

**LIZETH VARGAS PALOMINO**

**ANÁLISE DAS MÉTRICAS DE DANO ASSOCIADAS À  
TÉCNICA DA IMPEDÂNCIA ELETROMECÂNICA  
PARA O MONITORAMENTO DE INTEGRIDADE  
ESTRUTURAL**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

**2008**

**LIZETH VARGAS PALOMINO**

**ANÁLISE DAS MÉTRICAS DE DANO ASSOCIADAS À TÉCNICA DA  
IMPEDÂNCIA ELETROMECAÂNICA PARA O MONITORAMNETO DE  
INTEGRIDADE ESTRUTURAL**

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

Área de concentração: Mecânica dos sólidos e vibrações.

Orientador: Prof. Dr. Valder Steffen Jr

**UBERLÂNDIA –MG**

**2008**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

---

- P181a Palomino, Lizeth Vargas, 1983-  
Análise das métricas de dano associadas à técnica da impedância eletromecânica para o monitoramento de integridade estrutural / Lizeth Vargas Palomino.- 2008.  
117 f. : il.
- Orientador: Valder Steffen Jr.
- Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.
- Inclui bibliografia.
1. Aeronaves - Teses. 2. Localização de falhas (Engenharia) - Teses. 3. Materiais inteligentes - Teses. I. Steffen Junior, Valder II. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. IV. Título.

---

CDU: 629.73

**LIZETH VARGAS PALOMINO**

**ANÁLISE DAS MÉTRICAS DE DANO ASSOCIADAS À TÉCNICA DA  
IMPEDÂNCIA ELETROMECHANICA PARA O MONITORAMENTO DE  
INTEGRIDADE ESTRUTURAL**

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

Área de concentração: Mecânica dos sólidos e  
vibrações.

Banca Examinadora:

---

Prof. Dr. Valder Steffen Jr – UFU – Orientador

---

Prof. Dr. Milton Dias Jr - UNICAMP

---

Prof. Dr. Cleudmar Araújo - UFU

**Uberlândia, 25 de março de 2008**

*A Nereo, Luz Miryam  
e Rocio.*

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus pela oportunidade e pela força.

À Universidade Federal de Uberlândia e à Faculdade de Engenharia Mecânica pela oportunidade de realizar este curso.

Ao CNPq pelo apoio financeiro na realização desta pesquisa.

A meu orientador Valder Steffen Jr., que contribuiu com este trabalho e com minha formação.

Ao Prof. Cleudmar Araújo pela ajuda nos Ensaios de Fadiga.

A minha querida família Nereo, Luz Miryam e Rocio pelo apoio e carinho incondicional, que mesmo muito distantes, me acompanharam em todas as horas.

À Karina Mayumi Tsuruta e ao José dos Reis Vieira de Moura Jr pela ajuda e contribuições neste trabalho.

Aos colegas do Laboratório LMest pela amizade.

À Raquel, Maisa, Joiciane, Mauro, Lizette e Daniel que se tornaram uma nova família neste novo país.

Palomino, L. V. **Análise das Métricas de Dano associadas à Técnica da Impedância Eletromecânica para Monitoramento de Integridade Estrutural**. 2008. 111 f. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

## RESUMO

O conceito básico da técnica de integridade estrutural baseado na impedância tem a ver com o monitoramento da variação da impedância eletromecânica da estrutura, causada pela presença de dano, através de pastilhas de material piezelétrico coladas na superfície da estrutura ou nela incorporadas. A impedância é medida, sendo esta diretamente relacionada com a impedância mecânica da estrutura. A partir da variação dos sinais de impedância pode-se concluir pela existência ou não de uma falha. Para quantificar esta falha, uma métrica é especialmente definida para atribuir-lhe um valor escalar característico. O objetivo deste trabalho é avaliar as métricas propostas na literatura. Este trabalho pretende inicialmente identificar danos pequenos em estruturas simples, avaliando as métricas de dano e procurando determinar a que apresenta melhor comportamento para fins de identificação. Posteriormente, com um processo similar, procura-se identificar danos incipientes em uma estrutura aeronáutica, tal como a perda de um rebite. Novamente são avaliadas as métricas propostas pela literatura. Para esta estrutura avaliou-se também estatisticamente se as métricas eram realmente capazes de identificar o dano. Aplicou-se ainda o método de monitoramento de integridade estrutural baseado em impedância eletromecânica em ensaios de fadiga, monitorando o sinal de impedância a cada número de ciclos previamente definido. Ao final destes ensaios, foi construído um meta-modelo polinomial para tentar prever número de ciclos que leva ao colapso de um corpo de prova, partindo das medições de impedância eletromecânica. Com os resultados obtidos foi possível concluir que a técnica tem sensibilidade a danos incipientes. Também, pode-se observar que, para cada caso estudado, uma métrica pode ser melhor que as demais, razão pela qual é necessário testar todas as métricas para determinar qual delas é a mais indicada para cada problema. Finalmente, pode-se observar que é possível criar relações entre os ciclos de tensão aplicados em um ensaio de fadiga e as medições de impedância eletromecânica.

---

*Palavras chave: Monitoramento de Integridade Estrutural, Impedância Eletromecânica, Métricas de Dano.*

Palomino, L. V. **Analysis of Damage Metrics associated with the Electromechanical Impedance Technique for Structure Health Monitoring**. 2008. 111 f. M.Sc. Dissertation, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

## ABSTRACT

The basic concept of impedance-based structure health monitoring is the measuring of the variation of the electromechanical impedance of the structure as caused by the presence of damage, by using patches of piezoelectric material bonded on the surface of the structure or embedded in the structure. The measured impedance is directly related to the mechanical impedance of the structure. Based on the variation of the impedance signal, the presence of damage can be determined. In order to quantify damage, a metric is specially defined, which allows to assign a characteristic scalar value to the fault. The objective of this work is to evaluate the various metrics suggested by the literature. Primarily, this work intends to identify small damage in simple structures, evaluating the damage metrics and trying to determine which one shows the best behavior for the purposes of identification. Afterwards, incipient damage in an aeronautical structure, such as the loss of a rivet, is attempted to be identified. Again, the metrics suggested in the literature are evaluated. For this structure, it was statistically evaluated in the perspective of determining if the metrics were actually able to identify the damage. The structure health monitoring method based on the electromechanical impedance was also applied to fatigue tests by monitoring the impedance signal for each previously defined number of cycles. At the end of these tests, a polynomial meta-model was built in order to predict the number of cycles that lead to the collapse of a test sample, based on the measurements of the electromechanical impedance. From the results obtained by this contribution it was possible to conclude that the technique is sensitive to incipient damage. Moreover, it can be observed that, for each analyzed case, one of the metrics is better adjusted than the others. For this reason it is necessary to test all the metrics to determine which one is the most suitable for each problem. Finally, it is observed that it is possible to establish relations between the applied tension cycles in a fatigue test and the measurements of the electromechanical impedance.

---

*Keywords: Structure Health Monitoring, Electromechanical Impedance, Damage Metrics.*



## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1- Modelo eletromecânico do método de integridade estrutural baseado em impedância eletromecânica. ....	15
Figura 2.2 – Impedância em função da frequência.....	17
Figura 2.3- Analisador de impedância HP 4194A.....	18
Figura 2.4- Função DELAY TIME do analisador de impedância HP 4194A.....	19
Figura 3.1- Exemplo da variação da amplitude entre duas medições de impedância para o caso sem dano na estrutura. ....	25
Figura 3.2- Placa de alumínio. ....	28
Figura 3.3- Sinais de impedância medidos na placa sem dano em dias diferentes. ....	28
Figura.3.4- Danos inseridos na placa de alumínio.....	29
Figura 3.5 - Sinais de impedância medidos na estrutura.....	30
Figura 3.6- Comparação entre métricas do dano. ....	32
Figura 3.7- Métricas com pouca sensibilidade em relação aos danos inseridos (massa adicional). ....	32
Figura 3.8 – Métricas sensíveis aos danos inseridos. ....	33
Figura 3.9 – Métricas com maior sensibilidade aos danos inseridos.....	33
Figura 3.10- Separação da fuselagem do avião da Alhoa Airline em 1988.....	34
Figura 3.11- Parte da Fuselagem de um avião.....	35
Figura 3.12 – Distância das pastilhas de PZT à linha de rebites.....	35
Figura 3.13- Sinais de impedância medidos na fuselagem sem dano em dias diferentes. ....	36
Figura.3.14- Dano inserido na fuselagem da aeronave (retirada de um dos rebites)....	37
Figura 3.15 - Sinais de impedância medidos na fuselagem para o PZT1. ....	38
Figura 3.16- Comparação entre métricas de dano para a estrutura aeronáutica para PZT1. ....	40
Figura 3.17- Gráficos dos valores da Métrica CCD agrupados para os estados com e sem dano. ....	42
Figura 3.18- Gráficos dos valores da Métrica ASD agrupados para os estados, com e sem dano. ....	43

Figura 3.19- Gráficos dos valores da métrica M agrupados para os dois estados, com e sem dano. ....	44
Figura 4.1 – Curva hipotética de tensão-deformação de um metal. ....	46
Figura. 4.2 – Forma do corpo de prova para ensaios de tração e fadiga. ....	48
Figura 4.3- Três dos corpos de prova para os ensaios de fadiga. ....	49
Figura 4.4- Corpos de prova no ensaio de tração. ....	50
Figura 4.5- Curvas de Tensão-Deformação para os três corpos de prova. ....	50
Figura 4.6- Ciclos de força aplicados no primeiro ensaio de fadiga. ....	51
Figura 4.7- Ciclo de força aplicado no terceiro e quarto ensaios de fadiga da fase preliminar. ....	52
Figura 4.8- Pastilhas de PZT colados nos corpos de prova dos ensaios de fadiga. ....	53
Figura 4.9- Detalhes da fixação do cabo nos corpos de prova dos ensaios fadiga. ....	53
Figura 4.10-Trinca no corpo de prova 2 no ensaio de fadiga para o método de impedância. ....	54
Figura 4.11- Sinais de impedância (parte real) para a faixa de frequência de 39 kHz a 46kHz para o PZT1. ....	55
Figura 4.12- Sinais de impedância para a faixa de frequência de 39 kHz a 46 kHz para o PZT2. ....	55
Figura 4.13- Métricas de Dano RMSD5 para a faixa de frequência de 39 kHz a 46 kHz. ....	56
Figura 4.14- Métricas de Dano RMSD1 e RMSD3 para a faixa de frequência de 39 kHz a 46 kHz. ....	57
Figura 4.15- Métricas de Dano ASD para a faixa de frequência de 39 kHz a 46 kHz. ..	57
Figura 4.16- Sinais de impedância para a faixa de frequência de 103,5 kHz a 112,5 kHz para o PZT1. ....	58
Figura 4.17- Sinais de impedância para a faixa de frequência de 103,5 kHz a 112,5 kHz para o PZT2. ....	58
Figura 4.18- Métricas de Dano RMSD1 e RMSD3 para o PZT2 na faixa de frequência de 103,5 kHz a 112,5 kHz. ....	59
Figura 4.19- Métrica de Dano RMSD5 para o PZT1 na faixa de frequência de 103,5 kHz a 112,5 kHz. ....	59
Figura 4.20- Métricas de Dano ASD para a faixa de frequência de 103,5 kHz a 112,5 kHz. ....	60
Figura 4.21- Sinais de impedância para a faixa de frequência de 148 kHz a 153 kHz para o PZT1. ....	60

Figura 4.22- Sinais de impedância para a faixa de frequência de 148 kHz a 153 kHz para o PZT2.....	61
Figura 4.23- Métricas de Dano RMSD1 e RMSD3 para o PZT2 na faixa de frequência de 148 kHz a 153 kHz.....	61
Figura 4.24- Métrica de Dano RMSD5 para o PZT1 na faixa de frequência de 148 kHz a 153 kHz.....	62
Figura 4.25- Métricas de Dano ASD para a faixa de frequência de 148 kHz a 153 kHz.....	62
Figura 4.26- Sinais de impedância para a faixa de frequência de 178 kHz a 184,2 kHz para o PZT1.....	63
Figura 4.27- Sinais de impedância para a faixa de frequência de 178 kHz a 184,2 kHz para o PZT2.....	63
Figura 4.28- Métricas de Dano RMSD1 e RMSD3 para o PZT2 na faixa de frequência de 178 kHz a 184,2 kHz.....	64
Figura 4.29 - Métrica de Dano RMSD5 para o PZT1 na faixa de frequência de 178 kHz a 184,2 kHz.....	64
Figura 4.30- Trinca no corpo de prova 3 no ensaio de fadiga para o método de impedância. ....	65
Figura 4.31- Sinais de impedância (parte real) para a faixa de frequência de 40,5 kHz a 49 kHz para o PZT1.....	65
Figura 4.32- Sinais de impedância (parte real) para a faixa de frequência de 40,5 kHz a 49 kHz para o PZT2.....	66
Figura 4.33- Métricas de Dano CCD para a faixa de frequência de 40,5 kHz a 49 kHz.....	66
Figura 4.34- Sinais de impedância para a faixa de frequência de 120 kHz a 125 kHz para o PZT1.....	67
Figura 4.35- Sinais de impedância para a faixa de frequência de 120 kHz a 125 kHz para o PZT2.....	67
Figura 4.36- Teste de normalidade para o número de ciclos. ....	68
Figura 4.37- Teste de normalidade para a métrica de dano ASD PZT1.....	69
Figura 4.38- Teste de normalidade para a métrica de dano ASD PZT2.....	69
Figura 4.39 – Histograma dos Resíduos para a Métrica de dano ASD para PZT1.....	71
Figura 4.40 – Histograma dos Resíduos para a Métrica de dano ASD para PZT2.....	73
Figura 4.41- Gráficos de comparação entre o meta-modelo tipo polinômio de grau seis e o meta-modelo tipo <i>spline</i> para a variável métrica de dano ASD PZT1. ....	75
Figura 4.42- Gráficos de comparação entre o meta-modelo polinômio de grau seis e o meta-modelo <i>spline</i> para a variável métrica de dano ASD PZT2. ....	76

Figura 4.43- Gráficos de comparação entre os polinômios de grau cinco para a métrica de dano ASD para PZT1 e PZT2. ....	77
Figura 4.44- Curva de Polinômio de grau cinco com variável independente Métrica de dano ASD PZT1 .....	78
Figura 4.45- Gráficos do polinômio de grau sete para a variável independente métrica de dano ASD PZT1. ....	78
Figura 4.46- Gráficos de polinômio com as duas variáveis independentes Métrica de dano ASD PZT1 e Métrica de dano ASD PZT2. ....	79
Figura 4.47- Resíduos para os polinômio com duas variáveis independentes: Métricas de dano ASD PZT1 e Métricas de dano ASD PZT2. ....	80

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1- Valores das métricas para cinco medições sem dano na placa de alumínio. ....	29
Tabela 3.2- Valores das métricas para três medições sem dano na fuselagem. ....	37
Tabela 3.3 Valor da métrica CDD para cada uma das medições na pastilha PZT1, na estrutura aeronáutica. ....	41
Tabela 3.4- ANOVA da métrica de dano CCD do PZT1 da estrutura aeronáutica. ....	41
Tabela 3.5 - Valor da métrica ASD para cada uma das medições no PZT1 na estrutura aeronáutica. ....	42
Tabela 3.6- ANOVA da métrica de dano ASD do PZT1 para a estrutura aeronáutica. .	42
Tabela 3.7 - Valor da métrica M para cada uma das medições no PZT1 na estrutura aeronáutica. ....	43
Tabela 3.8- ANOVA da métrica de dano M do PZT1 para a estrutura aeronáutica. ....	44
Tabela 4.1- Dimensões dos corpos de prova para os ensaios tração e fadiga. ....	49
Tabela 4.2- Ensaios de fadiga para os terceiro e quarto corpos de prova da fase preliminar. ....	52
Tabela 4.3- Valor das métricas ASD para cada uma das medições no PZT1. ....	70
Tabela 4.4- ANOVA da métrica de dano ASD do PZT1. ....	71
Tabela 4.5 – Valor das métricas ASD para cada uma das medições no PZT2. ....	72
Tabela 4.6- ANOVA da métrica de dano ASD do PZT1. ....	72
Tabela 4.7- Análise de correlação. ....	73
Tabela 4.8- Análise de STEPWISE para ciclos versus Métrica de dano ASD PZT1 e Métrica de dano ASD PZT2. ....	74
Tabela 4.9 – Destaque da classificação das observações. ....	81
Tabela AI.1 – Gráficos de caixas para as métricas de dano para o corpo de prova 2 para o PZT1 na faixa de frequência de 39 kHz a 46 kHz. ....	93
Tabela AI.2 – Gráficos de caixas para as métricas de dano para corpo de prova 2 para o PZT2 na faixa de frequência de 39 kHz a 46 kHz. ....	94

Tabela AI.3 – Gráficos de caixas para as métricas de dano para corpo de prova 2 para o PZT1 na faixa de frequência de 103,5 kHz a 112,5 kHz.....	95
Tabela AI.4 – Gráficos de caixas para as métricas de dano para corpo de prova 2 para o PZT2 na faixa de frequência de 103,5 kHz a 112,5 kHz.....	97
Tabela AI.5 – Gráficos de caixas para as métricas de dano para corpo de prova 2 para o PZT1 na faixa de frequência de 148 kHz a 153 kHz.....	98
Tabela AI.6 – Gráficos de caixas para as métricas de dano para corpo de prova 2 para o PZT2 na faixa de frequência de 148 kHz a 153 kHz.....	99
Tabela AI.7 – Gráficos de caixas para as métricas de dano para corpo de prova 2 para o PZT1 na faixa de frequência de 178 kHz a 184,2 kHz.....	100
Tabela AI.8 – Gráficos de caixas para as métricas de dano para corpo de prova 2 para o PZT2 na faixa de frequência de 178 kHz a 184,2 kHz.....	102
Tabela AI.9 – Gráficos de caixas para as métricas de dano para corpo de prova 3 para o PZT1 na faixa de frequência de 40,5 kHz a 49 kHz.....	103
Tabela AI.10 – Gráficos de caixas para as métricas de dano para corpo de prova 3 para o PZT2 na faixa de frequência de 40,5 kHz a 49 kHz.....	104
Tabela AI.11 – Gráficos de caixas para as métricas de dano para corpo de prova 3 para o PZT1 na faixa de frequência de 120 kHz a 125 kHz.....	105
Tabela AI.12 – Gráficos de caixas para as métricas de dano para corpo de prova 3 para o PZT2 na faixa de frequência de 120 kHz a 125 kHz.....	107
Tabela AII.1- Classificação de grupos. ....	109
Tabela AII.2- Matriz resumo da classificação. ....	109
Tabela AII.3 – Média para cada grupo.....	109
Tabela AII.4 – Desvio padrão para cada grupo. ....	109
Tabela AII.5 – Matrizes de Covariância para cada grupo.....	110
Tabela AII.6 – Resumo da classificação das Observações.....	110

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANOVA	Análise de Variância.
ASD	Diferença Média Quadrada.
CC	Coefficiente de Correlação.
CCD	Desvio do Coeficiente de Correlação.
END	Ensaio não Destrutivo.
MAPD	Desvio Percentual da Média Absoluta.
PVDF	Fluorido de Polivinilideno.
PZT	Titanato-zirconato de Chumbo.
RMSD	Desvio Médio da Raiz Quadrada.
SHM	Monitoramento de Integridade Estrutural.

## LISTA DE SÍMBOLOS

$a$	Constante Geométrica do PZT
$B$	Largura do corpo de prova
$C$	Capacitância
$C_m$	Flexibilidade Mecânica
$D$	Deslocamento
$E$	Campo elétrico
$d_{ij}$	Modulo Piezelétrico
$F$	Força
$I$	Corrente elétrica
$K$	Rigidez
$L$	Indutância
$L_c$	Comprimento inicial
$L_n$	Comprimento cabeça de fixação
$L_o$	Comprimento da parte útil
$M_m$	Massa Mecânica
$n$	Número Total de Pontos Freqüenciais
$r$	Raio de concordância
$R_m$	Amortecimento mecânico
$R$	Resistência elétrica
$\text{Re}(Z_{1,i})$	Parte Real da Impedância da Medição sem Dano ( <i>Baseline</i> ) em uma Freqüência $i$
$\text{Re}(Z_{2,i})$	Parte Real da Impedância em uma Freqüência $i$ para uma nova Configuração da Estrutura
$\text{Re}(\bar{Z}_1)$	Média da Parte Real da Impedância da Medição sem Dano ( <i>Baseline</i> ) em uma Freqüência $i$
$\text{Re}(\bar{Z}_2)$	Média da Parte Real da Impedância em uma Freqüência $i$ para uma nova Configuração da Estrutura
$R_m$	Amortecimento Mecânico



$S_{Z_1}$	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 do Sinal de Referência
$th$	Espessura do PZT
$v$	Velocidade
$V$	Voltagem
$X$	Reatância
$X_c$	Reatância Capacitiva
$X_L$	Reatância Indutiva
$Y$	Admitância Elétrica
$\hat{Y}_{xx}^E$	Módulo de Young Complexo do PZT com Campo Elétrico Nulo
$Z_a$	Impedância Mecânica do PZT
$Z_m$	Impedância Mecânica
$Z_s$	Impedância Mecânica da Estrutura
$\varepsilon$	Deformação
$\bar{\varepsilon}_{33}^T$	Constante Dielétrica com Deformação Nula
$\sigma$	Tensão
$\delta$	Fator de Perda Dielétrica do PZT
$\omega$	Freqüência

# SUMARIO

<b>CAPÍTULO I-INTRODUÇÃO</b> .....	1
<b>1.1. Ensaaios Não Destrutivos</b> .....	1
1.1.1. <i>Inspeção Visual</i> .....	2
1.1.2. <i>Testes Radiográficos</i> .....	3
1.1.3. <i>Ensaaios por Ultra-som</i> .....	3
1.1.4. <i>Técnica das Ondas de Lamb</i> .....	4
1.1.5. <i>Líquidos Penetrantes</i> .....	5
1.1.6. <i>Medições de Propriedades Dinâmicas</i> .....	5
1.1.7. <i>Partículas Magnéticas</i> .....	6
1.1.8. <i>Método de Monitoramento de Danos Baseado na Impedância Eletromecânica</i> ...	6
<b>1.2. Objetivo da Dissertação</b> .....	6
<b>1.3. Estrutura da Dissertação</b> .....	7
<b>CAPÍTULO II-MONITORAMENTO DE INTEGRIDADE ESTRUTURAL BASEADO NA IMPEDÂNCIA ELETROMENCÂNICA</b> .....	9
<b>2.1. Introdução</b> .....	9
<b>2.2. Conceitos de Impedância Elétrica e Mecânica</b> .....	9
2.2.1. <i>Impedância Mecânica</i> .....	9
2.2.2. <i>Impedância Elétrica</i> .....	11
<b>2.3. Materiais Piezelétricos</b> .....	12
<b>2.4. Método de Integridade Estrutural Baseado em Impedância Eletromecânica</b> .....	14
2.4.1. <i>Medições de impedância eletromecânica</i> .....	18
2.4.2. <i>Comparações do Método da Impedância com Outras Técnicas de END</i> .....	20
<b>CAPÍTULO III-MÉTRICA DE DANO PARA O MÉTODO DE IMPEDÂNCIA ELETROMECÂNICA</b> .....	23
<b>3.1. Introdução</b> .....	23
<b>3.2. Métricas de Dano</b> .....	23
<b>3.3. Avaliação das Métricas</b> .....	27
<b>3.4 Estudo de Caso</b> .....	34
3.4.1. <i>Teste de Hipóteses para o Ensaio na Estrutura Aeronáutica</i> .....	40

<b>CAPÍTULO IV-MÉTODO DE MONITORAMENTO DE INTEGRIDADE ESTRUTURAL</b>	
<b>BASEADO NA IMPEDÂNCIA ELETROMECÂNICA EM ENSAIOS DE FADIGA</b> .....	45
<b>4.1. Introdução</b> .....	45
<b>4.2. Ensaios de Fadiga</b> .....	45
4.2.1 <i>Corpos de Prova</i> .....	48
4.2.2 <i>Ensaios de Tração</i> .....	50
4.2.3 <i>Ensaios de Fadiga</i> .....	51
4.2.4 <i>Ensaios de Fadiga Aplicando o Método de Monitoramento Integridade Estrutural Baseado na Impedância Eletromecânica</i> .....	53
<b>4.3 Modelo Estocástico da Fadiga</b> .....	68
4.3.1 <i>Avaliação da Distribuição Normal das Variáveis</i> .....	68
4.3.2 <i>Teste de Hipóteses para as duas Pastilhas PZT</i> .....	70
4.3.3 <i>Análise de Correlação</i> .....	73
4.3.4 <i>Análise por STEPWISE</i> .....	74
4.3.5 <i>Meta-modelo de Regressão</i> .....	75
4.3.6 <i>Análise de Discriminantes</i> .....	80
<b>CAPÍTULO V-CONCLUSÃO E PERSPECTIVAS PARA TRABALHOS FUTUROS</b> .....	83
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	87
<b>Anexo I-MÉTRICAS DE DANO PARA ENSAIOS DE FADIGA</b> .....	93
<b>Anexo II-ANÁLISE DE DISCRIMINANTES</b> .....	109

# CAPÍTULO I

## INTRODUÇÃO

Danos que ocorrem normalmente nos equipamentos industriais e nas estruturas em geral podem estar associados a diferentes fatores, tais como o atrito, fadiga, impacto, concentração de tensão, crescimento de trinca, dentre outras razões. Para um adequado funcionamento 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 para o sistema considerado.

O monitoramento de integridade estrutural (SHM - *structural health monitoring*) é o processo de detecção de dano dentro do contexto de aplicações voltadas para várias áreas da engenharia, tais como, aeroespacial, civil e mecânica, principalmente. Uma das finalidades mais importantes é prever e aumentar a vida útil de um sistema de engenharia. Desta forma, a criação ou aperfeiçoamento de técnicas que aumentem a precisão, robustez e confiabilidade dos processos de monitoramento são altamente desejáveis, sendo objeto de vários estudos tanto no meio industrial quanto no meio acadêmico (FARRAR; LIEVEN; BEMENT, 2005). Dessa forma, deseja-se aumentar a segurança e a confiabilidade das estruturas, além de reduzir custos operacionais e de manutenção. A essência do SHM é desenvolver sistemas auto-suficientes para monitoramento contínuo, inspeção e detecção de danos nas estruturas, exigindo-se o mínimo de intervenção humana.

### 1.1. Ensaio Não Destrutivos

Os métodos de avaliação de integridade estrutural, geralmente denominados como Ensaio Não Destrutivos (END), são caracterizados por manter, após a realização do ensaio de avaliação, as mesmas características da estrutura determinadas anteriormente ao ensaio

(BRAY; McBRIDE, 1992). Na área de projetos, geralmente estas técnicas são empregadas no diagnóstico e monitoramento de danos estruturais. A capacidade de avaliação de danos pode-se aplicar de duas formas: (1) monitorar as mudanças de sua condição e, se necessário, interromper a operação do equipamento antes que tais condições se deteriore; e (2) garantir que o dano iniciado não se estenda para uma situação de risco (FURTADO, 2004).

Deve-se salientar que técnicas destrutivas aplicadas na manutenção de máquinas ou equipamentos podem ser tão precisas ou até melhores que as técnicas não destrutivas para avaliação de integridade estrutural, mas, devido à necessidade de substituição de componentes a cada avaliação, as técnicas não destrutivas obviamente não são as mais indicadas em muitas aplicações.

Em alguns casos, uma parada do equipamento se faz necessária para a aplicação de uma das técnicas não destrutivas, porém sem que haja necessidade obrigatória da substituição de componentes após a avaliação (BRAY; McBRIDE, 1992). Por causa deste procedimento, ocorreu naturalmente um aumento na confiabilidade e segurança do processo, uma vez que os próprios componentes em uso passaram a ser avaliados. Com a expansão da tecnologia, tornou-se importante a criação de sistemas de engenharia cujos projetos têm que prever a futura necessidade de utilização de técnicas não destrutivas para monitorar em funcionamento (BRAY; McBRIDE, 1992).

### *1.1.1. Inspeção Visual*

A inspeção visual, um dos primeiros testes não destrutivos, é a prática mais utilizada e foi responsável pela criação de vários procedimentos óticos disponíveis. Os métodos de inspeção visual têm uma ampla variedade de aplicações. Geralmente, estes ensaios são aplicados para auxiliar na decisão de onde será aplicada uma outra técnica de avaliação não destrutiva. Os resultados assim obtidos são quase instantâneos e podem ser armazenados em filmes ou relatórios que descrevam o item observado. Talvez o aspecto mais importante é que o inspetor deve ficar atento a sinais que possam esconder características que conduzam a uma futura falha (BRAY; McBRIDE, 1992). Evidentemente, o sucesso na utilização desta técnica, onde cabível, depende fortemente da experiência do inspetor. As principais vantagens desta técnica são a simplicidade e a velocidade de aplicação, além de ser acessível e econômica. Já a principal desvantagem da inspeção visual é que os resultados são válidos apenas para as condições superficiais. Além disso, a técnica exige que a superfície seja previamente preparada, através de ações como limpeza, remoção de tinta, graxa, etc. Casos que exigem grande trabalho de desmontagem para permitir a inspeção visual naturalmente exigem maior tempo de execução.

### *1.1.2. Testes Radiográficos*

Uma imagem radiográfica é basicamente uma sombra bidimensional projetada ou uma distribuição de diferentes intensidades de raios-X que atravessam o objeto em avaliação. Assim, o objeto é capaz de atenuar tal tipo de radiação de acordo com a massa, tipo e tamanho da falha. Então, a projeção mostrada será uma distribuição de radiação que varia de acordo com o defeito. A radiação resultante da análise pode ser visualizada num filme fotográfico, em telas fluorescentes, ou em imagens digitalizadas apresentadas em monitores de TV ou de computadores. Os comprimentos de onda dos raios-X são muito curtos, além de poderem ser utilizados para investigar não intrusivamente a estrutura que pode ser de material metálico ou não metálico, com uma ampla variação da dimensão da espessura. A geração dos raios-X é feita arremessando elétrons a velocidades elevadas sobre um alvo metálico, geralmente de tungstênio incorporado ao cobre, para sistemas de identificação de falhas. (BRAY; McBRIDE, 1992).

Como vantagem da radiografia sobre as outras técnicas não destrutivas inclui-se a capacidade de verificar visualmente a descontinuidade de materiais sólidos. Peças de geometrias complexas que seriam difíceis de serem submetidas ao método por ultra-som, podem facilmente serem submetidos ao processo de radiografia, desde que acessíveis dos dois lados da peça. Com o equipamento adequado é possível fazer avaliações em tempo real, a partir de diferentes ângulos, permitindo uma visualização tridimensional, através de montagens usando tecnologia de tomografia computacional (BRAY; McBRIDE, 1992).

Existem, entretanto, algumas desvantagens, tais como a necessidade de acesso aos lados opostos da estrutura a ser avaliada e a necessidade das fissuras estarem quase paralelas ao feixe de raio-X para se ter uma boa definição da falha. Enquanto os vazios nas peças são óbvios para qualquer observador, descontinuidades marginais são de observação complexa e necessitam de um profissional com ampla experiência. O processo é caro, além de não ser imediata a coleta dos dados, com ainda alguma perda de tempo para a correta avaliação dos resultados. As delaminações, encontradas nos materiais compostos, são na maioria das vezes não verificáveis através desta técnica. Finalmente, é bom lembrar que algumas estruturas, por causa da emissão de radiações, impedem o uso deste procedimento. (BRAY; McBRIDE, 1992).

### *1.1.3. Ensaio por Ultra-som*

Os ensaios por ultra-som são caracterizados por uma técnica de avaliação não destrutiva que utiliza ondas ultra-sônicas de alta frequência, superiores aos da audição humana, sendo que a frequência mínima é de 20.000 Hz. Frequências maiores que  $10^9$  Hz já foram geradas, no entanto os equipamentos normalmente usados para caracterizar falhas

operam na faixa entre  $10^6$  a  $10^7$  Hz. As frequências superiores a  $5 \times 10^7$  Hz são utilizadas para a investigação das propriedades dos materiais. Esta técnica é amplamente utilizada e tem um custo de aplicação relativamente baixo. Sua principal dificuldade é a necessidade de um profissional qualificado que seja capaz de calibrar o equipamento e que possa analisar os resultados de forma correta. (BRAY; McBRIDE, 1992).

Algumas vantagens desta técnica têm a ver com a identificação visual de descontinuidades internas em materiais opacos, descrição das características da falha interna (tal como suas dimensões), e visualização tridimensional em tempo real. Além disso, abriga uma grande variedade de condições de teste que se adaptam facilmente ao problema em estudo, capacidade de detecção de falhas em materiais metálicos ou não e, em alguns casos, somente uma superfície é necessária para efetuar os testes (BRAY; McBRIDE, 1992).

No entanto, algumas desvantagens também surgem, tais como: o equipamento gerador de imagens é de custo elevado, exigindo um investimento inicial importante, além de ser um instrumento complexo. A técnica é de aplicação difícil em peças com formas complexas. Em alguns casos, exige-se  $360^\circ$  de acesso à peça, além de pessoal bem qualificado para realização dos ensaios e para sua posterior avaliação (BRAY; McBRIDE, 1992).

#### *1.1.4. Técnica das Ondas de Lamb*

A técnica permite detectar, principalmente, possíveis defeitos presentes em estruturas esbeltas. As ondas de Lamb podem viajar por uma longa distância, até mesmo em materiais com uma taxa de atenuação elevada, como os compostos de fibra de carbono. Além disso, elas possuem uma alta suscetibilidade de interferência no caminho de propagação, como por exemplo, um dano. Sendo assim, essas ondas possibilitam que a área de análise seja rapidamente examinada. A espessura de uma estrutura pode também ser examinada por vários modos de propagação (simétrico e assimétrico) das ondas de Lamb, podendo assim detectar tanto falhas internas como superficiais (RAGHAVAN; CESNIK, 2005).

O método de ondas de Lamb possui as seguintes características: (1) capacidade de verificar grandes estruturas, (2) capacidade de verificar a estrutura de uma área seccionada, (3) monitoramento em projetos complicados ou de alto custo, além de examinar estruturas em movimento, (4) boa sensibilidade a múltiplos defeitos com alta precisão de identificação, e (5) baixo consumo de energia.

Para a extração de características, podendo associar as falhas aos sinais adquiridos, existem duas abordagens relatadas na literatura. A primeira tem a ver com a modelagem

física do fenômeno (RAGHAVAN; CESNIK, 2005) e, a segunda, se concentra na modelagem dos dados (LEMISTRE et al., 1999).

Algumas aplicações desta técnica em ensaios não destrutivos têm sido relatadas na literatura (MOURA, 2008).

#### *1.1.5. Líquidos Penetrantes*

O ensaio por líquidos penetrantes presta-se a detectar descontinuidades superficiais que sejam abertas na superfície, tais como trincas, poros, dobras, etc., podendo ser aplicado em todos os materiais sólidos que não sejam porosos ou com superfície muito grosseira. É muito usado em materiais não magnéticos como alumínio, magnésio, aços inoxidáveis austeníticos, ligas de titânio e zircônio, além dos materiais magnéticos. É também aplicado em cerâmica vitrificada, vidros e plásticos.

O método consiste em fazer penetrar na abertura da descontinuidade um líquido de características especiais. Após a remoção do excesso de líquido da superfície, faz-se sair da descontinuidade o líquido retido através de um revelador. A imagem da descontinuidade fica então desenhada sobre a superfície. Pode-se descrever o método em seis etapas principais no ensaio, quais sejam: a) Preparação da superfície - Limpeza inicial; b) Aplicação do Penetrante; c) Remoção do excesso de penetrante; d) Revelação; e) Avaliação e Inspeção; f) Limpeza após o ensaio (BRAY; McBRIDE, 1992).

As principais vantagens do método são a sua simplicidade de aplicação e de interpretação dos resultados. Não há limitação para o tamanho e forma das peças a ensaiar, nem para o tipo de material e o método pode revelar descontinuidades (trincas) incipientes (da ordem de 0,001 mm de abertura). Algumas de suas desvantagens são: só detecta descontinuidades abertas na superfície; a superfície do material não pode ser porosa ou absorvente já que não haveria possibilidade de remover totalmente o excesso de penetrante; a aplicação do líquido deve ser feita numa determinada faixa de temperatura permitida ou recomendada pelo fabricante dos produtos, pois superfícies muito frias (abaixo de 5 °C ) ou muito quentes (acima de 52 °C) não são recomendáveis para os ensaios.

#### *1.1.6. Medições de Propriedades Dinâmicas*

Algumas técnicas de identificação de propriedades dinâmicas podem ser empregadas para avaliação não destrutiva de sistemas estruturais. Estes testes são feitos aplicando-se uma vibração forçada na estrutura em questão, sendo observadas as respostas dinâmicas do sistema. Geralmente são observadas duas características neste processo: as frequências naturais do sistema e a taxa de atenuação ou o amortecimento da estrutura. Estas respostas podem então ser avaliadas com algum critério para identificação de falhas (BRAY;



McBRIDE, 1992). De uma forma geral, pode-se dizer que as medições de propriedades dinâmicas permitem identificar parâmetros do sistema e alterações mais significativas destes parâmetros. A influência de falhas incipientes dificilmente seriam detectáveis por técnicas de análise modal.

#### *1.1.7. Partículas Magnéticas*

O ensaio por partículas magnéticas é utilizado na localização de descontinuidades superficiais e sub-superficiais em materiais ferromagnéticos. Pode ser aplicado tanto em peças acabadas quanto semi-acabadas e durante as etapas de fabricação.

O processo consiste em submeter a peça, ou parte desta, a um campo magnético. Na região magnetizada da peça, as descontinuidades existentes, ou seja, a falta de continuidade das propriedades magnéticas do material cria um campo de fuga do fluxo magnético. Com a aplicação das partículas ferromagnéticas, ocorrerá uma aglomeração destas partículas nos campos de fuga, uma vez que serão por eles atraídas, devido ao surgimento de pólos magnéticos. A aglomeração indicará o contorno do campo de fuga, fornecendo a visualização do formato e da extensão da descontinuidade (BRAY; McBRIDE, 1992).

#### *1.1.8. Método de Monitoramento de Danos Baseado na Impedância Eletromecânica*

O conceito básico da técnica de integridade estrutural baseado na impedância tem a ver com o monitoramento da variação da impedância eletromecânica da estrutura, causada pela presença de dano, usando pastilhas de material piezelétrico coladas na superfície da estrutura ou nela incorporadas. Nestas pastilhas é medida a impedância, que está diretamente relacionada com a impedância mecânica da estrutura. A partir da variação dos sinais de impedância pode-se concluir pela presença ou não de uma falha, considerando como hipótese a manutenção da integridade estrutural da pastilha de material piezelétrico.

Este método de SHM é o tema central desta dissertação, pelo que, no capítulo 2, se apresenta um estudo detalhado do mesmo.

## **1.2. Objetivo da Dissertação**

Para quantificar os danos detectados pela técnica de monitoramento estrutural baseado em impedância eletromecânica, uma métrica é especialmente definida para atribuir valores escalares característicos aos danos. Evidentemente, diferentes métricas apresentam comportamento distinto dependendo da configuração do dano. Neste sentido, o objetivo

deste trabalho é apresentar um estudo das diferentes métricas propostas na literatura, avaliando-as em medições de danos incipientes, para três casos diferentes: um primeiro caso é definido pela simples adição de massa em uma placa de alumínio; o segundo caso é dado pela perda de um rebite na fuselagem de uma estrutura aeronáutica e, finalmente, são aplicadas as métricas de dano em ensaios de fadiga para determinar se o método consegue detectar trincas geradas nos ensaios.

Ainda como objetivo deste trabalho foram utilizadas técnicas de meta-modelagem estatística em dois dos casos considerados acima. Primeiramente, tais técnicas, especialmente a análise de variância, foram usadas para verificar a validade do diagnóstico da estrutura aeronáutica à vista da perda de um dos rebites. Em seguida, foram usados meta-modelos para avaliar a possibilidade de se prever a vida útil de uma estrutura submetida a excitações dinâmicas a partir da obtenção da métrica de dano. Para tanto, as métricas de dano foram determinadas para vários intervalos regulares de ciclos.

### **1.3. Estrutura da Dissertação**

No capítulo 1 é feita uma introdução do tema Monitoramento de Integridade Estrutural e são apresentados, de forma geral, vários dos métodos não destrutivos encontrados na literatura.

No capítulo 2 são abordados os conceitos fundamentais do Método de Integridade Estrutural Baseado na impedância eletromecânica. Neste sentido, é realizada uma revisão bibliográfica do estado da arte desta técnica.

O capítulo 3 visita inicialmente as diferentes métricas utilizadas na literatura pelo método de integridade estrutural baseado na impedância eletromecânica, procurando identificar suas características mais importantes, à vista das aplicações realizadas. Em seguida, são avaliadas estas métricas efetuando ensaios em uma placa de alumínio. Mais à frente, é apresentado um estudo de caso onde se aplicam as métricas em um caso real, ou seja, em um componente estrutural de fuselagem de uma aeronave, onde se produz um dano através da remoção de um dos rebites de fixação. Ao final do capítulo, apresenta-se um teste de hipótese (NETO; SCARMINIO; BRUNS, 2003) para determinar estatisticamente se as métricas apresentam sensibilidade ao dano inserido na estrutura aeronáutica.

No capítulo 4 o método de impedância eletromecânica é aplicado em ensaios de fadiga, usando corpos de prova de alumínio. Neste capítulo se apresenta o desenvolvimento dos ensaios, e, no final, apresenta-se um meta-modelo com o fim de associar as métricas de dano medidas com o número de ciclos usado nos ensaios.

O capítulo 5 encerra o trabalho, apresentando as principais idéias e conclusões obtidas. São também apresentadas as perspectivas futuras para este campo de pesquisa.

