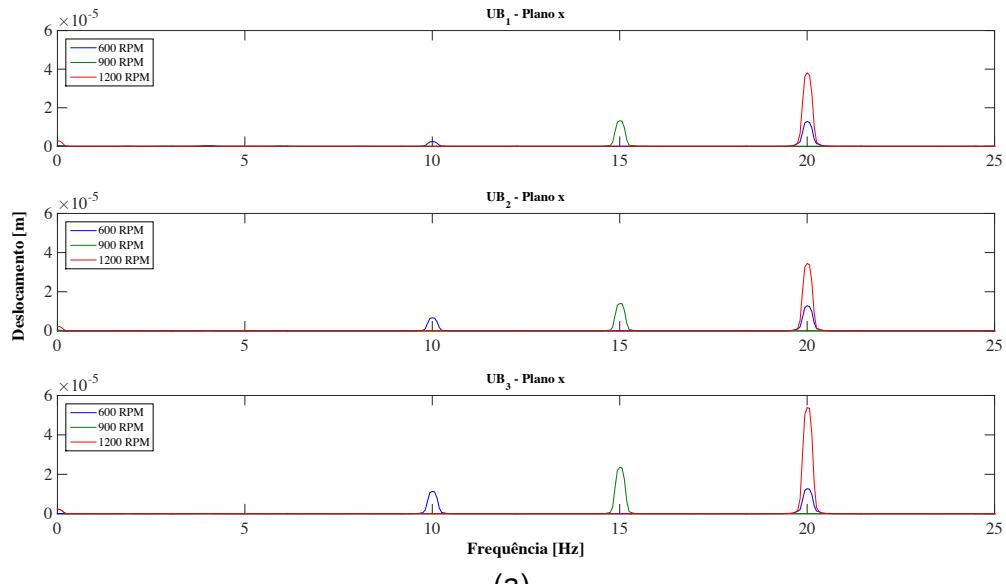
#### 7.4. Resultados experimentais

A Tabela 7.1 mostra as configurações adotadas para o experimento visando a obtenção das assinaturas de impedância desejadas. Para cada uma das 18 execuções (veja a Tab. 7.1), 30 medições de impedância foram adquiridas usando 1.024 médias por ponto frequencial. Neste caso, as condições estruturais estão associadas com o dano e com o nível de desbalanceamento. Deve-se ressaltar que o nível de desbalanceamento  $UB_1$  e a condição sem danos foi considerada como a condição intacta (sem dano). Além disto, as medições de *baseline* usadas como referência em todos os casos deste trabalho foram salvas com o rotor na velocidade de 600 RPM.

A Figura 7.6 mostra os deslocamentos laterais do eixo medidos ao longo dos eixos x e z (conforme Fig. 7.2) considerando as distintas condições operacionais do rotor (nível de desbalanceamento e velocidade de rotação). Estas respostas de vibrações foram adquiridas usando-se os sensores de proximidade do tipo corrente de Foucault apresentados na Fig. 7.5. Os resultados indicam que as respostas das vibrações aumentam conforme a velocidade de rotação e nível de desbalanceamento. As assinaturas de impedância podem ser diretamente influenciadas por estes efeitos, necessitando uma normalização de dados especial de modo a garantir a identificação de danos com segurança.

Tabela 7.1 Configurações experimentais adotadas para obter-se as assinaturas de impedância do rotor.

Execução	Condição estrutural	Dano (porca de aço)	Nível de desbalanceamento	Velocidade de rotação [RPM]
1	Intacta (baseline)	-	UB <sub>1</sub>	600
2	Intacta	-	UB <sub>1</sub>	900
3	Intacta	-	UB <sub>1</sub>	1200
4	Str Cnd. 1	c/ massa	UB <sub>1</sub>	600
5	Str Cnd. 1	c/ massa	UB <sub>1</sub>	900
6	Str Cnd. 1	c/ massa	UB <sub>1</sub>	1200
7	Str Cnd. 2	-	UB <sub>2</sub>	600
8	Str Cnd. 2	-	UB <sub>2</sub>	900
9	Str Cnd. 2	-	UB <sub>2</sub>	1200
10	Str Cnd. 3	-	UB <sub>3</sub>	600
11	Str Cnd. 3	-	UB <sub>3</sub>	900
12	Str Cnd. 3	-	UB <sub>3</sub>	1200
13	Str Cnd. 4	c/ massa	UB <sub>2</sub>	600
14	Str Cnd. 4	c/ massa	UB <sub>2</sub>	900
15	Str Cnd. 4	c/ massa	UB <sub>2</sub>	1200
16	Str Cnd. 5	c/ massa	UB <sub>3</sub>	600
17	Str Cnd. 5	c/ massa	UB <sub>3</sub>	900
18	Str Cnd. 5	c/ massa	UB <sub>3</sub>	1200



(a)

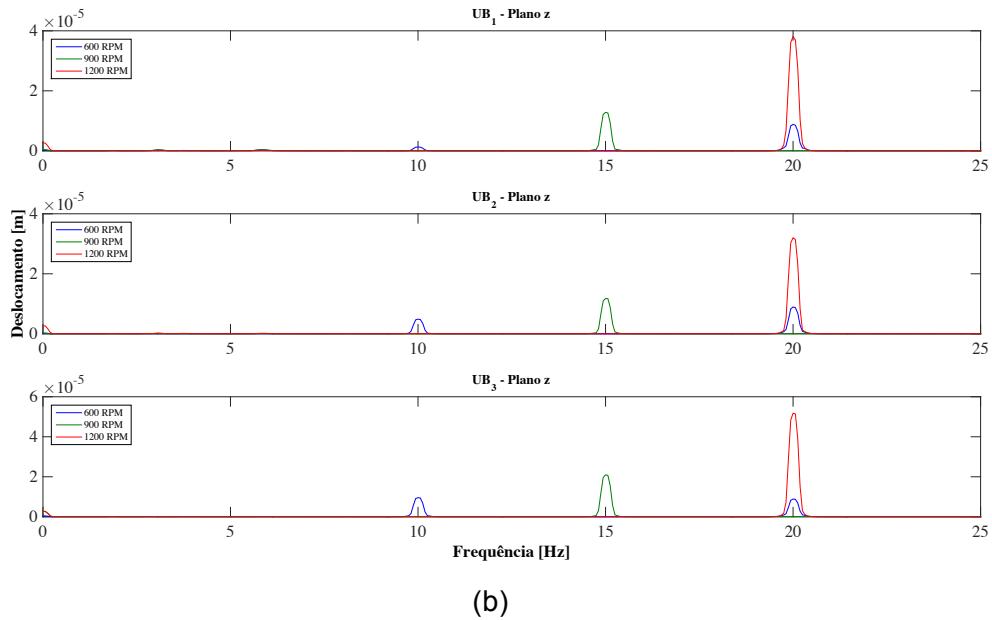


Figura 7.6 Deslocamento (sensores de proximidade tipo corrente de Foucault): (a) direção x; (b) direção z.

Com relação ao algoritmo híbrido de otimização usado para compensar as mudanças nas condições ambientais e operacionais do rotor (nível de desbalanceamento e velocidade de rotação), o otimizador evolutivo DE foi executado 5 vezes considerando 10 indivíduos em sua população inicial (esta é uma das vantagens do DE). A métrica de dano RMSD foi usada como função objetivo. As assinaturas de impedância foram digitalmente filtradas com um filtro de suavização tipo FIR da arquitetura Savitzky-Golay de 3<sup>a</sup> ordem, com tamanho de janela de 31 pontos, usando-se a plataforma MATLAB®.

A Figura 7.7(a) mostra as assinaturas de impedância medidas considerando as execuções #1 a #3 sem compensação. A Figura 7.7(b) apresenta as mesmas medições após a compensação. Estes resultados fornecem uma avaliação qualitativa do ISHM com relação à variação unicamente da velocidade de rotação.

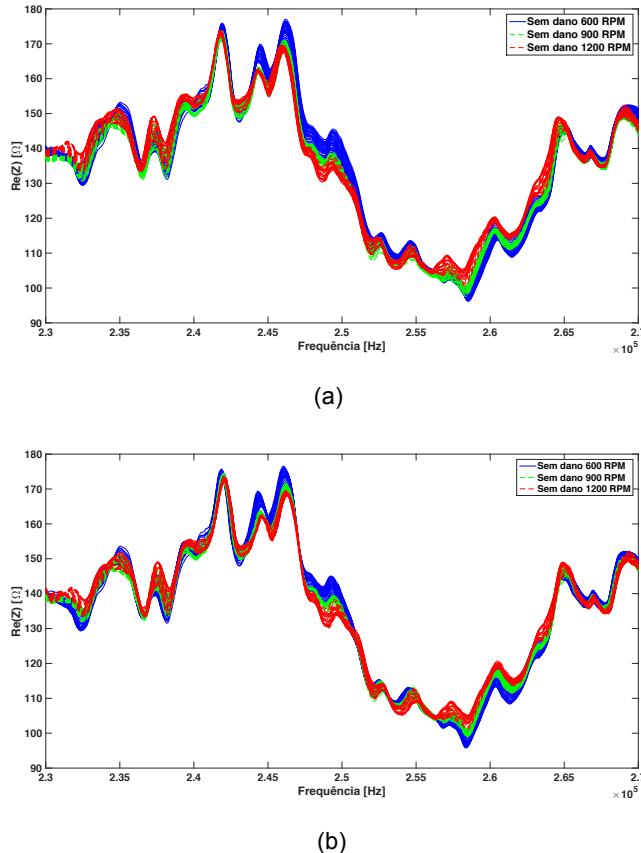


Figura 7.7 Assinaturas de impedância para diferentes velocidades de rotação. (a) sem compensação; (b) com compensação.

Nota-se que deslocamentos tanto na direção horizontal como vertical da curva são observados na Fig. 7.7(a). Contudo, após o procedimento de compensação, pode-se verificar que os picos de ressonância se aproximam da assinatura de referência (*baseline*, a 600 RPM).

#### 7.4.1. Análise #1: Massa adicionada (porca de 4,89 g):

A Figura 7.8 mostra as assinaturas de impedância adquiridas usando-se o PZT#1 (ver Fig. 7.2). As curvas representam a média de todas as medições realizadas em cada execução (cf. Tab. 7.1) mostrando o efeito da massa adicionada. A condição intacta (sem dano) corresponde à média de todas as medições realizadas nas execuções #1 a #3. As três condições estruturais seguintes estão relacionadas às assinaturas médias adquiridas nas execuções #4, #5 e #6 (600 RPM c/ massa adicional, 900 RPM c/ massa e 1.200 RPM c/ massa, respectivamente).

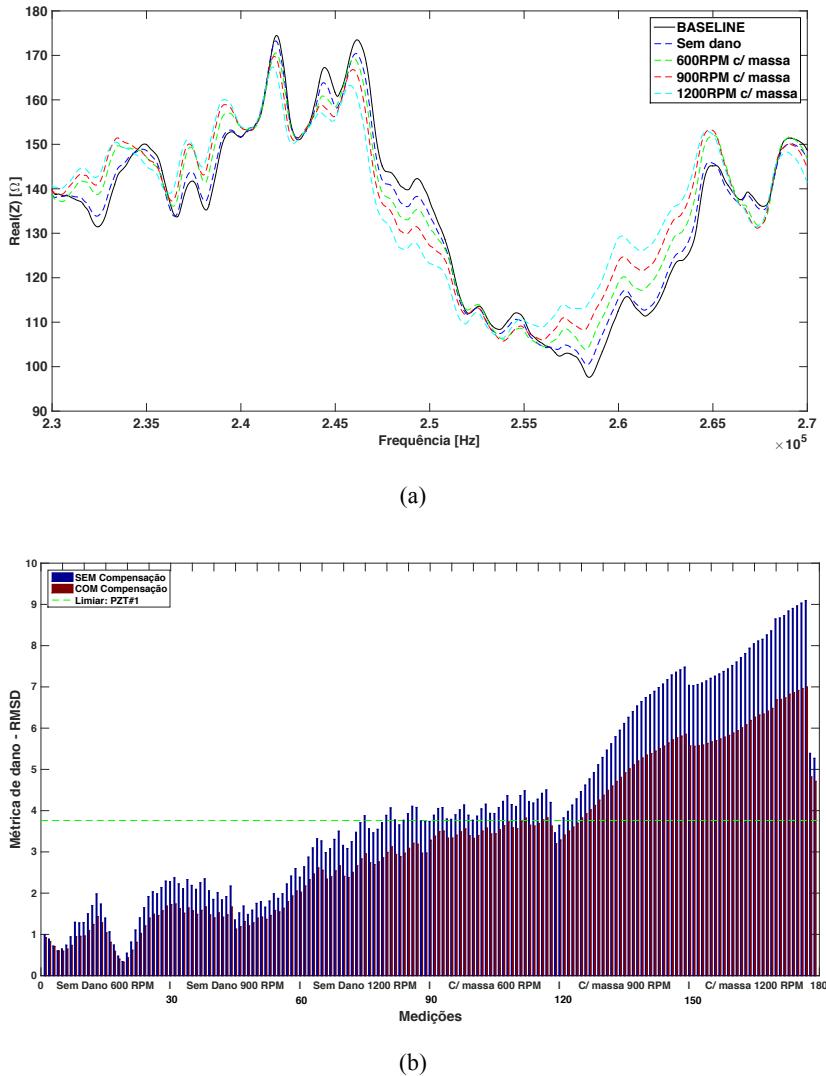


Figura 7.8 Assinaturas de impedância (PZT#1) considerando o efeito de massa adicionada.  
(a) Assinaturas de impedância compensadas; (b) Índices RMSD e limiar de discriminação.

