

Julián Leonel Pita Ruiz

Estudo de Sensores PZT Aplicados à Detecção de Danos em Tubulações

Ilha Solteira - SP
2013

Julián leonel Pita Ruiz

Estudo de Sensores PZT Aplicados à Detecção de Danos em Tubulações

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia do Câmpus de Ilha Solteira - UNESP como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Especialidade: Automação.

Prof. Dr. Jozué Vieira Filho
Orientador

Ilha Solteira - SP
2013

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

R934e Ruiz, Julián Leonel Pita.
Estudo de sensores PZT aplicados à detecção de danos em tubulações /
Julián Leonel Pita Ruiz. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2014
70 f.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de
Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Automação, 2014

Orientador: Jozué Vieira Filho
Inclui bibliografia

1. SHM. 2. EMI. 3. PZT. 4. Tubulação. 5. Dano. 6. CCDM.

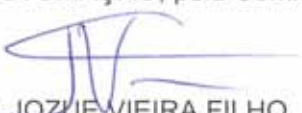
CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: Estudo de Sensores PZT Aplicados à Detecção de Danos em Tubulações

AUTOR: JULIAN LEONEL PITA RUIZ

ORIENTADOR: Prof. Dr. JOZUE VIEIRA FILHO

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica ,
Área: AUTOMAÇÃO, pela Comissão Examinadora:


Prof. Dr. JOZUE VIEIRA FILHO

Coordenadoria Executiva - Sjbv / C Experimental de São Joao Da Boa Vista


Profa. Dra. SUELY CUNHA AMARO MANTOVANI

Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira


Prof. Dr. BERNARDO JOSÉ GUILHERME DE ARAGÃO

Diretoria de Laboratórios e Infra Estrutura de Redes / Fundação Centro de Pesquisa e
Desenvolvimento em Telecomunicações, CPqD

Data da realização: 19 de fevereiro de 2014.

DEDICATÓRIA

Este trabalho é dedicado a minha esposa
Andrea Nataly e ao nosso filho Angel Santiago,
pelo infinito amor e apoio incondicional.

AGRADECIMENTOS

Meus agradecimentos:

- Ao meu orientador Prof. Dr. Jozué Vieira Filho, pelas dicas, correções, orientações e por sua paciência durante a realização do mestrado;
- Ao Prof. Dr. Antonio Eduardo Turra pelo apoio, sugestões de ideias e empréstimos de equipamentos;
- Ao Prof. Dr. Rubén Romero cuja ajuda foi fundamental para a realização deste objetivo;
- Aos colegas Nicolás e Mario, do Laboratório de Processamento de Sinais e Instrumentação, pela solidariedade e ajuda no desenvolvimento deste trabalho;
- Ao Grupo de Materiais e Sistemas Inteligentes (GMSINT) do Departamento de Engenharia Mecânica, pela colaboração na parte experimental e fornecimento do laboratório de pesquisa para realização de ensaios;
- A meus amigos de Ilha Solteira. Em especial a Darwin, Luz e Azucena pela disposição para me ajudar tanto nos bons momentos quanto nos difíceis;
- Aos meus amigos Cesar e Saul pelo apoio à distância;
- Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela oportunidade e apoio financeiro.
- Finalmente a minha família, especialmente aos meus pais Aura Alicia e Angel leonel e a minhas irmãs Ana e Vanessa, que são meu alicerce e minha força.

"Em momentos de crise, só a imaginação
é mais importante que o conhecimento."

Albert Einstein

RESUMO

Neste trabalho propõe-se o monitoramento da integridade estrutural (SHM) em sistemas de tubulações usando-se a técnica da impedância Eletromecânica (EMI), que é uma forma de avaliação não destrutiva (NDE). A técnica EMI tem como base a Função de Resposta em Frequência (FRF) e se destaca por utilizar transdutores piezelétricos de baixo custo. Através da implementação de um sistema de SHM nas tubulações, é possível monitorar a integridade estrutural de forma contínua e reduzir, assim, os riscos de acidentes que podem prejudicar a população e o meio ambiente. A técnica proposta é baseada em transdutores do tipo PZT, que são colados na superfície curva do corpo principal do tubo da estrutura por meio de um adesivo de alta rigidez, e tem como vantagem básica a simplicidade. Os sensores, devidamente posicionados, são excitados em uma determinada faixa de frequência, gerando uma resposta que é medida através da impedância elétrica. O processo de monitoramento da integridade estrutural da tubulação é feito através de medições periódicas da impedância da estrutura e a detecção do dano é baseada nas alterações das respostas. Para detectar o dano, as diferentes medições são analisadas usando-se índices de falha métrica tradicionais na área de SHM, como o RMSD (Root Mean Square Deviation) e o CCDM (Correlation Coefficient Deviation Metric). A técnica utilizada demonstrou capacidade para identificar corretamente a presença de danos no corpo principal dos segmentos de tubos das estruturas utilizadas, mostrando-se viável para detecção de danos em tubulações.

Palavras-chave: SHM. EMI. PZT. Dano. Tubulação. CCDM.

ABSTRACT

In this work proposes the Structural Health Monitoring (SHM) in piping systems using the technique of Electromechanical Impedance (EMI), which is a form of non destructive Evaluation (NDE). The EMI technique is based on the Frequency Response Function (FRF) known for its simplicity and for the use of low cost piezoelectric transducers. Through the implementation of a SHM system on the pipes, if possible to monitor the structural integrity continuously, reducing the risk of accidents to the people and the environment. The proposed technique is based on the PZT transducers type, which are pasted on the curved surface of the main body of the pipe with a high stiffness adhesive. The sensors, properly positioned, are excited in a certain range frequency, generating a response that is measured by the electrical impedance. The process of monitoring the structural integrity of the pipes is done through periodic measurements of the impedance and the detection of damage is based on the responses changes. To detect the damage, the different measurements are analyzed using the traditional metric damage indexes in the area of ? SHM, the RMSD (Root Mean Square Deviation) and the CCDM (Correlation Coefficient Deviation Metric). The technique has demonstrated its ability to correctly identify the presence of damage on the main body of the pipes segments of the structures.

Keywords: SHM. EMI. PZT. Damage. Pipeline. CCDM.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	a.) Cristal piezelétrico; b.) Efeito Direto; c.) Efeito Inverso.	22
Figura 2	Processo de fabricação de uma cerâmica piezelétrica; a.) Aquecimento em alta temperatura; b.) Aplicação de um campo elétrico DC; c.) Orientação final dos dipolos.	24
Figura 3	Modelo eletromecânico de um transdutor piezelétrico colado na estrutura do tipo massa-mola.	26
Figura 4	Comparação entre as resistências elétricas de várias cerâmicas PZT com diferentes dimensões.	28
Figura 5	Estrutura utilizada por (PARK; CUDNEY; INMAN, 2001).	31
Figura 6	Estrutura utilizada por (PEAIRS; PARK; INMAN, 2004).	32
Figura 7	Estrutura utilizada por (CHIAMORI et al., 2005).	33
Figura 8	Estrutura utilizada por (THIEN, 2006).	34
Figura 9	Estrutura utilizada (MASCARENAS et al., 2009).	35
Figura 10	Diagrama de blocos do analisador de impedância utilizado.	38
Figura 11	$Tubo_m$	39
Figura 12	Transdutor buzzer.	39
Figura 13	Níveis de danos simulados no $Tubo_m$	40
Figura 14	Parte real da impedância do $Tubo_m$ em uma faixa de frequências de 63-71 kHz.	40
Figura 15	Parte real da impedância do $Tubo_m$ em uma faixa de frequências de 75-83 kHz.	41
Figura 16	Parte real da impedância do $Tubo_m$ com furo em uma faixa de frequências de 63-71 kHz.	41
Figura 17	Parte real da impedância do $Tubo_m$ com furo em uma faixa de frequências de 75-83 kHz.	42

Figura 18	Índices RMSD e CCDM Normalizados do $Tubo_m$. a) Faixa de frequência de 63-71 kHz; b) Faixa de frequência de 75-83 kHz.	43
Figura 19	$Tubo_M$	44
Figura 20	Níveis de danos simulados no $Tubo_m$	45
Figura 21	Parte real da impedância do $Tubo_M$ em uma faixa de frequências de 65-68 kHz.	45
Figura 22	Parte real da impedância do $Tubo_M$ em uma faixa de frequências de 75-83 kHz.	46
Figura 23	Índices RMDS e CCDM Normalizados do $Tubo_M$. a) Faixa de frequências de 63-71 kHz; b) Faixa de frequências de 75-83 kHz.	47
Figura 24	Níveis de danos para o quarto teste.	47
Figura 25	Parte real da impedância do $Tubo_M$ em uma faixa de frequências de 65-68 kHz para o PZT1.	48
Figura 26	Parte real da impedância do $Tubo_M$ em uma faixa de frequências de 65-68 kHz para o PZT2.	48
Figura 27	Parte real da impedância do $Tubo_M$ em uma faixa de frequências de 65-68 kHz para o PZT3.	49
Figura 28	Parte real da impedância do $Tubo_M$ em uma faixa de frequências de 65-68 kHz para o PZT4.	49
Figura 29	Índices RMDS e CCDM Normalizados do $Tubo_M$. a) RMSD na faixa de frequências de 63-71 kHz; b) CCDM na faixa de frequências de 63-71 kHz. .	50
Figura 30	Parte real da impedância do $Tubo_M$ em uma faixa de frequências de 77-80 kHz para o PZT1.	51
Figura 31	Parte real da impedância do $Tubo_M$ em uma faixa de frequências de 77-80 kHz para o PZT2.	51
Figura 32	Parte real da impedância do $Tubo_M$ em uma faixa de frequências de 77-80 kHz para o PZT3.	52
Figura 33	Parte real da impedância do $Tubo_M$ em uma faixa de frequências de 77-80 kHz para o PZT4.	52

Figura 34	Índices RMDS e CCDM Normalizados do $Tubo_M$. a) RMSD na faixa de frequências de 75-83 kHz; b) CCDM na faixa de frequências de 75-83 kHz. .	53
Figura 35	Material piezelétrico.	54
Figura 36	Níveis de danos para o quinto e sexto teste.	54
Figura 37	Parte real da impedância do $Tubo_M$ em uma faixa de frequências de 40-45 kHz.	55
Figura 38	Parte real da impedância do $Tubo_M$ em uma faixa de frequências de 80-85 kHz.	55
Figura 39	Índices RMDS e CCDM do $Tubo_M$. a) Faixa de frequências de 35-45 kHz; b) Faixa de frequências de 75-85 kHz.	56
Figura 40	Parte real da impedância do $Tubo_M$ em uma faixa de frequências de 40-45 kHz.	57
Figura 41	Parte real da impedância do $Tubo_M$ em uma faixa de frequências de 80-85 kHz.	57
Figura 42	Índices RMDS e CCDM do $Tubo_M$. a) Faixa de frequências de 35-45 kHz; b) Faixa de frequências de 75-85 kHz.	58
Figura 43	Estrutura: <i>Tubulação</i>	60
Figura 44	Danos simulados na <i>Tubulação</i>	61
Figura 45	a) Medida da parte real da impedância da <i>Tubulação</i> a diferentes pressões; b) Índice CCDM da <i>Tubulação</i>	61
Figura 46	a) Medida da parte real da impedância da <i>Tubulação</i> com vazamento; b) Índice CCDM do vazamento na <i>Tubulação</i>	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Vazamentos reportados de 1 Janeiro de 2010, a 7 Julho de 2012	16
Tabela 2	Índices RMSD e CCDM do $Tubo_m$ na faixa de frequência de 63-71 kHz	42
Tabela 3	Índices RMSD e CCDM do $Tubo_m$ na faixa de frequência de 75-83 kHz.	42
Tabela 4	Índices RMSD e CCDM do $Tubo_m$ com furo na faixa de frequência de 63-71 kHz.	43
Tabela 5	Índices RMSD e CCDM do $Tubo_m$ com furo na faixa de frequência de 75-83 kHz.	43
Tabela 6	RMSD e CCDM do $Tubo_M$ na faixa de frequência de 63-71 kHz. . . .	46
Tabela 7	Índices RMSD e CCDM do $Tubo_M$ na faixa de frequência de 75-83 kHz	46
Tabela 8	Índice CCDM Normalizado para os quatro PZT's na faixa de frequência de 63-71 kHz.	50
Tabela 9	Índice RMSD Normalizado para os quatro PZT's na faixa de frequência de 63-71 kHz.	50
Tabela 10	Índice CCDM normalizado para os quatros PZT's na faixa de frequência de 75-83 kHz.	53
Tabela 11	Índice RMSD Normalizado para os quatro PZT's na faixa de frequência de 75-83 kHz.	53
Tabela 12	Índices RMSD e CCDM do $Tubo_M$ na faixa de frequência de 35-45 kHz.	56
Tabela 13	Índices RMSD e CCDM do $Tubo_M$ na faixa de frequência de 75-85 kHz	56
Tabela 14	Índices RMSD e CCDM do $Tubo_M$ na faixa de frequência de 35-45 kHz.	58
Tabela 15	Índices RMSD e CCDM do $Tubo_M$ na faixa de frequência de 75-85 kHz	58

LISTA DE ABREVIACÕES E SIGLAS

EMI	Electro-Mechanical Impedance
PZT	Pb-Lead Zirconate Titanate
SHM	Structural Health Monitoring
PHMSA	Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration
FRF	Função de Resposta em Frequência
NDE	Avaliação não destrutiva
RMSD	Root Mean Square Deviation
CCDM	Correlation Coefficient Deviation Metric
LDS	Leak Detection Systems

LISTA DE SÍMBOLOS

s_{ij}	Deformação mecânica i
T_{kl}	Tensão mecânica
E_k	Campo elétrico
D_j	Deslocamento elétrico
s_{ijkl}^E	Coefficiente de elasticidade
ϵ_{jk}^T	Permissividade dielétrica
d_{kij}	coeficiente piezelétrico
M	Massa
K	Constante elástica da mola
C	coeficiente de amortecimento
V	Tensão de entrada
I	corrente de saída
d_{3x}	Constante de acoplamento piezoelétrico
$\hat{Y}_{xx}^E$	Módulo de Young
ϵ_{33}^T	Constante dielétrica complexa
a	Constante geométrica
$Z_{n,h}$	Impedância elétrica do transdutor
$Z_{n,d}$	a impedância considerando o vazamento ou dano na tubulação
$\overline{Z}_h$	Impedância na faixa de frequência considerada obtidas antes do vazamento ou dano
$\overline{Z}_d$	Impedância na faixa de frequência considerada obtidas depois do vazamento ou dano

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	Objetivo do Trabalho	18
1.2	Organização do Trabalho	19
2	SHM BASEADO NA IMPEDÂNCIA ELETROMECHANICA	20
2.1	Introdução aos Sistemas de SHM	20
2.2	O Efeito Piezoelectrico	22
2.3	Materiais e Transdutores Piezoelectricos	23
2.4	Técnica da Impedância Eletromecânica (EMI)	25
2.4.1	Método para a identificação dos danos	27
3	REVISÃO DA LITERATURA	30
3.1	SHM baseado na Impedância Electromecânica (EMI) para tubulações	30
3.2	Conclusões	36
4	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	37
4.1	Sistema de Medição da Impedância	37
4.2	Testes na estrutura $Tubo_m$	38
4.2.1	Aumento de Massa	40
4.2.2	Furo	41
4.2.3	Análise dos Resultados	43
4.3	Testes na estrutura $Tubo_M$	44
4.3.1	Aumento de Massa	45
4.3.2	Aumento da Massa Medida com 4 Sensores	47
4.3.3	Aumento de Massa Dois	54
4.3.4	Aumento de Massa Três	56

4.3.5	Análise dos Resultados	59
4.4	Testes na Estrutura <i>Tubulação</i>	60
4.4.1	Variação de pressão	60
4.4.2	Vazamento 100 mm	62
4.4.3	Análise dos Resultados	62
5	CONCLUSÕES	63
5.1	Considerações Finais	63
5.2	Trabalhos Futuros	64
	REFERÊNCIAS	66
	APÊNDICE A - Artigos Publicados Relacionados com esta Pesquisa	70

1 INTRODUÇÃO

A maioria das empresas de distribuição de água, gás e petróleo consideram as tubulações como o melhor meio de transporte de fluidos para grandes distâncias, porque estes apresentam menores custos, maior segurança, e menores riscos de acidentes e/ou danos ao ambiente quando comparados ao transporte terrestre, ferroviário ou marítimo.

Os sistemas de detecção de danos em tubulações têm um papel muito importante na indústria porque as tubulações podem cruzar áreas densamente povoadas e áreas naturais. Além disso, os produtos transportados pelas tubulações são de alto custo e agressivos à natureza, exigindo tubulações mais seguras e bem monitoradas para impedir vazamentos e rupturas, e assim, conseguir evitar mais danos ambientais, prejuízos econômicos e também para evitar riscos para as pessoas.

Atualmente, as empresas dos Estados Unidos relatam a ocorrência de grande quantidade de danos em suas tubulações. As principais causas relatadas são apresentadas na tabela 1.

Tabela 1 - Vazamentos reportados de 1 Janeiro de 2010, a 7 Julho de 2012

	Tubulação com Líquidos perigosos	Transmissão de Gás Natural	Distribuição de Gás Natural	Total
Incidentes	766	295	276	1337
Rupturas	21	41	13	75
Vazamentos	567	136	63	766
Perfurações Mecânicas	33	25	51	109
Transbordos ou Estouros	46	0	0	46
Outros Tipos	99	93	149	341

Fonte: Adaptado de U.S. Department of Transportation Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration Final Report No. 12-173

A maioria dos danos em oleodutos e gasodutos é detectada e localizada a partir de ligações telefônicas feitas por moradores afetados pelos mesmos. Isto se deve à pouca penetração no mercado de sistemas de detecção de vazamentos, pois o monitoramento ainda é semimanual e, geralmente, é realizado através de uma supervisão periódica feita pelos operadores. Os requisitos para monitoramento das tubulações de petróleo e gás podem variar de país para país. Alguns países exigem um software de monitoramento em cada tubo, outros apenas em áreas de alto risco à população ou ao meio ambiente, ou ainda não possuem regulamentação sobre os sistemas de detecção de vazamentos em tubulações (LDS - Leak Detection Systems).

Os LDS podem diagnosticar três tipos de danos em tubulações: vazamentos, rupturas e pequenas infiltrações. Por conseguinte, a escolha entre os diferentes LDS dependerá dos tipos de perda de líquidos ou gases. Em princípio, um LDS com a função de evitar uma ruptura não precisa ser muito sensível, mas deve ser muito rápido. Um LDS destinado para a detecção de fugas pode levar mais tempo para detectar perda, mas deve ser sensível, de confiança no diagnóstico, além de fornecer informações para ajudar na localização do vazamento. Por fim, um LDS que detecte pequenas infiltrações deve ser o mais sensível, já que sua causa pode ser corrosão, fadiga ou defeitos na solda, que são mais difíceis de serem detectados (MOURA1 et al., 2004).

As rupturas, vazamentos e infiltrações podem provocar até 5 bilhões de dólares em danos materiais (SCHAEFER, 2012). Estima-se que um investimento de 1225 dólares por quilometro de tubulação ao ano, seria necessário para evitar esses prejuízos. Não se conhece ainda um sistema LDS que consiga evitar uma ruptura, mas sabe-se que já é possível ter alertas de danos incipientes em tempo hábil para saná-los e, por consequência, evitar danos maiores ou rupturas. Os LDS preferencialmente utilizados pela indústria são aqueles que podem ser implementados com o material já presente no campo, o que explica o domínio dos LDS baseados no controle de pressão/fluxo.