## CAPÍTULO II

### MONITORAMENTO DE INTEGRIDADE ESTRUTURAL BASEADO NA IMPEDÂNCIA ELETROMECÂNICA

#### 2.1. Introdução

Neste capítulo apresentam-se os fundamentos teóricos do método de monitoramento estrutural baseado na impedância eletromecânica. Inicialmente foram estudadas as definições de Impedância Mecânica e Impedância Elétrica para, em seguida, apresentar um resumo dos materiais piezelétricos. Como última parte deste capítulo apresenta-se uma revisão bibliografia do estado da arte do método de monitoramento de integridade estrutural baseado na impedância eletromecânica.

#### 2.2. Conceitos de Impedância Elétrica e Mecânica

##### 2.2.1. Impedância Mecânica

A impedância mecânica de um ponto de uma estrutura é a razão entre a força aplicada neste ponto e a velocidade resultante medida no mesmo ponto, Eq. (2.1) (MASSOUD, 1985).

$$Z_m = \frac{F}{v}, \quad (2.1)$$

sendo  $Z_m$  a impedância mecânica,  $F$  Força e  $v$  a velocidade. A impedância mecânica é uma quantidade complexa e expressa quanto a estrutura resiste ao movimento quando se aplica uma força, sendo o recíproco da mobilidade (ou admitância mecânica). A impedância

mecânica de uma estrutura varia com a frequência. Nos sistemas mecânicos serão manipuladas três grandezas básicas relacionados com a impedância mecânica:

- Amortecimento Mecânico ( $R_m$ ): está associada 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).

$$F(t) = R_m v(t) . \quad (2.2)$$

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

- 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).

$$F(t) = M_m \frac{dv(t)}{dt} . \quad (2.3)$$

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 a rigidez como o inverso da flexibilidade mecânica, Eq. (2.5).

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

### 2.2.2. Impedância Elétrica

É denominada como impedância elétrica a oposição que um circuito ou componente elétrico oferece à passagem da corrente alternada, Eq (2.6)

$$Z = \frac{V}{I}, \quad (2.6)$$

sendo  $Z$  a impedância elétrica,  $V$  a voltagem e  $I$  a corrente.

Trata-se de uma grandeza complexa, e, portanto, dividida em duas partes: resistência (parte real) e reatância elétrica (parte imaginária). A resistência nos circuitos de corrente alternada se comporta de maneira similar nos circuitos de corrente contínua e é 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 ( $R$ ) é um valor escalar, ou seja, é representada em uma escala unidimensional. Assim, para um circuito de corrente contínua, a corrente diminui conforme a resistência aumenta, obedecendo a conhecida Lei de Ohm. O mesmo comportamento é observado num circuito de corrente alternada. Já para uma indutância ou capacitância, a situação não é tão simples quanto para a resistência elétrica (GIBILISCO, 2002).

Reatância elétrica ( $X$ ) é a oposição oferecida à passagem da corrente alternada, podendo apresentar-se tanto na forma indutiva como capacitiva em um circuito elétrico. Constitui-se então numa componente da impedância de um circuito que não está associada a uma resistência pura. Quando a Reatância é menor que zero, a reatância é capacitiva ( $X_c$ ) e o seu valor em ohms é dado pela Eq.(2.7):

$$X_c = \frac{1}{2\pi\omega C}, \quad (2.7)$$

onde  $C$  é a capacitância dada em Farad.

Por outro lado, quando a Reatância é maior que zero, a reatância é indutiva ( $X_L$ ) e o seu valor em ohms é dado pela Eq.(2.8):

$$X_L = 2\pi\omega L, \quad (2.8)$$

onde  $L$  é a Indutância expressa em Henries.

Finalmente, quando a reatância é igual a zero a impedância é igual à resistência ôhmica e o circuito é dito como sendo puramente resistivo.

### 2.3. Materiais Piezelétricos

Os materiais que apresentam a propriedade de mudar suas dimensões em consequência da aplicação de uma voltagem são chamados de materiais piezelétricos (efeito direto). Tais materiais também apresentam o chamado efeito inverso, ou seja, ao ser aplicada uma deformação mecânica, resulta uma mudança em suas propriedades elétricas. Conseqüentemente, tais materiais podem ser usados como atuadores, como sensores, ou mesmo como sensores e atuadores ao mesmo tempo. O material piezelétrico mais conhecido é o titanato-zirconato de chumbo, cuja sigla PZT vem do inglês *lead-zirconate-titanate*.

Os sensores e atuadores piezelétricos são obtidos pela polarização do material que, submetido a campos elétricos elevados a altas temperaturas, acima da temperatura de Curie, adquire as características piezelétricas (BANKS; SMITH; WANG, 1996). Quando o material piezelétrico é usado numa temperatura inferior à temperatura de Curie e se lhe aplica um pequeno campo elétrico, observa-se uma expansão macroscópica ao longo do eixo de polarização e uma contração perpendicular a esta. Deve-se salientar que, se o material piezelétrico for exposto a temperaturas superiores à de Curie, ele perde suas propriedades piezelétricas.

A relação entre o campo aplicado e a deformação resultante é quantificada pelo módulo piezelétrico  $d_{ij}$ , onde  $i$  é a direção do campo elétrico aplicado e  $j$  é a direção resultante da deformação normal, como mostra a Eq. (2.9)

$$\varepsilon_{jj} = d_{ij} \frac{V}{th}, \quad (2.9)$$

sendo  $V$  a voltagem aplicada na direção  $i$  e  $th$  a espessura do PZT.

Conforme anteriormente comentado, a temperatura de trabalho do PZT é abaixo da temperatura de Curie. Se ao PZT é aplicado um campo elétrico com uma temperatura acima da temperatura de Curie, os dipolos voltam a ter direções aleatórias. Em temperaturas muito baixas também pode ocorrer que, ao aplicar um campo elétrico, os dipolos se desalinhem, comprometendo as propriedades do material.

As pastilhas de PZT têm temperaturas de Curie acima de 300 °C e não são de fácil polarização, exceto em altas temperaturas. Os materiais piezelétricos mais flexíveis (por exemplo, o PVDF - Fluorido de Polivinilideno) têm temperaturas de Curie abaixo de 200 °C e são mais fáceis de serem polarizados.

Utilizando o formalismo termodinâmico proposto por Devonshire (1954) citado por Bank, Smith e Wang (1996), é possível encontrar as relações constitutivas como procedentes da energia total do sistema, ou seja, compreender as relações fenomenológicas dos efeitos piezelétricos diretos e inversos. Entretanto, embora a resposta a aplicações estruturais típicas seja muito próxima da linear, ao se trabalhar com níveis de excitação elevados os elementos piezelétricos revelam um efeito de histerese (não linear). Desta forma, os trabalhos que geralmente são desenvolvidos utilizando estes elementos, são restritos às leis lineares formuladas por Voigt em 1910 (BANKS; SMITH; WANG, 1996), conforme podem ser observadas pelas Eqs. (2.10) e (2.11) que representam os efeitos direto e inverso respectivamente.

$$D_m = \varepsilon_{mn}^T E_n + d_{mkl} \sigma_{kl}, \quad (2.10)$$

$$e_{ij} = s_{ijkl} \sigma_{kl} + d_{mij} E_m, \quad (2.11)$$

nas quais  $D$  e  $E$  representam, respectivamente, o deslocamento e o campo elétrico,  $\varepsilon$  e  $d$  representam o tensor dielétrico do material e o tensor de tensão piezoelétrica, enquanto a deformação no material  $e$  é relacionada à tensão  $\sigma$  através da complacência  $s$ . Os índices subscritos decorrem da notação indicial.

É importante ressaltar que é utilizado o efeito direto do dispositivo ao utilizá-lo como sensor, já que o efeito inverso é responsável pela descrição do dispositivo como atuador. Assim, é possível perceber a capacidade destes materiais para aplicações de controle e detecção de danos, através de um único componente, além de sua insensibilidade a variações de temperatura (abaixo da temperatura de Curie).

Diversos tipos de materiais exibem propriedades piezelétricas. Dentre os mais utilizados, pode-se citar:

- Cerâmicas piezelétricas, em particular as cerâmicas de PZT, por se tratar de um material cerâmico, sua rigidez é geralmente superior ao da estrutura na qual ele está inserido, resultando numa conversão eletromecânica de grande eficiência, tornando-os eficientes em aplicações como atuadores (BANKS; SMITH; WANG, 1996). Sua aplicação em controle vem sendo muito explorada por ser o PZT efetivo em grandes faixas de



freqüências. O PZT é ainda recomendado como atuador auto-sensível, particularmente no controle e identificação de falhas (BANKS; SMITH; WANG, 1996).

- Polímeros piezelétricos, como o PVDF (Fluorido de Polivinilideno), cujo uso como atuador não é adequado, uma vez que seus coeficientes de acoplamento eletromecânico são bem menores do que os das pastilhas de PZT. Em contrapartida, o potencial dielétrico dos PVDFs é cerca de vinte vezes superior ao dos PZTs, podendo ser expostos a campos elétricos muito maiores (BANKS; SMITH; WANG, 1996). Estes são utilizados comumente como sensores, lembrando ainda que seu custo é bem inferior ao do observado para as pastilhas de PZT.

Algumas vantagens dos elementos piezelétricos podem ser verificadas, tais como: relativa insensibilidade a temperaturas, respostas lineares em baixos níveis de excitação, baixo peso e grande flexibilidade como sensores e atuadores, além de exibirem uma resposta em ampla banda de freqüência. Algumas possíveis desvantagens destes elementos são a histerese observada para campos elétricos elevados, a dificuldade de fabricação dos PZTs devido a suas características de material cerâmico, coeficientes de acoplamento eletromecânico baixos para os filmes de PVDF e, por fim, o decréscimo das características de polarização dos elementos piezelétricos ao longo do tempo, reduzindo assim seu desempenho.

#### **2.4. Método de Integridade Estrutural Baseado em Impedância Eletromecânica**

A técnica de monitoramento da integridade da estrutura baseado em impedância eletromecânica utiliza a propriedade piezelétrica dos materiais, formando um método de avaliação não destrutivo (PARK *et al*, 2003). O conceito básico desta técnica é o monitoramento da variação da impedância mecânica da estrutura causada pela presença de danos. Como a medição direta da impedância mecânica da estrutura é uma tarefa difícil, o método utiliza materiais piezelétricos colados ou incorporados à estrutura, permitindo medir a impedância elétrica. Esta se relaciona com a impedância mecânica da estrutura, que é afetada pela presença do dano. Evidentemente, considera-se que o material piezelétrico utilizado como sensor da impedância elétrica permanece íntegro durante o ensaio.

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) e Moura(2008) .

O método de monitoramento da integridade da estrutura utiliza sensores de impedância para monitorar as mudanças na rigidez, amortecimento e massa da estrutura. O sensor de impedância consiste em um pequena pastilha piezolétrica, usualmente menor que 25x25x0.1mm, que é usada para medir diretamente a resposta dinâmica local.

Como visto anteriormente, os materiais piezolétricos atuam diretamente produzindo uma mudança na voltagem elétrica quando sofrem uma deformação mecânica. Inversamente, uma deformação mecânica é produzida quando é aplicado um campo elétrico. O método de monitoramento baseado em impedância utiliza simultaneamente ambas as versões, direta e inversa, do efeito piezolétrico para obter medições de impedância (PARK *et al*, 2003).

Quando o PZT é colado na estrutura e é aplicada uma diferença de potencial elétrico muito baixa, geralmente de 1V (RAJU,1997), uma deformação é produzida na pastilha de PZT e na interface de sua união com a estrutura. Usando uma freqüência de excitação muito alta (do ponto de vista dos ensaios típicos de análise modal), a resposta dinâmica da estrutura representa somente a área local do sensor. A resposta mecânica da vibração da área onde se encontra a pastilha de PZT é transmitida ao sensor na forma de uma resposta elétrica. Quando uma falha mecânica causa mudanças na resposta dinâmica (dada pelo sinal de impedância), isto se manifesta na resposta elétrica do PZT.

O modelo eletromecânico que quantifica e descreve o processo de medição é visto na Fig.2.1 para um sistema de 1 grau de liberdade.

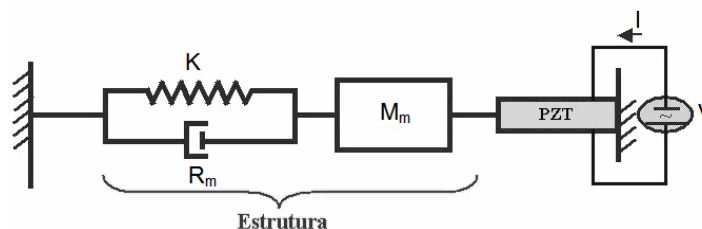


Figura 2.1- Modelo eletromecânico do método de integridade estrutural baseado em impedância eletromecânica.

A partir deste sistema, Liang; Sun; Rogers(1994) demonstraram que a admitância  $Y(\omega)$  do atuador PZT pode ser escrita como uma função combinada da impedância mecânica do atuador PZT,  $Z_a(\omega)$ , e da estrutura,  $Z(\omega)$ , assim como mostra a Eq. (2.12):

$$Y(\omega) = i\omega a \left( \bar{\epsilon}_{33}^T (1 - i\delta) - \frac{Z_s(\omega)}{Z_s(\omega) + Z_a(\omega)} d_{3x}^2 \hat{Y}_{xx}^E \right), \quad (2.12)$$

onde:

$Y$  é a admitância elétrica.

$Z_a$  é a impedância mecânica do PZT

$Z_s$  é a impedância mecânica da estrutura

$\hat{Y}_{xx}^E$  é o modulo complexo de Young do PZT com campo elétrico nulo.

$d_{3x}$  é a constante de acoplamento do PZT em uma direção x com deformação nula.

$\bar{\epsilon}_{33}^T$  é a constante dielétrica com deformação nula.

$\delta$  é o fator de perda dielétrica do PZT.

$a$  é uma constante geométrica do PZT.

Supondo que as propriedades mecânicas do PZT não variem ao longo do tempo utilizado para monitoramento, a Eq. (2.12) 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.

Deve ser notado que a admitância elétrica é basicamente capacitiva, mostrando que a parte imaginária é o termo dominante. Este termo imaginário é mais sensível à variação de temperatura do que a parte real. Desta forma, a parte real do sinal é geralmente utilizada na maioria das aplicações (RAJU, 1997). Trabalhos mais recentes, entretanto, usam tanto a parte real como a parte imaginária do sinal para fins de monitoramento (PEAIRS, 2006).

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 nas propriedades 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. Segundo a literatura, a faixa de frequência tipicamente usada no método de impedância é de 30kHz a 250kHz. Tal faixa é determinada geralmente por um método de tentativa e erro. Entretanto, Moura e Steffen (2004) apresentam 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 contêm de 20 a 30 picos são geralmente as escolhidas, pois o número de picos implica uma resposta dinâmica mais rica ao longo da faixa de frequência. Como exemplo, pode-se observar a Fig.2.2, onde se apresenta a resposta dinâmica na faixa de frequência entre 10kHz e 250kHz medida em uma viga de alumínio. Destacam-se duas faixas onde maior número de picos é verificado (10 kHz a 45 kHz e 100 kHz a 175 kHz).

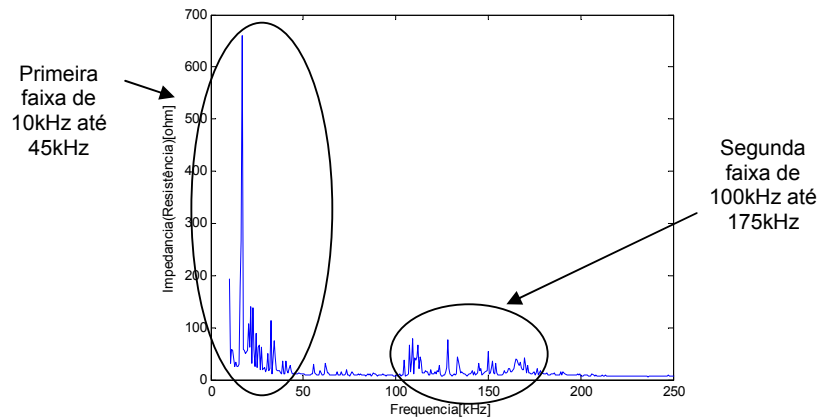


Figura 2.2 – Impedância em função da frequência.

Uma faixa em torno de uma frequência elevada (150kHz) é favorável para detectar a localização, já numa faixa mais baixa, em torno de (70kHz), detecta-se apenas as áreas onde se encontram os danos, Sun *et al* (1995). As medições da impedância elétrica não podem confundir os dois tipos de picos que aparecem no espectro de frequência: 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*, 2003).

Enquanto a maior parte dos trabalhos tem utilizado a parte real da impedância ou da admitância, Bhalla; Naidu; Soh (2002) introduzem o conceito de assinatura “ativa”, já que é possível utilizar a componente interativa direta do sinal após filtrar a componente “inerte”. Como são conhecidas as propriedades do material PZT, pode-se reescrever a Eq. (2.12) na forma da Eq. (2.13).

$$Y = i\omega a \bar{\epsilon}_{33}^T - i\omega a \frac{Z_s(\omega)}{Z_s(\omega) + Z_a(\omega)} d_{3x}^2 \hat{Y}_{xx}^E = Y_p + Y_A, \quad (2.13)$$

onde o termo  $Y_P$  (Eq.(2.14)) denota a parte passiva da admitância (representa a contribuição do PZT) e o termo  $Y_A$  (Eq.(2.15)) representa a parte ativa (interação PZT-estrutura).

$$Y_P = i\omega a \bar{\epsilon}_{33}^T, \quad (2.14)$$

$$Y_A = -i\omega a \frac{Z_s(\omega)}{Z_s(\omega) + Z_a(\omega)} d_{3x}^2 \hat{Y}_{xx}^E, \quad (2.15)$$

Como o termo passivo ainda apresenta a parte real do sinal e o termo ativo contém a parte imaginária, basta isolar o termo ativo da soma da Eq. (2.12) para trabalhar tanto com a parte imaginária quanto com a parte real para identificação de falhas, mantendo assim toda a informação das condições da estrutura (PARK *et al*, 2003).

Quanto à região sensível para identificação de mudanças, Park *et al* (2003) afirmam que, para um simples PZT, o mesmo pode identificar uma falha localizada a uma distância (radial) de até 0,4 m em estruturas de materiais compostos e de até 2 metros em estruturas de barra constituída de um único metal.

#### 2.4.1. Medições de impedância eletromecânica

Os sinais de impedância geralmente são obtidos através de um analisador de impedância. No caso do *Laboratório de Mecânica de Estruturas Professor José Eduardo Tannús Reis*, da FEMEC/UFU, tem-se o analisador de impedância HP 4194A (Fig 2.3) que possui onze funções de medição de impedância e cobre uma faixa de frequência de 100Hz até 40MHz.



Figura 2.3- Analisador de impedância HP 4194A.

Os níveis de saída são de 10mV até 1Vrms. Segundo o manual do equipamento, mais de 401 pontos podem ser selecionados para aplicações especiais. As medições básicas têm precisão de 0,17% para medir impedância. Outros parâmetros devem ser ajustados. O tempo de integração (INTEG TIME) é usado para selecionar o tempo de integração digital, que pode ser SHORT, MED ou LONGO. Os dois últimos são selecionadas para minimizar os ruídos no sinal. SHORT é o ajuste usado inicialmente. O tempo de integração pode ser alterado a qualquer momento, inclusive durante uma medição. Outro parâmetro a configurar é a média (AVERAGING), que é usada para alterar o número de medições por ponto, sendo que o valor de *default* é 1. Esta média é usada para eliminar os efeitos de ruído no sinal. É mais adequado selecionar valores pequenos para esta média em aplicações onde o teste tem que ser feito em tempo real. Assim, quando são selecionados valores pequenos o tempo de resposta é muito mais rápido do que quando se selecionam valores maiores. Para um sinal final de boa qualidade, pode-se selecionar o valor de 256, ou seja, o maior valor disponível para ajuste. Outro parâmetro que pode ser alterado no analisador de impedância é o DELAY TIME; com ele pode-se estabelecer um tempo de excitação antes de efetuar a medição propriamente dita. Segundo a Fig. 2.4, este pode assumir valores de 0 a 3600 segundos.

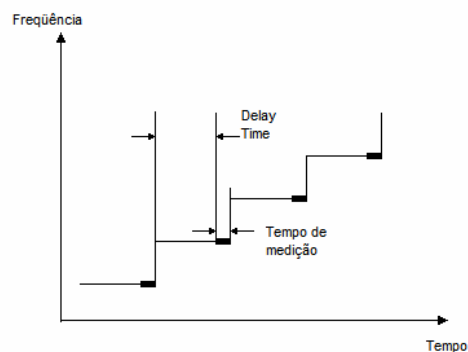


Figura 2.4- Função DELAY TIME do analisador de impedância HP 4194A.

Os dados adquiridos pelo analisador de impedância são transferidos para um computador pessoal para posterior análise e avaliação. Algumas desvantagens deste procedimento é que o equipamento de medição não é portátil, além de ser de custo muito elevado. Outro aspecto importante é que apenas poucos recursos do mesmo são utilizados nos ensaios de impedância eletromecânica. Assim, como alternativa, Peairs; Inman; Park (2007) desenvolveram um circuito equivalente para medição da impedância, reduzindo o custo do equipamento de cerca de U\$40,000.00 para um circuito simplificado de apenas U\$10.00.

Entretanto, este dispositivo necessita ser acoplado a um analisador de sinais digitais com FFT (transformada rápida de Fourier) embarcada, porém este é um equipamento comum em laboratórios de pesquisa na área de dinâmica. Um dispositivo semelhante, denominado Medidor de impedância Alternativo, foi desenvolvido na UNESP-Ilha Solteira (TEBALDI, 2003).

O gráfico da resposta de impedância apresenta uma avaliação qualitativa do dano. Para se ter uma avaliação quantitativa do dano se usa uma métrica de dano, que nada mais é do que um valor numérico capaz de representar a curva de impedância. Este tema será tratado em detalhe no próximo capítulo.

#### 2.4.2. Comparações do Método da Impedância com Outras Técnicas de END

Algumas comparações entre o método de avaliação da integridade estrutural baseado em impedância com outras técnicas de avaliação não destrutivas podem ser encontradas em Park *et al* (2000a) e Giurgiutiu *et al* (2002).

O método baseado em impedância percebe as variações nas propriedades estruturais observando as respostas dinâmicas das estruturas tal como nos métodos de análise modal, para os quais diferentes formas de identificação e localização das falhas tenham sido propostas (PARK *et al*, 2003). A maior diferença entre tais técnicas e aquela considerada nesta dissertação se encontra na faixa de frequência usada para detectar as mudanças da integridade da estrutura. É importante salientar que, dependendo do modelo global de baixa ordem, uma frequência baixa não é suficientemente sensível a uma falha em seu estado inicial. Porém, as altas frequências são sensíveis a mudanças na integridade da estrutura, o que justifica o procedimento adotado na técnica da impedância eletromecânica.

Como o método utiliza somente um elemento piezolétrico que combina características tanto de atuador como de sensor, considera-se que o método é mais prático que a tradicional combinação acelerômetro-shaker utilizada pelos métodos baseados nos sinais de vibração (PARK *et al*, 2003).

Algumas das outras técnicas não destrutivas descritas no capítulo anterior mostraram que possuem a capacidade de identificar pequenas falhas, mas são necessários conhecimentos específicos para interpretação dos dados, já que requerem instrumentos bastante complexos. Além disto, a maioria requer que a avaliação seja realizada durante paradas do equipamento, prejudicando ou impossibilitando a realização do procedimento em tempo real (PARK *et al*, 2003).

No ensaio por ultra-som de componentes estruturais, um transdutor piezolétrico é usado para produzir uma onda acústica. Com base no tempo de atraso da transmissão da onda, alterações no comprimento (deformação) e na densidade do componente estudado

podem ser determinados. Este método, entretanto, não se presta para uso autônomo, tal como o método de impedância. Além disso, técnicos experientes são necessários para avaliar os dados dos ensaios de ultra-som para discernir o possível dano (PARK; INMAN, 2005).

O método de emissão acústica usa as ondas elásticas geradas por danos incipientes. Este método é geralmente usado nas mesmas aplicações que o método de impedância. Ambos os métodos são ideais para monitorar partes críticas da estrutura. Deve-se lembrar, entretanto, que o método da Emissão Acústica requer uma fonte de potência que produza emissão acústica, enquanto a técnica da impedância é baseada simplesmente no conceito de sensor-atuador (DOSCH; INMAN; GARCIA, 1992).

Para o método do ensaio por impacto, um pulso de tensão é introduzido na estrutura a partir de um impacto, sendo as ondas de tensão resultante medidas e analisadas por um transdutor. O pulso se propaga pela estrutura e é refletido devido a trincas encontradas na estrutura. O método precisa também de uma fonte externa de excitação, e não é sensível a pequenas trincas (incipientes) na estrutura (PARK; INMAN, 2005).

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

As principais vantagens do método de impedância em comparação com outros métodos são:

- A técnica não é baseada em nenhum modelo, e pode ser usada em estruturas complexas.
- A técnica usa pequenos atuadores para monitorar locais de difícil acesso.
- A técnica é sensível a mudanças pequenas na estrutura.
- As medições são de fácil interpretação.
- A técnica pode ser utilizada on-line, não impondo paradas no equipamento em avaliação.

Algumas desvantagens do método de impedância em comparação com outros métodos são relacionadas aos tipos de sensores-atuadores disponíveis. Em alguns casos, a área de influência do sensor pode não ser capaz de detectar a falha. Deve salientar, entretanto, que esta pequena limitação vem sendo superada pelas novas gerações de sensores e pela otimização da distribuição espacial dos mesmos na estrutura. Um exemplo de superação de limitações anteriores é o do MFC (micro fiber composite) que é capaz de acomodar-se a curvaturas de componentes estruturais por ser mais flexível que o PZT.



## CAPÍTULO III

### MÉTRICA DE DANO PARA O MÉTODO DE IMPEDÂNCIA ELETROMECAÂNICA

#### 3.1. Introdução

Este capítulo apresenta um estudo das diferentes métricas de dano propostas na literatura para quantificar os danos presentes nas estruturas submetidas ao método de monitoramento de integridade estrutural baseado na impedância eletromecânica. Entre estas métricas, destacam-se: o desvio médio da raiz quadrada, com suas variantes; o desvio do coeficiente de correlação; a diferença média quadrada; o desvio porcentual da média absoluta; a diferença quadrada entre os sinais. Ao final deste capítulo as métricas são avaliadas para determinar quais delas têm maior sensibilidade às mudanças na estrutura.

#### 3.2. Métricas de Dano

As altas freqüências utilizadas pelo método de impedância tornam difícil prever a medição exata da impedância do sensor-atuador piezelétrico. Muitos fatores dificultam uma modelagem típica da impedância que seja válida para as faixas de freqüência usadas pelo método. Os sinais medidos podem ter variações associadas ao meio ambiente e não propriamente devido a um dano. Assim, é conveniente utilizar técnicas estatísticas para avaliar a medida da impedância, o que é conseguido através das chamadas métricas de dano.

Para se poder estabelecer uma metodologia capaz de quantificar as alterações estruturais estudadas, deve-se estabelecer uma referência para a métrica de dano, correspondente à estrutura sem falha. Assim, podem ser realizadas comparações envolvendo os valores da métrica para a estrutura com e sem dano. Estas comparações são capazes de apontar se ou não existe dano na estrutura. Ou seja, o objetivo geral da métrica

de dano é quantificar a diferença entre medições da impedância quando comparadas com os dados obtidos para a estrutura sem dano (ou *baseline*).

O modelo estatístico mais utilizado na literatura é o desvio médio da raiz quadrada, sendo sua definição formal descrita pela Eq.(3.1)

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

onde  $\operatorname{Re}(Z_{1,i})$  é a parte real da impedância da medição sem dano (*baseline*) 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 dentro de uma faixa de frequência previamente definida. Como uma primeira alternativa para esta métrica, propõe-se substituir o denominador pela parte real da impedância da referência (estrutura sem dano) (GRISSE,2004, PEAIRS,2006)

$$RMSD1 = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left( \frac{(\operatorname{Re}(Z_{1,i}) - \operatorname{Re}(Z_{2,i}))^2}{\operatorname{Re}(Z_{1,i})^2} \right)}. \quad (3.2)$$

Para efeito de nomenclatura, o desvio médio da raiz quadrada definido pela Eq.(3.2) é denominado RMSD1. Neste caso, o nível da medição de impedância não afeta qualitativamente a métrica, embora o resultado obtido seja alterado com o número de pontos tomados na comparação.

Outra definição do desvio médio da raiz quadrada, RMSD2, é descrita por Giurgiutiu e Rogers (1998). Nela, Eq.(3.3), pode-se observar que a somatória é feita independentemente no numerador e no denominador.

$$RMSD2 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\operatorname{Re}(Z_{1,i}) - \operatorname{Re}(Z_{2,i}))^2}{\sum_{i=1}^n \operatorname{Re}(Z_{1,i})^2}}}. \quad (3.3)$$

A métrica descrita pela Eq.(3.3) foi utilizada em outros trabalhos onde se faziam comparações entre diferentes métricas (TSENG e NAIDU, 2002; GIURGIUTIU e ZAGRAI, 2005).

Mais uma possibilidade para utilizar o desvio médio da raiz quadrada, RMSD3, é oferecida por Park et al. (2003)

$$RMSD3 = \sum_{i=1}^n \sqrt{\frac{(\text{Re}(Z_{1,i}) - \text{Re}(Z_{2,i}))^2}{\text{Re}(Z_{1,i})^2}}. \quad (3.4)$$

Na Eq.(3.4) a somatória está fora da raiz, diferentemente das definições anteriormente apresentadas.

Peairs (2006) apresenta ainda uma outra modificação no desvio médio da raiz quadrada, RMSD4, conforme mostrada na equação a seguir:

$$RMSD4 = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left( \frac{((\text{Re}(Z_{1,i}) - \text{Re}(\bar{Z}_1)) - (\text{Re}(Z_{2,i}) - \text{Re}(\bar{Z}_2)))^2}{n} \right)}, \quad (3.5)$$

onde  $\text{Re}(\bar{Z}_1)$  e  $\text{Re}(\bar{Z}_2)$  são as médias das medições para as duas condições analisadas. Estas médias foram incluídas na Eq.(3.5) para tirar o efeito das pequenas variações sobre o valor da métrica, resultado de mudanças na temperatura ou possíveis resistências elétricas dos cabos de conexão do sensor ao analisador de impedância, como se pode observar na Fig. 3.1, onde são ilustradas medições feitas em uma viga de alumínio mantendo as mesmas condições (sem dano).

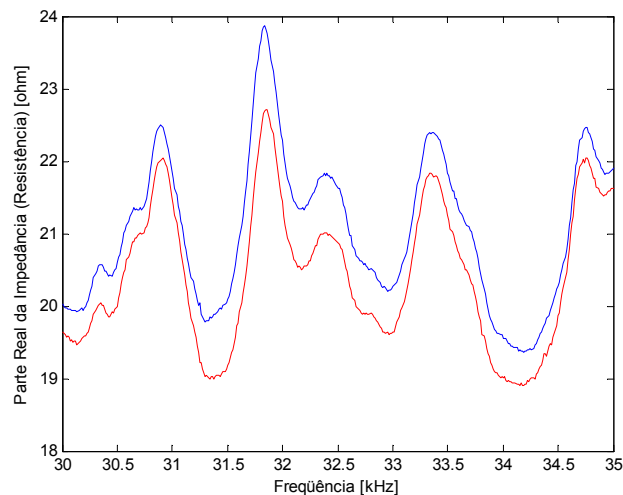


Figura 3.1- Exemplo da variação da amplitude entre duas medições de impedância para o caso sem dano na estrutura.

As variações mostradas na Fig.3.1 são bastante freqüentes, pelo que, para se determinar a referência (*baseline*), ou seja, a medição para a estrutura sem dano, se usa uma média de várias medições feitas com a estrutura em estado saudável. Com esta média e o desvio padrão calculado para cada ponto, Peairs (2006) apresenta a Eq.(3.6) como uma nova definição do desvio médio da raiz quadrada

$$RMSD5 = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left( \frac{\left( \frac{\text{Re}(\bar{Z}_{1,i}) - \text{Re}(Z_{2,i})}{S_{Z_{1,i}}} \right)^2}{n} \right)}, \quad (3.6)$$

onde se inclui o desvio padrão de cada ponto do sinal de referência,  $S_{Z_{1,i}}$ , com o fim de tornar a métrica pouco sensível a mudanças no sinal de impedância devidas a alterações no meio ambiente (e não associados propriamente a algum dano).

Com a Eq.(3.6) concluiu-se a apresentação das definições encontradas na literatura envolvendo o cálculo da métrica de dano baseado no desvio médio da raiz quadrada.

Já a métrica de dano referente ao desvio do coeficiente de correlação é usada para interpretar e quantificar a informação contida em dois conjuntos de dados. A formulação matemática, Eq. (3.7), envolve a diferença entre um e o coeficiente de correlação entre uma medição e a referência (GIURGIUTIU;ZAGRAI,2005).

$$CCD = 1 - CC, \quad (3.7)$$

onde  $CCD$  é o desvio do coeficiente de correlação e  $CC$  é o coeficiente de correlação dado pela Eq (3.8)

$$CC = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(\text{Re}(Z_{1,i}) - \text{Re}(\bar{Z}_1))(\text{Re}(Z_{2,i}) - \text{Re}(\bar{Z}_2))}{S_{Z_1} S_{Z_2}}, \quad (3.8)$$

sendo que  $S_{Z_1}$  é o desvio padrão do sinal de impedância da referência e  $S_{Z_2}$  é o desvio padrão do sinal de impedância a ser comparado. 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  $CC$ . O valor de  $CC$  é utilizado também para comparar e quantificar sinais de admitância (NAIDU;SOH,2003).

A diferença média quadrada é outra das métricas utilizadas pelo método da impedância eletromecânica para quantificar o dano (RAJU,1997), sendo sua formulação matemática apresentada pela Eq.(3.9)

$$ASD = \sum_{i=1}^n [\text{Re}(Z_{1,i}) - (\text{Re}(Z_{2,i}) - \delta)]^2, \quad (3.9)$$

onde  $\delta$  é a diferença das médias de cada um dos sinais, como mostra a Eq.(3.10)

$$\delta = \text{Re}(\bar{Z}_1) - \text{Re}(\bar{Z}_2). \quad (3.10)$$

Com o uso desta métrica de dano, também busca-se tirar o efeito das variações da amplitude devidas a mudanças no meio ambiente.

Ainda outra métrica utilizada pelo método da impedância eletromecânica é o desvio percentual da média absoluta (TSENG e NAIDU, 2002)

$$MAPD = \sum_{i=1}^n \left| \frac{\text{Re}(Z_{1,i}) - \text{Re}(Z_{2,i})}{\text{Re}(Z_{1,i})} \right|. \quad (3.11)$$

Observa-se que o MAPD, Eq.(3.11), é similar ao desvio médio da raiz quadrada definida por RMSD3, pois ambos avaliam as diferenças dos sinais em cada ponto dos dados da medição.

Como última métrica apresentada neste trabalho tem-se a simples somatória da diferença média entre os sinais (PEAIRS,2002). Esta métrica de dano não utiliza nenhuma relação entre valores, sendo implementada como mostra a Eq.(3.12)

$$M = \sum_{i=1}^n (\text{Re}(Z_{1,i}) - \text{Re}(Z_{2,i}))^2. \quad (3.12)$$

### 3.3. Avaliação das Métricas

Para a avaliação das métricas realizou-se um experimento em condições de laboratório. Para tal fim, foi utilizada uma placa de alumínio de 344x180x1mm. Nela foi colado um PZT de 20x20x0,1mm, como ilustra a Fig.3.2(b). As condições de contorno da placa foram as de livre-livre, Figura 3.2(a), sendo o peso da peça igual a 173,2g.



(a) Placa suspensa na condição livre-livre



(b) Dimensões da placa e do PZT

Figura 3.2- Placa de alumínio.

Com o analisador de impedância HP4194A, foi feita a aquisição dos sinais de impedância do PZT para cada uma das condições da estrutura (com e sem dano). Para o estado sem dano foram feitas cinco medições em dias diferentes para se observar o comportamento dos sinais e a estabilidade das métricas. A faixa de frequência utilizada para os ensaios foi de 49kHz até 59kHz com 1 volt de voltagem máxima de excitação. A cada dia foram tomadas seis medições e na Fig.3.3 pode-se ver o sinal médio obtido para cada dia.

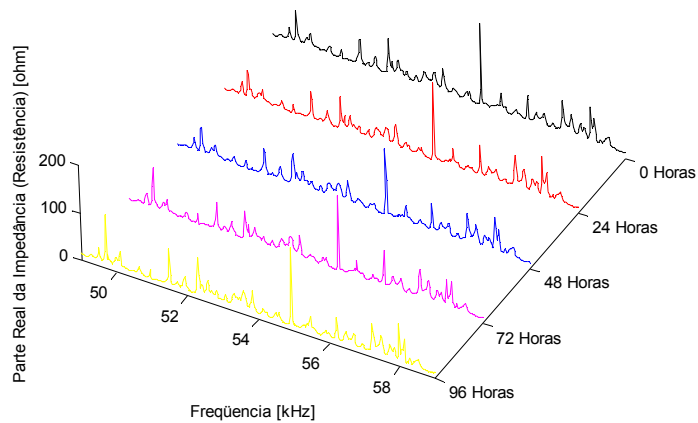


Figura 3.3- Sinais de impedância medidos na placa sem dano em dias diferentes.

Na Fig.3.3 pode-se verificar que o sinal de impedância não tem maiores variações em sua forma, embora ao aplicar as métricas, os valores correspondentes a cada dia apresentem diferenças. Nenhuma métrica teve o mesmo valor em dias distintos, como se

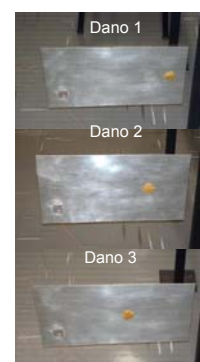
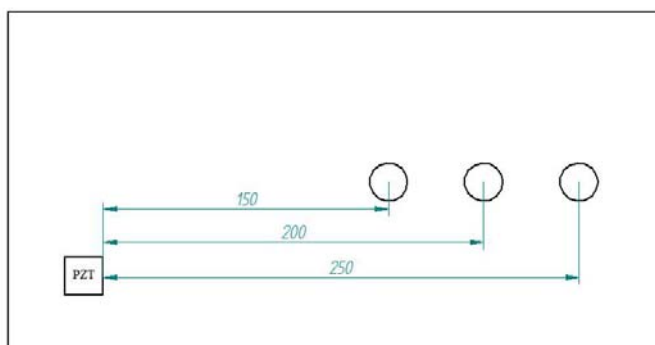
pode observar na tabela 3.1, onde as métricas obtidas para cada dia considerado são mostradas.

Tabela 3.1- Valores das métricas para cinco medições sem dano na placa de alumínio.

	0 Horas	24 Horas	48 Horas	72 Horas	96 Horas
<b>RMSD</b>	6,695	8,140	9,064	9,143	7,358
<b>RMSD1</b>	2,095	3,060	3,347	3,953	2,650
<b>RMSD2</b>	0,247	0,301	0,335	0,338	0,272
<b>RMSD3</b>	22,644	38,128	41,508	46,216	32,107
<b>RMSD4</b>	6,698	8,221	9,120	9,147	7,360
<b>RMSD5</b>	0,005	0,007	0,012	0,012	0,013
<b>CCD</b>	0,129	0,185	0,192	0,211	0,131
<b>ASD</b>	134,036	162,247	181,130	183,068	147,336
<b>MAPD</b>	22,644	38,128	41,508	46,216	32,107
<b>M</b>	23.326,000	32.100,000	34.350,000	34.049,000	21.772,000

Pode-se observar nestes dados que o valor do desvio médio da raiz quadrada, RMSD3, é exatamente igual ao valor do desvio percentual médio absoluto, MAPD (ver Tab.3.1). Também se pode observar que as escalas das métricas são diferentes, o que torna difícil qualquer comparação.

Com o fim de se analisar a sensibilidade das métricas foram simulados danos incipientes na placa. Para tal fim foi adicionada uma massa de cera de abelha de 1,7g (1% do peso total da estrutura) inicialmente a 250 milímetros do PZT, posteriormente a 200 e a 150 milímetros, como mostra a Fig.3.4(a) e (b).



(a) Distância dos danos(em mm) em relação ao PZT

(b) Placa com danos diferentes

Figura.3.4- Danos inseridos na placa de alumínio.

Na Fig.3.5 se apresentam os sinais médios da parte real da impedância eletromecânica em função da frequência, medidos para cada estado da placa, ou seja, o sinal para a estrutura saudável e os sinais correspondendo a cada um dos danos simulados. Pode-se observar a variação dos sinais para cada estado.