Alterações significativas podem ser observadas nos sinais de impedância da StrCnd-1 quando comparados à condição intacta. A Figura 7.8(b) apresenta os valores de RMSD obtidos antes e depois do processo de compensação. Os índices de dano compensados associados com as condições intactas foram usados para se estabelecer o limiar de discriminação estatístico (linha tracejada da Fig. 7.8b) para a identificação de danos, com 95% de confiança. Este nível de confiança é o mesmo para todos os resultados apresentados neste capítulo.

Na Fig. 7.8(b) pode-se observar que em apenas 10% das 30 medidas obtidas na execução #4 (com massa adicional a 600 RPM; ver Tab. 7.1) foi possível identificar a presença do dano. Assim, uma quantidade significativa de falsos negativos (90%) está representada neste caso. Entretanto, a maioria dos casos nas execuções #5 e #6 (c/ massa

adicional a 900 RPM e c/ massa a 1.200 RPM, respectivamente), foi possível detectar a massa adicional. Finalmente, estes resultados apresentam uma taxa de falsos positivos de 0%, com uma taxa de acertos de 64,44%.

Similarmente, a Fig. 7.9(a) e a Fig. 7.9(b) mostram os resultados globais com a métrica RMSD usando-se os sensores PZT#2 e PZT#3, respectivamente, considerando-se o efeito da massa adicional.

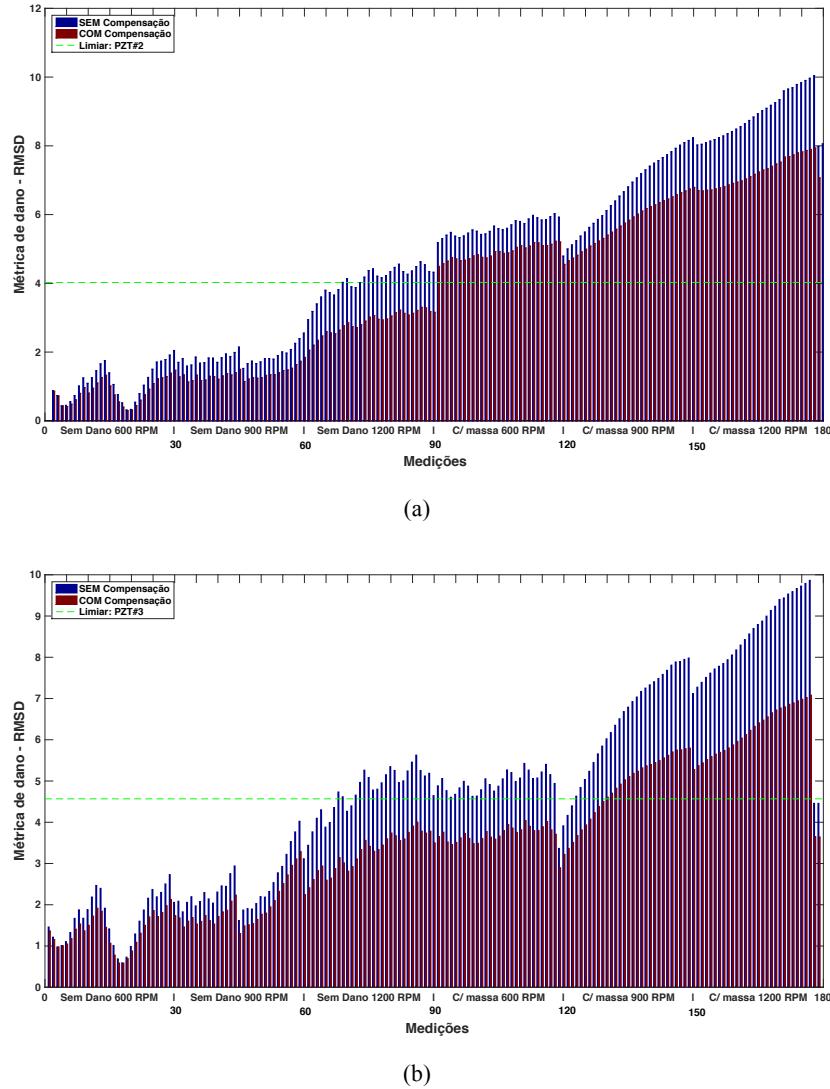


Figura 7.9 Índices RMSD e limiares de discriminação. (a) PZT#2; (b) PZT#3.

Pode-se observar que os índices de dano foram minimizados como resultado da aplicação da técnica de normalização. Além disto, somente o PZT#2 foi capaz de detectar em todas as ocasiões a presença da massa adicional.

#### 7.4.2. Análise #2: Efeito de desbalanceamento e massa adicionada com desbalanceamento:

A Figura 7.10, Fig. 7.11 e Fig. 7.12 mostram os resultados globais para todas as condições estruturais testadas considerando os PZT#1, PZT#2 e PZT#3, respectivamente, após a depuração de dados. Cabe ressaltar que apenas três valores atípicos foram detectados e descartados, a saber, uma medição do PZT#2 e duas medições do PZT#3, sendo que todas ocorreram durante a execução #12. A Tabela 7.2 sumariza os resultados globais de detecção de dano considerando a taxa de falsos positivos (alarmes falsos) e também sua taxa de acertos (Probabilidade de Detecção – POD).

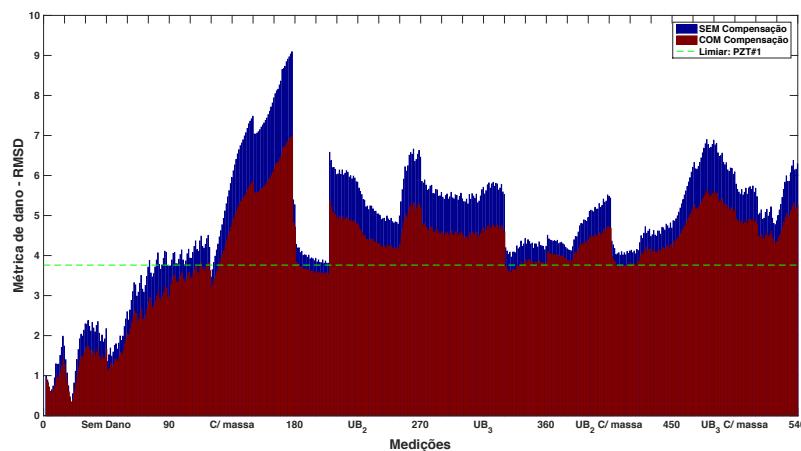


Figura 7.10 Resultados globais para o PZT#1 com limiar de discriminação após a depuração de dados.

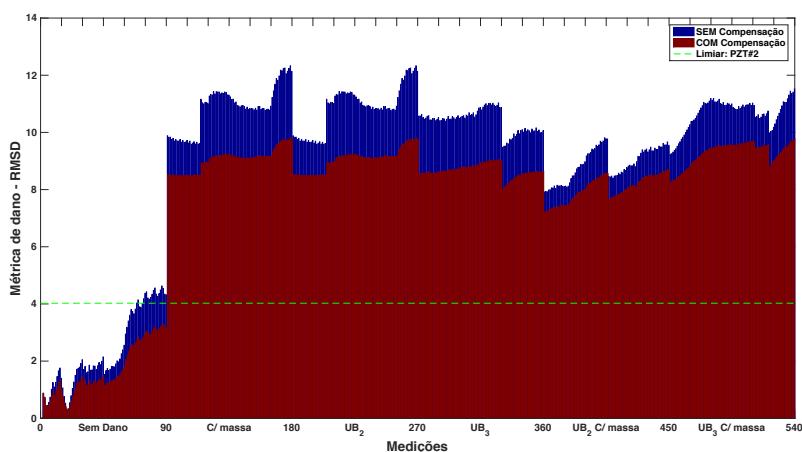


Figura 7.11 Resultados globais para o PZT#2 com limiar de discriminação após a depuração de dados.

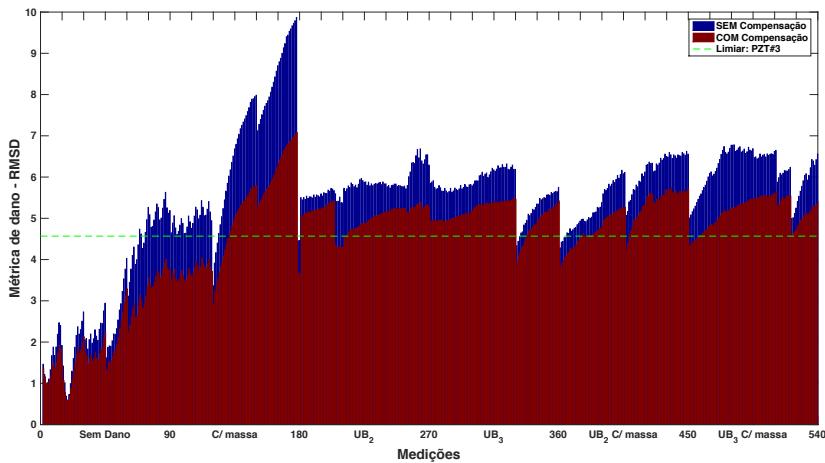


Figura 7.12 Resultados globais para o PZT#3 com limiar de discriminação após a depuração de dados.

Tabela 7.2 Resultados globais de detecção de dano para todos os sensores.

Transdutor	PFP*	POD** (Str Cnd. 1)	POD** (Str Cnd. 2)	POD** (Str Cnd. 3)	POD** (Str Cnd. 4)	POD** (Str Cnd. 5)
PZT#1	0%	64,44%	76,67%	87,78%	91,11%	100%
PZT#2	0%	100%	100%	100%	100%	100%
PZT#3	0%	53,33%	91,11%	94,32%	78,89%	92,22%

\* Probabilidade de Falsos Positivos (Alarmes falsos); \*\* Probabilidade de Detecção (Taxa de acertos)

Pode-se observar que com os valores RMSD devidamente compensados, a PFP para todos os sensores obtida foi zero. Além disto, todas as amostras passaram pelo teste de normalidade Jarque-Bera (JB), com um nível de significância (*alpha*) de 1%.

A Tabela 7.3 sumariza os resultados dos testes de normalidade.

Tabela 7.3 Resultados dos testes JB de normalidade para cada sensor .

Sensor	valor-p	Estatística do teste	Valor crítico	$H_0$
PZT#1	0.0578	4.9302	12.5579	0
PZT#2	0.0251	7.9220	12.5579	0
PZT#3	0.0421	5.9404	12.5579	0

Nível de significância: 1%.

O nível de significância (*alpha*) foi escolhido em 1%, ao se considerar a probabilidade de ocorrência de um erro do tipo I, o que caracteriza a chance de assumir que a amostra não possua distribuição normal (hipótese alternativa  $H_1$ ) quando na verdade a

amostra apresenta esta distribuição (hipótese nula  $H_0$ ). A plataforma MATLAB® foi usada para realizar os testes de normalidade. O valor nulo de  $H_0$  na Tab. 7.3 significa que a hipótese nula não deve ser rejeitada.

Conforme os resultados globais apresentados na Tab. 7.2 indicam, o sensor PZT#2 apresentou excelentes resultados na tarefa de detecção de danos. O autor considera que este resultado é consequência de um melhor acoplamento eletromecânico neste caso, uma vez que este sensor tem um número maior de pastilhas de PZT (4 pastilhas) em sua composição, ao passo que os PZT#1 e PZT#3 possuem apenas 3 pastilhas.

## 7.5. Conclusões do capítulo

Os resultados apresentados neste capítulo demonstram a eficiência do método ISHM quando combinado com uma técnica de normalização de dados para a detecção de falhas em eixos rotativos. A normalização de dados foi usada para a compensação dos efeitos causados pelas mudanças de condições ambientais e operacionais. O teste foi realizado em um eixo de rotor que foi sujeito a variações de temperatura ao longo dos dias em que os testes foram realizados, assim como mudanças na velocidade de rotação do rotor, na faixa de 600 RPM a 1.200 RPM, combinadas a níveis distintos de desbalanceamento. Uma massa adicional (porca de 4,89 g) e diferentes níveis de desbalanceamento foram testados de modo a introduzir alteração dinâmica na estrutura monitorada. Faixas de frequência elevadas forneceram boa sensibilidade de localização para os cenários de danos estruturais investigados neste capítulo.

Analisando-se o desempenho geral dos sensores, foi constatado que o PZT#2 forneceu melhor capacidade de detecção, uma vez que este sensor foi montado com quatro pastilhas de PZT conectadas em paralelo, diferentemente dos sensores PZT#1 e PZT#3, montados com apenas três pastilhas de PZT conectadas em paralelo. Deve-se notar que uma quantidade significativa de médias (1.000) por ponto frequencial foi implementada, conforme experiências anteriores na aquisição de sinais de impedância para o estudo do comportamento dinâmico da estrutura monitorada. Além disto um filtro digital foi necessário para permitir a obtenção de dados estáveis, de forma que o processo de diagnóstico pudesse ser realizado.

Neste trabalho, as mudanças provocadas pelas condições operacionais e ambientais foram minimizadas usando-se um método híbrido de otimização. A métrica RMSD foi usada como função objetivo para fins de minimização. Esta técnica de normalização de dados permitiu o estabelecimento de limiares de discriminação estatísticos baseados na teoria de CEP, de modo a avaliar o desempenho global de cada sensor com relação à probabilidade

de falsos positivos, bem como a correspondente taxa de acertos ou probabilidade de detecção.