Os LDS são muito importantes em qualquer aplicação, mas eles se destacam quando aplicados em tubulações de difícil acesso e, normalmente, subterrâneas. Geralmente os danos e vazamentos nas tubulações podem ocorrer devido à fatores como mudanças rápidas na pressão, deterioração por corrosão, fadiga de material, manutenção inadequada, erro humano, dentre outros.

Todos os materiais e estruturas estão susceptíveis a falhas e defeitos inerentes, o que torna necessária uma definição de dano antes de realizar-se a detecção dos mesmos. Wait, Park e Farrar (2004) definem dano como sendo uma mudança na estrutura, intencional ou não intencional, que afeta negativamente a capacidade da estrutura para realizar sua função pretendida. A presença de danos e vazamentos pode alterar a resposta dinâmica da estrutura devido às variações na rigidez, na massa, dissipação de energia, impedância mecânica ou as propriedades geométricas. Portanto, a identificação de dano é baseada na comparação entre dois estados de uma estrutura, um estado considerado íntegro e outro estado com a suposta falha.

Os estudos realizados neste trabalho estão focados nos sistemas de monitoramento de integridade estrutural, que são confiáveis e econômicos. Em geral, SHM tem aplicação dentro das áreas da indústria aeroespacial, engenharia civil e engenharia mecânica, e envolve o uso de um conjunto de sensores distribuídos ao longo de uma estrutura para fazer observações periódicas da resposta dinâmica do sistema. Uma análise sistematizada dessas observações, com cálculo de índices de falha métrica, permite que se determine a ausência ou não de danos. Deve-se destacar que um sistema SHM tem de ser capaz de monitorar continuamente a estrutura, mesmo

em serviço. Por conseguinte, o conjunto de sensores para o sistema de SHM deve ser fixado tal que a estrutura possa continuar em operação durante o monitoramento.

No caso deste trabalho, são monitorados vários tubos e um sistema de tubulação. Há vários elementos num sistema de tubulação, dentro dos quais estão o corpo principal dos segmentos de tubos simples, juntas flangeadas e soldadas, válvulas, conexões, e estações de bombeamento. Especificamente, o presente estudo coloca ênfase sobre o controle da integridade estrutural do corpo principal dos segmentos dos tubos simples.

Para implementar um sistema de SHM com uma tubulação, vários sensores implantados em locais ao longo do eixo do tubo são usados para fazer as observações do estado da estrutura. Os arranjos de sensores devem ser feitos de forma eficiente de tal maneira que seja possível obter o máximo de sensibilidade aos danos a partir das observações.

Neste trabalho, a detecção de danos foi baseada na impedância eletromecânica (EMI), que é uma forma de avaliação não destrutiva (NDE) baseada na Função de Resposta em Frequência (FRF). Os testes foram realizados no corpo principal dos segmentos de tubos simples de tubulações e as medições foram realizadas em frequências mais elevadas, que são mais sensíveis aos danos.

1.1 **Objetivo do Trabalho**

O objetivo deste trabalho é demonstrar os benefícios e a viabilidade dos transdutores do tipo piezelétrico para monitorar sistemas de tubulações. Para tal foi utilizado um sistema de monitoramento estrutural (SHM) baseado na técnica da impedância eletromecânica (EMI), que se destaca por sua simplicidade e por utilizar componentes de baixo custo. O sistema foi implementado com sensores do tipo piezocerâmicas e os testes foram realizados no corpo principal de segmentos de tubos simples.

1.2 Organização do Trabalho

O conteúdo desta dissertação está organizado em cinco capítulos, referências bibliográficas e um apêndice conforme descrito a seguir.

- **Capítulo 1 - Introdução:** Apresenta o escopo, o objetivo do trabalho e a motivação para sua realização;
- **Capítulo 2 - SHM Baseado na Impedância Electromecânica:** São apresentados os fundamentos de SHM, os princípios básicos do efeito piezelétrico, as características e vantagens do transdutor piezelétrico de PZT e os fundamentos da técnica de EMI;
- **Capítulo 3 - Revisão da Literatura:** Apresenta uma revisão da literatura apontando algumas aplicações práticas no contexto dos sistemas de SHM baseadas na técnica de EMI em tubulações;
- **Capítulo 4 - Procedimento Experimental:** São apresentados os experimentos realizados para comprovar a eficiência dos transdutores piezelétricos em detectar danos no corpo principal dos segmentos de tubos simples e em uma tubulação através da técnica da impedância electromecânica (EMI). Por último são apresentados e analisados os resultados através dos índices de falha métrica RMSD e CCDM;
- **Capítulo 5 - Conclusões:** São discutidas as conclusões e as perspectivas para futuro deste trabalho;
- **Referencias;**
- **APÊNDICE A - Artigos Publicados Relacionados com esta Pesquisa**

2 SHM BASEADO NA IMPEDÂNCIA ELETROMECHANICA

Este capítulo apresenta a fundamentação teórica necessária para o entendimento dos resultados presentes nesta dissertação: Introdução aos sistemas de monitoramento estrutural (SHM), o efeito piezoelectrico, as principais características dos materiais e transdutores piezoelectricos, e os fundamentos e principais características da técnica da impedância electromechanica (EMI).

2.1 Introdução aos Sistemas de SHM

O Monitoramento da Integridade Estrutural (SHM) é definido na literatura como a aquisição, a validação e a análise de dados técnicos para facilitar decisões de gerência do ciclo de vida da estrutura (HALL, 1999). De uma maneira mais genérica, os sistemas de monitoramento de integridade estrutural têm como finalidade detectar, em tempo real ou não, danos estruturais em um vasto campo de aplicações tais como estruturas civis (pontes, edifícios, estradas, plataformas petrolíferas), aeronáuticas e aeroespaciais (aviões, helicópteros, satélites, estações espaciais, etc.) e marítimas (submarinos e navios) (BAPTISTA; VIEIRA, 2009).

Em geral, a integridade é a condição da estrutura que permite a sua operação adequada com desempenho satisfatório; monitoramento é o processo de diagnóstico e prognóstico; e dano é uma falha material, estrutural, ou funcional que afeta o desempenho presente ou futuro da estrutura (INMAN, 2005).

De acordo com Rytter (1993) o estado de dano de uma estrutura pode ser classificado em uma categoria dentre cinco, representadas pelas seguintes questões:

- Existência: a estrutura está danificada?
- Localização: qual a posição do dano na estrutura?
- Tipo: que tipo de dano está presente na estrutura?
- Severidade: quão severo é o dano?
- Prognóstico: qual a vida útil da estrutura?

A partir dos estados de danos apresentados anteriormente, Doebling, Farrar e Prime (1998) classificam um sistema SHM em os seguintes níveis:

- NÍVEL 1: Detecta o dano:
- NÍVEL 2: Detecta e localiza o dano:
- NÍVEL 3: Detecta, localiza e quantifica o dano:
- NÍVEL 4: Detecta, localiza, quantifica o dano e estima a vida útil restante:

Incorporando Materiais Inteligentes no sistema de detecção, Inman (2001) propôs mais três níveis:

- NÍVEL 5: Combina o nível 4 com Estruturas Inteligentes para auto-diagnóstico de danos estruturais;
- NÍVEL 6: Combina o nível 4 com Estruturas Inteligentes e Controle para formar um sistema de auto-reparo estrutural;
- NÍVEL 7: Combina o nível 1 com Controle Ativo e Estruturas Inteligentes para obtenção de um sistema simultâneo de controle e monitoramento.

Geralmente, os sistemas de SHM coletam os dados enquanto a estrutura está em condição dinâmica por meio de excitação forçada em uma faixa de frequência mais sensível ao dano, sendo feita de forma controlada por atuadores como *shakers* e transdutores piezelétricos. Desse princípio, surgem as técnicas baseadas na Função de Resposta em Frequência (FRF). Assim, os sistemas de SHM geralmente consistem em redes ou arranjos de sensores para aquisição de dados gerenciados por processadores que executam algoritmos para avaliar as condições da estrutura, (CORTEZ, 2012).

As principais técnicas utilizadas em sistemas de SHM têm origem nos métodos da avaliação não destrutiva (NDE), tais como a EMI, a emissão acústica, a inspeção ultrasônica, a inspeção por raios-X, vácuo comparativo, ondas de Lamb, inspeção por partícula magnética, correntes de Eddy (parasitas) e aquelas baseadas em fibra óptica, (SOHN et al., 2004).

Neste estudo é trabalhada a técnica da EMI que utiliza transdutores piezelétricos. Para a compreensão do princípio dessa técnica é necessário um estudo desses dispositivos que têm como propriedade fundamental o efeito piezelétrico.

2.2 O Efeito Piezelétrico

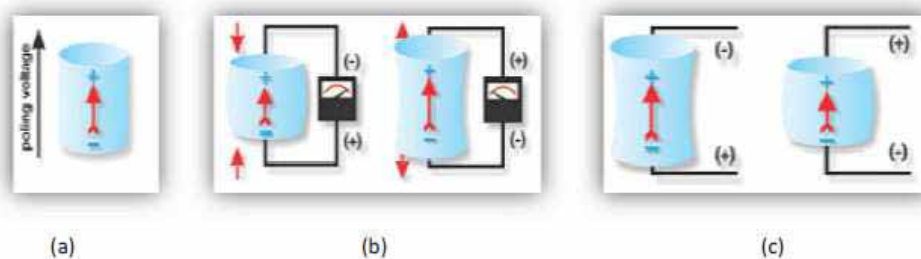
O efeito piezelétrico foi descoberto em 1880 pelos irmãos Curie, tendo sido utilizado em uma aplicação prática pela primeira vez por Paul Langevin para fazer sonares durante a Primeira Guerra Mundial. Langevin usou cristais de quartzo acoplados às massas de metal (inventando o transdutor tipo Langevin) para gerar ultra-som de dezenas de kHz.

Após a Primeira Guerra Mundial, por causa da dificuldade de excitar transdutores construídos com cristais de quartzo, que exigiam geradores de alta tensão, pesquisas continuaram a ser realizadas em busca de materiais sintéticos piezelétricos. Estes esforços levaram à descoberta e desenvolvimento, durante os anos 40 e 50, das cerâmicas piezelétricas de Titanato de Bário pela URSS e Japão, e as cerâmicas piezelétricas de Titanato Zirconato de Chumbo (PZT) pelos EUA (CADY, 1964).

Os materiais piezeletricos são uma classe de materiais inteligentes por possuírem a capacidade de gerar cargas elétricas ao sofrerem deformações ou alterações em suas dimensões, resultando em um fenômeno conhecido como efeito direto. De forma recíproca, denomina-se efeito indireto ou inverso quando a aplicação de um campo elétrico no material proporciona deformações ou variações em suas dimensões (LEO, 2007).

A Figura 1 ilustra o efeito direto e indireto, ou inverso, de um cristal piezelétrico cilíndrico. Na Figura 1.a) o cristal está livre de campos elétricos e de tensões. Na Figura 1.b) o cristal sofre variações de suas dimensões derivadas da aplicação de forças compressivas e trativas, gerando uma polarização relacionada à força aplicada no material (efeito direto). Na figura 1.c) o cristal sofre alterações em suas dimensões devido à aplicação de campos elétricos (efeito Inverso).

Figura 1 - a.) Cristal piezelétrico; b.) Efeito Direto; c.) Efeito Inverso.



Fonte: (APC, 2011).

Na atualidade, os materiais piezelétricos são utilizados como elementos sensores (forma passiva) e/ou atuadores (forma ativa) em aplicações tecnológicas desde baixa frequência (na faixa de poucos hertz) até frequências da ordem de GHz. As aplicações em baixas frequências são cobertas principalmente pelos materiais policristalinos (cerâmicos, polímeros ou compósitos). Cristais e filmes finos, por sua vez, são os mais utilizados em aplicações de altas frequências (CORTEZ, 2012).

Os sensores ativos de pastilha piezelétrica são normalmente construídos a partir de cerâmica de PZT. Para pequenas mudanças nos parâmetros mecânicos e elétricos, a teoria linear da piezeletricidade é aplicável e a cerâmica piezelétrica é descrita pelo seguinte par de equações em notação tensorial (MEITZLER, 1987):

$$D_j = d_{jkl}T_{kl} + \varepsilon_{jk}^T E_k \quad (1)$$

$$S_{ij} = s_{ijkl}^E T_{kl} + d_{kij} E_k \quad (2)$$

As Equações (1) e (2) definem uma relação entre a deformação mecânica S_{ij} , a tensão mecânica T_{kl} , o campo elétrico E_k e o deslocamento elétrico D_j , que são acoplados através do coeficiente de elasticidade s_{ijkl}^E medido com campo elétrico zero ($E = 0$), da permissividade dielétrica ε_{jk}^T medida com tensão mecânica nula ($T = 0$) e do coeficiente piezelétrico d_{kij} . Em geral, a representação tensorial nas Equações (1) e (2) resulta em nove equações correspondentes aos componentes de deformação mecânica e direções de polarização respectivas. A simplificação das equações constitutivas é obtida considerando particularidades do material piezelétrico e sua interação com a estrutura a ser monitorada.

Para o adequado entendimento deste trabalho, apenas as características básicas do efeito piezelétrico são necessárias. Consequentemente, um estudo mais elaborado envolvendo as equações (1) e (2) pode ser encontrado em (MEITZLER, 1987).

2.3 Materiais e Transdutores Piezelétricos

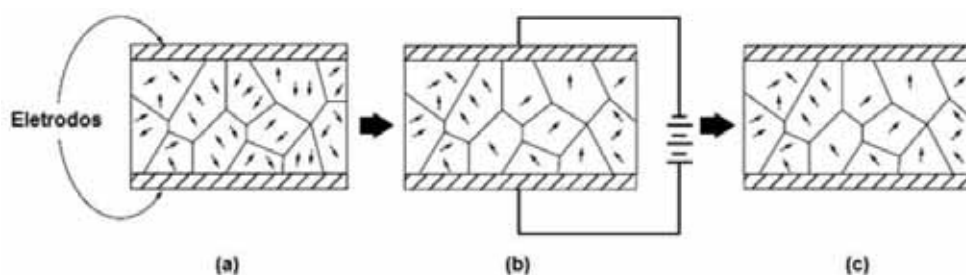
As propriedades piezelétricas estão presentes em 20 das 32 classes cristalográficas, embora somente algumas delas sejam usadas; elas também estão presentes em materiais ferroelétricos amórficos. Entre os materiais piezelétricos, podem ser citados: os cristais de quartzo (SiO_2), niobato de lítio (LiNbO_3), tantalato de lítio ($\text{LiTaO}_3 - \text{LT}$), entre outros; alguns semicondutores, sendo os mais usados o óxido de zinco (ZnO), o sulfeto de cádmio (CdS) e o nitreto de alumínio (AlN); os polímeros, tal como o polyvinylidene fluoride (PVDF ou PVF_2); e as cerâmicas piezelétricas (BAPTISTA; VIEIRA, 2009).

Dentre os materiais piezelétricos, as cerâmicas piezelétricas se destacam por apresentarem elevadas propriedades piezelétricas quando comparada como outros materiais naturais ou sintéticos piezelétricos. Outra importante característica é a variedade de formas e tamanhos que as cerâmicas podem assumir devido ao seu processo de fabricação. Apesar das vantagens, também existem alguns fatores que limitam as aplicações práticas de materiais cerâmicos, principalmente fatores relacionados à alta rigidez e baixa resiliência mecânica. Como alternativas

a tais limitações têm-se os chamados polímeros piezelétricos como, por exemplo, o Poly (vinylidene fluoride), PVDF ($C_2H_2F_2$)_n, que apresentam menor rigidez e maior flexibilidade que as cerâmicas (GONSALEZ, 2012).

Para que as cerâmicas apresentem propriedades piezelétricas macroscópicas é necessário submetê-las a dois procedimentos básicos. Primeiro, elas são aquecidas em alta temperatura. Após o aquecimento, as cerâmicas apresentam a estrutura cristalina ilustrada na Figura 2.a), mas ainda não possuem a propriedade piezelétrica porque os dipolos elétricos têm uma orientação randômica e o momento elétrico total é cancelado. Para as cerâmicas tornarem-se piezelétricas, elas devem ser polarizadas. Essa polarização é obtida através da aplicação de um campo elétrico DC na ordem de kV/mm, que orienta os dipolos do material, conforme ilustração da na Figura 2.b). Devido à sua forte propriedade dielétrica, os dipolos da cerâmica permanecem orientados mesmo após o campo elétrico ser retirado, apresentando uma intensa propriedade piezelétrica, como apresentado na Figura 2.c).

Figura 2 - Processo de fabricação de uma cerâmica piezelétrica; a.) Aquecimento em alta temperatura; b.) Aplicação de um campo elétrico DC; c.) Orientação final dos dipolos.



Fonte: (BAPTISTA; VIEIRA, 2009).

Comparando-se as cerâmicas de PZT com outros materiais piezelétricos, estas apresentam as seguintes vantagens: bom acoplamento eletromecânico, boa estabilidade, alta rigidez, resposta linear para campo elétrico de baixa intensidade e baixo custo (LIN; GIURGIUTIU, 2006). Neste trabalho são consideradas as cerâmicas piezelétricas de titanato zirconato de chumbo, que são amplamente utilizadas em atuadores eletromecânicos, sensores e transdutores (JAFÉ; COOK; JAFÉ, 1971). Nestas aplicações, estas piezocerâmicas são submetidas frequentemente a altas tensões mecânicas.

As cerâmicas PZT apresentam rigidez geralmente superior à da estrutura na qual ela está inserida, o que permite uma conversão eletromecânica de grande eficiência (acima de 80%), o que é uma característica importante em aplicações como atuadores. O PZT é ainda recomendado como atuador auto-sensível, particularmente no controle e identificação de falhas em grandes faixas de frequência (BANKS; SMITH; WANG, 1996). As pastilhas de PZT exigem tensões tipicamente menores que 1 V para excitar os modos de alta frequência de uma determinada estrutura (VIEIRA; BAPTISTA; INMAN, 2010).

Geralmente, os transdutores piezelétricos utilizados em aplicações de SHM são constituídos por pequenas placas delgadas de cerâmicas de PZT revestidas, em ambas as faces, por um filme metálico que serve como eletrodo. Exemplos de transdutores desse tipo são as cerâmicas produzidas pela Piezo Systems (SYSTEMS, 2013), comumente utilizadas em aplicações de SHM.

2.4 Técnica da Impedância Eletromecânica (EMI)

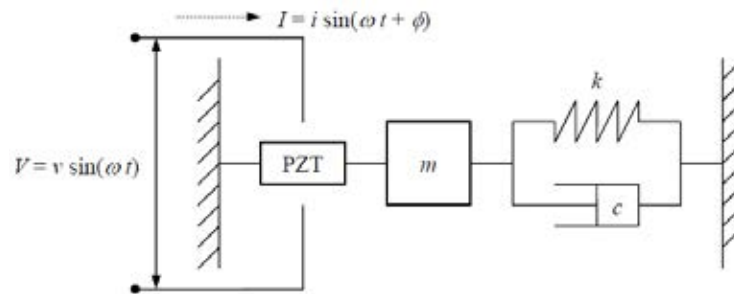
A técnica da EMI é uma forma de avaliação não destrutiva (NDE) baseada na Função de Resposta em Frequência (FRF) que se destaca por sua simplicidade e por utilizar transdutores piezelétricos de baixo custo. As pesquisas sobre a técnica da impedância EMI, embora sejam vastas, são baseadas, na maioria dos casos, em experimentos com estruturas simples, tais como barras delgadas ou vigas de alumínio. Embora existam aplicações em estruturas complexas, não há um estudo conclusivo sobre a influência da estrutura monitorada na sensibilidade do transdutor para detectar danos.