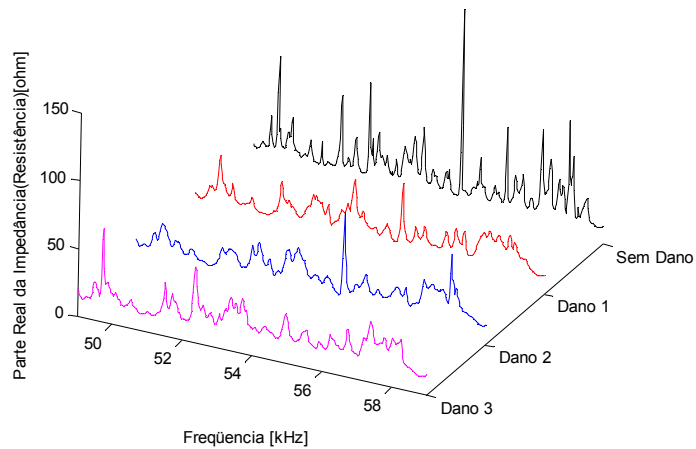
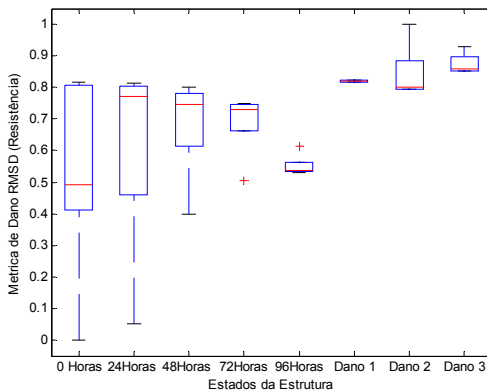
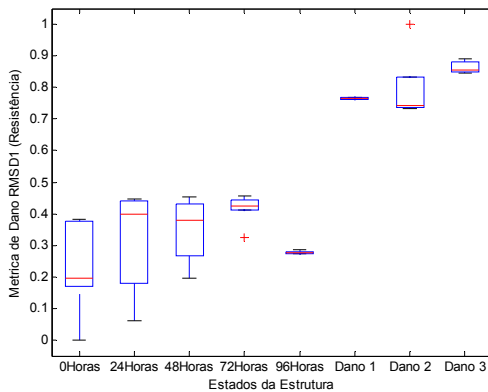


Figura 3.5 - Sinais de impedância medidos na estrutura.

Para poder fazer a comparação entre as métricas normalizou-se os dados obtidos em relação ao valor máximo encontrado para as métricas. Na Fig. 3.6 as métricas são ilustradas graficamente. As cinco primeiras caixas de cada gráfico representam métricas de medições sem dano e as três seguintes correspondem a cada um dos danos simulados pela adição de massa. O desvio padrão de cada estado também pode ser verificado.

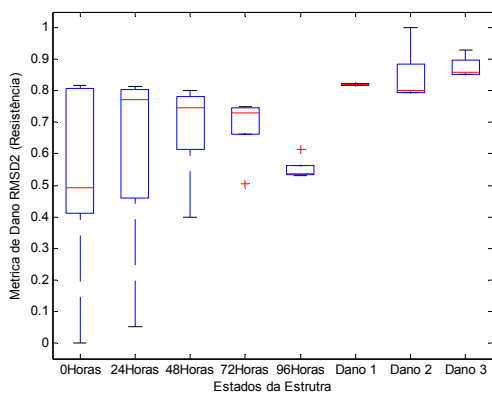


(a) Média e Desvio Padrão (RMSD)

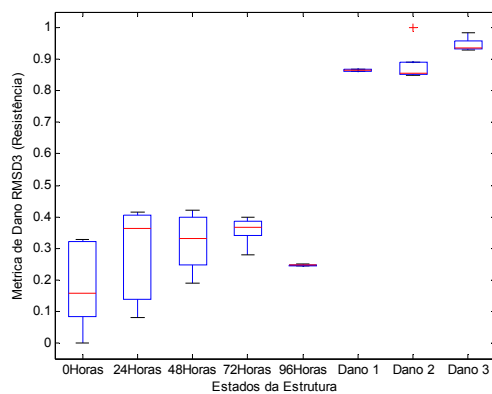


(b) Média e Desvio Padrão (RMSD1)

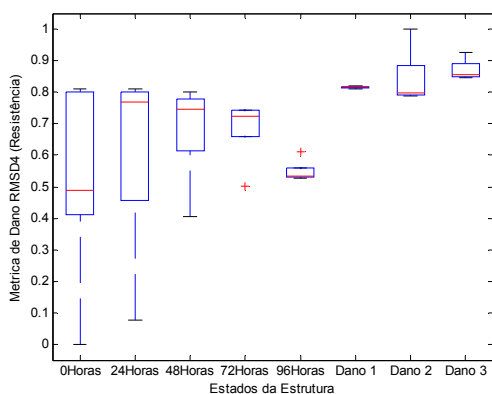




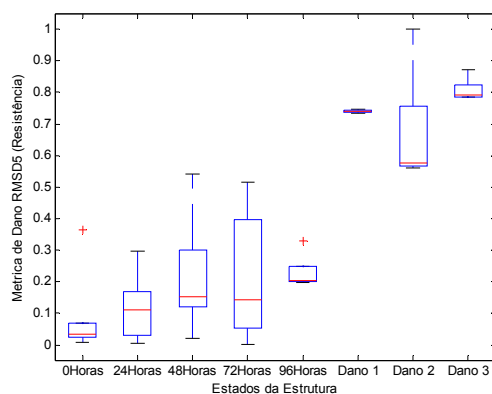
(c) Média e Desvio Padrão (RMSD2)



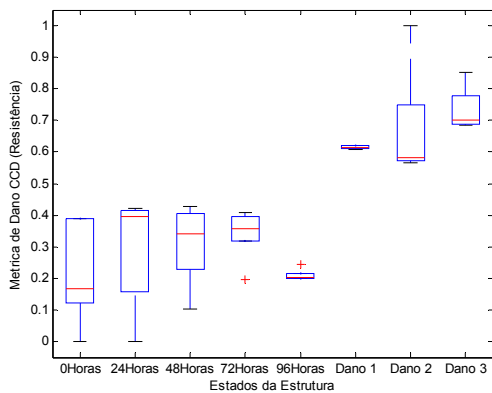
(d) Média e Desvio Padrão (RMSD3)



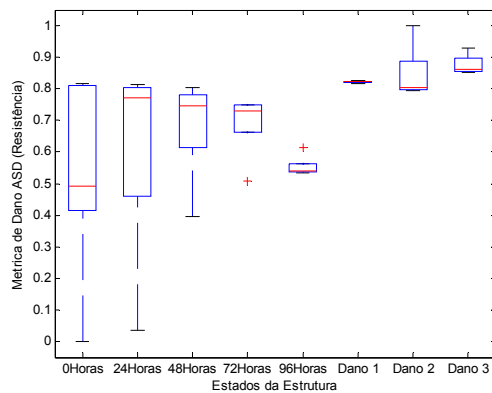
(e) Média e Desvio Padrão (RMSD4)



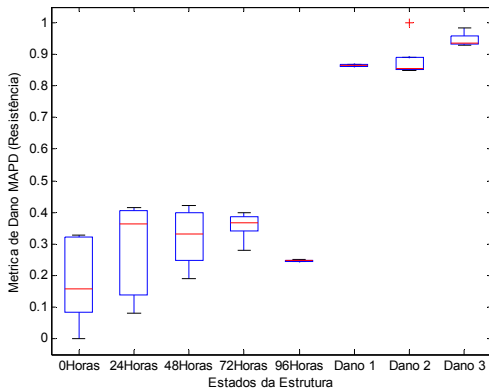
(f) Média e Desvio Padrão (RMSD5)



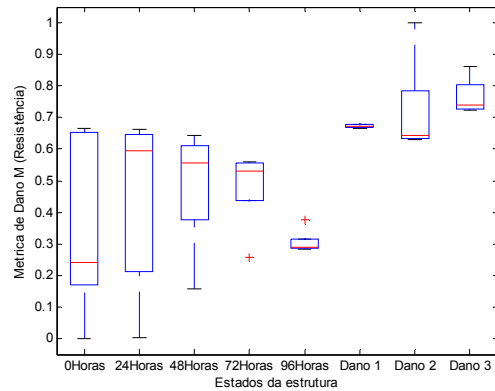
(g) Média e Desvio Padrão (CCD)



(h) Média e Desvio Padrão (ASD)



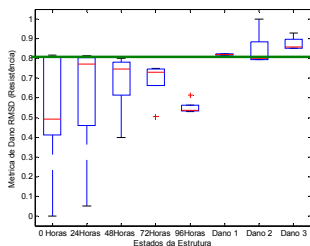
(i) Média e Desvio Padrão (MAPD)



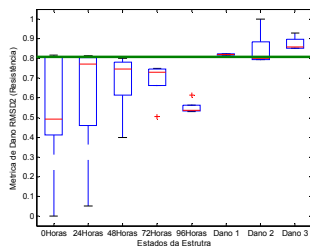
(j) Média e Desvio Padrão (M)

Figura 3.6- Comparação entre métricas do dano.

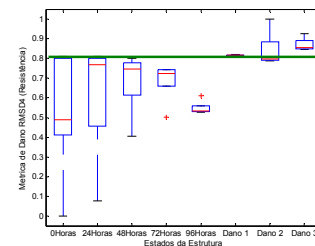
Analisando os gráficos da Fig.3.6, pode-se dividir as métricas calculadas em três grupos. Na Fig.3.7, embora as médias das medições referentes ao estado saudável da estrutura sejam menores que as médias das medições com dano, pode-se observar que, ao desenhar uma linha paralela ao eixo dos estados da estrutura (linha verde) não é possível separar com segurança os estados sem dano e os estados com dano. Assim, pode-se concluir que estas métricas não tem sensibilidade suficiente em relação a danos tão pequenos como os que foram utilizados no ensaio.



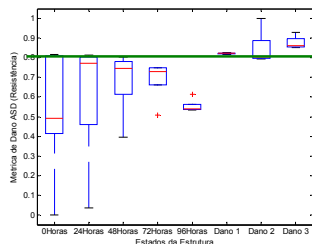
(a) Média e Desvio Padrão (RMSD)



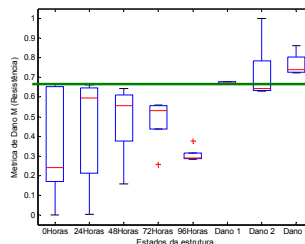
(b) Média e Desvio Padrão (RMSD2)



(c) Média e Desvio Padrão (RMSD4)



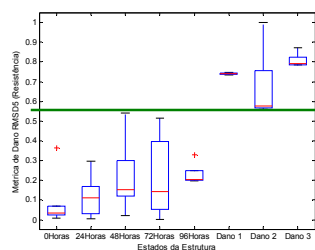
(d) Média e Desvio Padrão (ASD)



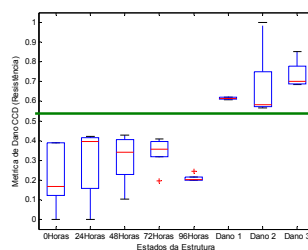
(e) Média e Desvio Padrão (M)

Figura 3.7- Métricas com pouca sensibilidade em relação aos danos inseridos (massa adicional).

Outras métricas, tais como o desvio médio da raiz quadrada (Eq. 3.6) e o coeficiente de correlação (Eq. 3.7) são mais sensíveis que as anteriores neste caso, sendo, portanto, possível separar os estados com dano e sem dano através da linha verde anteriormente descrita, como se mostra na Fig.3.8.



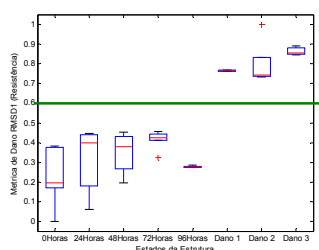
(a) Média e Desvio Padrão (RMSD5)



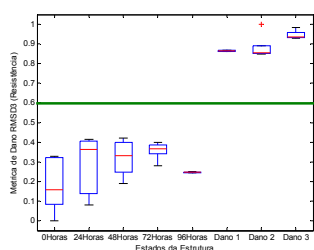
(a) Média e Desvio Padrão (CCD)

Figura 3.8 – Métricas sensíveis aos danos inseridos.

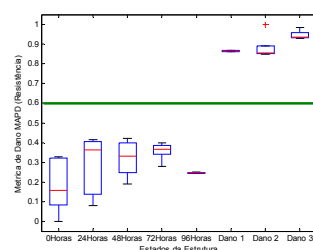
Finalmente, as métricas que têm maior sensibilidade aos danos simulados, segundo o critério da diferença evidente entre os dois estados (sem dano, com dano), podem ser observadas na Fig. 3.9. Trata-se do desvio médio da raiz quadrada – Grisso/Peairs (Eq.3.2 – RMSD1), do desvio médio da raiz quadrada – Park (Eq. 3.4 - RMSD3) e o desvio percentual da média absoluta, (Eq. 3.11 – MAPD). A linha verde utilizada nos casos anteriores é plenamente dispensada.



(a) Média e Desvio Padrão (RMSD1)



(b) Média e Desvio Padrão (RMSD3)



(c) Média e Desvio Padrão (MAPD)

Figura 3.9 – Métricas com maior sensibilidade aos danos inseridos.

Os resultados anteriormente mostrados permitem afirmar que, para os casos estudados, as métricas denominadas RMSD1, RMSD3 e MAPD são as mais sensíveis e seriam as mais indicadas num processo de monitoramento estrutural pela técnica da impedância eletromecânica. Numa situação real, recomenda-se testar estas métricas e identificar as mais sensíveis para o tipo específico de dano que está sendo monitorado. Por outro lado, as

métricas que apresentam menor desvio padrão são as mais indicadas quando se deseja desconsiderar variações ambientais. Destaca-se que, para o estudo em tela as métricas que se mostraram mais sensíveis aos danos simulados pela massa adicional são exatamente as mesmas com maior robustez do ponto de vista dos efeitos ambientais.

### 3.4 Estudo de Caso

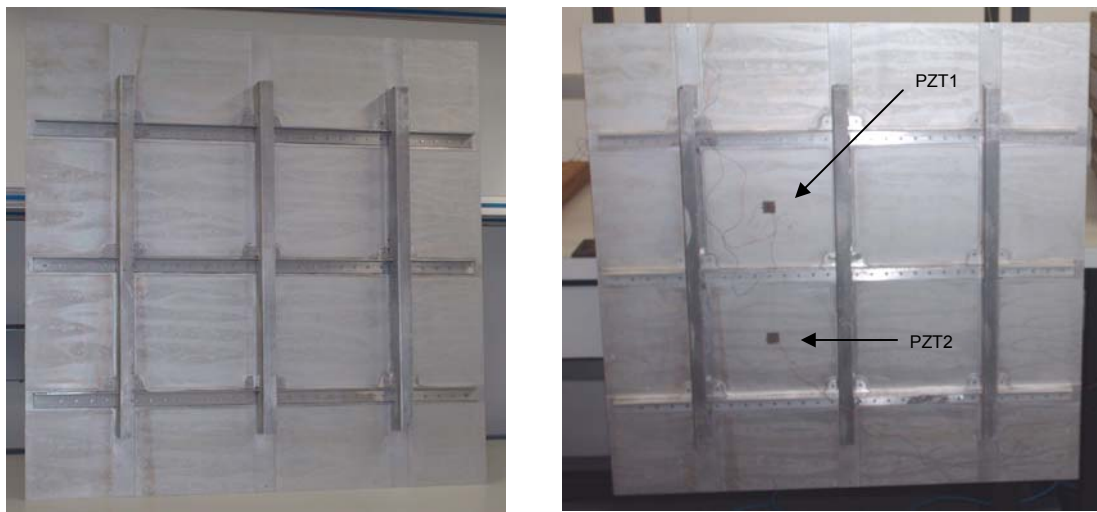
Uma das notícias de danos imprevistos mais comentadas é a que se refere ao ocorrido no dia 28 de abril de 1988, com a aeronave da *Aloha Airlines*, Modelo Boeing 737-297. O vôo saiu do aeroporto de Halo para o aeroporto Internacional de Honolulu com 86 passageiros e seis tripulantes. Em pleno vôo uma parte da fuselagem se separou da estrutura da aeronave (observar a Fig.3.10), provocando uma aterrissagem de emergência.



Figura 3.10- Separação da fuselagem do avião da Alhoa Airline em 1988, (FARRAR; LIEVEN; BEMENT, 2005).

Uma falha que pode sofrer a fuselagem do avião, levando a conseqüências como as anteriormente citadas, é a perda de rebites de fixação de partes da estrutura. Com o fim de avaliar as métricas utilizadas no método de monitoramento de integridade estrutural baseado na impedância num caso real, utilizou-se uma parte da fuselagem de uma aeronave para simular a perda de um rebite.

A estrutura utilizada pode ser observada na Fig. 3.11(a), cujas dimensões são de 810x810 milímetros. Nela foram coladas duas pastilhas de PZT, denominadas como PZT1 e PZT2, segundo mostra a figura 3.11(b).



(a) Estrutura de fuselagem

(b) Pastilhas de PZT Coladas na Estrutura

Figura 3.11- Parte da Fuselagem de um avião.

A estrutura foi pendurada com cabos de nylon de forma a caracterizar condições de contorno do tipo livre-livre. As dimensões das pastilhas de PZT são de 20x20 milímetros e foram coladas à mesma distância de dez centímetros em relação a uma linha de rebites da estrutura, conforme se verifica na Fig. 3.12.

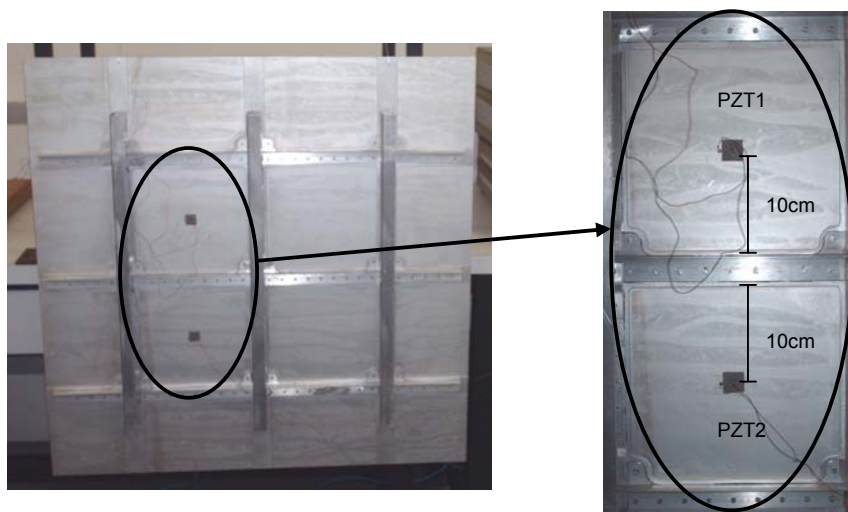


Figura 3.12 – Distância das pastilhas de PZT à linha de rebites.

No momento da realização do ensaio, a fita de cobre utilizada para polarizar o PZT2 descolou-se, pelo que os resultados não são apresentados neste trabalho. As variações da impedância obtidas podem ser devidas ao descolamento da fita e não propriamente ao dano inserido no ensaio. É muito importante garantir que as condições da cola do PZT não variem durante a aplicação do método de monitoramento de integridade estrutural baseado na impedância eletromecânica, pois, se houver alguma variação, os resultados obtidos perdem qualidade.

Semelhantemente aos ensaios anteriormente realizados, os sinais de impedância foram adquiridos com o analisador HP4194A para cada uma das condições da estrutura (com e sem o rebite). Para a condição sem dano, foram feitas três medições em dias diferentes para se observar o comportamento dos sinais e a estabilidade das métricas. A faixa de frequência utilizada para os ensaios foi de 36,5 kHz até 41,5 kHz. A cada dia foram tomadas seis medições e na Fig.3.13 pode-se ver os sinais médios obtidos para cada dia.

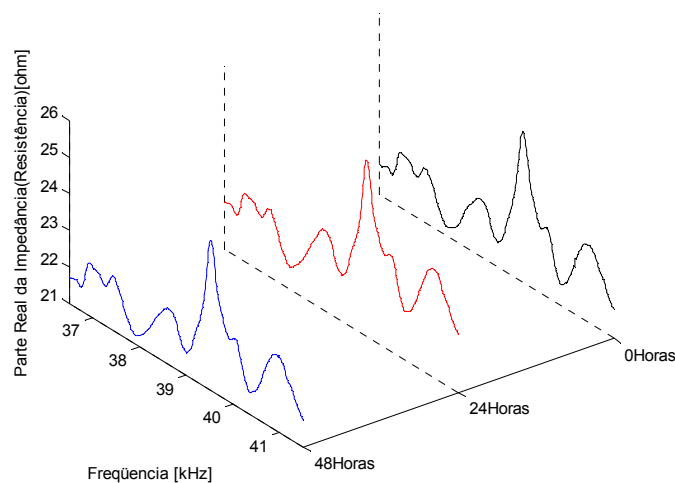


Figura 3.13- Sinais de impedância medidos na fuselagem sem dano em dias diferentes.

Nesta figura pode-se verificar que o sinal de impedância não tem variações em sua forma, embora ao aplicar as métricas os valores correspondentes a cada dia apresentem algumas diferenças. Nenhuma métrica mostrou o mesmo valor em dias distintos, como se pode observar na Tab. 3.2, onde as métricas obtidas para cada dia considerado são mostradas.

Verifica-se que os valores de todas as métricas foram menores que os obtidos no ensaio da placa de alumínio o que representa uma menor variação nos sinais de impedância. Isto pode estar relacionado ao tamanho da estrutura, uma vez que a placa de

alumino é menor que a parte de fuselagem utilizada, permitindo que as condições ambientais tenham maior influência sobre a estrutura menor.

Tabela 3.2- Valores das métricas para três medições sem dano na fuselagem.

	0 Horas	24 Horas	48 Horas
<b>RMSD</b>	0,1013	0,6012	0,4183
<b>RMSD1</b>	0,0897	0,5345	0,3715
<b>RMSD2</b>	0,0045	0,0268	0,0187
<b>RMSD3</b>	1,4478	9,9077	6,6089
<b>RMSD4</b>	0,1330	1,1322	0,7267
<b>RMSD5</b>	0,0213	0,0532	0,0476
<b>CCD</b>	0,0073	0,0375	0,0426
<b>ASD</b>	1,6900	4,5891	4,3252
<b>MAPD</b>	1,4478	9,9077	6,6089
<b>M</b>	5,1704	146,6882	76,1743

Para criar um dano incipiente na fuselagem e assim poder testar as métricas e ver a sensibilidade da técnica de monitoramento de integridade estrutural a pequenas variações que representam danos reais na estrutura estudada, foi tirado um dos rebites, como se observa na Fig.3.14.

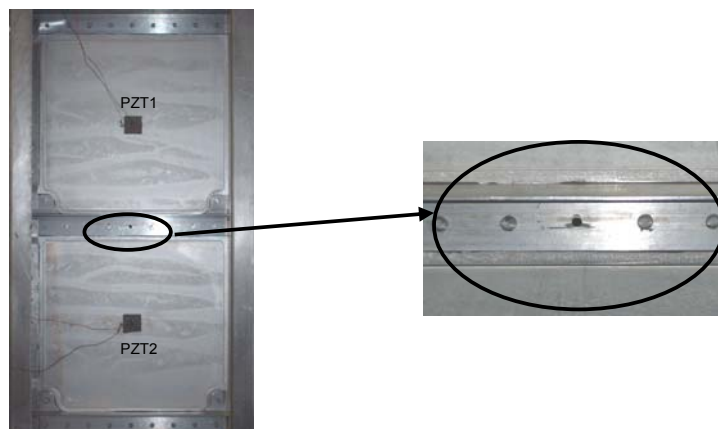


Figura.3.14- Dano inserido na fuselagem da aeronave (retirada de um dos rebites).

Na Fig.3.15 se apresentam os sinais médios da parte real da impedância eletromecânica em função da frequência, medidos para cada estado da placa, ou seja, o

sinal para a estrutura saudável e o sinal correspondente ao dano simulado (sem rebite). Pode-se observar a variação dos sinais para os dois estados.

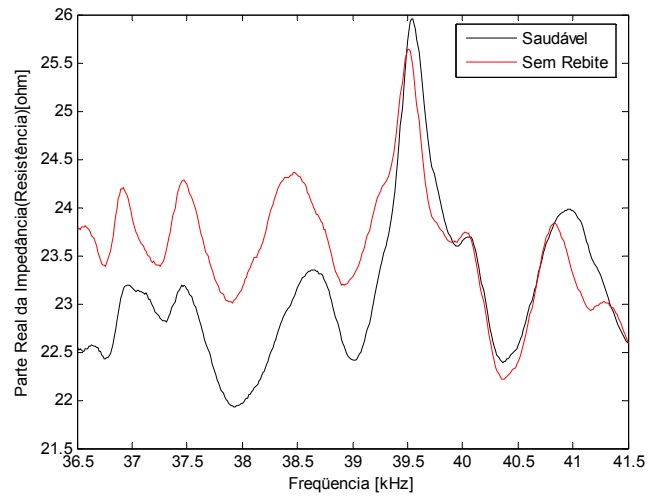
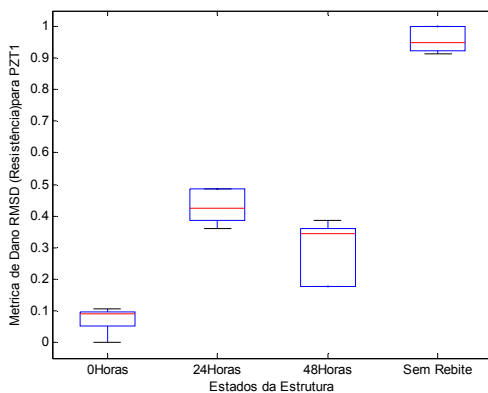
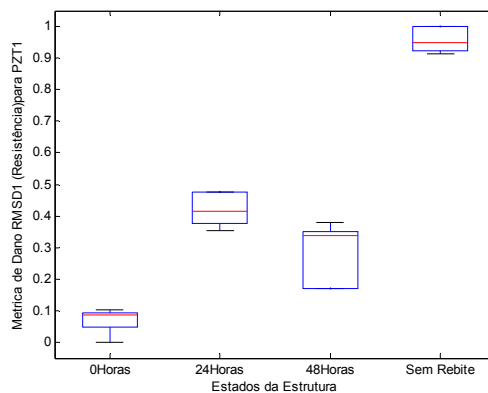


Figura 3.15 - Sinais de impedância medidos na fuselagem para o PZT1.

Para poder fazer a comparação entre as métricas, normalizou-se os dados obtidos em relação ao valor máximo encontrado para as métricas. Na Fig. 3.16 as várias métricas são ilustradas graficamente. As três primeiras caixas de cada gráfico representam métricas de medições sem dano para os três dias considerados a última caixa corresponde ao dano provocado pela perda do rebite. O desvio padrão para cada estado também pode ser verificado.

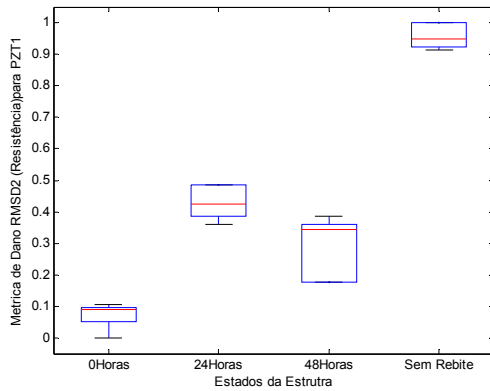


(a) Média e Desvio Padrão (RMSD)

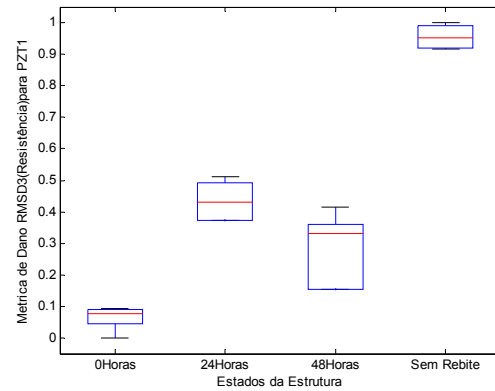


(b) Média e Desvio Padrão (RMSD1)

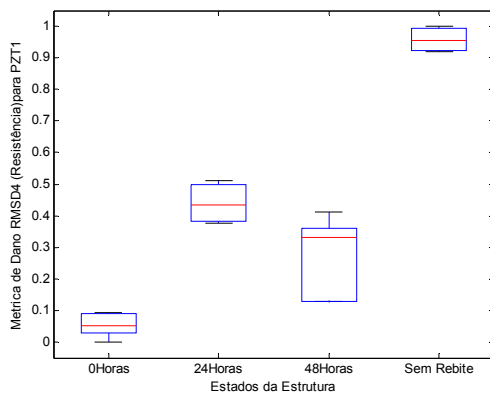




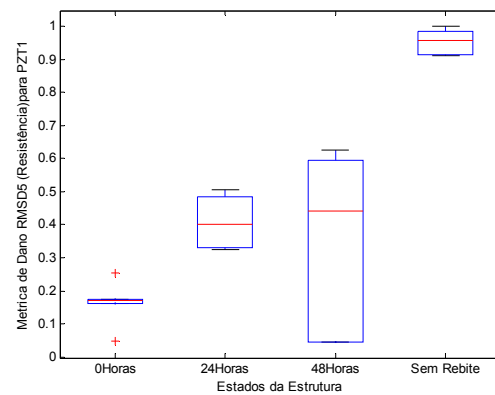
(c) Média e Desvio Padrão (RMSD2)



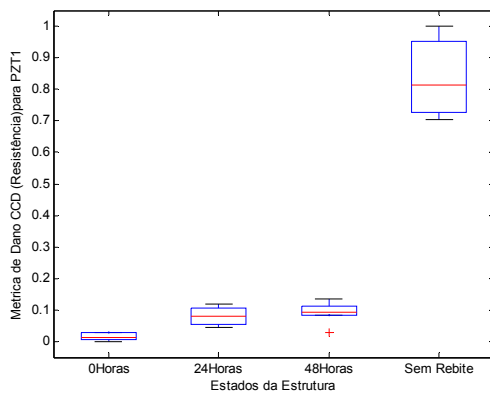
(d) Média e Desvio Padrão (RMSD3)



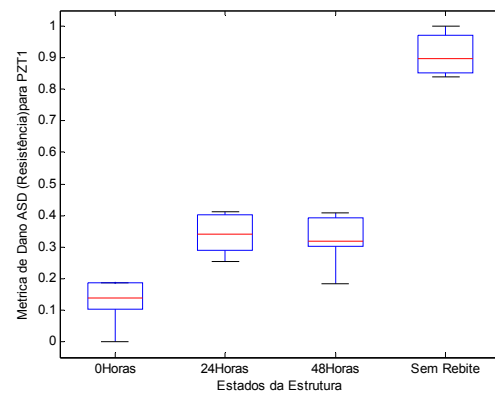
(e) Média e Desvio Padrão (RMSD4)



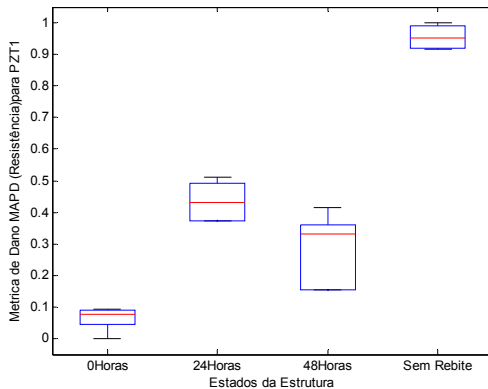
(f) Média e Desvio Padrão (RMSD5)



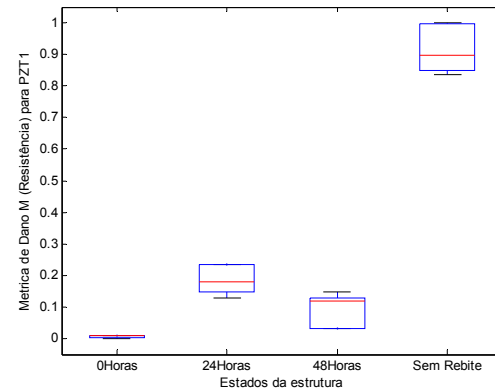
(g) Média e Desvio Padrão (CCD)



(h) Média e Desvio Padrão (ASD)



(i) Média e Desvio Padrão (MAPD)



(j) Média e Desvio Padrão (M)

Figura 3.16- Comparação entre métricas de dano para a estrutura aeronáutica para PZT1.

Analisando os gráficos da Fig.3.16, pode-se concluir que todas as métricas têm boa sensibilidade à falta do rebite, já que é evidente a diferença no valor das métricas entre os estados saudáveis e o estado sem rebite. Pode-se ressaltar que as melhores métricas para este estudo de caso são as seguintes: o coeficiente de correlação, CCD - Fig. 3.16(g), a diferença média quadrada, ASD - Fig. 3.16(h) e a somatória da diferença ao quadrado, M - Fig. 3.16(j).

#### 3.4.1. Teste de Hipóteses para o Ensaio na Estrutura Aeronáutica

Esta seção busca identificar se, do ponto de vista estatístico, a média das 18 medições sem dano (estrutura com rebite) é ou não diferente da média das seis medições feitas com a estrutura sem um dos rebites, para as três métricas que apresentam melhor comportamento, a saber, o coeficiente de correlação, CCD – Eq.(3.7), a diferença média quadrada, ASD – Eq.(3.9), e a somatória da diferença ao quadrado, M – Eq.(3.12). Se as médias forem iguais, então as métricas obtidas não são capazes de representar diferença entre o estado da estrutura saudável e o estado sem rebite. Entretanto, se o teste de hipótese nula for rejeitado e as médias forem diferentes, então os valores das métricas associadas à pastilha PZT1 têm condições de reconhecer o dano (estrutura sem um dos rebites). Assim, o teste de hipótese é:

- $H_0$ : as médias dos valores das métricas sem dano e com dano são iguais;
- $H_1$ : as médias entre os valores das métricas sem dano e com dano são diferentes.

O primeiro teste de hipóteses é aplicado à métrica dada pelo desvio do coeficiente de correlação, CCD, sendo que os dados são apresentados na Tab.3.3.

Tabela 3.3 Valor da métrica CDD para cada uma das medições na pastilha PZT1, na estrutura aeronáutica.

<b>Repetição</b>	<b>Sem Dano (0 Horas)</b>	<b>Sem Dano (24 Horas)</b>	<b>Sem Dano (48 Horas)</b>	<b>Com Dano</b>
<b>1</b>	0,0000	0,0464	0,0924	0,7883
<b>2</b>	0,0185	0,1008	0,1136	0,8372
<b>3</b>	0,0099	0,0565	0,0842	1,0000
<b>4</b>	0,0278	0,1193	0,1358	0,7281
<b>5</b>	0,0078	0,0530	0,0300	0,9533
<b>6</b>	0,0302	0,1069	0,0924	0,7040

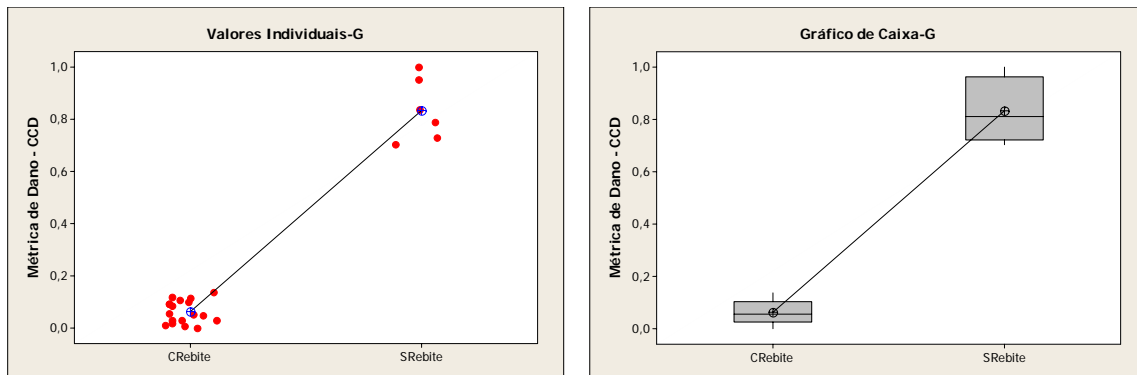
Para fazer este teste de hipóteses, é realizada uma ANOVA (Análise de Variância) entre os dois estados considerados (sem dano e com dano), sendo apresentada na Tab.3.4.

Tabela 3.4- ANOVA da métrica de dano CCD do PZT1 da estrutura aeronáutica.

	<b>Soma dos Quadrados</b>	<b>Graus de Liberdade</b>	<b>Médias</b>	<b>F</b>	<b>P-Nível</b>
<b>Regressão</b>	2,68625	1	2,68625	567,20	0,000
<b>Residual</b>	0,10419	22	0,00474		
<b>Total</b>	2,79044	23			
$R^2=96,10\%$					

Pode-se perceber que, como o valor de p-nível é inferior ao da significância adotada  $\alpha = 0,05$ , rejeita-se a hipótese nula, ou seja, as médias entre os estados sem dano e com dano são diferentes.

A Fig. 3.17(a) apresenta os valores individuais para as métricas, considerando o estado saudável e o estado com dano (sem um dos rebites) para a métrica de dano CCD referente à pastilha PZT1 da estrutura aeronáutica. Na Fig. 3.17(b), pode-se observar o diagrama de caixas dos mesmos dados, destacando-se a média dos dois estados e seu respectivo desvio padrão.



(a) Valores individuais (CCD)

(b) Diagrama de caixa (CCD)

Figura 3.17- Gráficos dos valores da Métrica CCD agrupados para os estados com e sem dano.

O mesmo procedimento foi realizado para a métrica calculada pela diferença média quadrada da pastilha PZT1. As informações das métricas de dano ASD estão na Tab.3.5.

Tabela 3.5 - Valor da métrica ASD para cada uma das medições no PZT1 na estrutura aeronáutica.

Repetição	Sem Dano (0 Horas)	Sem Dano (24 Horas)	Sem Dano (48 Horas)	Com Dano
1	0	0,2549	0,3186	0,8856
2	0,1616	0,3894	0,4090	0,9105
3	0,1143	0,2931	0,3038	1,0000
4	0,1861	0,4121	0,3907	0,8508
5	0,1036	0,2903	0,1843	0,9703
6	0,1866	0,4026	0,3186	0,8388

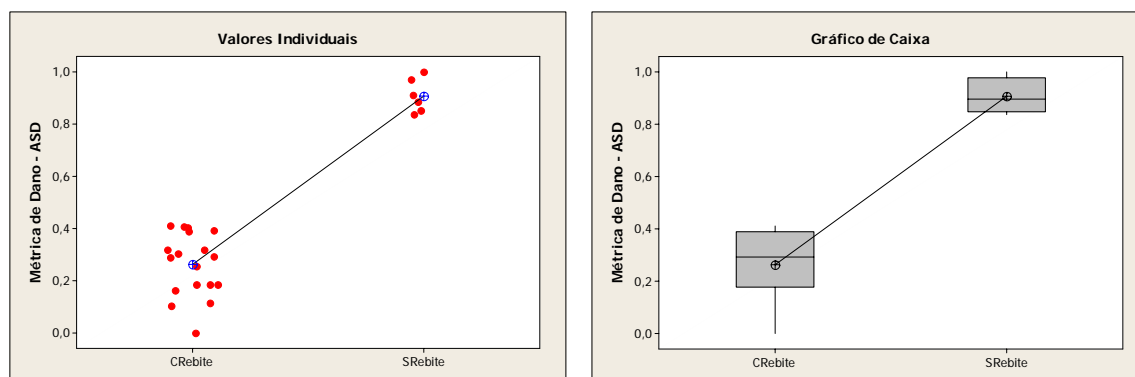
A ANOVA correspondente à métrica de dano ASD do PZT1 é apresentada na Tab. 3.6.

Tabela 3.6- ANOVA da métrica de dano ASD do PZT1 para a estrutura aeronáutica.

	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Médias	F	P-Nível
<b>Regressão</b>	1,8845	1	1,8845	153,16	0,000
<b>Residual</b>	0,2707	22	0,0123		
<b>Total</b>	2,1552	23			

$R^2=86,87$

Conforme é observado na Tab. 3.6, para os valores da métrica de dano ASD obtidas para a pastilha PZT1, o valor de p-nível é inferior ao nível de significância, sendo então descartada a hipótese nula de que as médias são iguais para os dois estados da estrutura (sem e com o rebite). Nas figuras 3.18(a) e (b) são apresentados tanto os valores individuais para as métricas considerando o estado saudável e o estado com dano (sem o rebite) para a métrica de dano ASD da pastilha PZT1, como o diagrama de caixas destes dados, respectivamente.



(a) Valores individuais (ASD)

(b) Diagrama de caixa (ASD)

Figura 3.18- Gráficos dos valores da Métrica ASD agrupados para os estados, com e sem dano.

Por último, o mesmo procedimento foi conduzido para a métrica determinada pela somatória da diferença ao quadrado,  $M$ , da pastilha PZT1. As informações sobre as métricas de dano  $M$  estão na Tab.3.7.

Tabela 3.7 - Valor da métrica  $M$  para cada uma das medições no PZT1 na estrutura aeronáutica.

Repetição	Sem Dano (0 Horas)	Sem Dano (24 Horas)	Sem Dano (48 Horas)	Com Dano
1	0	0,1294	0,0311	0,8496
2	0,0111	0,1483	0,1103	0,9008
3	0,0093	0,2344	0,1251	0,9973
4	0,0081	0,1746	0,1294	0,8353
5	0,0025	0,1855	0,1483	1,0000
6	0,0080	0,2356	0,0311	0,8952

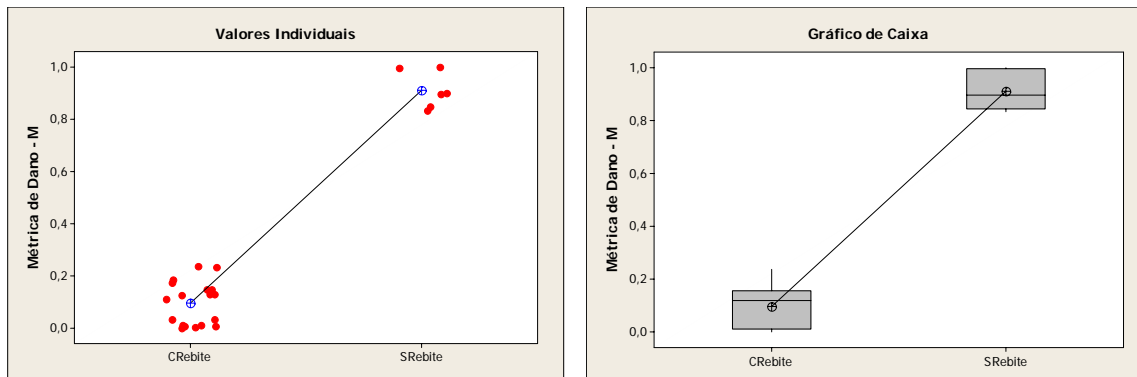
A ANOVA da métrica de dano M do PZT1 é apresentada na Tab. 3.8.