## CAPÍTULO VIII: ESTUDO COMPARATIVO DE TÉCNICAS DE NORMALIZAÇÃO DE DADOS PARA SISTEMAS ISHM E PROPOSTA DE UMA NOVA TÉCNICA DE COMPENSAÇÃO

### 8.1. Introdução

Este capítulo é dividido em duas partes. Na primeira, realiza-se um estudo comparativo entre a técnica conhecida como “Deslocamento efetivo em frequência através da análise de correlação” e a técnica de normalização de dados baseada no algoritmo híbrido de otimização (DE e SQP). Esta é uma etapa importante, tendo em vista que a primeira técnica é a mais comumente utilizada na literatura, embora possua uma restrição importante, conforme descrita abaixo. Na segunda parte deste capítulo, uma nova técnica de normalização de dados é proposta, com o objetivo de superar uma limitação presente nas duas técnicas de normalização utilizadas ao longo desta tese.

A largura da faixa de frequência escolhida não pode ser muito ampla, uma vez que o efeito de variação da temperatura causa um deslocamento no eixo das frequências e que possui uma tendência não linear (Baptista *et al.*, 2014). Isto significa que os deslocamentos ao longo da frequência para os picos localizados na vizinhança de 50 kHz são menores que aqueles verificados para os picos próximos de 100 kHz, que por sua vez são também menores que os deslocamentos no entorno dos 150 kHz, e assim por diante. Ademais, tais deslocamentos possuem uma tendência não linear (Rabelo *et al.*, 2015). Desta forma, tem-se uma restrição quanto à largura máxima da faixa de frequência utilizada.

Sabe-se que alguns tipos de dano são mais aparentes em algumas regiões ao longo do espectro de frequência (Palomino, 2014) como, por exemplo, um dano incipiente será mais facilmente detectável ao se utilizar uma faixa de frequência mais elevada (na casa de 200 kHz, aproximadamente). Contudo, ao utilizar-se tal faixa, restringe-se ao mesmo tempo a distância sensível entre o dano e sensor, tendo em vista que os comprimentos de onda são menores e o SDD pode enviar uma energia ao sinal atuante que é limitada pelo *hardware* do SDD. Por outro lado, faixas de frequência menores (na casa de 30 kHz, aproximadamente) possuem comprimentos de onda maiores, detectam mais facilmente danos maiores (tais como mudanças nas condições de contorno) e possuem em geral uma distância sensível maior (Park *et al.*, 2003). Desta forma, pode ser interessante ter a capacidade de monitorar uma determinada estrutura não em uma faixa de frequência restrita, mas uma faixa ampla, de modo que uma gama maior de alterações estruturais (ou tipos de dano) possam ser detectadas.

Já a técnica de normalização de dados baseada no algoritmo híbrido de otimização, conforme visto nos dois capítulos anteriores, apresentou resultados satisfatórios para a compensação tanto de mudanças nas condições ambientais como nas condições operacionais da estrutura monitorada (caso do eixo de máquina rotativa). Além disso, esta técnica possui a vantagem de não requerer necessariamente a instalação de sensores de temperatura na estrutura monitorada (embora sejam recomendados em muitos casos), uma vez que a busca pelos parâmetros ótimos de deslocamento é feita de forma automática pelo algoritmo. Entretanto, deve-se destacar que a função objetivo deste algoritmo é a própria métrica de dano que deve ser minimizada usando os algoritmos DE e SQP, não importando qual seja a assinatura de impedância tratada. Isto pode causar a mitigação de algum dano ou de alguma mudança estrutural importante, tendo em vista que, no resultado final, um índice de dano que deveria ser substancialmente elevado mostra-se reduzido devido à otimização (minimização da métrica de dano). Desta forma, pode-se ter problemas em casos de classificação da severidade de danos. Outra limitação desta técnica é que o tempo de processamento da mesma é comparativamente bem mais elevado quando comparado a outras técnicas de normalização de dados.

Ambas as técnicas previamente mencionadas aplicam deslocamentos únicos (um vertical e um horizontal) a todos os pontos das assinaturas de impedância, sendo portanto restringidos pelo efeito não linear citado acima. Desta forma, neste capítulo, propõe-se o uso de uma nova técnica de normalização de dados, ou seja, os deslocamentos são feitos ponto a ponto usando-se como função objetivo a minimização da distância euclidiana entre cada ponto da curva associada à assinatura de impedância do teste e cada ponto correspondente da curva de impedância de referência (*baseline*). Esta técnica será apresentada neste capítulo após fazer uma comparação entre as duas primeiras técnicas, quais sejam: *i*) deslocamento efetivo em frequência por análise de correlação, e *ii*) algoritmo híbrido de otimização tendo uma métrica de dano como função objetivo.

## 8.2. Estudo comparativo de técnicas de normalização de dados

Uma placa de alumínio aeronáutico (Al. 2024-T3) de dimensões 500 mm x 500 mm x 3 mm foi instrumentada com uma pastilha de PZT tipo 5H sendo selecionada uma faixa de frequência de 75 kHz a 85 kHz com 1.000 pontos freqüenciais, de modo que as assinaturas de impedância possuem 10 Hz de resolução em frequência. Utilizou-se o analisador de impedâncias portátil e de baixo custo (Finzi Neto *et al.*, 2011) para as medições de impedância. As medições ocorreram com o corpo de prova instalado dentro da câmara

climática ESPEC (modelo EPL-4H), com a temperatura interna controlada na faixa de -10 °C a 60 °C com passos de 5 °C, onde o tempo de estabilização para cada ponto de temperatura foi de 30 minutos, tempo em que, segundo os fabricantes, a câmara climática chega à estabilização com uma tolerância de  $\pm 0,5$  °C. A Figura 8.1 mostra a placa utilizada neste experimento, sendo que a posição central da placa foi utilizada para a inserção de dano. Para isso, uma fresa foi usada para inserir danos na estrutura com dois níveis de severidade. Primeiro, utilizou-se uma broca de 3 mm de diâmetro e realizou-se um furo de 1,3 mm de profundidade (Dano 1). Em seguida, utilizou-se uma broca de 5 mm de diâmetro e realizou-se um furo no mesmo local de 1,6 mm de profundidade (Dano 2).

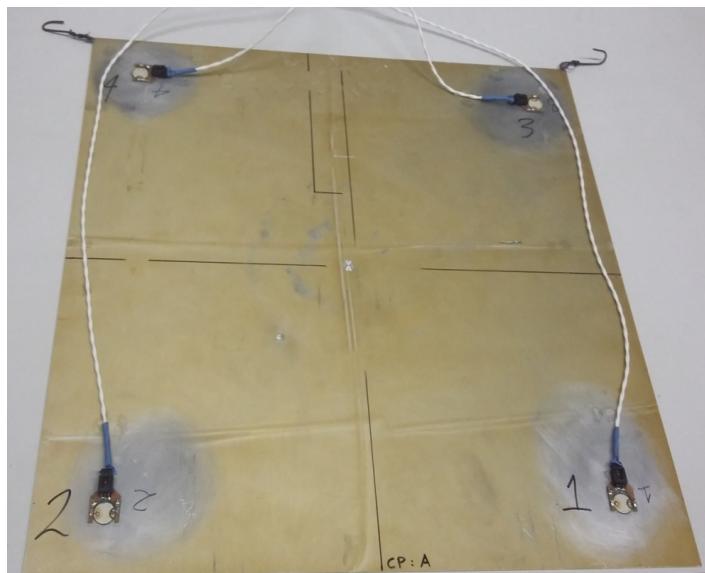


Figura 8.1 Placa de alumínio (corpo de prova) instrumentada utilizada no experimento.

Conforme foi planejado o experimento apresenta 15 medições para cada condição estrutural analisada (Sem Dano, Dano 1 e Dano 2), uma vez que são considerados 15 pontos de temperatura, totalizando assim 45 assinaturas de impedância.

### 8.3. Resultados e discussão

Procurando resumir a apresentação dos resultados, apenas aqueles do PZT#1 são apresentados nesta etapa, uma vez que o objetivo deste estudo é o de avaliar o desempenho de cada técnica de normalização de dados. As assinaturas de impedância na condição intacta são mostradas na Fig. 8.2, onde se pode observar os efeitos importantes da variação da temperatura nos sinais de impedância. Temperaturas intermediárias foram ocultadas para evitar saturação de curvas nas figuras.

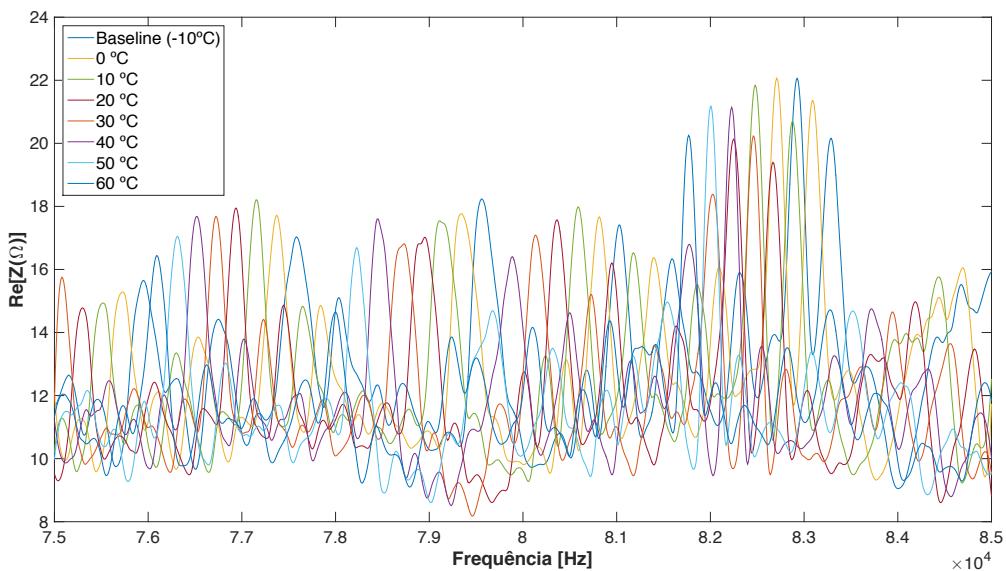


Figura 8.2 Variações causadas nas assinaturas de impedância na condição intacta devido a mudanças na temperatura.

A Figura 8.3 mostra as assinaturas de impedância corrigidas através do método de deslocamento efetivo em frequência por análise de correlação.

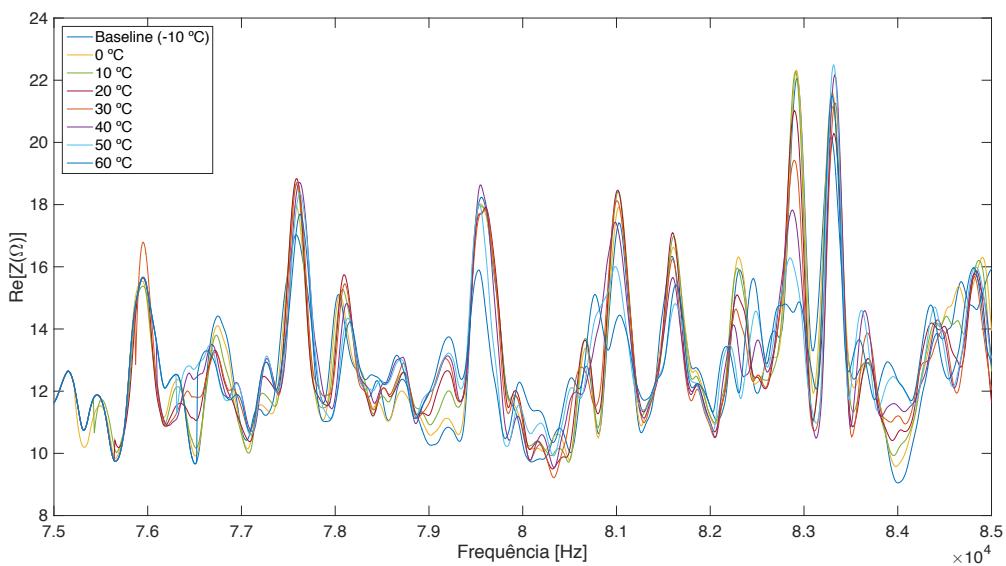


Figura 8.3 Assinaturas de impedância corrigidas pelo método deslocamento efetivo em frequência por análise de correlação.

Uma vez que o método de análise de correlação utiliza o coeficiente de correlação como parâmetro para buscar o deslocamento ótimo, para fins de comparação com a técnica de normalização através do algoritmo híbrido de otimização, foi escolhida a métrica de dano CCD como função objetivo. A Figura 8.4 apresenta as assinaturas de impedância corrigidas.

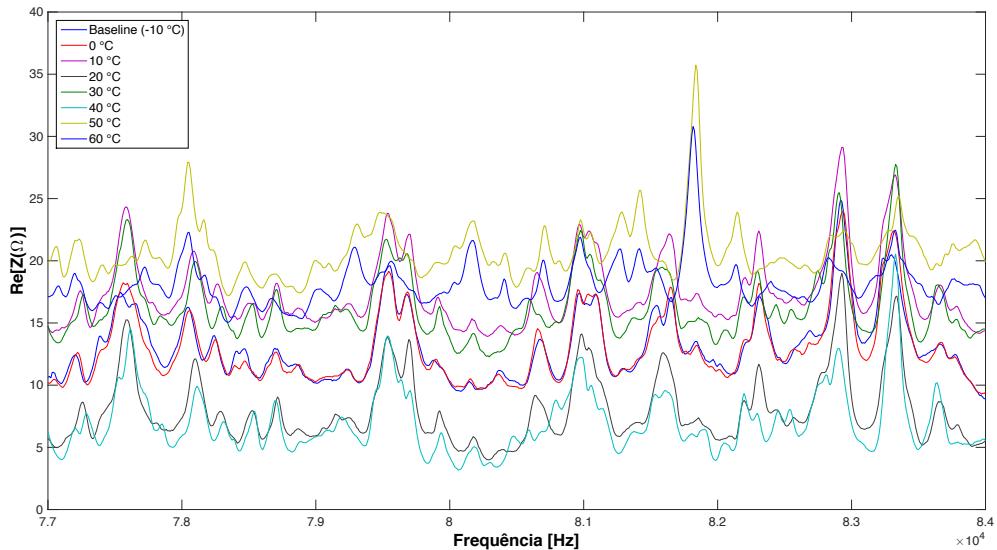


Figura 8.4 Assinaturas de impedância corrigidas pelo algoritmo híbrido de otimização (DE e SQP) usando-se a métrica CCD como função objetivo.