Nos modelos da impedância eletromecânica (EMI), os transdutores de PZT são geralmente colados à superfície da estrutura de acolhimento por meio de um adesivo de alta rigidez, que pode ser uma cola instantânea a base de cianoacrilato ou uma resina de epóxi. O transdutor de PZT é alimentado por um campo elétrico alternado, de valor fixo, que excita e induz vibrações na estrutura (efeito piezelétrico inverso). A vibração resultante gera um fluxo de corrente no transdutor (efeito piezelétrico direto), estabelecendo uma relação entre as propriedades mecânicas da estrutura e a impedância elétrica do transdutor. Logo, é possível monitorar variações das propriedades mecânicas da estrutura através da medição da impedância elétrica (CAWLEY, 1984). A Impedância eletromecânica é uma função da rigidez, massa e de amortecimento da estrutura de acolhimento (SUN et al., 1995b), e do comprimento, largura, espessura e orientação do transdutor de PZT (WETHERHOLD; MESSER; PATRA, 2003).

As alterações nas medidas de impedância são indicativas da presença de danos estruturais portanto é importante ter um modelo analítico ou numérico para garantir o sucesso da implementação da técnica em diferentes tipos de estruturas, nos últimos anos vários modelos de interação PZT-estrutura têm sido desenvolvidos até hoje.

Um modelo eletromecânico proposto por Liang, Sun e Rogers (1994) que quantitativamente descreve o processo de medição de impedância é apresentado na Figura 1. O transdutor de PZT é considerado como uma barra fina exposta a uma vibração axial quando submetido a uma tensão elétrica alternada. Uma extremidade é fixa e a outra é conectada na estrutura, representada por um sistema de um grau de liberdade.

Figura 3 - Modelo eletromecânico de um transdutor piezelétrico colado na estrutura do tipo massa-mola.



Fonte: (PARK et al., 2003).

Na Figura 3, m é a massa, k é a constante elástica da mola e c o coeficiente de amortecimento. O transdutor é excitado por uma fonte de tensão senoidal com amplitude v e com frequência angular ω que produz uma corrente I com amplitude i e fase ϕ . Considerando-se que as propriedades do transdutor sejam invariáveis no tempo, qualquer mudança na estrutura irá afetar o valor da impedância do sistema. A solução do sistema apresentado na Figura 1 em termos da impedância elétrica do transdutor é dada, de acordo com Liang, Sun e Rogers (1994), pela seguinte equação:

$$Z_E(\omega) = \frac{V}{I} = \frac{1}{j\omega a} \left(\epsilon_{33}^T - \frac{Z(\omega)}{Z(\omega) + Z_a(\omega)} d_{3x}^2 \hat{Y}_{xx}^E \right)^{-1} \quad (3)$$

Na Equação (3), V representa a tensão de entrada e I é a corrente de saída do transdutor piezelétrico. Além disso, a é uma constante geométrica, e d_{3x} , $\hat{Y}_{xx}^E$ e ϵ_{33}^T , a constante de acoplamento piezelétrico, módulo de Young, e a constante dielétrica complexa do transdutor piezelétrico a uma tensão constante, respectivamente.

De acordo com a Equação (3), qualquer alteração na impedância mecânica da estrutura provocada por um dano implica em uma variação correspondente na impedância elétrica do transdutor. Portanto, a técnica da EMI permite que a integridade da estrutura seja avaliada de uma maneira simples através da medição da impedância elétrica do transdutor de PZT.

Liang, Sun e Rogers (1994) desenvolveram o modelo de interação unidimensional baseado no pressuposto de que o PZT se comporta como uma barra para ver sua atuação transversal (Vibração axial) ao longo da direção X; Zhou, Liang e Rogers (1996) e Bhalla e Soh (2004) estenderam o modelo unidimensional para um bidimensional; Annamdas e Soh (2007a) consideraram as limitações dos modelos 1D e 2D, tais como, restrições na forma do transdutor, tamanho, e isotropia, e propuseram um modelo tridimensional, modelo que considera as atuações em 3D do transdutor PZT.

Recentemente, muitos pesquisadores têm investigado como alguns problemas práticos podem afetar o desempenho de um sistema de SHM baseado na EMI. Em Park et al. (2009), foi

sugerido um novo modelo eletromecânico para considerar a qualidade do transdutor e o efeito da degradação da camada de cola entre o transdutor e a estrutura. Os efeitos do carregamento externo e da rigidez da estrutura foram analisados por Annamdas, Yang e Soh (2007); os resultados indicaram que uma tensão mecânica aplicada na estrutura causa alterações na admitância elétrica do transdutor e a susceptância é a componente mais sensível ao carregamento.

Em YangANG, Hu e Lu (2007), os autores analisaram a sensibilidade do transdutor PZT para detectar danos em estruturas de concreto; eles determinaram a região de sensibilidade do transdutor e concluíram que a parte real da admitância é mais adequada do que a parte imaginária para a detecção de danos.

Uma grande vantagem apresentada pela técnica da impedância Eletromecânica quando comparada com outras técnicas de monitoramento utilizadas em sistemas SHM é a possibilidade de detectar falhas em estado incipiente, ou seja, inicial. Isso ocorre devido ao fato dos sinais serem analisados em altas frequências e, conseqüentemente, estarem relacionados aos comprimentos de ondas pequenos, sensíveis o bastante para detectar pequenas variações na estrutura (GONSALEZ, 2012).

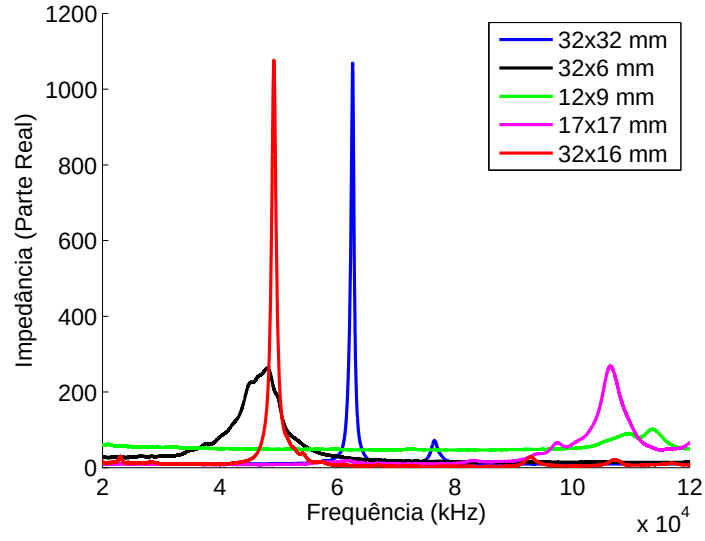
Segundo Park et al. (2003), a melhor faixa de frequência para uso da técnica da técnica da Impedância Eletromecânica se encontra entre 30 kHz a 400 kHz. Frequências mais elevadas favorecem a localização do dano, enquanto que frequências mais baixas permitem detectar danos em áreas maiores. Em termos de ressonância, as faixas de frequências selecionadas devem conter um número de picos variando entre 20 e 30, o que indica uma boa excitação da estrutura.

2.4.1 Método para a identificação dos danos

Na prática, o transdutor PZT é excitado por uma fonte com frequência variável de forma que as variações na impedância elétrica correspondentes às frequências naturais da estrutura, que são alteradas pelo dano, possam ser avaliadas (BAPTISTA; VIEIRA, 2009). Na Figura 2, faz-se uma comparação da resistência elétrica (parte real da impedância) de vários transdutores PZT com diferentes dimensões, em uma faixa de frequência de 20 kHz a 120 kHz.

Com o transdutor colado na estrutura, sua impedância elétrica (módulo, parte real ou parte imaginária) passa a apresentar picos correspondentes às frequências naturais da estrutura. São as alterações nesses picos que devem ser analisadas para a identificação de um possível dano estrutural. A identificação do dano é feita comparando-se a impedância elétrica do transdutor medida com a estrutura em uma condição inicial, considerada íntegra, com a impedância medida após a estrutura ter sofrido um possível dano. Essa comparação é realizada por meio de índices de falha métrica. Os índices mais usados na literatura são o desvio da raiz média quadrática, RMSD (Root Mean Square Deviation), e a métrica do desvio do coeficiente de correlação, CCDDM (Correlation Coefficient Deviation Metric).

Figura 4 - Comparação entre as resistências elétricas de várias cerâmicas PZT com diferentes dimensões.



Fonte: o próprio autor

O índice RMSD pode ser calculado através da equação (4) (ROGERS, 1998),

$$RMSD = \sum_n^N \sqrt{\frac{(Z_{n,d} - Z_{n,h})^2}{Z_{n,h}^2}} \quad (4)$$

Na Equação (4), $Z_{n,h}$ é a impedância elétrica do transdutor considerando a estrutura íntegra e $Z_{n,d}$ é a impedância considerando o vazamento ou dano na tubulação, ambas considerando a variação na frequência de n até N ;

O índice CCDM é dado pela Equação (5) (MARQUI et al., 2008),

$$CCDM = \left| 1 - \frac{\sum_n^N (z_{n,h} - \bar{Z}_h)(z_{n,d} - \bar{Z}_d)}{\sqrt{\sum_n^N (z_{n,h} - \bar{Z}_h)^2} \sqrt{\sum_n^N (z_{n,d} - \bar{Z}_d)^2}} \right| \quad (5)$$

Na Equação (5), $\bar{Z}_h$ e $\bar{Z}_d$ são as médias da impedância na faixa de frequência considerada obtidas antes e depois do dano, respectivamente, dadas por:

$$\bar{Z}_h = \frac{1}{N} \sum_n^N z_{n,h} \quad (6)$$

$$\bar{Z}_d = \frac{1}{N} \sum_n^N z_{n,d} \quad (7)$$

Nas Equações (6) e (7), $z_{n,h}$ e $z_{n,d}$, podem ser utilizados tanto o módulo, a parte real ou imaginária da impedância elétrica do transdutor. Ainda não há um consenso na literatura de qual componente da impedância é mais adequado. Além disso, as frequências dessa faixa devem ser altas o suficiente para que estas tenham um comprimento de onda menor do que o tamanho do dano que se deseja detectar, (NOKES; CLOUD, 1993). Frequências elevadas, entretanto, limitam a região de sensibilidade do transdutor, mas podem ser vantajosas para a localização de dano em sistemas que utilizam rede de transdutores (PARK et al., 2003).

3 REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo apresenta-se uma visão da arte dos sistemas de monitoramento estrutural (SHM) que usam a técnica da impedância eletromecânica (EMI) para monitorar tubulações. São apresentados as estruturas e os transdutores utilizados para a implementação da técnica e, além disso, é realizado um análise dos principais testes realizados com tradutores piezoelétricos e dos índices de falha métrica utilizados para processar os dados tomados. Também, são apresentados os principais resultados obtidos para diferentes sistemas de tubulações e suas principais conclusões.

3.1 SHM baseado na Impedância Electromecânica (EMI) para tubulações

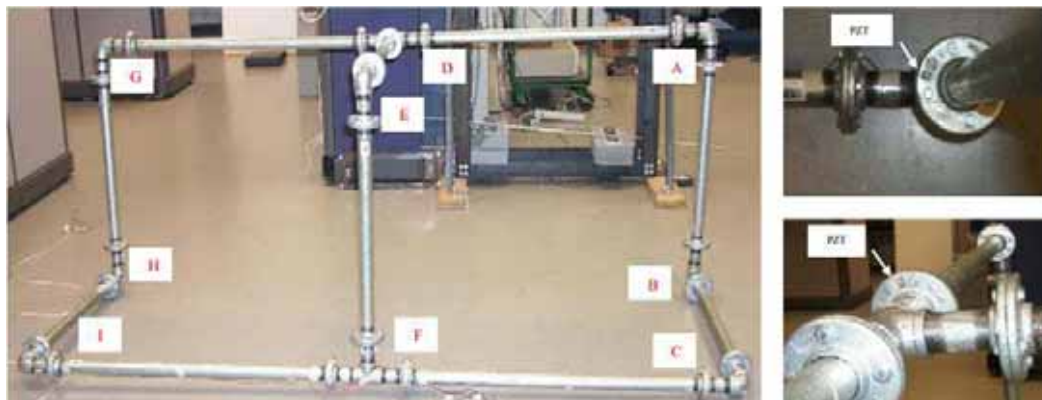
SHM baseado na EMI e aplicada a tubulações teve início com o desenvolvimento experimental proposto pela primeira vez por Park, Cudney e Inman (2001) . Outros trabalhos vieram posteriormente, com os desenvolvidos por (PEAIRS; PARK; INMAN, 2004; CHIAMORI et al., 2005; THIEN, 2006; MASCARENAS et al., 2009).

Park, Cudney e Inman (2001) fizeram o primeiro teste numa tubulação com flanges parafusadas, como descrito a seguir.

Naquele trabalho a estrutura usada tinha 2 m de largura e 1,3 m de comprimento, e foi feita de tubos segmentados de diâmetro 40 mm. As flanges da estrutura foram etiquetadas de A à J, e os cotovelos e articulações foram ligados por mais de 100 parafusos como é apresentado na Figura 5.

Um sensor/atuador PZT de largura 15 mm, comprimento 15 mm e espessura 0,2 mm foi colado em cada uma das flanges etiquetadas de A à J para monitorar as condições da estrutura, e um analisador de impedância elétrica HP4194 foi utilizado para realizar as medições, numa faixa de frequência de 80-100 kHz, obtida por tentativa e erro. Para os testes realizados nesta estrutura foi medida e analisada a parte real da impedância.

Figura 5 - Estrutura utilizada por (PARK; CUDNEY; INMAN, 2001).



Fonte: (PARK; CUDNEY; INMAN, 2001).

Dois testes foram realizados: o primeiro envolveu a flange D, no qual foram simulados quatro danos severos. Para o primeiro dano foram retirados três parafusos da flange, para o segundo dano foram retirados quatro parafusos, para o terceiro dano foram retirados seis parafusos e para o último danos foram retirados oito parafusos, provocando assim danos consideráveis na estrutura.

Um segundo teste foi realizado nas flanges A, B, E, F, G e H, simulando-se três níveis de danos. Para o primeiro dano foram retirados três parafusos da flange A e B, para o segundo dano foram retirados dois parafusos da flange F e G, e para o ultimo dano foram retirados quatro parafusos da flange F, G e H. As medições da impedância para este teste foram realizadas para cada flange respetivamente.

Nestes testes não foi especificado o índice de falha métrica utilizado, mas os autores foram apresentados gráficos comparativos com as métricas aplicadas aos diferentes danos simulados.

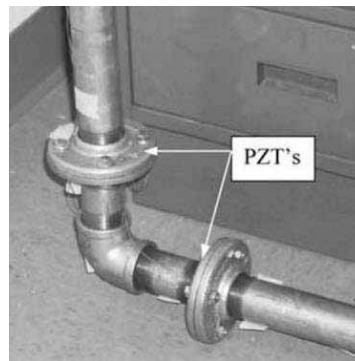
Os dados coletados a partir dos dois testes demonstraram a capacidade desta técnica para detectar danos. Verificou-se ainda que esta tem a capacidade de monitorar a integridade das tubulações em condições normais de operação e após um desastre natural, quando uma rápida avaliação de uma estrutura é urgentemente necessária.

Os resultados mostram, também, que é possível ter uma localização dos danos, devido a que o índice de falha métrica apresenta um maior valor para os danos locais quando comparado com os danos globais.

Peairs, Park e Inman (2004) realizaram testes com a mesma estrutura descrita anteriormente, mas com alguns configurações diferentes.

Um sensor/atuador PZT de largura 15 mm, comprimento 15 mm e espessura 0,2 mm foi colado em cada uma das flanges etiquetadas de A à J para monitorar as condições da estrutura (ver figura 6), e um analisador de impedância elétrica baseado no equipamento com um HP35665A foi utilizado para realizar as medições, numa faixa de frequência de 35-47.8 kHz, obtida por tentativa e erro.

Figura 6 - Estrutura utilizada por (PEAIRS; PARK; INMAN, 2004).



Fonte: (PEAIRS; PARK; INMAN, 2004).

No teste realizado foram simulados cinco níveis de danos. Após duas medidas da parte real da impedância no estado íntegro, foi retirado um dos parafusos da flange A (primeiro dano); na sequência, mais um parafuso foi retirado do flange (segundo dano); e para o terceiro dano, três parafusos foram retirados da flange. No quarto dano foram retirados três dos quatro parafusos na flange e mais um parafuso foi retirado na articulação adjacente. Por fim, no quinto dano, foi repetido o dano anterior e ainda retirou-se um segundo parafuso da articulação adjacente.

O índice de falha métrica utilizado para quantificar os danos é descrito pela seguinte equação:

$$M = \sum_{i=1}^N [Re(Y_{i,1}) - Re(Y_{i,2})]^2 \quad (8)$$

Na equação (8), M representa o índice de falha métrica, $Y_{i,1}$ é a impedância do PZT medida em condição íntegra, e $Y_{i,2}$ é a impedância do PZT depois de ter simulado um dano, e i representa a frequência das medições.

Foi calculado o índice para um caso em estado íntegro e para os dois primeiros casos de danos, obtendo os seguintes resultados: 0,0060, 1, e 1.305 respetivamente. Os testes realizados com o medidor de impedância de baixo custo utilizado para monitorar as flanges da estrutura gerou resultados similares aos obtidos em (PARK; CUDNEY; INMAN, 2001).

Chiamori et al. (2005) utilizaram pela primeira vez transdutores MFC (Micre Fiber Composer), que são flexíveis e têm características de desempenho similares às cerâmicas piezelétricas tradicionais.

A estrutura de tubulação utilizada para este trabalho foi suspensa utilizando elásticos, sendo composta por três seções ligadas por duas flanges parafusadas. A seção de tubo do meio tinha 2,1 m de comprimento, e cada uma das extremidades tinha 0,9 m de comprimento, com um total de 3,9 m de comprimento como é apresentado na Figura 7.

Figura 7 - Estrutura utilizada por (CHIAMORI et al., 2005).



Fonte: (CHIAMORI et al., 2005).

Cinco transdutores MFC foram utilizados para monitorar a estrutura na flange A. Os transdutores MFC utilizados tinham uma area ativa de 85 mm x 57 mm, e uma area total de 110 mm x 75 mm. Um analisador de impedância Agilent 4294 foi utilizado para obter os dados das medições. Para este experimento duas faixas de frequência foram utilizadas para as medições: uma faixa de frequência baixa de 50-60 kHz, e uma faixa de frequência alta foi de 110-120 kHz.

Uma medição da impedância foi realizada a partir de cada um dos MFC localizado na estrutura. Três casos de danos foram medidos e cada um envolveu a remoção de um ou mais parafusos das flanges. Para o primeiro caso, apenas um parafuso da flange foi removido; para o segundo caso, foram removidos dois parafusos; por último, para o terceiro caso, além de serem removidos dois parafusos, o tubo foi rotacionado 180 graus.