Tabela 3.8- ANOVA da métrica de dano M do PZT1 para a estrutura aeronáutica.

	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Médias	F	P-Nível
<b>Regressão</b>	3,00636	1	3,00636	461,36	0,000
<b>Residual</b>	0,14336	22	0,0652		
<b>Total</b>	3,14971	23			

$R^2=95,24\%$

Como nos casos anteriores, pode-se observar nesta última ANOVA, que o valor de p-nível é inferior ao nível de significância, sendo então igualmente descartada a hipótese nula de que as médias são iguais para os dois estados da estrutura (sem e com o rebite). Nas Figs. 3.19(a) e (b) apresenta-se tanto os valores individuais para as métricas considerando o estado saudável e o estado com dano (sem o rebite) para a métrica de dano ASD para a pastilha PZT1 da estrutura aeronáutica, como o diagrama de caixas dos mesmos dados, respectivamente.



(a) Valores individuais (M)

(b) Diagrama de caixa (M)

Figura 3.19- Gráficos dos valores da métrica M agrupados para os dois estados, com e sem dano.

Com estes testes de hipótese ficou demonstrado estatisticamente que as métricas de dano selecionadas são capazes de reconhecer adequadamente a falta do rebite no painel aeronáutico estudado.

## CAPÍTULO IV

### MÉTODO DE MONITORAMENTO DE INTEGRIDADE ESTRUTURAL BASEADO NA IMPEDÂNCIA ELETROMECAÂNICA EM ENSAIOS DE FADIGA

#### 4.1. Introdução

O ensaio de fadiga é um processo pelo qual se produz uma alteração estrutural permanente, progressiva e localizada, que ocorre quando um material é sujeito a condições que produzem tensões dinâmicas num ou vários pontos, e que pode culminar em trincas ou, em alguns casos, na fratura completa após um número suficiente de ciclos de carga (BRANCO,1994). A ruptura por fadiga é provocada pela nucleação e propagação de trincas que aparecem em uma peça submetida a tensões mecânicas e na maioria das vezes é súbita, ou seja, ocorre sem emitir algum sinal prévio, pois a trinca não é visível. Com o fim de seguir avaliando a sensibilidade do método de monitoramento de integridade estrutural baseado na impedância eletromecânica, aplicou-se o método em ensaios de fadiga, lembrando que a fadiga estrutural é uma ocorrência comum nos componentes estruturais. Assim, deseja-se observar a relação do número de ciclos com as métricas de dano propostas. Para tanto, foi criado um meta-modelo com o fim de prever o colapso por fadiga da estrutura (vida útil). Neste trabalho optou-se por trabalhar com corpos de prova tipicamente utilizados em ensaios de fadiga. As variações dos sinais de impedância foram monitoradas ao longo dos ensaios de fadiga.

#### 4.2. Ensaio de Fadiga

A aplicação de uma força num corpo sólido promove uma deformação do material na direção do esforço. Como é sabido, o ensaio de tração consiste basicamente em submeter

um corpo de prova a um esforço de tração na direção de seu alongamento. Com este ensaio é possível determinar a conhecida curva de tensão-deformação, Fig 4.1.

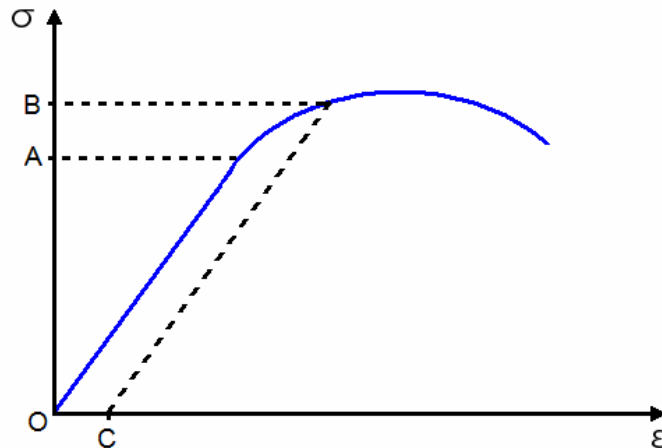


Figura 4.1 – Curva hipotética de tensão-deformação de um metal.

Pode-se observar na Fig.4.1 que o diagrama inicialmente é linear, trecho OA, que é representado pela Eq.(4.1)

$$\sigma = E\varepsilon, \quad (4.1)$$

onde  $\sigma$  é tensão,  $\varepsilon$  é deformação e  $E$  é o módulo de elasticidade ou módulo de Young. A linearidade termina no ponto A, denominado como limite elástico, definido como a maior tensão que o metal pode suportar sem deixar qualquer deformação residual quando o material é descarregado.

Verifica-se então que, no trecho OA da curva na Fig.4.1, o material está dentro de sua região elástica, isto é, além de obedecer à lei de Hooke, pode-se garantir que, se em qualquer ponto pertencente à reta OA a carga foi aliviada, o descarregamento acompanhará também esta mesma reta. Além disso, em havendo descarregamento total, o metal volta à sua situação de origem, sem apresentar qualquer deformação residual ou permanente.

Terminada a zona elástica, atinge-se a zona plástica, onde a tensão e a deformação não são mais relacionadas por uma simples constante de proporcionalidade. Neste caso, em qualquer ponto da curva, havendo descarregamento do material até que a tensão seja igual a zero, o metal retém uma deformação permanente ou residual. A Fig. 4.1 mostra um descarregamento a partir do ponto B da região plástica, chegando até o eixo das abscissas.



Nota-se que a linha BC é paralela a AO, pois o que se perde é a deformação ocorrida na região plástica, restando a deformação ocorrida na região elástica.

Fica então claro que o material não se romperá nem se deformará permanentemente com uma carga menor que a do limite elástico, quando é submetido a esforços estáticos. Entretanto, quando são aplicados esforços dinâmicos, repetidos ou flutuantes a um material metálico, o mesmo pode romper com uma carga bem inferior à carga máxima. Neste caso, tem-se a chamada ruptura por fadiga do material.

O comportamento de materiais devido à fadiga depende de inúmeros fatores, tais como: acabamento superficial, geometria e tamanho da peça, concentração de tensões, estado de tensões, temperatura, tipo de material, tratamento térmico, dentre outros. A influência de cada um destes parâmetros depende das condições de solitação da peça (tração, torção, flexão, etc).

As etapas que levam à ruptura por fadiga de um material são as seguintes: nucleação da trinca, propagação da trinca e, finalmente, a ruptura da peça ou corpo de prova. As duas primeiras etapas tomam praticamente todo o tempo de um ensaio de fadiga e, quando o comprimento da trinca atinge um tamanho tal que a seção transversal se torna suficientemente pequeno, a parte remanescente não pode mais resistir à carga e a ruptura ocorre repentinamente (SOUZA,2000) .

A morfologia das superfícies de fratura de uma peça que rompe por fadiga depende do nível das tensões aplicadas e do modo de solitação. No entanto, todas as superfícies apresentam características comuns que independem destes parâmetros, tais como seu aspecto visual do tipo frágil, sem sinais de deformação plástica em nível macroscópico.

A vida de uma peça submetida à fadiga é determinada pelo número de ciclos de aplicação da carga, até a ruptura. Os principais tipos de ciclos de tensão de fadiga podem ser divididos em dois grandes grupos: ciclos com amplitude de tensão constante e ciclos com amplitude de tensão variável. Em um ciclo de tensão com amplitude constante, a peça está sempre sujeita ao mesmo ciclo de tensões que são aplicadas com a mesma amplitude. Já os ciclos de tensão com amplitude variável representam o tipo mais freqüente e o mais difícil de analisar. Os ciclos de tensão podem ser de tração, de compressão e de tração-compressão.

Os ensaios de fadiga podem ser realizados com três espécies diferentes de corpos de prova; 1) a própria peça ou um protótipo podem ser usados como corpos de prova para determinar a vida da peça a uma determinada tensão ou a um determinado número de ciclos; 2) produtos acabados tais como barras, chapas, tubos, arames, etc, podem ser usados diretamente nos ensaios ; 3) ou corpos de prova fabricados especialmente para os

ensaios. A forma do corpo de prova varia muito, de acordo com o tipo de sollicitação e com as diversas normas usadas nos ensaios de fadiga.

#### 4.2.1 Corpos de Prova

Nesta dissertação, para determinar o valor máximo da tensão aplicada no ensaio de fadiga sem que resulte deformação plástica, foram realizados ensaios preliminares para obter a curva de tensão-deformação do material utilizado. Para determinar as dimensões dos corpos de prova utilizou-se a norma NBR 6152 (ABNT - 2002). A Fig. 4.2 permite observar a forma do corpo de prova e a nomenclatura utilizada para definir as dimensões da estrutura.

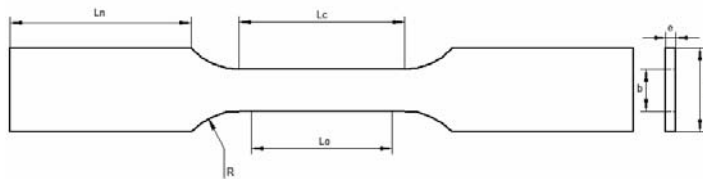


Figura. 4.2 – Forma do corpo de prova para ensaios de tração e fadiga.

$L_c$  é o comprimento inicial,  $L_o$  é comprimento da parte útil,  $e$  é espessura,  $L_n$  é o comprimento de cabeça de fixação do corpo de prova,  $B$  é a largura do corpo de prova e  $r$  é o raio de concordância.

Assumindo os valores de  $e=5$  mm,  $b= 12$  mm e  $L_o= 40$  mm, pela norma NBR 6152 tem-se a relação descrita pela Eq. (4.2)

$$L_c > L_o + 1,5\sqrt{S_o} , \quad (4.2)$$

onde  $S_o$  é dado pela Eq.(4.3) ,

$$S_o = b * e . \quad (4.3)$$

Assim, tem-se que o valor de  $L_c$  deve ser maior que 49,1856 mm. Considerou-se, então, que  $L_c=50$  mm. Para determinar o valor de  $R$  tem-se a seguinte relação:

$$R > 1,6 * b . \quad (4.4)$$

Pela Eq. (4.4), o valor de  $R$  tem que ser maior que 20 mm, e determinou-se que  $R=20,1$  mm.

O valor de  $L_n$  depende da garra de fixação do corpo de prova da máquina onde se vai realizar o ensaio. Neste caso, o valor indicado é igual a 25mm, mas como as pastilhas de PZT devem ser coladas nesta área, foram adicionados mais 30mm para poder acomodá-los. Em assim sendo,  $L_n=55$  mm. Determinadas as medidas do corpo de prova, foram construídos 10 corpos de alumínio, com 5 mm de espessura. Apesar dos corpos de prova terem sido usinados com uma fresa de topo com controle numérico, as dimensões estabelecidas tiveram algumas pequenas variações de um corpo de prova para outro, como se pode observar nas células destacadas da Tab. 4.1.

Tabela 4.1- Dimensões dos corpos de prova para os ensaios tração e fadiga.

<b>N. do Corpo</b>	<b>L<sub>o</sub></b>	<b>L<sub>c</sub></b>	<b>L<sub>N</sub></b>	<b>B</b>	<b>B</b>	<b>R</b>	<b>C</b>
<b>1</b>	40mm	50mm	55mm	24,85mm	12,35mm	20mm	5mm
<b>2</b>	40mm	50mm	55mm	25,00mm	12,35mm	20mm	5mm
<b>3</b>	40mm	50mm	55mm	25,00mm	12,35mm	20mm	5mm
<b>4</b>	40mm	50mm	55mm	24,90mm	12,40mm	20mm	5mm
<b>5</b>	40mm	50mm	55mm	24,15mm	12,55mm	20mm	5mm
<b>6</b>	40mm	50mm	55mm	24,05mm	12,55mm	20mm	5mm
<b>7</b>	40mm	50mm	55mm	25,00mm	12,45mm	20mm	5mm
<b>8</b>	40mm	50mm	55mm	25,00mm	12,45mm	20mm	5mm
<b>9</b>	40mm	50mm	55mm	25,05mm	12,45mm	20mm	5mm
<b>10</b>	40mm	50mm	55mm	24,10mm	12,55mm	20mm	5mm

Na Fig. 4.3 podem-se observar alguns dos corpos de prova assim construídos.

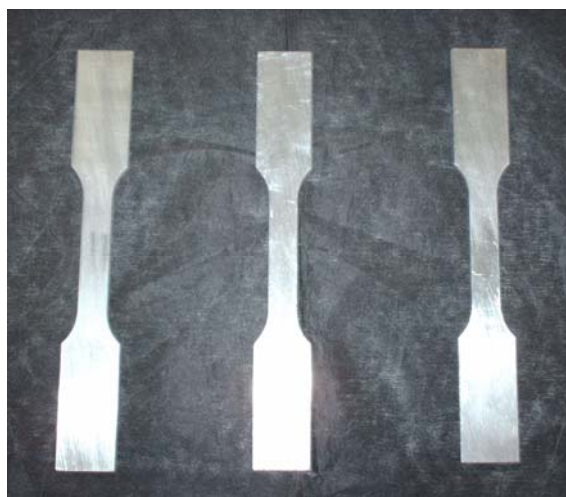


Figura 4.3- Três dos corpos de prova para os ensaios de fadiga.

#### 4.2.2. Ensaios de Tração

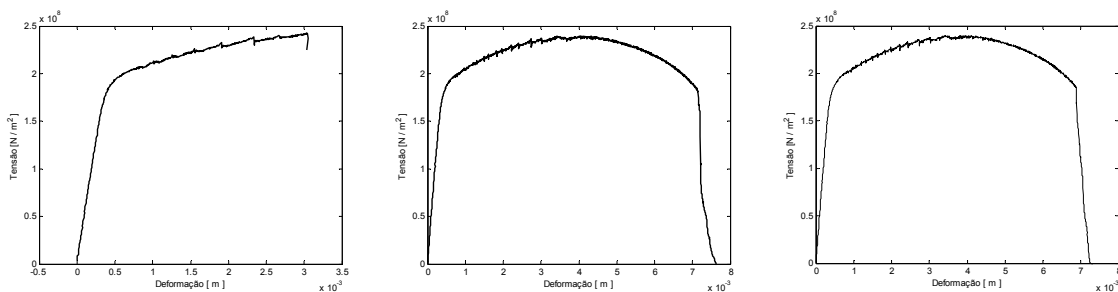
Os três primeiros corpos de prova foram utilizados para fazer ensaios de tração para obter a curva de tensão-deformação do material. O objetivo é o de determinar o valor máximo de tensão que suporta o material, antes da região plástica. A máquina universal de ensaios utilizada é a MTS 810, com capacidade de 20 toneladas e sistema de teste de acionamento digital Teste Star IIs. Na Fig. 4.4 (a) pode-se observar os corpos de prova na máquina de ensaios do *Laboratório de Projeto Mecânico Prof. Henner Alberto Gomide* da FEMEC/UFU, e na Fig. 4.4 (b) se mostra a aparência dos corpos de prova ao final do ensaio.



(a) Ensaios de tração (b) Corpos de prova depois do ensaio de tração

Figura 4.4- Corpos de prova no ensaio de tração.

Os gráficos de tensão-deformação para os três corpos de prova são apresentados na Fig.4.5. A Fig 4.5(a) mostra uma curva diferente das outras duas mostradas nas Figs. 4.5 (b) e (c). Isto tem a ver com o fato do corpo de prova correspondente não ter se rompido no ensaio (Fig. 4.4(b)).



(a) Corpo de prova1

(b) Corpo de prova2

(c) Corpo de prova3

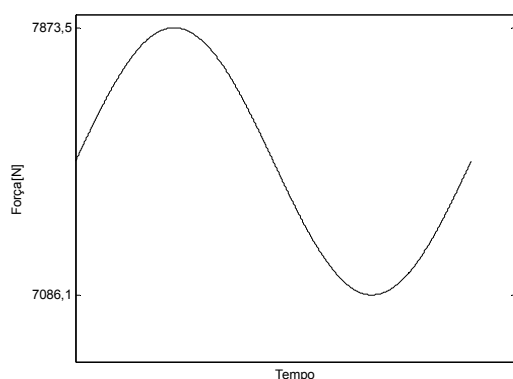
Figura 4.5- Curvas de Tensão-Deformação para os três corpos de prova.

Analisando os gráficos obtidos, tem-se que o valor máximo de tensão do material usado é de 170 MPa, aproximadamente. Isto equivale a uma força de 10498N. Assim, nos demais ensaios de fadiga a amplitude máxima do ciclo de tensão aplicada ao material deverá ser menor que este, procurando assim que todos os ensaios sejam restritos à região elástica.

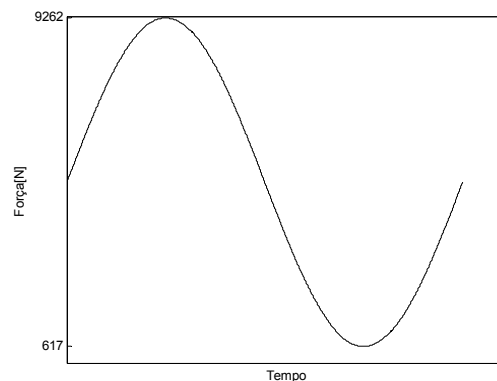
#### 4.2.3. Ensaios de Fadiga

Para aplicar o método de monitoramento de integridade estrutural baseado na impedância eletromecânica nos ensaios de fadiga é necessário determinar o número máximo de ciclos após o qual serão feitas as medições de impedância. Como metodologia, definiu-se que pelo menos três medições devem ser feitas para cada corpo de prova, antes da ruptura.

Com o fim de determinar o ciclo de tensão e o número de ciclos para os ensaios de fadiga, foram realizados quatro ensaios sem se preocupar em medir a impedância. No primeiro ensaio se aplicou um ciclo de tensão de tração com uma amplitude máxima de 127,5MPa (75% do valor máximo de tensão), equivalente a uma força de 7873,5N e uma amplitude mínima de 114,7MPa (67.5% do valor máximo de tensão), equivalente a uma força de 7086,1N. Pode-se observar o sinal da força correspondente na Fig.4.6(a).



(a) Primeiro ciclo de força



(a) Segundo ciclo de força

Figura 4.6- Ciclos de força aplicados no primeiro ensaio de fadiga.

A frequência do ciclo de força aplicado no corpo de prova foi de 10 Hz. O ensaio foi interrompido após 109.583 ciclos, após aproximadamente três horas de teste. A esta altura o corpo de prova ainda não apresentava nenhuma trinca visível. Procurou-se então acelerar o processo, aplicando faixa maior de força, como apresenta a Fig. 4.6 (b), além de se aplicar

agora uma freqüência de 20 Hz. O corpo de prova rompeu após 129.773 ciclos, porém considerou-se que o tempo de realização do ensaio ainda era elevado.

Para o segundo corpo de prova aumentou-se ainda mais a faixa do sinal de força, diminuindo o valor mínimo para 247N. A freqüência dos ciclos se manteve em 20 Hz e o corpo de prova se rompeu após 166.298 ciclos, ou seja, após quatro horas e 40 minutos, tempo ainda muito elevado para os ensaios. Finalmente, procurou-se trabalhar com tração e compressão para acelerar ainda mais o processo nos dois corpos de prova restantes. Foi então aplicado um sinal de força como o que se apresenta na Fig. 4.7.

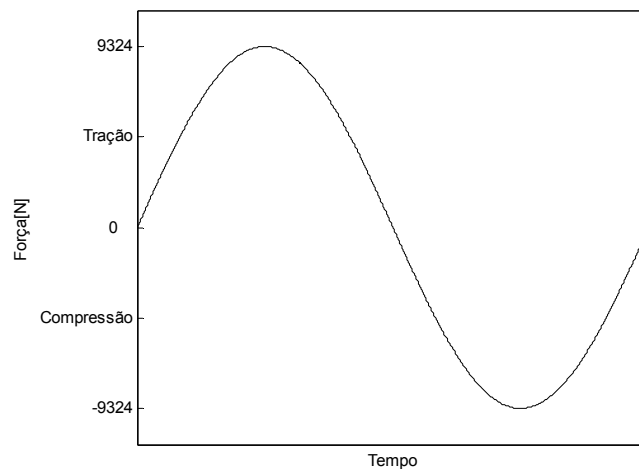


Figura 4.7- Ciclo de força aplicado no terceiro e quarto ensaios de fadiga da fase preliminar.

A Tab. 4.2 apresenta os valores obtidos nos terceiro e quarto corpos de prova.

Tabela 4.2- Ensaio de fadiga para os terceiro e quarto corpos de prova da fase preliminar.

# Corpo de prova	Ciclo	Fmax [N]	Fmin [N]	Freqüência [Hz]	# ciclos (rompimento)
3	Tração-Compressão	9324	9.324	10	23.733
4	Tração-Compressão	9324	9.324	10	37.503

Pode-se observar que, mantidas as mesmas condições, os corpos de prova se romperam após números de ciclos diferentes. Provavelmente isto se deve ao acabamento superficial dos corpos, já que eles não tiveram nenhum tratamento especial. Estes permitiram determinar as condições a serem adotadas para os ensaios de fadiga para os

testes de impedância eletromecânica. Serão feitas medições a cada 8000 ciclos, para ter no mínimo três medições antes do eventual rompimento do corpo de prova.

#### 4.2.4. Ensaio de Fadiga Aplicando o Método de Monitoramento Integridade Estrutural Baseado na Impedância Eletromecânica

Depois de determinar a amplitude da tensão e o número de ciclos, colou-se duas pastilhas de PZT de 10x10x0.1 milímetros em três corpos de prova. As pastilhas foram coladas fora da área de maior concentração de tensões (comprimento útil do corpo de prova), como se pode observar na Fig. 4.8. Este cuidado tem por finalidade evitar que deformações elevadas comprometam a integridade das pastilhas de PZT.

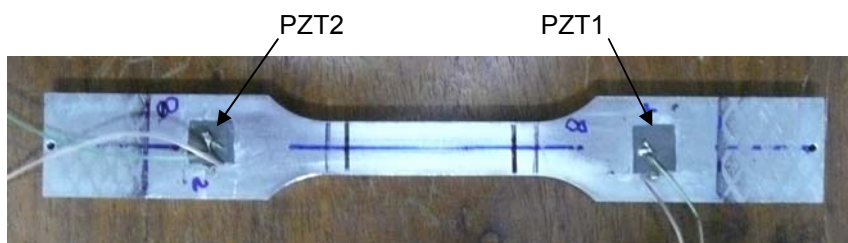


Figura 4.8- Pastilhas de PZT colados nos corpos de prova dos ensaios de fadiga.

Nestas condições, o primeiro corpo de prova rompeu-se após 29.110 ciclos e foram feitas cinco medições. Porém, durante o ensaio a solda de união do cabo com a fita de cobre utilizada para polarizar o PZT rompeu-se, pelo que os dados medidos não têm confiabilidade suficiente para serem considerados. Para evitar a repetição deste problema nos dois corpos de prova seguintes, o cabo foi colado com fita adesiva para não provocar movimento no ponto de solda, ver Fig.4.9.



(a) Corpo de Prova 1

(b) Corpo de prova 2 e 3

Figura 4.9- Detalhes da fixação do cabo nos corpos de prova dos ensaios fadiga.

O segundo corpo de prova apresentou uma fissura visível (Fig. 4.10) após 50.636 ciclos.

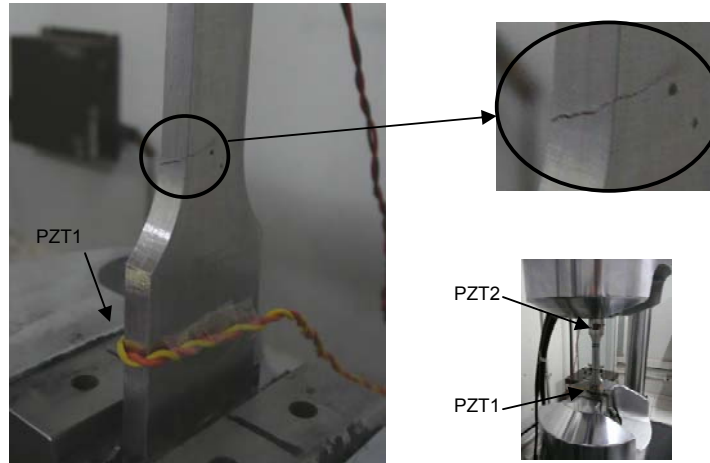


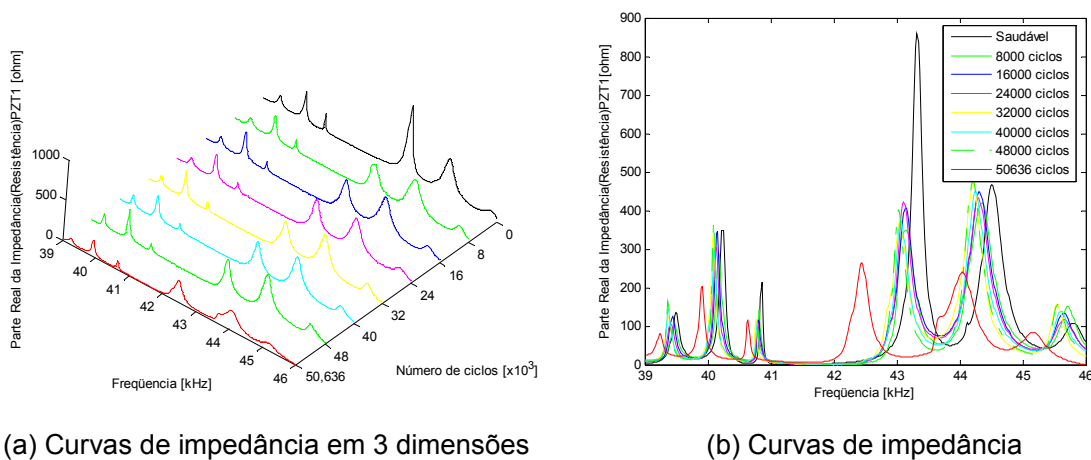
Figura 4.10-Trinca no corpo de prova 2 no ensaio de fadiga para o método de impedância.

Para este corpo de prova foram tomadas seis medições de impedância a cada 8000 ciclos até atingir 48000, além de mais seis medições que foram realizadas quando a trinca se tornou visível (50.636 ciclos). O processo foi repetido para as quatro faixas de frequência usadas para este corpo de prova. De forma resumida, o procedimento foi o seguinte:

- a) inicialmente se tomaram as medições para o estado saudável da estrutura (antes do ensaio);
- b) a seguir, se colocou o corpo de prova na máquina de ensaios de fadiga e aplicou-se 8000 ciclos de força;
- c) retirou-se o corpo de prova da máquina para realizar as medições de impedância;
- d) novamente o corpo foi colocado na máquina para a aplicação de mais 8000 ciclos;
- e) e assim sucessivamente, até se ter uma trinca visível.

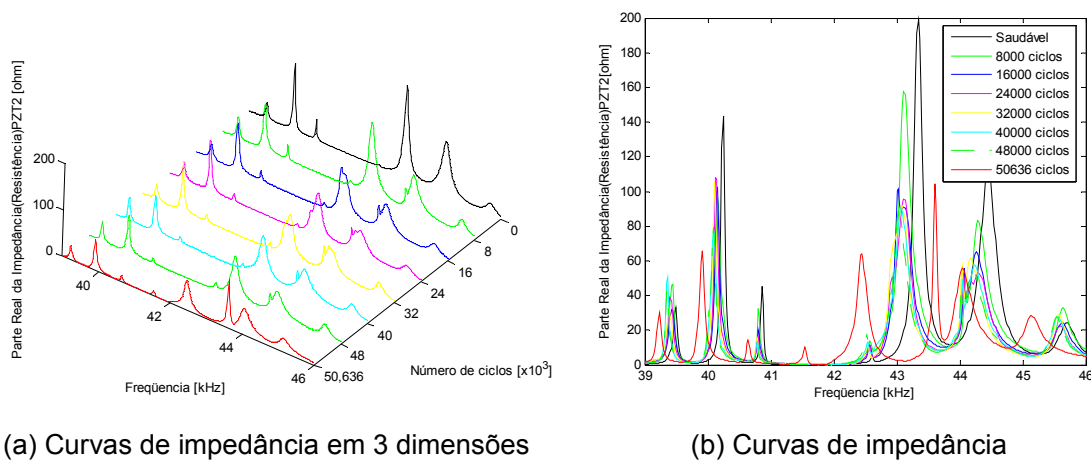
A faixa de frequência mais utilizada pelo método de impedância eletromecânica é a que vai de 30 kHz a 50 kHz (MOURA Jr, 2008). No caso do corpo de prova 2 desta etapa, a faixa utilizada foi de 39 kHz a 46 kHz. A parte real dos sinais de impedância foram medidos para o PZT1, conforme se vê na Fig. 4.11.





(a) Curvas de impedância em 3 dimensões (b) Curvas de impedância  
 Figura 4.11- Sinais de impedância (parte real) para a faixa de frequência de 39 kHz a 46kHz para o PZT1.

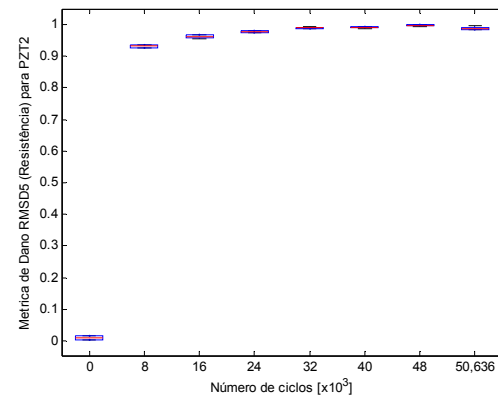
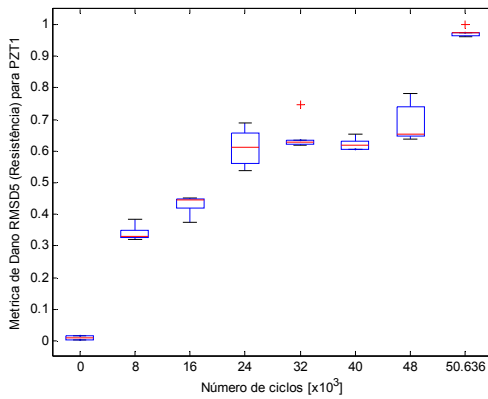
Pode-se observar como é diferente o sinal quando a trinca se torna visível. Isso pode ser visto também através dos sinais medidos para o PZT2 para a mesma faixa de frequência, mesmo lembrando que o PZT2 se encontra mais distante da trinca do que o PZT1.



(a) Curvas de impedância em 3 dimensões (b) Curvas de impedância  
 Figura 4.12- Sinais de impedância para a faixa de frequência de 39 kHz a 46 kHz para o PZT2.

As dez métricas estudadas no Capítulo 3 foram testadas nas quatro faixas de frequência medidas nas duas pastilhas de PZT. Os resultados podem ser observados no anexo I. Na faixa de frequência de 39 kHz a 46 kHz observa-se que, para o PZT1, a métrica de dano descrita pela Eq. (3.6), RMSD5, apresentou um bom comportamento como se vê na

Fig. 4.13(a). Ao aumentar o número de ciclos resulta um valor maior para a métrica. A diferença entre uma medição e outra se torna ainda mais evidente quando aparece a trinca (Fig. 4.10). Já para o PZT2 esta mesma métrica não é representativa, conforme se pode constatar a partir da Fig. 4.13(b).

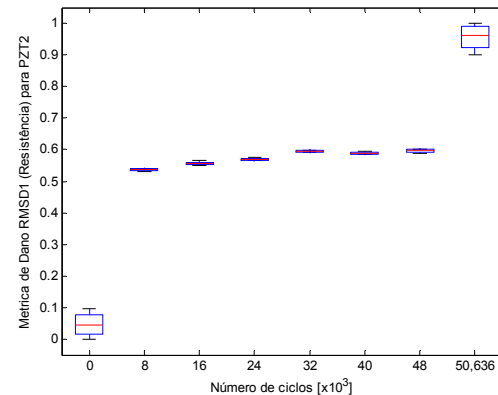
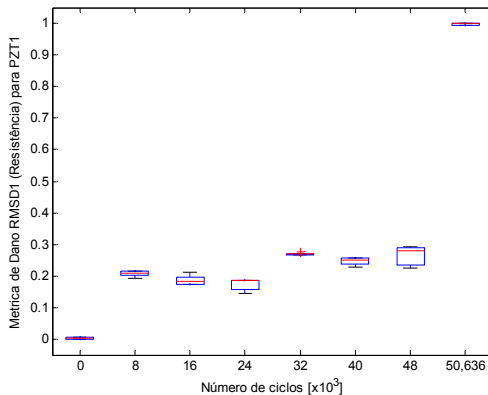


(a) Média e Desvio Padrão (RMSD5) PZT1

(b) Média e Desvio Padrão (RMSD5) PZT2

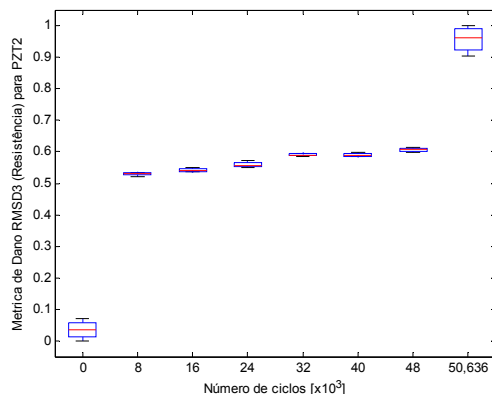
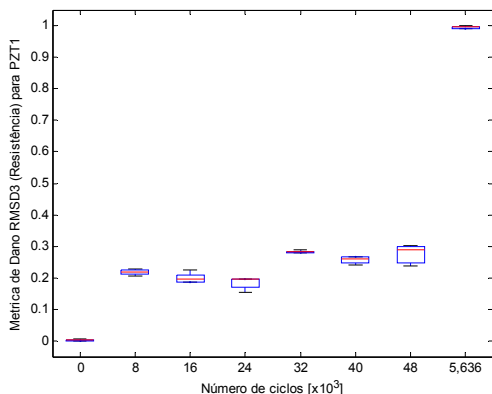
Figura 4.13- Métricas de Dano RMSD5 para a faixa de frequência de 39 kHz a 46 kHz.

As métricas que apresentaram um melhor comportamento para o PZT2 foram a RMSD1, dada pela Eq. (3.2), e a RMSD3, dada pela Eq. (3.4), mostradas nas Figs.4.3(b) e (d). Semelhantemente ao que ocorreu no caso anterior, porém para o PZT1, estas métricas não foram as mais representativas Fig.4.14(a) e (c).



(a) Média e Desvio Padrão (RMSD1) PZT1

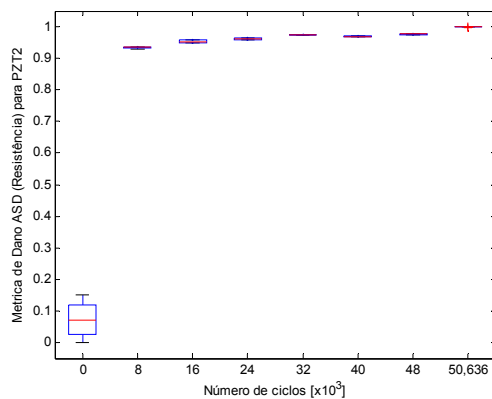
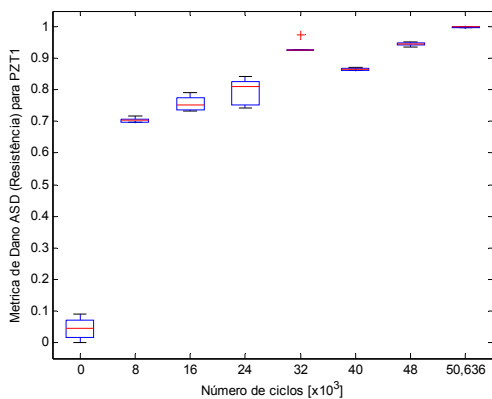
(b) Média e Desvio Padrão (RMSD1) PZT2



(c) Média e Desvio Padrão (RMSD3) PZT1      (d) Média e Desvio Padrão (RMSD3) PZT2

Figura 4.14- Métricas de Dano RMSD1 e RMSD3 para a faixa de freqüência de 39 kHz a 46 kHz.

Estudando os dados provenientes das duas pastilhas de PZT no mesmo tempo, pode-se observar que na faixa de freqüência de 39 kHz a 46 kHz, a métrica que apresenta melhor resultado para as duas pastilhas simultaneamente é a diferença média quadrada (ASD Eq.(3.9)). Pode-se observar um aumento no valor da métrica com o aumento do número de ciclos, para os PZT1 e PZT2, Fig. 4.15(a) e (b).

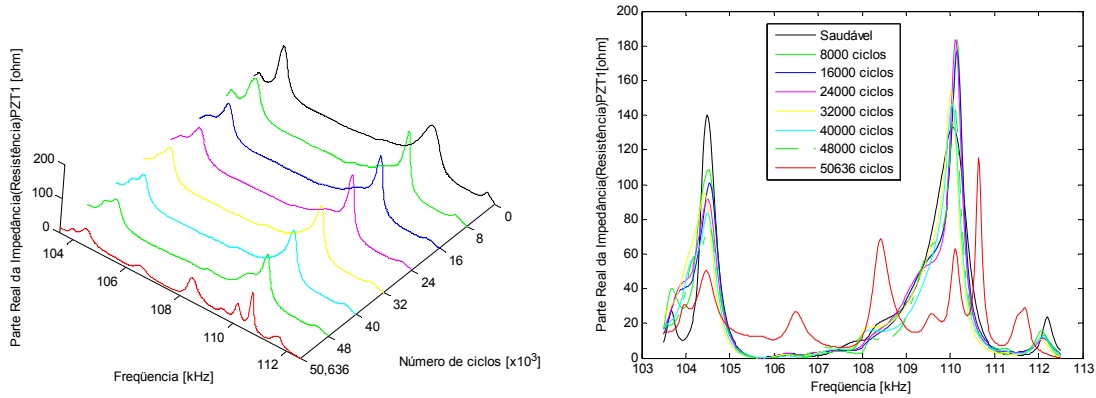


(a) Média e Desvio Padrão (ASD) PZT1      (b) Média e Desvio Padrão (ASD) PZT2

Figura 4.15- Métricas de Dano ASD para a faixa de freqüência de 39 kHz a 46 kHz.

Na Fig. 4.15(a) pode-se observar que aos 32000 ciclos a métrica deixa de seguir o comportamento observado para números menores de ciclos. Isto pode estar relacionado a algum problema na aquisição dos dados ao se atingir os 32000 ciclos.

Outra faixa de frequência utilizada nos ensaios foi a de 103,5 kHz a 112,5 kHz. Para este caso o sinal da parte real da impedância para o PZT1 pode ser observado na Fig. 4.16.

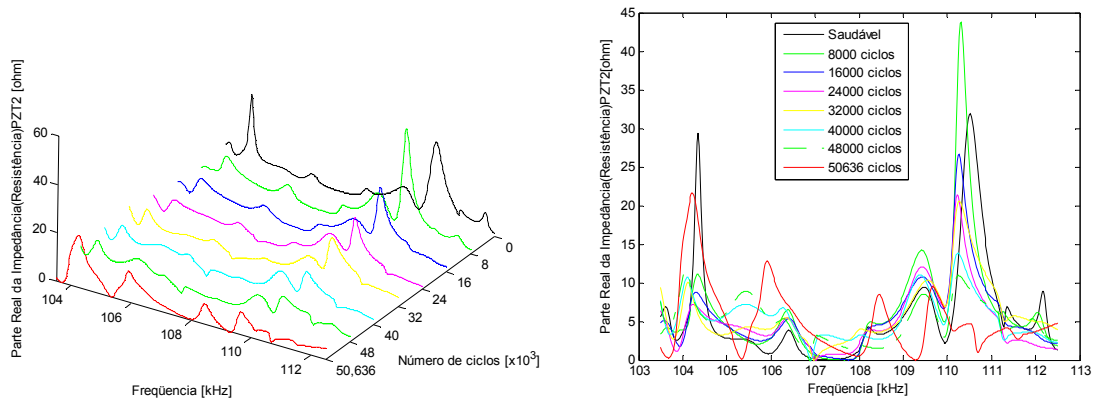


(a) Curvas de impedância em 3 dimensões

(b) Curvas de impedância

Figura 4.16- Sinais de impedância para a faixa de frequência de 103,5 kHz a 112,5 kHz para o PZT1.

Os sinais medidos para o PZT2 são apresentados na Fig.4.17.

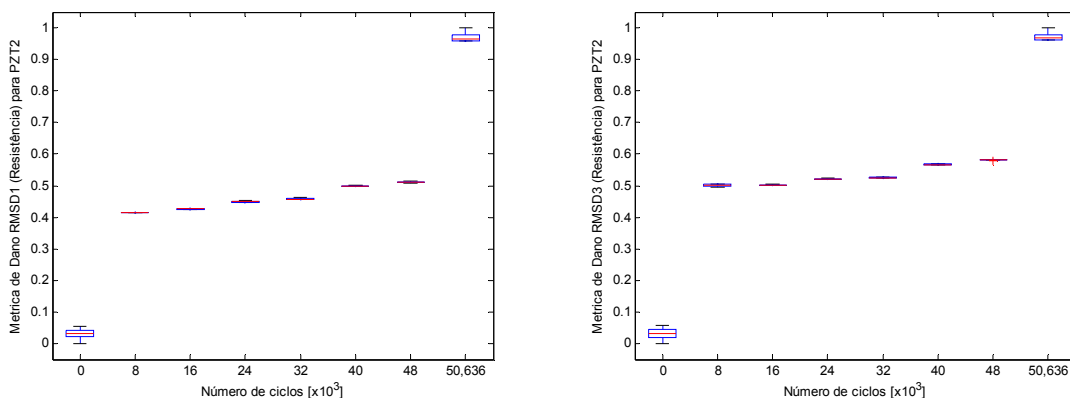


(a) Curvas de impedância em 3 dimensões

(b) Curvas de impedância

Figura 4.17- Sinais de impedância para a faixa de frequência de 103,5 kHz a 112,5 kHz para o PZT2.