As assinaturas de impedância corrigidas da Fig. 8.3 estão mais próximas uma das outras quando comparadas às assinaturas corrigidas da Fig. 8.4. Isto porque, no método de análise de correlação, busca-se o parâmetro que irá tornar máximo o coeficiente de correlação entre as duas curvas; em seguida, aplica-se um deslocamento vertical baseado na diferença média global dos valores dos dois padrões de impedância analisados (cf. descrito no capítulo 3). Já as assinaturas de impedância corrigidas pelo algoritmo híbrido de otimização, estas encontram-se organizadas de modo que os deslocamentos aplicados são aqueles que permitiram a minimização da métrica CCD. Sabe-se que a métrica CCD é geralmente mais sensível aos deslocamentos horizontais do que aos verticais e, desta forma, as curvas da Fig. 8.4 não apresentam compensação vertical significativa.

A Figura 8.5 apresenta os índices CCD com o método de análise de correlação, enquanto a Fig. 8.6 apresenta os índices CCD com o algoritmo híbrido de otimização.

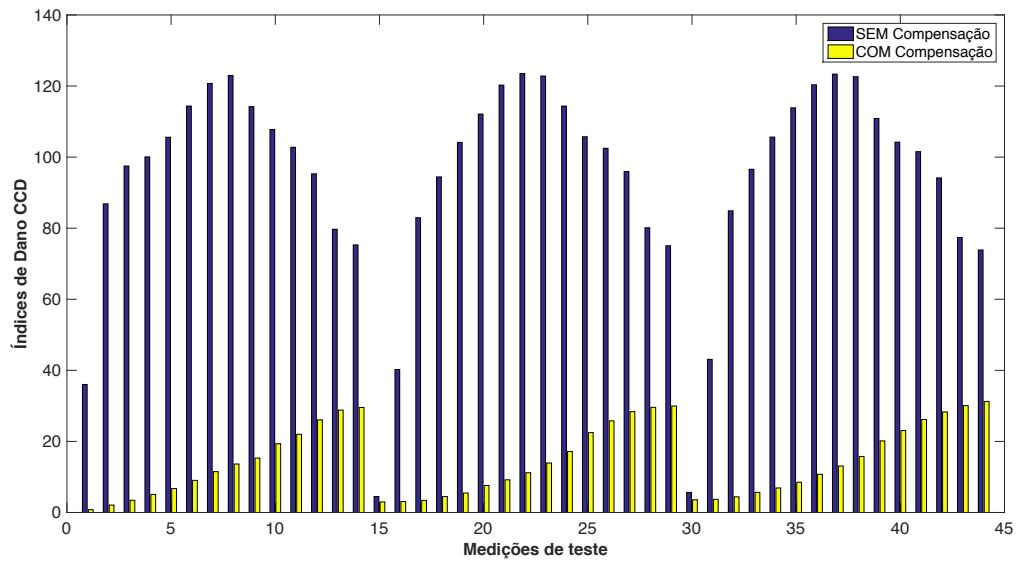


Figura 8.5 Índices de dano CCD antes e após a normalização de dados através do método deslocamento efetivo em frequência por análise de correlação.

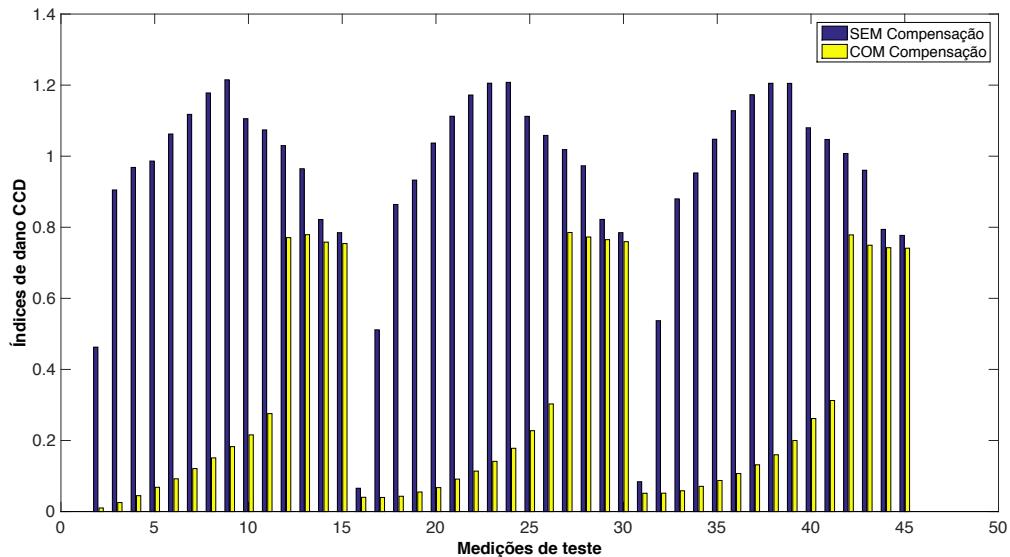


Figura 8.6 Índices de dano CCD antes e após a normalização de dados através do algoritmo híbrido de otimização usando a métrica CCD como função objetivo.

Os histogramas da Fig. 8.5 e da Fig. 8.6 apresentam as 45 medições testadas, conforme 15 medidas (de -10 °C a 60 °C com passos de 5 °C) para três condições estruturais: Intacta, Dano 1 (broca de 3 mm) e Dano 2 (broca de 5 mm). Comparando os resultados da Fig. 8.5 e Fig. 8.6 pode-se notar que, à medida que o gradiente de temperatura cresce, o algoritmo híbrido de otimização apresenta resultados piores quando comparado com a técnica de análise de correlação. Entretanto, quando pequenos

gradientes de temperatura são considerados, o algoritmo híbrido de otimização fornece resultados melhores. A Tabela 8.1 sumariza os resultados das métricas de dano CCD para cada abordagem de normalização de dados dentro de um gradiente de 10 °C de magnitude para fins de comparação.

Tabela 8.1 Resultados comparativos entre cada técnica de normalização de dados.

Deslocamento efetivo através de análise de correlação			Otimização híbrida		
Temperatura [°C]	Condição	CCD [%]	Temperatura [°C]	Condição	CCD [%]
-10	Intacta	0,001	-10	Intacta	0,001
-5	Intacta	1,036	-5	Intacta	1,018
0	Intacta	2,718	0	Intacta	2,542
-10	Dano 1	4,152	-10	Dano 1	4,02
-5	Dano 1	4,239	-5	Dano 1	3,976
0	Dano 1	4,832	0	Dano 1	4,3113
-10	Dano 2	5,158	-10	Dano 2	5,158
-5	Dano 2	5,181	-5	Dano 2	5,181
0	Dano 2	5,854	0	Dano 2	5,854

Como pode-se notar na Tab. 8.1 e Figs. 8.5 e 8.6, independentemente da técnica de normalização de dados utilizada, à medida que o gradiente de temperatura entre a medição de teste e a assinatura de referência (*baseline*) aumenta, as chances de se obter um falso positivo irão aumentar caso outro *baseline* não seja utilizado para uma melhor compensação. Este método de utilizar-se mais de um *baseline* em temperaturas intermediárias foi utilizado no trabalho apresentado no capítulo 4 (Rabelo *et al.*, 2016).

Pode-se concluir, ao comparar os valores de CCD mostrados na Tab. 8.1, que o algoritmo híbrido de otimização fornece resultados discretamente melhores quando se considera pequenos gradientes de temperatura, o que pode implicar na obtenção de limiares de discriminação mais bem definidos estatisticamente, melhorando assim a probabilidade de detecção do SDD. Entretanto, conforme mencionado anteriormente, caso se deseje utilizar uma ampla faixa de frequência no processo de monitoramento, ambas as técnicas não apresentam bons resultados devido ao efeito não linear do deslocamento em frequência causado pelas variações de temperatura. A Fig. 8.7 ilustra este problema ao se utilizar o método do deslocamento efetivo através de análise de correlação.

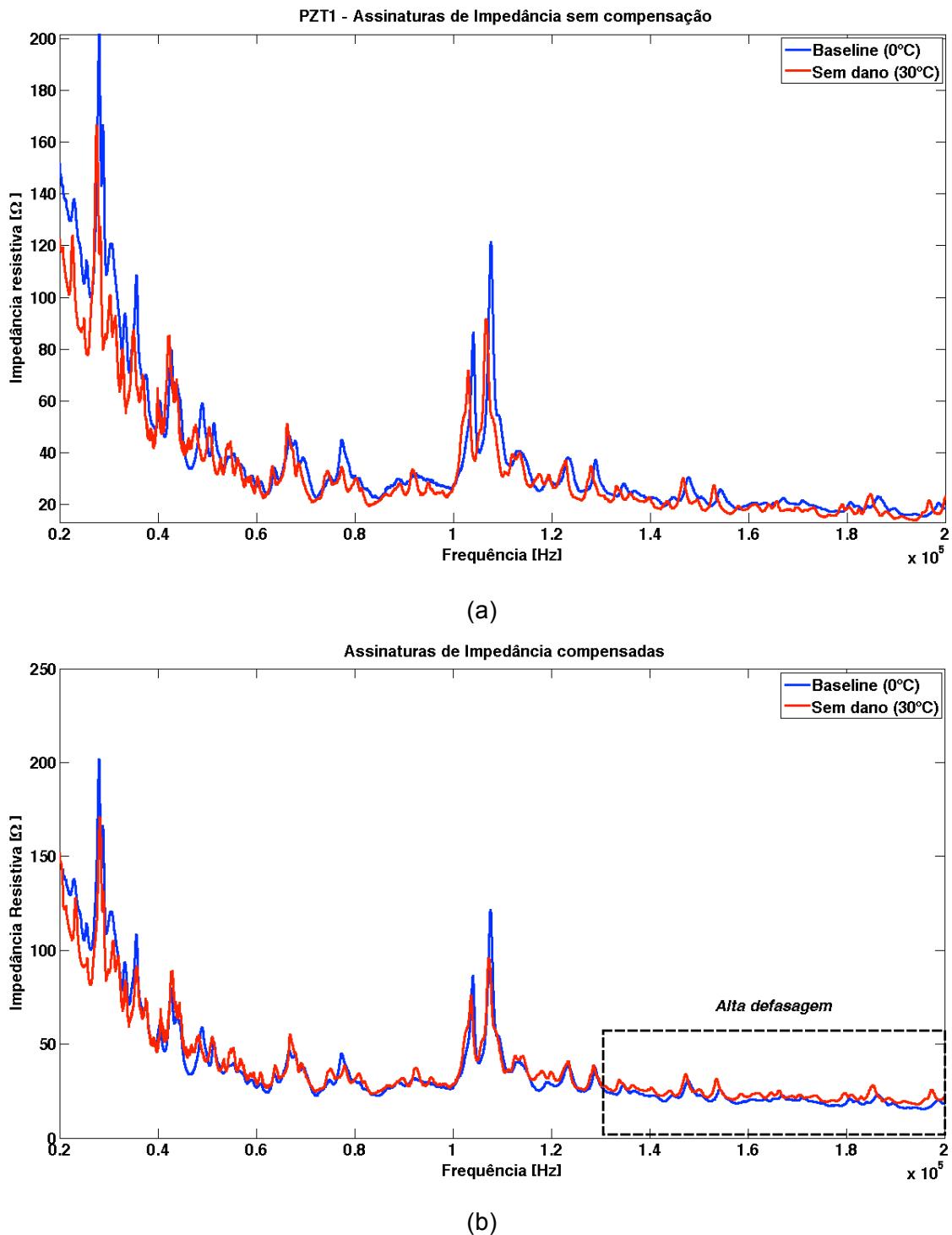


Figura 8.7 Assinaturas de impedância: (a) Antes da compensação; (b) após a compensação obtidas com um gradiente de 30 °C entre *baseline* e medição de teste, usando-se uma faixa larga de frequência para o monitoramento. Fonte: Rabelo (2014).

Como se pode observar na Fig. 8.7(b), o alinhamento entre as duas assinaturas ao longo de uma faixa larga de frequência pode implicar uma alta defasagem nas faixas mais altas de frequência, deteriorando assim o processo de compensação da temperatura.

Por este motivo, deseja-se ainda nesta tese propor uma nova técnica de normalização de dados que possa superar esta limitação, de modo que uma ampla faixa de frequência possa ser utilizada, garantindo uma maior cobertura de tipos de danos detectáveis pelo SDD. Esta nova técnica é apresentada na próxima seção.

#### **8.4. Normalização de dados ponto a ponto baseada na minimização da distância euclidiana**

Esta técnica tem por objetivo aplicar, ao invés de um deslocamento  $d_x$  e um deslocamento  $d_y$  para todos os pontos de uma assinatura de impedância, um deslocamento  $d_{x,i}$  e um deslocamento  $d_{y,i}$  para cada ponto  $i$  pertencente à assinatura de impedância que está sendo testada. Para isto, necessita-se aplicar uma rotina computacional que promova a minimização da distância euclidiana entre o ponto  $i$  e a curva da assinatura de impedância de referência (*baseline*).