O índice de falha métrica utilizado neste trabalho foi o coeficiente de correlação, calculado com os valores obtidos com a estrutura em estado íntegro e após ter sofrido um dano. O coeficiente de correlação determina a relação linear dentre os dois conjuntos de dados e é obtido como segue:

$$\rho = \frac{1}{n-1} \frac{\sum_{i=1}^n (Re(Z_{i,1}) - Re(\bar{Z}_1))(Re(Z_{i,2}) - Re(\bar{Z}_2))}{\sigma_{Z_1} \sigma_{Z_2}} \quad (9)$$

Na equação (9), ρ é o coeficiente de correlação, $Z_{i,1}$ são os dados da impedância da estrutura considerada íntegra, e $Z_{i,2}$ é a impedância apos da estrutura ter sofrido um dano a uma frequência i , Z_1 e Z_2 são as médias dos sinais, e os termos σ_{Z_1} e σ_{Z_2} são os desvios-padrão.

Os resultados mostraram que o índice de falha métrica detecta de forma eficaz a presença dos danos na estrutura. Observou-se ainda que o índice é pelo menos um ordem de magnitude maior para todos os casos de danos do que qualquer das medições considerando a estrutura íntegra. Além disso, também foi possível obter informação significativa para localizar o dano.

A partir dos resultados obtidos, foi possível concluir que as faixas de frequências mais elevadas mostram um efeito mais localizado quando comparado ao efeito obtido nas faixas de frequências baixas. As medições da impedância para as duas faixas de frequências são eficazes para quantificar os danos no sistema. Em todos os casos de danos simulados, o valor do índice de falha métrica foi aumentando à medida que a magnitude do dano era maior. Evidentemente foi possível detectar, localizar, e quantificar o dano através da técnica da impedância electromecânica.

Thien (2006) utilizou uma estrutura similar à anterior. A estrutura está composta por três seções ligadas por duas flanges parafusadas. Cada flange tinha quatro parafusos (9,5 mm), e cada parafuso foi originalmente apertado a 200 lb-in (22,6 Nm). Cada uma das três seções de tubo foi feita do mesmo tipo e tamanho (aço de carbono). As seções de tubo tinham um diâmetro externo de 6,4 cm e uma espessura de parede de 1,60 mm. O tubo foi suspenso usando cintas elásticas, como apresentado na Figura 8.

Figura 8 - Estrutura utilizada por (THIEN, 2006).



Fonte: (THIEN, 2006).

Foram colados transdutores MFC em quatro locais ao longo do comprimento do tubo. Os dois primeiros transdutores MFC foram colados a 6,4 cm a partir de cada lado da flange A, e os outros dois transdutores MFC foram colados a 6,4 cm a partir de cada lado da flange B. Os três primeiros transdutores MFC ficaram posicionados no mesmo eixo, e o quarto transdutor MFC foi localizado 180 graus em torno da circunferência dos outros três transdutores.

Para as medidas de impedância, duas faixas de frequência foram utilizadas: uma faixa de frequência mais baixa, de 50 a 60 kHz, e uma faixa de frequência mais alta, de 110 a 120 kHz.

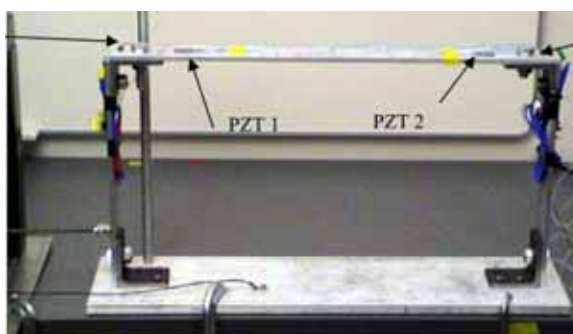
Neste experimento foram simulados três tipos de danos para cada flange A e B. O primeiro dano foi simulado retirando um parafuso da flange, o segundo dano foi simulado retirando dois parafusos da flange, e o ultimo caso de dano foi simulado com dois parafusos retirados da flange e o tubo rotacionado de 180 graus. Para cada caso de dano foram realizadas duas medições da impenitência na flange para os quatro transdutores MFC, e para cada uma das faixas de frequências.

O índice de falha métrica utilizado neste trabalho foi o coeficiente de correlação, de acordo com a Equação (9).

Os resultados obtidos mostraram que a presença de danos nas flanges do tubo foram corretamente identificada e, também, que a utilização da métrica de danos pode determinar corretamente o local do dano. Além disso, o método proposto demonstra a capacidade para quantificar o nível de danos presentes no sistema.

Mascarenas et al. (2009) utilizaram uma estrutura composta de placas de alumínio conectadas com suportes de aço, medindo 31 cm de altura e 56 cm de largura. O quadro é construído com três vigas de 50 mm x 6 mm parafusadas nas extremidades e ferros angulares (cantoneiras de aço). Toda a estrutura é parafusada a uma base de alumínio com dimensão de 61 cm x 15.2 cm x 1,2 cm. Os parafusos foram apertados a 150 lb-in na condição íntegra, conforme ilustração da Figura 9.

Figura 9 - Estrutura utilizada (MASCARENAS et al., 2009).



Fonte: (MASCARENAS et al., 2009).

Transdutores MFC de 25,4 mm de comprimento, 25,4 mm de largura e 0,2 mm de espessura (PZT 1 e PZT 2) foram colados sobre a viga superior da estrutura de forma simétrica. Um analisador Agilent 4249A foi utilizado para medir os sinais de impedância de cada MFC em uma faixa de frequências de 130-150 kHz.

Para os testes, dois danos foram simulados na estrutura, afrouxando-se, inicialmente, os parafusos em 150 lb-in. O primeiro dano é definido quando o parafuso é retirado na aresta 1, e

o segundo dano é definido quando os dois parafusos são retirados.

Neste teste não foi utilizado nenhum índice de falha métrica, sendo apresentados somente os gráficos comparativos das medições da impedância com os diferentes danos e o estado integro.

Estes testes demonstram que os Transdutores MFC apresentam uma sensibilidade extrema à presença de danos, mas são mais limitados quando se pensa em localizar o dano. A dificuldade em localizar o dano usando MFC se agrava quando se utiliza um denso conjunto de flanges parafusadas na estrutura, porque, mesmo depois de identificar a região danificada, ainda precisa-se inspecionar cada parafuso para definir exatamente qual está danificado.

3.2 Conclusões

Neste capítulo foram discutidos alguns trabalhos importantes que usam a técnica da impedância eletromecânica para monitorar tubulações. Dois primeiros trabalhos apresentados utilizaram cerâmicas piezelétricas para realizar as medições da impedância, e os trabalhos restantes testes utilizaram apenas flexíveis MFC. Além de isso, alguns testes utilizaram índices de falha métrica para poder identificar, quantificar e localizar os danos, enquanto outros fizeram um análise observando os gráficos da impedância.

Os resultados obtidos mostraram que todos os testes apresentados, conseguiram identificada a presença de danos nas flanges do tubo, e também, que a utilização da métrica de danos pode determinar corretamente o local do dano. Além disso, os métodos propostos demonstraram a capacidade para quantificar os danos presentes no sistema.

Nesta dissertação é utilizada a técnica da impedância electromecânica para a detecção de danos no corpo principal dos segmentos de tubos simples em tubulações. Utilizando dois índices de falha métrica foi possível analisar impedância do conjunto PZT/estrutura, tendo sido usado um sistema SHM de baixo custo. Estes índices permitiram lograr a identificação dos danos, e mostrar o potencial da técnica da EMI na localização e quantificação dos danos numa faixa de frequência relativamente alta.

4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Neste capítulo são apresentados vários testes realizados em três estruturas diferentes, baseados na utilização de transdutores PZT de cerâmica de baixo custo. A técnica da impedância electromecânica (EMI) foi utilizada para detectar danos no corpo principal dos segmentos de tubos simples em tubulações através dos índices de falha métrica RMSD e CCDM.

Para a análise do sinal da impedância foi utilizada a parte real da impedância, já que esta é recomendada na literatura por ser menos susceptível à variações de temperatura (BHALLA; NAIDU; SOH, 2003; SUN et al., 1995a). Todos os dados da impedância foram tomados em séries, e cada série contém dez medidas. Duas séries de medições foram obtidas em condições íntegras e utilizadas como referência da estrutura em condição íntegra (baseline). A fim de cobrir as diferenças devido às mudanças ambientais, as medidas de referência foram realizadas em diferentes horas do dia, durante vários dias.

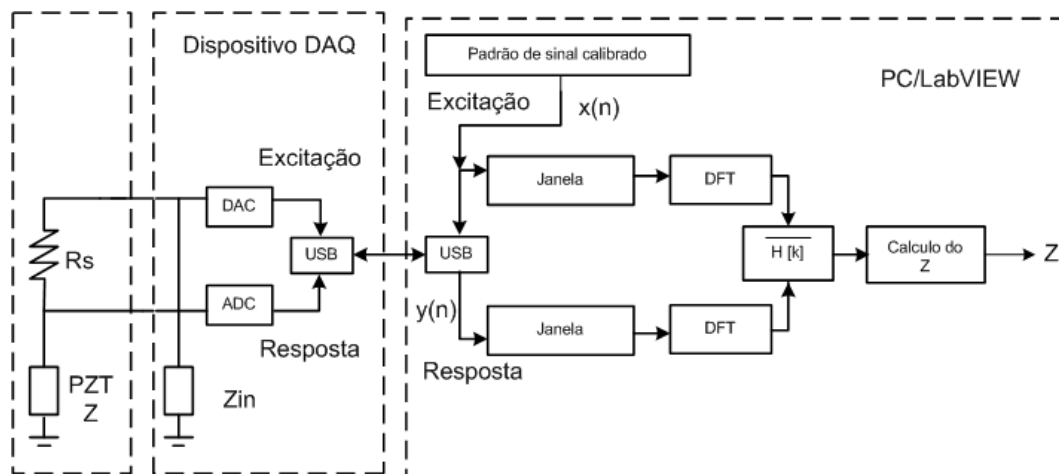
O software MATLAB foi utilizado para elaborar os gráficos das figuras e para calcular os índices de falha métrica RMSD e CCDM apresentados nas seções seguintes.

4.1 Sistema de Medição da Impedância

O diagrama de blocos da Figura 10 representa o sistema geral utilizado. Neste caso, os seguintes equipamentos e componentes foram utilizados: Dispositivo DAQ multifuncional USB-6259 da National Instruments, Software LabVIEW 2010 v10.0 versão para avaliação, Software Impedance Analyzer 2.0 para medição da impedância baseado na plataforma LabVIEW, desenvolvido por Baptista e Vieira (2009), Microcomputador notebook Dell Inspiron 14 core i5 - 4 GB com Windows 7 e um resistor de filme carbono: $R_s = 1k\Omega \frac{1}{4}W$.

No diagrama de blocos da Figura 8, $x(t)$ e $x(n)$ representam o sinal de excitação na forma contínua e discreta, respectivamente; da mesma forma, $y(t)$ e $y(n)$ representam as duas formas do sinal de resposta do transdutor. O dispositivo DAQ é multifuncional, isto é, permite tanto a aquisição do sinal de resposta $y(t)$ através do CAD como também a geração do sinal de excitação $x(t)$ através do CDA, ambos com resolução de 16 bits.

Figura 10 - Diagrama de blocos do analisador de impedância utilizado.



Fonte: (BAPTISTA; VIEIRA, 2009).

A geração do sinal de excitação é feita por software e, além de permitir a escolha entre uma ampla variedade de sinais, evita que este precise ser reamostrado. Isso é possível porque é feita uma "calibração" entre o padrão do sinal gerado por software $x(n)$ e o sinal $x(t)$ que realmente chega ao circuito auxiliar, que é realizada como segue: antes de qualquer medição e com todos os parâmetros definidos, a saída do CDA e a entrada do CAD são conectadas e o sinal de excitação é amostrado uma única vez e armazenado substituindo o padrão gerado por software.

Esse procedimento reduz significativamente as discrepâncias causadas pelo CDA. Também, as discrepâncias causadas pelo CAD em $x(n)$ durante a "calibração" e em $y(n)$ durante o processo normal de medição são compensadas durante o cálculo da FRF, a qual é obtida pela divisão da DFT dos dois sinais (BAPTISTA; VIEIRA, 2009).

Através do software mencionado anteriormente, foi gerado um sinal de excitação chirp $x(t)$ para os testes realizados neste trabalho usando as seguintes opções de configuração: Amplitude: 2,0 V; Taxa de amostragem: 10^6 amostras por segundo; Número de amostras: 262144; e Resolução de frequência: 4 Hz.

4.2 Testes na estrutura $Tubo_m$

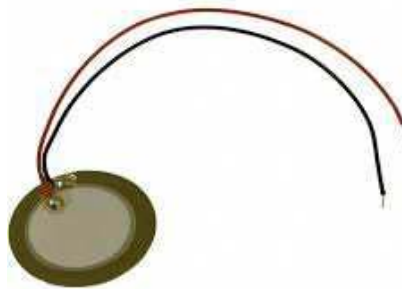
Nesta seção foram realizados dois testes na estrutura chamada de $Tubo_m$, que é um tubo metálico com 500 mm de comprimento, 60 mm de diâmetro e uma espessura de 4 mm, como mostrado na Figura 11.

Figura 11 - $Tubo_m$.

Fonte: Dados do próprio autor

Para os dois testes foi utilizado um transdutor PZT acoplado ao $Tubo_m$. O PZT utilizado é conhecido como Buzzer, mas é, de fato, uma piezocerâmica na forma circular acoplada a uma base de latão, com diâmetro de 15 mm e uma espessura de 4 mm como apresentado na figura 12.

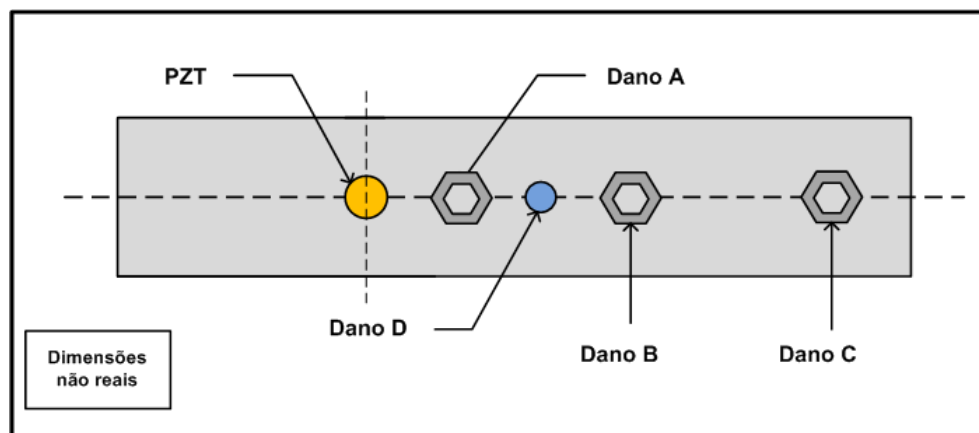
Figura 12 - Transdutor buzzer.



Fonte: Dados do próprio autor

Para os testes realizados na estrutura $Tubo_m$ foram simulados quatro níveis de danos: o dano A (porca colada a 50 mm), o dano B (porca colada a 150 mm) e o dano C (porca colada a 300 mm), e um nível de dano grande (Fenda), denominado dano D, que são apresentados na Figura 13.

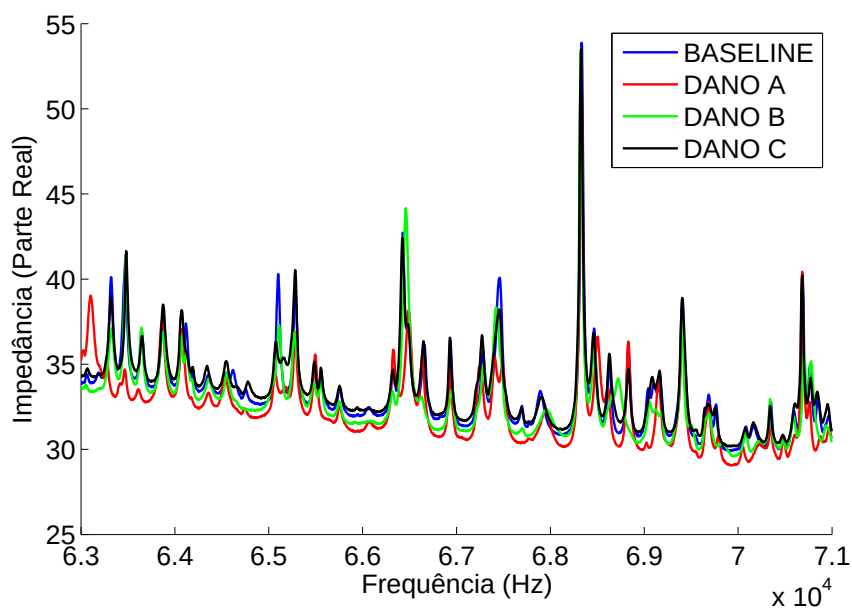
Frequências entre 60-90 kHz foram selecionadas de uma faixa de análise de 30-160 kHz devido a sua sensibilidade na detecção do dano. Dentro desta faixa selecionada são analisadas duas faixas principais que são de 63-71 kHz e de 85-73 kHz.

Figura 13 - Níveis de danos simulados no $Tubo_m$.

Fonte: Dados do próprio autor

4.2.1 Aumento de Massa

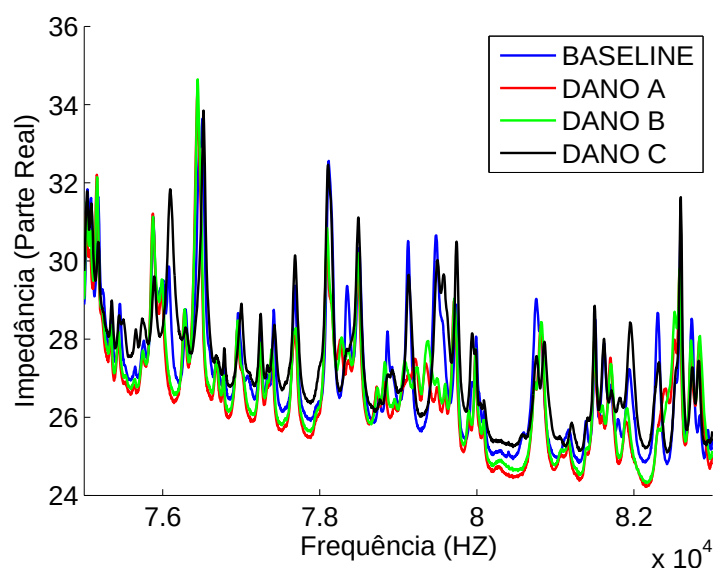
Para o primeiro teste foram analisados os danos A, B e C. Um gráfico da parte real da impedância em uma faixa de frequências de 63-71 kHz é apresentado na Figura 14.

Figura 14 - Parte real da impedância do $Tubo_m$ em uma faixa de frequências de 63-71 kHz.

Fonte: Dados do próprio autor

Na Figura 15 observa-se um exemplo da medida da parte real da impedância em uma faixa de frequências de 75-83 kHz.