Nesta faixa pode-se observar que para o PZT2 o comportamento das métricas foi similar ao da faixa anterior. As métricas que apresentaram os melhores resultados são a RMSD1 (Eq.(3.2)) e a RMSD3 (Eq.(3.4)), como apresentadas na Fig. 4.18.



(a) Média e Desvio Padrão (RMSD1) PZT2      (b) Média e Desvio Padrão (RMSD3) PZT2

Figura 4.18- Métricas de Dano RMSD1 e RMSD3 para o PZT2 na faixa de frequência de 103,5 kHz a 112,5 kHz.

Entretanto, as demais métricas não apresentaram o mesmo comportamento verificado da faixa anterior. Este é o caso da métrica RMSD5 (Eq.(36)) no PZT1, como se pode ver na Fig. 4.19.

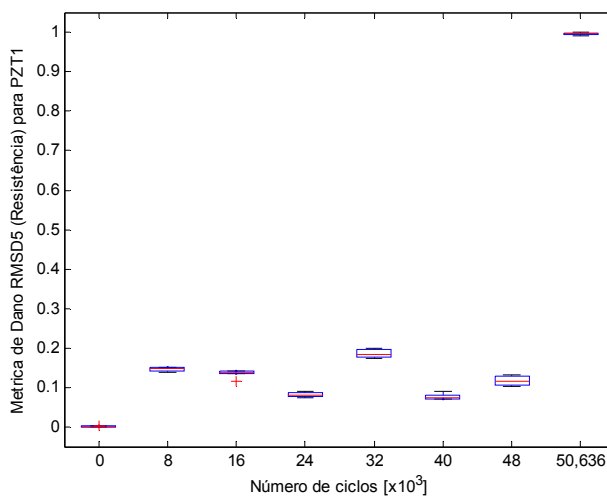
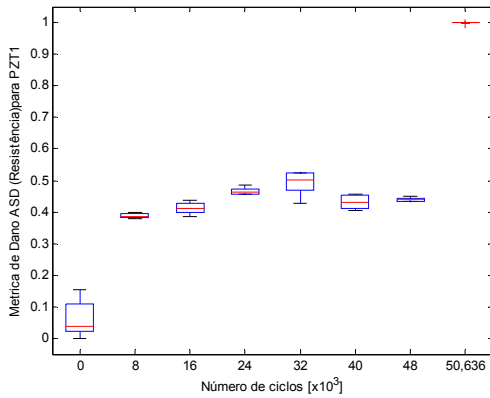


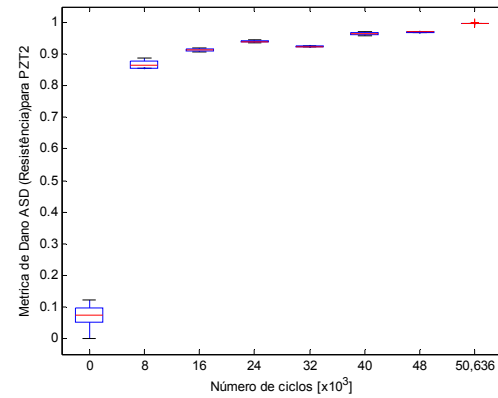
Figura 4.19- Métrica de Dano RMSD5 para o PZT1 na faixa de frequência de 103,5 kHz a 112,5 kHz.

Enquanto a métrica dada pela diferença média quadrada (ASD) teve melhor comportamento na faixa anterior para as duas pastilhas de PZT consideradas, agora, nesta nova faixa de frequência, somente se verifica bom resultado para o PZT2, como mostra a

Fig. 4.20(a). Para o PZT1 os resultados não foram representativos nesta faixa de frequência, Fig. 4.20(b).



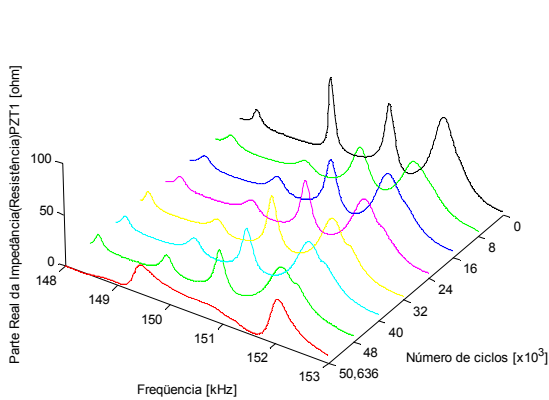
(a) Média e Desvio Padrão (ASD) PZT1



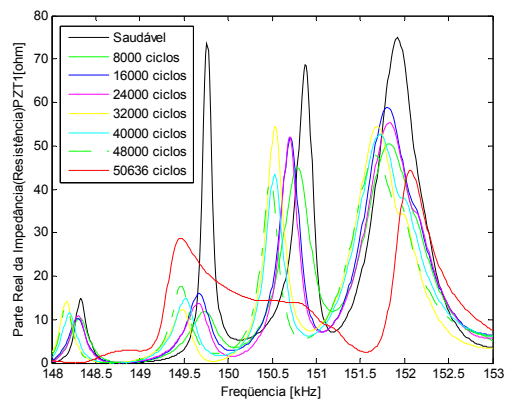
(b) Média e Desvio Padrão (ASD) PZT2

Figura 4.20- Métricas de Dano ASD para a faixa de frequência de 103,5 kHz a 112,5 kHz.

Uma terceira faixa de frequência, utilizada para o segundo corpo de prova desta etapa, foi estabelecida de 148 kHz até 153 kHz. Os sinais da parte real da impedância para o PZT1 são mostrados na Fig.4.21.



(a) Curvas de impedância em 3 dimensões



(b) Curvas de impedância

Figura 4.21- Sinais de impedância para a faixa de frequência de 148 kHz a 153 kHz para o PZT1.

Na Fig.4.22 se apresentam os sinais de impedância obtidos pra o PZT2.

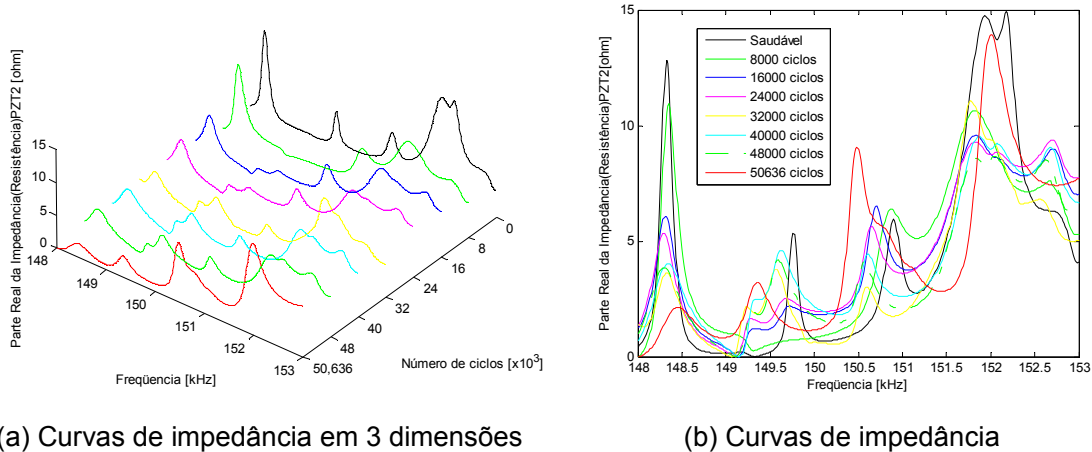


Figura 4.22- Sinais de impedância para a faixa de freqüência de 148 kHz a 153 kHz para o PZT2.

Nesta faixa de freqüência o comportamento das métricas para o PZT2 foi similar ao da primeira faixa (39 kHz - 46 kHz), onde as métricas com melhores resultados são a RMSD1 e a RMSD3, Fig. 4.23(a) e (b), embora os resultados sejam muito melhores na primeira faixa de freqüência.

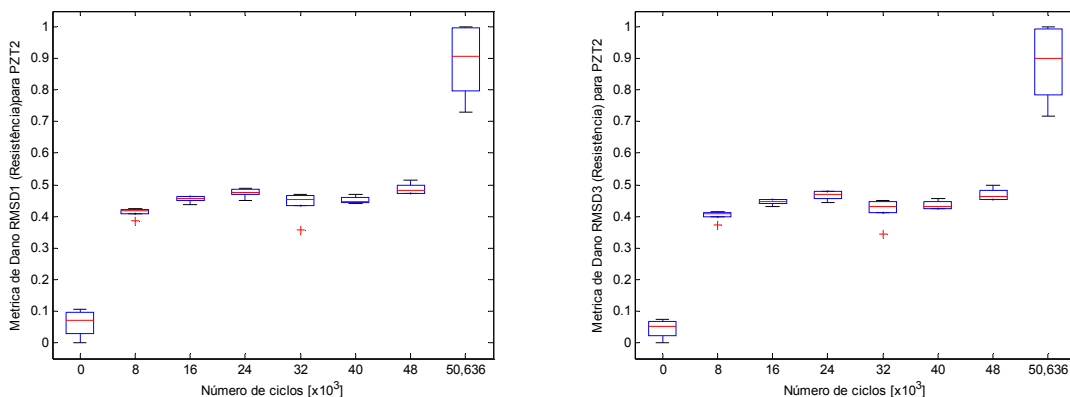


Figura 4.23- Métricas de Dano RMSD1 e RMSD3 para o PZT2 na faixa de freqüência de 148 kHz a 153 kHz.

Para o PZT1 o comportamento das métricas na faixa de freqüência de 148 kHz a 153 kHz foi similar ao da primeira faixa estudada (39 kHz - 46 kHz). O melhor comportamento encontrado foi para a métrica referente à Eq.(3.6), RMSD5, como se observa na Fig. 4.24.

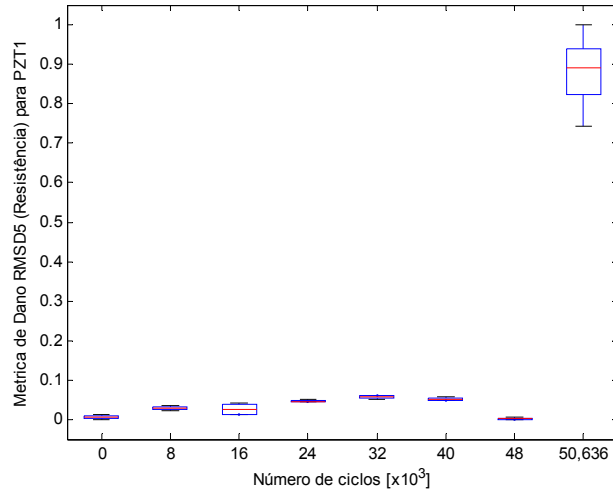
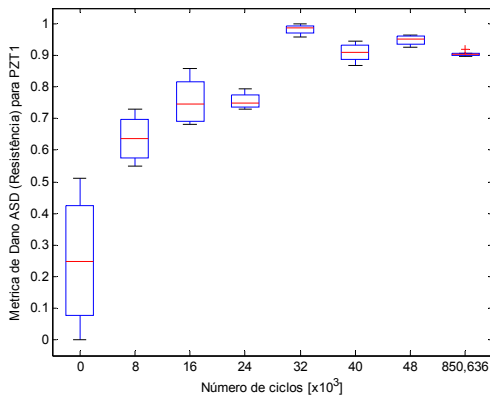
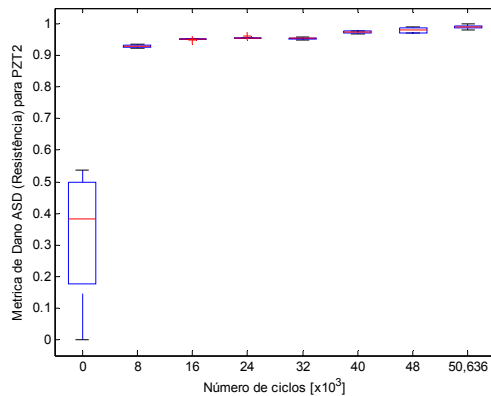


Figura 4.24- Métrica de Dano RMSD5 para o PZT1 na faixa de frequência de 148 kHz a153 kHz.

Nesta terceira faixa de frequência, ao estudar as duas pastilhas de PZT juntas, pode-se observar que, semelhantemente ao que foi encontrado na primeira faixa, a métrica que melhor descreve os ciclos aplicados ao corpo de prova foi a que se refere à diferença média quadrada, ASD, como se mostra nas Figs. 4.25(a) e (b).



(a) Média e Desvio Padrão (ASD) PZT1

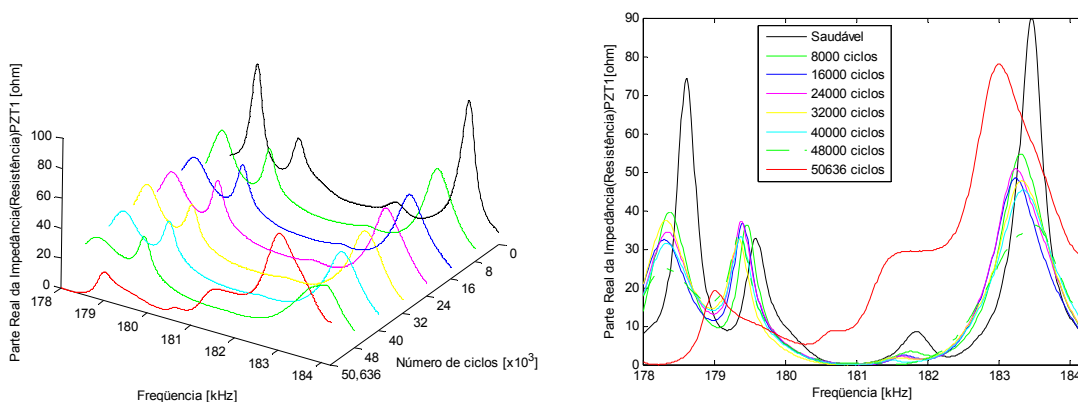


(b) Média e Desvio Padrão (ASD) PZT2

Figura 4.25- Métricas de Dano ASD para a faixa de frequência de 148 kHz a153 kHz.

Finalmente, uma última faixa de frequência foi utilizada, de 178 kHz a 184,2 kHz. Os sinais do PZT1 podem ser observados na Fig.4.26.



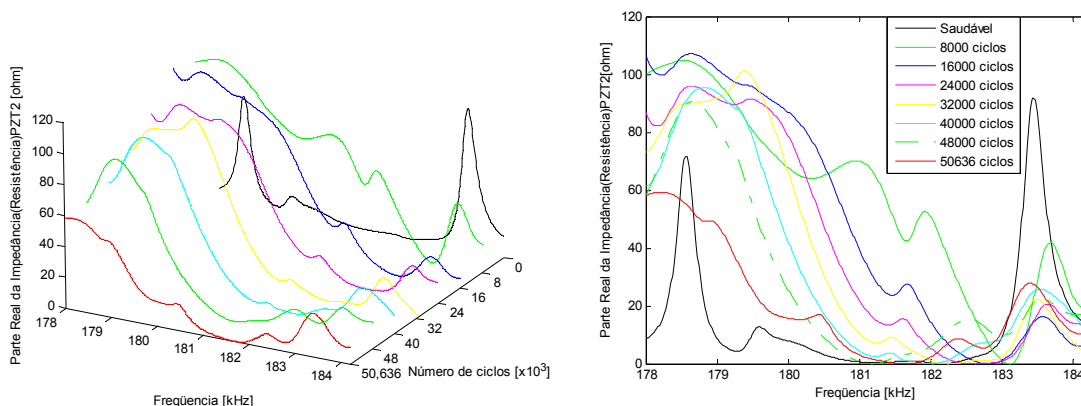


(a) Curvas de impedância em 3 dimensões

(b) Curvas de impedância

Figura 4.26- Sinais de impedância para a faixa de frequência de 178 kHz a 184,2 kHz para o PZT1.

Na Fig.4.27 se apresentam os sinais de impedância obtidos pra o PZT2.



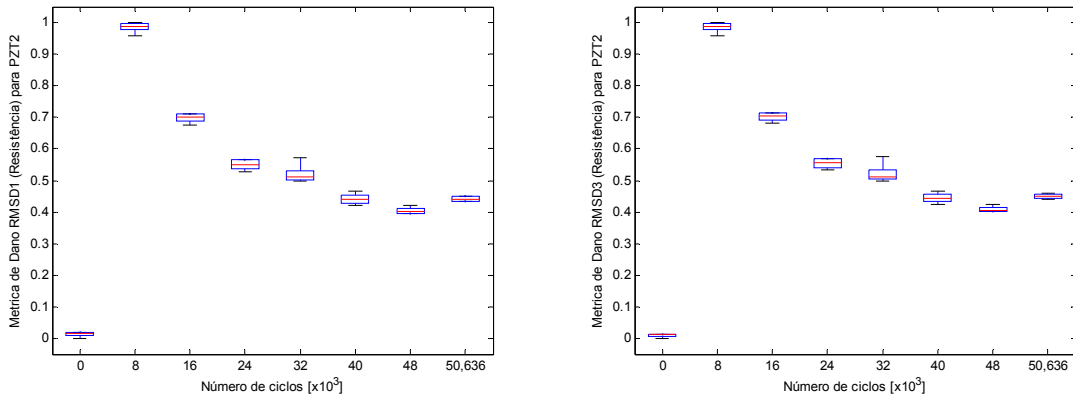
(a) Curvas de impedância em 3 dimensões

(b) Curvas de impedância

Figura 4.27- Sinais de impedância para a faixa de frequência de 178 kHz a 184,2 kHz para o PZT2.

Nesta última faixa pode-se observar que, ao serem aplicadas as métricas, os resultados não são bons. O valor das métricas vai diminuindo na medida em que o número de ciclos vai aumentando, como se pode observar nas Figs. 4.28(a) e (b), onde se apresentam os resultados referentes às métricas RMSD1 e RMSD3 para o PZT2. Estas métricas, nas faixas de frequência anteriores tiveram comportamento contrário, ou seja, o valor da métrica aumentava com o aumento do número de ciclos. Assim, pode-se concluir

que esta faixa de frequência não deve ser usada quando se deseja associar número de ciclos com impedância em ensaios de fadiga.



(a) Média e Desvio Padrão (RMSD1) PZT2      (b) Média e Desvio Padrão (RMSD3) PZT2

Figura 4.28- Métricas de Dano RMSD1 e RMSD3 para o PZT2 na faixa de frequência de 178 kHz a 184,2 kHz.

Para o PZT1 também não foram observados bons resultados nesta faixa de frequência, como se observa na Fig. 4.29. A métrica mais representativa segundo as faixas anteriores, RMSD5, não têm sensibilidade satisfatória para esta faixa tão alta.

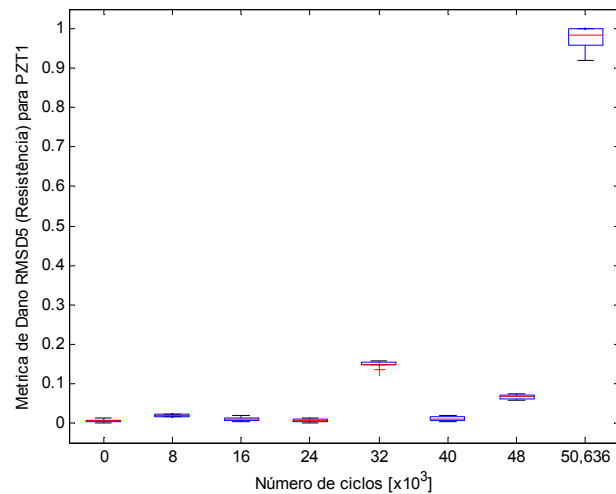


Figura 4.29 - Métrica de Dano RMSD5 para o PZT1 na faixa de frequência de 178 kHz a 184,2 kHz.

O terceiro corpo de prova apresentou uma fissura visível (Fig. 4.30) após 31.969 ciclos.

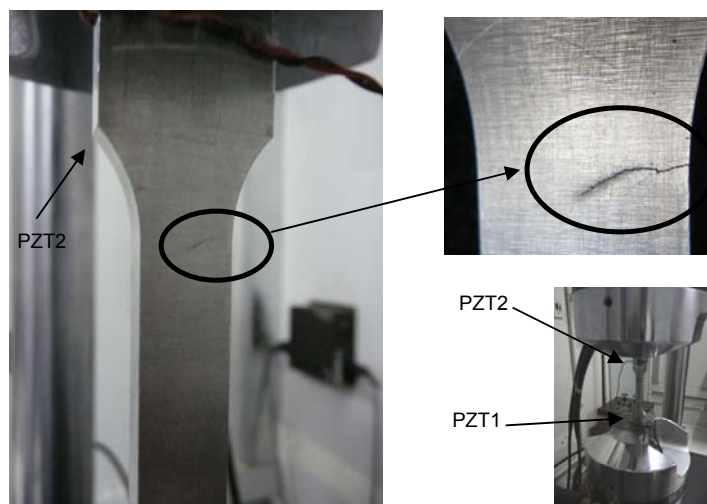
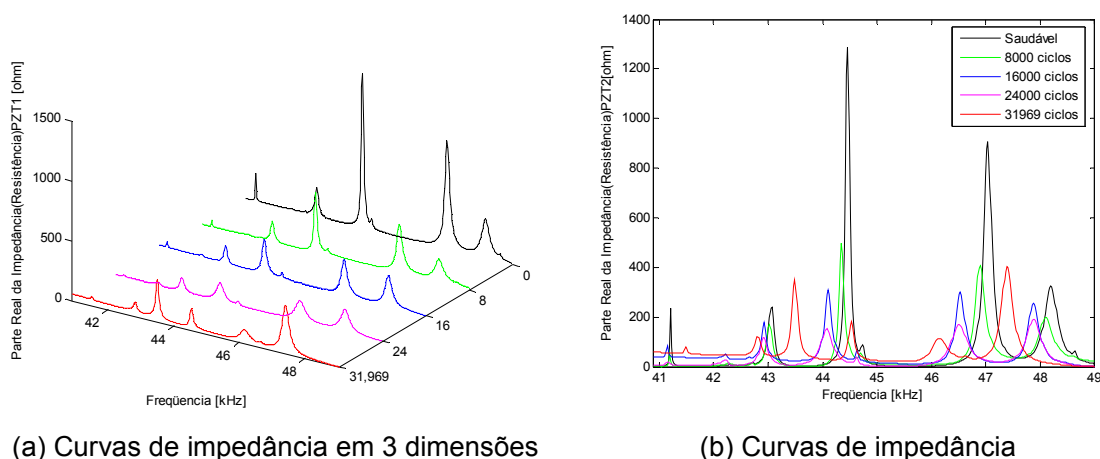


Figura 4.30- Trinca no corpo de prova 3 no ensaio de fadiga para o método de impedância.

Para este corpo de prova foram tomadas seis medições de impedância a cada 8000 ciclos até se chegar a 24.000, além de mais seis medições que foram feitas quando a trinca se tornou visível (31.969 ciclos). O processo foi repetido para as duas faixas de frequência usadas para este corpo de prova.

A primeira faixa de frequência utilizada para este último corpo de prova foi de 40,9 kHz a 49 kHz. A parte real dos sinais de impedância, medidos para o PZT1, estão na Fig. 4.31.



(a) Curvas de impedância em 3 dimensões

(b) Curvas de impedância

Figura 4.31- Sinais de impedância (parte real) para a faixa de frequência de 40,5 kHz a 49 kHz para o PZT1.

Na Fig. 4.32 se apresenta os sinais medidos para o PZT2 para esta mesma faixa de frequência.

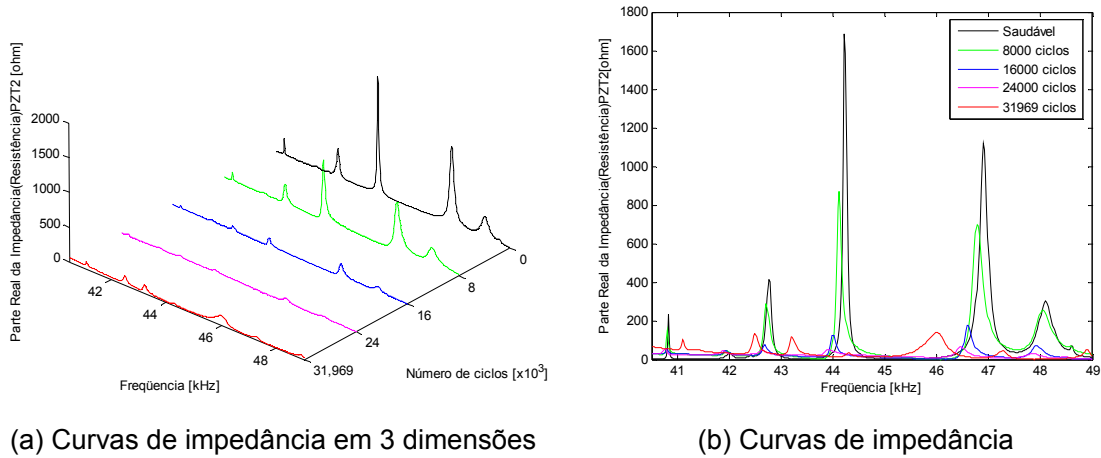


Figura 4.32- Sinais de impedância (parte real) para a faixa de frequência de 40,5 kHz a 49 kHz para o PZT2.

Para este último corpo de prova também foram testadas as dez métricas propostas para as duas faixas de frequência medidas nas duas pastilhas de PZT. Os resultados podem ser observados no anexo I. Quando foi feito o ensaio de fadiga, depois de tomar as medições para 16000 ciclos, o ensaio foi interrompido por quase cinco dias. Ao se retomar os ensaios, curiosamente verificou-se uma diminuição na tendência natural de aumento das métricas, conforme se vê nas medições entre 16000 e 24000 ciclos. Provavelmente, durante o período de interrupção, houve uma acomodação das tensões impostas ao corpo de prova nos ensaios de fadiga. A métrica que apresentou melhor comportamento foi aquela dada pelo desvio do coeficiente de correlação, Fig.4.33.

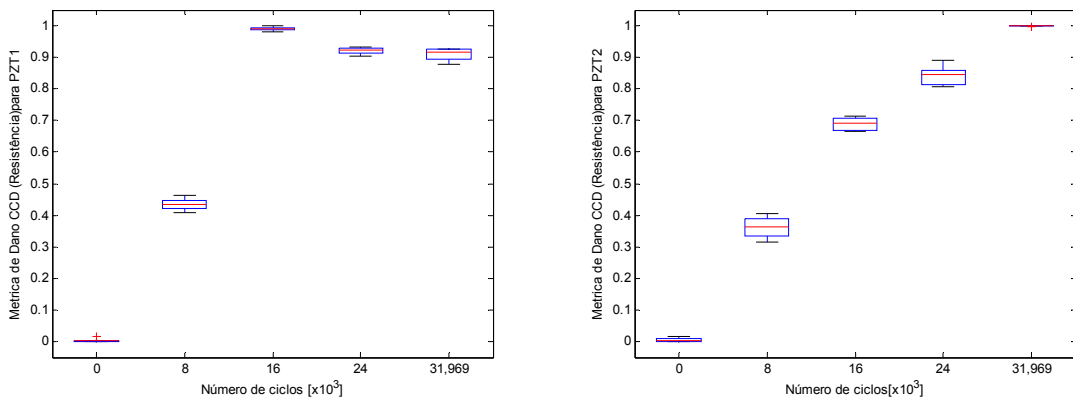
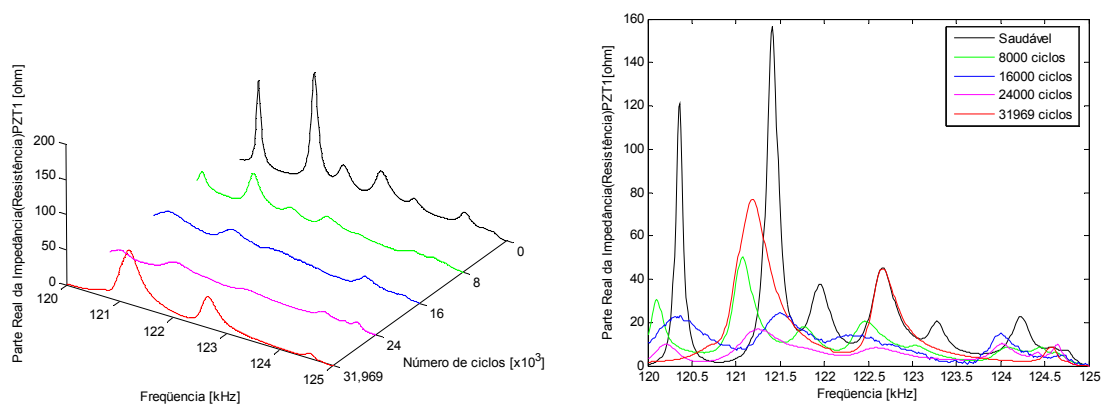


Figura 4.33- Métricas de Dano CCD para a faixa de frequência de 40,5 kHz a 49 kHz.

A métrica CCD não sofre tanto o efeito da diminuição dos valores obtidos para os sinais entre 16.000 e 24.000 ciclos. A métrica calculada para o PZT2 apresenta um melhor comportamento mesmo após interrupção dos ensaios, certamente porque ele está mais perto da trinca, Fig. 4.30.

A outra faixa de frequência utilizada para este corpo de prova foi a de 120 kHz a 125 kHz, sendo que o sinal da parte real da impedância para o PZT1 é mostrado na Fig. 4.34.

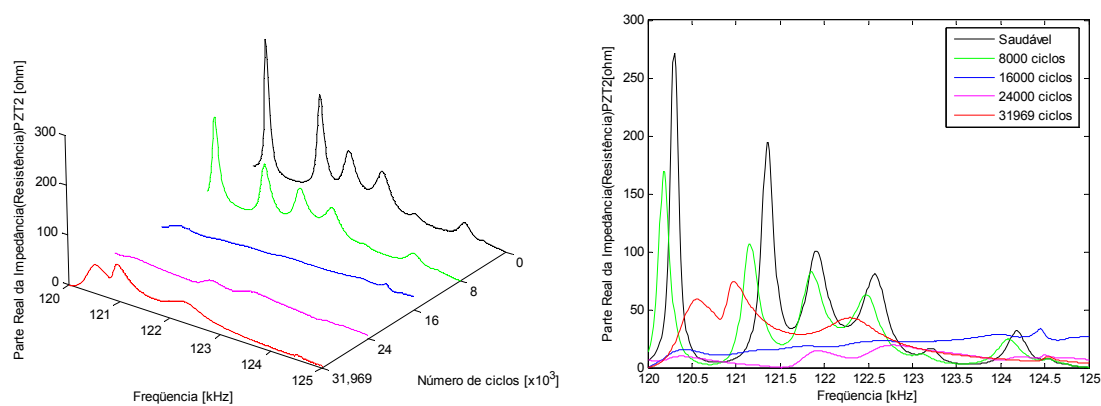


(a) Curvas de impedância em 3 dimensões

(b) Curvas de impedância

Figura 4.34- Sinais de impedância para a faixa de frequência de 120 kHz a 125 kHz para o PZT1.

Os sinais medidos para o PZT2 nesta faixa de frequência se apresentam na Fig. 4.35.



(a) Curvas de impedância em 3 dimensões

(b) Curvas de impedância

Figura 4.35- Sinais de impedância para a faixa de frequência de 120 kHz a 125 kHz para o PZT2.

As métricas calculadas para esta última faixa de frequência, para o terceiro corpo de prova, podem ser encontradas no Anexo I. Tais métricas apresentaram comportamento bastante semelhante ao que foi verificado para a faixa anterior. A diminuição no valor das métricas foi mais evidente para o PZT1 (aquele que se encontra mais distante da trinca), conforme seria de se esperar.

### 4.3 Modelo Estocástico da Fadiga

Com o fim de estabelecer uma relação entre a métrica de dano e os ciclos aplicados aos corpos de prova, construiu-se um modelo estocástico. Foram escolhidos os resultados obtidos para o corpo de prova2 do ensaio de fadiga com o método da impedância, na faixa de frequência de 39 kHz a 46 kHz, para a métrica de dano calculada pela diferença média quadrada (ASD, Eq.(3.9)).

#### 4.3.1 Avaliação da Distribuição Normal das Variáveis

Esta seção visa identificar se cada variável utilizada apresenta uma distribuição normal. Em caso positivo, significa que as variações podem ser associadas a erros aleatórios do processo de experimentação e, de outra forma, elas podem de fato ser utilizadas para representação do sistema, através de um meta-modelo.

Foi primeiramente avaliado o nível de significância do número de ciclos para  $\alpha = 0,05$ . Como neste caso o valor de p-nível (ver Fig.4.36) é muito menor que  $\alpha$ , então é rejeitada a hipótese de normalidade da distribuição dos pontos. Assim, o número de ciclos não pode ser confundido com sendo uma variável aleatória, o que permite sua efetiva utilização no processo de identificação.

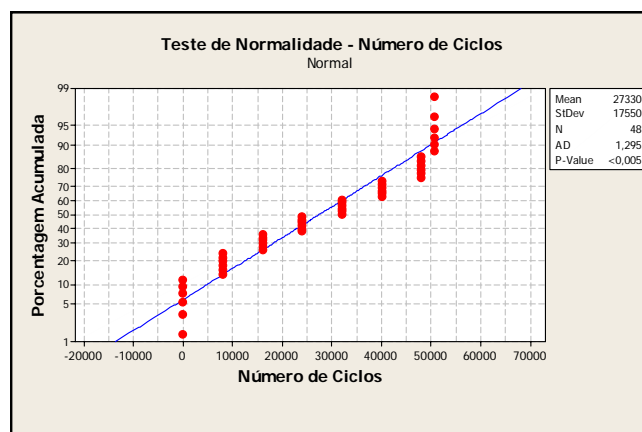


Figura 4.36- Teste de normalidade para o número de ciclos.

O mesmo é feito para a variável “Métrica de Dano ASD PZT1”, conforme ilustra a Fig. 4.37. Pode-se verificar que os pontos amostrados se afastam ainda mais da reta de distribuição de probabilidade normal acumulada do que na situação anterior. Isso aponta para a representação estatística desta métrica, o que também confirmado pelo valor de p-nível.

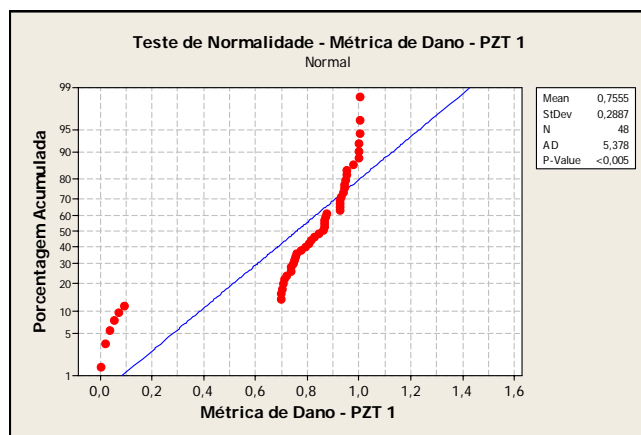


Figura 4.37- Teste de normalidade para a métrica de dano ASD PZT1.

O mesmo ocorre para a variável “Métrica de Dano ASD PZT2”, como se vê na Fig.4.38.

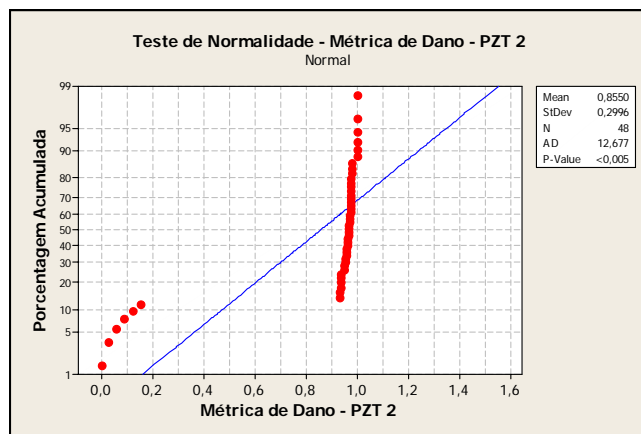


Figura 4.38- Teste de normalidade para a métrica de dano ASD PZT2.

Assim, foram consideradas as hipóteses abaixo para as três variáveis analisadas:

- $H_0$ : os dados seguem distribuição normal;
- $H_1$ : os dados não seguem a distribuição normal.

Pode-se concluir pelo teste de Anderson-Daling (onde se determina se um conjunto de dados pertence a uma distribuição específica, no caso a distribuição normal (PYCKE,2003)),

que a hipótese nula deve ser rejeitada e, portanto, as três variáveis podem ser consideradas como não aleatórias, uma vez que apresentam valores de p-nível inferiores ao nível de significância  $\alpha = 0,05$ , não obedecendo uma distribuição normal.

Concluindo esta seção, as variáveis podem ser investigadas com o propósito de geração de um meta-modelo, pois não há como confundi-las com meras oscilações de erros aleatórios durante o procedimento experimental.

#### 4.3.2. Teste de Hipóteses para as duas Pastilhas PZT

Esta seção busca identificar independentemente para as duas pastilhas de PZT, se do ponto de vista estatístico as médias das seis métricas obtidas para cada número de ciclos são as mesmas ou não. Se as médias forem iguais, obviamente as métricas obtidas não podem ser usadas para representar um meta-modelo cuja resposta seja o número de ciclos. Entretanto, se o teste de hipótese nula for rejeitado, e as médias forem diferentes, os valores das métricas das pastilhas de PZT podem ser usados na construção de um meta-modelo. Assim, o teste de hipótese é:

$H_0$ : as médias das métricas agrupadas por número de ciclos são iguais;

$H_1$ : as médias entre os grupos são diferentes.

Para fazer este teste de hipóteses, é realizada uma ANOVA (Análise de Variância) entre os grupos de cada pastilha de PZT. Para a pastilha PZT1, os dados são apresentados na Tab. 4.3.

Tabela 4.3– Valor das métricas ASD para cada uma das medições no PZT1.

<b>Repetição</b>	<b>0</b>	<b>8000</b>	<b>16000</b>	<b>24000</b>	<b>32000</b>	<b>40000</b>	<b>48000</b>	<b>50636</b>
	<b>Ciclos</b>	<b>Ciclos</b>	<b>Ciclos</b>	<b>Ciclos</b>	<b>Ciclos</b>	<b>Ciclos</b>	<b>Ciclos</b>	<b>Ciclos</b>
<b>1</b>	0,0000	0,7055	0,7896	0,8438	0,9746	0,8719	0,9482	1,0000
<b>2</b>	0,0155	0,6981	0,7752	0,7415	0,9259	0,8656	0,9418	0,9990
<b>3</b>	0,0333	0,6977	0,7569	0,7513	0,9255	0,8608	0,9357	0,9980
<b>4</b>	0,0534	0,7023	0,7462	0,8044	0,9256	0,8618	0,9429	0,9955
<b>5</b>	0,0711	0,7072	0,7367	0,8134	0,9259	0,8636	0,9467	1,0000
<b>6</b>	0,0889	0,7187	0,7339	0,8263	0,9264	0,8671	0,9504	1,0000

A ANOVA da métrica de dano ASD da pastilha PZT1 é apresentada na Tab 4.4.



Tabela 4.4- ANOVA da métrica de dano ASD do PZT1.

	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Médias	F	p-nível
<b>Regressão</b>	3,897651	7	0,556807	1159,07	0,000
<b>Residual</b>	0,019216	40	0,000480		
<b>Total</b>	3,916867	47			
$R^2=99,42\%$					

Pode-se perceber que, como o valor de p-nível é inferior ao da significância adotada  $\alpha = 0,05$ , rejeita-se a hipótese nula, ou seja, as médias entre os grupos de número de ciclos são diferentes, e, assim, a métrica de dano da pastilha PZT1 pode ser utilizada como uma variável independente no meta-modelo de representação do número de ciclos. Outra informação importante é o valor de  $R^2 = 99,42\%$ , mostrando que 99,42% da variação dos dados se devem à variação do número de ciclos. Praticamente toda a influência da mudança entre as médias está relacionada à alteração do número de ciclos.

Ao se observar o histograma dos resíduos, Fig. 4.39, nota-se que estes sugerem uma distribuição normal com média nula, ou seja, os resíduos são aleatórios.

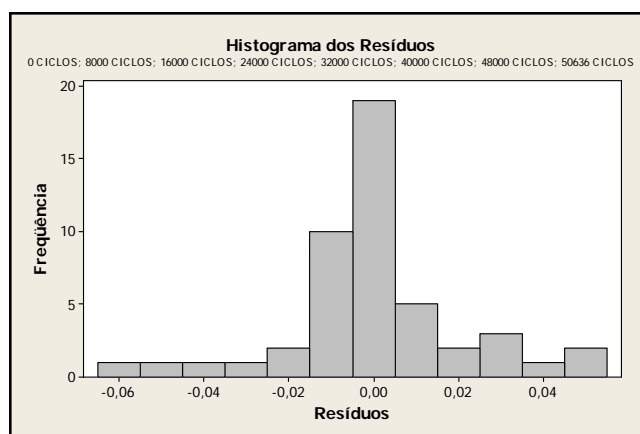


Figura 4.39 – Histograma dos Resíduos para a Métrica de dano ASD para PZT1.

