

**GIULIANO GARDOLINSKI VENSON**

**APLICAÇÃO DO COEFICIENTE DE HURST NA TÉCNICA  
DE MONITORAMENTO DA INTEGRIDADE ESTRUTURAL  
BASEADA NA IMPEDÂNCIA ELETROMECHANICA**

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

**2020**

**GIULIANO GARDOLINSKI VENSON**

**APLICAÇÃO DO COEFICIENTE DE HURST NA TÉCNICA DE  
MONITORAMENTO DA INTEGRIDADE ESTRUTURAL  
BASEADA NA IMPEDÂNCIA ELETROMECHANICA**

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

Área de Concentração: Mecânica dos Sólidos e Vibrações

Orientador: Prof. Dr. Aldemir Aparecido Cavalini Jr.

**UBERLÂNDIA - MG**

**2020**

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU  
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

V464 Venson, Giuliano Gardolinski, 1982-  
2020 Aplicação do Coeficiente de Hurst na Técnica de Monitoramento  
da Integridade Estrutural Baseada na Impedância Eletromecânica  
[recurso eletrônico] / Giuliano Gardolinski Venson. - 2020.

Orientador: Aldemir Aparecido Cavalini Jr..  
Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Uberlândia, Pós-  
graduação em Engenharia Mecânica.

Modo de acesso: Internet.

Disponível em: <http://doi.org/10.14393/ufu.te.2020.356>

Inclui bibliografia.

Inclui ilustrações.

1. Engenharia mecânica. I. Jr., Aldemir Aparecido Cavalini, 1983-  
, (Orient.). II. Universidade Federal de Uberlândia. Pós-graduação  
em Engenharia Mecânica. III. Título.

CDU: 621

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:  
Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091  
Nelson Marcos Ferreira - CRB6/3074


**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA**
**Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica**

Av. João Naves de Ávila, nº 2121, Bloco 1M, Sala 212 - Bairro Santa Mônica, Uberlândia-MG, CEP 38400-902

Telefone: (34) 3239-4282 - www.posgrad.mecanica.ufu.br - secposmec@mecanica.ufu.br


**ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO**

Programa de Pós-Graduação em:	Engenharia Mecânica				
Defesa de:	Tese de Doutorado, 297, COPEM				
Data:	20/03/2020	Hora de início:	08:30	Hora de encerramento:	12:00
Matrícula do Discente:	11813EMC007				
Nome do Discente:	Giuliano Gardolinski Venson				
Título do Trabalho:	Aplicação do Coeficiente de Hurst na Técnica de Monitoramento da Integridade Estrutural baseada na Impedância Eletromecânica				
Área de concentração:	Mecânica dos Sólidos e Vibrações				
Linha de pesquisa:	Dinâmica de Sistemas Mecânicos				
Projeto de Pesquisa de vinculação:					

Reuniu-se no Anfiteatro do MFLab - Bloco 5P, Campus Santa Mônica, da Universidade Federal de Uberlândia, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, assim composta: Professores Doutores: Valder Steffen Junior - FEMEC/UFU; Fran Sérgio Lobato - FEQUI/UFU; Vicente Lopes Júnior - UNESP e Aldemir Aparecido Cavalini Junior - FEMEC/UFU orientador do candidato. Ressalta-se que o Prof. Domingos Alves Rade - ITA e o Prof. Roberto Mendes Finzi Neto - FEMEC/UFU participaram da defesa por meio de Skype desde a cidade de São José dos Campos/SP e Uberlândia/MG, respectivamente, e os demais membros da banca e o aluno participaram *in loco*.

Iniciando os trabalhos o presidente da mesa, Dr. Aldemir Aparecido Cavalini Junior, apresentou a Comissão Examinadora e o candidato, agradeceu a presença do público, e concedeu ao Discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação do Discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir o senhor(a) presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos(às) examinadores(as), que passaram a arguir o(a) candidato(a). Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o(a) candidato(a):

Aprovado.

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor.

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Aldemir Aparecido Cavalini Junior, Professor(a) do Magistério Superior**, em 20/03/2020, às 11:57, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Roberto Mendes Finzi Neto, Membro de Comissão**, em 20/03/2020, às 11:57, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Valder Steffen Junior, Professor(a) do Magistério Superior**, em 20/03/2020, às 11:57, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Domingos Alves Rade, Usuário Externo**, em 20/03/2020, às 11:58, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Fran Sergio Lobato, Professor(a) do Magistério Superior**, em 20/03/2020, às 11:58, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **VICENTE LOPES JUNIOR, Usuário Externo**, em 27/03/2020, às 14:58, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://www.sei.ufu.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **1951824** e o código CRC **796CEEC4**.

**GIULIANO GARDOLINSKI VENSON**

**APLICAÇÃO DO COEFICIENTE DE HURST NA TÉCNICA DE  
MONITORAMENTO DA INTEGRIDADE ESTRUTURAL  
BASEADA NA IMPEDÂNCIA ELETROMECHANICA**

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

Área de Concentração: Mecânica dos Sólidos e Vibrações

**Uberlândia, março de 2020**

Dedico esse trabalho a todos que de alguma forma participaram de sua realização

Em especial à minha família: pais Walter e Rita, esposa Elaine e filho Gabriel

# **AGRADECIMENTOS**

À Deus, pois dele e para ele são realizadas todas as coisas boas na vida.

À minha esposa Elaine do Vale Venson, pelo amor e companheirismo ao longo desses 19 anos de união, que mais uma vez esteve presente, realizando as tarefas familiares as quais eu não pude realizar por estar envolvido nesse trabalho.

Ao meu filho Gabriel do Vale Venson, pelo amor e entendimento da minha ausência em alguns momentos necessários para a realização desse trabalho.

Aos meus pais Walter Venson e Rita Maria Gardolinski Venson e meus irmãos Rafael Gardolinski Venson e Walter Venson Filho, que desde o início da minha formação escolar e acadêmica criaram e ofereceram as melhores condições para eu que pudesse estar hoje nesse momento de vida.

Ao Prof. Aldemir Aparecido Cavalini Jr, orientador desse trabalho, por acreditar na proposta, ensinar os conceitos fundamentais a respeito de impedância eletromecânica, compensação de temperatura e análises de dano, oferecendo todas as condições técnicas para realização dos ensaios desse trabalho de tese.

Ao Prof. Roberto Mendes Finzi Neto, pelos ensinamentos a respeito da técnica de monitoramento, oferecendo as condições técnicas para realização dos ensaios, em especial ao uso do equipamento analisador de impedância.

À Karina Mayumi Tsuruta, pelos ensinamentos a respeito da técnica de impedância, utilização da câmara de controle climática e pelo acompanhamento nos ensaios de dano.



## **AGRADECIMENTOS**

À Faculdade de Engenharia Mecânica e demais órgãos administrativos da Universidade Federal de Uberlândia por permitirem e aprovarem meu afastamento integral remunerado para pós-graduação através do processo SEI/UFU 23117.028815/2018-89, sem bolsa de pós-graduação.

Aos projetos de pesquisa financiados pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq): 574001/2008-5, 304546/2018-8 e 431337/2018-7), Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG): TEC-APQ-3076-09, TEC-APQ-02284-15, TEC-APQ-00464-16 e PPM-00187-18) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) através do Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia de Estruturas Inteligentes em Engenharia (INCT-EIE).

Às empresas PETROBRÁS, CPFL Energia, CERAN, ENERCAN, BAESA e Usina Hidrelétrica Foz do Chapecó S/A pelo apoio direto e indireto nos projetos de pesquisa e parcerias dentro do LMEst/UFU.

À todos os demais amigos pessoais e colegas da comunidade acadêmica que de alguma forma contribuíram para a realização desse trabalho.

Venson, G. G. Aplicação do Coeficiente de Hurst na Técnica de Monitoramento da Integridade Estrutural Baseada na Impedância Eletromecânica. 2020. 171 f. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

## RESUMO

Este trabalho apresenta a aplicação do coeficiente de Hurst na técnica de monitoramento da integridade estrutural baseada no método da impedância eletromecânica. Esse método de monitoramento utiliza sensores e atuadores do tipo pastilhas piezelétricas acopladas na estrutura a fim de detectar mudanças nas assinaturas de impedância que podem estar relacionada à presença de danos. As métricas de dano são parâmetros utilizados para quantificar as mudanças nas assinaturas de impedância, as quais apresentam valores muito próximos a zero na condição da estrutura sem dano e aumentam significativamente na medida em que o dano torna-se presente. Nesse trabalho será apresentado e discutido o coeficiente de Hurst como uma nova métrica de dano para avaliar as mudanças nas assinaturas devido a presença de dano, em contribuição às métricas já consolidadas na literatura. Para avaliar a eficácia do coeficiente de Hurst em detectar a presença de dano em uma estrutura realizou-se um conjunto de experimentos em vigas de alumínio, submetidas a ensaios sem a presença de dano e com a presença de dano em diferentes temperaturas. As análises de dano são realizadas considerando a comparação dos valores obtidos a partir do coeficiente de Hurst com as métricas de dano existentes. Os resultados mostram que o coeficiente de Hurst como métrica de dano permite detectar a presença de dano em todas as condições de ensaio, permitindo apresentar e concluir sobre as vantagens e desvantagens do método de Hurst na impedância eletromecânica.

---

*Palavras-chave:* coeficiente de Hurst, impedância eletromecânica, monitoramento da integridade estrutural, assinatura de impedância, métrica de dano

Venson, G. G. The Use of Hurst Coefficient in Impedance-Based Structural Health Monitoring. 2020. 171 f. PhD. Thesis, Federal University of Uberlândia, Uberlândia.

## **ABSTRACT**

This work presents the use of Hurst coefficient in structural health monitoring based on electromechanical impedance method. This method uses piezoelectric sensors coupled to the structure in order to detect impedance signatures changes that may be related to the presence of damage. The damage metrics are parameters used to quantify the changes in impedance signatures, which presents values very close to zero in structural no-damage condition and increases significantly as the damage becomes present. The Hurst coefficient will be presented and discussed as a new damage metric to assess changes in impedance signatures due to the presence of damage, in addition to the damage metrics already consolidated in the literature. To evaluate the effectiveness of Hurst coefficient in damage detection, a set of experiments were carried out on aluminum beams, submitted to tests without the presence of damage and with the presence of damage at different temperatures. The damage analysis is performed considering the comparison of the values obtained from Hurst with the existing damage metrics. The results show that the Hurst coefficient as a damage metric allows to detect the presence of damage in all test conditions, allowing to present and conclude on the advantages and disadvantages of the Hurst method in electromechanical impedance.

---

*Keywords:* Hurst coefficient, electromechanical impedance, structural health monitoring, impedance signature, damage metric,

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Distribuição Percentual dos Trabalhos Relacionados à SHM .....	6
Figura 2.2 - Artigos Relacionados à Impedância Eletromecânica em SHM .....	7
Figura 2.3 - Distribuição Percentual dos Trabalhos Relacionados à Impedância.....	8
Figura 2.4 - Artigos Relacionados ao Método Estatístico de Hurst .....	10
Figura 2.5 - Distribuição Percentual dos Trabalhos Relacionados ao Hurst .....	10
Figura 3.1 - Modelo Eletromecânico do Método de Impedância .....	18
Figura 3.2 - Representação de Assinatura de Impedância .....	20
Figura 3.3 - Assinatura de Impedância em Ampla Faixa de Frequência .....	22
Figura 3.4 - Representação do Limiar de Dano em Métrica de Dano .....	30
Figura 3.5 - Assinaturas de Impedância em Diferentes Temperaturas .....	34
Figura 3.6 - Assinaturas de Impedância Compensadas .....	34
Figura 3.7 - Temperatura para as Assinaturas de Impedância.....	35
Figura 3.8 - Métricas de Dano RMSD: COM E SEM Compensação .....	36
Figura 3.9 - Métricas de Dano RMSD1: COM E SEM Compensação .....	36
Figura 3.10 - Métricas de Dano RMSD2: COM E SEM Compensação .....	37
Figura 3.11 - Métricas de Dano RMSD3: COM E SEM Compensação .....	37
Figura 3.12 - Métricas de Dano RMSD4: COM E SEM Compensação .....	38
Figura 3.13 - Métricas de Dano RMSD5: COM E SEM Compensação .....	38
Figura 3.14 - Métricas de Dano CCD: COM E SEM Compensação .....	39
Figura 3.15 - Métricas de Dano ASD: COM E SEM Compensação .....	39
Figura 3.16 - Métricas de Dano MAPD: COM E SEM Compensação .....	40

## LISTA DE FIGURAS (cont.)

Figura 3.17 - Métricas de Dano SSD: COM E SEM Compensação .....	40
Figura 4.1 - Representação de Variável com Comportamento Senoidal.....	43
Figura 4.2 - Representação de Variável com Comportamento Linear.....	44
Figura 4.3 - Representação de Variável com Comportamento Aleatório .....	45
Figura 4.4 - Séries de Dados em Conjunto de Dados com 4800 pontos.....	47
Figura 4.5 - Ajuste Linear para Estimativa do Coeficiente de Hurst .....	51
Figura 4.6 - Coeficiente de Hurst para Comportamento Senoidal.....	52
Figura 4.7 - Coeficiente de Hurst para Comportamento Linear .....	53
Figura 4.8 - Coeficiente de Hurst para Comportamento Aleatório.....	54
Figura 4.9 - Coeficiente de Hurst em função do Fator de Escala .....	58
Figura 4.10 - Comparação de Ajustes para Fatores de Escala de 48 e 480 .....	59
Figura 4.11 - Assinatura de Impedância de 20 a 180kHz @ 16000 pontos .....	60
Figura 4.12 - Coeficiente de Hurst para Assinatura de 20 a 180kHz.....	61
Figura 4.13 - Assinatura de Impedância de 20 a 60kHz @ 4000 pontos .....	62
Figura 4.14 - Assinatura de Impedância de 60 a 100kHz @ 4000 pontos .....	63
Figura 4.15 - Assinatura de Impedância de 100 a 140kHz @ 4000 pontos .....	63
Figura 4.16 - Assinatura de Impedância de 140 a 180kHz @ 4000 pontos .....	64
Figura 4.17 - Coeficientes de Hurst das Assinaturas Deslocadas.....	66
Figura 5.1 - Viga de Alumínio com PZT .....	68
Figura 5.2 - Detalhe da Pastilha Circular de PZT na Viga de Alumínio .....	69
Figura 5.3 - Vigas de Alumínio Montadas no Suporte de Isopor .....	69

## LISTA DE FIGURAS (cont.)

Figura 5.4 - Analisador de Impedância SySHM do LMEst/FEMEC .....	70
Figura 5.5 - Câmara Climática Espec EPL-4H do LMEst/FEMEC.....	71
Figura 5.6 - Vigas de Alumínio com Presença de Porcas de Aço .....	72
Figura 5.7 - Roteiro Simplificado do Processo de Análise de Resultados .....	74
Figura 5.8 - Roteiro do Processo de Análise dos Ensaios de Dano .....	74
Figura 6.1 - Sensibilidade do Coeficiente de Hurst PZT #1.....	78
Figura 6.2 - Sensibilidade do Coeficiente de Hurst PZT #2.....	78
Figura 6.3 - Sensibilidade do Coeficiente de Hurst PZT #3.....	79
Figura 6.4 - Sensibilidade do Coeficiente de Hurst PZT #4.....	79
Figura 6.5 - Sensibilidade do Coeficiente de Hurst PZT #5.....	80
Figura 6.6 - Sensibilidade do Coeficiente de Hurst PZT #6.....	80
Figura 6.7 - Sensibilidade do Coeficiente de Hurst PZT #7.....	81
Figura 6.8 - Sensibilidade do Coeficiente de Hurst PZT #8.....	81
Figura 6.9 - Sensibilidade do Coeficiente de Hurst PZT #1.....	85
Figura 6.10 - Sensibilidade do Coeficiente de Hurst PZT #2.....	85
Figura 6.11 - Sensibilidade do Coeficiente de Hurst PZT #3.....	86
Figura 6.12 - Sensibilidade do Coeficiente de Hurst PZT #4.....	86
Figura 6.13 - Sensibilidade do Coeficiente de Hurst PZT #5.....	87
Figura 6.14 - Sensibilidade do Coeficiente de Hurst PZT #6.....	87
Figura 6.15 - Sensibilidade do Coeficiente de Hurst PZT #7.....	88
Figura 6.16 - Sensibilidade do Coeficiente de Hurst PZT #8.....	88

## LISTA DE FIGURAS (cont.)

Figura 6.17 - Temperatura Ambiente durante os Ensaios .....	91
Figura 6.18 - Repetibilidade do Coeficiente de Hurst PZT #1 .....	91
Figura 6.19 - Repetibilidade do Coeficiente de Hurst PZT #2 .....	92
Figura 6.20 - Repetibilidade do Coeficiente de Hurst PZT #3 .....	92
Figura 6.21 - Repetibilidade do Coeficiente de Hurst PZT #4 .....	93
Figura 6.22 - Repetibilidade do Coeficiente de Hurst PZT #5 .....	93
Figura 6.23 - Repetibilidade do Coeficiente de Hurst PZT #6 .....	94
Figura 6.24 - Repetibilidade do Coeficiente de Hurst PZT #7 .....	94
Figura 6.25 - Repetibilidade do Coeficiente de Hurst PZT #8 .....	95
Figura 6.26 - Temperatura na Câmara Climática durante os Ensaios.....	97
Figura 6.27 - Repetibilidade do Coeficiente de Hurst PZT #1 .....	98
Figura 6.28 - Repetibilidade do Coeficiente de Hurst PZT #2 .....	98
Figura 6.29 - Repetibilidade do Coeficiente de Hurst PZT #3 .....	99
Figura 6.30 - Repetibilidade do Coeficiente de Hurst PZT #4 .....	99
Figura 6.31 - Repetibilidade do Coeficiente de Hurst PZT #5 .....	100
Figura 6.32 - Repetibilidade do Coeficiente de Hurst PZT #6 .....	100
Figura 6.33 - Repetibilidade do Coeficiente de Hurst PZT #7 .....	101
Figura 6.34 - Repetibilidade do Coeficiente de Hurst PZT 8 .....	101
Figura 7.1 - Detecção de Dano Através da Métrica RMSD no PZT #1 .....	107
Figura 7.2 - Detecção de Dano Através da Métrica RMSD no PZT #2 .....	108
Figura 7.3 - Detecção de Dano Através da Métrica RMSD no PZT #3 .....	108

## LISTA DE FIGURAS (cont.)

Figura 7.4 - Detecção de Dano Através da Métrica RMSD no PZT #4 .....	109
Figura 7.5 - Detecção de Dano Através da Métrica RMSD no PZT #5 .....	109
Figura 7.6 - Detecção de Dano Através da Métrica RMSD no PZT #6 .....	110
Figura 7.7 - Detecção de Dano Através da Métrica RMSD no PZT #7 .....	110
Figura 7.8 - Detecção de Dano Através da Métrica RMSD no PZT #8 .....	111
Figura 7.9 - Detecção de Dano: Coeficiente de Hurst PZT#1 a 25°C .....	125
Figura 7.10 - Detecção de Dano: Coeficiente de Hurst PZT#2 a 25°C .....	125
Figura 7.11 - Detecção de Dano: Coeficiente de Hurst PZT#3 a 25°C .....	126
Figura 7.12 - Detecção de Dano: Coeficiente de Hurst PZT#4 a 25°C .....	126
Figura 7.13 - Detecção de Dano: Coeficiente de Hurst PZT#5 a 25°C .....	127
Figura 7.14 - Detecção de Dano: Coeficiente de Hurst PZT#6 a 25°C .....	127
Figura 7.15 - Detecção de Dano: Coeficiente de Hurst PZT#7 a 25°C .....	128
Figura 7.16 - Detecção de Dano: Coeficiente de Hurst PZT#8 a 25°C .....	128
Figura 7.17 - Coeficientes de Hurst SEM Presença de Dano.....	130
Figura 7.18 - Coeficientes de Hurst COM Presença de Dano.....	130
Figura 7.19 - Métrica de Dano CCD SEM Presença de Dano.....	132
Figura 7.20 - Métrica de Dano CCD COM Presença de Dano .....	133



## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Parâmetros das Assinaturas para Determinação do Limiar de Dano.....	31
Tabela 4.1 - Séries de Dados em Conjunto de Dados com 4800 pontos.....	50
Tabela 4.2 - Amplitudes Reescaladas para Comportamento Senoidal .....	52
Tabela 4.3 - Amplitudes Reescaladas para Comportamento Linear .....	53
Tabela 4.4 - Amplitudes Reescaladas para Comportamento Aleatório .....	54
Tabela 4.5 - Fatores de Escala e Número de Série de Dados .....	56
Tabela 4.6 - Blocos e Coeficiente de Hurst em função do Fator de Escala .....	58
Tabela 4.7 - Método de Hurst para Assinatura de 20 a 180kHz.....	61
Tabela 4.8 - Coeficientes de Hurst para Assinaturas Original e Reduzidas .....	64
Tabela 4.9 - Coeficientes de Hurst para Assinaturas Deslocadas.....	66
Tabela 6.1 - Ensaios de Sensibilidade à Temperatura Ambiente.....	77
Tabela 6.2 - Análise Estatística da Sensibilidade do Coeficiente de Hurst .....	82
Tabela 6.3 - Ensaios de Sensibilidade em Temperatura Controlada .....	84
Tabela 6.4 - Análise Estatística da Sensibilidade do Coeficiente de Hurst .....	89
Tabela 6.5 - Análise Estatística da Repetibilidade do Coeficiente de Hurst .....	95
Tabela 6.6 - Análise Estatística da Repetibilidade do Coeficiente de Hurst.....	102
Tabela 7.1 - Condições de Ensaio nas Vigas de Alumínio .....	104
Tabela 7.2 - Referência de Baseline para Compensação de Temperatura.....	105
Tabela 7.3 - Referência de Baseline para Métricas de Dano .....	106
Tabela 7.4 - Métricas de Dano para Temperatura de -5°C (PZT #1 a PZT #4).....	112
Tabela 7.5 - Métricas de Dano para Temperatura de -5°C (PZT #5 a PZT #8).....	113

## LISTA DE TABELAS (cont.)

Tabela 7.6 - Métricas de Dano para Temperatura de 10°C (PZT #1 a PZT #4).....	114
Tabela 7.7 - Métricas de Dano para Temperatura de 10°C (PZT #5 a PZT #8).....	115
Tabela 7.8 - Métricas de Dano para Temperatura de 25°C (PZT #1 a PZT #4).....	116
Tabela 7.9 - Métricas de Dano para Temperatura de 25°C (PZT #5 a PZT #8).....	117
Tabela 7.10 - Métricas de Dano para Temperatura de 40°C (PZT #1 a PZT #4)....	118
Tabela 7.11 - Métricas de Dano para Temperatura de 40°C (PZT #5 a PZT #8)....	119
Tabela 7.12 - Coeficientes de Hurst para Temperatura de -5°C .....	121
Tabela 7.13 - Coeficientes de Hurst para Temperatura de 10°C.....	122
Tabela 7.14 - Coeficientes de Hurst para Temperatura de 25°C.....	123
Tabela 7.15 - Coeficientes de Hurst para Temperatura de 40°C.....	124

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASD	Desvio da Somatória Absoluta ( <i>Absolute Sum Deviation</i> )
CC	Coeficiente de Correlação
CCD	Desvio do Coeficiente de Correlação
FEMEC	Faculdade de Engenharia Mecânica
ISHM	Monitoramento de Integridade Estrutural Baseado em Impedância
LMEst	Laboratório de Mecânica de Estruturas Prof. José Eduardo Tannús Reis
MSD	Desvio Quadrático Médio ( <i>Mean-Square Deviation</i> )
PZT	Titanato Zirconato de Chumbo
RMSD	Raiz Quadrada do Desvio Quadrático Médio ( <i>Root-Mean-Square Deviation</i> )
SD	Desvio Quadrático ( <i>Square Deviation</i> )
SHM	Monitoramento de Integridade Estrutural
SSD	Somatória do Desvio Quadrático ( <i>Sum of Square Deviation</i> )
SySHM	Analizador de Impedância do LMEst/UFU
UFU	Universidade Federal de Uberlândia

## LISTA DE SÍMBOLOS

$H$	coeficiente de Hurst
$I$	impedância resistiva [ $\Omega$ ]
$\mu$	valor médio da população, média populacional
$\bar{x}$	valor médio da amostra, média amostral
$R$	amplitude
$s$	desvio-padrão amostral
$\sigma$	desvio-padrão populacional
$S$	desvio-padrão dos desvios em relação à média
$Y$	desvio em relação à media
$Z$	desvio acumulado
$R/s$	amplitude reescalada
$c$	número de bloco de dados
$n$	tamanho do bloco de dados, tamanho amostral
$P$	probabilidade
$\alpha$	significância estatística
$I_0(\omega)$	função de corrente elétrica em frequência [A]
$V_i(\omega)$	a função de tensão elétrica em frequência [V]
$j$	unidade imaginária
$\omega$	frequência [Hz]
$w_a$	largura da pastilha de PZT [mm]
$l_a$	comprimento da pastilha de PZT [mm]
$h_a$	largura da pastilha de PZT [mm]
$\epsilon_{33}^{-T}$	constante dielétrica
$\delta$	fator de perda elétrica
$Z_s$	impedância mecânica da estrutura [ $\Omega$ ]