##### 8.4.1 Distância mínima entre um ponto e uma curva:

Da geometria analítica, sabe-se que a distância euclidiana no plano cartesiano entre dois pontos  $(a,b)$  e  $(c,d)$  é dada pela Eq. 8.1.

$$D = \sqrt{(a-c)^2 + (b-d)^2} \quad (8.1)$$

O quadrado da distância entre o ponto dado  $(a,b)$  e um ponto genérico qualquer  $[x, f(x)]$  da curva gerada pela equação  $y = f(x)$  é dado pela Eq. 8.2.

$$Q(x) = D^2 = (a-x)^2 + [b-f(x)]^2 \quad (8.2)$$

Deseja-se encontrar o ponto  $[w, f(w)]$  da curva que seja o mais próximo possível do ponto  $(a,b)$ . Do cálculo diferencial, isto ocorrerá quando  $Q(w)$  for mínimo, ou seja,  $Q'(w)=0$ . Assim, tem-se que:

$$\begin{aligned}
 Q'(x) &= 2(a-w)(-1) + 2[b-f(w)][-f'(w)] = 0 \\
 \Rightarrow f'(w)[f(w)-b] &+ (w-a) = 0 \\
 \Rightarrow \frac{1}{f'(w)} &= -\frac{f(w)-b}{w-a}
 \end{aligned} \tag{8.3}$$

#### 8.4.2 Interpretação geométrica:

Como pode-se observar na Fig. 8.8, o ponto  $B[w, f(w)]$  da curva é o mais próximo do ponto externo dado  $A(a, b)$ , de forma que o segmento  $AB$  representa a distância mínima entre estes pontos. Quando este fenômeno geométrico ocorre, a reta  $s$ , tangente à curva no ponto  $B[w, f(w)]$ , é perpendicular ao segmento de reta  $AB$ .

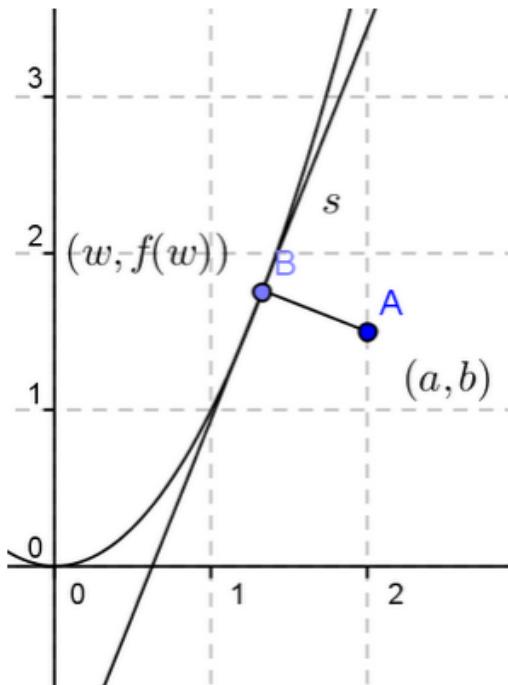


Figura 8.8 Representação auxiliar para interpretação geométrica da distância mínima entre o ponto  $A$  e uma curva. Fonte: Teixeira, A.S. (2012).

Se duas retas têm inclinações de  $\theta_1$  e  $\theta_2$ , a condição de perpendicularidade é a relação dada pela Eq. 8.4.

$$\frac{1}{\tan \theta_1} = -\tan \theta_2 \quad (8.4)$$

Como  $f'(w)$  é o coeficiente angular da reta  $s$ , tangente no ponto  $B$  e  $\frac{f(w)-b}{w-a}$  é o coeficiente angular da reta que contém o segmento  $AB$ , pela relação anteriormente calculada (Eq. 8.3) fica garantida a perpendicularidade em questão.

#### 8.4.3 Cálculo da distância mínima:

A equação da reta  $s$  tangente ao ponto  $B$  é  $\frac{y-f(w)}{x-w} = f'(w)$ , ou então:

$$f'(w)x - y + [f(w) - f'(w)w] = 0 \quad (8.5)$$

Conforme a fórmula da distância entre um ponto e uma reta (Boulos e Camargo, 2005), pode-se concluir que a distância mínima  $d=AB$ , entre o ponto  $(a,b)$  e a curva  $y=f(x)$ , é fornecida pela Eq. 8.6.

$$d = \left\| \frac{f'(w)a - b + [f'(w)w]}{\sqrt{[f'(w)]^2 + 1}} \right\| \quad (8.6)$$

Todavia, precisa-se saber o valor de  $w$ . Pode-se notar que  $w$  é a solução da Eq. 8.3 (Teixeira, S.A., 2012).

Assim, de posse das coordenadas do ponto  $A(a,b)$ , pertencente a uma assinatura de impedância de teste, e do ponto  $B(w,f(w))$ , pertencente à assinatura do *baseline*, pode-se determinar que os deslocamentos individuais em frequência  $d_{x,i}$  e amplitude  $d_{y,i}$ , para ponto da assinatura de impedância de teste, será finalmente obtido através da Eq. 8.7:

$$\begin{aligned} d_{x,i} &= |w_i - a_i| \\ d_{y,i} &= |f(w_i) - b_i| \end{aligned} \quad (8.7)$$

onde  $a_i$  e  $b_i$  são as coordenadas de cada ponto da assinatura de impedância de teste, na frequência  $i$  e  $w_i$  e  $f(w_i)$  são as coordenadas dos pontos mais próximos pertencentes à curva assinatura de impedância do *baseline* determinados pelo método descrito nesta seção. Este algoritmo foi programado em ambiente MATLAB, e os resultados para os dados medidos do corpo de prova da seção 8.2 são mostrados a seguir.

### 8.5. Resultados obtidos com a técnica de normalização de dados proposta

Usando a mesma configuração experimental da seção 8.3, os mesmos dados da faixa de frequência entre 75 kHz a 85 kHz foram utilizados para serem comparados às duas técnicas precedentes de normalização de dados (deslocamento por análise de correlação e algoritmo híbrido de otimização). Esta faixa de frequência foi denominada para este estudo como “Faixa estreita”. Durante os ensaios, assinaturas de impedância em uma faixa de 20 kHz a 250 kHz também foram adquiridas, com 5.000 pontos freqüenciais, fornecendo assim assinaturas com 46 Hz de resolução em frequência.

A Figura 8.9 mostra em um gráfico misto as impedâncias não corrigidas (Fig. 8.9a) e as corrigidas pelo método do deslocamento efetivo em frequência (*EFS*, Fig. 8.9b), bem como pelo método de normalização de dados ponto a ponto (Fig. 8.9c):

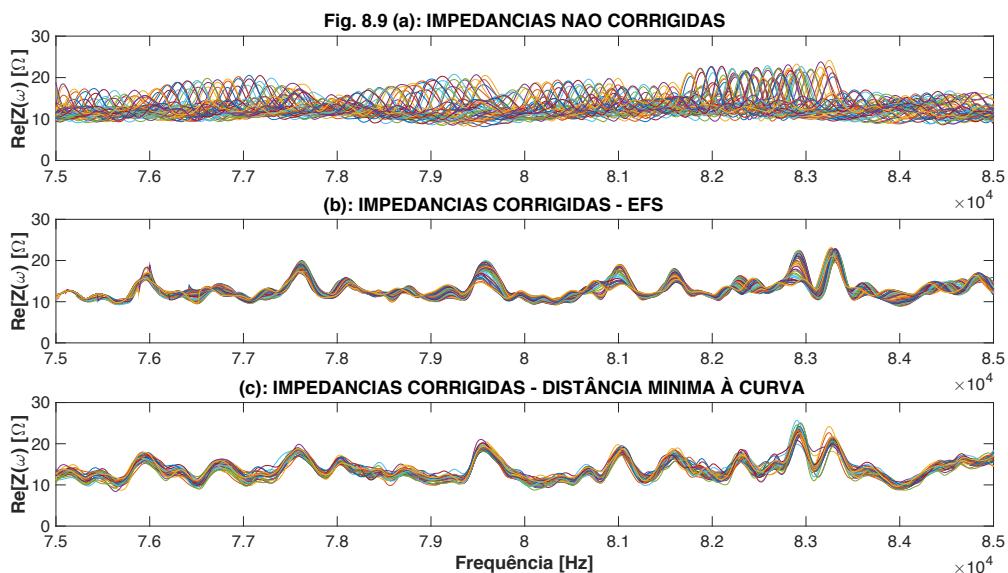


Figura 8.9 Assinaturas de impedância (a): Não corrigidas; (b) Corrigidas pelo método de deslocamento efetivo em frequência por análise de correlação; (c) Corrigidas pela normalização de dados ponto a ponto baseado na minimização da distância euclidiana.

Pode-se notar que com a normalização de dados ponto a ponto as curvas ficam ainda mais próximas umas das outras, de modo a aproximarem-se da assinatura de referência (*baseline*).

A Figura 8.10 apresenta os índices de dano CCD com o método de normalização de dados ponto a ponto, comparados aos índices já compensados por meio da técnica do deslocamento efetivo por análise de correlação.

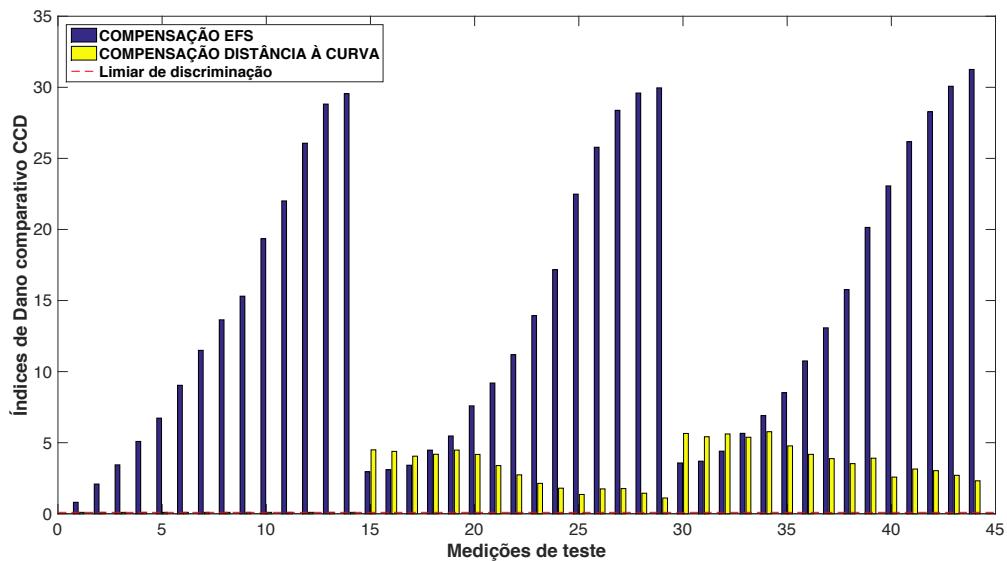


Figura 8.10 Índices de dano CCD comparando os métodos de deslocamento efetivo por análise de correlação (azul) e normalização ponto a ponto (amarelo).

Pode-se notar que o método proposto apresenta valores extremamente pequenos para as condições intactas (índices #1 a #14), de modo que todas as condições com dano seguintes puderam ser detectadas considerando o limiar de discriminação estabelecido. Nota-se, entretanto, que os valores dos índices de dano não seguiram uma tendência crescente à medida que o gradiente de temperatura aumentou. Isto não necessariamente significa uma desvantagem, uma vez que a única mudança entre o índice #15 e o #29 foi a alteração da temperatura interna, de modo similar à comparação entre o índice #30 e o #44. A Tab. 8.2 sumariza os resultados das métricas de dano CCD com as três técnicas de normalização abordadas neste capítulo para um gradiente de 10 °C de magnitude para comparação. Na Tab. 8.2, Método #1 corresponde ao deslocamento efetivo em frequência por análise de correlação, Método #2 corresponde ao algoritmo híbrido de otimização e o Método #3 corresponde à normalização ponto a ponto baseada na minimização da distância euclidiana.

Tabela 8.2 Resultados comparativos entre cada técnica de normalização de dados.

Temperatura [°C]	Condição estrutural	Índices de dano CCD [%]		
		Método #1	Método #2	Método #3
-10	Intacta	0,001	0,001	0,001
-5	Intacta	1,036	1,018	0,1001
0	Intacta	2,718	2,542	0,1001
-10	Dano 1	4,152	4,02	4,497
-5	Dano 1	4,239	3,976	4,389
0	Dano 1	4,832	4,3113	4,052
-10	Dano 2	5,158	5,158	5,651
-5	Dano 2	5,181	5,181	5,419
0	Dano 2	5,854	5,854	5,614

Pode-se notar, a partir da Tab. 8.2, que os índices são bastante parecidos para cada condição estrutural analisada. Entretanto, analisando-se os índices CCD da condição intacta da Fig. 8.10 pode-se observar que somente o Método #3 foi capaz de fornecer um limiar de discriminação baixo o suficiente para permitir que os danos pudessem todos ser detectados utilizando somente um *baseline* para a faixa de temperatura considerada (-10 °C a 60 °C). A seguir, apresenta-se os resultados para a largura de banda ampla (20 kHz a 250 kHz).