O mesmo procedimento deve ser feito para a pastilha PZT2, a fim de se avaliar se as informações das métricas de dano desta pastilha podem ser também definidas como variáveis independentes para um meta-modelo de regressão capaz de representar o número de ciclos de um ensaio de fadiga. As informações sobre as métricas de dano estão na Tab.4.5.

Tabela 4.5 – Valor das métricas ASD para cada uma das medições no PZT2.

<b>Repetição</b>	<b>0</b>	<b>8000</b>	<b>16000</b>	<b>24000</b>	<b>32000</b>	<b>40000</b>	<b>48000</b>	<b>50636</b>
	<b>Ciclos</b>	<b>Ciclos</b>	<b>Ciclos</b>	<b>Ciclos</b>	<b>Ciclos</b>	<b>Ciclos</b>	<b>Ciclos</b>	<b>Ciclos</b>
<b>1</b>	0,0000	0,9307	0,9594	0,9653	0,9740	0,9668	0,9733	0,9990
<b>2</b>	0,0251	0,9324	0,9568	0,9635	0,9733	0,9677	0,9746	0,9983
<b>3</b>	0,0570	0,9337	0,9536	0,9617	0,9741	0,9688	0,9755	0,9989
<b>4</b>	0,0870	0,9351	0,9515	0,9597	0,9751	0,9700	0,9767	0,9989
<b>5</b>	0,1203	0,9365	0,9480	0,9578	0,9757	0,9716	0,9776	0,9991
<b>6</b>	0,1515	0,9354	0,9475	0,9569	0,9746	0,9726	0,9767	1,0000

A ANOVA da métrica de dano ASD do PZT2 é apresentada na Tab 4.6.

Tabela 4.6- ANOVA da métrica de dano ASD do PZT1.

	<b>Soma dos quadrados</b>	<b>Graus de liberdade</b>	<b>Médias</b>	<b>F</b>	<b>p-nível</b>
<b>Regressão</b>	4,202939	7	0,600420	1437,59	0,000
<b>Residual</b>	0,016706	40	0,000418		
<b>Total</b>	4,219645	47			
$R^2=99,53\%$					

Conforme é observado nesta ANOVA para as métricas de dano em relação ao número de ciclos para a pastilha PZT 2, o valor de p-nível é inferior ao nível de significância, sendo então descartada a hipótese nula de que as médias são iguais. Esta variável pode também ser utilizada como uma variável independente para a construção de um meta-modelo de representação do número de ciclos em um ensaio de fadiga.

O histograma dos resíduos, Fig.4.40, é apresentado para comprovar que a variação entre os sinais para a métrica de dano da pastilha PZT2 é inferior ao encontrado para a pastilha PZT1.

Com esta etapa ficou demonstrado através dos testes de hipótese, para ambas as métricas de dano calculadas para as duas pastilhas de PZT, que as médias das métricas agrupadas por número de ciclos não são as mesmas. Com isto, um meta-modelo representativo do número de ciclos de fadiga pode ser gerado com as duas variáveis independentes apontadas, a saber, a métrica de dano ASD do PZT1 e a métrica do dano ASD do PZT 2.

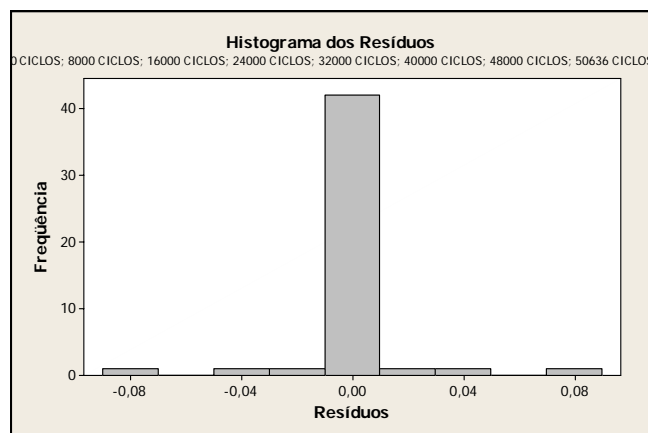


Figura 4.40 – Histograma dos Resíduos para a Métrica de dano ASD para PZT2.

#### 4.3.3. Análise de Correlação

A análise de correlação entre as variáveis CICLOS e PZT1, assim como CICLOS e PZT2 são feitas pra determinar o grau de relação linear entre elas. Assim, busca-se identificar a possibilidade de um meta-modelo de representação de CICLOS ser linear.

A correlação entre as duas variáveis PZT1 e PZT2 serve para verificar se o comportamento de ambas é similar, pois os dois sofrem a mesma influência de CICLOS de forma comum. Na Tab. 4.7 se apresenta os resultados da análise de correlação envolvendo CICLOS e Métrica de Dano ASD do PZT1, do PZT2, e dos PZT1 e PZT2 juntos, respectivamente.

Tabela 4.7- Análise de correlação.

	CICLOS e PZT1	CICLOS e PZT2	PZT1 e PZT2
<b>Correlação</b>	0,808	0,637	0,960

Fazendo a análise de correlação entre os dados pode-se perceber: a) a correlação entre o número de ciclos e o PZT1 é mais linear que a encontrada para o número de ciclos e o PZT2. Isto porque a correlação avalia apenas a relação de linearidade entre as variáveis, não permitindo se fazer afirmações sobre outros tipos de relações (quadráticas, logarítmicas, exponenciais); b) a relação linear entre os PZTs é elevada, como se esperava, pois os dois PZTs possuem um comportamento bastante similar.

Como as duas variáveis são correlacionadas, poder-se-ia criar um meta-modelo com apenas uma das duas variáveis. Entretanto, como mostra a Fig. 4.15(a) para as métricas de dano para a pastilha PZT1, os valores para o número de ciclos iguais a 32000 não estão em conformidade com o esperado. Assim, ao se adicionar mais uma variável, pode-se contornar

o problema para os casos que fogem do comportamento esperado através da inclusão de mais de uma variável. Por este motivo, é importante manter, também, as informações das métricas da pastilha PZT2.

#### 4.3.4. Análise por STEPWISE

Esta avaliação serve para comprovar uma das conclusões da seção anterior quanto à necessidade ou não da participação da variável PZT2.

O procedimento de *stepwise* é um processo automatizado em que um meta-modelo por regressão é criado e as variáveis independentes são adicionadas e retiradas até que um meta-modelo mais adequado e representativo seja obtido (MINGOTI, 2005). Com isto, o processo permite a obtenção das interações envolvidas, das variáveis participantes em cada interação e dos valores dos coeficientes de determinação ajustados  $R^2$ . É importante lembrar que estes valores de  $R^2$  representam o quanto a variação da(s) variável(eis) independente(s) é(são) responsável(eis) pela variação da variável dependente. Na tab. 4.8, são apresentados os valores de  $R^2$  para as variáveis independentes da Métrica de dano ASD para PZT1 e PZT2, com respeito à variável dependente Ciclos.

Tabela 4.8- Análise de STEPWISE para ciclos versus Métrica de dano ASD PZT1 e Métrica de dano ASD PZT2.

Número de Variáveis	$R^2$	Métrica de dano ASD PZT1	Métrica de dano ASD PZT2
1	64,6%	X	
1	39,3%		X
2	89,1%	X	X

Como pode ser visto, tem-se maior representatividade para o uso de um modelo quando são usadas as duas variáveis ao mesmo tempo (89,1%). O menor valor de representatividade é verificado pela métrica de dano do PZT2. Este resultado tem a ver com a curva da métrica de dano mostrada no diagrama de caixa desta pastilha (Fig. 4.15 (b)) que é bem menos inclinada que a que se refere a PZT1, sofrendo então menor influência do número de ciclos aplicados. Fisicamente, isto se deve ao fato da pastilha PZT2 estar colada mais distante da trinca que surgiu durante o ensaio de fadiga. Isto também pode explicar a maior variação dos sinais das métricas de dano para a pastilha PZT1.

#### 4.3.5. Meta-modelo de Regressão

Por fim, após a avaliação da representatividade das variáveis independentes para a construção de um meta-modelo representativo do número de ciclos de um ensaio de fadiga, pode-se finalmente partir para a determinação dos coeficientes deste meta-modelo.

Entre os diferentes tipos de meta-modelo, estudou-se neste trabalho apenas dois, sendo representados ou por polinômios, ou por *splines*. Primeiramente, determinou-se qual dos dois meta-modelos apresenta maior adequação ao sistema. Como o foco desta dissertação não é o de estudar os meta-modelos, não será apresentado o detalhamento de como são formulados. A técnica foi utilizada apenas como uma ferramenta de análise do processo de SHM nos ensaios de fadiga. Maiores informações sobre este assunto podem ser encontradas em Santos (2002) e Moura (2004).

Na Fig.4.41(a) apresenta-se o gráfico do meta-modelo do tipo polinômio de grau seis e o meta-modelo do tipo *spline*, considerando como variável somente a métrica de dano ASD para o PZT1.

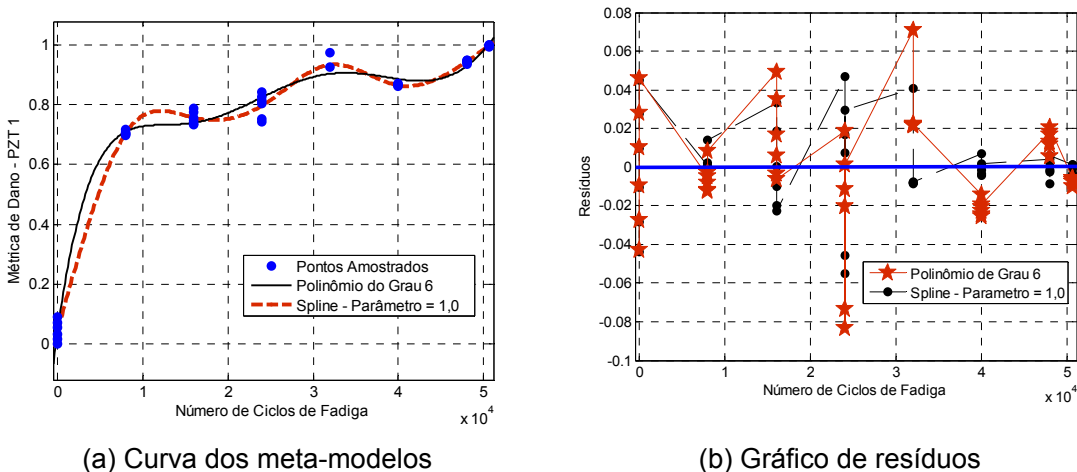


Figura 4.41- Gráficos de comparação entre o meta-modelo tipo polinômio de grau seis e o meta-modelo tipo *spline* para a variável métrica de dano ASD PZT1.

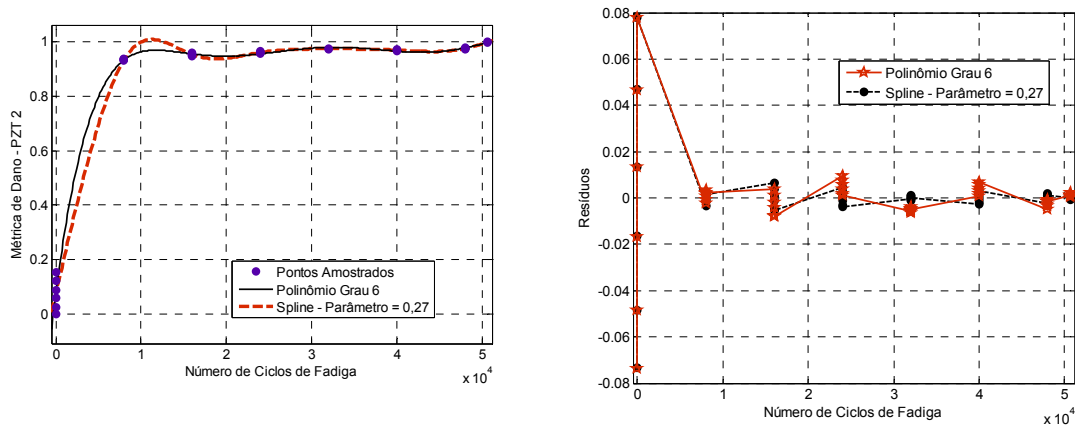
Estudando os resíduos dos dois modelos, Fig.4.41(b), pode-se perceber que os resíduos do ajuste por polinômio apresentam uma melhor distribuição em torno de zero.

Então, pode-se concluir que o polinômio de grau seis, Eq. (4.5), é o que melhor se adequou para representar a relação entre a métrica de dano ASD PZT1 e o número de ciclos.

$$F(x) = -0,0688x^6 + 0,1335x^5 + 0,2065x^4 - 0,2539x^3 - 0,1987x^2 + 0,2004x + 0,8681. \quad (4.5)$$

Na Eq.(4.5),  $F(x)$  representa a métrica de dano ASD PZT1 e  $x$  representa o número de ciclos.

Considerando-se agora como variável a métrica de dano ASD PZT2, na Fig.4.42(a) se apresenta o gráfico do meta-modelo do tipo polinômio de grau seis e o meta-modelo do tipo *spline*.



(a) Curva dos meta-modelos

(b) Gráfico de resíduos

Figura 4.42- Gráficos de comparação entre o meta-modelo polinômio de grau seis e o meta-modelo *spline* para a variável métrica de dano ASD PZT2.

Pode-se observar que a métrica do PZT2 apresenta melhor ajuste do que a do PZT1. Ao estudar os resíduos dos dois meta-modelos para o PZT2, Fig.4.42(b), pode-se perceber que tanto o baseado no *polinômio* como o baseado no *spline* têm uma boa distribuição em torno de zero, ou seja, ambos representam bem o fenômeno em estudo.

Estudando as duas métricas (para PZT1 e PZT2) pode-se concluir que o meta-modelo tipo polinômio é o mais adequado para estas duas variáveis. O polinômio de grau seis para a métrica de dano ASD PZT2 é representado pela Eq.(4.6). Nesta equação  $F(x)$  simboliza a métrica de dano ASD PZT2 e  $x$  simboliza o número de ciclos.

$$F(x) = -0,0667x^6 + 0,1132x^5 + 0,1098x^4 - 0,1766x^3 - 0,0489x^2 + 0,0646x + 0,9686. \quad (4.6)$$

Ficou então demonstrado que o meta-modelo tipo polinômio é o mais indicado no caso estudado. Tentou-se então baixar o grau do polinômio para 5 para simplificar o cálculo.

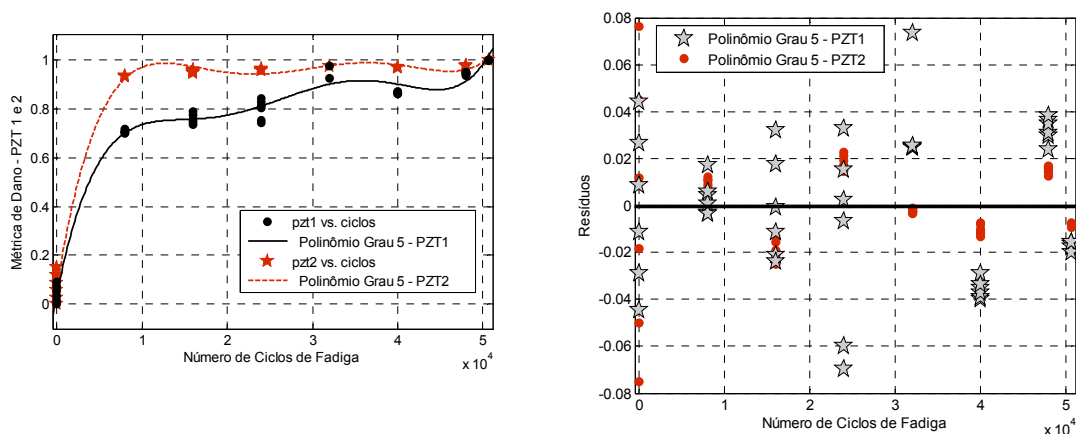
A Eq. (4.7) mostra o polinômio de grau cinco para o PZT1. Nela  $F(x)$  representa a métrica de dano ASD PZT1 e  $x$  representa o número de ciclos.

$$F(x) = 0.1663x^5 - 0,0020x^4 - 0,3106x^3 - 0,0443x^2 + 0,2172x + 0,8518 \quad (4.7)$$

O polinômio de grau cinco para o PZT2 é dado pela Eq. (4.8). Nela  $F(x)$  representa a métrica de dano ASD PZT2 e  $x$  representa o número de ciclos.

$$F(x) = 0.1450x^5 - 0,0923x^4 - 0,2315x^3 + 0,1008x^2 + 0,0809x + 0,9528. \quad (4.8)$$

Comparou-se então os meta-modelos de grau 5 para PZT1 e PZT2, conforme se vê na Fig. 4.43(a).



(a) Curva dos meta-modelos

(b) Gráfico de resíduos

Figura 4.43- Gráficos de comparação entre os polinômios de grau cinco para a métrica de dano ASD para PZT1 e PZT2.

Estudando agora os resíduos dos dois modelos, Fig.4.43(b), pode-se perceber que os dois apresentam uma boa distribuição em torno de zero.

Deste estudo verificou-se que a curva para a métrica de dano ASD para PZT2 é menos acentuada que a de PZT1. Também se pode observar que os pontos amostrais para PZT2 são menos dispersos que os de PZT1, indicando um melhor ajuste para PZT2. Mesmo assim, caso um único PZT seja considerado, é melhor escolher PZT1, devido à inclinação mais acentuada da curva correspondente, o que favorece a identificação. Por este motivo, para criar um modelo para a previsão do número de ciclos, foi escolhido PZT1. A curva de regressão de um polinômio de grau cinco para PZT1 se apresenta na Fig.4.44.

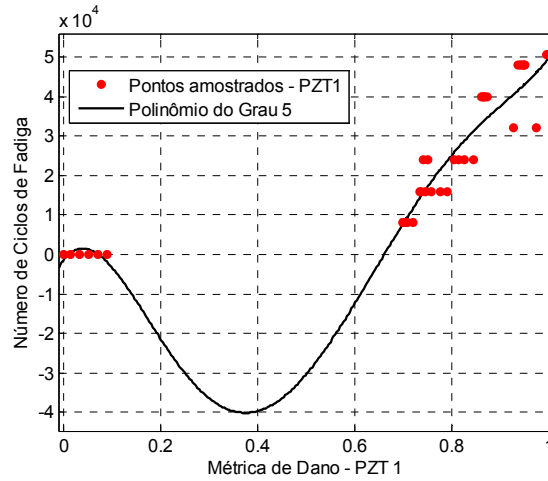


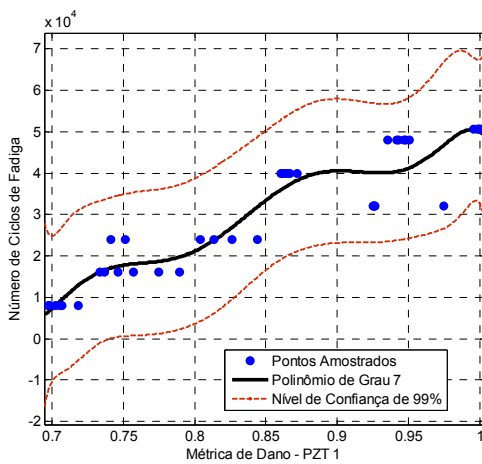
Figura 4.44- Curva de Polinômio de grau cinco com variável independente Métrica de dano ASD PZT1

O polinômio que descreve esta curva é dado pela Eq.(4.9):

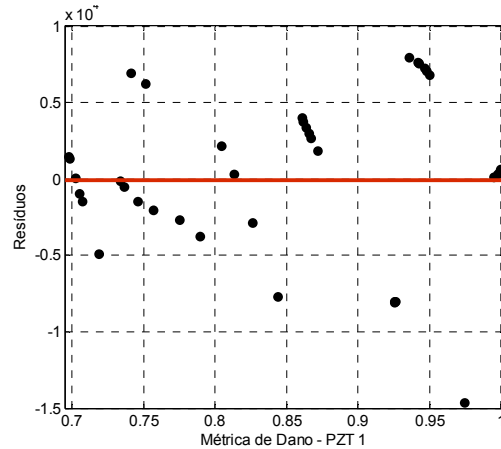
$$F(x) = 4760x^5 + 14950x^4 - 7736x^3 - 21320x^2 + 49380x + 18150, \tag{4.9}$$

onde  $F(x)$  representa o número de ciclos e  $x$  representa a métrica de dano ASD PZT1.

Para se ter um modelo mais representativo, retirou-se os pontos correspondentes às métricas antes do ensaio (sem impor os ciclos de tensão sobre o corpo de prova), e obteve-se a curva da Fig.4.45(a), para um polinômio de grau sete.



(a) Curva do polinômio



(b) Gráfico de resíduos

Figura 4.45- Gráficos do polinômio de grau sete para a variável independente métrica de dano ASD PZT1.



O polinômio de grau sete que representa esta curva é dado pela Eq.(4.10), onde  $F(x)$  representa o número de ciclos e  $x$  representa a métrica de dano ASD PZT1.

$$F(x) = -5966x^7 - 7150x^6 + 24420x^5 + 233530x^4 - 30500x^3 - 21120x^2 + 24590x + 35200. \quad (4.10)$$

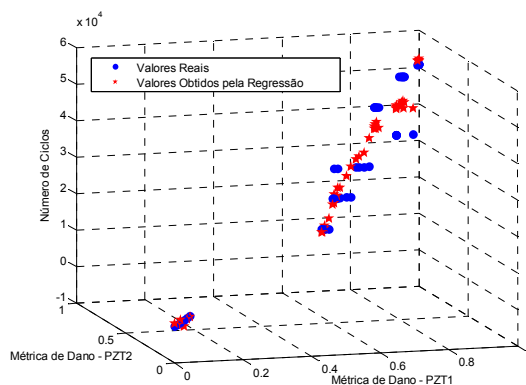
Finalmente, construiu-se um meta-modelo com duas variáveis independentes, a saber: a métrica de dano ASD PZT1 e a métrica de dano ASD PZT2. A variável dependente é o número de ciclos. O polinômio obtido é dado pela Eq.(4.11).

$$N^{\circ} \text{ Ciclos} = b_1 + b_2x_1 + b_3x_2 + b_4x_1^2 + b_5x_2^2 + b_6x_1x_2. \quad (4.11)$$

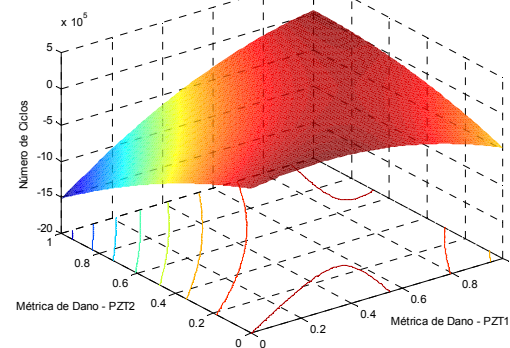
onde  $x_1$  é a métrica de dano ASD PZT1,  $x_2$  é a métrica de dano ASD PZT2 e os valores dos coeficientes  $b$  são indicados abaixo:

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ b_4 \\ b_5 \\ b_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 811,0281 \\ -985589,139 \\ 577649,150 \\ -529230,007 \\ -1051960,144 \\ 2040637,801 \end{bmatrix}$$

Na Fig. 4.46(a) pode-se observar tanto os valores obtidos nas medições experimentais como os valores calculados com o meta-modelo (polinômio da Eq. 4.8). Já a Fig.4.49(b) apresenta a superfície de resposta, sendo que no plano estão ilustradas as curvas de nível desta superfície, facilitando sua visualização.



(a) Curva do polinômio



(b) Gráfico de resíduos

Figura 4.46- Gráficos de polinômio com as duas variáveis independentes Métrica de dano ASD PZT1 e Métrica de dano ASD PZT2.

Se todos os pontos fossem corretamente classificados, o modelo apresentaria um acerto de 100%. Entretanto, como o meta-modelo calculou quatro valores falsos em 48 experimentos, sua representatividade é de 91,67%. Na Fig. 4.47 podem-se visualizar os resíduos do modelo de regressão, que é a diferença entre os valores obtidos e os reais.

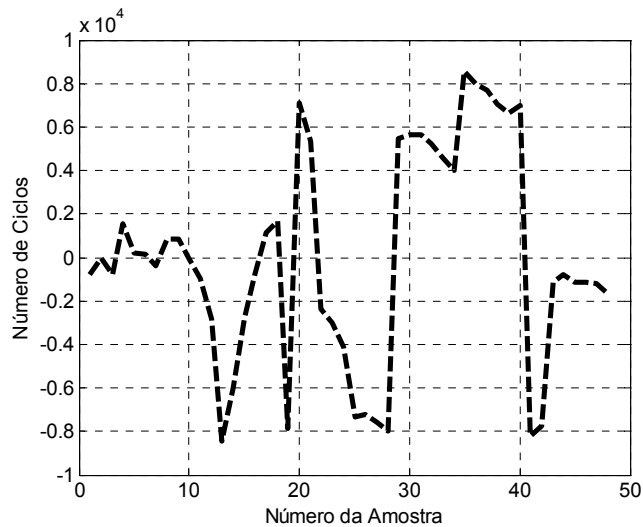


Figura 4.47- Resíduos para os polinômio com duas variáveis independentes: Métricas de dano ASD PZT1 e Métricas de dano ASD PZT2.

#### 4.3.6. Análise de Discriminantes

Para confirmar a capacidade de distinção entre grupos do número de ciclos de fadiga em relação às métricas de danos para as duas pastilhas de PZT, foi realizada a análise de discriminante (MINGOTI, 2005), conferindo que cada amostra do experimento pode ser identificada corretamente pelo grupo do número de ciclos correspondente. No Anexo II, pode-se observar todos os dados obtidos na análise de discriminantes. Pode-se destacar que para todos os casos, no momento de classificar as medições segundo os grupos de ciclos, algumas medições tiveram valores baixos de probabilidade, como é o caso da medição 37, que pertence ao número de ciclos 48000 e foi classificada corretamente, porém com apenas 52,2% de probabilidade de pertencer a este grupo como se observar tab. 4.9. Isto aconteceu também com as medições 38 e 39, o que pode ter ocorrido devido ao salto verificado para a métrica ASD no PZT1 ao chegar aos 32000 ciclos. A análise de discriminante é, portanto, uma ferramenta interessante para a identificação do número de ciclos em ensaios de fadiga usando a métrica ASD, partindo dos sinais das duas pastilhas de PZT.

Tabela 4.9 – Destaque da classificação das observações.

<b>Observação</b>	<b>Grupo Verdadeiro</b>	<b>Grupo Identificado</b>	<b>Grupo</b>	<b>Distancia quadrada</b>	<b>Probabilidade</b>
37	48000	48000	0	162338	0
			8000	1001	0
			16000	1038	0
			24000	18	0
			32000	-20	0,478
			40000	475	0
			48000	-20	0,522
			50636	2352	0
38	48000	48000	0	156209	0
			8000	964	0
			16000	791	0
			24000	21	0
			32000	-22	0,389
			40000	414	0
			48000	-23	0,611
			50636	2286	0
39	48000	48000	0	150643	0
			8000	929	0
			16000	613	0
			24000	22	0
			32000	-20	0,455
			40000	357	0
			48000	-21	0,545
			50636	2316	0

## CAPÍTULO V

### CONCLUSÃO E PERSPECTIVAS PARA TRABALHOS FUTUROS

Quanto ao estudo realizado na placa de alumínio, os resultados mostrados neste trabalho permitem afirmar que as métricas denominadas RMSD1, RMSD3 e MAPD são as mais sensíveis, à vista de sua utilização num processo de monitoramento estrutural pela técnica da impedância eletromecânica. Numa situação real, recomenda-se testar todas as métricas e identificar as mais sensíveis para o tipo específico de dano que está sendo monitorado. As métricas que apresentam menor desvio padrão para medições feitas para um mesmo estado da estrutura (com ou sem falha) são as mais indicadas para reduzir a influência das condições ambientais. Destaca-se que, para o estudo em tela, as métricas que se mostraram mais sensíveis aos danos simulados pela massa adicional são exatamente as mesmas com maior robustez do ponto de vista dos efeitos ambientais.

No que diz respeito à influência da perda de um dos rebites da estrutura aeronáutica, pode-se concluir que todas as métricas apresentaram boa sensibilidade à perda do rebite. Isto porque a diferença no valor das métricas entre os estados saudáveis e o estado sem rebite é bastante evidente. Pode-se ressaltar que as melhores métricas determinadas para este estudo de caso são as seguintes: o coeficiente de correlação, CCD, a diferença média quadrada, ASD e a somatória da diferença ao quadrado, M. Além disso, foram realizados testes de hipótese que demonstraram estatisticamente que as métricas de dano selecionadas foram mesmo capazes de reconhecer adequadamente a perda do rebite no painel aeronáutico estudado.

No monitoramento do ensaio de fadiga observou-se que a melhor faixa de monitoramento coincide com aquela entre 39 e 46 kHz. Por outro lado, verificou-se que faixas envolvendo frequências muito elevadas levaram a resultados insatisfatórios, sendo portanto tais faixas não recomendadas para o método da impedância eletromecânica.

Ainda com relação ao ensaio de fadiga, verificou-se que, para o último corpo de prova estudado, depois de tomar as medições para 16000 ciclos, o ensaio foi interrompido por quase cinco dias. Ao se retomar os ensaios, curiosamente verificou-se uma diminuição na tendência natural de aumento das métricas, conforme se verificou nas medições entre 16000 e 24000 ciclos. Conforme comentado anteriormente, é provável que, durante o período de interrupção, houve uma acomodação das tensões impostas ao corpo de prova nos ensaios de fadiga. Neste caso, a métrica que apresentou melhor comportamento foi a calculada através do desvio do coeficiente de correlação.

Finalmente, foram realizados testes de hipótese para avaliar a métrica que apresentou melhores resultados no segundo corpo de prova usado nos ensaios de fadiga. Ficou demonstrado através destes testes, para ambas as métricas de dano calculadas para as duas pastilhas de PZT, que as médias das métricas agrupadas por número de ciclos não são as mesmas. Com isto, um meta-modelo representativo do número de ciclos de fadiga pode ser gerado com duas variáveis independentes, ou seja, a métrica de dano ASD do PZT1 e a métrica do dano ASD do PZT 2. Foi também realizado um teste de correlação. Como as duas variáveis anteriormente citadas são correlacionadas, poder-se-ia criar um meta-modelo com apenas uma das duas variáveis. Entretanto, verificou-se, para as métricas de dano para a pastilha PZT 1, que os valores para o número de ciclos igual a 32000 não estão em conformidade com o esperado. Assim, ao se adicionar mais uma variável, pode-se contornar o problema para os casos que fogem do comportamento esperado, através da simples inclusão de mais uma variável. Por este motivo, foram mantidas também as informações das métricas da pastilha PZT 2. Foram ainda construídos meta-modelos do tipo polinomial e do tipo *spline* para identificar qual deles representaria melhor o fenômeno estudado, verificando-se que o primeiro meta-modelo levou a melhores resultados.

A maior contribuição deste trabalho tem a ver com a realização de um estudo sistemático envolvendo as várias métricas propostas pela literatura. Foi evidenciada a necessidade de, numa aplicação específica, calcular todas as métricas para selecionar aquela que tem maior sensibilidade. Esta necessidade se torna muito importante, especialmente quando o interesse está nas falhas consideradas incipientes.

Outra contribuição interessante decorre do uso da técnica da impedância eletromecânica no monitoramento de ensaios de fadiga, usando corpos de prova em condições de laboratório. Ficou claro que existe uma correlação importante entre o número de ciclos dos ensaios e a variação da impedância. Acredita-se que, numa aplicação específica, seja possível definir a proximidade da vida útil de um componente estrutural pela avaliação da impedância eletromecânica.

A preocupação em se verificar a sensibilidade da técnica em situações consideradas limites tais como a simples adição de uma pequena massa (1% do peso total da estrutura) ou a remoção de um dos rebites de um painel aeronáutico, torna a técnica proposta bastante promissora à vista de sua aplicação em situações reais de monitoramento.

Como perspectivas para trabalhos futuros, pode-se mencionar:

- Estudar novas métricas de dano que levem em consideração o deslocamento das curvas ao longo do eixo das freqüências, uma vez que as métricas encontradas na literatura preocupam-se fundamentalmente com variações ao longo do eixo vertical e com mudanças na forma do sinal de impedância coletado.
- Pensando em aplicações industriais, deve-se substituir o medidor de impedância utilizado por um circuito mais simples e portátil. O equipamento utilizado é de alto custo, pesado e fornece muitas funções desnecessárias para utilização em SHM.
- O uso de técnicas de redes neurais artificiais e de lógica nebulosa pode contribuir para a etapa seguinte do processo de monitoramento, ou seja, a determinação da localização e da severidade para tipos comuns de danos encontrados em aplicações bem definidas.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANBT, **NBR 6152**: Materiais metálicos – Ensaio de tração à temperatura ambiente. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2002. 35 p.

BHALLA, S.; NAIDU, A. S. K.; SOH, C. K. Influence of Structure– Actuator Interactions and Temperature on Piezoelectric Mechatronic Signatures for NDE. In: **Proceedings of ISSS-SPIE 2002 International Conference on Smart Materials Structures and Systems**, December 12–14 de 2002, Bangalore, India (paper no ISSS-SA-502).

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**. December 16-18 de 2002, Melbourne, Australia.

BANKS, H.T.; SMITH, R.C.; WANG, Y. **Smart Materials Structures – Modeling, Estimation and Control**. Paris: John Wiley & Sons, 1996.

BRANCO, C. A. G. M.; **Mecânica dos Materiais**. 2.ed. Lisboa: Fundação Calouste Guelbenkian, 1994. 1098 p.

BRAY, D. E.; McBRIDE, D. **Nondestructive Testing Techniques**. N.Y.: AWiley-Interscience Publication, 1992. 765 p.

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 the 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.

DOSCH, J.J.; INMAN, D. J.; GARCIA, E. A Self sensing piezoelectric actuator for collocated control. **Journal of Intelligent Material System and Structures**, n.3, p. 166-185. 1992.

FARRAR, C.R.; LIEVEN, N.A.J.; BEMENT, M.T., An Introduction to Damange Prognosis. **Damage Prognosis for Aerospace, Civil and Mechanical System**, Wiley, Cap.1, pp. 1-12. 2005.

FURTADO, R.M. **Identificação de Falhas Estruturais Usando Sensores e Atuadores Piezelétricos e Redes Neurais Artificiais**. 2004. 152 f. Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira.

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

GIURGIUTIU, V.; ROGERS, C. A., Recent Advancements in the Eletro-Mechanical (E/M) Impedance Method for Structural Health Monitoring and NDE. In: **5<sup>th</sup> Annual International Symposium on Structures and Materials**, 1998, San Diego. Proc. SPIE **3329** 536-47.

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

GIURGIUTIU, V.; ZAGRAI, A. Embedded Self-Sensing Piezoelectric Active Sensors for On-Line Structural Identification. **Journal of Vibration and Acoustics**. Vol. 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**. Vol. 1. p. 41-61. 2002.

GIURGIUTIU, V.; ZAGRAI, A. N.; BAO, 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**. Vol. 6. NO. 1. p. 3-21. 2003.



GIURGIUTIU, V.; ZAGRAI, A. Damage Detection in Thin Plates and Aerospace Structure with the Electro-Mechanical Impedance Method. **Structural Health Monitoring**. V. 4(2), p. 99-118, 2005.

GRISSE, B. L. **Considerations of the Impedance Method, Wave Propagation, and Wireless Systems for Structural Health Monitoring**. 2004. 108 f. Tese de Mestrado – Virginia Polytechnic Institute and State University, Virginia.

LEMISTRE, M., GOUYON, R., KACZMAREK, H.; BALAGEAS, D., Damage Localization in Composite Plates Using Wavelet Transform Processing on Lamb Wave Signals, **Second International Workshop on Structural Health Monitoring**, 1999, Stanford, USA.

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

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

MINGOTI, S. A. **Análise de Dados Através de métodos de estatística multivariada: Uma abordagem Aplicada**. 1 Ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2005. 295 p.

MOURA Jr, J. R. V.; STEFFEN Jr, V. **Impedance-Based Health Monitoring: Frequency Band Evaluation**. XXII IMAC. Dearborn, MI, USA. 2004.

MOURA JR., J. R. V. **Métodos de Identificação de Falhas em Estruturas Aeronáuticas Utilizando Meta-Modelagem Aliada às Técnicas de Impedância e Estruturas Inteligentes**. 2004. 158 F. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

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.

NAIDU, A. S. K.; SOH, C. K. Damage severity and propagation characterization with admittance signatures of piezo transducers. **Journal Smart Materials and Structures**. V. 13, p. 393-403, fevereiro, 2004.

NETO, B. B.; SCARMINIO, I. S.; BRUNS, R. E. **Como Fazer Experimentos: Pesquisa e desenvolvimento na ciência e na indústria**. 2 ed. Campinas: Editora Unicamp, 2003. 401 p.

PARK, G.; KABEYA, K.; CUDNEY, H. H.; INMAN, D. J. Impedance- Based Structural Health Monitoring for Temperature Varying Applications. **JSME International Journal**. Vol. 42. No. 2. p. 249–258. 1999a.

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. Vol. 3670. p. 461–469. 1999b.

PARK, G.; CUDNEY, H.; INMAN, D. J. Impedance-Based Health Monitoring of Civil Structural Components. **ASCE Journal of Infrastructure Systems**. Vol. 6. No. 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**. Vol. 11. No. 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**. Vol. 30. No. 10. p. 1463–1474. 2001.

PARK, G.; SOHN, H.; FARRAR, C. R.; INMAN, D. J. Overview of Piezoelectric Impedance-Based Health Monitoring and Path Forward. **The Shock and Vibration Digest**. V.35, Issue 6. 2003. p. 85-92.

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.

PEAIRS, D. M., **Development of a Self-Sensing and Self-Healing Bolted Joint**. 2002.93 f. Tese de Mestrado - Virginia Polytechnic Institute and State University, Virginia.

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.

PEAIRS, D. M.; INMAN, D. J.; PARK, G. Circuit Analysis of Impedance-based Health Monitoring of Beams Using Spectral Elements. **Structural Health Monitoring**. v. 6, p. 81-94. 2007.

PYCKE, J. R.; Multivariate extension of the Anderson-Darling process. **Statistics & Probability Letters**. v. 63, p 387-399, 2003.

RAGHAVAN, A.; CESNIK, C. E. S. Lamb-Wave Based Structural Health Monitoring. **Damage Prognosis for Aerospace, Civil and Mechanical System**, Wiley, Cap.11, pp. 235-274. 2005.

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

SANTOS, M. I. C. S. R. **Construção de Metamodelos de Regressão não Linear para Simulação de Acontecimentos Discretos**. 2002. 177p.

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**. Vol. 9. p. 533–542. 2000.

SOUZA, S. A. **Ensaios mecânicos de materiais metálicos**: Fundamentos teóricos e práticos. 5 ed., São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda., 2000. 286 f. Tese de doutorado – Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa.

SUN, F.P.; CHAUDHY, Z.; LIANG, C.; ROGERS, C.A. Truss Structure Integrity Identification Using PZT Sensor–Actuator. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**. Vol. 6. p134–139. 1995.

TEBALDI, A. **Detecção de Falhas Estruturais Usando Sensores e Atuadores Piezelétricos e Algoritmos Genéticos**, 2003. 105 f. Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira.

TODD, M. D. Optical-Based Sensing. **Damage Prognosis for Aerospace, Civil and Mechanical System**, Wiley, Cap.17, pp. 343-362. 2005.

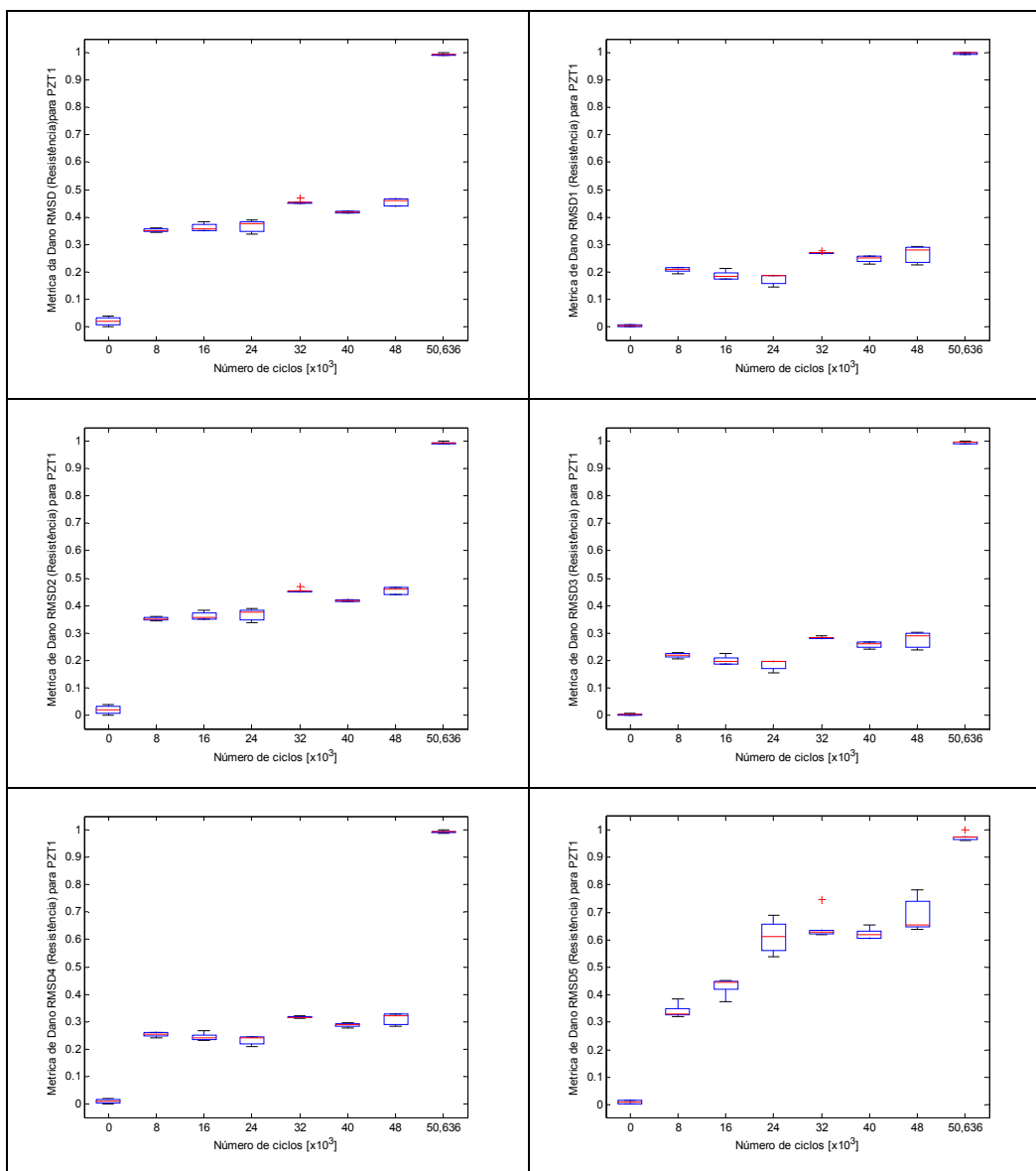
TSENG, K. K-H.; NAIDU, A. S. K. Non-parametric damage detection and characterization using smart piezoceramic material. **Journal Smart Material and Structures**. V.11, p. 317-329, maio. 2002.