## LISTA DE SÍMBOLOS (cont.)

$Z_a$	impedância mecânica do PZT [ $\Omega$ ]
$d_{3x}$	constante do acoplamento piezoelétrico
$\overline{Y}_{22}^E$	módulo de Young do PZT em campo elétrico nulo [ $\text{N/m}^2$ ]
$Z_M$	impedância mecânica [ $\Omega$ ]
$Z_E$	impedância elétrica [ $\Omega$ ]
$F(\omega)$	função de força em frequência [N]
$v(\omega)$	função de velocidade em frequência [m/s]

# SUMÁRIO

<b>1.</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1.	Apresentação do Tema .....	1
1.2.	Objetivos do Trabalho de Tese.....	2
1.3.	Relevância do Trabalho de Tese.....	2
1.4.	Estrutura do Documento de Tese .....	3
<b>2.</b>	<b>REVISÃO DE LITERATURA.....</b>	<b>5</b>
2.1.	Pesquisa Científica sobre Monitoramento da Integridade Estrutural .....	5
2.2.	Pesquisa Científica sobre Método Estatístico de Hurst .....	8
<b>3.</b>	<b>MÉTODO DA IMPEDÂNCIA ELETROMECAÂNICA .....</b>	<b>12</b>
3.1.	Monitoramento da Integridade Estrutural.....	12
3.2.	Conceitos de Impedância Mecânica e Impedância Elétrica.....	14
3.2.1.	Impedância Mecânica .....	14
3.2.2.	Impedância Elétrica.....	15
3.3.	Materiais Piezoelétricos.....	16
3.4.	Monitoramento Estrutural Baseado na Impedância Eletromecânica .....	17
3.4.1.	Região de Monitoramento e Faixas de Frequência.....	20
3.4.2.	Técnica de Aquisição de Impedância.....	22
3.5.	Métricas de Dano para o Método da Impedância Eletromecânica .....	23
3.6.	Inferência Estatística no Método da Impedância Eletromecânica .....	26
3.6.1.	Distribuição Populacional das Métricas de Dano .....	27
3.6.2.	Intervalos de Confiança para as Métricas de Dano.....	27

## SUMÁRIO (cont.)

3.7.	Limiar de Detecção de Dano em Estruturas .....	29
3.8.	Efeito da Temperatura nos Materiais Piezoelétricos .....	32
3.9.	Compensação de Temperatura por Análise de Correlação .....	32
<b>4.</b>	<b>MÉTODO ESTATÍSTICO DE HURST .....</b>	<b>42</b>
4.1.	Histórico do Método Estatístico de Hurst .....	42
4.2.	Interpretação do Coeficiente de Hurst .....	42
4.3.	Determinação do Coeficiente de Hurst .....	46
4.4.	Coeficiente de Hurst de Conjuntos de Dados Padronizados .....	51
4.5.	Número de Séries de Dados e Fator de Escala de Análise .....	55
4.6.	Considerações para Estimativa do Coeficiente de Hurst .....	57
4.7.	Aplicação do Método de Hurst em Impedância Eletromecânica .....	59
4.7.1.	Coeficiente de Hurst de Assinaturas de Impedância .....	60
4.7.2.	Efeito da Compensação de Temperatura no Coeficiente de Hurst ..	65
<b>5.</b>	<b>APARATO EXPERIMENTAL PARA ANÁLISES DE IMPEDÂNCIA .....</b>	<b>68</b>
5.1.	Estrutura de Monitoramento e Analisador de Impedância .....	68
5.2.	Montagem Experimental para Ensaios em Temperatura Controlada .....	70
5.3.	Montagem Experimental para Ensaios de Dano .....	71
5.4.	Programa Computacional para Análise de Resultados .....	72
<b>6.</b>	<b>ANÁLISES PRELIMINARES DO COEFICIENTE DE HURST .....</b>	<b>75</b>
6.1.	Análises de Sensibilidade e Repetibilidade do Coeficiente de Hurst .....	75
6.2.	Sensibilidade do Coeficiente de Hurst em Temperatura Ambiente .....	76

## SUMÁRIO (cont.)

6.3.	Sensibilidade do Coeficiente de Hurst em Temperatura Controlada .....	83
6.4.	Repetibilidade do Coeficiente de Hurst em Temperatura Ambiente .....	90
6.5.	Repetibilidade do Coeficiente de Hurst em Temperatura Controlada.....	96
<b>7.</b>	<b>ANÁLISES DE DANO EM VIGAS DE ALUMÍNIO .....</b>	<b>103</b>
7.1.	Descrição do Procedimento de Ensaios .....	103
7.2.	Análise de Dano Utilizando Métricas de Dano.....	104
7.2.1.	Processo de Compensação de Temperatura .....	105
7.2.2.	Assinaturas Baseline para Métricas de Dano.....	106
7.2.3.	Determinação das Métricas de Dano .....	106
7.3.	Análise de Dano Utilizando o Coeficiente de Hurst .....	120
7.3.1.	Coeficiente de Hurst das Assinaturas .....	120
7.3.2.	Deteção de Dano Utilizando o Coeficiente de Hurst.....	120
7.3.3.	Efeito da Temperatura no Coeficiente de Hurst .....	131
7.4.	Análise Comparativa do Coeficiente Hurst e Métricas de Dano .....	131
<b>8.</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>134</b>
8.1.	Conclusões e Contribuições do Trabalho de Tese .....	134
8.2.	Perspectivas para Trabalhos Futuros.....	135
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>137</b>



# 1.

## INTRODUÇÃO

### 1.1. Apresentação do Tema

O monitoramento da integridade estrutural SHM (do inglês, *Structural Health Monitoring*) consiste de processos de monitorar a condição de estrutura a fim de detectar a presença de dano ou condições anormais que possam afetar a integridade física e o desempenho mecânico. Os danos que podem ocorrer em uma estrutura são de diversos tipos e podem ter origem nas mais variadas condições de operação a qual a estrutura está sujeita, em especial às condições ambientais.

A técnica de monitoramento da integridade estrutural baseada no método da impedância eletromecânica utiliza sensores e atuadores do tipo pastilhas piezelétricas PZT (Zirconato Titanato de Chumbo) acopladas na estrutura a ser monitorada. Os PZT são capazes de detectar mudanças nas propriedades de massa, rigidez e/ou amortecimento da estrutura. O princípio fundamental do método é monitorar as mudanças na impedância mecânica da estrutura, causadas pela presença de danos, através da impedância elétrica do PZT através de assinaturas de impedância. Conhecendo as propriedades do PZT, qualquer mudança nas assinaturas de impedância pode estar relacionada à presença de danos.

Para quantificar as variações nas assinaturas de impedância são utilizadas métricas de dano, que correspondem a valores numéricos atribuídos à condição atual da estrutura. Na condição da estrutura sem presença de dano, as métricas de dano apresentam valores muito próximos a zero. Na medida em que o dano torna-se presente os valores das métricas de dano aumentam significativamente. As métricas de dano são calculadas a partir da análise ponto-a-ponto das assinaturas considerando uma condição de referência, comumente definida como uma condição sem dano em uma dada temperatura, e a condição atual.

As assinaturas sofrem pequenos deslocamentos horizontais e verticais em função da variação da condição ambiente, em especial temperatura, sem no entanto sofrerem variação significativa no comportamento da resposta em frequência.

Nesse contexto, introduz-se o método estatístico de Hurst como parâmetro para análise das assinaturas de impedância. O método de Hurst é uma ferramenta estatística que quantifica a tendência de comportamento de um determinado fenômeno através de um parâmetro adimensional denominado coeficiente ou expoente de Hurst. Esse coeficiente varia entre zero e a unidade, levando a diferentes interpretações com relação ao comportamento do fenômeno observado.

## **1.2. Objetivos do Trabalho de Tese**

O objetivo principal deste trabalho de tese é apresentar a aplicação do método estatístico de Hurst na impedância eletromecânica visando permitir o uso do coeficiente de Hurst como uma nova métrica de dano para detecção de danos.

As assinaturas de impedância são analisadas através do coeficiente de Hurst com o intuito de identificar padrões de comportamento em diferentes condições de ensaio, permitindo concluir sobre a presença de dano em contribuição às métricas de danos já consolidadas na literatura. A aplicação do coeficiente de Hurst como uma nova métrica de dano visa também minimizar os chamados falso positivos, onde variações das métricas são associadas erroneamente à presença de dano.

## **1.3. Relevância do Trabalho de Tese**

A correlação entre o coeficiente de Hurst e outros fenômenos já é bastante explorada em várias áreas do conhecimento. Entretanto, nenhuma informação é apresentada na literatura correlacionando o coeficiente de Hurst com o método da impedância eletromecânica em estruturas e sistemas dinâmicos. A relevância e o caráter inovador desse trabalho de tese é o desenvolvimento e discussão do método estatístico de Hurst aplicado à assinaturas de impedância e a correlação dessas assinaturas em uma estrutura submetida a um dano estrutural.

#### **1.4. Estrutura do Documento de Tese**

Esse trabalho de tese está dividido em 8 (oito) capítulos, divididos de forma a permitir uma melhor compreensão dos elementos textuais e apresentar de forma clara e didática o desenvolvimento do assunto.

O Capítulo 1 apresenta uma breve introdução sobre os principais conceitos que serão abordados no trabalho, definindo os objetivos e a relevância científica desse trabalho de tese.

O Capítulo 2 apresenta a pesquisa científica por artigos em periódicos relacionados ao tema de monitoramento da integridade estrutural e ao tema do método estatístico de Hurst. Nesse capítulo são apresentados resultados obtidos pelo autor mostrando a distribuição dos artigos científicos por ano e por categorias.

O Capítulo 3 apresenta os conceitos relacionados à técnica de monitoramento da integridade estrutural baseada no método da impedância eletromecânica. Dentre os conceitos apresentados têm-se: integridade estrutural, impedância elétrica e mecânica, materiais piezoelétricos, região de monitoramento, técnica de aquisição de impedância, métricas de dano, limiar de detecção de dano e processo de compensação de temperatura. Nesse capítulo também é apresentado conceitos de inferência estatística os quais são utilizados para determinar os intervalos de confiança dos resultados experimentais.

O Capítulo 4 apresenta os conceitos relacionados ao método estatístico de Hurst, sua interpretação e o modelo matemático para determinação do coeficiente de Hurst. Algumas aplicações do método de Hurst em outras áreas do conhecimento são apresentadas para demonstrar o potencial desse método estatístico. Para contribuir no entendimento são apresentados exemplos padronizados de cálculo do coeficiente e como o método de Hurst será utilizado para analisar as assinaturas de impedância.

O Capítulo 5 apresenta o aparato experimental utilizado para as análises de impedância na estrutura escolhida, considerando as condições de ensaio sem presença de dano e com presença de dano. Nesse capítulo é apresentado o programa computacional utilizado e os roteiros de análise de resultados.

O Capítulo 6 apresenta análises preliminares da aplicação do método de Hurst em assinaturas de impedância, considerando ensaios de avaliação de sensibilidade e repetibilidade do coeficiente de Hurst em condições de temperatura ambiente e de temperatura controlada.

O Capítulo 7 apresenta as análises de detecção de dano na estrutura a partir de métricas de dano consolidadas na literatura e a partir do coeficiente de Hurst. Os resultados são apresentados e analisados para 8 (oito) condições de ensaio. Os ensaios simulam condições sem dano e com dano na estrutura. Uma análise comparativa qualitativa e quantitativa é apresentada para concluir sobre a eficácia do coeficiente de Hurst como métrica de dano que permita afirmar sobre a condição de presença de dano.

O Capítulo 8 apresenta as considerações finais na forma de conclusões obtidas a partir da análise dos resultados fornecidos no Capítulo 6. Nesse capítulo são discutidas as vantagens e desvantagens do método de Hurst para detecção de dano em relação ao método das métricas de dano. Como fechamento desse trabalho de tese é apresentado uma sugestão de trabalhos futuros, para aprimorar o método de Hurst como ferramenta de monitoramento estrutural e detecção de danos a partir de assinaturas de impedância.

## 2.

# REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1. Pesquisa Científica sobre Monitoramento da Integridade Estrutural

O monitoramento da integridade estrutural SHM (do inglês, *Structural Health Monitoring*) consiste de processos de monitorar a condição de estruturas a fim de detectar a presença de dano ou condições anormais que possam afetar a sua integridade física e seu desempenho mecânico. Os conceitos relacionados ao monitoramento da integridade estrutural para detecção de dano, apresentados e discutidos no Capítulo 3 desse trabalho de tese, são amplamente explorado na literatura, com grandes contribuições científicas inseridas nos últimos anos. Dentro do SHM, algumas das técnicas de monitoramento relacionadas à vibração que são utilizadas: **emissão acústica** (*acoustic emission*), **ondas de Lamb** (Lamb waves), **fibras óticas** (*fiber optics*), **corrente parasita** (*eddy current*) e **impedância eletromecânica** (*eletromechanical impedance*) (CASTRO, BAPTISTA E CIAMPA, 2019). A Figura 2.1 ilustra a distribuição percentual estimada dos artigos científicos divididos por técnicas de monitoramento.

Dentre as aplicações de emissão acústica em SHM: Gagar, Martinez e Foote (2014) apresenta uma metodologia para aplicação da técnica de emissão de acústica; Asamene, Hudson e Sundaresan (2015) e Yu et al. (2016) apresentam estudos da técnica de emissão acústica em estruturas de fibra de carbono; Naderloo, Moosavi e Ahmadi (2019) apresenta a aplicação da técnica na detecção de dano em articulações frágeis.

Dentre as aplicações de ondas de Lamb em SHM: Carboni, Gianneo e Giglio (2015) e Zeng, Huang e Lin (2019) apresentam estudos da técnica de Lamb em materiais compósitos; Mishra *et al.* (2015) apresenta o estudo de ondas de Lamb para identificação em trincas.

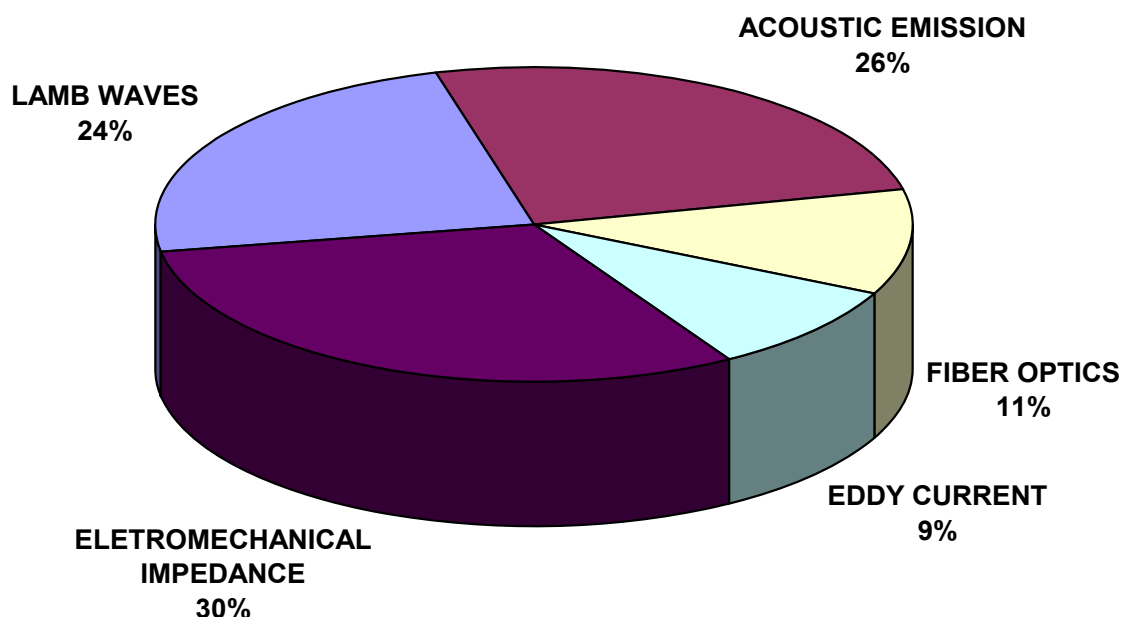


Figura 2.1 - Distribuição Percentual dos Trabalhos Relacionados à SHM  
(pesquisa do autor no Periódicos Capes)

Dentre as aplicações de fibras óticas em SHM: McKenzie *et al.* (2000) apresenta a aplicação da técnica em reparos por colagem; Antunes *et al.* (2012) apresenta estudo de monitoramento dinâmico de estruturas esbeltas; Guemes *et al.* (2018) apresenta a aplicação de sensores óticos em materiais compósitos.

Dentre as aplicações de corrente parasita em SHM: Amjadian e Agrawal (2017) apresenta a aplicação de *eddy current* na modelagem do amortecimento por fricção de estruturas; Wang e Yu (2018) apresenta a aplicação da técnica no diagnóstico de múltiplas trincas em estruturas metálicas; Janovec, Bugaj e Smetana (2019) apresenta estudos da técnica em inspeção em juntas rebitadas.

Nesse trabalho de tese a técnica de monitoramento empregada consiste no **método da impedância eletromecânica**. A pesquisa em todas as bases de dados acessíveis ao autor por artigos científicos contendo os termos *structural health monitoring*, *eletromechanical impedance* e *damage detection* forneceu como resultado 863 trabalhos científicos nos últimos 20 anos, conforme Figura 2.2. Nos últimos 10 anos verifica-se um crescimento exponencial dos trabalhos relacionados a monitoramento da integridade estrutural, impedância eletromecânica e dano.

Dentre as principais aplicações da técnica de impedância eletromecânica têm-se: **estruturas metálicas, estruturas de concreto; acoplamento adesivo, efeito da temperatura e redes neurais**. A Figura 2.3 fornece uma estimativa percentual das aplicações de impedância eletromecânica em SHM.

O desenvolvimento teórico que propôs o uso da impedância como técnica para monitoramento estrutural foi inicialmente proposto por Liang, Sun e Rogers (1994) e posteriormente ampliado por diversos autores: Chaudhry *et al.* (1995, 1996); Sun *et al.* (1995); Park *et al.* (1999); Soh *et al.* (2000); Park, Cudney e Inman (1999, 2000a, 2000b, 2001); Giurgiutiu e Zagari (2000, 2002); Giurgiutiu, Zagari e Bao (2002); Bhalla *et al.* (2002a, 2002b); Park *et al.* (2003), Giurgiutiu *et al.* (2003); Peairs (2006); Raghavan e Cesnik (2008); Liu e Paurobally (2009); Grisso e Inman (2010); Baptista, Vieira Filho e Inman (2010); Vieira Filho, Baptista e Inman (2011); Min *et al.* (2012); Selva *et al.* (2013); Ai *et al.* (2014); Malinowski *et al.* (2015); Dugnani *et al.* (2016); Silveira, Campeiro e Baptista (2017); Campeiro, Silveira e Baptista (2018); Thomas *et al.* (2019) e muitos outros pesquisadores.

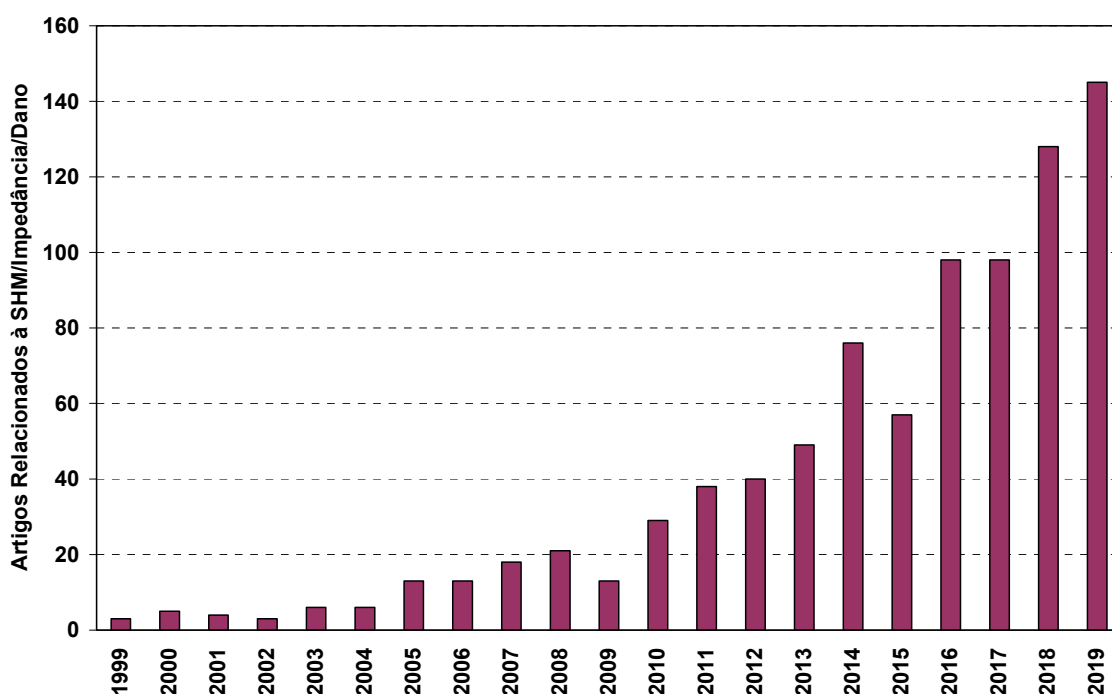


Figura 2.2 - Artigos Relacionados à Impedância Eletromecânica em SHM  
(pesquisa do autor no Periódicos Capes)

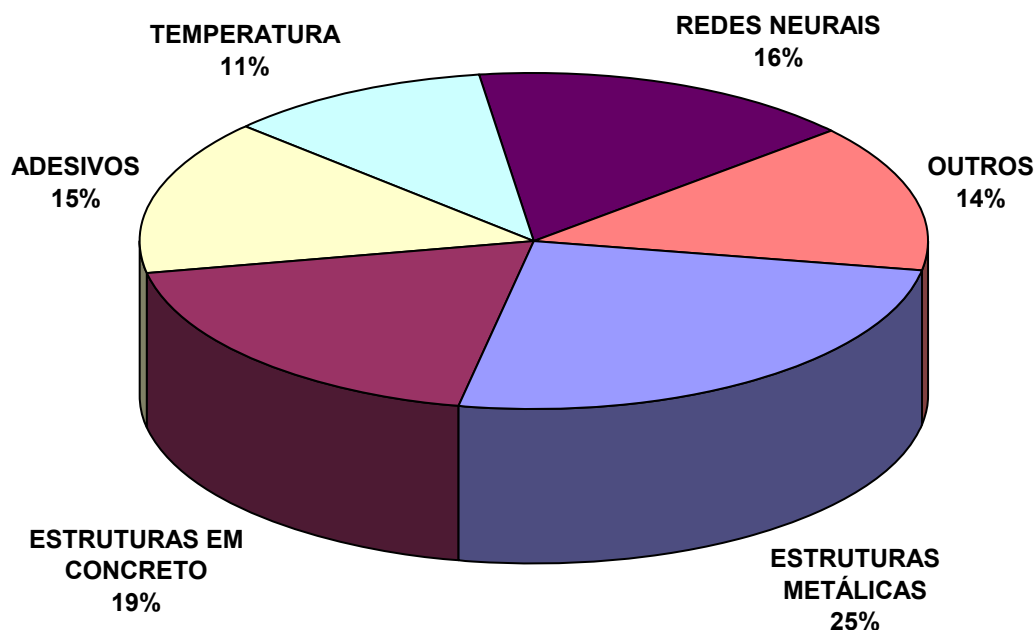


Figura 2.3 - Distribuição Percentual dos Trabalhos Relacionados à Impedância  
(pesquisa do autor no Periódicos Capes)

O grupo de pesquisa do LMEst/UFU desenvolve a alguns anos trabalhos e pesquisas relacionadas à técnica de monitoramento da integridade estrutural baseada no **método da impedância eletromecânica**. Dentre os artigos em periódicos, originados dos trabalhos em impedância no LMEst/UFU têm-se: Moura Jr e Steffen Jr. (2006); Finzi Neto *et al.* (2010); Martins *et al.* (2012); Palomino, Steffen Jr. e Finzi Neto (2014); Maruo *et al.* (2015); Cavalini Jr., Finzi Neto e Steffen Jr. (2015); Rabelo *et al.* (2017a, 2017b) e Menegaz *et al.* (2019).

## 2.2. Pesquisa Científica sobre Método Estatístico de Hurst

O método estatístico de Hurst é uma ferramenta estatística que quantifica a tendência de comportamento de um fenômeno, fornecendo como resultado um parâmetro estatístico adimensional denominado coeficiente ou expoente de Hurst. Esse parâmetro é referenciado na literatura como "índice de dependência de longo prazo" (*long-range dependence index*) pois quantifica a tendência relativa do valor da variável de interesse em aproximar ou afastar-se do valor médio no longo prazo.