Figura 15 - Parte real da impedância do $Tubo_m$ em uma faixa de frequências de 75-83 kHz.

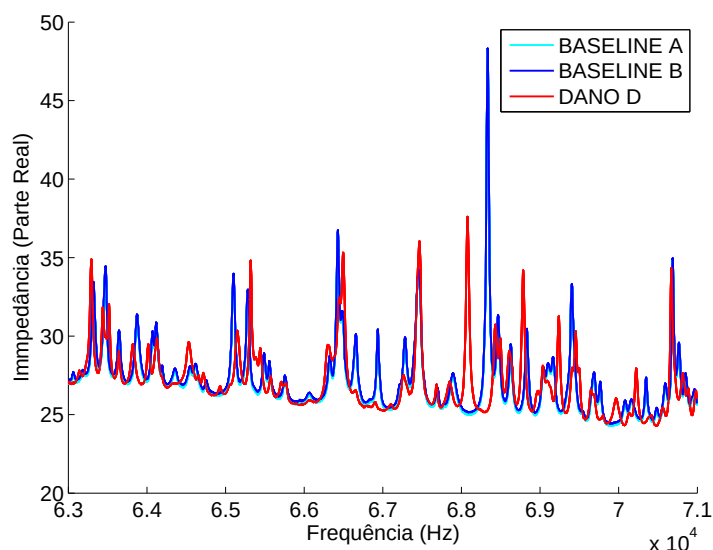


Fonte: Dados do próprio autor

4.2.2 Furo

Para o segundo teste denominado **Furo no $Tubo_m$** , foi simulado um nível de dano grande (Fenda), denominado dano D. Um gráfico da parte real da impedância em uma faixa de frequências de 63-71 kHz é apresentado na Figura 16.

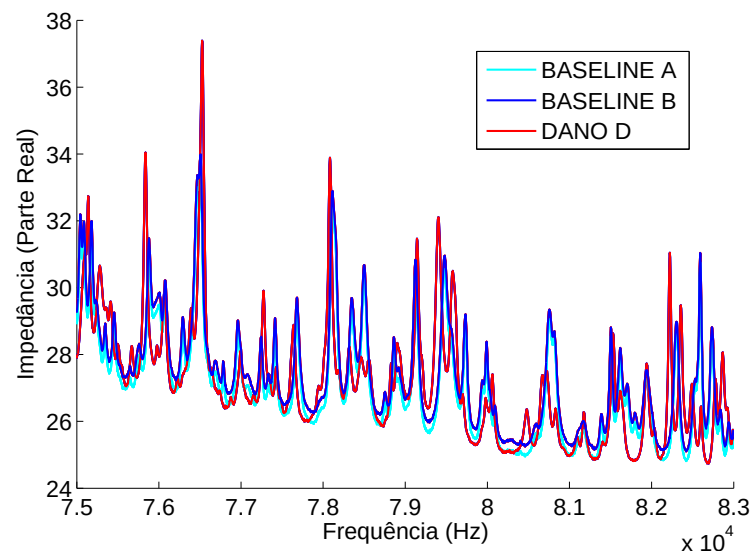
Figura 16 - Parte real da impedância do $Tubo_m$ com furo em uma faixa de frequências de 63-71 kHz.



Fonte: Dados do próprio autor

Na Figura 17 observa-se um exemplo da medida da parte real da impedância em uma faixa de frequências de 75-83 kHz.

Figura 17 - Parte real da impedância do $Tubo_m$ com furo em uma faixa de frequências de 75-83 kHz.



Fonte: Dados do próprio autor

Nas tabelas 2 , 3, 4, 5 e na Figura 18 são apresentados os resultados dos índices de falha métrica RMSD e CCDM para os quatro danos simulados na estrutura $Tubo_m$, nas duas faixas de frequência de interesse.

Tabela 2 - Índices RMSD e CCDM do $Tubo_m$ na faixa de frequência de 63-71 kHz

Distância ao dano	RMSD	RMSD normalizado	CCDM	CCDM normalizado
Integro	13.41	1	2.76806E-05	1
50	78.8	5.88	0.16145	5832
150	52.6	3.92	0.07985	2884
300	21.5	1.60	0.04239	1531

Fonte: Dados do próprio autor

Tabela 3 - Índices RMSD e CCDM do $Tubo_m$ na faixa de frequência de 75-83 kHz.

Distância ao dano	RMSD	RMSD normalizado	CCDM	CCDM normalizado
Integro	22.36	1	4.6329E-05	1
50	60.1	2.69	0.18529	3999
150	51.1	2.28	0.16504	3562
300	44.3	1.98	0.09890	2134

Fonte: Dados do próprio autor

Tabela 4 - Índices RMSD e CCDM do $Tubo_m$ com furo na faixa de frequência de 63-71 kHz.

Distância ao dano	RMSD	RMSD normalizado	CCDM	CCDM normalizado
Baseline2	11.5	1	4.49622E-05	1
100	88.6	7.7	0.55378	12316

Fonte: Dados do próprio autor

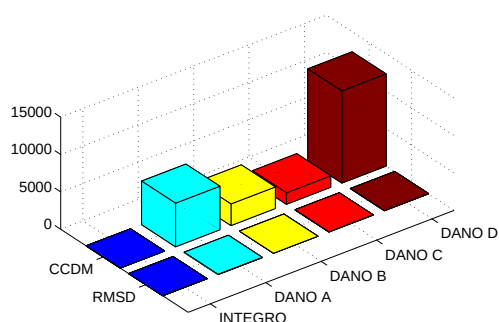
Tabela 5 - Índices RMSD e CCDM do $Tubo_m$ com furo na faixa de frequência de 75-83 kHz.

Distância ao dano	RMSD	RMSD normalizado	CCDM	CCDM normalizado
Baseline2	24.1	1	0.0001164	1
100	198.4	8.2	0.32817	2817

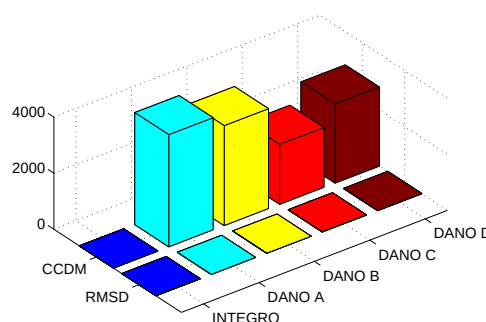
Fonte: Dados do próprio autor

Figura 18 - Índices RMSD e CCDM Normalizados do $Tubo_m$. a) Faixa de frequência de 63-71 kHz;
b) Faixa de frequência de 75-83 kHz.

(a)



(b)



Fonte: Dados do próprio autor

4.2.3 Análise dos Resultados

Como é observado nas tabelas 2, 3, 4, 5 e na Figura 18, o índice de falha métrica CCDM tem um maior valor para todos os casos de danos que o índice RMSD nas duas faixas de frequências analisadas. O maior valor registrado pelo índice CCDM para o dano mais grave (Fenda) foi de 12316 na faixa de frequências de 63-71 kHz. Logo, o maior valor registrado pelo índice RMSD para o dano mais grave foi de 8.2 na faixa de frequência de 75-83 kHz, portanto, o Índice CCDM seria mais adequado na hora de definir um limiar para a detecção e localização dos danos.

Quanto ao comportamento do índice CCDM nas duas faixas de frequência, é evidente que, na faixa de frequência de 63-71 kHz o índice tem uma melhor correspondência com a gravidade dos danos, já que para o dano maior (Fenda), o índice é aproximadamente oito vezes maior do que para o dano menor (porca colada a 300 mm do PZT). Entretanto, para a faixa de frequência de 75-83 kHz, o dano maior apresentou menor valor para o índice do que os dois primeiros casos de dano (porca colada a 50 mm e 150 mm respectivamente).

4.3 Testes na estrutura $Tubo_M$

Quatro testes foram realizados na estrutura chamada de $Tubo_M$, que é um tubo de aço galvanizado de 500 mm de comprimento, 100 mm de diâmetro e uma espessura de 2 mm, como apresentado na Figura 19.

Figura 19 - $Tubo_M$.



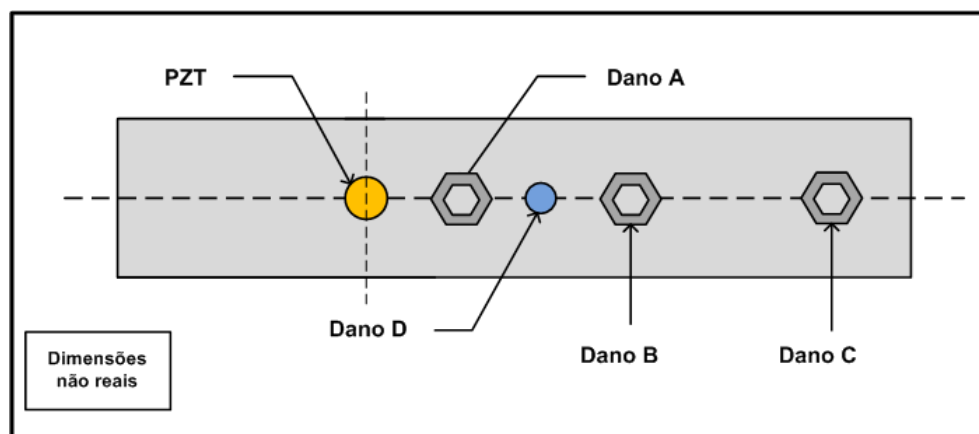
Fonte: Dados do próprio autor

Para os dois primeiros testes na estrutura $Tubo_M$, as frequências entre 60-90 kHz foram selecionadas de uma faixa de análise de 30-160 kHz devido a sensibilidade na detecção do dano. Dentro desta faixa selecionada são analisadas duas faixas principais que são de 63-71 kHz e de 85-73 kHz.

4.3.1 Aumento de Massa

Para o primeiro teste denominado **Aumento de Massa no $Tubo_M$** , foram simulados três níveis de danos: o dano A (porca colada a 50 mm), dano B (porca colada a 150 mm) e dano C (porca colada a 300 mm), como apresentados na Figura 20.

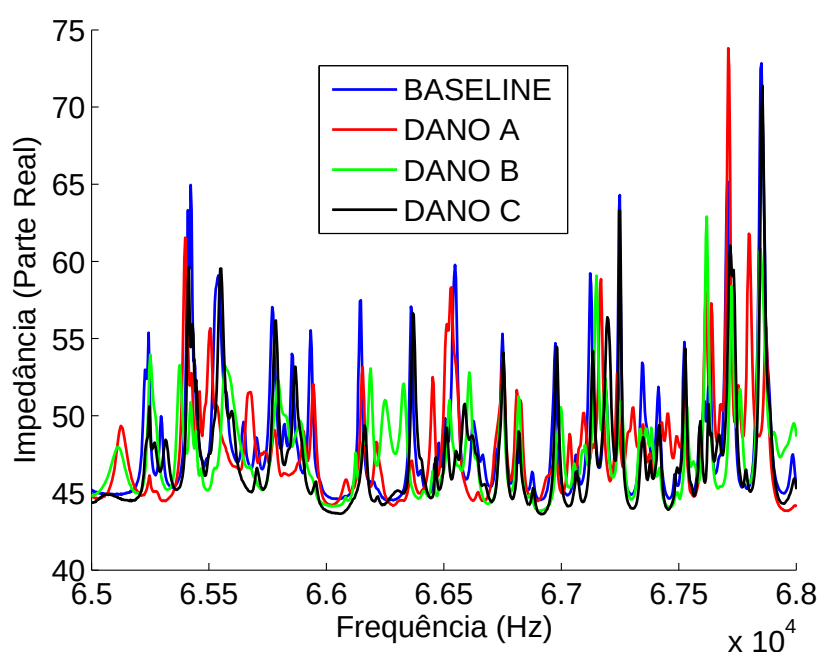
Figura 20 - Níveis de danos simulados no $Tubo_m$.



Fonte: Dados do próprio autor

Três casos de danos são apresentados graficamente juntamente com uma medida do baseline, na Figura 21. Observa-se um exemplo da medida da parte real da impedância em uma faixa de frequências de 65-68 kHz, obtida diretamente da resposta do PZT.

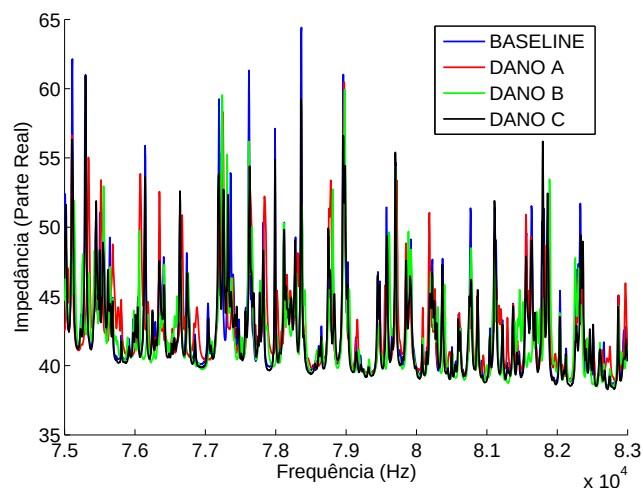
Figura 21 - Parte real da impedância do $Tubo_M$ em uma faixa de frequências de 65-68 kHz.



Fonte: Dados do próprio autor

Na Figura 22 observa-se um exemplo da medida da parte real da impedância em uma faixa de frequências de 75-83 kHz, obtidas diretamente do PZT (ver Figura 20).

Figura 22 - Parte real da impedância do $Tubo_M$ em uma faixa de frequências de 75-83 kHz.



Fonte: Dados do próprio autor

Nas Tabelas 6 e 7, e na Figura 23 são apresentados os resultados dos índices de falha métrica RMSD e CCDM normalizados para as faixas de frequências de 63-71 kHz e de 75-83 kHz.

Tabela 6 - RMSD e CCDM do $Tubo_M$ na faixa de frequência de 63-71 kHz.

Distância ao dano	RMSD	RMSD normalizado	CCDM	CCDM normalizado
Integro	6.56	1	0.0009	1
50	104.2	15.8	0.5123	520.6
150	91.9	14.1	0.4366	443.7
300	85.9	13.1	0.3333	338.7

Fonte: Dados do próprio autor

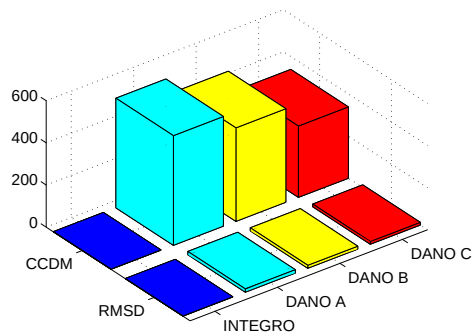
Tabela 7 - Índices RMSD e CCDM do $Tubo_M$ na faixa de frequência de 75-83 kHz

Distância ao dano	RMSD	RMSD normalizado	CCDM	CCDM normalizado
Integro	4.44	1	0.00045	1
50	83.4	18.7	0.37854	835.1
150	78.9	17.7	0.36562	806.6
300	39.9	8.9	0.09468	208.9

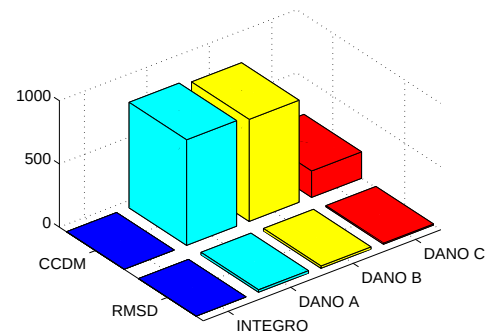
Fonte: Dados do próprio autor

Figura 23 - Índices RMDS e CCDDM Normalizados do $Tubo_M$. a) Faixa de frequências de 63-71 kHz;
b) Faixa de frequências de 75-83 kHz.

(a)



(b)

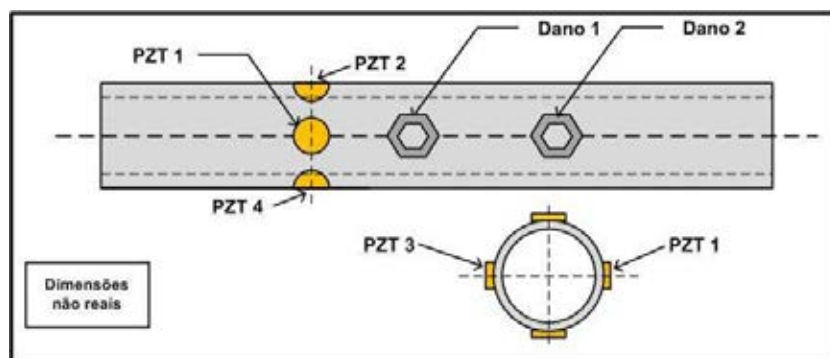


Fonte: Dados do próprio autor

4.3.2 Aumento da Massa Medida com 4 Sensores

Para o segundo teste na estrutura $Tubo_M$, foram colando quatro sensores PZT deslocados de 90 graus, como apresentado na Figura 24. Para os quatro sensores foram simulados dois danos colando-se uma porca, primeiro a 100 mm do PZT (Dano 1), e depois a 250 mm do PZT (Dano 2).

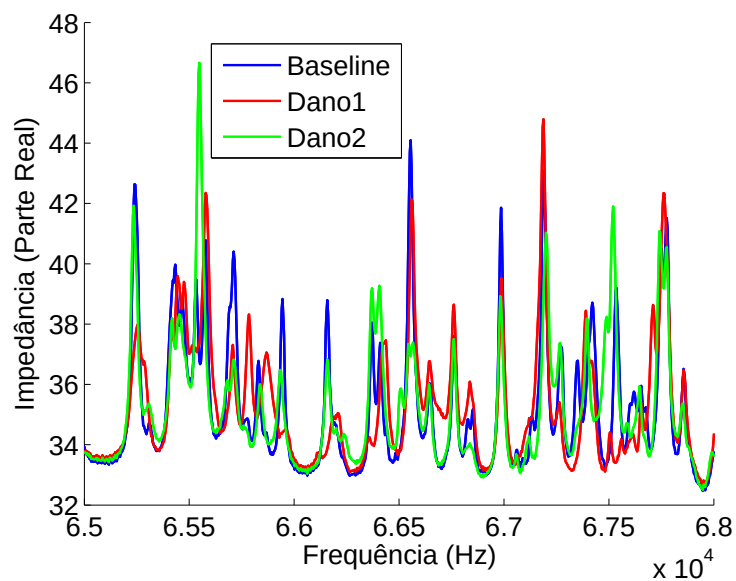
Figura 24 - Níveis de danos para o quarto teste.