## Anexo I

### MÉTRICAS DE DANO PARA ENSAIOS DE FADIGA

Neste anexo são apresentados os gráficos das métricas calculadas para os corpos de prova dos ensaios de fadiga.

Tabela AI.1 – Gráficos de caixas para as métricas de dano para o corpo de prova 2 para o PZT1 na faixa de frequência de 39 kHz a 46 kHz.



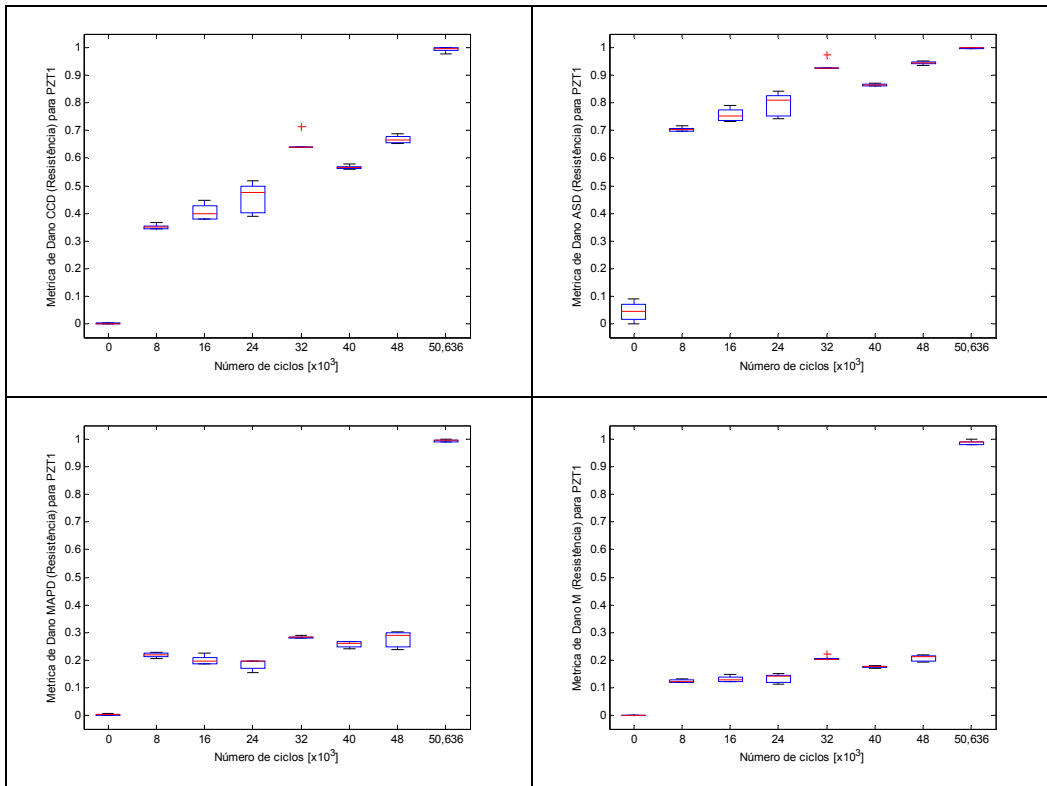
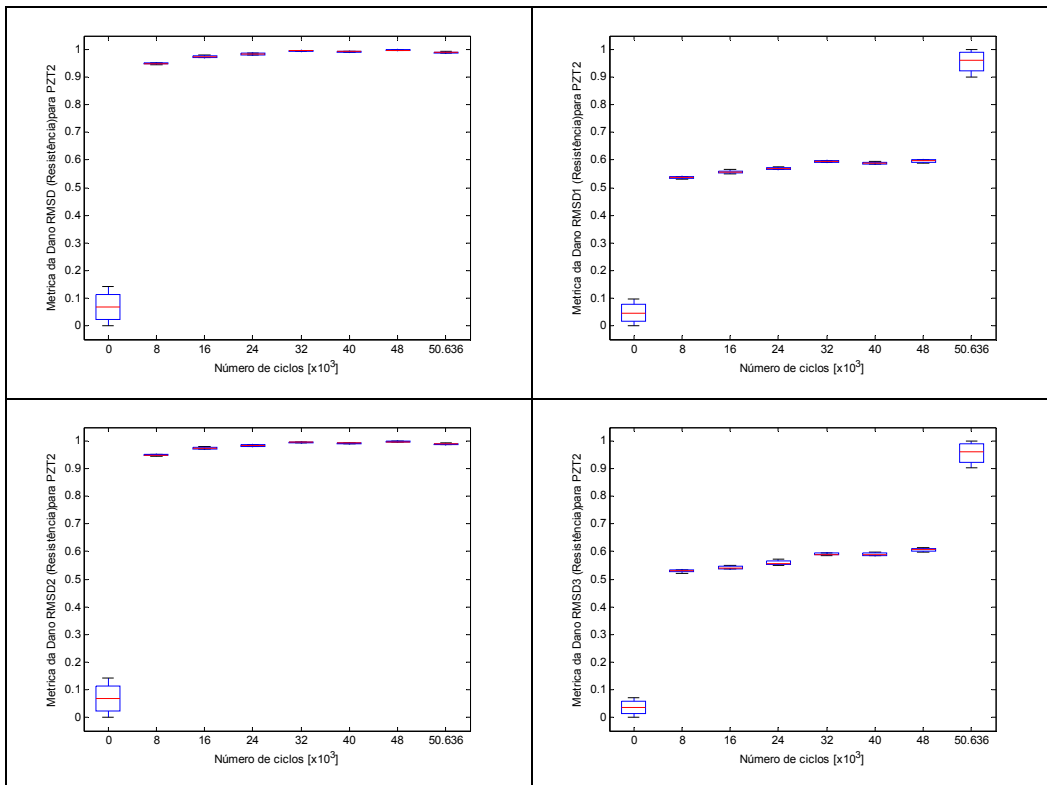


Tabela A1.2 – Gráficos de caixas para as métricas de dano para corpo de prova 2 para o PZT2 na faixa de frequência de 39 kHz a 46 kHz.



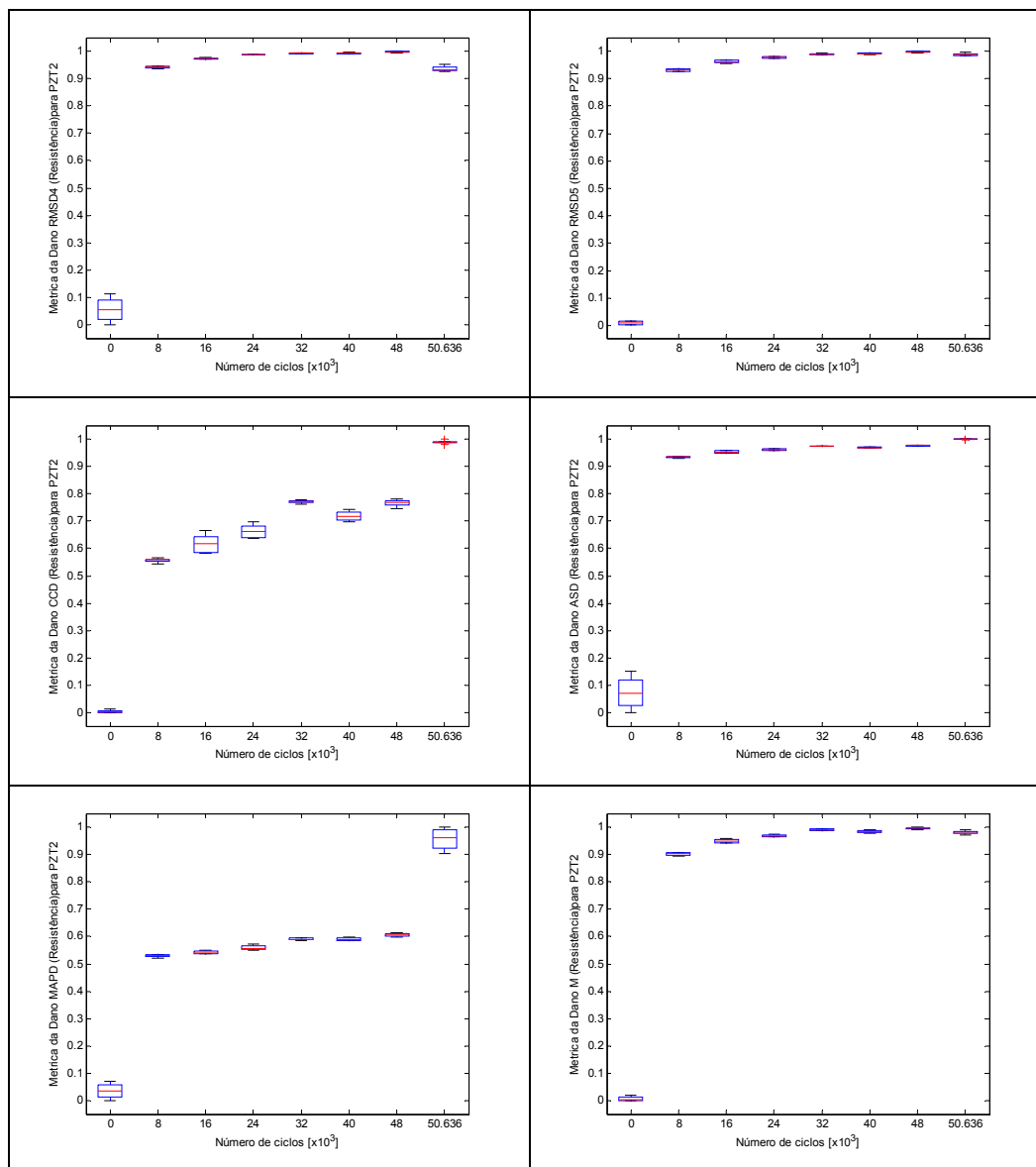
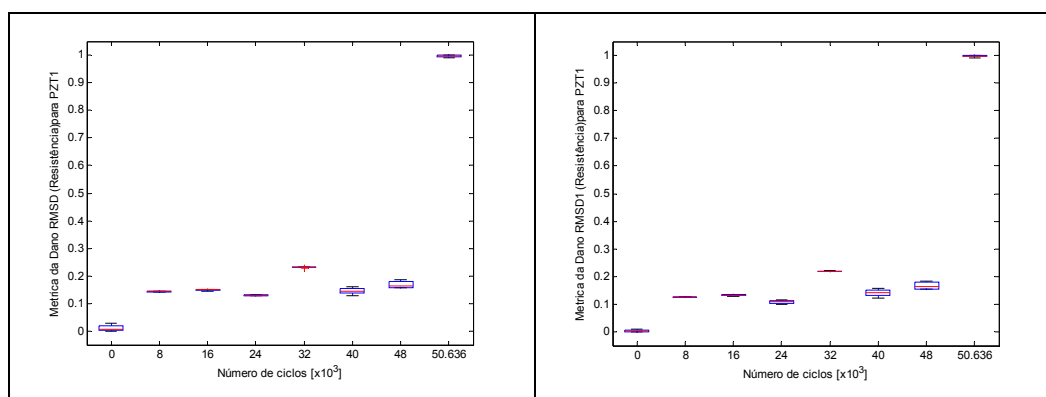


Tabela A1.3 – Gráficos de caixas para as métricas de dano para corpo de prova 2 para o PZT1 na faixa de frequência de 103,5 kHz a 112,5 kHz.



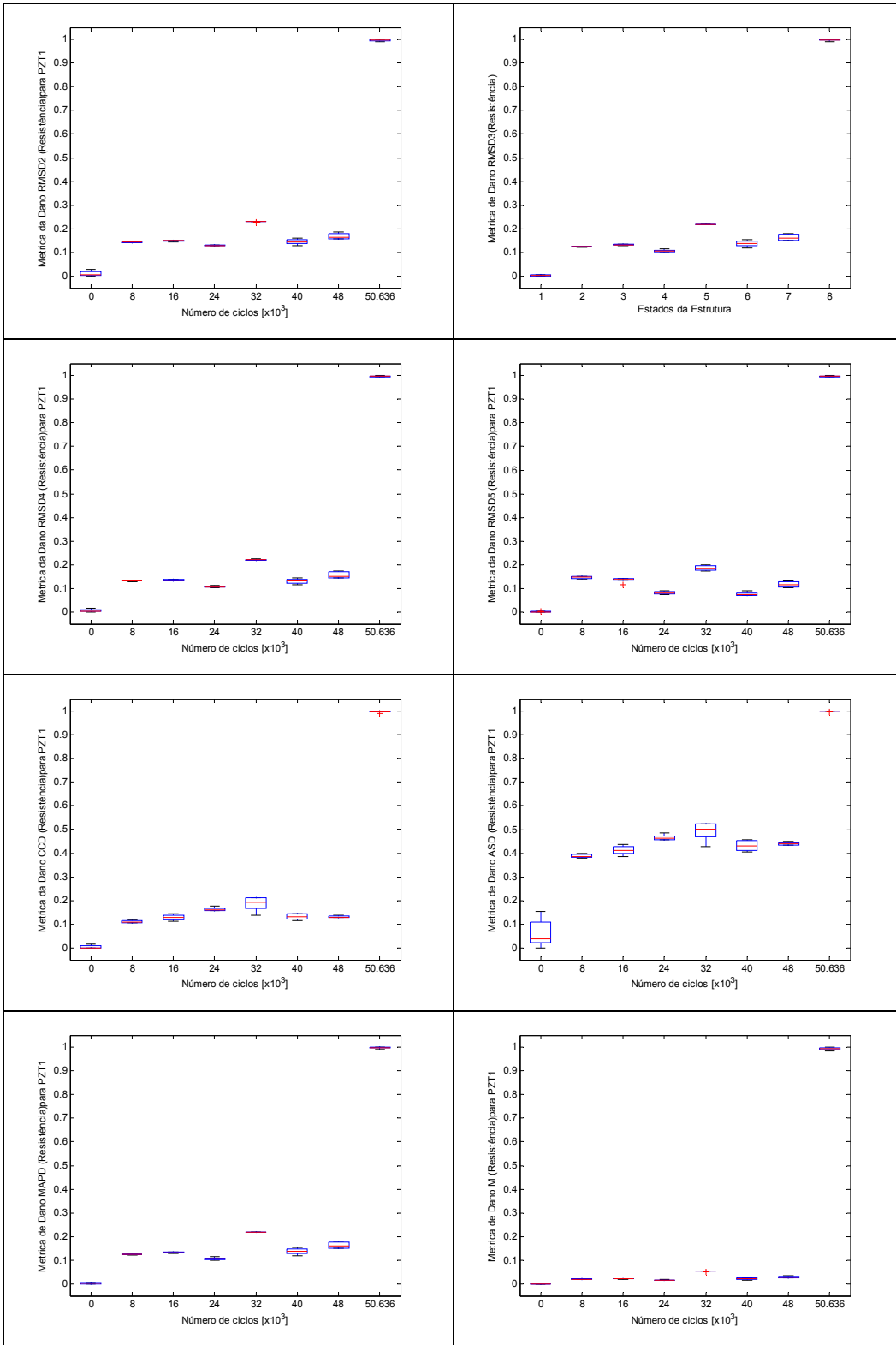
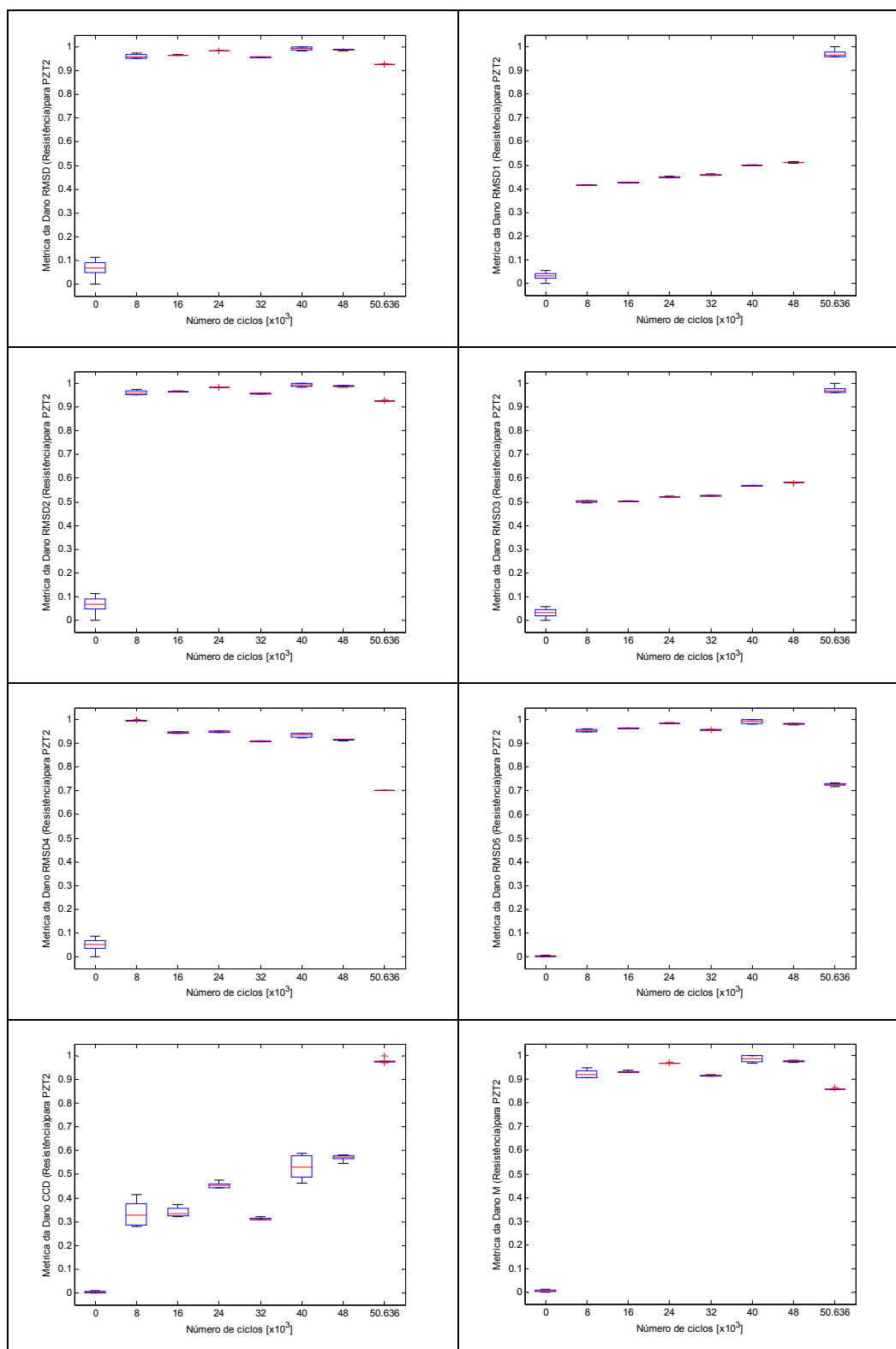




Tabela A1.4 – Gráficos de caixas para as métricas de dano para corpo de prova 2 para o PZT2 na faixa de frequência de 103,5 kHz a 112,5 kHz.



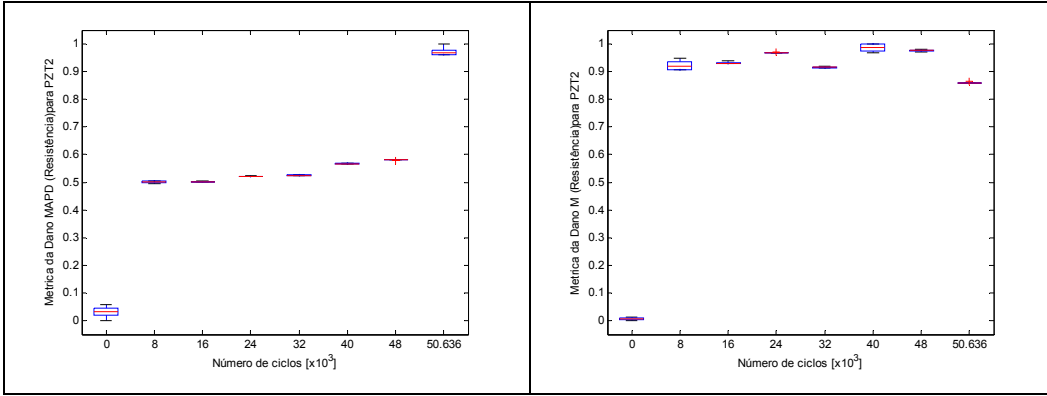
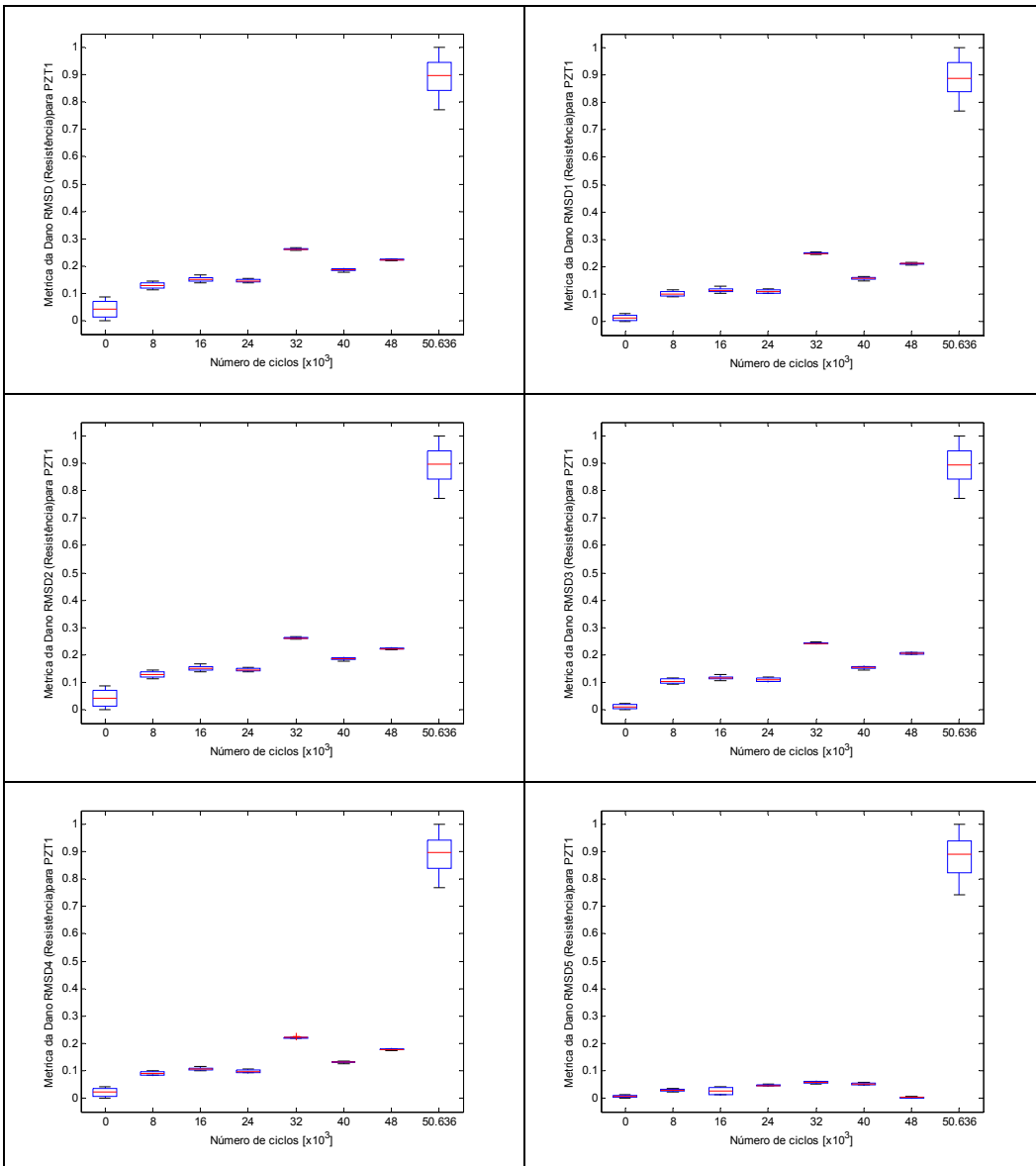


Tabela A1.5 – Gráficos de caixas para as métricas de dano para corpo de prova 2 para o PZT1 na faixa de frequência de 148 kHz a 153 kHz.



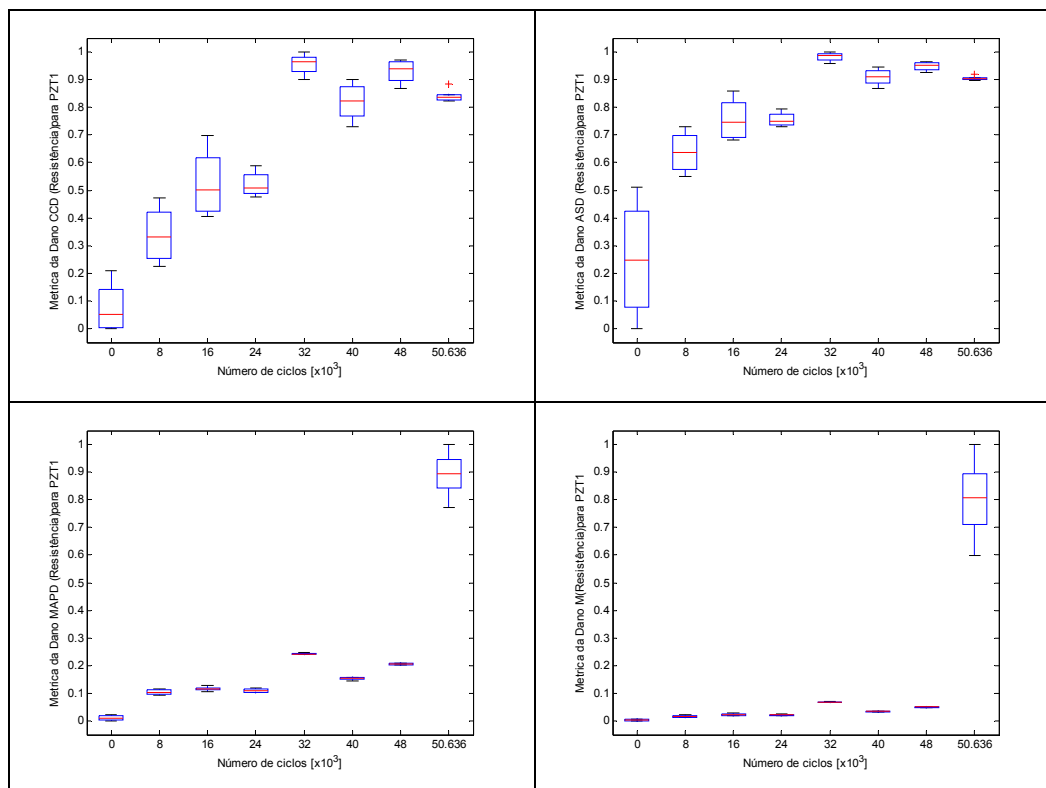
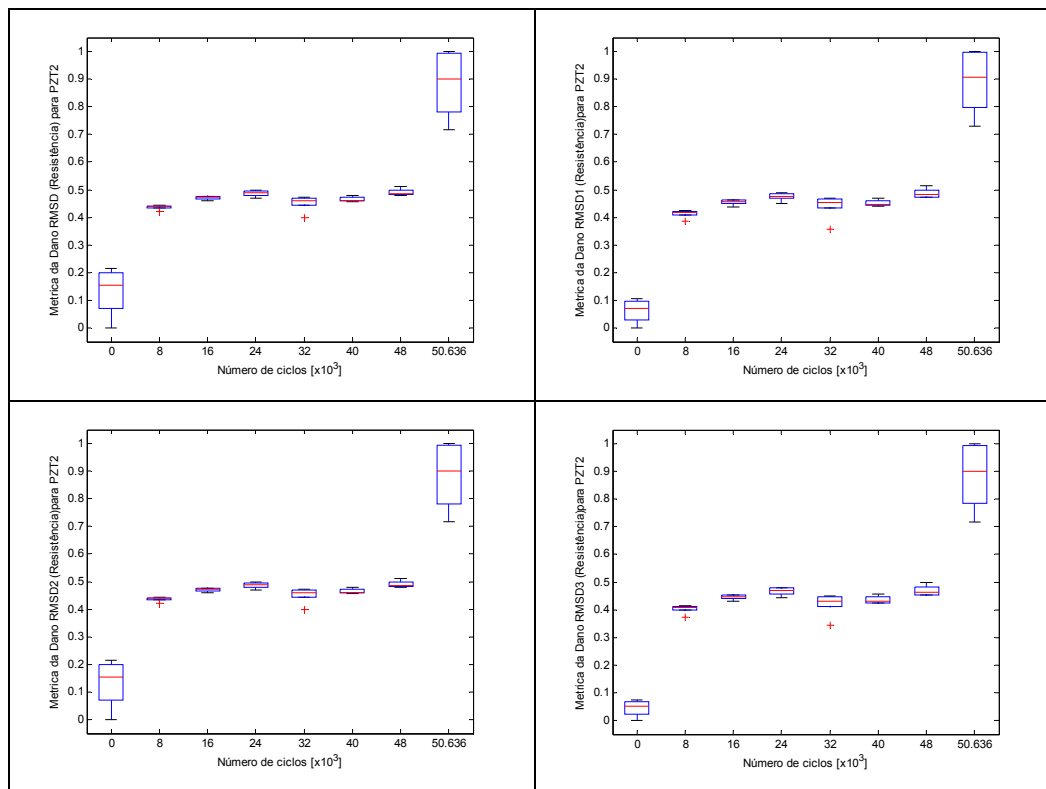


Tabela A1.6 – Gráficos de caixas para as métricas de dano para corpo de prova 2 para o PZT2 na faixa de frequência de 148 kHz a 153 kHz.



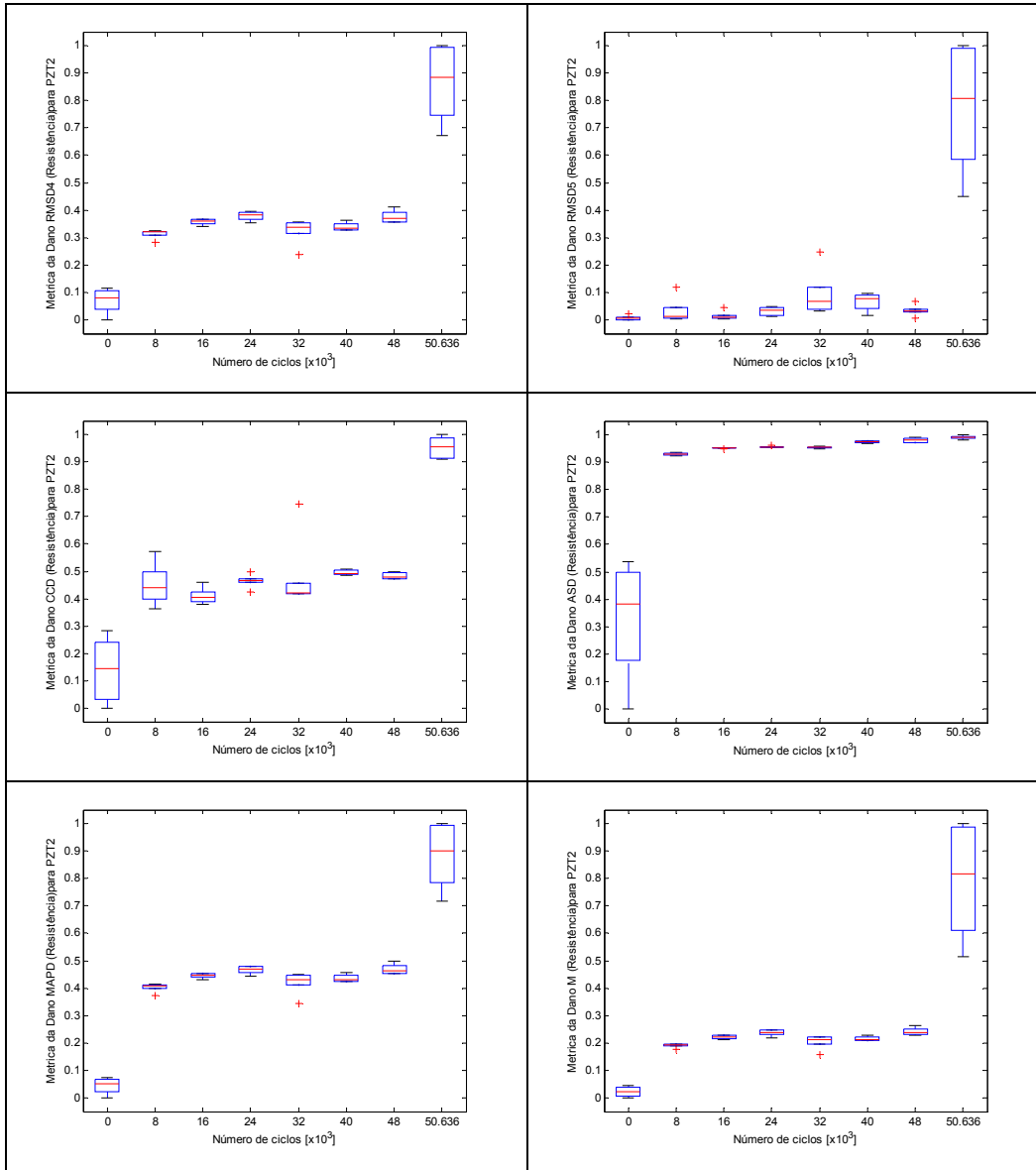
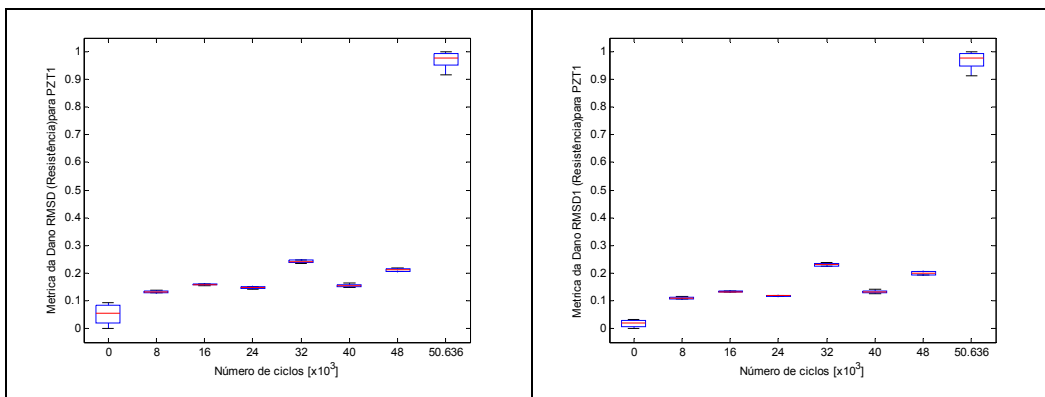


Tabela A1.7 – Gráficos de caixas para as métricas de dano para corpo de prova 2 para o PZT1 na faixa de frequência de 178 kHz a 184,2 kHz.



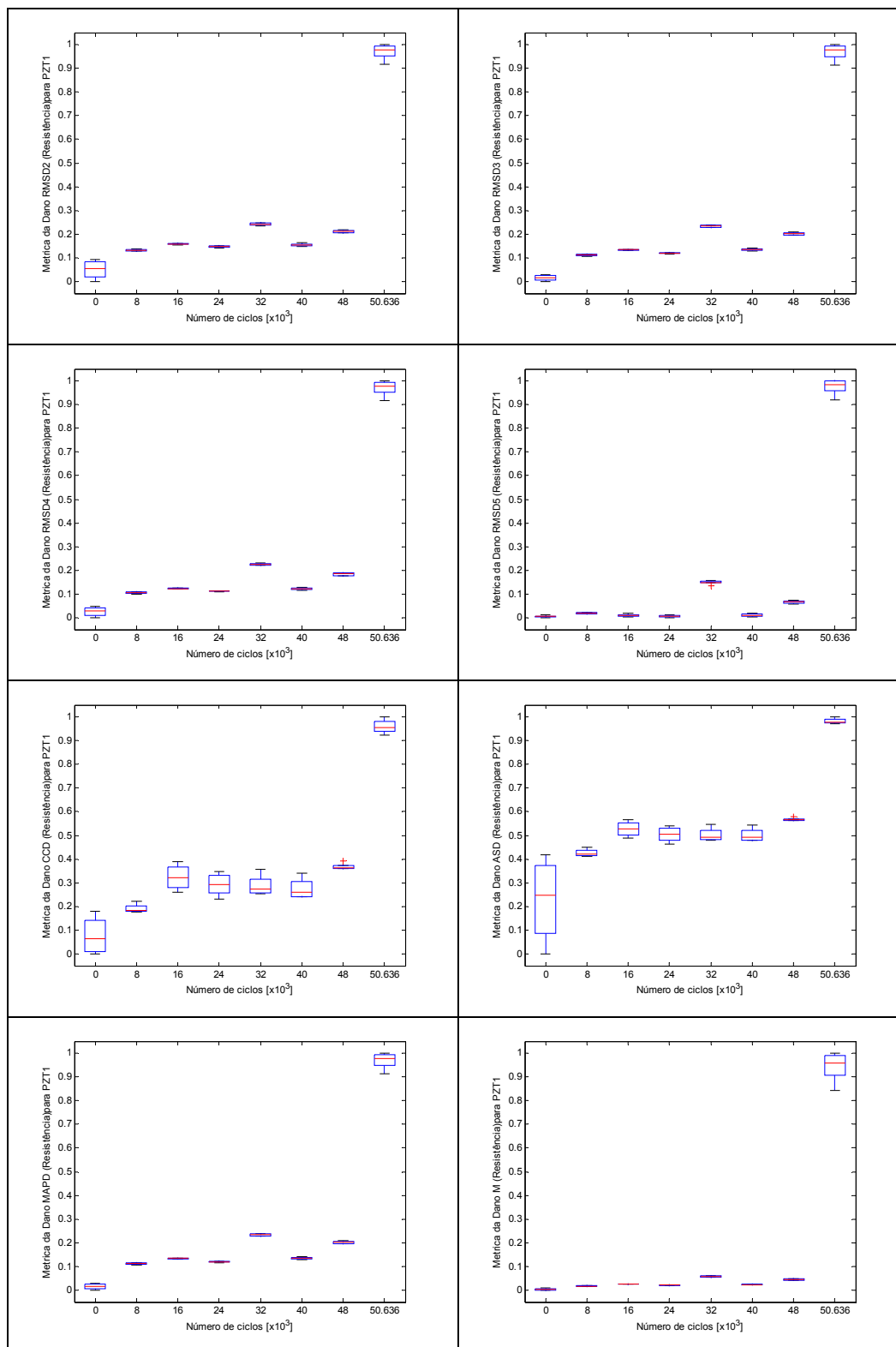
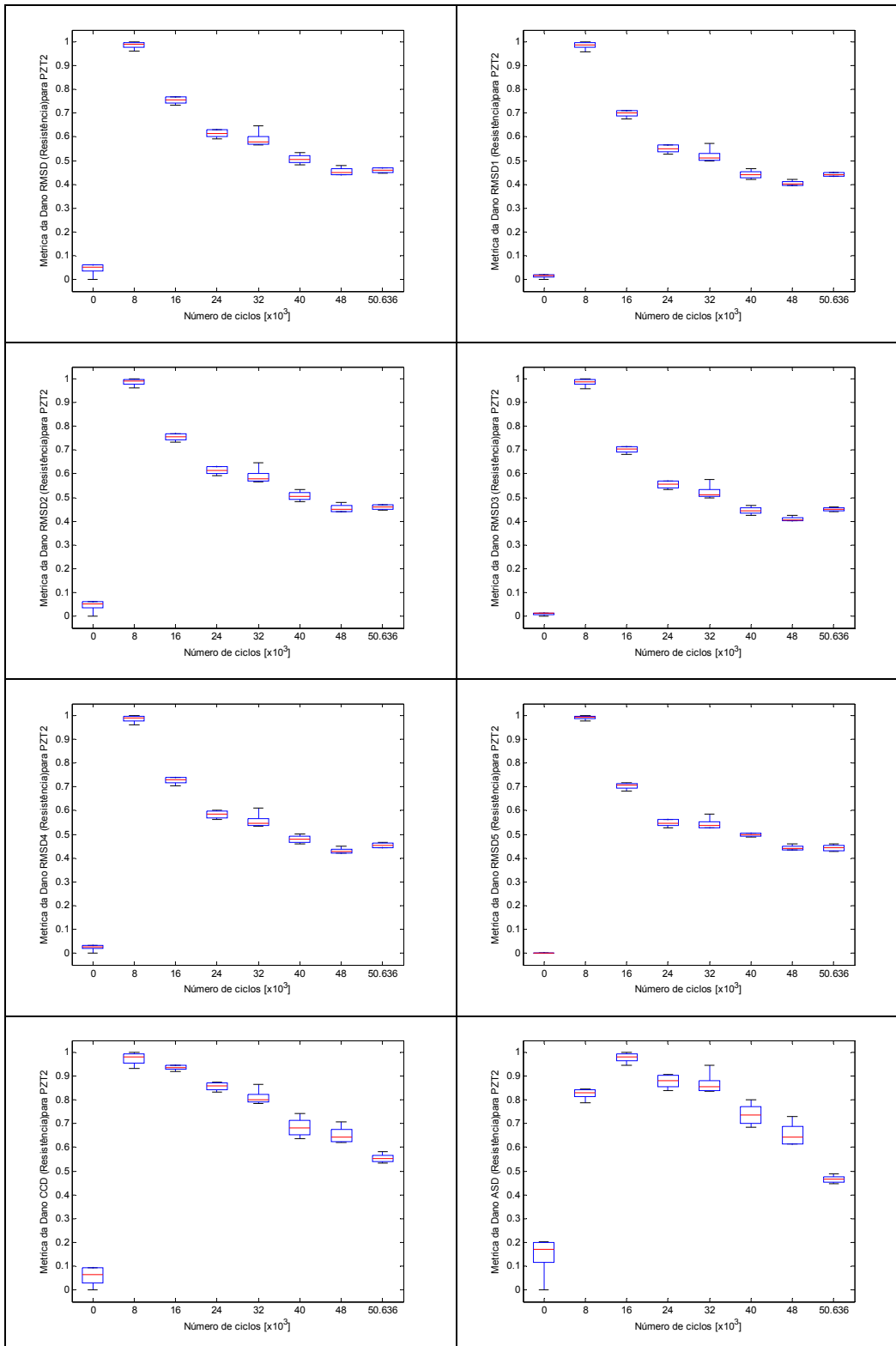


Tabela A1.8 – Gráficos de caixas para as métricas de dano para corpo de prova 2 para o PZT2 na faixa de frequência de 178 kHz a 184,2 kHz.