Essa tendência da variável no longo prazo é chamado efeito de memória longa (*long-memory effect*) ou simplesmente efeito de Hurst (*Hurst effect*). Esse método estatístico foi desenvolvido na década de 1950 pelo hidrólogo e pesquisador inglês **Harold Edwin Hurst** para dimensionamento de barragens de irrigação no Rio Nilo, no Egito (HURST, 1951, apud MANSUKHANI, 2012). O efeito de memória longa desempenha um papel importante para o conhecimento pois permite analisar o comportamento atual para garantir previsibilidade no comportamento futuro de fenômenos de interesse (GRAVES *et al.*, 2016).

Ao longo das últimas décadas diversas aplicações do método estatístico de Hurst foram apresentadas e discutidas na literatura. A Figura 2.4 apresenta o resultado de pesquisas relacionadas ao método de Hurst, a partir referências cruzadas de títulos e palavras-chave, em artigos científicos de periódicos nos últimos 20 anos. Analisando o resultado da pesquisa pode-se verificar o crescimento anual das publicações relacionadas ao Hurst. Dentre as principais áreas do conhecimento na qual o método de Hurst está inserido têm-se: **mercado financeiro, matemática aplicada, medicina, climatologia e ecologia, química, computação e materiais**. A Figura 2.5 apresenta a distribuição percentual estimada dos trabalhos relacionados ao Hurst divididos nas principais áreas do conhecimento.

A pesquisa em todas as bases de dados acessíveis ao autor demonstra que nenhuma informação correlacionando o coeficiente de Hurst com o método da impedância eletromecânica é apresentada na literatura.

Dentre alguns dos trabalhos relacionados ao Hurst na área de mercado financeiro: Couillard e Davison (2005), Matos *et al.* (2008) e Tzouras e McCoy (2015) apresentam modelagens de séries financeiras utilizando o Hurst; Garnier e Solna (2019), Yonghong, He e Wihua (2018), Al-Yahyaee, Mensi e Yoon (2018) apresentam estudos relacionados à moeda eletrônica *bitcoin*; Alvarez-Ramirez *et al.* (2008) apresenta análises do mercado de ações norte-americano; Sanchez-Granero *et al.* (2020) apresenta estudos do mercado de ações em países da América Latina; Fernandes *et al.* (2020) apresenta análises do índice de inflação no Brasil; Wang (2018) apresenta estudos envolvendo mercados de ações, títulos e fundos na China.; Sensoy (2013) estuda mercados financeiros do Oriente Médio com o Hurst.

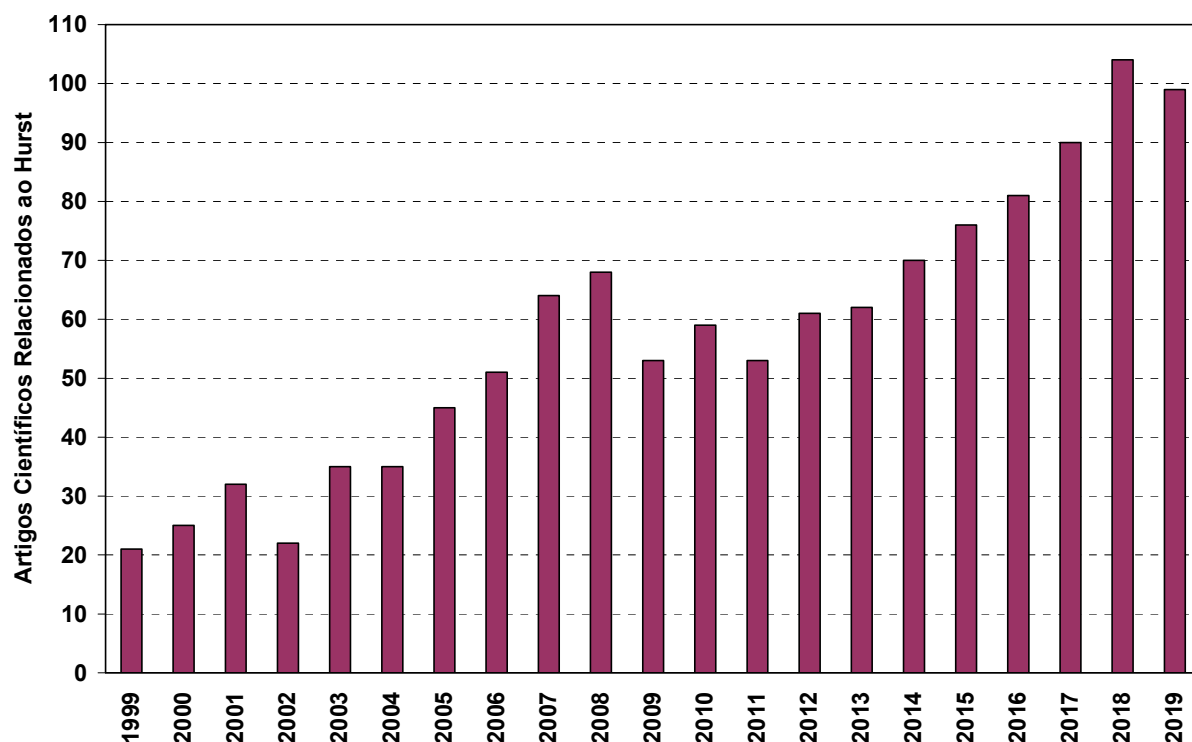


Figura 2.4 - Artigos Relacionados ao Método Estatístico de Hurst  
(pesquisa do autor no Periódicos Capes)

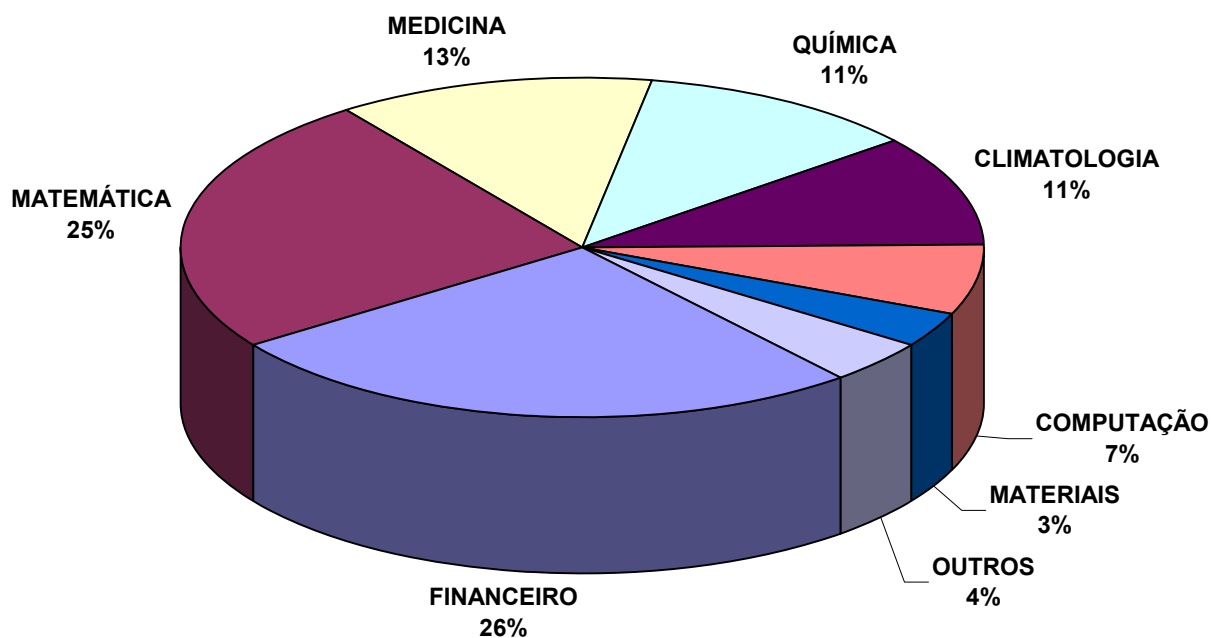


Figura 2.5 - Distribuição Percentual dos Trabalhos Relacionados ao Hurst  
(pesquisa do autor no Periódicos Capes)

Na área de matemática aplicada: McCauley, Gunaratne e Bassler (2007) e Chigansky, Kleptsyna e Marushkevych (2020) introduzem o Hurst na análise de movimentos brownianos; Fan, Liu e Wang (2019) apresenta a análise de séries temporais a partir da escala multifractal e a correlação com o expoente de Hurst.

Na área de medicina: Lai (2004) apresenta o Hurst para monitoramento de ensaios clínicos; Navarro *et al.* (2013) analisa a emissão acústica da respiração de crianças prematuras; Tylová *et al.* (2018) apresentam o Hurst no diagnóstico da doença de Alzheimer; Tsang, Lukac e Martin (2019) utilizam o Hurst para analisar a deflexão de articulações durante caminhadas.

Na área de química: Yadav *et al.* (2019) apresenta a caracterização de flocos de cobre e hidróxido de estrôncio como filmes finos em elementos supercapacitivos; Yadav *et al.* (2017) apresenta a correlação do expoente de Hurst com o ângulo de deposição de óxido de zinco em superfícies finas. Pandey *et al.* (2019) apresenta o estudo morfológico da aplicação de fluoreto de bário em superfícies finas.

Na área de climatologia e ecologia: Chaves e Lorena (2019) apresenta estudos do reservatório de Descoberto no Brasil; Wang *et al.* (2011) estuda a concentração populacional de roedores na China; Silva *et al.* (2019) apresenta a análise da temperatura ambiente no Brasil; Stan *et al.* (2020) apresenta investigação sobre poluentes atmosféricos envolvendo o Hurst.

Na área de computação: Stoev *et al.* (2005) apresenta o expoente de Hurst na análise do tráfego de dados na internet; Tian (2020) apresenta a caracterização e previsão do tráfego de dados em redes de dados; Hott *et al.* (2015) apresenta a estimativa do expoente de Hurst em imagens de sensoriamento de pastagens.

Na área de materiais e estruturas: Soares *et al.* (2013) apresenta a aplicação do expoente de Hurst na detecção de anormalidades no movimento de estruturas metálicas a partir de interferência laser. Laudani e Ostojia (2020) apresenta análises de fratura em vigas utilizando o Hurst e fractais.

Dentre outras áreas com referências ao método de Hurst têm-se: Liu e Zhang (2019) analisam o tráfego aéreo de decolagens em um aeroporto da China e Kononovicius (2019) utiliza o Hurst para analisar o desempenho de arremessos de bola na liga nacional de basquete norte-americana nas décadas de 1990 a 2010.

### 3.

## MÉTODO DA IMPEDÂNCIA ELETROMECAÂNICA

### 3.1. Monitoramento da Integridade Estrutural

O monitoramento da integridade estrutural SHM (do inglês, *Structural Health Monitoring*) consiste de processos de monitorar a condição de estrutura a fim de detectar a presença de dano ou condições anormais que possam afetar a integridade física e o desempenho mecânico. Os danos que podem ocorrer em uma estrutura são de diversos tipos (como fissuras, trincas, descolamentos, entre outros) e podem ter origem nas mais variadas condições de operação a qual a estrutura está sujeita, em especial às condições ambientais.

Para monitorar a integridade estrutural são empregados dispositivos e materiais especiais que são utilizados como sensores e/ou atuadores, os quais podem ser facilmente incorporados à estrutura de interesse. As estruturas que contém esses “materiais inteligentes” para monitorar a condição são denominadas “estruturas inteligentes” e vêm ganhando reconhecidas aplicações nas mais diversas áreas da indústria atuadores (BANKS; SMITH; WANG, 1996).

Em um contexto mais simples, a estrutura inteligente agrega componentes que tem a habilidade de sentir e fornecer informações sobre o estado da estrutura. Em um contexto mais complexo, por meio do monitoramento dos parâmetros operacionais (como pressão, temperatura, carregamento, entre outros) a estrutura e os componentes possuem a habilidade de diagnosticar a natureza e dimensão do problema para provocar alguma ação de controle. Em casos especiais, as informações de monitoramento podem ser utilizadas para aprendizado do sistema e, no longo prazo, para que o sistema tenha capacidade de agir em situações semelhantes no futuro (RABELO, 2014).

Os sensores podem ser colados na superfície ou inseridos no interior da estrutura e devem ser escolhidos de tal forma que não afetem significativamente o comportamento dinâmico do sistema. Assim como os sensores, os atuadores devem ter o menor peso possível, desprezível em relação ao peso da estrutura, devem ter efeito mínimo sobre o comportamento dinâmico do sistema e devem apresentar respostas dinâmicas rápidas. Para aplicações em condições reais, os sensores e atuadores devem ser capazes de operar em condições ambientais extremas. Uma característica desejável é que os sensores e atuadores sejam flexíveis, permitindo serem empregados em uma variedade de locais, inclusive contemplando curvaturas (MOURA JR., 2008).

Dentre os materiais empregados nas estruturas inteligentes, os comumente utilizados são as cerâmicas piezelétricas, os eletroestrutivos e magnetoestrutivos, os fluidos e sólidos eletroreológicos e magnetoreológicos, as ligas com memória de forma e as fibras óticas. A inserção destes materiais nas estruturas inteligentes está sob intensa investigação e com várias perspectivas possíveis (MOURA JR., 2008).

Nesse trabalho a técnica de monitoramento da integridade estrutural é baseada no método da impedância eletromecânica. Essa técnica utiliza transdutores piezoelétricos integrados à estrutura, colados através de uma resina a base de epóxi. Os transdutores agem como sensores e atuadores simultaneamente. Na ação atuador os transdutores recebem uma tensão elétrica e deformam-se, produzindo uma força que excita a estrutura a ser monitorada. A estrutura por sua vez deforma-se, fazendo com que o transdutor na ação sensor gere uma corrente elétrica a partir da deformação mecânica induzida pela estrutura. A impedância elétrica do transdutor é medida como sendo a razão entre a tensão de excitação e a corrente de saída no transdutor. O princípio de detecção de falhas através do método da impedância está associada ao fato que qualquer alteração na impedância mecânica da estrutura irá resultar em uma mudança na impedância elétrica do transdutor (RABELO, 2017).

Nas próximas seções desse trabalho serão explorados os conceitos de impedância eletromecânica, os tipos e características de materiais piezoelétricos e as formulações matemáticas relacionadas às assinaturas de impedância.

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

#### 3.2.1. Impedância Mecânica

A impedância mecânica de um componente expressa a resistência ao movimento desse componente quando se aplica uma força sobre ele. A impedância mecânica corresponde à razão entre a força aplicada de forma alternada e a velocidade linear resultante, conforme Eq. (3.1):

$$Z_M(\omega) = \frac{F(\omega)}{v(\omega)} \quad (3.1)$$

onde: " $Z_M(\omega)$ " é a impedância mecânica; " $F(\omega)$ " é a força alternada; " $v(\omega)$ " é a velocidade resultante e " $\omega$ " é a frequência angular. No SI a impedância mecânica é expressa pela unidade Ohms [ $\Omega$ ].

Conforme a equação anterior, a impedância mecânica de um componente varia em função da frequência. Nas frequências de ressonância a impedância é baixa, o que significa que menos força é necessária para movimentar o componente em uma dada velocidade. Nos sistemas mecânicos três grandezas físicas estão relacionadas à impedância mecânica (PALOMINO, 2008):

- **Amortecimento Mecânico ( $R_m$ )**: está associado à parte real da impedância, sendo responsável por dissipar toda a potência mecânica entregue ao sistema. Um componente mecânico se comporta como uma resistência mecânica quando, ao ser acionado por uma força, resulta em uma velocidade diretamente proporcional à força aplicada. No Sistema Internacional de Unidades (SI) o amortecimento mecânico é expresso por [N.s/m].

- **Massa Mecânica ( $M_m$ )**: está associada à parte imaginária positiva da impedância complexa. Um componente mecânico se comporta como uma massa mecânica quando, ao ser acionado por uma força, resulta em uma aceleração diretamente proporcional à força aplicada. No SI a massa é expressa por [kg].

• **Flexibilidade Mecânica ( $C_m$ )**: está associada à parte imaginária negativa da impedância complexa. Um componente mecânico se comporta como uma flexibilidade mecânica quando, ao ser acionado por uma força, se desloca proporcionalmente à força. Em muitos casos, a flexibilidade é representada pelo seu inverso: a rigidez. Dessa forma, rigidez corresponde ao inverso da flexibilidade mecânica. No SI a rigidez é expressa por [N/m].

### 3.2.2. Impedância Elétrica

A impedância elétrica de um circuito ou componente eletrônico expressa a oposição que estes oferecem à passagem de corrente alternada. A impedância elétrica corresponde à razão entre a tensão elétrica e a corrente elétrica aplicada de forma alternada, conforme Eq. (3.2):

$$Z_E(\omega) = \frac{V_i(\omega)}{I_0(\omega)} \quad (3.2)$$

onde: " $Z_E(\omega)$ " é a impedância elétrica; " $V_i(\omega)$ " é a tensão elétrica; " $I_0(\omega)$ " é a corrente alternada e " $\omega$ " é a frequência angular. No SI a impedância elétrica é expressa pela unidade Ohms [ $\Omega$ ].

A impedância elétrica é uma grandeza complexa, dividida em duas partes: a resistência (parte real) e a reatância (parte imaginária). A resistência nos circuitos de corrente alternada se comporta de maneira similar à verificada nos circuitos de corrente contínua, sendo expressa como um valor positivo. Já a reatância pode ser indutiva, ou seja, é dada por um valor não-negativo, ou capacitiva, representada por um valor não-positivo (GIBILISCO, 2002).

A resistência é uma grandeza escalar, ou seja, é representada em uma escala unidimensional. Assim, para um circuito de corrente contínua, a corrente diminui conforme a resistência aumenta, obedecendo à conhecida Lei de Ohm. O mesmo comportamento é observado num circuito de corrente alternada (GIBILISCO, 2002).

### 3.3. Materiais Piezoelétricos

Os materiais que apresentam a característica de mudar suas dimensões a partir da aplicação de uma tensão elétrica são denominados materiais piezoelétricos. Esses materiais possuem também a característica de mudar suas propriedades elétricas a partir de uma deformação mecânica. Os materiais piezoelétricos podem ser utilizados como sensores e atuadores: na primeira característica os materiais geram corrente elétrica (efeito direto) e na segunda os materiais geram deformação mecânica (efeito inverso) (BANKS; SMITH; WANG, 1996).

Os materiais piezoelétricos são obtidos através de polarização do material base e possuem uma temperatura limite de polarização, denominada temperatura de Curie. Dessa forma, a temperatura de trabalho deve ser inferior a temperatura de Curie (BANKS; SMITH; WANG, 1996). O material piezoelétrico mais conhecido é o “Titanato Zirconato de Chumbo” PZT (sigla do inglês, Lead Zirconate Titanate). O PZT é comumente apresentado na forma de transdutores de pastilhas cerâmicas, as quais possuem temperatura de Curie acima de 300°C. Dentre os principais tipos de materiais piezoelétricos utilizados têm-se:

- **Cerâmicas Piezoelétricas**: os materiais cerâmicos piezoelétricos como o PZT possuem rigidez superior ao da estrutura na qual ele estão inserido, resultando numa conversão eletromecânica de grande eficiência, tornando-os eficientes em aplicações como atuadores (BANKS; SMITH; WANG, 1996). A aplicação desse tipo de material piezoelétrico em controle e detecção de falhas é muito explorada por serem efetivos em grandes faixas de frequências.

- **Polímeros Piezoelétricos**: os materiais polímeros cerâmicos, como o Fluoreto de Polivinilideno PVDF (do inglês, *Polyvinylidene Difluoride*) possuem menor rigidez em relação à estrutura na qual estão inserido, não sendo utilizados como atuadores. Entretanto, possuem elevado potencial dielétrico e podem ser expostos a campos elétricos elevados. expostos a muito maiores (BANKS; SMITH; WANG, 1996). Esses materiais são comumente utilizados somente como sensores e possuem custo bem inferior ao do observado nas pastilhas de PZT (RABELO, 2014).



- **Compostos de Fibras**: os materiais compostos de fibras MFC (do inglês, Macro-Fiber Composite) correspondem a fibras finas de PZT prensadas entre camadas de adesivo e filme de poliamida. O design do MFC incorpora fibras de fácil manuseio em um processo de fabricação simples. Em relação aos PZT tradicionais, os MFC oferecem maior flexibilidade e durabilidade (NASA, 2007).

As principais vantagens dos materiais piezoelétricos são: insensibilidade a temperaturas (até a temperatura de Curie), respostas lineares em baixos níveis de excitação, baixo peso e boa resposta dinâmica em grandes faixas de frequência. As principais desvantagens dos materiais piezoelétricos são: histerese em campos elétricos elevados, dificuldade de fabricação dos PZT devido às características de material cerâmico, baixo acoplamento eletromecânico para os PVDF e decréscimo das características de polarização dos elementos piezoelétricos ao longo do tempo (BANKS; SMITH; WANG, 1996).

### **3.4. Monitoramento Estrutural Baseado na Impedância Eletromecânica**

A técnica de monitoramento de integridade estrutural baseada na impedância eletromecânica vem sendo aprimorada ao longo dos anos como uma ferramenta para identificação de danos e falhas estruturais em tempo real. Essa técnica é considerada como um método de avaliação não-destrutivo. Como apresentado, a técnica utiliza transdutores piezoelétricos para captar alterações em propriedades da estrutura (rigidez e amortecimento). Essa técnica se beneficia de ambos os efeitos piezoelétricos, direto e inverso (sensor e atuador) para obter os valores de impedância em função da frequência de excitação do transdutor. Quando a pastilha de PZT é excitada por uma corrente elétrica alternada com frequência, uma pequena deformação é produzida na pastilha e na estrutura monitorada. A resposta desta região às vibrações mecânicas de alta frequência é transferida de volta à pastilha de PZT na forma de uma resposta elétrica. Quando um dano gera uma mudança na resposta dinâmica isto se manifesta na resposta elétrica do PZT. De modo geral, o tamanho do dano detectável é inversamente proporcional à frequência.

O modelo eletromecânico do método de impedância considerando o sistema com 1 (um) grau de liberdade é mostrado na Figura 3.1. As pastilhas cerâmicas circulares de PZT usualmente utilizadas são de dimensões 20x0,1mm e 25x0,1mm e são coladas na estrutura através de adesivos de alta rigidez, como colas instantâneas a base de cianoacrilato ou resina de epóxi. O PZT colado à estrutura (ou incorporado a ela) é considerado como uma barra fina em vibração axial devido a tensão elétrica alternada aplicada. Uma das extremidade da barra é considerada fixa enquanto a outra extremidade é conectada à estrutura. Esta suposição a respeito da interação em dois pontos discretos é consistente com o mecanismo de transmissão de força do transdutor de PZT colado à estrutura (RABELO, 2017).

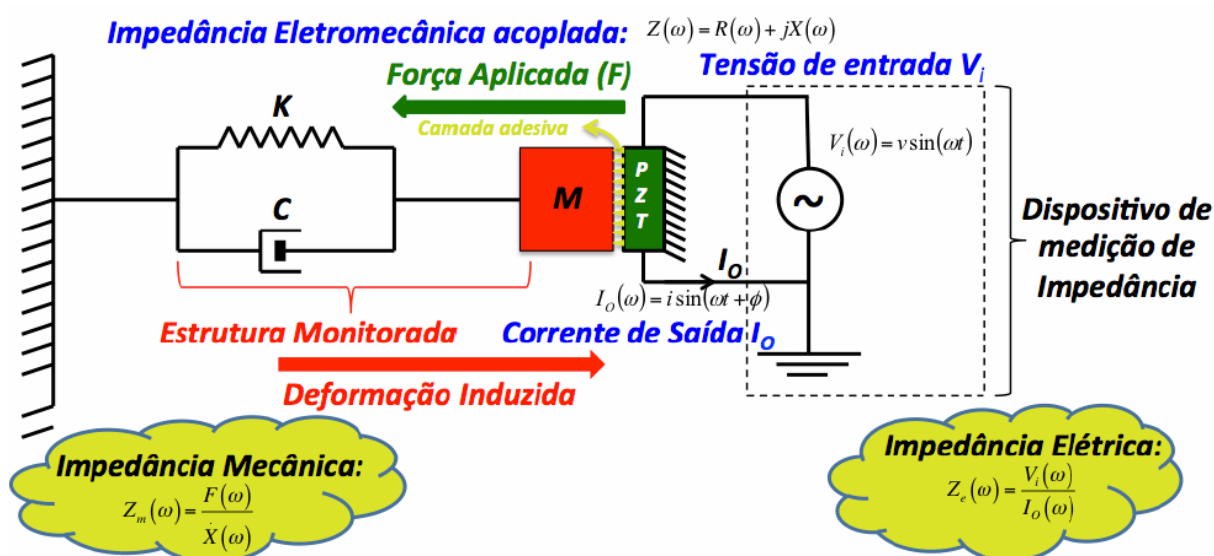


Figura 3.1 - Modelo Eletromecânico do Método de Impedância

(fonte: RABELO, 2017)

Na Figura 3.1 as propriedades dinâmicas da estrutura monitorada são a massa ( $M$ ), a rigidez ( $K$ ) e o coeficiente de amortecimento ( $C$ ). O transdutor é excitado por uma tensão elétrica senoidal  $V_i(\omega)$  com frequência angular  $\omega$ . Pelo efeito atuador o transdutor aplica uma força à estrutura que em resposta, sofre uma deformação. Pelo efeito sensor, esta deformação produz uma corrente de saída  $I_o(\omega)$  com amplitude  $i$  e fase  $\phi$ .