A Figura 8.11 apresenta em um gráfico misto as impedâncias não corrigidas (Fig. 8.11a), as corrigidas pelo método do deslocamento efetivo em frequência (*EFS*, Fig. 8.11b), bem como pelo método de normalização de dados ponto a ponto (Fig. 8.11c):

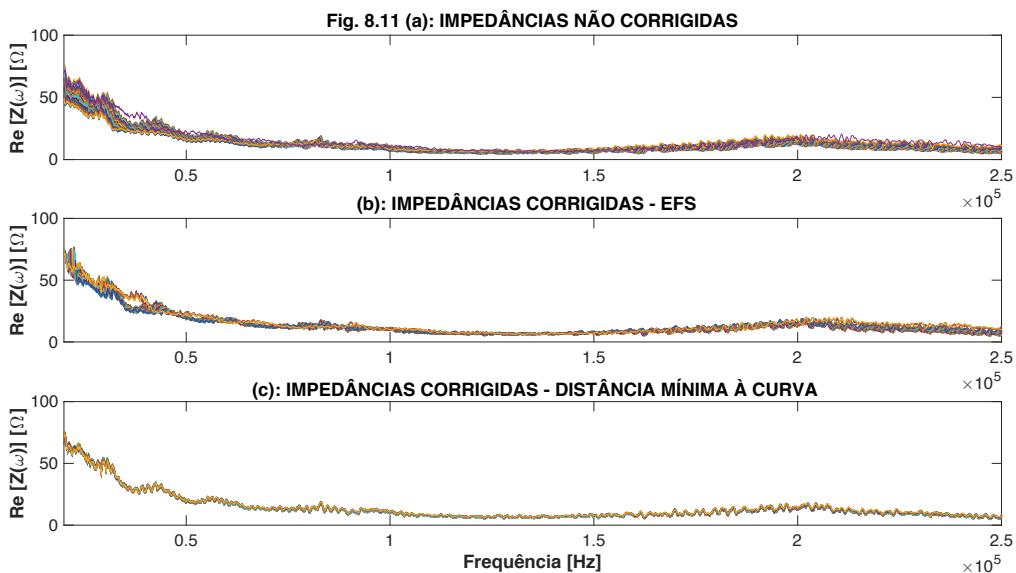


Figura 8.11 Assinaturas de impedância medidas na faixa de 20 kHz a 250 kHz (a): Não corrigidas; (b) Corrigidas pelo método de deslocamento efetivo em frequência por análise de correlação; (c) Corrigidas pela normalização de dados ponto a ponto baseado na minimização da distância euclidiana.

Pode-se notar, comparando os resultados da Fig. 8.11b e Fig. 8.11c, que as assinaturas de impedância compensadas pelo método EFS apresentam defasagem importante em relação ao *baseline* a partir da frequência de 160 kHz, aproximadamente. Já com a normalização ponto a ponto, as assinaturas de impedância corrigidas apresentam-se mais correlacionadas, em geral, com a assinatura da *baseline*.

A Figura 8.12 apresenta os índices CCD com o método de normalização de dados ponto a ponto, comparados com os índices já compensados por meio do deslocamento efetivo por análise de correlação.

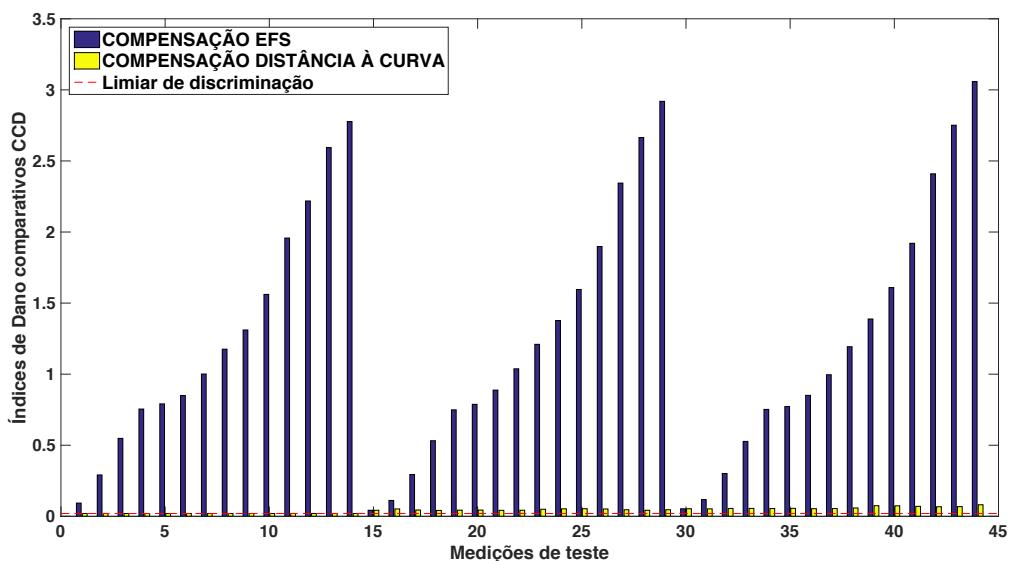


Figura 8.12 Índices de dano CCD comparando os métodos de deslocamento efetivo por análise de correlação (azul) e normalização ponto a ponto (amarelo) – Faixa ampla.

Novamente, pode-se notar que o método proposto proporciona um limiar de discriminação significativamente menor, de modo que todas as condições posteriores às intactas são detectadas com sucesso. Também, de forma similar, não constatou-se uma tendência crescente dos índices de dano à medida que o gradiente de temperatura aumentou.

## 8.6. Conclusões do capítulo

Apresentou-se neste capítulo uma comparação envolvendo as diferentes técnicas de normalização de dados aplicadas a sistemas ISHM. Tais técnicas são úteis no processamento de dados, especialmente quando as estruturas monitoradas estão sujeitas a

variações em suas condições ambientais e/ou operacionais. Ao se comparar as técnicas de deslocamento efetivo e o algoritmo híbrido de otimização, pode-se concluir que a otimização fornece resultados levemente melhores para pequenos gradientes de temperatura entre a condição de teste e a referência (*baseline*). Isto significa menores níveis de limiares de discriminação, uma vez que o desvio padrão amostral é reduzido, melhorando assim a capacidade de detecção do SDD. Entretanto, à medida que o gradiente de temperatura aumenta, o método de deslocamento efetivo em frequência por análise de correlação apresenta resultados melhores.

Além disto, propôs-se neste capítulo o uso de uma nova técnica de normalização de dados, baseada na minimização da distância euclidiana entre um ponto (da assinatura de impedância de teste) a uma curva (assinatura de referência *baseline*). Esta técnica superou as limitações encontradas pelas duas técnicas anteriormente citadas, quando aplicada em uma faixa de monitoramento mais ampla. Isto permite a possibilidade de monitorar-se mais de um tipo de dano na estrutura, que pode ser o caso quando danos de natureza distinta possuem repercussão mais pronunciada em determinada faixa de frequência. Além disto, os índices obtidos nesta normalização ponto a ponto não apresentaram tendência crescente com o gradiente de temperatura, indicando a possibilidade de obter-se bons resultados de compensação com um número menor de *baselines* em temperaturas diferentes, como foi o caso apresentado no capítulo 4. Finalmente, embora os resultados aqui reportados se mostrem promissores, esta técnica ainda deve ser estudada com mais profundidade, uma vez que se trata de uma nova abordagem, requerendo mais estudos de caso para verificar o desempenho global em comparação com outras técnicas de normalização de dados.

## CAPÍTULO IX: CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo são apresentadas as considerações finais deste trabalho, além de perspectivas de continuidade da tese. Como o trabalho envolveu temas distintos, porém bastante correlacionados quanto à metodologia utilizada, optou-se por apresentar as considerações finais separadamente.

Neste sentido, futuras contribuições e novos desenvolvimentos são também comentados em separado para cada tópico.

Este trabalho dedicou-se a temas avançados de monitoramento da integridade estrutural, buscando agregar técnicas que foram desenvolvidas e testadas com a finalidade de tornar o monitoramento mais confiável e seguro, com preocupação de evitar falsos diagnósticos. Neste sentido, técnicas de normalização de dados foram implementadas e agregadas ao sistema de monitoramento de integridade estrutural, tendo em vista mudanças em condições ambientais e/ou operacionais. Uma das técnicas de normalização de dados para a compensação da variação da temperatura mais utilizadas na literatura é conhecida como deslocamento efetivo em frequência (*Effective Frequency Shift* - EFS) por análise de correlação. Tal método foi detalhado e implementado ao longo do capítulo 3, juntamente com um estudo do efeito causado pela temperatura nas assinaturas de impedância. Embora tal método seja amplamente utilizado, este possui limitações que foram detidamente estudadas neste trabalho, de modo a propor técnicas avançadas de normalização de dados que sejam capazes de superar tais limitações.

No capítulo 1 foi introduzido o tema monitoramento de integridade estrutural (SHM) e a técnica baseada na impedância eletromecânica (ISHM), bem como a estrutura da tese foi apresentada.

O capítulo 2 apresenta o estado da arte da técnica de monitoramento ISHM juntamente com a fundamentação teórica para o desenvolvimento do trabalho. Pode-se considerar que foram abordados os tópicos mais essenciais, facilitando a compreensão acerca da técnica da impedância eletromecânica, escolhida como sendo plenamente adequada aos objetivos da tese.

O capítulo 3 apresenta um estudo sobre o efeito de mudanças na temperatura sobre os sinais das assinaturas de impedância, assim como a principal técnica de normalização de dados utilizada (EFS por análise de correlação). Uma revisão de trabalhos anteriores relacionados também foi feita, de modo a situar contribuições prévias realizadas e como a

técnica foi incorporada na metodologia que foi desenvolvida. Para ilustrar seu potencial de aplicação, vários estudos de caso foram estudados ao longo desta tese.

No capítulo 4, a primeira contribuição inovadora deste trabalho é representada por um método estatístico para determinação de um valor que possa ser entendido como limiar para discriminação de dano, conforme baseada na teoria de CEP e intervalos de confiança. Como se considera no CEP que as amostras obedecem uma distribuição normal, testes de normalidade foram implementados de modo a garantir que esta hipótese não fosse violada. Aliando-se à técnica de normalização de dados, métodos para determinar valores limiares para discriminação de dano dentro de um nível de confiança aceitável foram estabelecidos, de modo a quantificar o desempenho do SDD na tarefa de detecção de danos.

Em seguida, no capítulo 5, propôs-se um método para realizar o monitoramento de integridade estrutural em tempo real (ou quase real), usando-se o método de determinação do limiar de discriminação em conjunto com as conhecidas curvas S/N para o caso de uma viga sujeita a carregamentos dinâmicos, aqui usada como ilustração da técnica. Pôde-se concluir que o método ISHM permite detectar trincas de fadiga durante seu processo de formação, sem a necessidade de interromper o ensaio dinâmico da estrutura monitorada. Isto permite que a estrutura seja monitorada de forma *online* e em tempo real, incrementando assim as possibilidades de se implementar um sistema robusto para aplicações práticas tanto na indústria como em aplicações veiculares em geral.

Evidentemente todos os trabalhos realizados ao longo desta tese ocorreram em condições de laboratório, de modo que implementações práticas no campo certamente irão requerer maior atenção quanto ao envelope de situações a que a estrutura monitorada estará sujeita. Somente assim será possível definir qual método estatístico será o mais indicado para obter o valor do limiar de discriminação de dano, de modo que seja devidamente adequado para cada situação.

Por se tratar de uma estrutura simples a que foi estudada no capítulo 5 (viga esbelta em balanço), o capítulo 6 trouxe uma aplicação em uma estrutura mais complexa (eixo de uma máquina rotativa). Além disto, no capítulo 6, um algoritmo híbrido de otimização foi proposto para a normalização de dados, usando as técnicas de evolução diferencial (DE) e programação sequencial quadrática (SQP). Os resultados obtidos puderam indicar com certo grau de confiança que a técnica ISHM pode ser implementada em estruturas em operação, desde que seja previsto cuidadoso processamento de sinais, tanto para a eliminação de ruídos de instrumentação, como para o correto tratamento estatístico dos dados.

No capítulo 7, investigou-se a capacidade de um sistema ISHM poder compensar a variação da condição de operação do sistema considerado, além da variação ambiental que

ocorre normalmente ao longo do dia, no local onde a máquina se encontra. Assim, fez-se uma compensação da variação da velocidade de rotação do eixo da máquina rotativa, usando-se um algoritmo híbrido de otimização para a normalização de dados. Sensores de dois tipos foram posicionados ao longo do eixo, tendo em sua construção 3 e 4 pastilhas de PZT conectadas em paralelo, respectivamente. Embora os sensores de 4 pastilhas levaram a ótimos resultados na detecção das falhas consideradas incipientes, os sensores de 3 pastilhas também permitiram obter resultados satisfatórios.

Por fim, no capítulo 8 apresentou-se um comparativo entre a técnica EFS por análise de correlação e a técnica baseada no algoritmo híbrido de otimização, além de propor uma nova técnica baseada na minimização da distância euclidiana entre um ponto e uma curva. Esta última técnica foi acrescentada com o objetivo de superar uma limitação presente nas duas técnicas precedentes, qual seja, a limitação da largura da faixa de frequência usada no processo de monitoramento. Como os deslocamentos dos picos de ressonância das assinaturas de impedância têm uma tendência não linear, torna-se necessário um processo de compensação ponto a ponto, para que se tenha maior eficiência no processo de normalização quando se tem uma ampla faixa de frequência de monitoramento. Um estudo de caso com placas de alumínio aeronáutico (2024-T3) foi apresentado, demonstrando com sucesso o processo de compensação em largura ampla da faixa de frequência (de 20 kHz a 250 kHz).

Cabe ressaltar que vários trabalhos já foram desenvolvidos para a implementação da técnica ISHM em materiais compósitos, dentre os quais pode-se citar (Tsuruta, 2008; Grisso *et al.* 2004, Rocha, 2017). Um artigo científico com a participação do autor desta tese encontra-se em preparação para publicação no momento em que este trabalho está sendo redigido, cujo assunto trata da eficiência na detecção de falhas do método ISHM, usado em conjunto com o método das ondas de Lamb, com vistas à detecção de falhas do tipo impacto. O trabalho inclui técnicas de normalização de dados aplicadas em ambos os métodos de monitoramento (ISHM e ondas de Lamb).