Fonte: o próprio autor

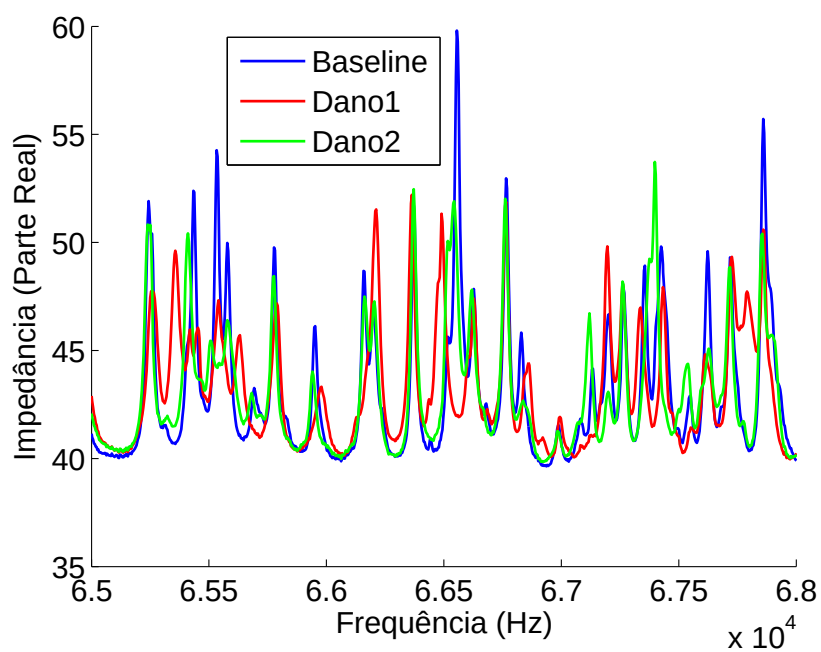
Nas Figuras 25, 26, 27 e 28 observam-se exemplos das medidas da parte real da impedância em uma faixa de frequências de de 63-71 kHz.

Figura 25 - Parte real da impedância do $Tubo_M$ em uma faixa de frequências de 65-68 kHz para o PZT1.



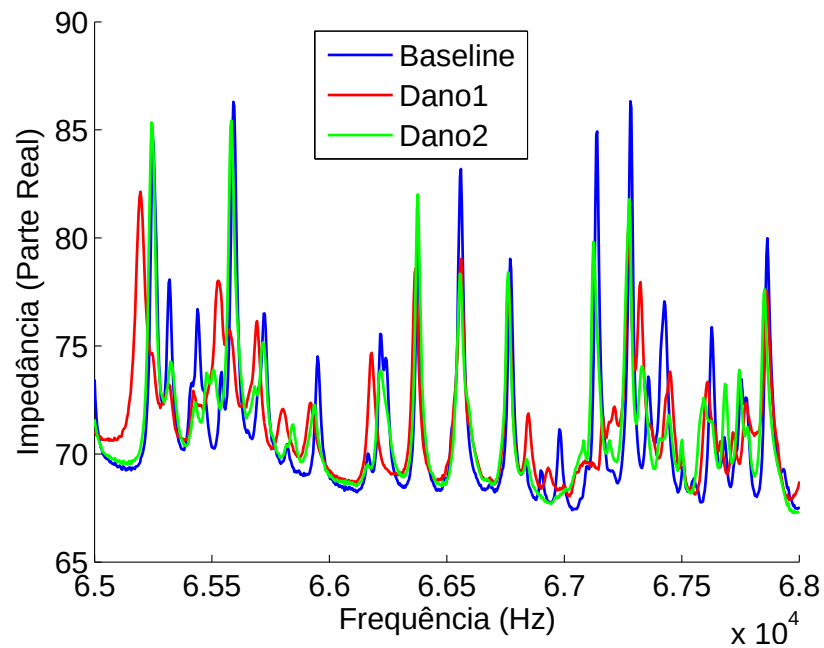
Fonte: Dados do próprio autor

Figura 26 - Parte real da impedância do $Tubo_M$ em uma faixa de frequências de 65-68 kHz para o PZT2.



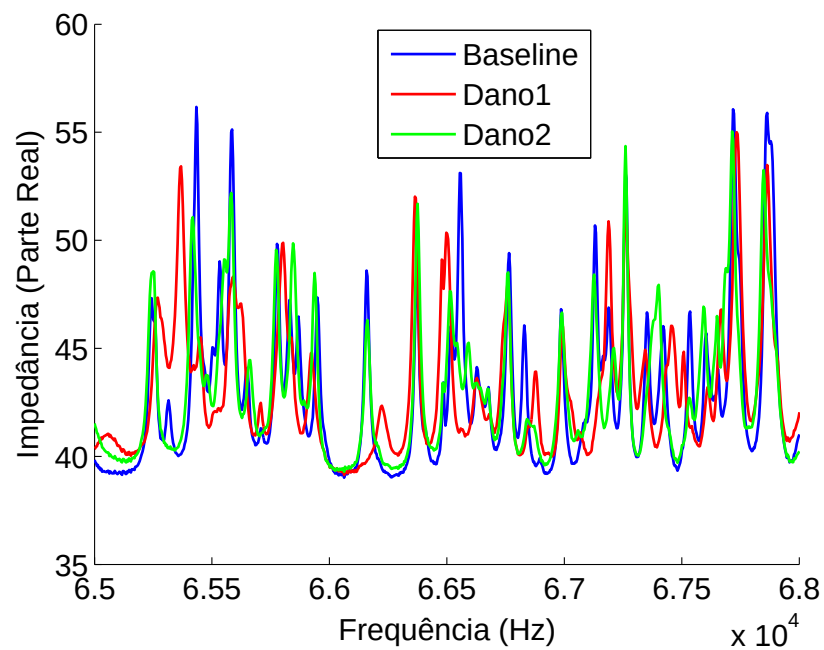
Fonte: Dados do próprio autor

Figura 27 - Parte real da impedância do $Tubo_M$ em uma faixa de frequências de 65-68 kHz para o PZT3.



Fonte: Dados do próprio autor

Figura 28 - Parte real da impedância do $Tubo_M$ em uma faixa de frequências de 65-68 kHz para o PZT4.



Fonte: Dados do próprio autor

Nas Tabelas 8 e 9, e na Figura 29 são apresentados os resultados dos índices de falha métrica CCDM e RMSD para os quatro PZT's na faixa de frequência de 63-71 kHz.

Tabela 8 - Índice CCDM Normalizado para os quatro PZT's na faixa de frequência de 63-71 kHz.

Distância do dano	PZT 1	PZT 2	PZT 3	PZT 4
Integro	1	1	1	1
100	2769	651.7	681.6	1141
250	2134	406.3	336.5	587.6

Fonte: Dados do próprio autor

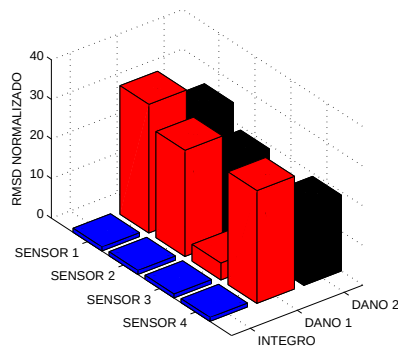
Tabela 9 - Índice RMSD Normalizado para os quatro PZT's na faixa de frequência de 63-71 kHz.

Distância do dano	PZT 1	PZT 2	PZT 3	PZT 4
Integro	1	1	1	1
100	32.5	26.8	4.2	28.5
250	24.7	18.9	3.1	19.2

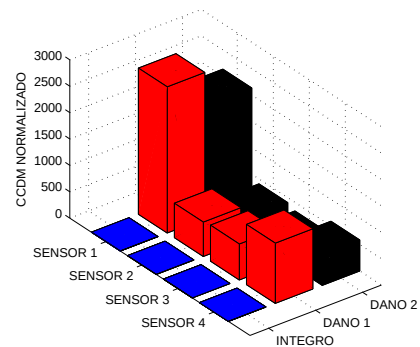
Fonte: Dados do próprio autor

Figura 29 - Índices RMDS e CCDM Normalizados do $Tubo_M$. a) RMSD na faixa de frequências de 63-71 kHz; b) CCDM na faixa de frequências de 63-71 kHz.

(a)



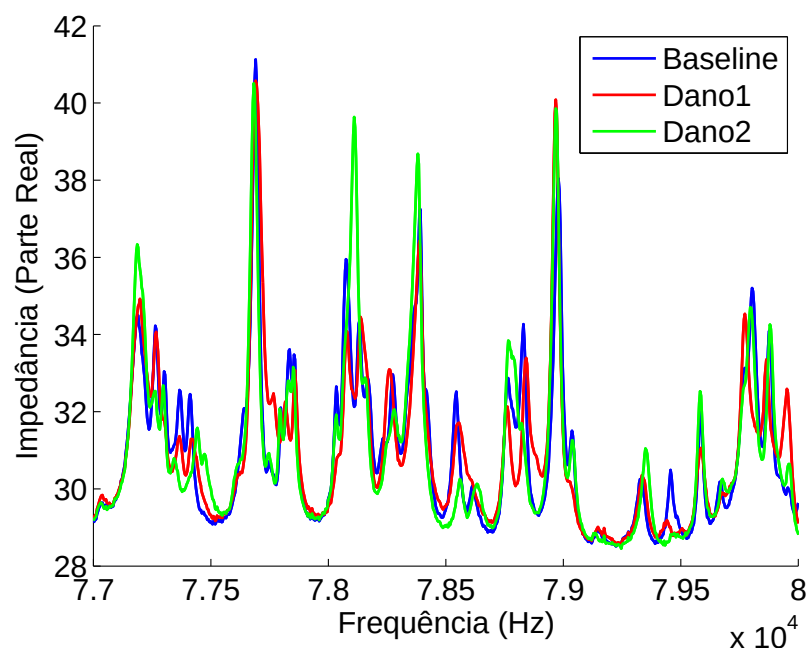
(b)



Fonte: Dados do próprio autor

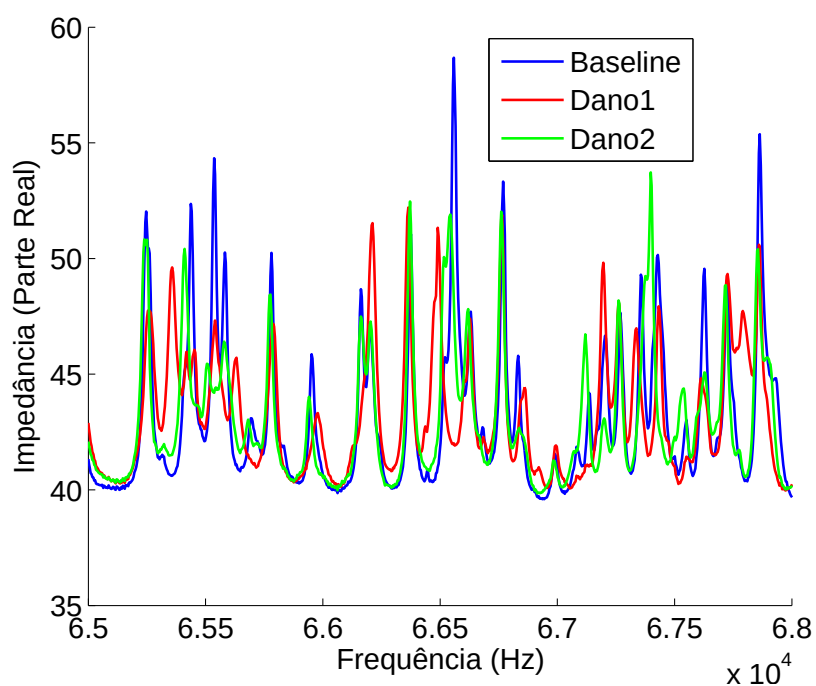
Nas Figuras 30, 31, 32 e 33 observam-se uns exemplos das medidas da parte real da impedância em uma faixa de frequências de de 77-80 kHz.

Figura 30 - Parte real da impedância do $Tubo_M$ em uma faixa de frequências de 77-80 kHz para o PZT1.



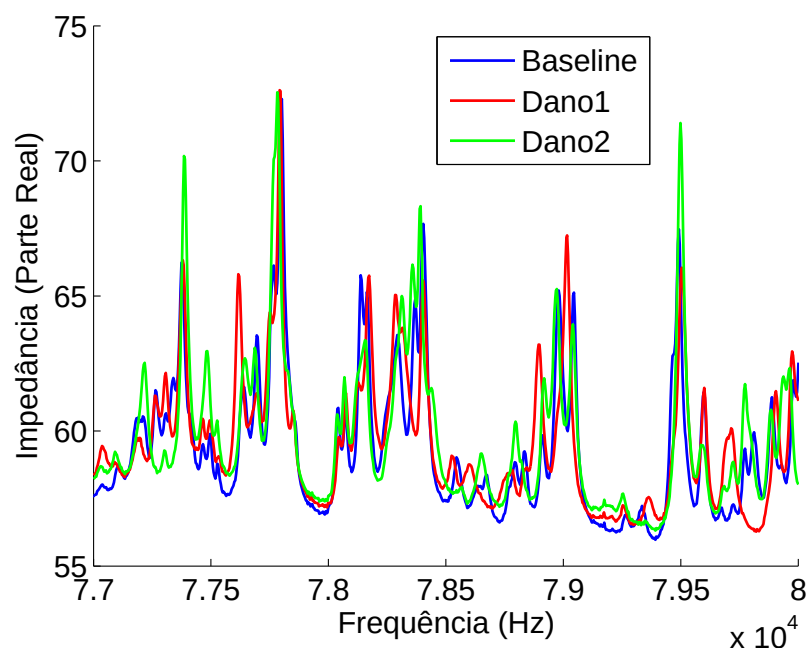
Fonte: Dados do próprio autor

Figura 31 - Parte real da impedância do $Tubo_M$ em uma faixa de frequências de 77-80 kHz para o PZT2.



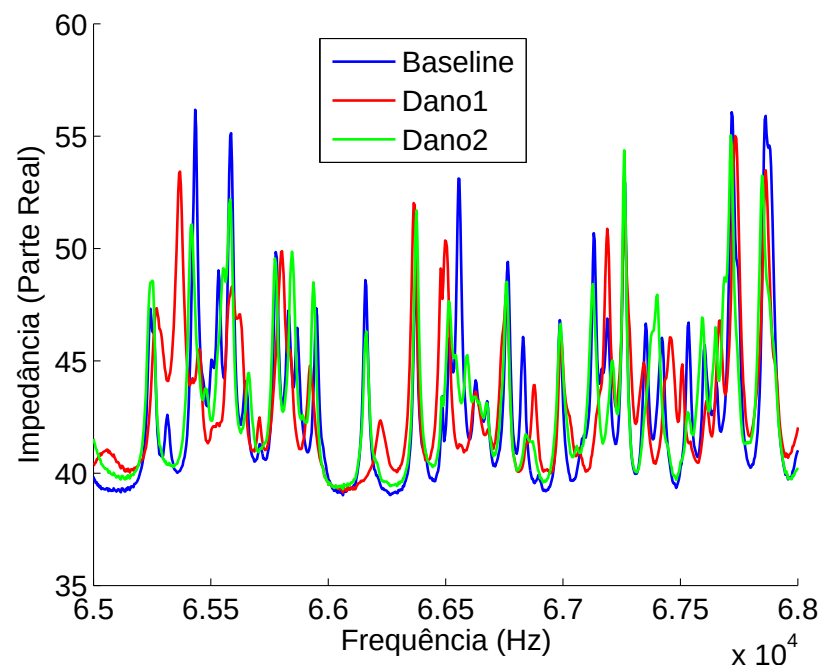
Fonte: Dados do próprio autor

Figura 32 - Parte real da impedância do $Tubo_M$ em uma faixa de frequências de 77-80 kHz para o PZT3.



Fonte: Dados do próprio autor

Figura 33 - Parte real da impedância do $Tubo_M$ em uma faixa de frequências de 77-80 kHz para o PZT4.



Fonte: Dados do próprio autor

Nas Tabelas 10 e 11, e na Figura 34 são apresentados os resultados dos índices CCDM para os quatro PZT's na faixa de frequência de 75-83 kHz.

Tabela 10 - Índice CCDM normalizado para os quatros PZT's na faixa de frequência de 75-83 kHz.

Distância do dano	PZT 1	PZT 2	PZT 3	PZT 4
Integro	1	1	1	1
100	1988	330.1	624.6	552.9
250	1134	322.7	532.2	309.9

Fonte: Dados do próprio autor

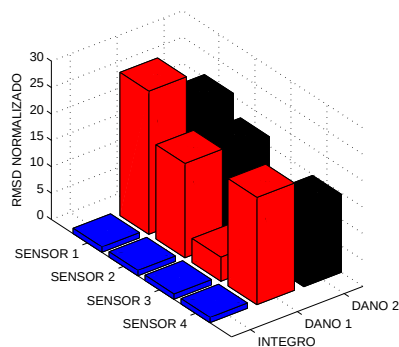
Tabela 11 - Índice RMSD Normalizado para os quatros PZT's na faixa de frequência de 75-83 kHz.

Distância do dano	PZT 1	PZT 2	PZT 3	PZT 4
Integro	1	1	1	1
100	27.1	17.8	4.5	20.3
250	20.5	16.8	3.7	14.8

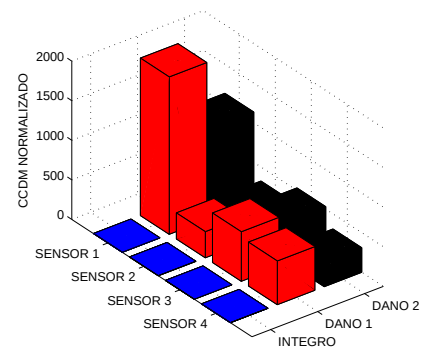
Fonte: Dados do próprio autor

Figura 34 - Índices RMDS e CCDM Normalizados do $Tubo_M$. a) RMSD na faixa de frequências de 75-83 kHz; b) CCDM na faixa de frequências de 75-83 kHz.

(a)



(b)



Fonte: Dados do próprio autor

4.3.3 Aumento de Massa Dois

Para este teste, e para o teste seguinte foi utilizado um transdutor PZT acoplado na estrutura $Tubo_M$, sendo o sensor uma piezocerâmica de forma rectangular de 32 mm de largura e 6 mm de comprimento (Referencia: PSI-5A4E (SYSTEMS, 2013)), como ilustrado na Figura 35.

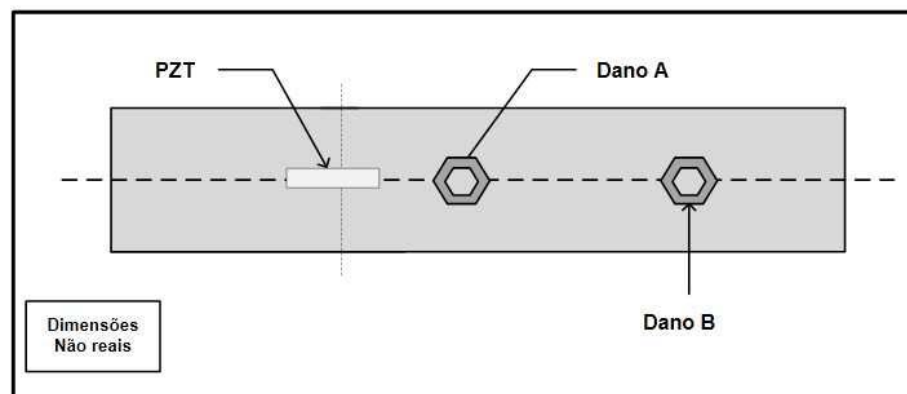
Figura 35 - Material piezelétrico.



Fonte: (SYSTEMS, 2013).