Considerando-se que as propriedades do transdutor PZT não variem no tempo, qualquer mudança na estrutura irá afetar o valor da impedância. A impedância mecânica da estrutura é obtida através da razão entre a força aplicada na estrutura  $F(\omega)$  e a velocidade  $\dot{X}(\omega)$  com que a estrutura se desloca. Adicionalmente, considerando que as propriedades invariantes do PZT, pode-se demonstrar que a admitância do sistema é uma função combinada da impedância mecânica do PZT  $Z_a(\omega)$  e da impedância mecânica da estrutura  $Z_s(\omega)$ , conforme apresentado em Liang, Sun e Rogers (1994). A impedância elétrica acoplada do PZT é descrita pela seguinte equação:

$$Z_E(\omega) = \frac{V_i(\omega)}{I_0(\omega)} = \frac{h_a}{j \omega w_a l_a} \left[ \varepsilon_{33}^{-T} (1 - j \delta) - \frac{Z_s(\omega)}{Z_s(\omega) + Z_a(\omega)} d_{3x}^2 \bar{Y}_{22}^E (1 + j \eta) \right]^{-1} \quad (3.3)$$

onde: " $V_i(\omega)$ " é a tensão elétrica de entrada no PZT; " $I_0(\omega)$ " é a corrente elétrica de saída do PZT; " $Z_s(\omega)$ " é a impedância mecânica da estrutura; " $Z_a(\omega)$ " é a impedância mecânica do PZT; " $h_a$ " é a espessura do PZT; " $w_a$ " é largura do PZT; " $l_a$ " é o comprimento do PZT; " $\bar{Y}_{22}^E$ " é o módulo de Young do PZT em campo elétrico nulo; " $d_{3x}$ " é a constante de acoplamento piezoelétrico; " $\varepsilon_{33}^{-T}$ " é a constante dielétrica do PZT com tensão mecânica nula; " $\delta$ " é o fator de perda elétrica do PZT; " $\eta$ " é o fator de perda mecânica do PZT e " $j$ " é a unidade imaginária.

Analisando a equação verifica-se que a impedância elétrica do PZT está associada à impedância mecânica da estrutura. Como na presença de danos ocorrem mudanças na impedância mecânica da estrutura, pode-se utilizar os sinais de impedância elétrica do PZT para o monitoramento da integridade estrutural.

Como a impedância elétrica do PZT é função da frequência é necessário a utilização de um equipamento apropriado para gerar os sinais de frequência e adquirir o sinal de resposta da impedância. Esse equipamento é denominado "analisador de impedância" ou "impedancímetro".

A resposta de impedância obtida para uma dada faixa de frequência é chamada da "assinatura de impedância", conforme representada na Figura 3.2. As assinaturas de impedância representam no eixo das abscissas a frequência de excitação do PZT e no eixo das ordenadas o valor real da impedância resistiva.

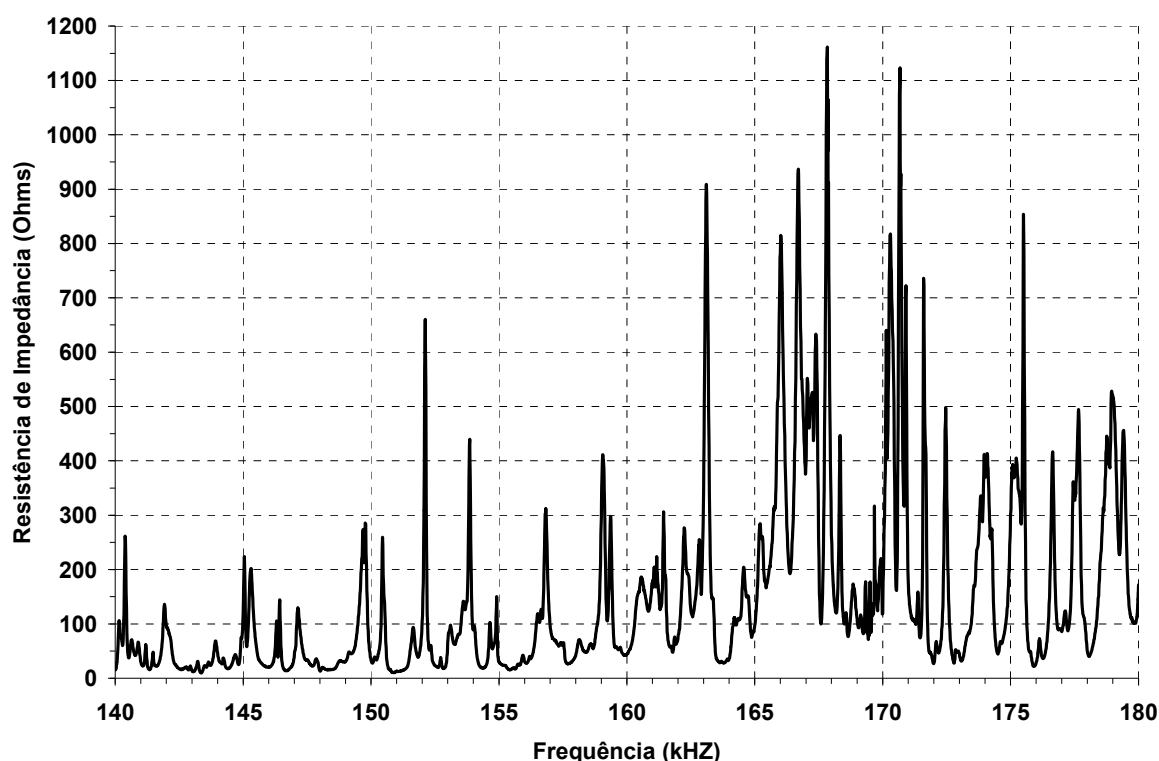


Figura 3.2 - Representação de Assinatura de Impedância

Nesse trabalho de tese as análises referentes ao coeficiente de Hurst e as métricas de dano serão baseadas somente nessas assinaturas de impedância.

### 3.4.1. Região de Monitoramento e Faixas de Frequência

A sensibilidade da técnica de impedância em detectar danos estruturais está relacionada com a faixa de frequência selecionada para análise. Em geral, um dano muito pequeno na estrutura não provoca mudanças significativas de rigidez, massa e amortecimento da estrutura, sendo necessário um comprimento de onda de excitação suficientemente pequeno para permitir a detecção do dano.

A seleção da faixa de frequência a ser utilizada nas assinaturas de impedância depende de como a estrutura responde à excitação. No método da impedância eletromecânica a faixa de frequência ampla comumente varia de 20kHz a 250kHz. No entanto, a faixa de frequência mais adequada dentro desse amplo intervalo é geralmente determinada por um método empírico, onde várias faixas de frequência candidatas são analisadas.

As características desejáveis para uma faixa de frequência de análise são: grande densidade de picos, picos de impedância com grande amplitude, grande repetibilidade em medições sequenciais sem dano e alta sensibilidade ao dano (quando conhecida a presença do dano).

Para detecção de danos incipientes, como pequenas trincas ou pequenas deformações, altas frequências em faixas menores são usualmente utilizadas (SUN *et al.*, 1995). As vantagens da utilização de altas frequências são: minimização dos efeitos de condições de contorno e comprimento de onda de excitação suficiente para detecção de pequenos danos (PARK; INMAN, 2005).

No trabalho de Moura Jr. e Steffen Jr. (2006) é apresentado um procedimento para obtenção das melhores configurações para ensaios de impedância e nesse trabalho é estabelecido um critério de presença de 20 a 30 picos em uma faixa de frequência para essa ser considerada adequada, pois esse número de picos implica numa resposta dinâmica mais rica na respectiva faixa de frequência.

A Figura 3.3 ilustra uma assinatura de impedância obtida em uma ampla faixa de frequência de 20 a 180kHz para uma viga de alumínio. Nessa assinatura é possível detectar a presença de faixas de frequência que contém grande densidade de picos: 20 a 80kHz e 80 a 140kHz. Na região de frequência acima de 140kHz verifica-se uma redução na quantidade de picos, além de uma redução significativa na amplitude dos picos.

Para monitoramento da integridade estrutural e possível detecção de danos a faixa de frequência de 80 a 140 kHz se mostra uma boa escolha pois considera a utilização de altos valores de frequência (maiores do que na faixa de 20 a 80kHz, a qual também apresenta grande densidade de picos), mas não tão altos a ponto de haver redução na amplitude dos picos de impedância.

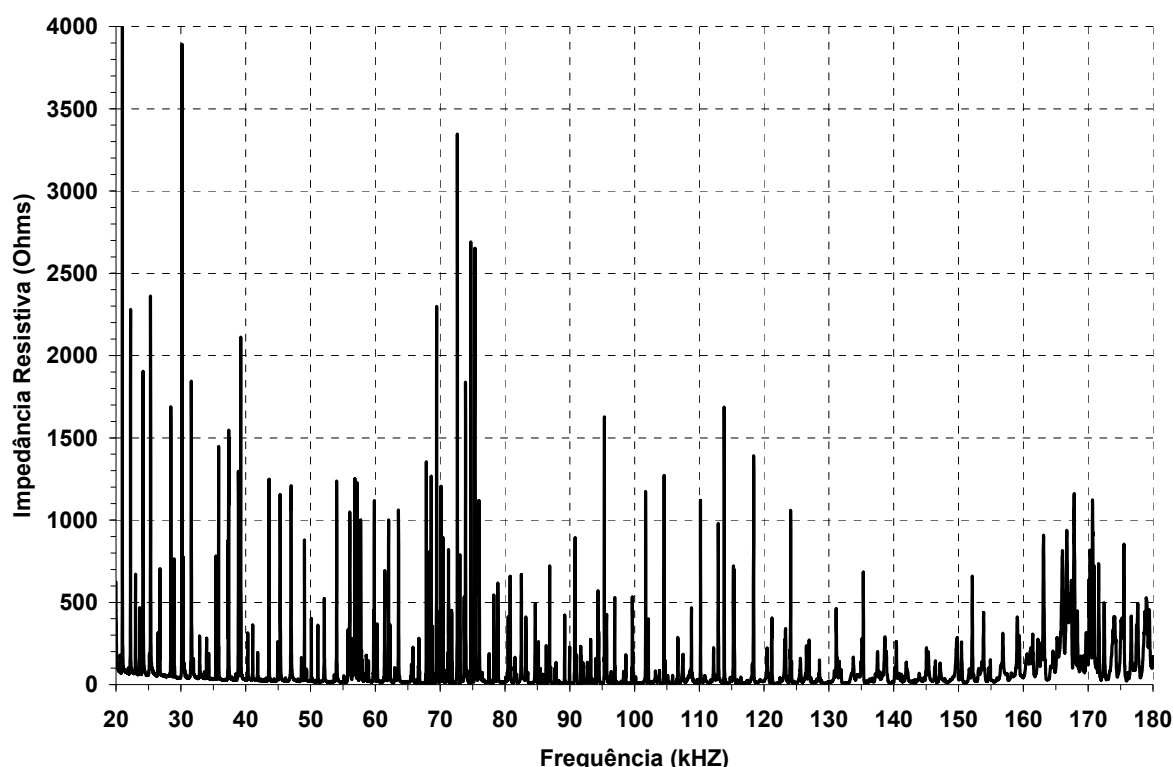


Figura 3.3 - Assinatura de Impedância em Ampla Faixa de Frequência

### 3.4.2. Técnica de Aquisição de Impedância

A método de obtenção das assinatura de impedância consiste na aquisição de valores de impedância resistiva em função da frequência de excitação da estrutura, através de um transdutor piezoelétrico, utilizando o equipamento analisador de impedância. Para permitir a obtenção das assinaturas de impedância de forma adequada o analisador de impedância deve ser configurado respeitando os seguintes parâmetros de medição (RABELO, 2014):

- **Frequências Inicial e Final da Assinatura**: valores de frequência que delimitam o início e o final da faixa de frequência monitorada. A diferença entre o valor final e inicial é denominada **largura da faixa de frequência** ou **largura da banda de frequência BW** (do inglês, Bandwidth). Os valores de frequência e banda de frequência comumente são expresso em [kHz]. Por exemplo, uma assinatura na faixa de frequência de 100 a 140kHz possui largura da banda igual a 40kHz.

- **Número de Pontos da Assinatura**: quantidade de pontos de medição da assinatura dentro da faixa de frequência.

- **Resolução em Frequência da Assinatura**: corresponde à razão entre a largura da banda de frequência e o número de pontos da assinatura, expresso em [kHz/ponto]. Em termos práticos, a resolução em frequência define o espaçamento em frequência entre dois pontos. Por exemplo, uma assinatura com largura da banda de frequência de 40kHz obtida com 4000 pontos possui resolução em frequência igual a 10Hz por ponto.

- **Número de Médias por Ponto**: corresponde ao número de pontos que são adquiridos em cada ponto de medição para fins de obtenção de um valor médio que caracterize esse ponto de medição. O uso de um valor médio para o ponto de medição visa reduzir ruídos de medição. Por exemplo, um valor de médias igual a 128 significa que são realizadas 128 aquisições em um ponto de medição para caracterizar esse ponto de medição através do valor médio.

### 3.5. Métricas de Dano para o Método da Impedância Eletromecânica

As assinaturas de impedância fornecem uma abordagem qualitativa para a análise do comportamento da resistência de impedância na faixa de frequência em análise. A comparação entre várias assinaturas de impedância de forma qualitativa, na tentativa de identificação de picos e vales ao longo da faixa de frequência pode levar a má interpretação da presença ou não de dano na estrutura. Para quantificar a diferença de comportamento entre duas ou mais assinaturas de impedância entre si são utilizadas as "métricas de dano" ou "índices de dano" (TSENG; NAIDU, 2002).

As métricas de dano correspondem à equações estatísticas que fornecem como resultado um valor numérico que representa a diferença de comportamento entre as assinaturas. Para utilização das métricas de dano uma ou mais assinaturas de impedância devem ser obtidas antes que a estrutura apresente qualquer tipo de dano. A assinatura obtida para a estrutura sem dano é chamada "*baseline*" e essa assinatura é utilizada como referência para o cálculo das métricas de dano.

A obtenção de várias assinaturas *baseline* pode ser utilizada para caracterizar uma assinatura "*baseline média*". Ao longo do tempo, as assinaturas de obtidas pelo sensor são comparadas à assinatura *baseline* para determinar uma possível alteração na estrutura na vizinhança do sensor. Desta forma, a partir de um limiar de dano previamente definido, pode-se afirmar sobre a presença do dano.

No trabalho de Palomino (2008) são apresentadas e discutidas várias métricas de dano aplicadas ao método da impedância. No presente trabalho são utilizadas as métricas de dano denominadas RMSD (RMSD original e suas variantes), a métrica de dano CCD, a métrica de dano ASD, a métrica de dano MAPD e a métrica de dano SSD.

A métrica de dano RMSD (do inglês, *Root-Mean-Square Deviation*) para duas assinaturas de impedância corresponde à raiz quadrada do desvio quadrático médio entre os respectivos pontos das assinaturas, conforme Eq. (3.4):

$$RMSD = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (I_{1,i} - I_{2,i})^2} \quad (3.4)$$

onde " $I_{1,i}$ " é a parte real da resistência de impedância na frequência " $i$ " na assinatura *baseline*; " $I_{2,i}$ " é a parte real da resistência de impedância na frequência " $i$ " na nova assinatura da estrutura; " $n$ " é o número de pontos em frequência nas assinaturas.

As métricas de dano variantes da métrica RMSD original são denotadas por RMSD1 a RMSD5. Essas novas métricas de dano correspondem a modificações algébricas na equação original, as quais apresentadas a seguir:

$$RMSD1 = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left( \frac{(I_{1,i} - I_{2,i})^2}{I_{1,i}^2} \right)} \quad (3.5)$$

$$RMSD2 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (I_{1,i} - I_{2,i})^2}{\sum_{i=1}^n I_{1,i}^2}} \quad (3.6)$$



$$RMSD3 = \sum_{i=1}^n \sqrt{\frac{(I_{1,i} - I_{2,i})^2}{I_{1,i}^2}} \quad (3.7)$$

$$RMSD4 = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left( \frac{((I_{1,i} - \bar{I}_1) - (I_{2,i} - \bar{I}_2))^2}{n} \right)} \quad (3.8)$$

$$RMSD5 = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \frac{(I_{1,i} - I_{2,i})^2}{s_1} \right)} \quad (3.9)$$

onde " $\bar{I}_1$ " é o valor médio amostral da resistência de impedância na assinatura *baseline*, " $\bar{I}_2$ " é o valor médio amostral da resistência de impedância na nova assinatura e " $s_1$ " é o desvio-padrão amostral na assinatura *baseline*.

A métrica de dano CCD (do inglês, *Correlation Coefficient Deviation*) para duas assinaturas corresponde à diferença entre a unidade e o coeficiente de correlação CC (do inglês, *Correlation Coefficient*), conforme Eqs. (3.10) e (3.11):

$$CCD = 1 - CC \quad (3.10)$$

$$CC = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(I_{1,i} - \bar{I}_1)(I_{2,i} - \bar{I}_2)}{s_1 s_2} \quad (3.11)$$

onde " $s_1$ " é o desvio-padrão amostral da resistência de impedância na assinatura *baseline*, " $s_2$ " é o desvio-padrão amostral na nova assinatura da estrutura e " $n$ " é o número de pontos em frequência nas assinaturas.

O coeficiente de correlação é normalizado entre zero e a unidade. A interpretação do coeficiente igual a unidade é a completa correlação entre as assinaturas analisadas. Na medida em que o coeficiente se aproxima à zero, maior a diferença entre as assinaturas analisadas. Sendo o coeficiente de correlação (CC) igual a unidade, o desvio do coeficiente de correlação (CCD) será nulo.

A métrica de dano ASD (do inglês, *Absolute Sum Deviation*) para duas assinaturas corresponde à Eq. (3.12):

$$ASD = \sum_{i=1}^n \left( (I_{1,i} - I_{2,i}) - (\bar{I}_1 - \bar{I}_2) \right)^2 \quad (3.12)$$

A métrica de dano MAPD (do inglês, *Mean Absolute Percentual Deviation*) para duas assinaturas corresponde à Eq. (3.13):

$$MAPD = \sum_{i=1}^n \left| \sqrt{\frac{(I_{1,i} - I_{2,i})}{I_{1,i}}} \right| \quad (3.13)$$

A métrica de dano M ou SSD (do inglês, *Sum Square Deviation*) para duas assinaturas corresponde à Eq. (3.14):

$$SSD = \sum_{i=1}^n (I_{1,i} - I_{2,i})^2 \quad (3.14)$$

### 3.6. Inferência Estatística no Método da Impedância Eletromecânica

Para a caracterização dos valores e incertezas das métricas de dano e dos coeficientes de Hurst (objetos de estudo desse trabalho de tese) utilizou-se a técnica de inferência estatística baseada em frequência amostral através de intervalos de confiança para estimar os valores médios e os desvios-padrão dos valores médios.

Os intervalos de confiança são utilizados para estimar parâmetros populacionais de variáveis aleatórias (média e desvio-padrão da população) a partir do valor médio e do desvio-padrão de um conjunto de dados com tamanho significativamente menor do que a população, denominado conjunto amostral (BUSSAB; MORETTIN, 2017). Devido a limitação técnica para realização dos experimentos propostos nesse trabalho, um tamanho amostral reduzido, mas suficientemente adequado foi selecionado para permitir estimar intervalos de confiança com nível de confiança de 95%.

### 3.6.1. Distribuição Populacional das Métricas de Dano

Considerando que a distribuição dos valores do coeficiente de Hurst e das métricas de dano, obtidas através das assinaturas de impedância, são desconhecidas (não sendo necessariamente uma distribuição normal) foi escolhida a distribuição dos valores médios como parâmetro estimador para estimar os intervalos de confiança dos valores médios e dos desvios-padrão. Dessa forma, as incertezas associadas ao coeficiente de Hurst e as métricas de dano correspondem às incertezas estimadas através de funções de probabilidade.

Por exemplo, em uma amostra contendo 30 (trinta) dados é possível obter  $10^{14}$  valores médios a partir da escolha aleatória de 10 (dez) dados dessa amostra. Dessa forma, os valores médios obtidos correspondem a uma nova amostra com tamanho significativamente superior ao tamanho da amostra original de dados. De acordo com o Teorema do Limite Central, o qual estabelece que na medida em que tamanho da amostra aumenta, a distribuição amostral do valor médio aproxima-se cada vez mais de uma distribuição normal, pode-se utilizar de forma adequada as funções de probabilidade aplicadas as variáveis t-Student e qui-quadrado (BUSSAB; MORETTIN, 2017).

### 3.6.2. Intervalos de Confiança para as Métricas de Dano

Para uma amostra aleatória de dados com distribuição normal, com média amostral ( $\bar{x}$ ) conhecida, desvio-padrão amostral ( $s$ ) conhecido, média populacional ( $\mu$ ) desconhecida e desvio-padrão populacional ( $\sigma$ ) desconhecido, aplica-se a *função de probabilidade t-Student* para estimar o intervalo de confiança para o valor médio populacional e a *função de probabilidade qui-quadrado* para estimar o intervalo de confiança para o desvio-padrão populacional (BUSSAB; MORETTIN, 2017). Os valores da média e desvio-padrão da população são estimados a partir dos respectivos valores amostrais. As variáveis de t-Student (t) e qui-quadrado (Q) aplicáveis aos intervalos de confiança da media e do desvio-padrão, respectivamente, são expressas matematicamente pelas Eqs. (3.15) e (3.16):

$$t = \frac{\bar{x} - \mu}{\frac{s}{\sqrt{n}}} \quad (3.15)$$

$$Q = \frac{(n-1)s^2}{\sigma^2} \quad (3.16)$$

onde " $\bar{x}$ " é o valor médio amostral, " $s$ " é o desvio-padrão amostral, " $\mu$ " é o valor médio populacional, " $\sigma$ " é o desvio-padrão populacional e " $n$ " é o tamanho de dados na amostra.

Considerando um nível de confiança  $(1 - \alpha)$ , a probabilidade (P) da variável t-Student estar contido no intervalo  $[-t_{\alpha/2}; t_{\alpha/2}]$  e a probabilidade (P) da variável qui-quadrado estar no intervalo  $[Q_{\alpha/2}; Q_{1-\alpha/2}]$  são expressas por:

$$P(-t_{\alpha/2} \leq t \leq t_{\alpha/2}) = 1 - \alpha \quad (3.17)$$

$$P(Q_{\alpha/2} \leq Q \leq Q_{1-\alpha/2}) = 1 - \alpha \quad (3.18)$$

Substituindo a Eq. (3.15) em (3.17) e substituindo a Eq. (3.16) em (3.18), efetuando as devidas manipulações algébricas, tem-se as seguintes formas para as funções de probabilidade que representam os intervalos para o valor médio populacional ( $\mu$ ) e para o desvio-padrão populacional ( $\sigma$ ):

$$P\left(\bar{x} - t_{\alpha/2} \frac{s}{\sqrt{n}} \leq \mu \leq \bar{x} + t_{\alpha/2} \frac{s}{\sqrt{n}}\right) = 1 - \alpha \quad (3.19)$$

$$P\left(\frac{(n-1)s^2}{Q_{1-\alpha/2}} \leq \sigma^2 \leq \frac{(n-1)s^2}{Q_{\alpha/2}}\right) = 1 - \alpha \quad (3.20)$$

O valor da variável " $t_{\alpha/2}$ " é obtido para a distribuição cumulativa t-Student com nível de significância " $\alpha$ ", considerando uma distribuição bi-caudal para com graus de liberdade " $\nu = n - 1$ ". Os valores das variáveis qui-quadrado " $Q_{\alpha/2}$ " e " $Q_{1-\alpha/2}$ " são obtidos para a distribuição cumulativa qui-quadrado com nível de significância " $\alpha$ ", considerando uma distribuição bi-caudal para com graus de liberdade " $\nu = n - 1$ ". Os valores das variáveis t-Student e qui-quadrado podem ser obtidos através de tabelas ou funções matemáticas em softwares estatísticos.

A representação matemática para os intervalos de confiança do valor médio  $IC(\mu, 1-\alpha)$  e do desvio-padrão  $IC(\sigma, 1-\alpha)$  são expressas por:

$$IC(\mu, 1-\alpha) = \left[ \bar{x} - t_{\alpha/2} \frac{s}{\sqrt{n}}; \bar{x} + t_{\alpha/2} \frac{s}{\sqrt{n}} \right] \quad (3.21)$$

$$IC(\sigma, 1-\alpha) = \left[ \frac{(n-1)s^2}{Q_{1-\alpha/2}}; \frac{(n-1)s^2}{Q_{\alpha/2}} \right] \quad (3.22)$$

Os intervalos de confiança para os valores médios e desvios-padrão do coeficiente de Hurst e das métricas de dano serão utilizados como parâmetro de análise dos resultados em todas as condições de ensaios apresentadas nesse trabalho de tese. Os limites superiores dos valores médios e dos desvios-padrão serão utilizados para definir o limiar de detecção de dano nas análises de dano.