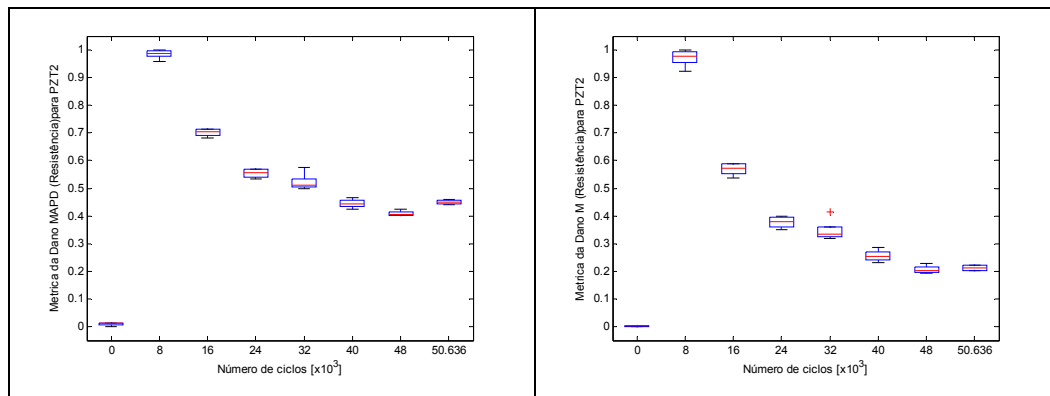
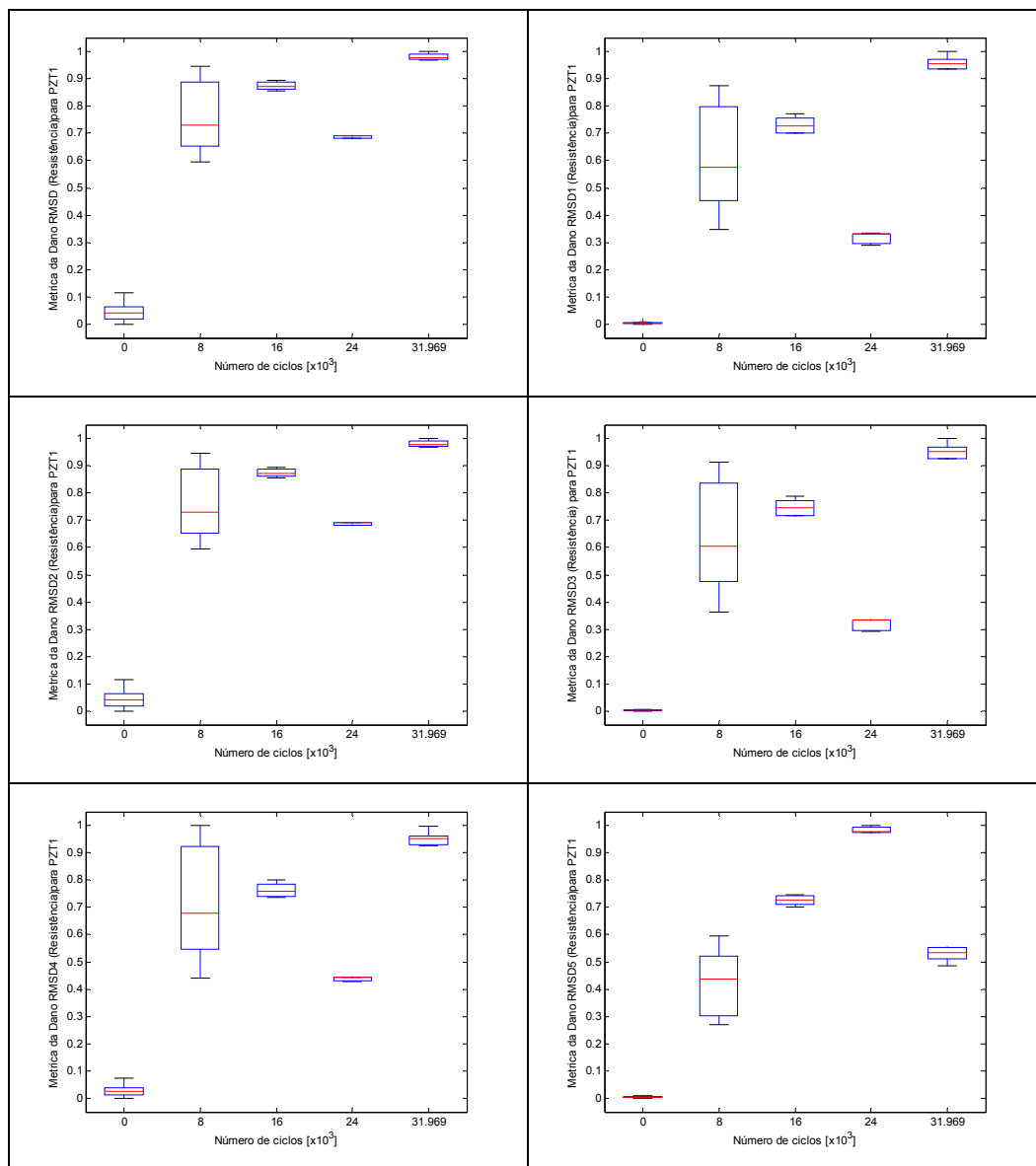


Tabela A1.9 – Gráficos de caixas para as métricas de dano para corpo de prova 3 para o PZT1 na faixa de frequência de 40,5 kHz a 49 kHz.



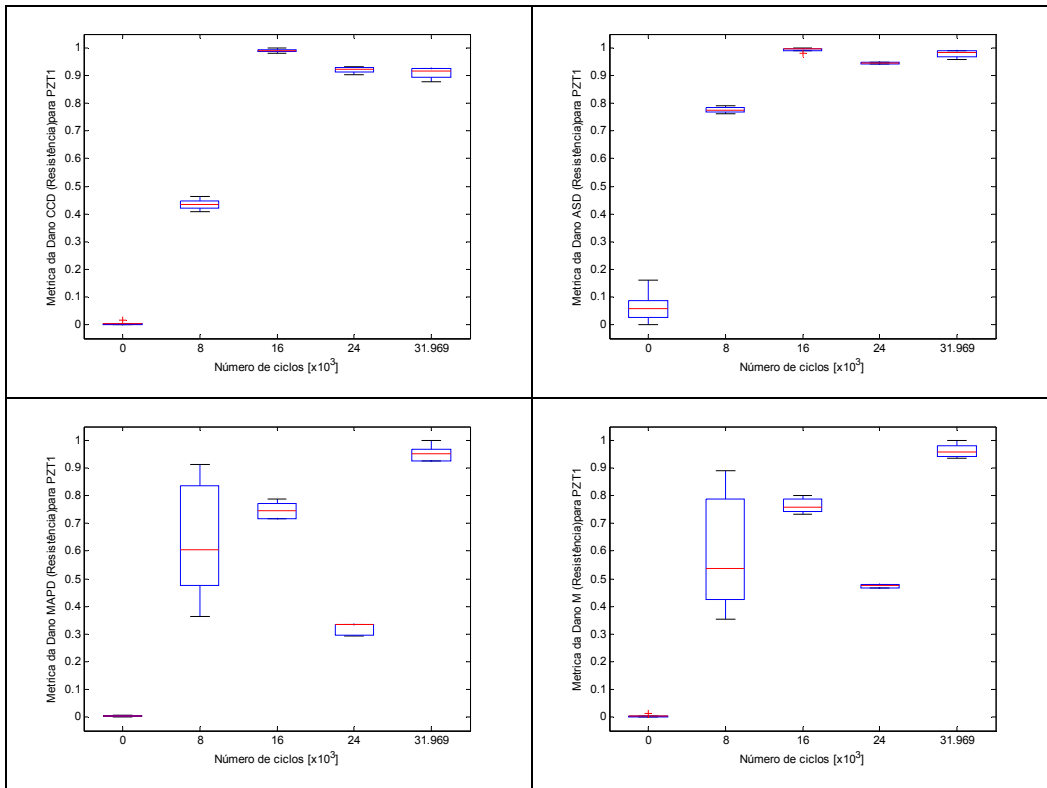
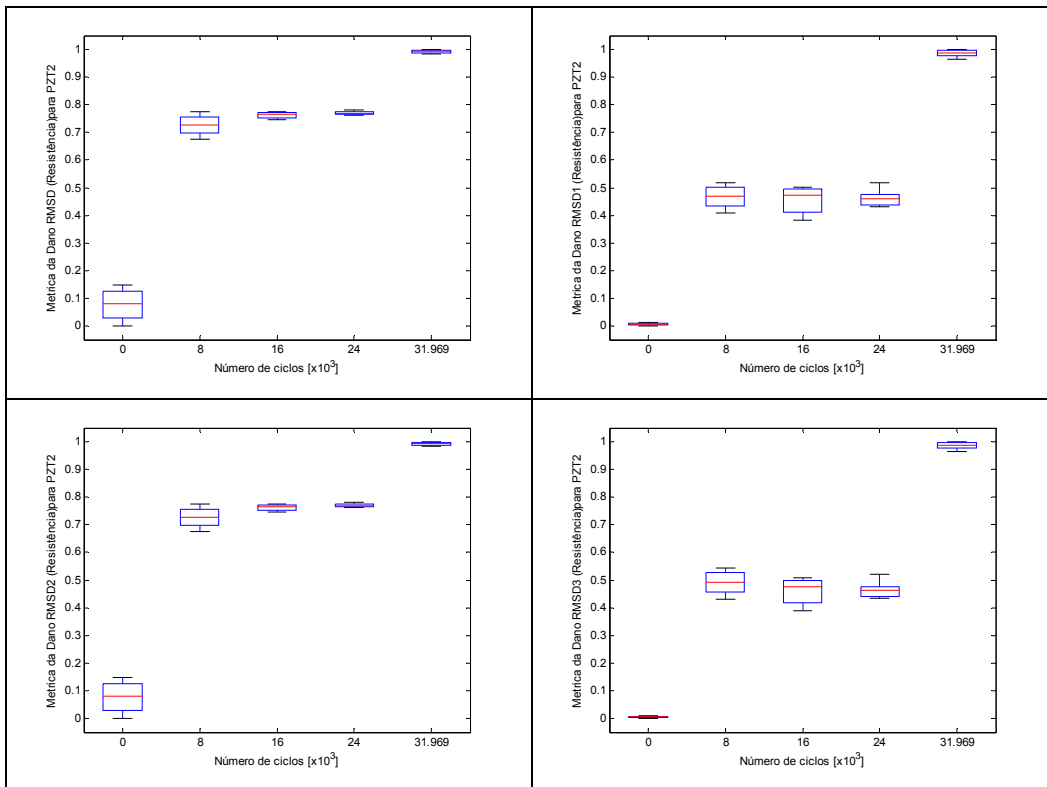


Tabela A1.10 – Gráficos de caixas para as métricas de dano para corpo de prova 3 para o PZT2 na faixa de frequência de 40,5 kHz a 49 kHz.





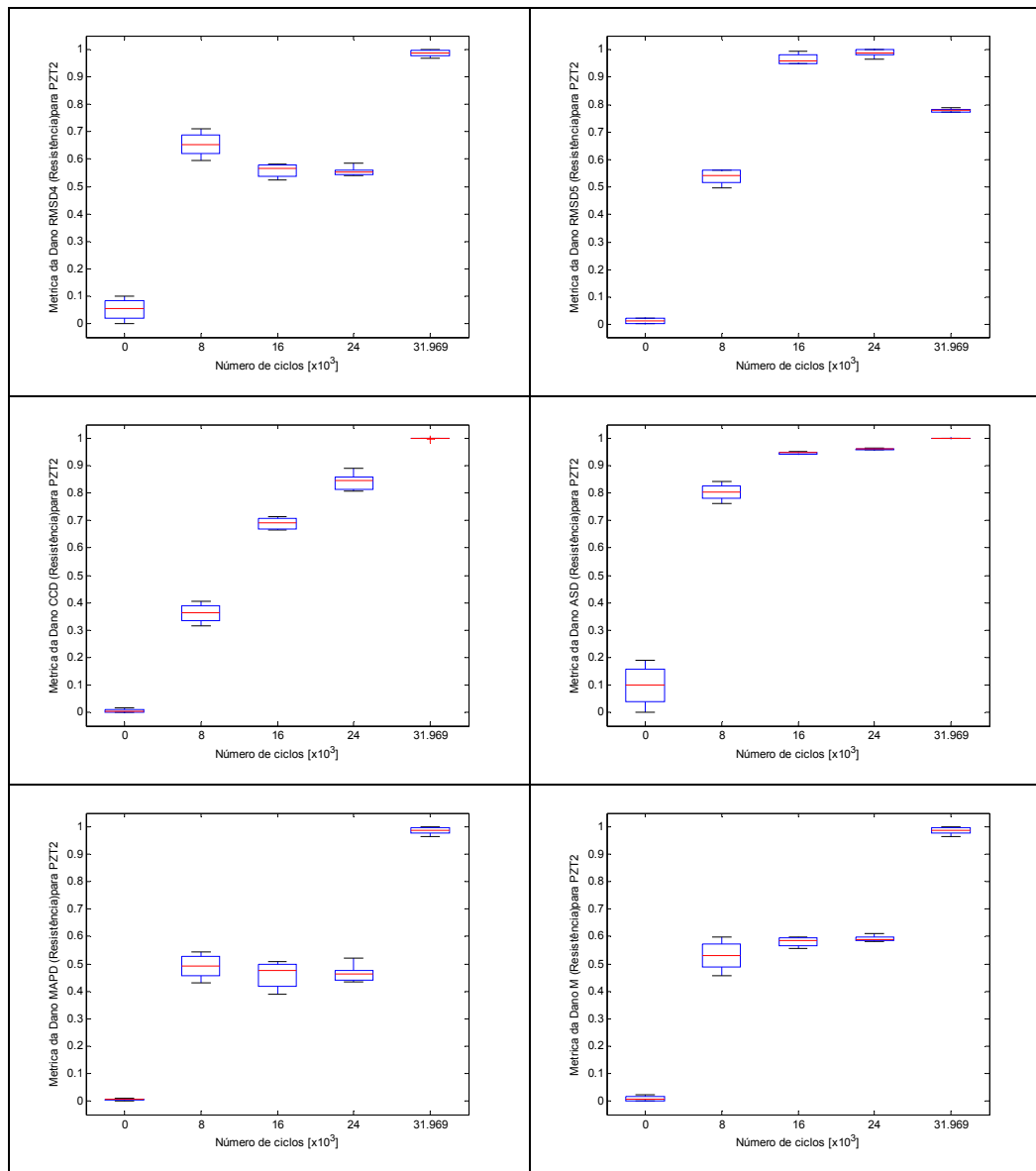
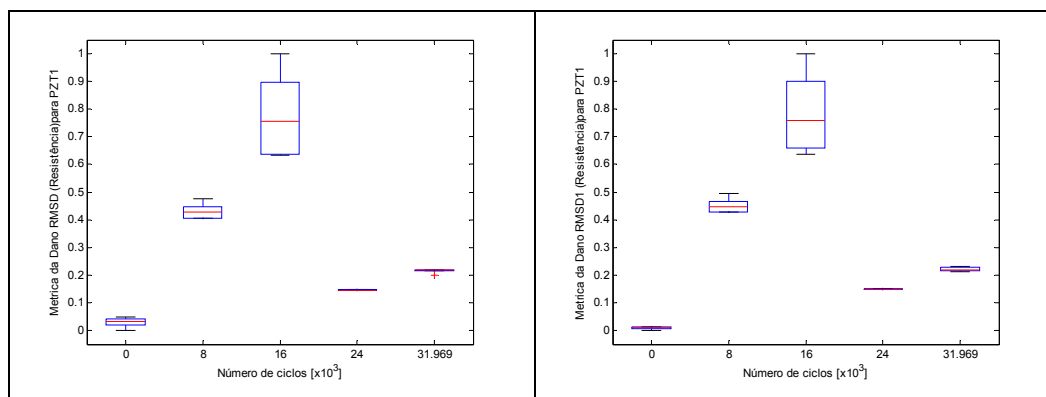


Tabela A1.11 – Gráficos de caixas para as métricas de dano para corpo de prova 3 para o PZT1 na faixa de frequência de 120 kHz a 125 kHz.



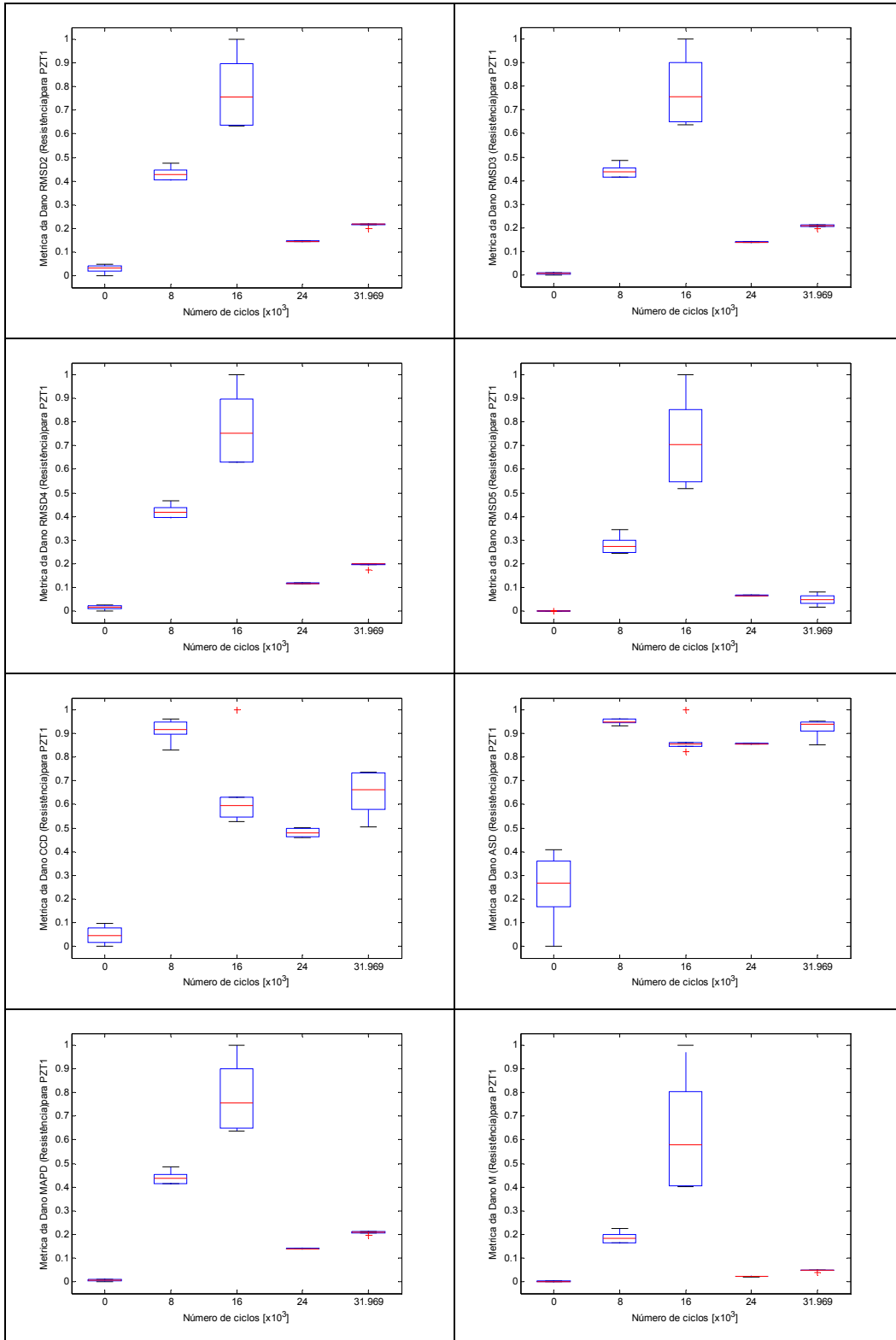
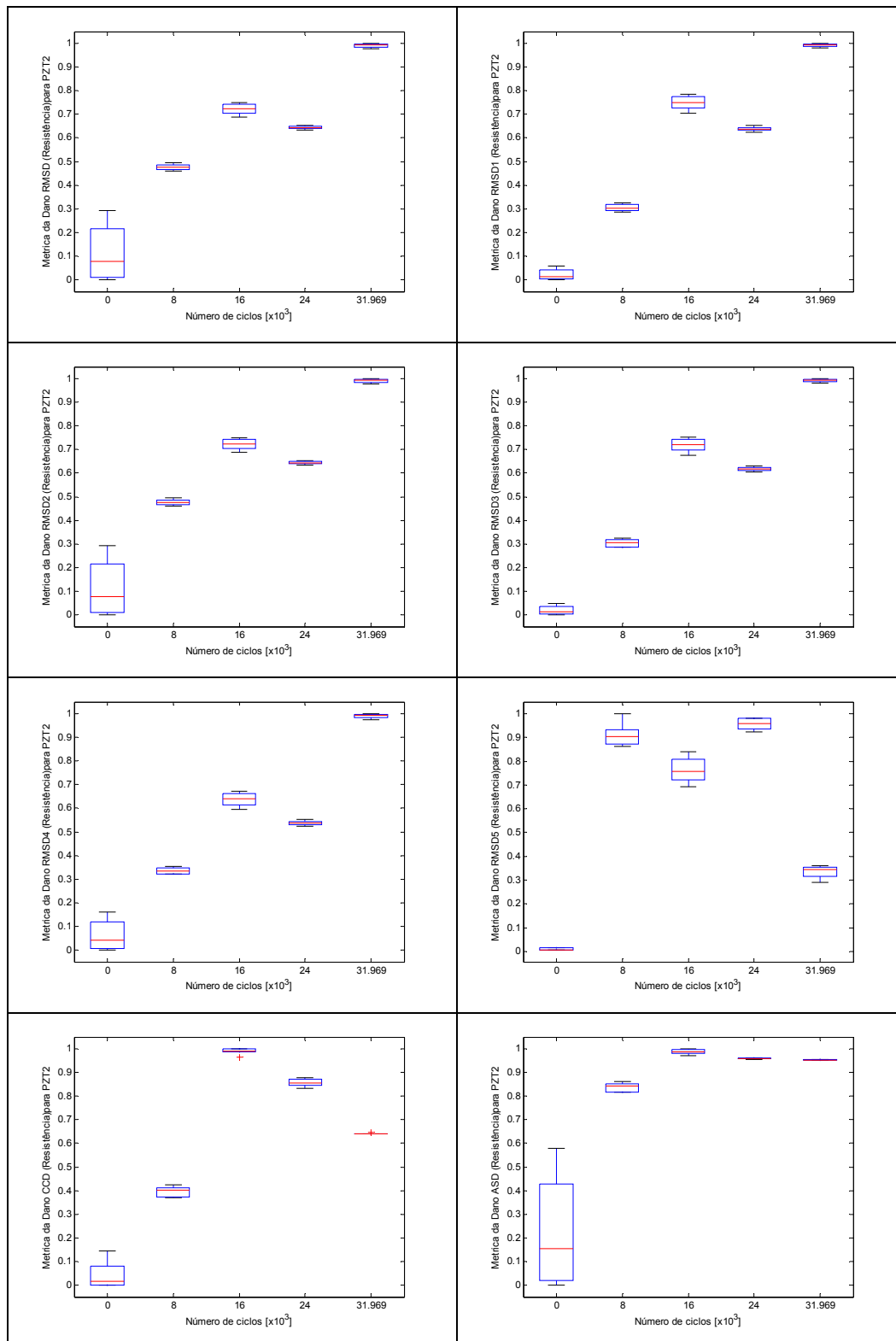
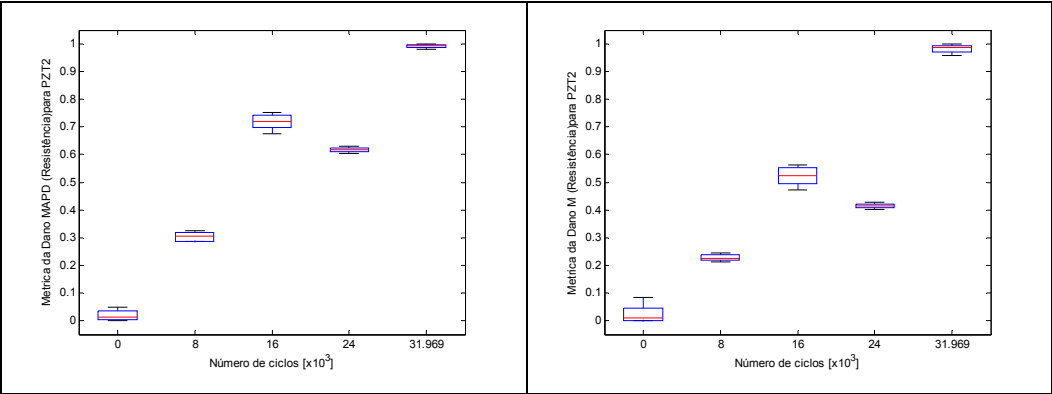


Tabela AI.12 – Gráficos de caixas para as métricas de dano para corpo de prova 3 para o PZT2 na faixa de frequência de 120 kHz a 125 kHz.





## Anexo II

### ANÁLISE DE DESCRIMINANTES

Neste anexo apresentam-se todos os resultados fornecidos pela análise de discriminante. A análise foi feita para a variável “número de ciclos” versus métrica de dano ASD PZT1 e métrica de dano ASD PZT2.

Tabela All.1- Classificação de grupos.

<b>Grupo (Nº de Ciclos)</b>	0	8000	16000	24000	32000	40000	48000	50636
<b>Nº de elementos (Nº de medições)</b>	6	6	6	6	6	6	6	6

Tabela All.2- Matriz resumo da classificação.

<b>Grupo Classificado</b>	<b>Grupo Verdadeiro</b>							
	0	8000	16000	24000	32000	40000	48000	50636
0	6	0	0	0	0	0	0	0
8000	0	6	0	0	0	0	0	0
16000	0	0	6	0	0	0	0	0
24000	0	0	0	6	0	0	0	0
32000	0	0	0	0	6	0	0	0
40000	0	0	0	0	0	6	0	0
48000	0	0	0	0	0	0	6	0
50636	0	0	0	0	0	0	0	6
Total	6	6	6	6	6	6	6	6
Total corretos	6	6	6	6	6	6	6	6
Proporção	1	1	1	1	1	1	1	1
Total= 48			Total corretos= 48			Proporção=1		

Tabela All.3 – Média para cada grupo.

<b>Variável</b>	0	8000	16000	24000	32000	40000	48000	50636
<b>Métrica de dano ASD PZT1</b>	0,0437	0,7049	0,7564	0,7968	0,9340	0,8651	0,9443	0,9987
<b>Métrica de dano ASD PZT2</b>	0,0734	0,9340	0,9528	0,9608	0,9745	0,9696	0,9757	0,9990

Tabela All.4 – Desvio padrão para cada grupo.

<b>VARIÁVEL</b>	0	8000	16000	24000	32000	40000	48000	50636
<b>Métrica de dano ASD PZT1</b>	0,0338	0,0078	0,0222	0,0413	0,0199	0,0040	0,0053	0,0018
<b>métrica de dano ASD PZT2</b>	0,0574	0,0021	0,0047	0,0033	0,0008	0,0022	0,0016	0,0005

Tabela All.5 – Matrizes de Covariância para cada grupo.

Grupo 0			Grupo 8000		
	Métrica ASD PZT1	Métrica ASD PZT2		Métrica ASD PZT1	Métrica ASD PZT2
Métrica ASD PZT1	0,0011	0,0019	Métrica ASD PZT1	$0,060 \times 10^{-3}$	$0,007 \times 10^{-3}$
Métrica ASD PZT2	0,0019	0,0033	Métrica ASD PZT2	$0,007 \times 10^{-3}$	$0,004 \times 10^{-3}$
Grupo 16000			Grupo 24000		
	Métrica ASD PZT1	Métrica ASD PZT2		Métrica ASD PZT1	Métrica ASD PZT2
Métrica ASD PZT1	$0,491 \times 10^{-3}$	$0,104 \times 10^{-3}$	Métrica ASD PZT1	$1,708 \times 10^{-3}$	$-0,03 \times 10^{-3}$
Métrica ASD PZT2	$0,104 \times 10^{-3}$	$0,023 \times 10^{-3}$	Métrica ASD PZT2	$-0,03 \times 10^{-3}$	$0,011 \times 10^{-3}$
Grupo 32000			Grupo 40000		
	Métrica ASD PZT1	Métrica ASD PZT2		Métrica ASD PZT1	Métrica ASD PZT2
Métrica ASD PZT1	$0,396 \times 10^{-3}$	$-4,54 \times 10^{-6}$	Métrica ASD PZT1	$0,016 \times 10^{-3}$	$-2,97 \times 10^{-6}$
Métrica ASD PZT2	$-4,54 \times 10^{-6}$	$0,73 \times 10^{-6}$	Métrica ASD PZT2	$-2,97 \times 10^{-6}$	$0,005 \times 10^{-3}$
Grupo 48000			Grupo 50636		
	Métrica ASD PZT1	Métrica ASD PZT2		Métrica ASD PZT1	Métrica ASD PZT2
Métrica ASD PZT1	$0,028 \times 10^{-3}$	$0,87 \times 10^{-6}$	Métrica ASD PZT1	$3,17 \times 10^{-6}$	$0,32 \times 10^{-6}$
Métrica ASD PZT2	$0,87 \times 10^{-6}$	$2,52 \times 10^{-6}$	Métrica ASD PZT2	$0,32 \times 10^{-6}$	$0,30 \times 10^{-3}$

Tabela All.6 – Resumo da classificação das Observações.

Observação	Grupo Verdadeiro	Grupo Identificado	Grupo	Distancia quadrada	Probabilidade
1	0	0	0	-18	1
			8000	198326	0
			16000	1504172	0
			24000	93434	0
			32000	1432422	0
			40000	326701	0
			48000	390602	0
			50636	3298718	0
2	0	0	0	-19	1
			8000	187722	0
			16000	1422502	0
			24000	88637	0
			32000	1359897	0
			40000	311322	0
			48000	371140	0
			50636	3134696	0

3	0	0	0	-19	1
			8000	174622	0
			16000	1320566	0
			24000	82732	0
			32000	1270510	0
			40000	292671	0
			48000	347212	0
			50636	2932328	0
4	0	0	0	-16	1
			8000	162812	0
			16000	1230600	0
			24000	77350	0
			32000	1189104	0
			40000	275055	0
			48000	325307	0
			50636	2748352	0
5	0	0	0	-19	1
			8000	150087	0
			16000	1131238	0
			24000	71606	0
			32000	1102055	0
			40000	256958	0
			48000	302026	0
			50636	2551203	0
6	0	0	0	-17	1
			8000	138662	0
			16000	1042751	0
			24000	66421	0
			32000	1023458	0
			40000	240365	0
			48000	280964	0
			50636	2373319	0
7	8000	8000	0	28821,8	0
			8000	-19,3	1
			16000	287,6	0
			24000	85,7	0
			32000	3280,5	0
			40000	2546,9	0
			48000	2574,2	0
			50636	32618,1	0
8	8000	8000	0	25855,4	0
			8000	-21,2	1
			16000	138,8	0
			24000	77	0
			32000	3072,2	0
			40000	2683,3	0
			48000	2645,4	0
			50636	33323	0
9	8000	8000	0	25457,6	0
			8000	-21,2	1
			16000	89,6	0
			24000	69,5	0
			32000	2904,3	0
			40000	2655,0	0
			48000	2615,6	0

			50636	33045,3	0
10	8000	8000	0	26762,2	0
			8000	-21,5	1
			16000	75,6	0
			24000	60,9	0
			32000	2715,8	0
			40000	2498,1	0
			48000	2501,6	0
			50636	31940,5	0
11	8000	8000	0	28207,3	0
			8000	-20,7	1
			16000	64,3	0
			24000	52,6	0
			32000	2532,9	0
			40000	2338,7	0
			48000	2385,5	0
			50636	30807,9	0
12	8000	8000	0	32737,0	0
			8000	-19,0	1
			16000	191,5	0
			24000	56,1	0
			32000	2637,2	0
			40000	2098,9	0
			48000	2234,0	0
			50636	29310,2	0
13	16000	16000	0	58432,8	0
			8000	164,0	0
			16000	-19,6	0,728
			24000	-17,6	0,272
			32000	442,7	0
			40000	450,3	0
			48000	882,2	0
			50636	15022,8	0
14	16000	16000	0	51959,9	0
			8000	118,7	0
			16000	-21,6	0,950
			24000	-15,7	0,050
			32000	601,2	0
			40000	656,4	0
			48000	1070,0	0
			50636	17147,8	0
15	16000	16000	0	44256,3	0
			8000	72,7	0
			16000	-21,1	0,994
			24000	-10,8	0,006
			32000	829,7	0
			40000	970,6	0
			48000	1333,9	0
			50636	20034,5	0
16	16000	16000	0	40097,0	0
			8000	49,8	0
			16000	-20,3	0,999
			24000	-6,1	0,001
			32000	996,8	0
			40000	1185,9	0



			48000	1505,2	0
			50636	21863,7	0
17	16000	16000	0	36970,6	0
			8000	23,3	0
			16000	-20,6	1
			24000	3,1	0
			32000	1292,5	0
			40000	1426,7	0
			48000	1693,0	0
			50636	23842,5	0
18	16000	16000	0	35946,8	0
			8000	19,4	0
			16000	-20,6	1
			24000	4,9	0
			32000	1340,7	0
			40000	1491,2	0
			48000	1741,8	0
			50636	24347,0	0
19	24000	24000	0	87655,7	0
			8000	364,5	0
			16000	81,8	0
			24000	-13,8	1
			32000	151,8	0
			40000	19,1	0
			48000	357,7	0
			50636	8748,0	0
20	24000	24000	0	35225,6	0
			8000	168,6	0
			16000	439,2	0
			24000	-15,8	1
			32000	327,3	0
			40000	1087,0	0
			48000	1455,6	0
			50636	21156,8	0
21	24000	24000	0	39718,6	0
			8000	146,1	0
			16000	216,8	0
			24000	-16,7	1
			32000	387,7	0
			40000	945,7	0
			48000	1329,2	0
			50636	19825,7	0
22	24000	24000	0	66248,4	0
			8000	198,6	0
			16000	8,5	0
			24000	-17,7	1
			32000	409,6	0
			40000	297,9	0
			48000	728,3	0
			50636	13310,7	0
23	24000	24000	0	71942,4	0
			8000	209,7	0
			16000	105,6	0
			24000	-17,0	1
			32000	494,7	0

			40000	238,8	0
			48000	663,8	0
			50636	12673,4	0
24	24000	24000	0	79865,1	0
			8000	246,1	0
			16000	264,9	0
			24000	-16,2	1
			32000	528,1	0
			40000	154,6	0
			48000	564,6	0
			50636	11604,6	0
25	32000	32000	0	185563	0
			8000	1213	0
			16000	1595	0
			24000	27	0
			32000	-18	1
			40000	837	0
			48000	12	0
			50636	2045	0
26	32000	32000	0	143648	0
			8000	847	0
			16000	614	0
			24000	13	0
			32000	-20	0,992
			40000	250	0
			48000	-10	0,008
			50636	2895	0
27	32000	32000	0	142942	0
			8000	851	0
			16000	550	0
			24000	16	0
			32000	-22	0,996
			40000	251	0
			48000	-10	0,004
			50636	2801	0
28	32000	32000	0	142547	0
			8000	860	0
			16000	484	0
			24000	19	0
			32000	-21	0,995
			40000	259	0
			48000	-11	0,005
			50636	2672	0
29	32000	32000	0	142505	0
			8000	867	0
			16000	449	0
			24000	21	0
			32000	-20	0,987
			40000	266	0
			48000	-11	0,013
			50636	2589	0
30	32000	32000	0	143434	0
			8000	860	0
			16000	529	0
			24000	17	0

			32000	-22	0,993
			40000	263	0
			48000	-12	0,007
			50636	2707	0
31	40000	40000	0	105775	0
			8000	495	0
			16000	272	0
			24000	-9	0,005
			32000	91	0
			40000	-20	0,995
			48000	181	0
			50636	6439	0
32	40000	40000	0	101069	0
			8000	473	0
			16000	168	0
			24000	-9	0,001
			32000	74	0
			40000	-23	0,999
			48000	210	0
			50636	6743	0
33	40000	40000	0	97392,8	0
			8000	461,9	0
			16000	91,8	0
			24000	-7,3	0,001
			32000	53,9	0
			40000	-21,6	0,999
			48000	232,4	0
			50636	6952,1	0
34	40000	40000	0	97590,4	0
			8000	477,3	0
			16000	65,2	0
			24000	-4,9	0
			32000	32,4	0
			40000	-22,6	1
			48000	223	0
			50636	6737,2	0
35	40000	40000	0	98167,2	0
			8000	500,9	0
			16000	39,2	0
			24000	-1,2	0
			32000	10,4	0
			40000	-22,5	1
			48000	209,6	0
			50636	6430,6	0
36	40000	40000	0	100133	0
			8000	526	0
			16000	36	0
			24000	2	0
			32000	-1	0
			40000	-21	1
			48000	189	0
			50636	6072	0
37	48000	48000	0	162338	0
			8000	1001	0
			16000	1038	0

			24000	18	0
			32000	-20	0,478
			40000	475	0
			48000	-20	0,522
			50636	2352	0
38	48000	48000	0	156209	0
			8000	964	0
			16000	791	0
			24000	21	0
			32000	-22	0,389
			40000	414	0
			48000	-23	0,611
			50636	2286	0
39	48000	48000	0	150643	0
			8000	929	0
			16000	613	0
			24000	22	0
			32000	-20	0,455
			40000	357	0
			48000	-21	0,545
			50636	2316	0
40	48000	48000	0	156096	0
			8000	989	0
			16000	643	0
			24000	28	0
			32000	-14	0,010
			40000	445	0
			48000	-23	0,990
			50636	1987	0
41	48000	48000	0	158879	0
			8000	1023	0
			16000	639	0
			24000	32	0
			32000	-6	0
			40000	497	0
			48000	-22	1
			50636	1795	0
42	48000	48000	0	162513	0
			8000	1042	0
			16000	775	0
			24000	30	0
			32000	-13	0,010
			40000	532	0
			48000	-22	0,990
			50636	1836	0
43	50636	50636	0	195589	0
			8000	1697	0
			16000	173	0
			24000	177	0
			32000	931	0
			40000	1727	0
			48000	273	0
			50636	-27	1
44	50636	50636	0	195032	0
			8000	1677	0

			16000	186	0
			24000	171	0
			32000	879	0
			40000	1689	0
			48000	258	0
			50636	-26	1
45	50636	50636	0	193753	0
			8000	1679	0
			16000	163	0
			24000	176	0
			32000	922	0
			40000	1683	0
			48000	265	0
			50636	-28	1
46	50636	50636	0	191401	0
			8000	1660	0
			16000	148	0
			24000	175	0
			32000	919	0
			40000	1632	0
			48000	257	0
			50636	-24	1
47	50636	50636	0	195534	0
			8000	1699	0
			16000	171	0
			24000	178	0
			32000	939	0
			40000	1729	0
			48000	275	0
			50636	-27	1
48	50636	50636	0	195033	0
			8000	1714	0
			16000	149	0
			24000	186	0
			32000	1007	0
			40000	1751	0
			48000	291	0
			50636	-25	1