As principais contribuições desta tese podem ser relacionadas:

- Estabelecimento de uma metodologia para determinação do limiar discriminante para sistemas ISHM, utilizando-se de teorias de CEP, intervalos de confiança e testes de normalidade;
- Demonstração de metodologia para uso da técnica ISHM sob a condição de carregamento dinâmico em tempo real, ilustrando o potencial que esta técnica permite em termos de robustez em suas aplicações;

- Proposta de uma técnica de normalização de dados utilizando algoritmos de otimização (DE e SQP) para fins de compensação dos efeitos de variação de temperatura e/ou condições operacionais;
- Desenvolvimento de nova técnica de normalização de dados baseada na minimização da distância euclidiana entre um ponto e uma curva, realizando-se assim compensações pontuais ao longo do espectro de frequências das assinaturas de impedância.

Ao longo da tese, foram publicados os seguintes artigos de periódicos:

- RABELO, D. S.; STEFFEN JR., V.; FINZI NETO, R. M.; LACERDA, H. B. Impedance-based structural Health monitoring and statistical method for threshold-level determination applied to 2024-T3 aluminum panels under varying temperature. **Structural Health Monitoring**, v. 16, n. 4, p. 365-381, 2016. DOI: 10.1177/1475921716671038.
- RABELO, D. S.; TSURUTA, K. M.; OLIVEIRA, D. D.; CAVALINI JR., A. A.; FINZI NETO, R. M.; STEFFEN JR., V. Fault Detection of a Rotating Shaft by using the Electromechanical Impedance Method and a Temperature Compensation Approach. **Journal of Nondestructive Evaluation. Online First**, publicado em 13/03/2017. DOI: 10.1007/s10921-017-0405-9. 2017a.
- RABELO, D. S.; HOBECK, J. D.; INMAN, D. J.; FINZI NETO, R. M.; STEFFEN JR., V. Real-time structural Health monitoring of fatigue crack on aluminum beam using an impedance-based portable device. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures. Online First**, publicado em 15/05/2017. DOI: 10.1177/1045389X17705213. 2017b.

Como perspectivas para trabalhos de continuação, pode-se mencionar:

- Implementação de um modelo estatístico para obter-se curvas de probabilidade de detecção (POD), transformando as amostras de dados dependentes em amostras independentes. Uma proposta genérica para sistemas SHM neste sentido foi proposta por Kabban *et al.*, (2015).
- Ampliação dos estudos para casos de fadiga estrutural, uma vez que neste trabalho concentrou-se nos casos em que os ciclos são de amplitude quase constante. Pode-se sugerir que ciclos de fadiga de amplitude variável seja implementado, buscando assim a detecção de trincas de fadiga que ocorrem em muitas situações práticas. Modelos de mecânica da fratura são igualmente desejáveis para determinar quando a falha deve ocorrer.

- Implementar testes de certificação para aplicação prática. Para isso, recomendações de normas como a MIL-HDBK-1823A são de grande auxílio.
- Desenvolver uma metodologia para avaliar a região mais recomendada de sensoriamento conforme a faixa de frequência utilizada.
- Avaliar o desempenho da última técnica proposta nesta tese (minimização da distância euclidiana) em situações adversas com variação de condições ambientais e/ou operacionais, sobretudo estudando a capacidade de classificação da severidade do dano.
- Finalmente, técnicas de prognóstico de falha devem ser estudadas e agregadas à presente contribuição. Para tanto, aspectos relacionados à vida residual da estrutura devem ser considerados.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADAMS, D. E. **Health Monitoring of Structural Materials and Components: Methods with Applications**. Purdue University, EUA, John Wiley & Sons, Ltd., 2007.
- American Society for Metals (ASM). **Metals Handbook: Failure Analysis and Prevention**. v. 10, 8<sup>a</sup> Ed. Materials Park, OH: ASM, p. 99-125, 1975.
- ANNAMDAS, V. G. M.; SOH, C. K. Application of Electromechanical Impedance Technique for Engineering Structures: Review and Future Issues. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**. v. 21, n. 1, p. 41-59, fev. 2010.
- ATCP Engenharia Física. **Materiais e Dispositivos Piezoelétricos: Fundamentos e Desenvolvimento**. São Carlos, 2004. 17 p. Apostila 3 da fase 1.
- BACHSMID, N.; PENNACCHI, P.; TANZI, E. **Cracked Rotors: A Survey on Static and Dynamic Behavior Including Modeling and Diagnosis**. Springer, Heidelberg, 2010.
- BAPTISTA, F.; VIEIRA, J.; INMAN, D. J. Influence of excitation Signal on Impedance-based Structural Health Monitoring. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**. v. 21, n. 14, p. 1409-1416, nov. 2010.
- BAPTISTA, G. G.; BUDOYA, D. E.; ALMEIDA, V. A. D.; ULSON, J. A. C. An Experimental Study on the Effect of Temperature on Piezoelectric Sensors for Impedance-Based Structural Health Monitoring. **Sensors** v. 14, p. 1208-1227, 2014.
- BASTANI, A.; AMINDAVAR, H.; SHAMSHIRSAZ, M. SEPEHRY, N. Identification of temperature variation and vibration disturbance in impedance-based structural Health monitoring using piezoelectric sensor array method. **Structural Health Monitoring**. v. 11, p. 305-314, 2012.
- BAYDAR, N. e BALL, A. Detection of gear failure via vibration and acoustic signals using wavelet transform. **Mechanical Systems and Signal Processing**. v. 17, p. 787-804, 2003.
- BEATTIE, A. Relatório Técnico da Sandia “**Acoustic Emission Non-Destructive Testing of Structures Using Source Location Techniques**”. Sandia National Laboratories, Albuquerque, New Mexivo, EUA, 2013. SAND2013-7779.
- BENDAT, J. S. e PIERSOL, A. G. **Random data – analysis and measurement procedures**. 4<sup>a</sup> ed., Nova Iorque: John Wiley & Sons, 2000.
- BENTLY, D. E. e HATCH, C. T. **Fundamentals of Rotating Machinery Diagnostics (Design and Manufacturing)**. 1<sup>a</sup> ed. ASME Press, Nova Iorque, 2003.
- BHALLA, S.; NAIDU, A. S. K.; ONG, C. W.; SOH, C. K. Practical Issues in the Implementation of Electromechanical Impedance Technique for NDE. In: **Proceedings of**

**the SPIE International Symposium on Smart Materials, Nano-, and Micro-Smart Systems.** Melbourne, Austrália, 2002.

BHALLA, S.; NAIDU, A. S. K.; SOH, C. K. Influence of Structure-Actuator Interactions and Temperature on Piezoelectric Mechatronic Signatures for NDE. In: **Proceedings ISSS-SPIE 2002 International Conference on Smart Materials Structures and Systems**, 2002, Bangalore, India (paper n. ISSS-SA-502).

BOLLER, C.; STASZEWSKI, W. J. **Health monitoring of aerospace structures:** smart sensor Technologies and signal processing, an introduction to damage prognosis. Munich: John Wiley & Sons, 2004. 266 p.

BORESI, A. P. e SCHMIDT, R. J. **Advanced Mechanics of Materials.** Cap. 16, 6<sup>a</sup> ed. Nova Iorque: John Wiley & Sons, p. 567-573, 2003.

BOULOS, P. e CAMARGO, I. **Geometria Analítica – Um Tratamento Vetorial.** 3<sup>a</sup> ed. São Paulo: Prentice Hall, 2005.

BRANCO, C. A. G. M. **Mecânica dos Materiais.** 2<sup>a</sup> Ed. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 1098p., 1994.

BUDYNAS, R. G. e NISBETT, J. K. **Shigley's Mechanical Engineering Designs.** Capítulo 6-3. 9<sup>a</sup> Ed. Nova Iorque: McGraw-Hill, p. 71-212, 2011.

CAVALINI JR., A. A.; FINZI NETO, R. M.; STEFFEN JR., V. Impedance-based fault detection methodology for rotating machines. **Structural Health Monitoring.** v. 14, n. 3, p. 228-240, 2014.

CAVALINI JR., A. A.; OLIVEIRA, D. D.; RABELO, D. S.; FINZI NETO, R. M.; STEFFEN JR., V. Fault detection in a rotating shaft by using the electromechanical impedance method and a temperature compensation approach. Em: Proc. of the XXXVI Ibero-Latin American Congress on Computational Methods in Engineering, Rio de Janeiro, 2015.

CHAUDHRY, Z.; JOSEPH, T.; SUN, F.; ROGERS, C. Local-Area Health Monitoring of Aircraft via Piezoelectric Actuator/Sensor Patches. In: **Smart Structures and Integrated Systems, SPIE Conference.** 1995. San Diego, CA. Proceedings of SPIE. Vol. 2443.

CHAUDHRY, Z.; LALANDE, F.; GANINO, A.; ROGERS, C. **Monitoring the Integrity of Composite Patch Structural Repair via Piezoelectric Actuators/Sensors.** 1996. AIAA-1996-1074-CP.

CHO, H. e LISSENDEN, C. J. Structural Health monitoring of fatigue crack growth in plate structures with ultrasonic guided waves. **Structural Health Monitoring.** v. 11, n. 4, p. 393-404, 2012.

DARPE, A. K.; GUPTA, K.; CHAWLA, A. Coupled bending, longitudinal and torsional vibrations of a cracked rotor. **Journal of Sound and Vibration.** v. 269, n. 1, p. 33-60, 2004.

DOEBLING, S. W.; FARRAR, C. R.; PRIME, M. R. A summary review of vibration-based damage identification methods. **Shock and Vibration Digest**. v. 30, n. 2, p. 91-105, 1998.

DOT/FAA/AR-MMPDS-01 Relatório Técnico da *Federal Aviation Administration* "Metallic material properties development and standardization". Department of Transportation, FAA, Washington, DC, 2003.

FARRAR, C. R. e WORDEN, K. **Structural Health monitoring: a machine learning perspective**. Chichester: John Wiley & Sons, Ltd., 2012.

FARRAR, C. R.; LIEVEN, N. A. J.; BEMENT, M. T. An introduction do damage prognosis. Em: INMAN, D. J., FARRAR, C. R. LOPES JR., V. et al., (eds.) **Damage Prognosis: For Aerospace, Civil and Mechanical Systems**. Nova Iorque: Wiley, p. 1-12, 2005.

FARRAR, C. R.; WORDEN, K. An introduction to structural Health monitoring. **Philosophical Transactions of Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences**. Londres, v. 365, n. 1851, p.303-315, 2007.

FINZI NETO, R. M.; STEFFEN JR., V.; RADE, D. A.; GALLO, C. A.; PALOMINO, L. V. A Low-cost Electromechanical Impedance-based SHM Architecture for Multiplexed Piezoceramic Actuators. **Structural Health Monitoring**. v. 10, n. 4, p. 391-401, 2011.

FROMME, P. e SAYIR, M. B. Detection of cracks at rivet holes using guided waves. **Ultrasonics**, v. 40, n. 1-8, p. 199-203, 2002.

GIBILISCO, S. **Manual de Eletrônica e de Telecomunicações**. Reichmann e Affonso Editores, Brasil. 2002.

GIURGIUTIU, V. ; ZAGRAI, A. Characterization of Piezoelectric Active Sensors. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**. v. 11, p. 959-976, 2000.

GIURGIUTIU, V.; ZAGRAI, A. BAO, J.J.; REDMOND, J.; ROACH, D.; RACKOW, K. Active Sensors for Health Monitoring of Aging Aerospace Structures. **International Journal of the Condition Monitoring and Diagnostic Engineering Management**. v. 6, n. 1, p. 3-21. 2003.

GIURGIUTIU, V.; ZAGRAI, A. Embedded Self-Sensing Piezoelectric Active Sensors for Online Structural Identification. **Journal of Vibration and Acoustics**. v. 124, p. 1-10. 2002.

GIURGIUTIU, V.; ZAGRAI, A.; BAO, J.J. Piezoelectric Wafer Embedded Active Sensors for Aging Aircraft Structural Health Monitoring. **International Journal of Structural Health Monitoring**. v. 1, p. 41-61. 2002.

GRISSO, B. L.; PEAIRS, D. M.; INMAN, D. J. **Impedance-based Health monitoring of composites**. Em: Proc. of the IMAC-XXII, Dearborn, MI, EUA, 2004.

GRISSO, B.; INMAN, D. J. Temperature Corrected Sensor Diagnostics for Impedance-based SHM. **Journal of Sound and Vibration.** v. 329, n. 12, p. 2323-2336, 2010.

GYEKENYESI, A.; MARTIN, R.; SAWICKI, J. BAAKLINI, G. Memorando Técnico da NASA "Damage Assessment of Aerospace Structural Components by Impedance-Based Health Monitoring". Ohio, EUA, 2005. 13 p. NASA TM-2005-213579.

HONG, D. S.; NGUYEN, K. D.; LEE, I. C.; KIM, J. T. Temperature-compensated damage monitoring by using wireless acceleration-impedance sensor nodes in steel girder connection. **International Journal of Distributed Sensor Networks.** 2012, DOI: 167120:1167120:12.

KABBAN, C. M. S.; GREENWELL, B. M.; DE SIMIO, M. P.; DERRISO, M. M. The probability of detection for structural health monitoring systems: Repeated measures data. **Structural Health Monitoring.** v. 14, n. 3, p. 252-264, 2015.