### 3.7. Limiar de Detecção de Dano em Estruturas

Nas análises das métricas de dano obtidas a partir das assinaturas de impedância é necessário definir e conhecer a condição a partir da qual os valores das métricas de dano passam a representar uma alteração significativa na estrutura, permitindo inferir sobre a presença de um dano. O valor a partir da qual as métricas de dano passam a representar um dano é chamado "limiar de detecção de dano" ou "limiar de discriminação do dano" (o termo correspondente em inglês é *threshold*).

A determinação do limiar de detecção de dano é apresentada na literatura de diversas formas. Neste trabalho de tese a determinação do limiar é baseada nos limites de controle (superior e inferior) dos intervalos de confiança, como apresentado em Rabelo (2017). Como o limite inferior não possui relevância para as análises, define-se o limite superior como o limiar de detecção de dano:

$$\text{limiar de dano} = \text{threshold} = \mu_{\max} + 3\sigma_{\max} \quad (3.23)$$

onde " $\mu_{\max}$ " é maior valor estimado para a média populacional no intervalo de confiança apresentado na Eq. (3.21) e " $\sigma_{\max}$ " é o maior valor estimado para o desvio-padrão populacional no intervalo de confiança apresentado na Eq. (3.22).

Para ilustrar o conceito do limiar de detecção de dano é mostrado na Figura 3.4 a representação do *threshold* de uma métrica de dano.

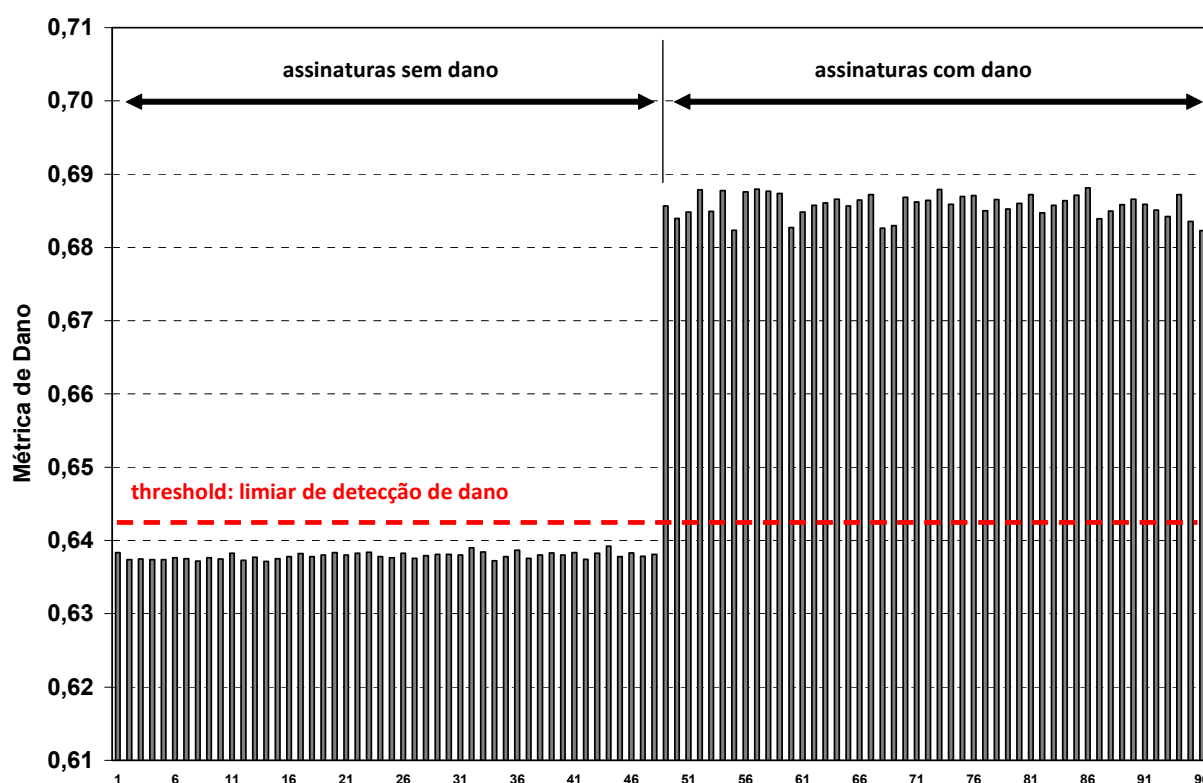


Figura 3.4 - Representação do Limiar de Dano em Métrica de Dano

As métricas de dano identificadas à esquerda são obtidas para a condição sem dano na estrutura e as métricas à direita são às obtidas com a presença de dano. A partir dos parâmetros amostrais das assinaturas sem dano são construídos os intervalos de confiança. Aplicando o limite superior de controle estima-se o valor da métrica de dano que representa o limiar de detecção de dano.

Para melhor compreensão dos valores relacionados a obtenção do limiar de detecção de dano, mostrado na Figura 3.4, os parâmetros estatísticos e o limiar de detecção de dano são apresentado na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Parâmetros das Assinaturas para Determinação do Limiar de Dano

condição	parâmetro estatístico	valor
SEM DANO	número de assinaturas, $n$	48
	média da métrica de dano, $\bar{x}$	0,6379
	desvio-padrão da métrica de dano, $s$	0,00091
	nível de confiança, $1 - \alpha$	95%
	intervalo de confiança da média, $IC(\mu, 1 - \alpha)$	[0,6377; 0,6382]
	intervalo de confiança do desvio-padrão $IC(\sigma, 1 - \alpha)$	[0,00076; 0,00114]
	maior valor da média, $\mu_{\max}$	0,6382
	maior valor do desvio-padrão, $\sigma_{\max}$	0,00114
	<b>limiar de detecção de dano, <math>threshold</math></b>	<b>0,6416</b>
COM DANO	número de assinaturas, $n$	48
	média da métrica de dano, $\bar{x}$	0,6858
	desvio-padrão da métrica de dano, $s$	0,0032
	nível de confiança, $1 - \alpha$	95%
	intervalo de confiança da média, $IC(\mu, 1 - \alpha)$	[0,6849; 0,6867]
	intervalo de confiança do desvio-padrão, $IC(\sigma, 1 - \alpha)$	[0,0027; 0,0040]

### 3.8. Efeito da Temperatura nos Materiais Piezoelétricos

Do ponto vista operacional as mudanças climáticas (pressão, temperatura e umidade) afetam o comportamento dinâmico da estrutura pois alteram propriedades físicas. As mudanças climáticas não afetam apenas as propriedades físicas da estrutura, mas também as propriedades físicas e elétricas dos PZT e da cola de fixação (BAPTISTA; VIEIRA FILHO; INMAN, 2010 e PALOMINO *et al.*, 2011).

Em relação à cola, variações de temperatura promovem alteração na rigidez da camada de cola, alterando a interface de acoplamento entre o PZT e a estrutura. Em relação aos materiais piezoelétricos, a propriedade elétrica da constante dielétrica  $\epsilon_{33}^{-T}$  é fortemente dependente da temperatura e tem efeito significativo na determinação da impedância elétrica, conforme mostrado na Eq. (3.3).

As mudanças relacionadas à impedância em função da temperatura podem levar a um falso diagnóstico sobre a presença de dano pelo sistema de monitoramento. No entanto, o efeito da temperatura e o efeito da presença de dano nas assinaturas de impedância de estruturas metálicas possuem características distintas. As mudanças relacionadas à presença de dano causam uma alteração completa e abrupta no comportamento dos picos e valores de impedância nas assinaturas. As mudanças relacionadas a variação de temperatura causam deslocamentos horizontal e vertical dos picos de impedância, sem alterar o comportamento geral da assinatura nos materiais metálicos. Dessa forma é possível identificar e isolar o efeito da temperatura nas análises de impedância através de métodos de compensação de temperatura (RABELO, 2017).

### 3.9. Compensação de Temperatura por Análise de Correlação

Na literatura encontram-se vários trabalhos relacionados ao efeito da temperatura na impedância eletromecânica e nesses trabalhos são apresentados alguns métodos eficazes de compensação de temperatura. Nesse trabalho de tese o método utilizado para compensação de temperatura nas assinaturas de impedância corresponde ao "método de deslocamento efetivo através da análise de correlação".



Esse método de compensação de temperatura é apresentado em Rabelo (2014) e pode ser aplicado em um intervalo de temperatura restrito, comumente da ordem de 10 a 20°C. O método consiste no deslocamento horizontal e vertical de uma dada assinatura em relação a uma assinatura *baseline* de referência a fim de compatibilizar as escalas de frequência e impedância entre as duas assinaturas.

O procedimento consiste em aplicar de forma iterativa pequenos deslocamentos verticais em amplitude ( $\Delta I$ ) e deslocamentos horizontais e frequência ( $\Delta \omega$ ) em todos os pontos das assinaturas. Os deslocamentos são aplicados individualmente a cada iteração do processo. A cada iteração calcula-se o coeficiente de correlação (CC), conforme Eq. (3.11), entre a assinatura compensada (entenda-se, assinatura deslocada) e a assinatura *baseline*: quanto mais próximo à unidade, maior a correlação e semelhança entre as assinaturas.

Como estratégia para o processo iterativo de compensação de temperatura pode-se aplicar métodos de otimização para determinar as melhores direções de busca para os maiores coeficiente de correlação. Nesse trabalho de tese implementou-se um método iterativo na qual são gerados pequenos deslocamentos horizontais e verticais a fim de terminar a combinação de deslocamentos que maximizam o coeficiente de correlação, assim como realizado por Rabelo (2014).

A Figura 3.5 mostra duas assinaturas obtidas para uma viga de alumínio sem dano em uma mesma faixa de frequência, mas em diferentes temperaturas: 25°C e 40°C. A faixa de frequência corresponde de 100 a 120kHz, com resolução em frequência de 10Hz por ponto. A viga de alumínio e o aparato experimental utilizado para obtenção das assinaturas estão apresentados no Capítulo 5. Considerando a assinatura *baseline* como à obtida na temperatura de 25°C e aplicando o método de compensação de temperatura na assinatura obtida à 40°C, obtém-se a assinatura compensada de 40°C mostrada na Figura 3.6.

Nesse processo de compensação foram gerados 15 deslocamentos verticais negativos (0,1 $\Omega$  cada deslocamento) e 29 deslocamentos horizontais positivos (10Hz cada deslocamento). O coeficiente de correlação entre as assinaturas antes do processo de compensação é de 0,126 e após a compensação o coeficiente de correlação é de 0,707.

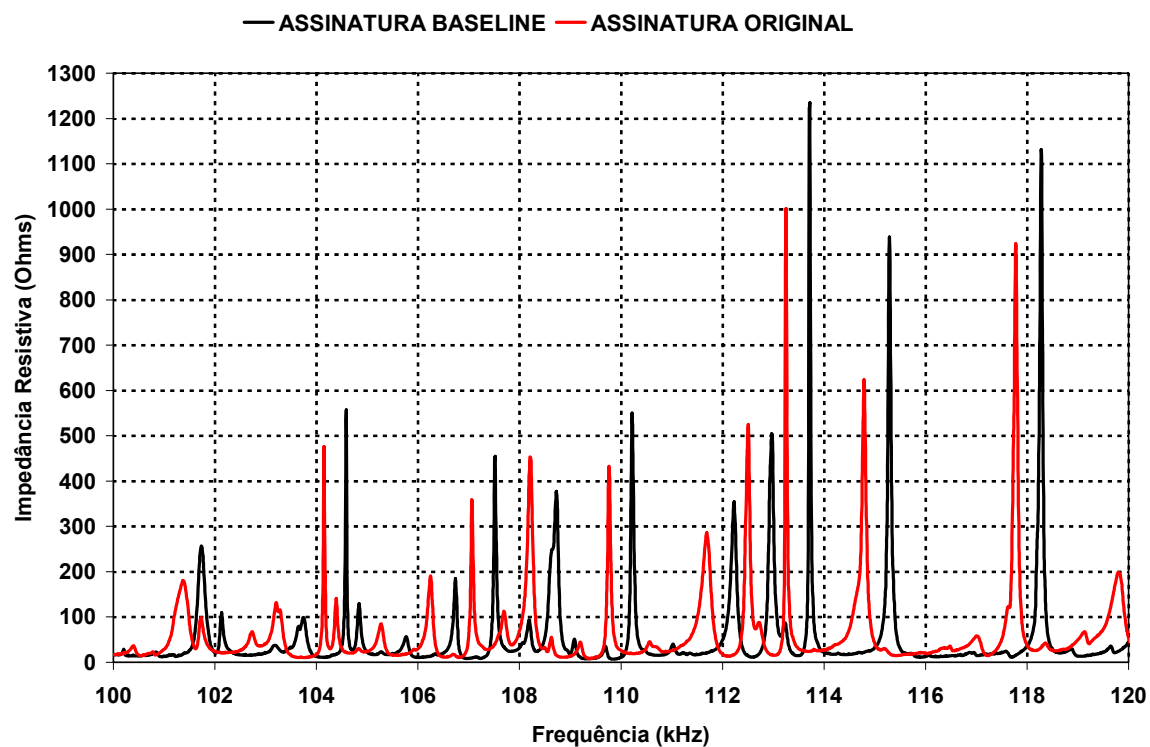


Figura 3.5 - Assinaturas de Impedância em Diferentes Temperaturas

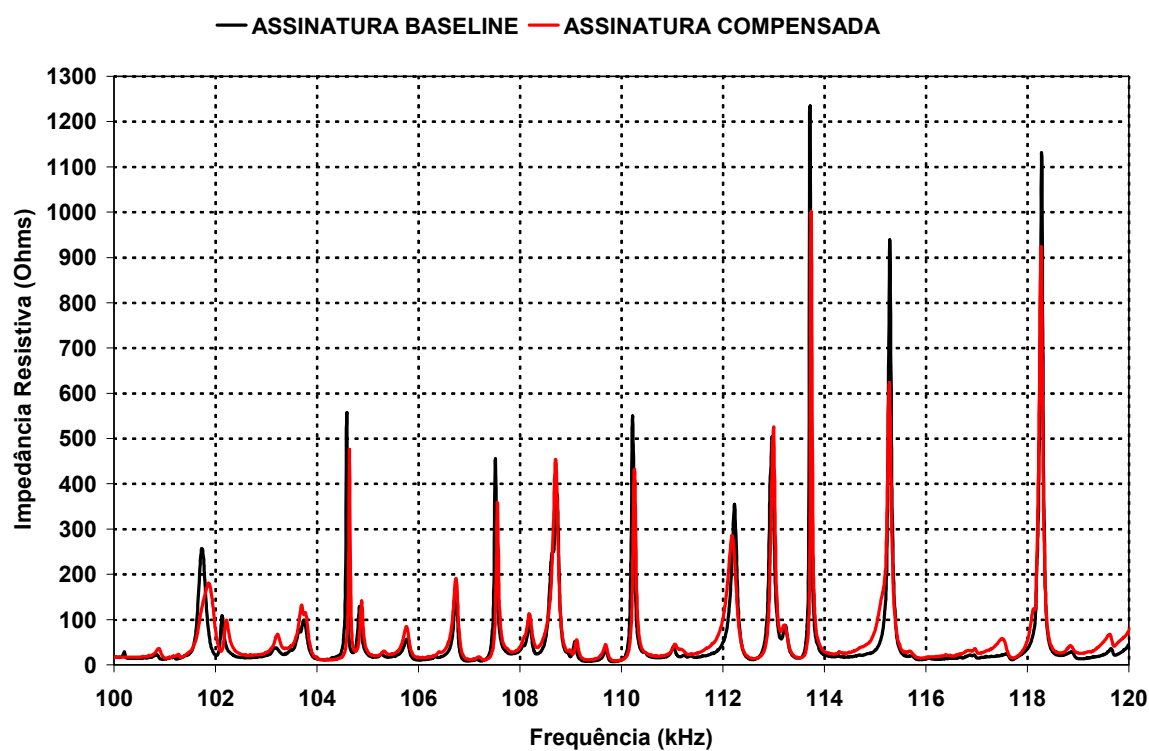


Figura 3.6 - Assinaturas de Impedância Compensadas

Analisando as duas assinaturas apresentadas anteriormente em relação à métrica de dano CCD, obtém-se antes do processo de compensação de temperatura o valor de 0,874 (valor da unidade menos o coeficiente de correlação). Após o processo de compensação de temperatura a métrica CCD passa a ter valor de 0,293 (valor da unidade menos o coeficiente de correlação). Ambas as assinaturas foram obtidas em uma condição sem dano. Concluindo-se a partir do valor do desvio do coeficiente de correlação antes do processo de compensação pode-se ter uma falsa percepção de dano, condição denominada de falso positivo.

Para ilustrar o comportamento das métricas de dano calculadas sem o processo de compensação de temperatura e com o processo de compensação, as figuras a seguir apresentam os valores das métricas de dano para 20 assinaturas de impedância obtidas em uma viga de alumínio, em uma condição sem dano e submetida a temperatura ambiente crescente. A faixa de frequência das assinaturas é de 100 a 140kHz. O comportamento da temperatura ambiente para cada assinatura é mostrado na Figura 3.7.