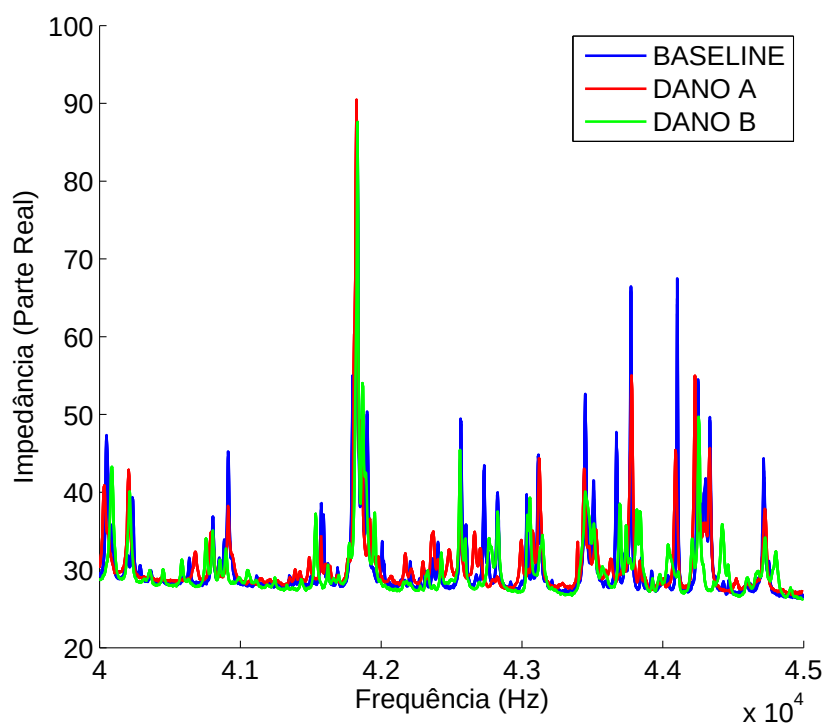
No terceiro e no quarto teste foram simulados dois danos colando-se uma porca , primeiro a 100 mm do PZT (Dano A) e depois a 250 mm do PZT (Dano B), como apresentado na Figura 36. As faixas de frequências utilizadas foram 35-45 kHz e 75-85 kHz.

Figura 36 - Níveis de danos para o quinto e sexto teste.



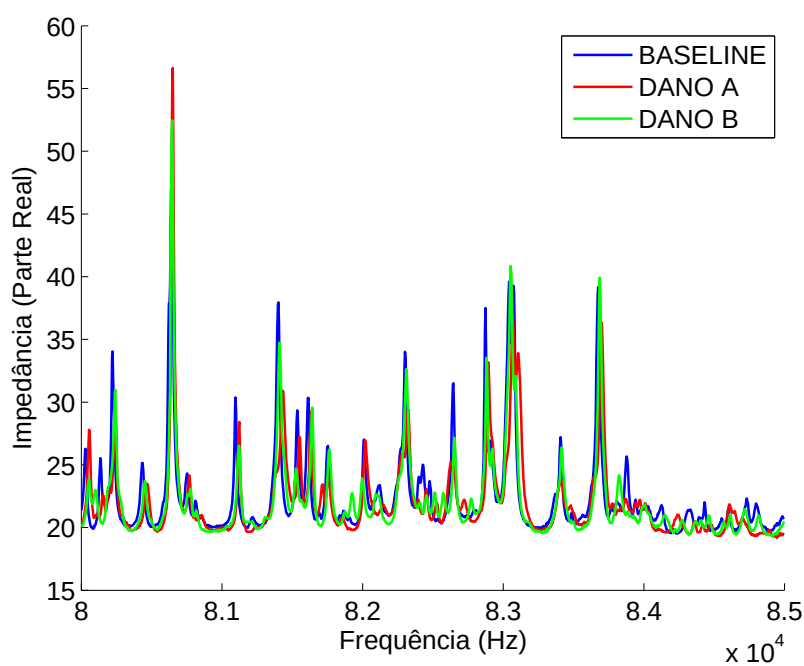
Fonte: Dados do próprio autor

Os dois primeiros casos de danos são apresentados em comparação com uma medida de baseline na Figura 37. Observa-se um exemplo da medida da parte real da impedância em uma faixa de frequências de 40-45 kHz.

Figura 37 - Parte real da impedância do $Tubo_M$ em uma faixa de frequências de 40-45 kHz.

Fonte: Dados do próprio autor

Na Figura 38 são apresentadas medidas da parte real da impedância em uma faixa de frequências de 80-85 kHz.

Figura 38 - Parte real da impedância do $Tubo_M$ em uma faixa de frequências de 80-85 kHz.

Fonte: Dados do próprio autor

Nas Tabelas 12 e 13, e na Figura 39 são apresentados os resultados dos índices RMSD e CCDM para umas faixas de frequências de 35-45 kHz e 75-85 kHz respectivamente.

Tabela 12 - Índices RMSD e CCDM do $Tubo_M$ na faixa de frequência de 35-45 kHz.

Distância ao dano	RMSD	RMSD normalizado	CCDM	CCDM normalizado
Integro	8.2	1	0.0002	1
100	225.9	27.7	0,249	1247
250	226.6	27.8	0.228	1140

Fonte: Dados do próprio autor

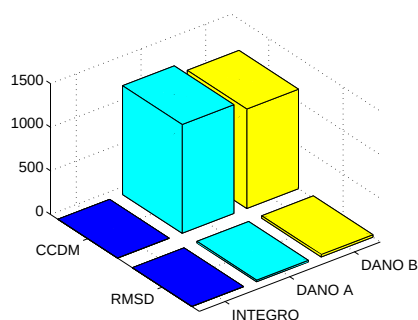
Tabela 13 - Índices RMSD e CCDM do $Tubo_M$ na faixa de frequência de 75-85 kHz

Distância ao dano	RMSD	RMSD normalizado	CCDM	CCDM normalizado
Integro	5.15	1	0.0001	1
100	168.52	32.7	0.1616	1616
250	168.34	32.6	0.1264	1264

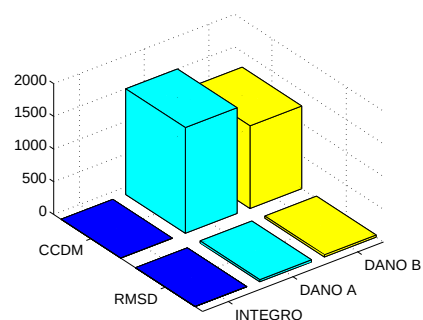
Fonte: Dados do próprio autor

Figura 39 - Índices RMSD e CCDM do $Tubo_M$. a) Faixa de frequências de 35-45 kHz; b) Faixa de frequências de 75-85 kHz.

(a)



(b)



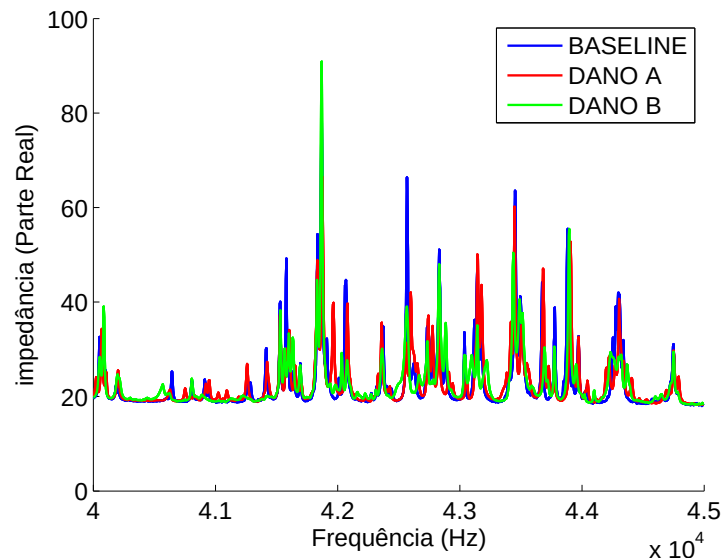
Fonte: Dados do próprio autor

4.3.4 Aumento de Massa Três

Neste teste a piezocerâmica de forma rectangular utilizada tinha 32 mm de largura, e 3 mm de comprimento. Os dois primeiros casos de danos são apresentados na Figura 40, tendo como

referência o baseline. A parte real da impedância foi obtida na faixa de 40 a 45 kHz.

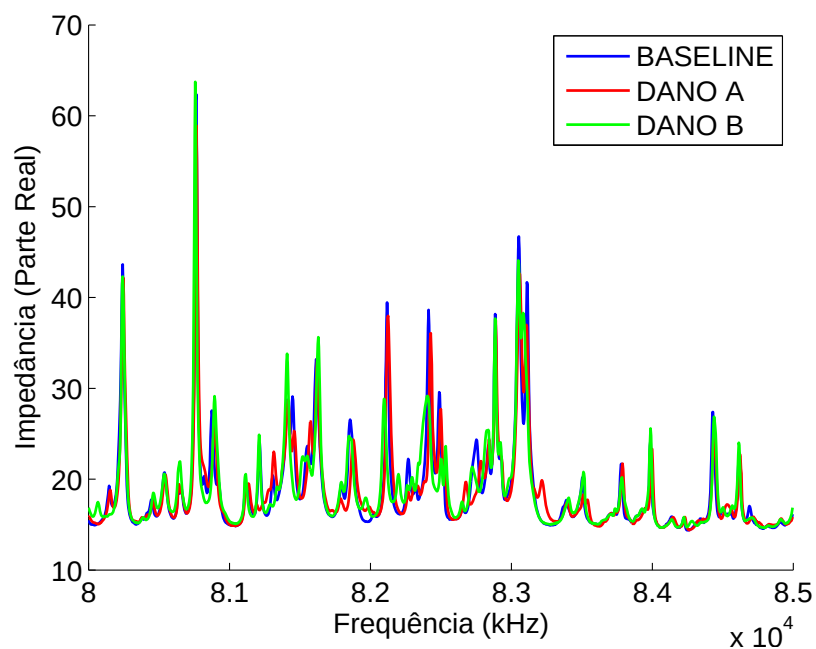
Figura 40 - Parte real da impedância do $Tubo_M$ em uma faixa de frequências de 40-45 kHz.



Fonte: Dados do próprio autor

Na Figura 41 observa-se um exemplo da medida da parte real da impedância em uma faixa de frequências de 80-85 kHz.

Figura 41 - Parte real da impedância do $Tubo_M$ em uma faixa de frequências de 80-85 kHz.



Fonte: Dados do próprio autor

Nas Tabelas 14 e 15, e na Figura 42 são apresentados os resultados dos índices RMSD e CCDM para umas faixas de frequências de 35-45 kHz e 75-85 kHz respectivamente.

Tabela 14 - Índices RMSD e CCDM do $Tubo_M$ na faixa de frequência de 35-45 kHz.

Distância ao dano	RMSD	RMSD normalizado	CCDM	CCDM normalizado
Integro	28.2	1	0.0095	1
100	147.6	5.2	0.2735	28.8
250	145.3	5.2	0.2316	24.4

Fonte: Dados do próprio autor

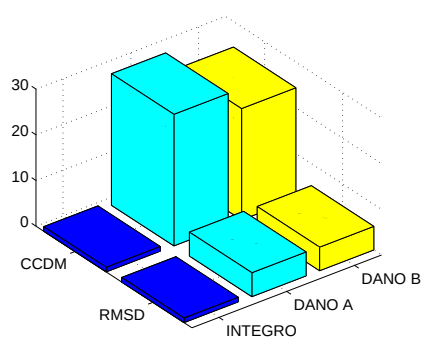
Tabela 15 - Índices RMSD e CCDM do $Tubo_M$ na faixa de frequência de 75-85 kHz

Distância ao dano	RMSD	RMSD normalizado	CCDM	CCDM normalizado
Integro	9.88	1	0.0011	1
100	122.2	15.1	0.3008	273.4
250	149.6	12.4	0.1725	156.8

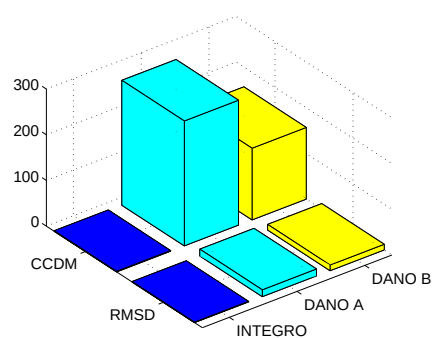
Fonte: Dados do próprio autor

Figura 42 - Índices RMSD e CCDM do $Tubo_M$. a) Faixa de frequências de 35-45 kHz; b) Faixa de frequências de 75-85 kHz.

(a)



(b)



Fonte: Dados do próprio autor

4.3.5 Análise dos Resultados

No primeiro teste na estrutura $Tubo_M$ chamado de **Aumento de Masa**, percebe-se, para as duas faixas de frequências, que o índice CCDM é um ordem de grandeza maior do que o índice RMSD, mas os dois detectam, com sucesso, os três danos simulados. O índice CCDM e o RMSD, na faixa de frequências de 75-83 kHz, detectaram melhor os dois primeiros danos, apresentando maiores valores nesta faixa. Já no terceiro dano, a detecção foi mais eficiente na faixa de 63-71 kHz. Portanto, na faixa de frequência de 75-83 kHz é possível detectar danos menores perto do transdutor PZT, enquanto que a faixa de frequência de 63-71 kHz mostra-se mais adequada para detecção de danos distantes do PZT - tipicamente acima de 300 mm.

No segundo teste na estrutura $Tubo_M$, chamado de teste **Aumento da Massa Medida com 4 Sensores**, percebe-se que, para as duas faixas de frequências, o índice CCDM tem ordem de grandeza superior à do índice RMSD. Porém, os dois índices apresentaram melhores resultados para o sensor 1, que está mais próximo do dano, nas duas faixas de frequências analisadas. Também é possível afirmar que os dois índices de falha métrica detectaram todos os níveis de danos, mas, o índice RMSD apresenta uma melhor correspondência entre o valor do índice e a distancia ao dano, sendo que quando a distancia do dano ao sensor aumenta o valor do índice diminui.

É possível observar que, o o índice RMSD aporta mais informação quanto à localização do dano, mas o Índice CCDM é mais favorável para definir um limiar e detectar danos mais longes dos PZTs.

No terceiro e no quarto teste na estrutura $Tubo_M$, foram utilizadas piezocerâmicas retangulares no lugar dos PZTs tipo buzzer. As análises foram feitas na parte real da impedância e os resultados mostram que há menos picos do que os obtidos com os sensores tipo buzzer, o que pode evidenciar uma possível diminuição do ruído no sinal da parte real da impedância. Quanto aos resultados obtidos pode-se observar para os dois testes que na faixa de frequência de 75-83 kHz é possível detectar danos mais perto do transdutor PZT, e a faixa de frequência de 63-71 kHz é mais adequada para detectar danos mais longe do que 250 mm. Observa-se também que o transdutor PZT com maior área tem melhores resultados para os dois índices de falha métrica.

Em relação aos resultados do índice CCDM obtidos nas estruturas $Tubo_m$ e $Tubo_M$, pode-se dizer que no $Tubo_M$ o menor valor do índice foi de 208,9 na faixa de frequência de 75-83 kHz (para o dano da porca colada a 300 mm), e no $Tubo_m$ o menor valor do índice foi de 1531 na faixa de frequência de 63-71 kHz (para o mesmo dano da porca colada a 300 mm), por conseguinte, pode-se dizer que o transdutor buzzer apresentou melhores resultados para o tubo de menor diâmetro. Quanto aos transdutores rectangulares, a piezocerâmica de dimensões 32 mm x 6 mm gerou índices CCDM bem superiores aos obtidos com os sensores PZT tipo buzzer, mostrando-se mais eficiente na detecção de danos.

4.4 Testes na Estrutura Tubulação

A terceira estrutura utilizada neste trabalho é uma *Tubulação* de aço galvanizado com diâmetro nominal de 80 mm, diâmetro externo de 88,90 mm e uma espessura de 4 mm como ilustrada na Figura 43. A estrutura monitorada com fluxo constante de água, foram colados 4 transdutores PZT em 4 posições diferentes, separados entre si por 90 graus.

Figura 43 - Estrutura: *Tubulação*.

(a)



(b)



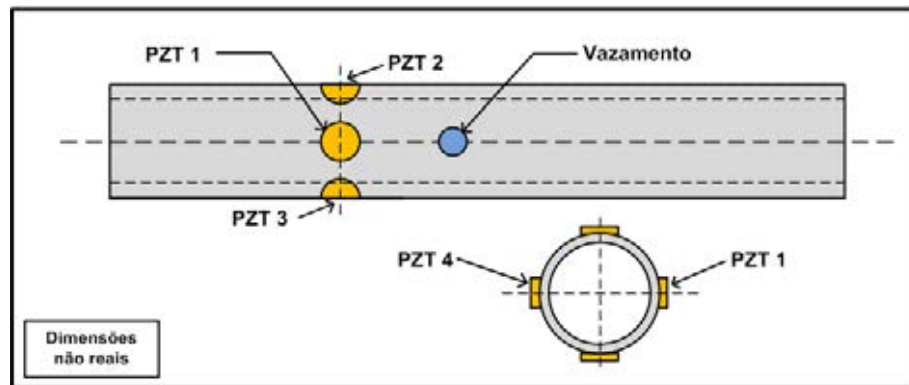
Fonte: Dados do próprio autor

Nesta seção é comparada a impedância elétrica medida com PZT1 com a tubulação a uma pressão de 2893 kPa, condição considerada como referência íntegra (baseline), com a impedância elétrica do transdutor medida com a tubulação submetida a três pressões diferentes e também à simulação de um vazamento, considerados como danos.

4.4.1 Variação de pressão

O primeiro dano (A) foi simulado baixando-se a pressão para 2059 kPa psi; no segundo caso (dano B) a pressão baixou para 883 kPa; para o terceiro caso (dano C), a pressão foi reduzida para 343 kPa. O último dano foi simulado com um vazamento, através de um furo de 8 mm de diâmetro a uma distância de 100 mm do PZT 1 como apresentado na Figura 44 e com pressão inicial de 2893 kPa.

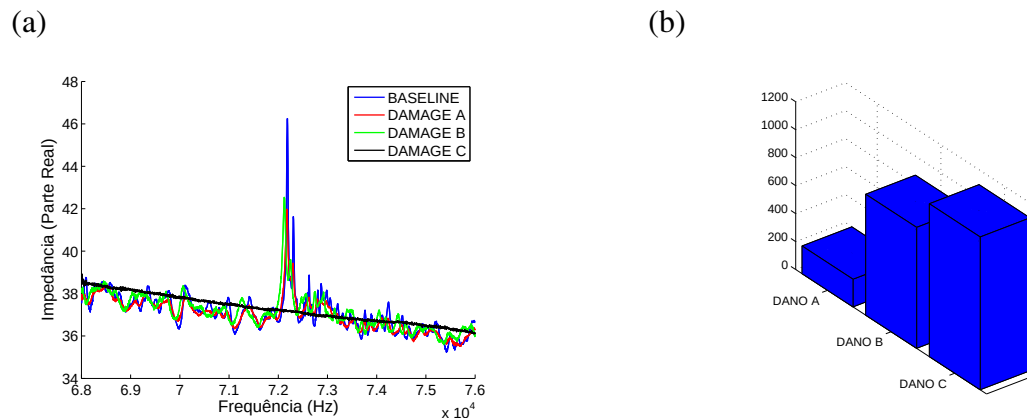
Figura 44 - Danos simulados na Tubulação.