KEREMAIT, R. C. **A new cepstral approach for prognostic maintenance of cyclic machinery.** Em: Proc. of IEEE Southeastcon, p. 256-262, 1987.

KOO, K.-Y.; PARK, S.; LEE J.-J.; YUN, C.-B. Automated Impedance-based Structural Health Monitoring Incorporating Effective Frequency Shift for Compensating Temperature Effects. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures,** v. 20, n. 4, p. 367-377, 2009.

KRISHNAMURTHY, K.; LALANDE, F.; ROGERD, C. A. **Effects of temperature on the electrical impedance of piezoelectric sensors.** In: Proc. SPIE 2717, Smart Structures and Materials 1996: Smart Structures and Integrated Systems, 203 (mai. 1996); San Diego, CA, EUA. 1996. doi: 10.1117/12.239033.

LAMBERTI, A.; CHIESURA, G.; DE PAUW, B. et al. **Combining embedded Fibre Bragg Grating sensors and modal analysis techniques to monitor fatigue induced propagating delaminations in composite laminates.** Em: Proc. of emerging Technologies in non-destructive testing VI, Londres, 2016.

LIANG, C.; SUN, F. P.; ROGERS, C. A. Coupled Electromechanical Analysis of Adaptative Material Systems – Determination of the Actuator Power Consumption and System Energy Transfer. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures.** 1994, v. 5. p. 12-20.

LIM, H. J.; KIM, M. K.; SOHN, H.; PARK, C. Y. Impedance based damage detection under varying temperature and loading conditions. **NDT&E International,** v. 44, n. 8, p. 740-750, Dez. 2011.

LIU, X.; PAROUBALLY, R. Robust Damage Metric in Terms of Magnitude and Phase for Impedance-based Structural Health Monitoring. **Structural Health Monitoring**, v. 8, n. 4, p. 303-309, mar. 2009.

MA, J. e LI, C. J. **Detection of localized defects in rolling element bearings via composite hypothesis test**. Em: Proc. of the Symposium on Mechatronics, ASME, 1993.

MASSEREY B. e FROMME, P. Fatigue crack growth monitoring using high-frequency guided waves. **Structural Health Monitoring**. v. 12, n. 5-6, p. 484-493, 2013.

MASSOUD, M. **Impedance Methods for Machine Analysis**: Modal Parameters Extraction Techniques. Université de Sherbrooke, Quebec, Canadá, p. 4-14, 1985.

MATWEB. **Material Property data by Automation Creation**, Inc. Disponível em: <http://www.matweb.com> (acessado em 17/07/2016).

MIL-HDBK-1823A:2009. **Nondestructive Evaluation System Reliability Assessment**. Department of Defense Handbook: nondestructive Evaluation System Reliability Assessment, 2009.

MONTGOMERY, D. C.; PECK, E. A.; VINING, G. G. **Introduction to Linear Regression Analysis**. Wiley, Nova Iorque, 2012.

MOURA JR., J. R. V. **Uma Contribuição aos Sistemas de Monitoramento de Integridade Estrutural Aplicada a Estruturas Aeronáuticas e Espaciais**. 2008. 264 f. Tese de Doutorado – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

MOURA JR., J. R. V.; STEFFEN JR., V. **Damage Detection Techniques for Aeronautic Structures**. In: IMAC-XXIII Conference & Exposition on Structural Dynamics, Orlando – Florida, EUA, 2005.

MOURA JR., J. R. V.; STEFFEN JR., V. **Impedance-based Health Monitoring: Frequency Band Evaluation**. XXII IMAC. Dearborn, MI, EUA. 2004.

PALOMINO, L. V. **Análise das Métricas de Dano Associadas à Técnica da Impedância Eletromecânica para o Monitoramento de Integridade Estrutural**. 2008. 117 f. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

PALOMINO, L. V. **Técnicas de Inteligência Artificial aplicadas ao método de Monitoramento de Integridade Estrutural baseado na impedância eletromecânica para monitoramento de danos em estruturas aeronáuticas**. 2014. 175 f. Tese de Doutorado – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

PALOMINO, L. V.; MOURA JR., J. R. V.; TSURUTA, K. M.; et al. Impedance-based Health monitoring and mechanical testing of structures. **Smart Structures and Systems**. v. 7, n. 1, p. 15-25, 2011.

PALOMINO, L. V.; TSURUTA, K. M.; MOURA, J. R. V.; RADE, D. A.; STEFFEN JR., V.; INMAN, D. J. Evaluation of the Influence of Sensor Geometry and Physical Parameters

on Impedance-based Structural Health Monitoring, **Shock and Vibration**. v. 19, p. 1-13, 2012.

PARK, G. CUDNEY, H.; INMAN, D. J. Impedance-Based Health Monitoring Technique for Massive Structures and High-Temperature Structures. In: **Smart Structures and Materials 1999: Sensory Phenomena and Measurement Instrumentation for Smart Structures and Materials**. Proceedings of the SPIE. v. 3670, p. 461-469. 1999b.

PARK, G. KABEYA, K. CUDNEY, H. H.; INMAN, D. J. Impedance-Based Structural Health Monitoring for Temperature Varying Applications. **JSME International Journal**. v. 42, n. 42, p. 249-258. 1999a.

PARK, G.; CUDNEY, H., INMAN, D. J. Impedance-Based Health Monitoring of Civil Structural Components. **ASCE Journal of Infrastructure Systems**. v. 6, n. 4, p. 153-160. 2000a.

PARK, G.; CUDNEY, H.; INMAN, D. J. An Integrated Health Monitoring Technique Using Structural Impedance Sensors. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**. v. 11, n. 6, p. 448-455. 2000b.

PARK, G.; CUDNEY, H.; INMAN, D. J. Feasibility of Using Impedance-Based Damage Assessment for Pipeline Systems. **Earthquake Engineering and Structural Dynamics Journal**. v. 30, n. 10, p. 1463-1474. 2001.

PARK, G.; INMAN, D. J. Impedance-Based Structural Health Monitoring. **Damage Prognosis for Aerospace, Civil and Mechanical System**, Wiley, Cap. 1, pp. 1-12, 2005.

PARK, G.; KABEYA, K.; CUDNEY, H. H.; INMAN, D. J. Overview of Piezoelectric Impedance-based Health Monitoring and Path-Forward. **The Shock and Vibration Digest**. v. 35(6), p. 85-92, 2003.

PARK, S.; LEE J.-J.; YUN, C.-B.; INMAN, D. J. Electro-Mechanical Impedance-Based Wireless Structural Health Monitoring using PCA-Data Compression and  $k$ -means Clustering Algorithms. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**. Mar. 2008. DOI: 10.1177/1045389X11421814.

PEAIRS, D. M. **High Frequency Modeling and Experimental Analysis for Implementation of Impedance-based Structural Health Monitoring**. 2006. 150 f. Tese de Doutorado – Virginia Polytechnic Institute and State University, Virginia, EUA.

RABELO, D. S. STEFFEN JR., V.; FINZI NETO, R. M.; LACERDA, H. B. **A statistical approach for assessing reliability for impedance-based structural Health monitoring using probability of detection**. Em: Proc. of the 10<sup>th</sup> international workshop on structural Health monitoring, Stanford University, Palo Alto, EUA, 2015c.

RABELO, D. S.; FINZI NETO, R. M.; STEFFEN JR., V. **Impedance-based Structural Health Monitoring incorporating compensation of temperature variation**

**effects.** In: COBEM 2015 – 23<sup>rd</sup> ABCM International Congress f Mechanical Engineering, Rio de Janeiro, 2015a.

RABELO, D. S.; GUIMARÃES, C.G.; CAVALINI JR., A. A.; STEFFEN JR., V. **A comparative study of temperature compensation techniques for impedance-based structural Health monitoring systems.** Em: Anais do 1º Workshop em Matemática Industrial, Modelagem e Otimização, Catalão, 2015b.

RABELO, D. S.; HOBECK, J. D.; INMAN, D. J.; FINZI NETO, R. M.; STEFFEN JR., V. Real-time structural Health monitoring of fatigue crack on aluminum beam using an impedance-based portable device. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures.** *Online First*, publicado em 15/05/2017. DOI: 10.1177/1045389X17705213. 2017b.

RABELO, D. S.; STEFFEN JR., V.; FINZI NETO, R. M.; LACERDA, H. B. Impedance-based structural Health monitoring and statistical method for threshold-level determination applied to 2024-T3 aluminum panels under varying temperature. **Structural Health Monitoring**, v. 16, n. 4, p. 365-381, 2016. DOI: 10.1177/1475921716671038.

RABELO, D. S.; TSURUTA, K. M.; OLIVEIRA, D. D.; CAVALINI JR., A. A.; FINZI NETO, R. M.; STEFFEN JR., V. Fault Detection of a Rotating Shaft by using the Electromechanical Impedance Method and a Temperature Compensation Approach. **Journal of Nondestructive Evaluation.** *Online First*, publicado em 13/03/2017. DOI: 10.1007/s10921-017-0405-9. 2017a.

RAGHAVAN, A.; CESNIK, C. E. S. Effects of Elevated Temperature on Guided-Wave Structural Health Monitoring. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures.** v. 19, n. 12, p. 1383-1398, Dez. 2008.

RAJU, V. **Implementing Impedance-Based Health Monitoring.** 1997. 224 f. Dissertação de Mestrado – Virginia Polytechnic Institute and State University, Virginia, EUA.

RANDALL, R. B. **Vibration-Based Condition Monitoring – Industrial, Aerospace and Automotive Applications.** Wiley, Chichester, 2011.

REDDY, R. A. **Applied data analysis and modeling for energy engineers and scientists.** Nova Iorque; Dordrecht; Heidelberg; Londres: Springer, 2011.

ROCHA, L.A.A. **Identificação de dano em estruturas utilizando uma metodologia que integra a técnica da Impedância eletromecânica e as ondas de Lamb.** 2017. 103f. Tese de Doutorado – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

SAAVEDRA, P. N. e CUITIÑO, L. A. Vibration analysis of rotor crack identification. **Journal of Vibration and Control.** v. 8, p. 51-67 (2002).

SEPEHRY, N.; SHAMSHIRSAZ, M.; ABDOLLAHI, F. Temperature Variation Effect Compensation in Impedance-Based Structural Health Monitoring using Neural Networks.

**Journal of Intelligent Material Systems and Structures.** Set. 2011. DOI: 10.1177/1045389X11431814.

SIKORSKA, J. Z. e PAN, J. The effect of waveguide material and shape on acoustic emission transmission characteristics part 1: traditional features. **Journal of Acoustic Emission.** vol. 22, n. 1, p. 274-287, 2004.

SOH, C. K.; TSENG, K.; BHALLA, S.; GUPTA, A. Performance of Smart Piezoceramic Patches in Health Monitoring of a RC Bridge. **Smart Materials and Structures.** v. 9, p. 533-542. 2000.

SOUZA, S. A. **Ensaio mecanicos de materiais metalicos: fundamentos teoricos e praticos** 5<sup>a</sup> ed. São Paulo, Edgar Blücher, 286 p., 2000.

STORN, R. e PRICE, K. Relatório Técnico TR-95-012 “**Differential evolution: a simple and eficiente Adaptative scheme for global optimization over continuous spaces**”, International Computer Science Institute, Berkeley, CA, EUA, 1995.

SUN, F. P.; CHAUDHRY, Z.; LIANG, C.; ROGERS, C. A. Truss Structure Integrity Identification Using PZT Sensor-Actuator. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures.** v. 6, p. 134-139. 1995.

SURESH, S. **Fatigue of Materials**. Cambridge: Cambridge University Press, 1998.

TANG, H.; CHAND, J.; WANG, Y. The principle of cepstrum and its application in quantitative fault diagnosis of gears. ASME Des. Tech. Conf. v. 38, p. 141-144, 1991.

TEIXEIRA, A. S. **Distância mínima entre um ponto e uma curva**. Disponível em <http://elementosdeteixeira.blogspot.com.br/2012/11/085-distancia-minima-entre-um-ponto-e.html>, acessado em 11/07/2017, Publicado em Nov. 2012.

VANDERPLAATS, G. N. **Multidiscipline Design Optimization**. Vanderplaats Research & Development Inc., Colorado, EUA, 2007.

WIDOLLO, A. e YANG, B. S. Support vector machine in machine condition monitoring and fault diagnosis. **Mechanical Systems and Signal Processing.** v. 21, n. 6, p. 2560-2574, 2007.

XU, Y. G.; LIU, G. R. A modified electro-mechanical impedance model for piezoelectric actuator-sensors for debonding detection of composite sensors. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, v. 13, n. 6, p. 389-396, 2002.

YANG, Y.; LIM, Y. Y.; SOH, C. K. Practical issues related to the application of the electromechanical impedance technique in the structural Health monitoring of civil structures: I. Experiment. **Smart Materials and Structures.** v. 17, n. 3, Mar. 2008. doi: 10.1088/09641726/17/3/035008.

YAOSEN, Y.; LIM, Y. Y.; SOH, C. K. Practical issues related to the application of the electromechanical impedance technique in structural Health monitoring of civil structures: I. Experiment. **Smart Material Structures**, v. 17, n. 3, 14 p. (035008), 2008.

YUAN, F.-G., **Structural Health Monitoring (SHM) in Aerospace Structures**. Woodhead Publishing in Composites Science and Engineering, 1<sup>a</sup> Ed., 2016.

ZHOU, D.; KIM, J. K.; HA, D. S.; QUESENBERRY, J. D.; INMAN, D. J. A System Approach for Temperature Dependency of Impedance-Based Structural Health Monitoring. In: **Smart Sensor Phenomena, Technology, Networks, and Systems 2009**, Proceedings of the SPIE v. 7293, 2009. doi: 10.1117/12.816285.