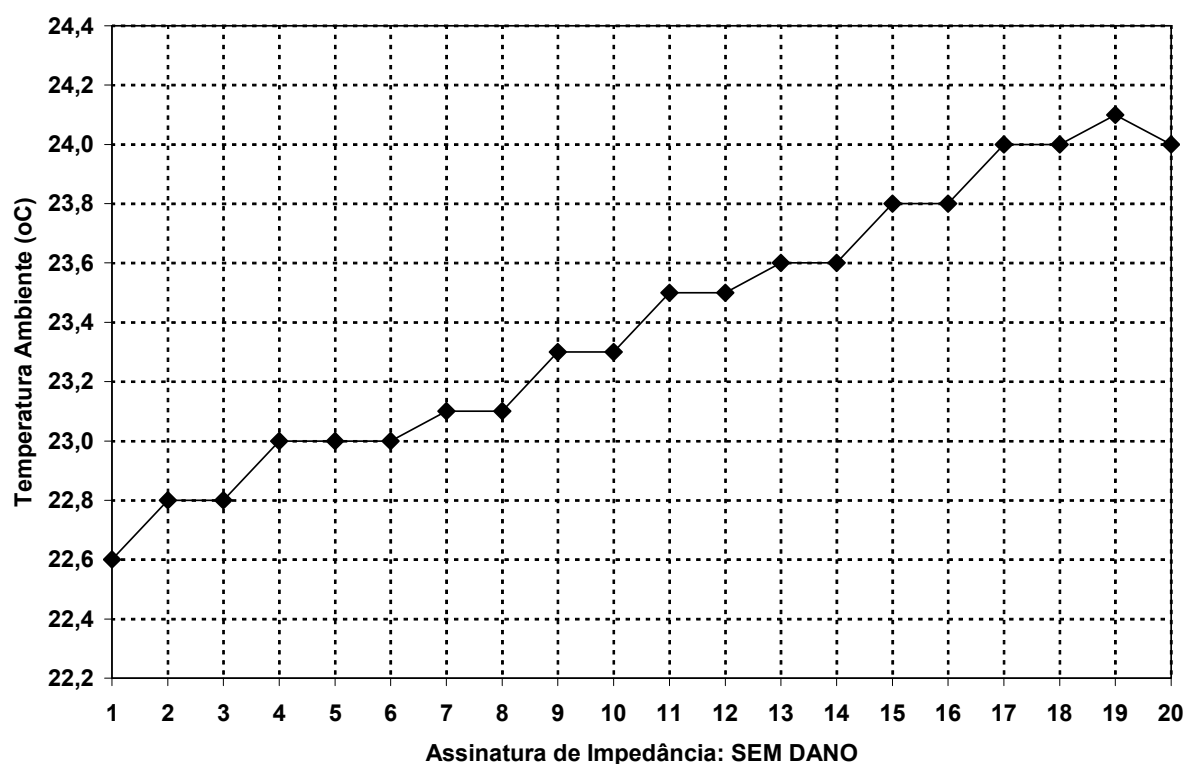


Figura 3.7 - Temperatura para as Assinaturas de Impedância

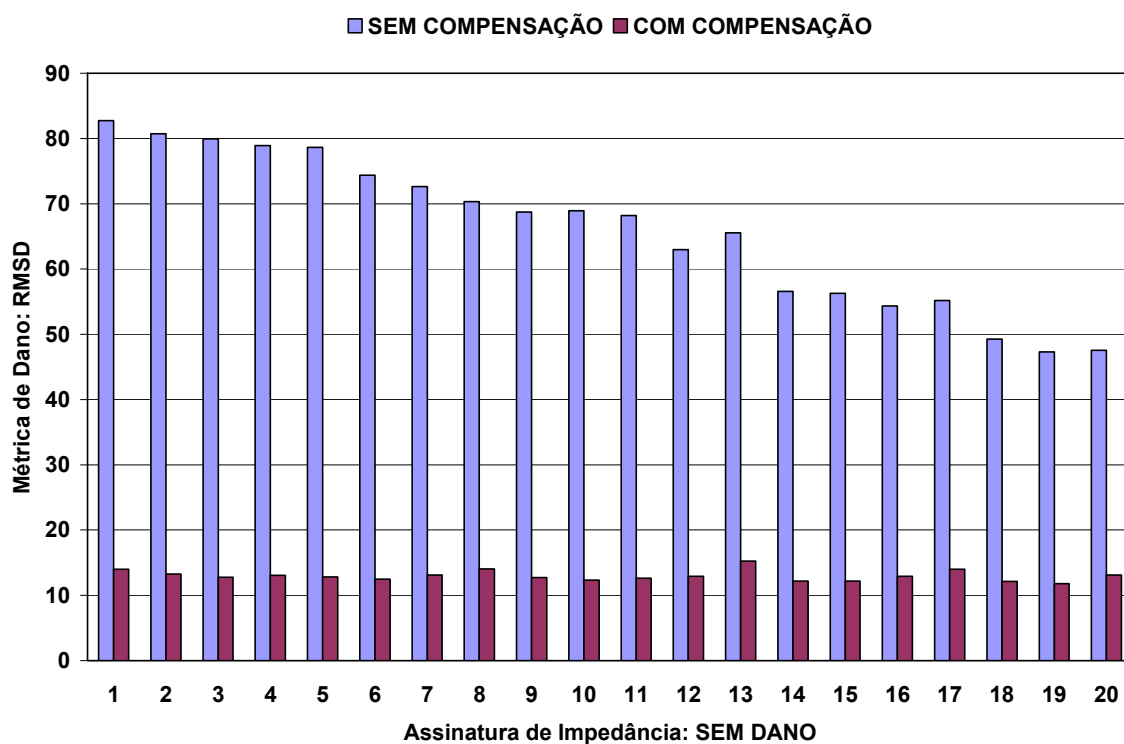


Figura 3.8 - Métricas de Dano RMSD: COM E SEM Compensação

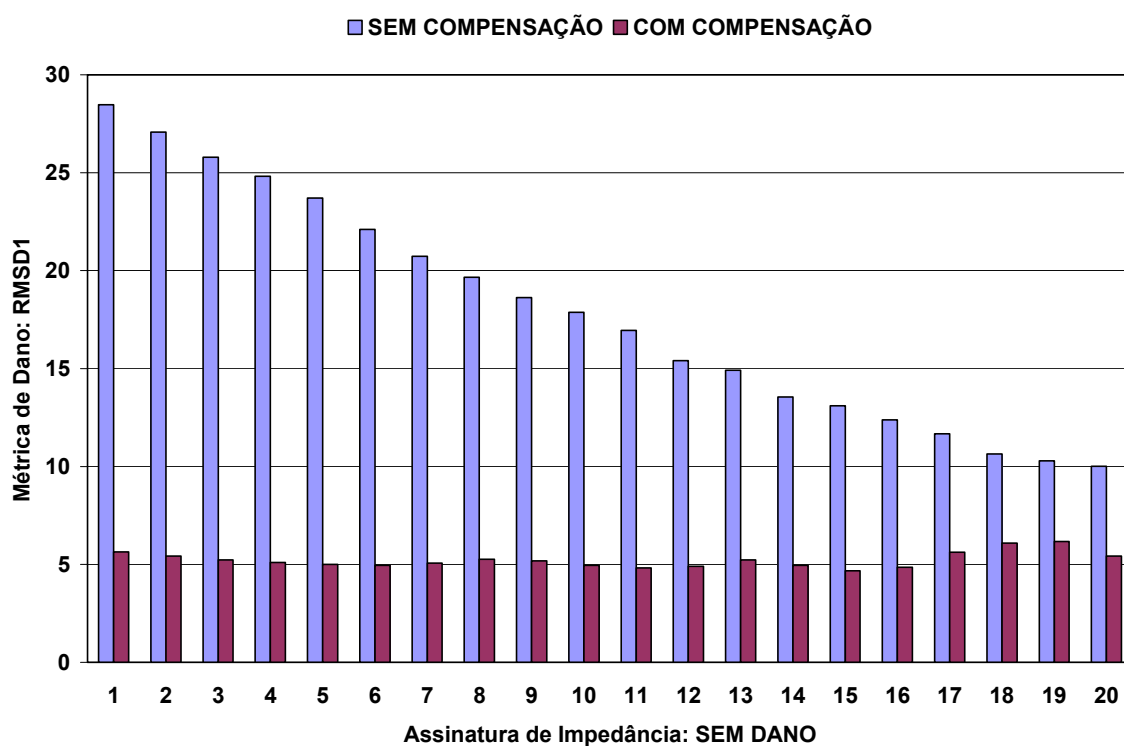


Figura 3.9 - Métricas de Dano RMSD1: COM E SEM Compensação

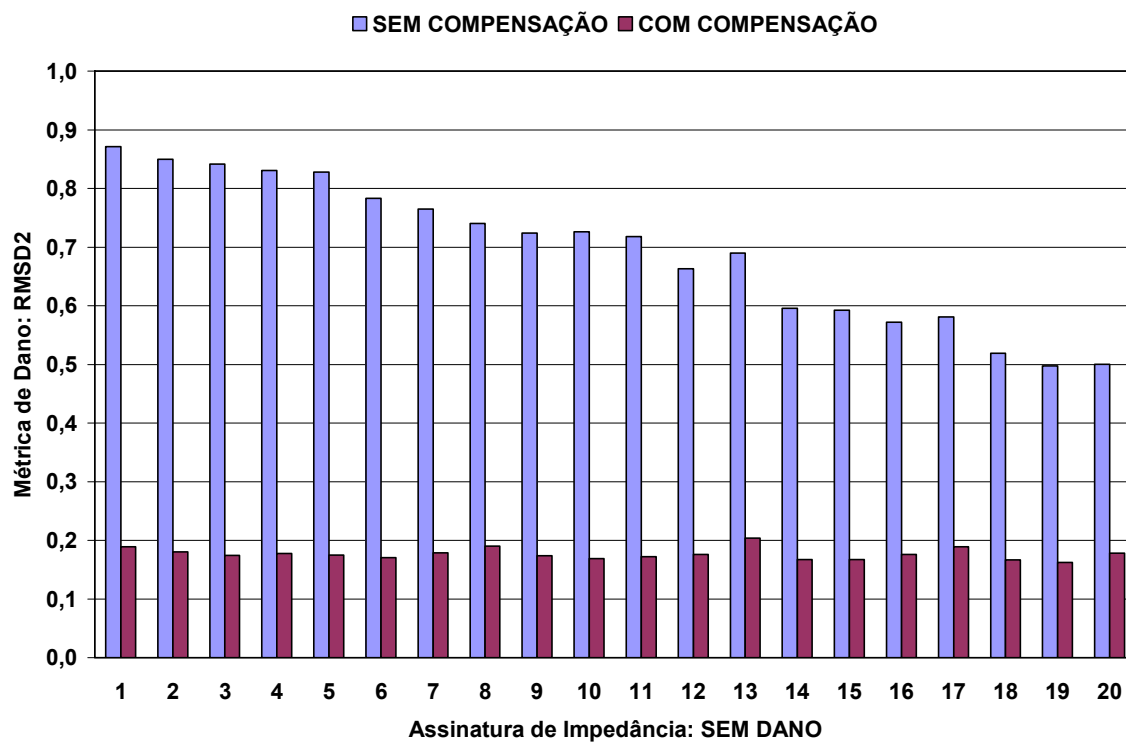


Figura 3.10 - Métricas de Dano RMSD2: COM E SEM Compensação

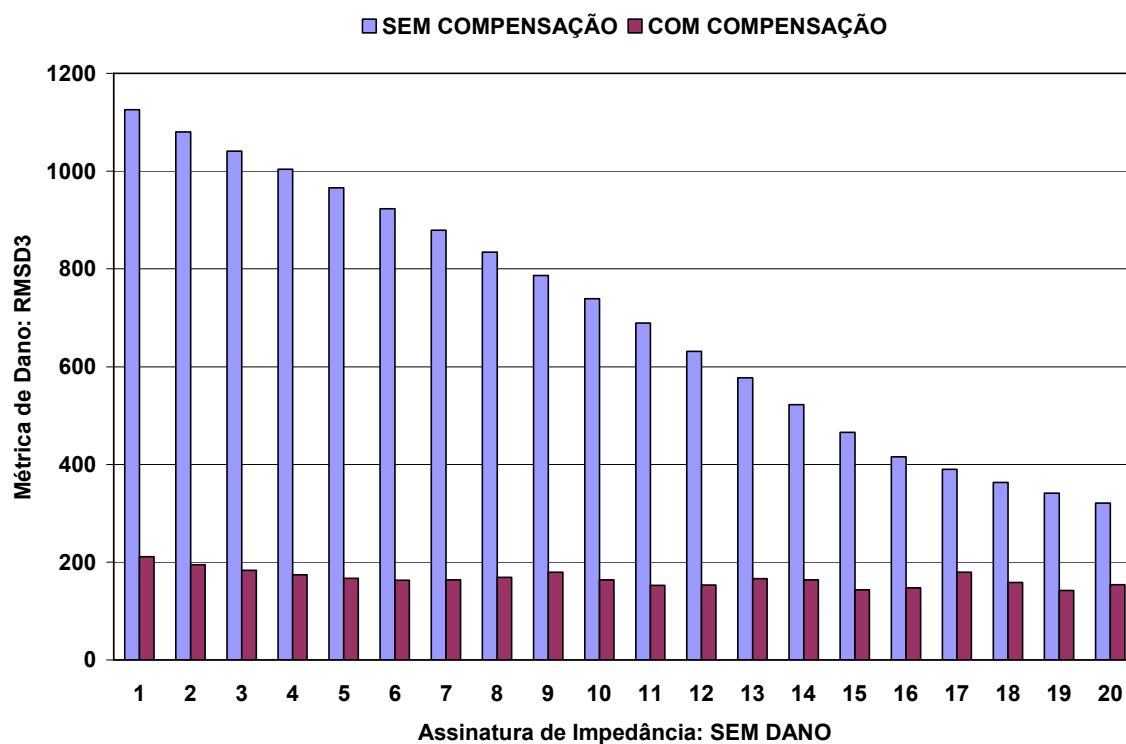


Figura 3.11 - Métricas de Dano RMSD3: COM E SEM Compensação

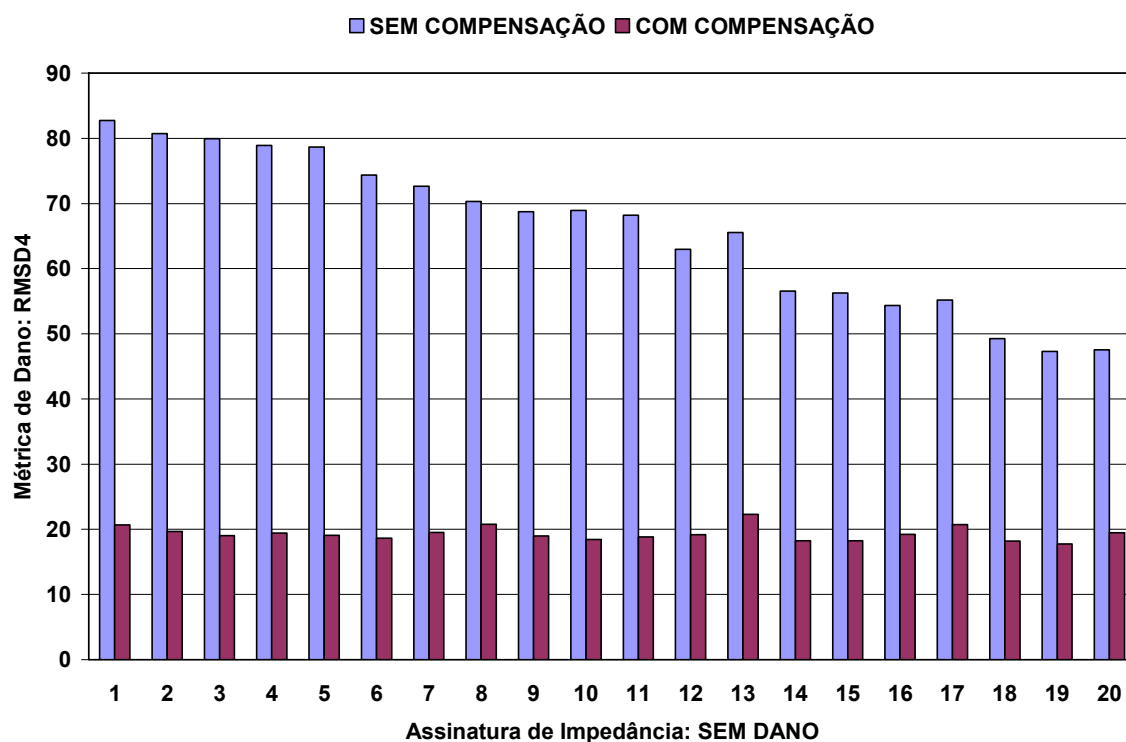


Figura 3.12 - Métricas de Dano RMSD4: COM E SEM Compensação

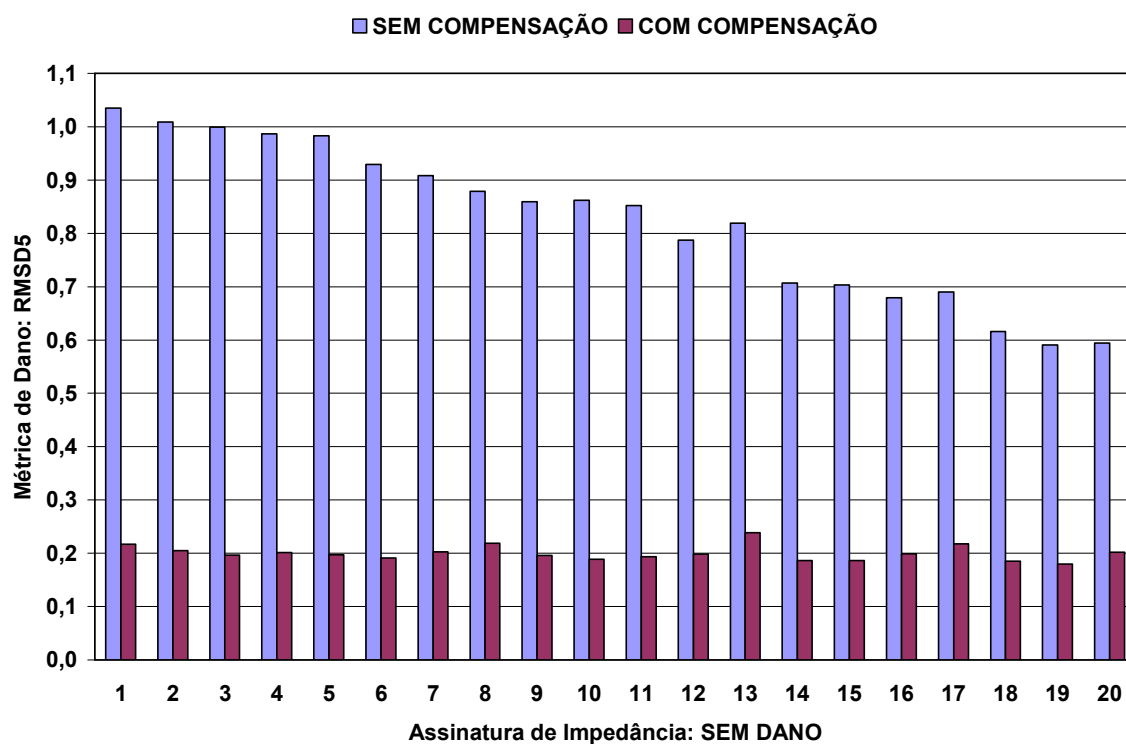


Figura 3.13 - Métricas de Dano RMSD5: COM E SEM Compensação

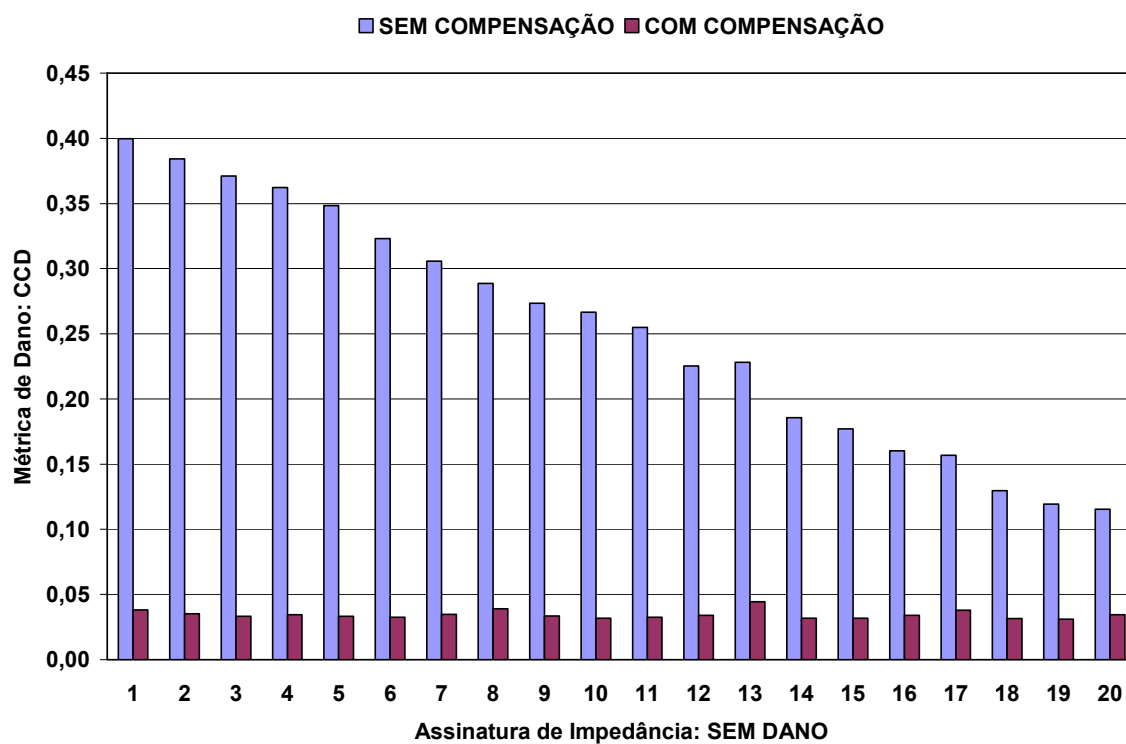


Figura 3.14 - Métricas de Dano CCD: COM E SEM Compensação

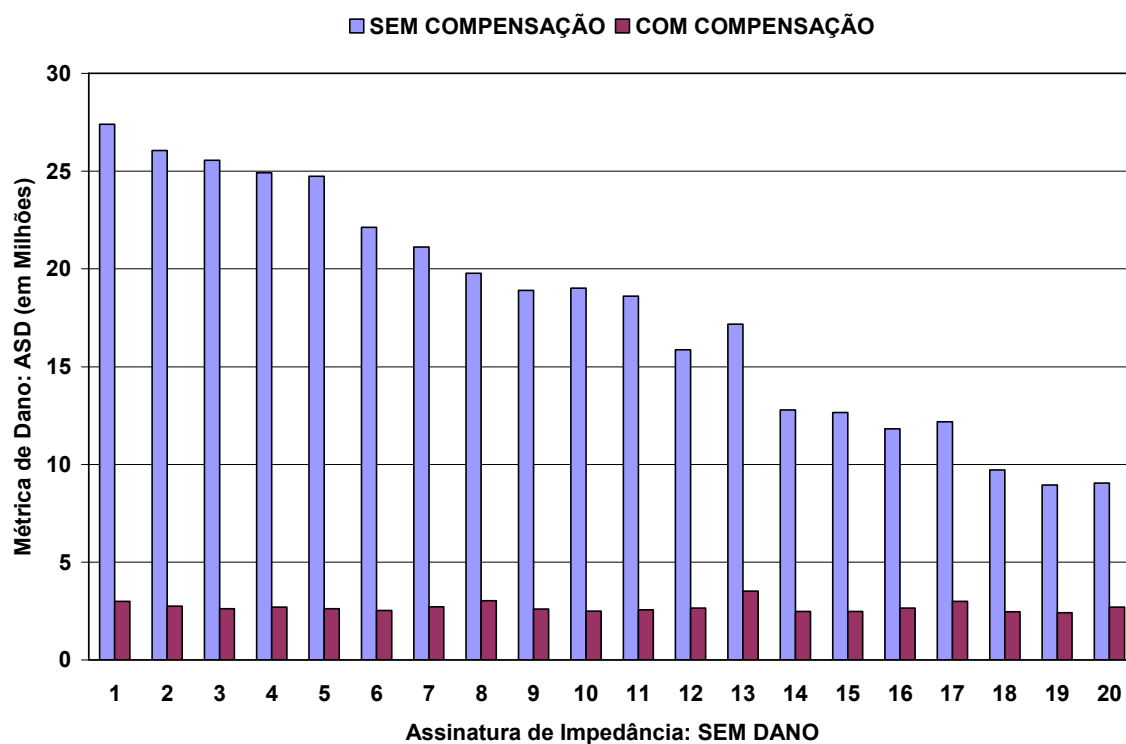


Figura 3.15 - Métricas de Dano ASD: COM E SEM Compensação

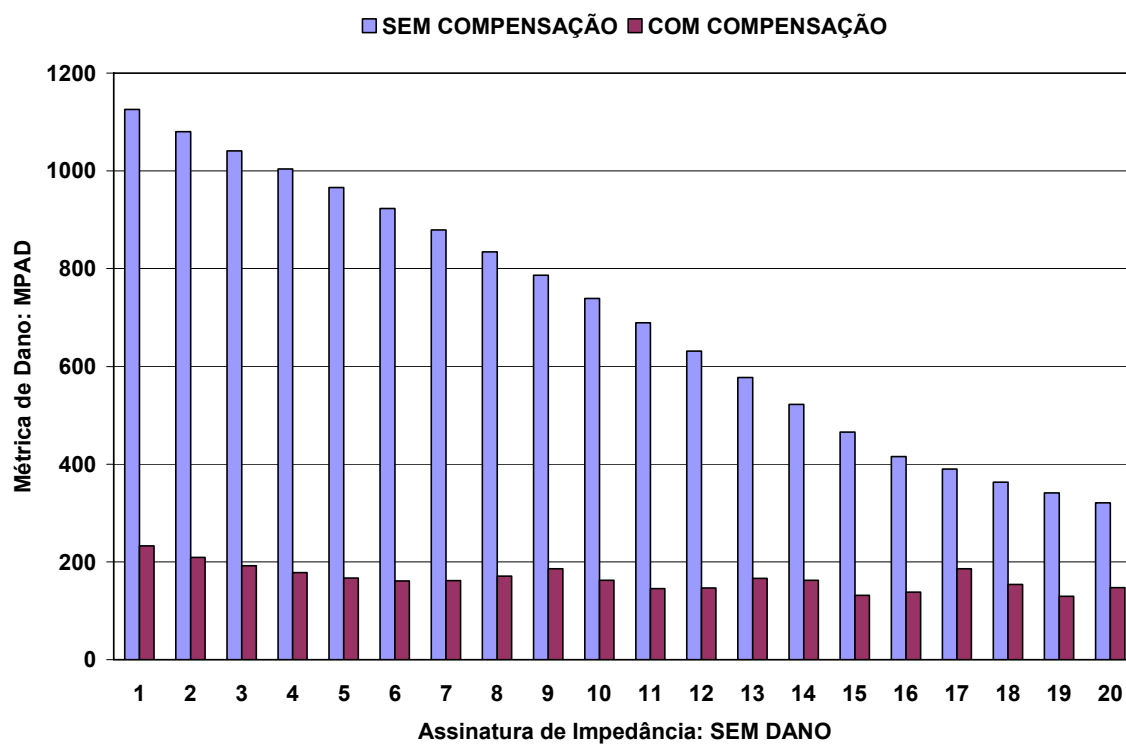


Figura 3.16 - Métricas de Dano MAPD: COM E SEM Compensação

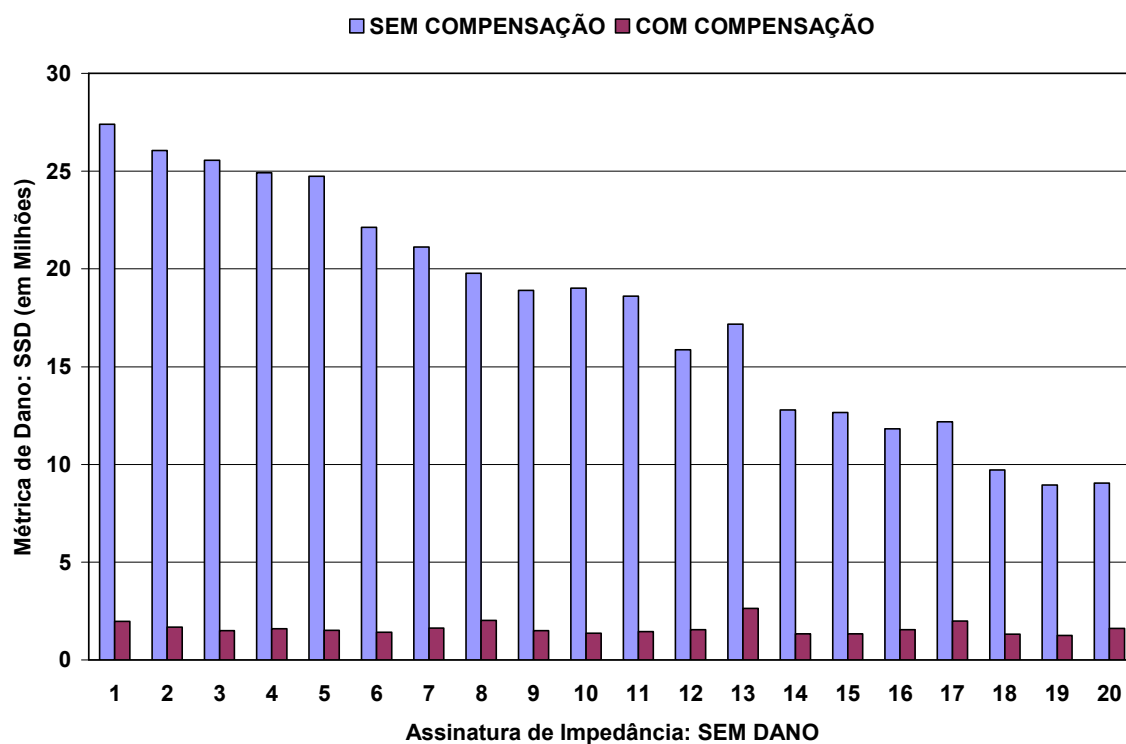


Figura 3.17 - Métricas de Dano SSD: COM E SEM Compensação



Analisando o comportamento das métricas de dano obtidas a partir das assinaturas não-compensadas, verifica-se que o aumento da temperatura promove mudanças significativas nas métricas de dano (o aumento da temperatura implica na redução das métricas de dano). As métricas de dano RMSD3, CCD e MAPD apresentam as maiores reduções percentuais no intervalo de temperatura analisado. As métricas de dano RMSD, RMSD1 e RMSD5 apresentam as menores reduções percentuais no intervalo de temperatura analisado.

Conforme apresentado anteriormente, a análise de dano utilizando assinaturas não-compensadas pode levar a má interpretação sobre a presença de dano na estrutura, mesmo para a estrutura sem dano. Com o processo de compensação de temperatura, utilizando como assinatura *baseline* a assinatura média, verifica-se uma harmonização e redução dos valores das métricas de dano em relação as assinaturas não-compensadas. Dessa forma, as assinaturas de impedância compensadas se mostram mais adequadas para avaliar a condição de integridade estrutural.

Para as análises de dano utilizando as métricas de dano serão utilizadas as assinaturas compensadas. Para as análises de dano utilizando o coeficiente de Hurst serão utilizadas as assinaturas originais, sem compensação. Na Seção 3.7.2 desse trabalho será demonstrado que o processo de compensação de temperatura não altera o comportamento das assinaturas. Dessa forma, não ocorrendo alteração no coeficiente de Hurst não se justifica o uso do processo de compensação de temperatura para as análises utilizando o coeficiente de Hurst.

## 4.

# MÉTODO ESTATÍSTICO DE HURST

### 4.1. Histórico do Método Estatístico de Hurst

O método estatístico de Hurst é uma ferramenta estatística que quantifica a tendência de comportamento de um determinado fenômeno. Esse método fornece com resultado um parâmetro estatístico adimensional denominado coeficiente de Hurst ou expoente de Hurst ( $H$ ). O coeficiente varia entre zero (0) e a unidade (1), levando a diferentes interpretações com relação a tendência de comportamento do fenômeno observado. O coeficiente ou expoente de Hurst é referenciado em muitas literaturas como "índice de dependência de longo prazo" pois o coeficiente quantifica a tendência relativa do valor da variável de interesse em aproximar ou afastar-se do valor médio no longo prazo. Essa tendência da variável no longo prazo é chamado efeito de memória longa (*long-memory effect*) ou simplesmente efeito de Hurst (*Hurst effect*). Esse método estatístico foi desenvolvido na década de 1950 pelo hidrologista e pesquisador inglês **Harold Edwin Hurst** para dimensionamento de barragens de irrigação no Rio Nilo, no Egito (HURST, 1951, apud MANSUKHANI, 2012). O trabalho científico de Hurst consistiu de observar durante um longo período de tempo as condições de chuva e seca no rio Nilo, a fim de determinar as melhores condições para dimensionamento das barragens de irrigação.