Fonte: Dados do próprio autor

Na Figura 45a observa-se um exemplo da medida da parte real da impedância da tubulação em uma faixa de frequências de 68-76 kHz. Os três primeiros casos de danos são representados graficamente em comparação com uma medida de baseline.

Figura 45 - a) Medida da parte real da impedância da Tubulação a diferentes pressões; b) Índice CCDM da Tubulação.

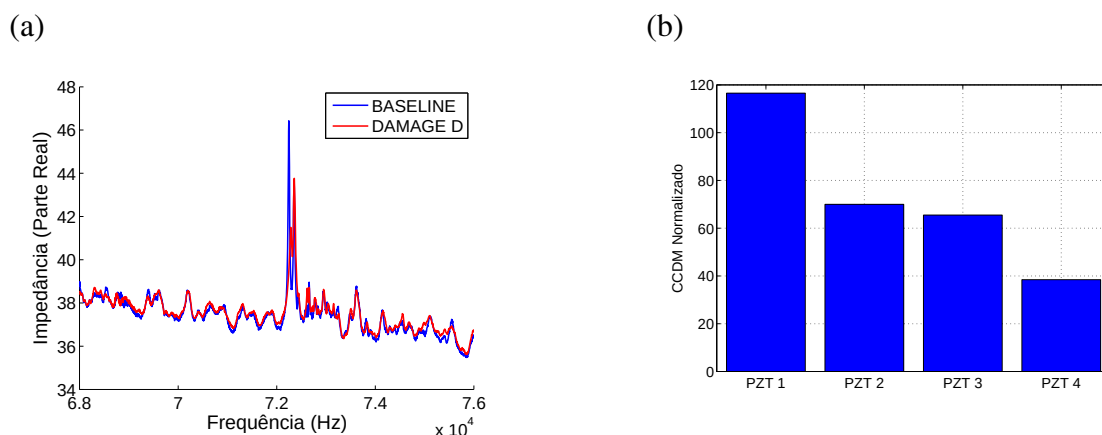


Fonte: Dados do próprio autor

4.4.2 Vazamento 100 mm

Na Figura 46a observa-se um exemplo da medida da parte real da impedância da tubulação em uma faixa de frequências de 68-76 kHz. O quarto dano (vazamento ou D) é representado graficamente em comparação com uma medida de baseline.

Figura 46 - a) Medida da parte real da impedância da *Tubulação* com vazamento; b) Índice CCDM do vazamento na *Tubulação*.



Fonte: Dados do próprio autor

4.4.3 Análise dos Resultados

No teste da variação da pressão pode-se observar que, quando a pressão é reduzida, há um aumento significativo dos índice falha métrica CCDM, comprovado com mudanças na impedância. Também pode-se observar na Figura 46b que o índice de falha CCDM apresenta uma correlação direta com a pressão da tubulação, de tal maneira que quando se detecta a diminuição de pressão o índice do dano aumenta.

No teste do vazamento observa-se que na Figura 44b o PZT1 tem um índice de falha métrica muito maior do que os outros PZT's, dado que o PZT1 está localizado mais próximo ao dano em relação aos outros. Por outro lado, PZT2 e PZT3 apresentam índice de falha métrica muito similar, com valores bem abaixo dos obtidos com o PZT1. Por último, o índice obtido com o PZT3 diminuiu 77% em relação ao obtido com o PZT1. Isto pode ser atribuído ao posicionamento mais distante do PZT4 em relação ao dano.

5 CONCLUSÕES

5.1 Considerações Finais

O objetivo deste trabalho foi demonstrar os benefícios e a viabilidade de transdutores do tipo piezelétrico (PZT) para monitorar sistemas de tubulações. Para isto foi utilizado um sistema de monitoramento estrutural (SHM) baseado na técnica da impedância eletromecânica (EMI). Os testes foram realizados em segmentos de tubos simples, monitorando-se a integridade estrutural do sistema de tubulações na presença de diferentes danos simulados. Os resultados mostraram que a presença de danos foi corretamente detectada, o que demonstra a viabilidade dos sensores tipo PZT e da técnica EMI para detectar e quantificar danos em tubulações.

Para obter um maior número de situações durante as avaliações, as medidas de referências, conhecidas como baseline, foram obtidas a cada novo teste, de modo a eliminar possíveis variações da estrutura durante a simulação do dano. A técnica da impedância eletromecânica mostrou-se mais sensível quando o sinal analisado era a parte real da impedância. Naturalmente, tanto a magnitude quanto a parte imaginária também apresentaram variações.

A detecção e quantificação da falha foram baseadas nos tradicionais índices CCDDM e RMSD. Para os diferentes testes nos diferentes tubos, os dois índices apresentaram bons resultados. Porém, deve-se destacar que o índice CCDDM mostrou-se mais sensível às falhas do que o índice RMSD. Em particular, nos testes realizados com o transdutor PZT tipo buzzer, o índice CCDDM e o índice RMSD foram mais sensíveis na faixa de frequências de 75-83 kHz. Porém, a faixa de frequência de 63-71 kHz mostrou-se adequada para quantificar o dano.

Um ponto importante em SHM é a localização do dano. Nesse sentido, testes com quatro transdutores presos à estrutura mostraram que o índice RMSD apresenta uma melhor correspondência entre o valor obtido e a distância do dano, ou seja, quanto mais distante está o dano do sensor menor é o valor do índice RMSD. Tal desempenho não se repetiu quando os danos foram simulados com a tubulação conduzindo água, o que pode ser um indicativo de que o tubo cheio apresenta uma impedância bem diferente. De qualquer forma, há um bom indicativo de que o índice RMSD pode ser usado também para localizar o dano.

Para os testes realizados com as piezocerâmicas, a parte real da impedância apresentou um menor número de picos quando comparadas com as medidas com os transdutores PZT tipo buzzer, o que pode evidenciar uma possível diminuição do ruído no sinal da impedância. Quanto aos resultados obtidos nas duas faixas de frequência, pode-se observar que, para os dois testes,

a faixa de frequência de 75-83 kHz detecta de forma mais eficiente os danos mais próximos do transdutor PZT e a faixa de frequência de 63-71 kHz se mostrou mais adequada para detectar danos mais afastados do sensor. É tipicamente acima de 250 mm. Observou-se também que a piezocerâmica com maior área apresenta melhores resultados nos índices de falha métrica utilizados.

Quanto aos testes na tubulação, em relação aos resultados apresentados pelas variações de pressão, é importante notar que o índice CCDM é apropriado para a detecção de variações de alta pressão, de modo que vazamentos com depressurização rápida e rupturas na tubulação são facilmente detectados usando este índice. Além disso, contrariamente aos resultados apresentados pelo índice CCDM nos testes sem fluxo, este apresenta uma boa correspondência do valor do índice com os danos, ou seja: quando a pressão diminui o valor do índice aumenta e quando o dano está mais afastado do transdutor PZT o índice diminui. Tal desempenho pode ser um bom caminho para localizar o dano na tubulação.

Dos casos considerados neste trabalho, pode-se concluir que o método da impedância eletromecânica, com uso de sensores piezelétricos, pode ser usado com sucesso na detecção de danos na seção principal de tubulações metálicas. A eficiência das medições de impedância para a gama de frequência selecionada depende da posição dos transdutores no sistema. Por fim, é possível também concluir que o método pode viabilizar a localização do dano, o que é algo importante na maioria das aplicações práticas.

5.2 Trabalhos Futuros

No trabalho aqui apresentado, foram simulados dois tipos de danos nas estruturas sem fluxo e dois danos na estrutura com fluxo. Tal procedimento foi necessário porque era preciso simular danos reais, de modo que seria impossível voltar a obter a referência original (baseline). No entanto, mais danos ainda podem ser caracterizados, tais como: vazamentos de diferentes dimensões, danos devido à fadiga de material, danos por corrosão e rupturas. A caracterização destes tipos de danos seria muito útil para a localização e quantificação dos mesmos. A análise e processamento de dados para a detecção, quantificação e localização do dano ainda é um campo aberto em sistemas de SHM baseados na técnica da impedância eletromecânica. Além disso, na maior parte dos sistemas de detecção de danos em tubulações (LDS) existe um alarme que é quando o dano é detectado na tubulação, além de ter operações remotas. Tais características são importantes e podem ser estudadas pensando em aplicações práticas no futuro.

No desenvolvimento deste trabalho, os efeitos térmicos e magnéticos não foram considerados na análise dos transdutores de PZT. Embora seja seguro desprezar o efeito do campo magnético, os materiais piezelétricos também apresentam efeitos piroelétricos, isto é, a distribuição das cargas elétricas nesses materiais depende não só da deformação mecânica, mas também da

temperatura. Uma investigação sobre a influência desse efeito na detecção de danos estruturais e das medidas para atenuá-la ainda é desejável. Além disso, seria importante obter um modelo analítico ou numérico que represente a interação PZT-Tubulação no domínio da frequência, o que pode viabilizar estudos mais avançados.

Assim, de forma resumida, os seguintes pontos podem ser destacados como importantes em estudos futuros: (a) caracterização de diferentes tipos de danos; (b) desenvolvimento de um sistema de SHM compacto e remoto; (c) análise do efeito piroelétrico; (d) desenvolvimento de um modelo matemático ou numérico que represente a interação PZT-Tubulação.

REFERÊNCIAS

- ANNAMDAS, V. G. M. ; SOH, C. Three-dimensional electromechanical impedance model. i: formulation of directional sum impedance. *Journal of Aerospace Engineering*, Reston, v. 20, n. 1, p. 53–62, 2007a.
- ANNAMDAS, V. G. M.; YANG, Y.; SOH, C. K. Influence of loading on the electromechanical admittance of piezoceramic transducers. *Smart Materials and Structures*, Bristol, v. 16, n. 5, p. 1888–1897, 2007.
- APC, I. *Piezoelectricity*. [S.l.: s.n.], 2011. Disponível em:
<<http://www.americanpiezo.com/knowledge-center/piezo-theory/piezoelectricity.html>>. Acesso em: 5 nov. 2013.
- BANKS, H. T.; SMITH, R. C.; WANG, Y. *Smart materials structures*. [S.l.]: John Wiley and Sons, 1996.
- BAPTISTA, F. G.; VIEIRA, J. F. A new impedance measurement system for pzt-based structural health monitoring. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Piscataway, v. 58, n. 10, Oct 2009.
- BHALLA, S.; NAIDU, A. S. K.; SOH, C. K. Influence of structure-actuator interactions and temperature on piezoelectric mechatronic signatures for nde. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SMART MATERIALS STRUCTURES AND SYSTEMS, *Bangalore, 2003. Conference...* Bangalore: [s.n.], 2003. p. 263–269.
- BHALLA, S.; SOH, C. K. Structural health monitoring by piezoimpedance transducers. i: Modeling. *Journal of Aerospace Engineering*, Reston, v. 17, n. 4, p. 154–165, 2004.
- CADY, W. G. *Piezoelectricity*. [S.l.]: Dover Press, 1964.
- CAWLEY, P. The impedance method of non-destructive inspection. *NDT International*, Ann Arbor, v. 17, n. 2, p. 59 –65, 1984.
- CHIAMORI, H. C.; THIEN, A. B.; CHING, J. T.; WAIT, J. R.; PARK, G. Piezoelectric active sensing for damage detection in pipeline structures. In: CONFERENCE AND EXPOSITION ON STRUCTURAL DYNAMICS, 2005. *Conference...* [S.l.: s.n.], 2005.
- CORTEZ, N. E. *Desenvolvimento e implementação de um sistema para detecção de falhas em estruturas usando microcontrolador*. 2012. Tese (Mestrado)- Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista- UNESP, Ilha Solteira, 2012.
- DOEBLING, S. W.; FARRAR, C. R.; PRIME, M. B. A summary review of vibration based damage identification methods. *Shock and Vibrations Digest*, Thousand Oaks, v. 30, n. 2, p. 91–105, 1998.
- GONSALEZ, C. G. *Metodologias para reconhecimento de padrões em sistemas SHM utilizando a técnica da impedância electromecânica*. 2012. Tese (Mestrado)-

Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista- UNESP, Ilha Solteira, 2012.

HALL, S. R. The effective management and use of structural health. In: INTERNATIONAL WORKSHOP ON STRUCTURAL HEALTH MONITORING, 1999. *Workshop...* [S.l.: s.n.], p. 265–275.

INMAN, D. J. Smart structures: Examples and new problems. In: BRAZILIAN CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING, 2001. *Congress...* [S.l.: s.n.], 2001. v. 2, n. 16.

INMAN, D. J. *Damage prognosis*. Los Alamos: Los Alamos National Laboratory Report, 2005.

JAFFE, B.; COOK, W. R.; JAFFE, H. Piezoelectric ceramics. *Journal of Sound and Vibration*, New York, v. 20, n. 4, p. 562–563, 1971.

LEO, D. *Engeneering analysis of smart materials systems*. [S.l.: s.n.], 2007. 556 p.

LIANG, C.; SUN, F. P.; 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*, Michigan, v. 5, n. 1, p. 12–20, Jan 1994.

LIN, B.; GIURGIUTIU, V. *Modeling and testing of PZT and PVDF piezoelectric wafer active sensors*. 4. ed. [S.l.: s.n.], 2006.

MARQUI, C. R.; BUENO, D.; FILHO, J. V.; SANTOS, R. B.; JUNIOR, V. L. External disturbance effect in damage detection using electrical impedance. In: INTERNATIONAL MODAL ANALYSIS CONFERENCE, 2008, Orlando. *Conference...* Orlando: [s.n.], 2008.

MASCARENAS, D. L.; PARK, G.; FARINHOLT, K. M.; TODD, M. D.; FARRAR, C. R. A low-power wireless sensing device for remote inspection of bolted joints. *Journal of Aerospace Engineering*, Reston, n. 223, p. 565–575, 2009.

MEITZLER, A. H. *Ieee standard on piezoelectricity : an american national standard*. New York: IEEE-ANSI, 1987. p. 66.

MOURA1, E. M.; SOUZA, I. C.; SILVA, J. S. da; SILVA, F. C. da. Abordagem sobre perdas de Água em sistemas de abastecimento: breve explanação sobre os tipos e principais causas. In: SEMINÁRIO HISPANO-BRASILEIRO SOBRE SISTEMAS DE ABASTECIMENTO URBANO DE ÁGUA, 4., 2004, João Pessoa. *Seminário...* João Pessoa: [s.n.], 2004.

NOKES, J. P.; CLOUD, G. L. The application of interferometric techniques to the nondestructive inspection of fiber -reinforced materials. *Experimental Mechanics*, Heidelberg, v. 33, n. 4, p. 314–319, 1993.

PARK, G.; CUDNEY, H. H.; INMAN, D. J. Feasibility of using impedance-based damage assessment for pipeline structures. In: . Earthquake engineering and structural dynamics. [S.l.: s.n.], 2001. p. 1463 – 1474.

PARK, G.; SOHN, H.; FARRAY, C. R.; INMAN, D. J. Overview of piezoelectric impedance based health monitoring and path forward. *The Shock and Vibration Digest*, Thousand Oaks, v. 35, n. p1., 451–463, 2003.

PARK, S.; PARK, G.; C., Y.; FARRAR, C. Sensor self-diagnosis using a modified impedance model for active sensing-based structural health monitoring. *Structural Health Monitoring*, Stanford, v. 8, n. 1, p. 71–89, 2009.

PEAIRS, D.; PARK, G.; INMAN, A. D. J. Improving accessibility of the impedance-based structural health monitoring method. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Michigan, n. 15, p. 129–139, 2004.

ROGERS, C. A. Recent advancements in the electro-mechanical (e/m) impedance method for structural health monitoring and nde. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON SMART STRUCTURES AND MATERIALS, 53., 1998, Catamaran. In: *Annual...* Catamaran: [s.n.], 1998. p. 536–547,

RYTTER, A. *Vibration based inspection of civil engineering structures thesis*. 1993. Thesis (Philosophical Doctor)- Dep. of Building Technology and Structural Engineering, Aalborg University, Denmark, 1993.

SCHAEFER, K. *Leak detection: a new challenge for the oil and gas pipeline industry*. [S.l.: s.n.], 2012. Disponível em: <<http://oilandgas-investments.com/2012/energy-services/leak-detection-pipeline-industry/>>. Acesso em: 14 jun. 2013.

SOHN, H.; FARRAR, C. R.; HEMEZ, F. M.; SHUNK, D. D.; STINEMATES, D. W.; NADLER, B. R. *A review of structural health monitoring literature*. Los Alamos: Los Alamos National Laboratory Report, 2004.

SUN, F. P.; CHAUDHRY, Z.; LIANG, C.; ROGERS, C. A. Truss structure integrity identification using pzt sensor-actuator. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Lancaster, v. 6, n. 5, p. 134–139, 1995.

SUN, F. P.; CHAUDHRY, Z.; ROGERS, C. A.; MAJMUNDAR, M.; LIANG, C. Automated real-time structure health monitoring via signature pattern recognition. *Proc. SPIE*, San Diego, v. 244, n. 3, p. 236–247, 1995.

SYSTEMS, I. P. *Piezo systems sctuator and sensors*. [S.l.: s.n.], 2013. Disponível em: <<http://www.piezo.com/>>. Acesso em: 5 jul. 2013.

THIEN, A. B. *Pipeline structural health monitoring using macro-fiber composite active sensors*. 2006. ... f. Tese (Mestrado)- Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Cincinnati, Cincinnati, 2006.

VIEIRA, J. F.; BAPTISTA, F. G.; INMAN, D. J. Influence of excitation signal on impedance-based structural health monitoring. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Lancaster, v. 21, n. 14, p. 1409–1416, 2010.

WAIT, J. R.; PARK, G.; FARRAR, C. R. Plate damage identification using wave propagation and impedance methods. *Health Monitoring and Smart Nondestructive Evaluation of Structural and Biological Systems*, San Diego, v. 3, n. 5394, p. 53–65, Julho 2004.

WETHERHOLD, R.; MESSER, M.; PATRA, A. Optimization of directionally attached piezoelectric actuators. *J. Eng. Mater. Technol*, North Carolina, v. 125, n. 2, p. 148–152, 2003.

YANGANG, Y.; HU, Y.; LU, Y. Sensitivity of pzt impedance sensors for damage detection of concrete structures. *Sensors*, Basel, v. 8, n. 1, p. 327–346, 2007.

ZHOU, S. W.; LIANG, C.; ROGERS, C. A. An impedance-based system modeling approach for induced strain actuator-driven structures. *Journal of Vibration and Acoustics*, New York v. 118, n. 3, p. 323–331, 1996.

APÊNDICE A - ARTIGOS PUBLICADOS RELACIONADOS COM ESTA PESQUISA

PITA, J. L.; TURRA, A. E.; VIEIRA FILHO, J. Leakage detection in water pipe networks using electromechanical impedance (EMI) based technique. In: INTERNATIONAL WORKSHOP ON STRUCTURAL HEALTH MONITORING- IWSHM, 9., 2003, Stanford. *Proceedings...* Lancaster: DEStech Publications, 2013. v. 2, p. 1524-1531.

PITA, J. L.; TURRA, A. E.; VIEIRA FILHO, J. Detecção de dano em tubulações usando técnica baseada na Impedância Eletromecânica (EMI). In: SIMPOSIO BRASILEIRO DE AUTOMAÇÃO INTELIGENTE- SBAI, 11., 2013, Fortaleza. *Simpósio...* Fortaleza: [s.n.], 2013.