### 4.2. Interpretação do Coeficiente de Hurst

A interpretação do coeficiente entre zero e metade da unidade (0 a 0,5) indica um fenômeno com grande probabilidade de mudança de comportamento no longo prazo, caracterizando um fenômeno anti-persistente (MANSUKHANI, 2012).

Em termos práticos, significa que um valor grande da variável de interesse provavelmente será seguido por um valor pequeno da variável e que o valor depois desse tenderá a ser grande novamente, com essa alternância ocorrendo no longo prazo. A Figura 4.1 mostra uma variável com comportamento senoidal, de forma que os valores grandes da variável são seguidos por valores pequenos, com alternância no longo prazo. O comportamento senoidal implica na alternância de picos e vales de forma igualmente espaçada e repetitiva. Nesse caso, a aplicação do método estatístico retorna um coeficiente de Hurst muito próximo à zero. Adicionalmente, o coeficiente de Hurst para qualquer comportamento que possua repetição de alternância no longo prazo será sempre muito próximo a zero.

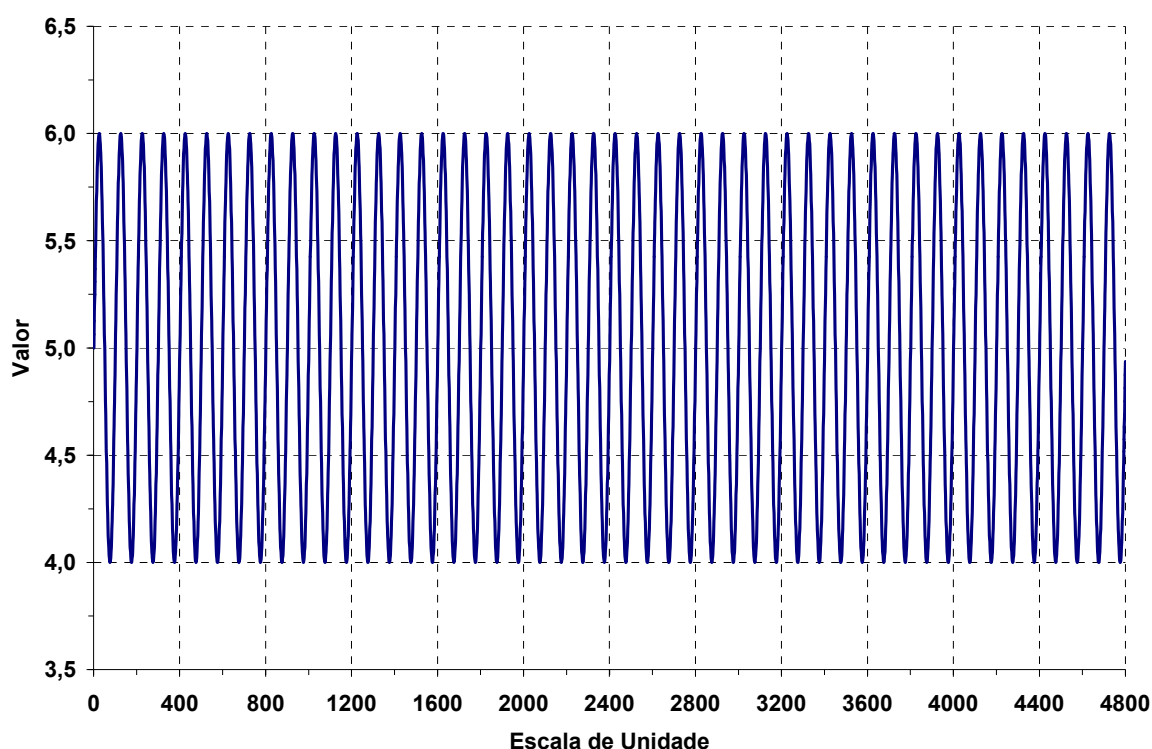


Figura 4.1 - Representação de Variável com Comportamento Senoidal

A interpretação do coeficiente entre metade da unidade e a unidade (0,5 a 1) indica um fenômeno com pequena ou nenhuma probabilidade de mudança de comportamento no longo prazo, caracterizando assim um fenômeno persistente (MANSUKHANI, 2012).

Em termos práticos, significa que um valor grande da variável de interesse será seguido por outro valor grande da variável e que os valores no longo prazo também tenderão a ser grandes. A Figura 4.2 mostra uma variável com comportamento linear crescente, de forma que os valores grandes da variável são seguidos por valores cada vez maiores no longo prazo. Nesse caso, a aplicação do método de Hurst retorna um coeficiente muito próximo da unidade.

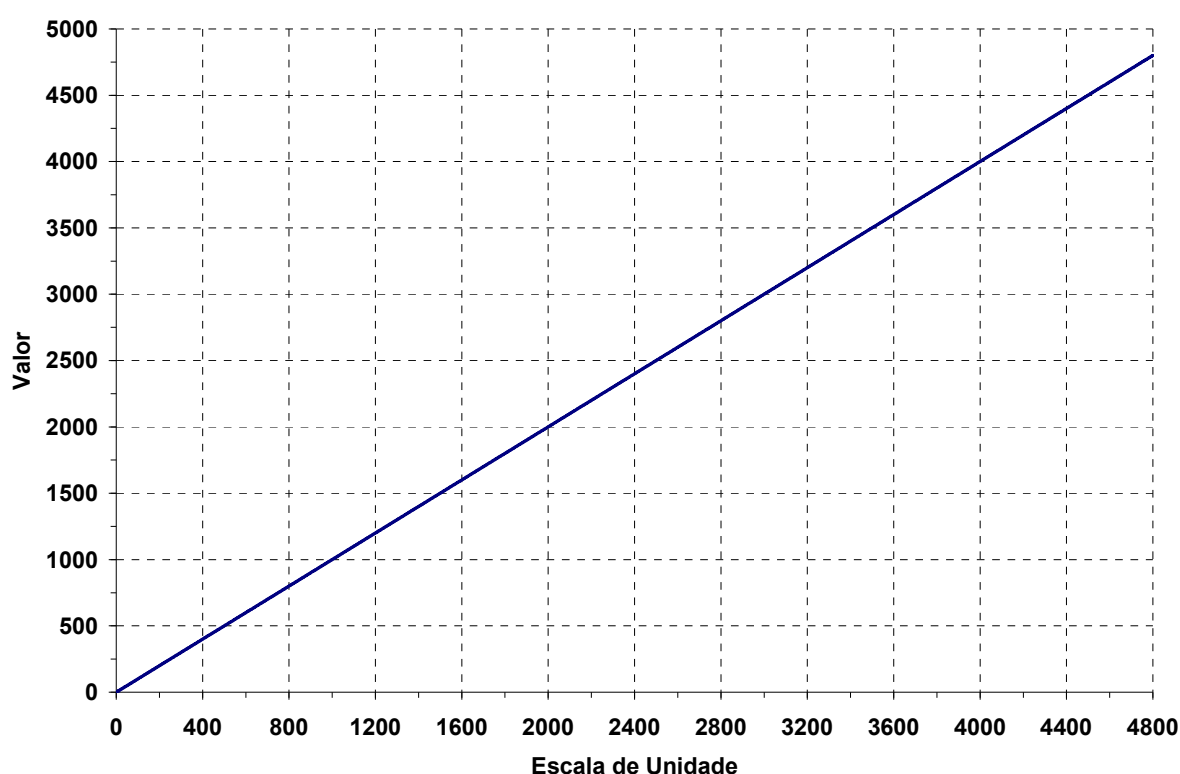


Figura 4.2 - Representação de Variável com Comportamento Linear

O coeficiente igual à metade da unidade (0,5) indica um fenômeno com mudança de comportamento aleatória no longo prazo (MANSUKHANI, 2012). Em termos práticos, significa que um valor grande da variável poderá ser seguido por um valor grande ou poderá ser seguido por um valor pequeno, sem que haja uma correlação no longo prazo. A Figura 4.3 mostra uma variável com comportamento aleatório, de forma que os valores grandes são seguidos ora por valores maiores, ora por valores menores no longo prazo. Nesse caso, a aplicação do método de Hurst retorna um coeficiente muito próximo à metade da unidade.

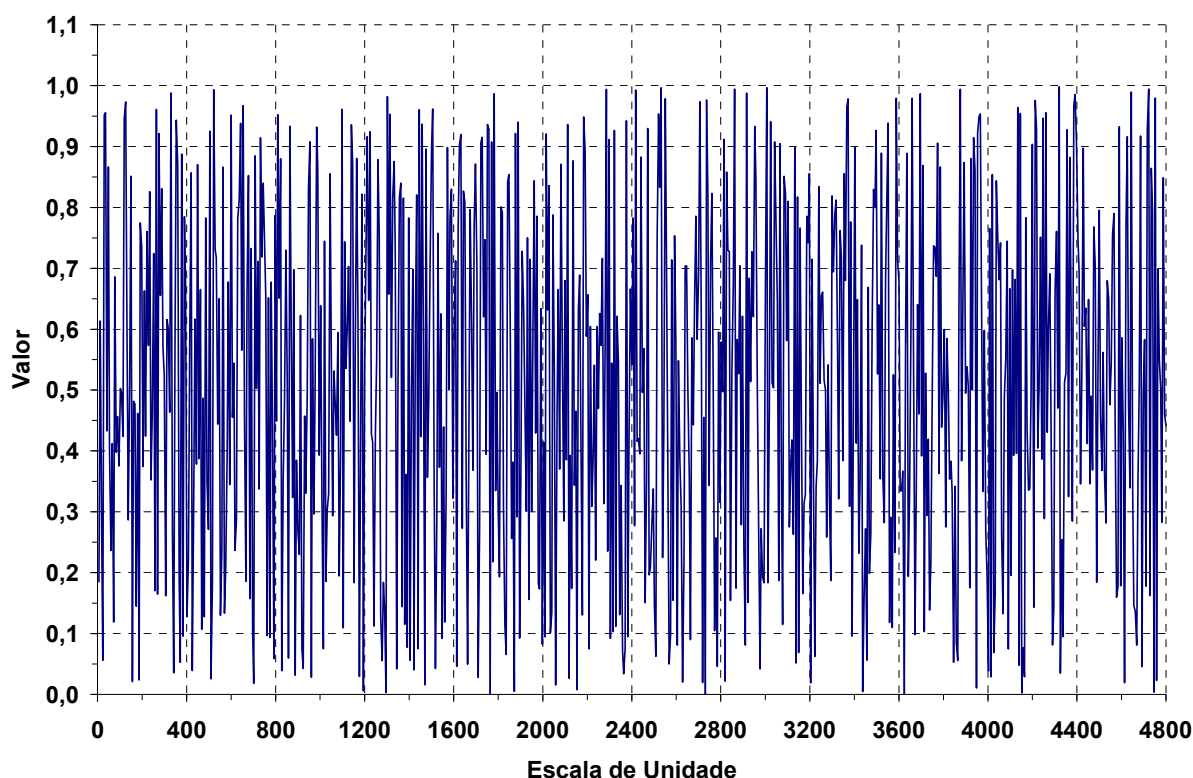


Figura 4.3 - Representação de Variável com Comportamento Aleatório

De forma alternativa, o coeficiente de Hurst pode ser interpretado como a probabilidade do comportamento não mudar no longo prazo. Isso significa que um coeficiente igual a unidade (1) representa uma variável com 100% de probabilidade do comportamento não mudar no longo prazo (como por exemplo, um fenômeno linear crescente ou decrescente).

Desde a introdução do coeficiente por Hurst, em meados da década de 1950, diversas abordagens matemáticas foram desenvolvidas e aperfeiçoadas para determinação do coeficiente de Hurst. Entretanto, no desenvolvimento dessa tese não foi possível a obtenção do trabalho original publicado por Hurst. Uma extensa pesquisa foi realizada a fim de encontrar trabalhos científicos que apresentassem os conceitos do trabalho original de Hurst. Em Graves *et al.* (2016) é apresentada uma extensa revisão histórica do trabalho de Hurst e demais abordagens matemáticas correlacionadas, as quais serviram como base para descrição dos conceitos apresentados nessa tese.

### 4.3. Determinação do Coeficiente de Hurst

O coeficiente de Hurst é determinado através de parâmetros estatísticos aplicados a um conjunto de dados. Esse conjunto de dados comumente é apresentado no domínio do tempo ou da frequência. No entanto, o único requisito obrigatório para o método estatístico é que os dados possuam mesmo espaçamento na escala em que são apresentados. Isso significa que um fenômeno observado no domínio do tempo deve possuir um passo de tempo (diferença entre dois pontos consecutivos) constante em todo o período observado. Um fenômeno observado no domínio da frequência deve possuir passo de frequência (diferença entre dois pontos consecutivos) constante em toda a faixa de frequência observada.

O método estatístico para determinação do coeficiente de Hurst envolve os conceitos de conjunto de dados, séries de dados, blocos de dados e amplitude reescalada (dos blocos e séries de dados). O coeficiente de Hurst não é calculado, mas sim estimado através da formulação matemática que será apresentada a seguir.

O conjunto de dados corresponde a amostra completa a ser analisada pelo método de Hurst e esse conjunto é formado por um número finito de pontos. Um conjunto de dados de tamanho " $N$ " pode ser reescrito em função de um número inteiro de blocos de dados " $c$ " com mesmo tamanho " $n$ " cada, podendo inclusive conter o tamanho original " $N$ ". O número de blocos " $c$ " multiplicado pelo tamanho dos blocos " $n$ " é igual ao tamanho do conjunto de dados " $N$ ". Por exemplo, um conjunto de dados de 4800 pontos pode ser reescrito por: (a) 1 bloco com 4800 pontos; (b) 2 blocos com 2400 pontos cada; (c) 3 blocos com 1600 pontos cada e (d) 4 blocos com 1200 pontos cada.

Cada divisão do conjunto de dados em blocos de dados é chamada de série de dados. No parágrafo anterior, a primeira série de dados (a) corresponde a 1 bloco com 4800 pontos; a segunda série (b) corresponde a 2 blocos com 2400 pontos cada; a terceira série (c) corresponde a 3 blocos com 1600 pontos cada; a quarta série (d) corresponde a 4 blocos com 1200 pontos cada. A Figura 4.4 ilustra as informações apresentadas nos parágrafos anteriores.

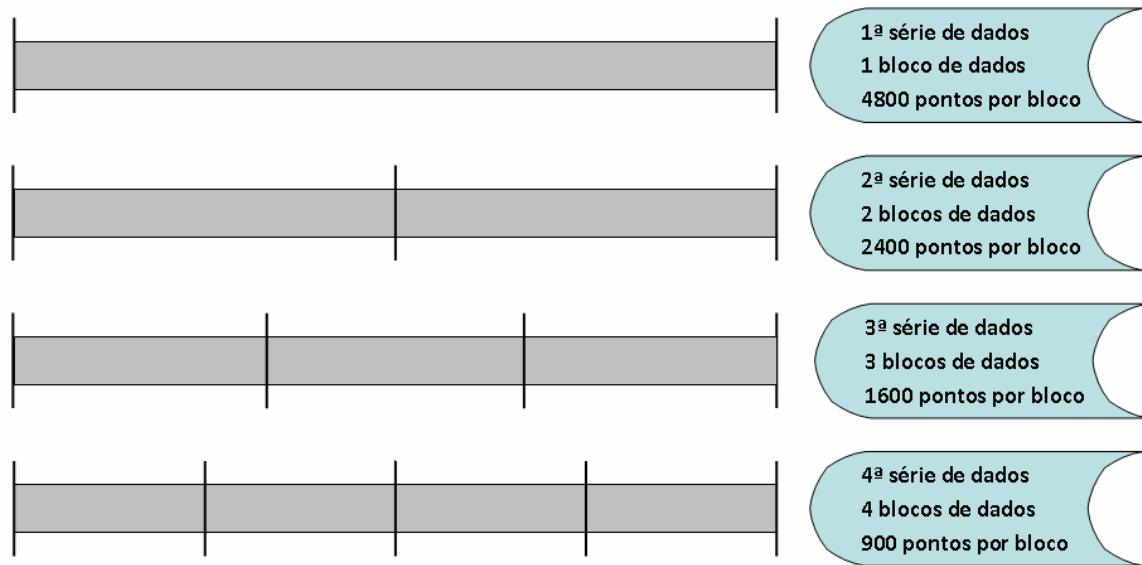


Figura 4.4 - Séries de Dados em Conjunto de Dados com 4800 pontos

A estimativa do coeficiente de Hurst é realizada a partir do cálculo da amplitude reescalada ( $R/s$ ) em cada série de dados, considerando as diferentes combinações de blocos de dados que originam as séries de dados (ELLIS, 2006). Em termos práticos, ao reescrever o conjunto de dados em diferentes séries, para cada série será obtida uma amplitude reescalada. A amplitude reescalada de cada série é calculada pelo número e tamanho dos blocos que a constituem.

De acordo com o trabalho de Hurst, referenciado em diversas literaturas, o valor esperado de amplitude reescalada ( $R/s$ ) de uma série de dados com blocos de tamanho " $n$ " segue uma lei de potência em função do tamanho dos blocos conforme Eq. (4.1).

$$\frac{R}{s} = C n^H \quad (4.1)$$

Onde " $H$ " é o coeficiente de Hurst do conjunto de dados que origina a série de dados, " $n$ " é o tamanho dos blocos que foram a série de dados e " $C$ " é uma constante. Em termos práticos, o valor da constante " $C$ " não possui relação alguma com o coeficiente de Hurst e pode ser desconsiderada no método estatístico.

Aplicando o logaritmo em ambos os lados da equação e efetuando as manipulações algébricas necessárias, reescreve-se a Eq. (4.2) explicitando o coeficiente de Hurst:

$$\log\left(\frac{R}{s}\right) = H \log(n) + \log(C) \quad (4.2)$$

Analisando a equação acima, verifica-se que essa corresponde a uma equação linear que correlaciona a amplitude reescalada ( $R/s$ ) em função do tamanho do bloco de dados ( $n$ ). Dessa forma, conhecendo-se os valores de amplitude reescalada de algumas séries de dados e correlacionando-as com o tamanho dos blocos que originaram as respectivas séries, é possível estimar o coeficiente de Hurst através do processo de regressão linear.

Para determinação da amplitude reescalada de uma série de dados, contendo um número finito de bloco de dados, realiza-se o seguinte procedimento em cada bloco da série:

1. Define-se o tamanho do bloco de dados ( $n$ ):
2. Calcula-se o valor médio dos pontos no bloco de dados ( $\bar{x}$ ):

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (4.3)$$

3. Calcula-se o desvio de cada ponto do bloco em relação à média ( $Y$ ):

$$Y_i = x_i - \bar{x} \quad \text{para } i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (4.4)$$

4. Calcula-se o desvio-padrão dos desvios individuais de cada ponto do bloco ( $s$ ) em relação ao valor médio:



$$s = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i^2} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (4.5)$$

5. Calcula-se o desvio acumulado ( $Z$ ) de cada ponto do bloco, através da soma cumulativa dos desvios individuais dos pontos que precedem a referência ( $t$ ).

$$Z_t = \sum_{i=1}^t Y_i \quad \text{para } i = 1, 2, 3, \dots, t \quad (4.6)$$

6. Determina-se o amplitude do desvio acumulado ( $R$ ) através da diferença entre o maior valor de desvio acumulado encontrado ( $Z_{\max}$ ) e o menor valor de desvio acumulado ( $Z_{\min}$ ).

$$R = Z_{\max} - Z_{\min} \quad (4.7)$$

7. Calcula-se a amplitude reescalada ( $R/s$ ) em cada bloco, dividindo a amplitude do desvio acumulado ( $R$ ) do bloco pelo desvio-padrão ( $s$ ) do bloco. Em seguida, calcula-se a amplitude reescalada da série através do valor médio das amplitudes reescaladas de cada bloco.

$$\left(\frac{R}{s}\right)_{\text{série}} = \frac{1}{c} \sum_{i=1}^c \left(\frac{R}{s}\right)_{\text{bloco},c} \quad \text{para } i = 1, 2, 3, \dots, c \quad (4.8)$$

Para um dado conjunto de dados, analisado através de diversas séries de dados, estima-se o coeficiente de Hurst a partir da regressão linear aplicada aos valores de " $R/s$ " e " $n$ ", conforme formulação apresentada na Eq. (4.1).

A Tabela 4.1 apresenta as séries, blocos e amplitudes reescaladas considerando um conjunto de dados com 4800 pontos reescrito em 6 (quatro) séries de dados. Primeiramente são calculadas as amplitude reescaladas de cada bloco da série para em seguida calcular-se a amplitude reescalada da série.

Tabela 4.1 - Séries de Dados em Conjunto de Dados com 4800 pontos

série	blocos na série	tamanho dos blocos (n)	bloco da série	(R/S) do bloco	(R/S) da série	log (R/S) da série	log (n)
a	1	$n_a$ : 4800	1a	$(R/S)_{1a}$	$(R/S)_a$	$\log (R/S)_a$	$\log (n_a)$
b	2	$n_b$ : 2400	1b	$(R/S)_{1b}$	$(R/S)_b$	$\log (R/S)_b$	$\log (n_b)$
			2b	$(R/S)_{2b}$			
c	3	$n_c$ : 1600	1c	$(R/S)_{1c}$	$(R/S)_c$	$\log (R/S)_c$	$\log (n_c)$
			2c	$(R/S)_{2c}$			
			3c	$(R/S)_{3c}$			
d	4	$n_d$ : 1200	1d	$(R/S)_{1d}$	$(R/S)_d$	$\log (R/S)_d$	$\log (n_d)$
			2d	$(R/S)_{2d}$			
			3d	$(R/S)_{3d}$			
			4d	$(R/S)_{4d}$			
e	6	$n_e$ : 800	1e	$(R/S)_{1e}$	$(R/S)_e$	$\log (R/S)_e$	$\log (n_e)$
			2e	$(R/S)_{2e}$			
			3e	$(R/S)_{3e}$			
			4e	$(R/S)_{4e}$			
			5e	$(R/S)_{5e}$			
			6e	$(R/S)_{6e}$			
f	8	$n_f$ : 600	1f	$(R/S)_{1f}$	$(R/S)_f$	$\log (R/S)_f$	$\log (n_f)$
			2f	$(R/S)_{2f}$			
			3f	$(R/S)_{3f}$			
			4f	$(R/S)_{4f}$			
			5f	$(R/S)_{5f}$			
			6f	$(R/S)_{6f}$			
			7f	$(R/S)_{7f}$			
			8f	$(R/S)_{8f}$			

Na forma gráfica, o coeficiente de Hurst pode ser obtido através do coeficiente angular de da reta de melhor ajuste em um gráfico bi-logarítmico, conforme mostrado na Figura 4.5. O número de pontos no gráfico será igual ao número de séries de dados.

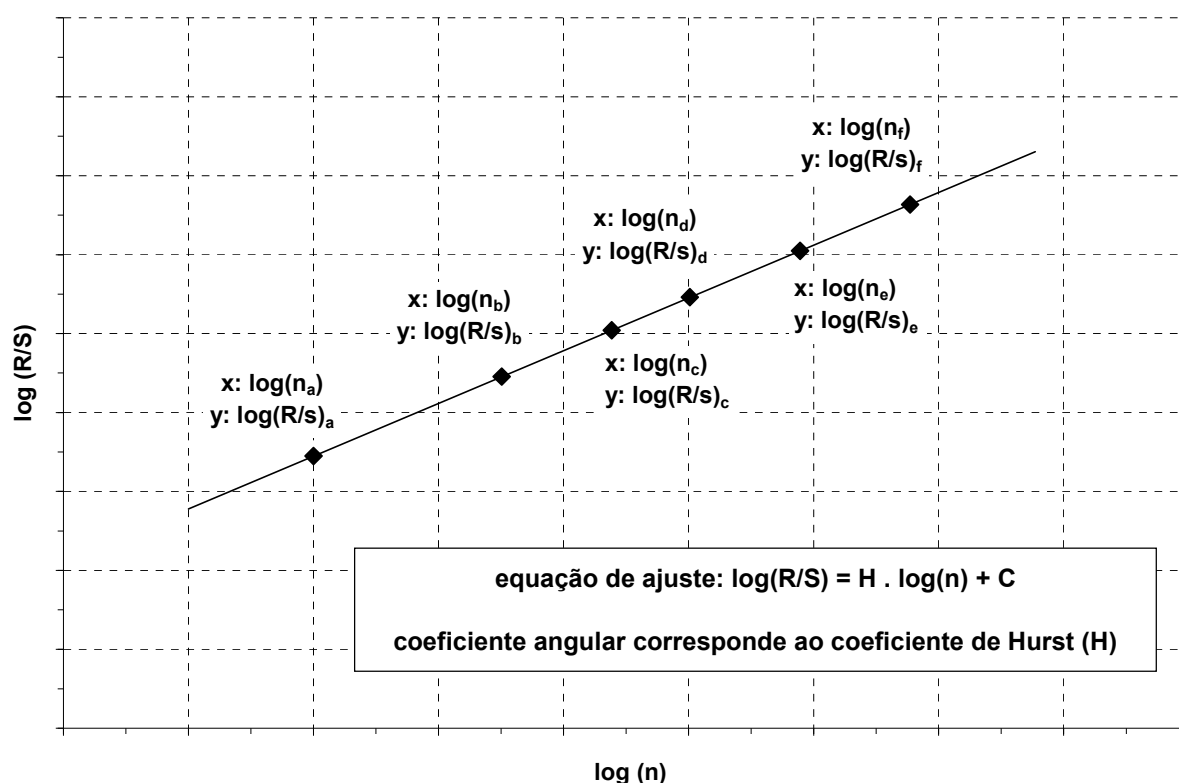


Figura 4.5 - Ajuste Linear para Estimativa do Coeficiente de Hurst

#### 4.4. Coeficiente de Hurst de Conjuntos de Dados Padronizados

Para demonstrar a aplicação do coeficiente de Hurst adotou-se como referência conjuntos de dados padronizados, nos quais o coeficiente de Hurst é previamente conhecido. Adotou-se como referência variáveis com comportamentos senoidal, linear e aleatório, mostrados anteriormente nas Figuras 3.1, 3.2 e 3.3 respectivamente. Aplicando o método estatístico de Hurst em cada conjunto padronizado, considerando 10 (dez) séries de dados, obtém-se os resultados conforme as tabelas e figuras a seguir.

Tabela 4.2 - Amplitudes Reescaladas para Comportamento Senoidal

série	blocos na série	tamanho dos blocos (n)	log (n)	log (R/S)
1	1	4800	3,681	1,653
2	2	2400	3,380	1,653
3	3	1600	3,204	1,653
4	4	1200	3,079	1,653
5	6	800	2,903	1,653
6	8	600	2,778	1,653
7	12	400	2,602	1,653
8	16	300	2,477	1,652
9	24	200	2,301	1,652
10	48	100	2,000	1,651

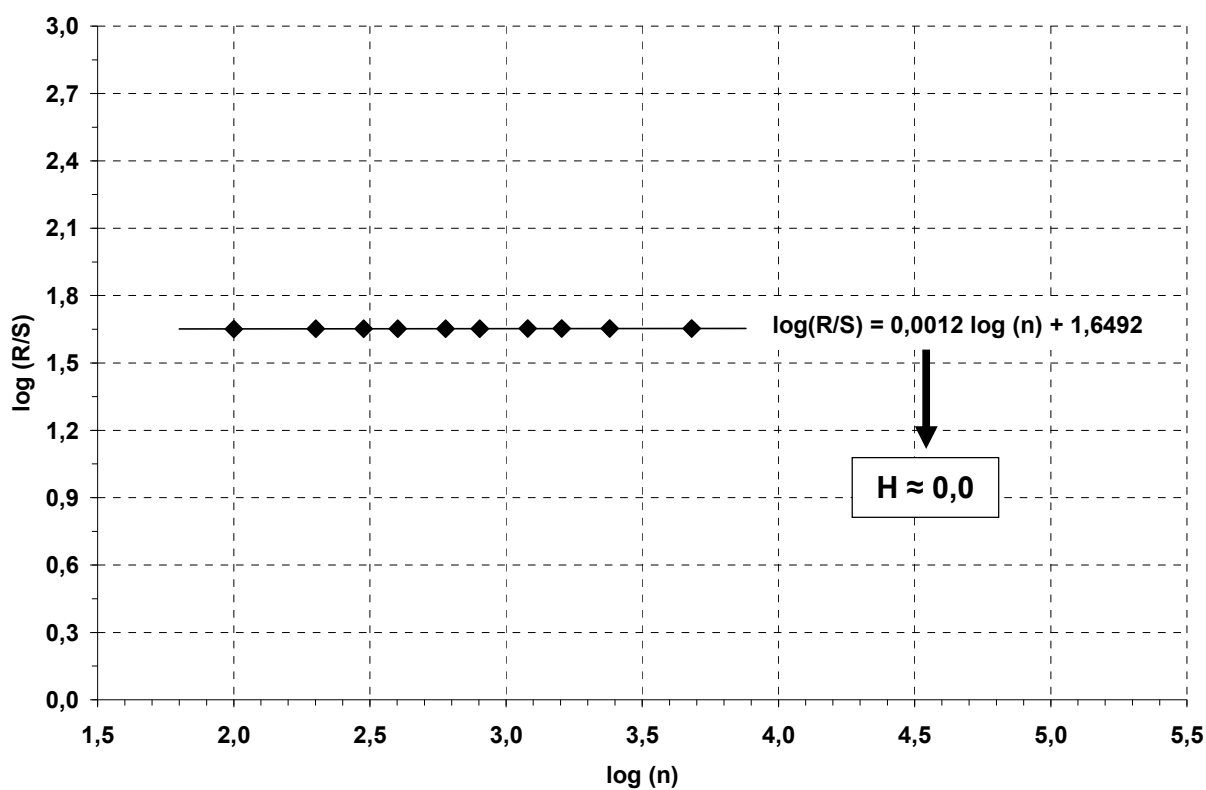


Figura 4.6 - Coeficiente de Hurst para Comportamento Senoidal  
(ver Figura 4.1)

Tabela 4.3 - Amplitudes Reescaladas para Comportamento Linear

série	blocos na série	tamanho dos blocos (n)	log (n)	log (R/S)
1	1	4800	3,681	3,318
2	2	2400	3,380	3,017
3	3	1600	3,204	2,840
4	4	1200	3,079	2,716
5	6	800	2,903	2,539
6	8	600	2,778	2,414
7	12	400	2,602	2,238
8	16	300	2,477	2,113
9	24	200	2,301	1,936
10	48	100	2,000	1,634

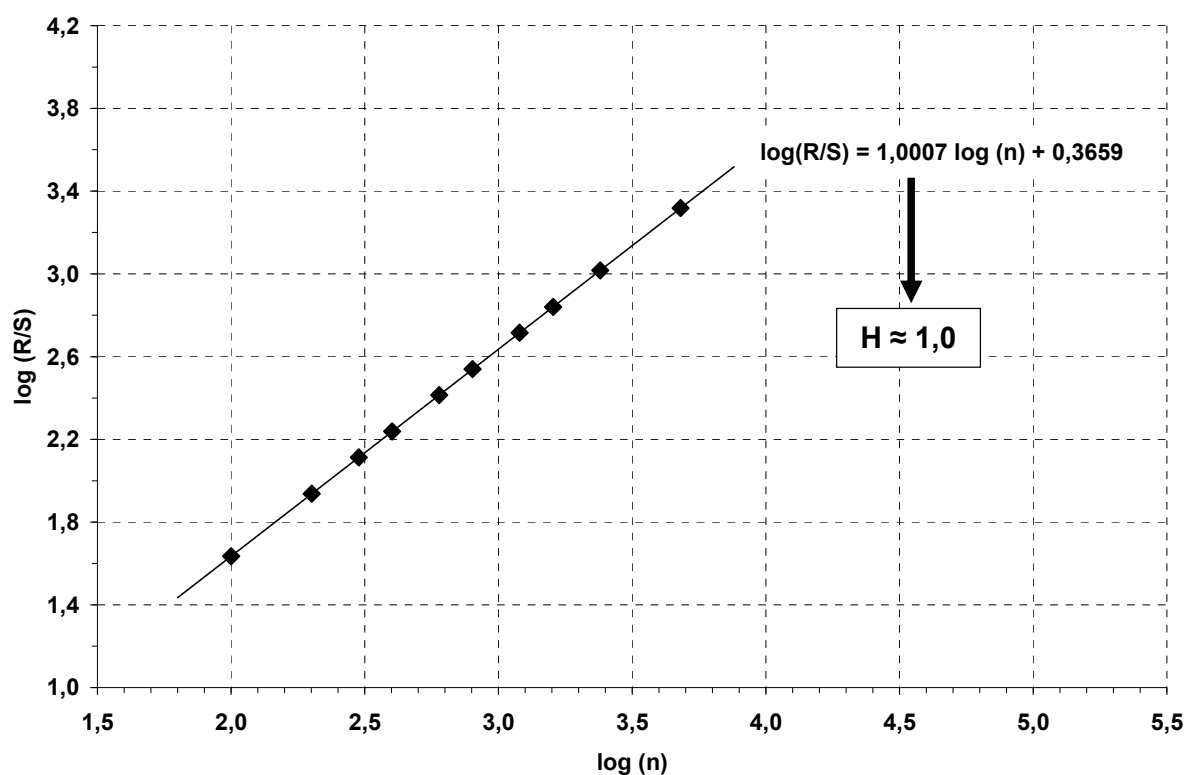


Figura 4.7 - Coeficiente de Hurst para Comportamento Linear  
(ver Figura 4.2)

Tabela 4.4 - Amplitudes Reescaladas para Comportamento Aleatório

série	blocos na série	tamanho dos blocos (n)	log (n)	log (R/S)
1	1	4800	3,681	1,922
2	2	2400	3,380	1,745
3	3	1600	3,204	1,638
4	4	1200	3,079	1,556
5	6	800	2,903	1,447
6	8	600	2,778	1,414
7	12	400	2,602	1,348
8	16	300	2,477	1,309
9	24	200	2,301	1,215
10	48	100	2,000	1,050

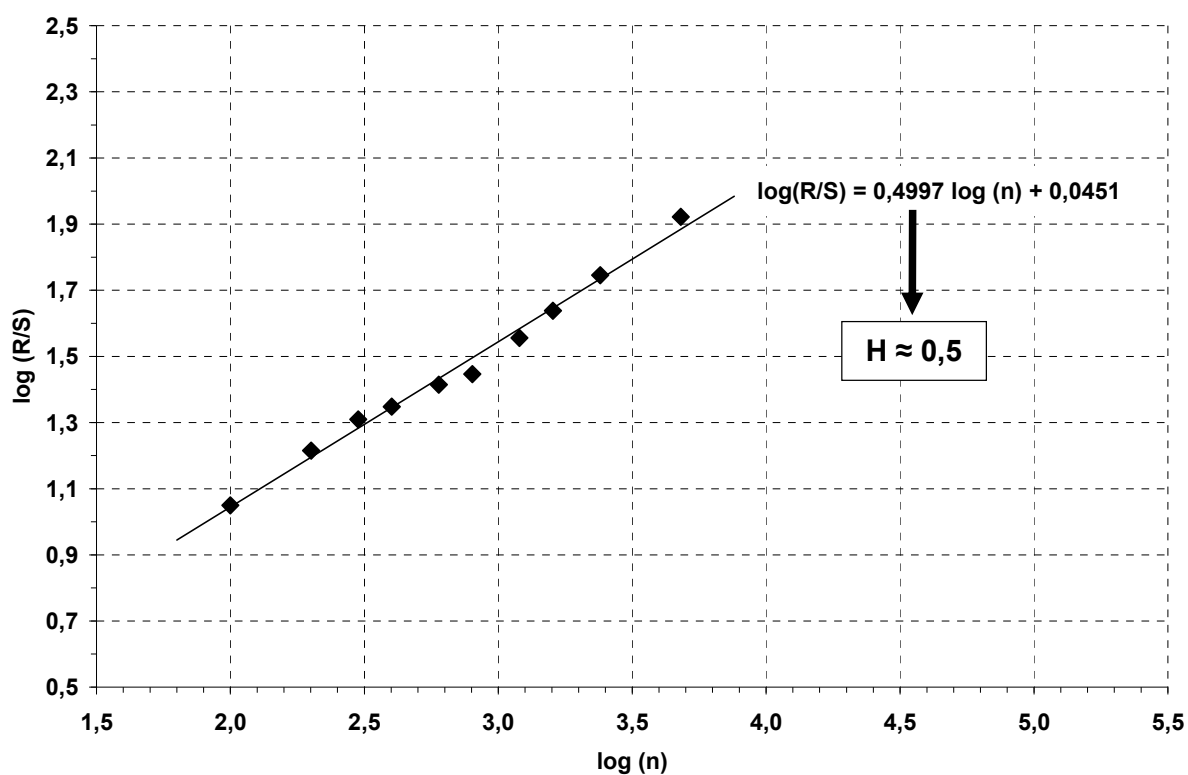


Figura 4.8 - Coeficiente de Hurst para Comportamento Aleatório  
(ver Figura 4.3)

#### **4.5. Número de Séries de Dados e Fator de Escala de Análise**

No método estatístico de Hurst o número de séries de dados na qual um conjunto de dados pode ser reescrito e analisado depende do tamanho do menor bloco de dados. De uma forma geral, na medida em que o tamanho do menor bloco de dados diminui, aumenta-se o número de séries de dados na qual o conjunto de dados pode ser analisado.

De acordo com Mansukhani (2012) o tamanho recomendado do menor bloco deve ser maior do que 8 (oito), a fim de fornecer uma boa representação da média e desvio-padrão, e o número recomendado de séries deve ser pelo menos 9 (nove), a fim de permitir boa estimativa do coeficiente pelo método dos mínimos quadrados.

A razão entre o tamanho do conjunto de dados e o tamanho do menor bloco de dados é denominada fator de escala de análise (ELLIS, 2006). O fator de escala é um parâmetro matemático que fornece a indicação do número de série de dados que um conjunto de dados pode ser analisado, independente do tamanho do conjunto de dados. Isso significa que um conjunto de dados com 1000, 10000 ou 100000 pontos e mesmo fator de escala são analisados a partir de um mesmo número de séries. A Tabela 4.5 apresenta o número de séries de dados para diferentes valores de fatores de escala, considerando somente os fatores que implicam em pelo menos 9 (nove) séries.

Deve-se tomar atenção ao escolher o fator de escala de análise para que não ocorra mal-condicionamento dos blocos de dados. Por exemplo: em um conjunto de dados com 1000 pontos pode-se utilizar um fator de escala igual a 100, pois o tamanho do menor bloco será igual a 10 e o número de séries será igual a 9, sendo atendidas ambas as condições de análise. No entanto, nesse mesmo conjunto com 1000 pontos não se pode utilizar um fator de escala igual a 200, pois o tamanho do menor bloco será igual a 5, não atendendo a primeira condição de análise, mesmo que o número de séries seja igual a 12. Adicionalmente, em um conjunto de dados com 1000 pontos não se pode utilizar um fator de escala de 60 e 300, pois os tamanhos dos menores blocos seriam 16,66 e 3,333, respectivamente, os quais não representam valores inteiros de número de pontos.

Tabela 4.5 - Fatores de Escala e Número de Série de Dados

fator de escala	número de series	fator de escala	número de series	fator de escala	número de series	fator de escala	número de series
36	9	196	9	304	10	400	15
48	10	198	12	306	12	405	10
60	12	200	12	308	12	408	16
72	12	204	12	312	16	414	12
80	10	208	10	315	12	416	12
84	12	210	16	320	14	420	24
90	12	216	16	324	15	432	20
96	12	220	12	330	16	440	16
100	9	224	12	336	20	441	9
108	12	225	9	340	12	444	12
112	10	228	12	342	12	448	14
120	16	234	12	348	12	450	18
126	12	240	20	350	12	456	16
132	12	252	18	352	12	460	12
140	12	256	9	360	24	462	16
144	15	260	12	364	12	464	10
150	12	264	16	368	10	468	18
156	12	270	16	372	12	476	12
160	12	272	10	378	16	480	24
162	10	276	12	380	12	486	12
168	16	280	16	384	16	490	12
176	10	288	18	390	16	492	12
180	18	294	12	392	12	496	10
192	14	300	18	396	18	500	12



#### 4.6. Considerações para Estimativa do Coeficiente de Hurst

A determinação do coeficiente de Hurst de um conjunto de dados se baseia na análise desse conjunto a partir de séries e blocos de dados. Como apresentado anteriormente, o número de séries de dados será função do fator de escala de análise e esse fator de escala irá definir o tamanho do menor bloco de dados.

Para um dado conjunto de dados, analisando esse conjunto utilizando diferentes fatores de escala é esperado que o valor do coeficiente de Hurst sofra pequenas alterações, pois alteram-se os parâmetros estatísticos implícitos ao método estatístico, como médias, desvios-padrão e amplitudes reescaladas em cada bloco e séries de dados. Isso significa que um conjunto de dados com 4800 pontos analisado a partir de um fator de escala de 48 (i.e, tamanho do menor bloco igual a 100) irá fornecer um valor de coeficiente de Hurst que será muito próximo (mas não igual) ao coeficiente obtido caso esse conjunto fosse analisado a partir de um fator de escala de 480 (i.e, tamanho do menor bloco igual a 10).

Para demonstrar o efeito do fator de escala na determinação do coeficiente de Hurst utiliza-se como referência o comportamento da variável aleatória mostrado na Figura 4.3. O conjunto de dados da variável aleatória possui 4800 pontos e esse conjunto pode ser analisado com diferentes fatores de escala para determinação dos respectivos valores dos coeficientes de Hurst. A fim de atender aos critérios de análises, adotou-se 12 (doze) fatores de escala: 48, 60, 80, 120, 150, 160, 200, 240, 300, 320, 400 e 480. O número de séries de dados e o tamanho do menor bloco de dados para cada fator de escala são apresentados na Tabela 4.6. A Tabela 4.6 e a Figura 4.9 apresentam os resultados dos coeficientes de Hurst obtidos a partir da análise desse conjunto com diferentes fatores de escala.

Analisando os resultados verifica-se uma pequena variação do coeficiente de Hurst para diferentes fatores de escala. Isso ocorre pois o número de séries utilizadas na regressão linear é diferente. A Figura 4.10 mostra os ajustes lineares para os fatores de escala 480 (24 séries) e 48 (10 séries). A diferença entre os valores dos coeficientes de Hurst nas regressões ocorrem pois estas são realizadas a partir de número de pontos (número de séries) diferentes.

Tabela 4.6 - Blocos e Coeficiente de Hurst em função do Fator de Escala

fator de escala	número de séries	tamanho dos blocos (n)	coeficiente de Hurst (H)
48	10	100	0,4997
60	12	80	0,4949
80	10	60	0,5042
120	16	40	0,4980
150	12	32	0,5075
160	12	30	0,5075
200	12	24	0,5079
240	20	20	0,5061
300	18	16	0,5083
320	14	15	0,5150
400	15	12	0,5181
480	24	10	0,5160

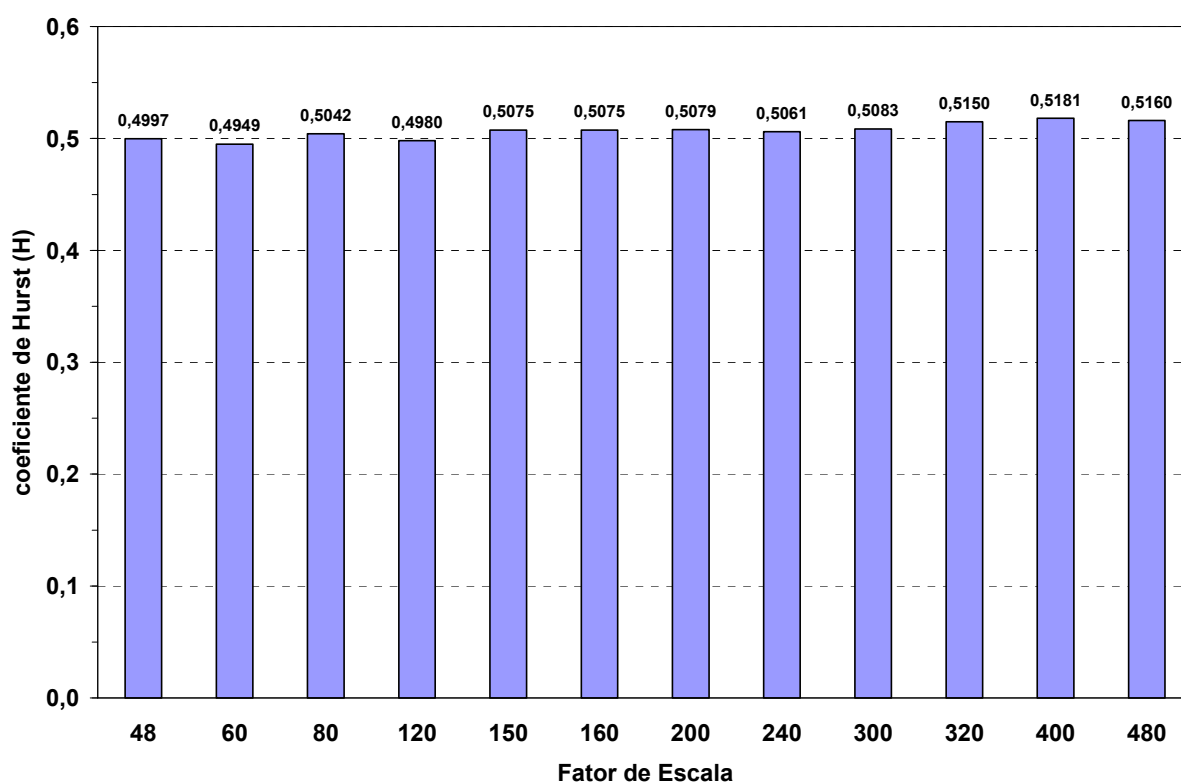


Figura 4.9 - Coeficiente de Hurst em função do Fator de Escala

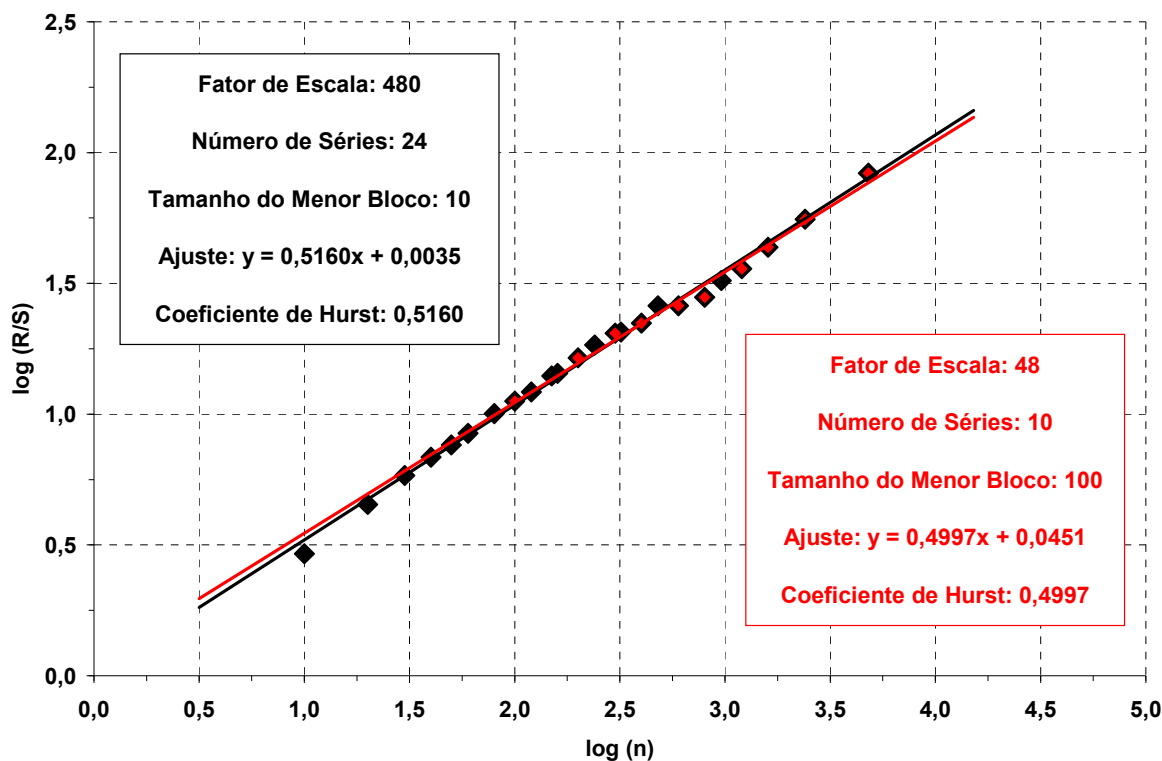


Figura 4.10 - Comparação de Ajustes para Fatores de Escala de 48 e 480

#### 4.7. Aplicação do Método de Hurst em Impedância Eletromecânica

Dentro da proposta desse trabalho de tese propõem-se utilizar o método estatístico de Hurst para determinar o coeficiente de Hurst de assinaturas de impedância e correlacionar esse coeficiente às métricas de dano já existentes na literatura. De forma conceitual, os fenômenos a serem analisados são as assinaturas de impedância em diferentes condições de ensaio e cada assinatura de impedância será tratada como um conjunto de dados.

As informações relevantes para aplicação do método estatístico de Hurst em assinaturas de impedância são: (i) o número de pontos que formam a assinatura de impedância e (ii) os valores de impedância resistiva em cada ponto da assinatura. Em termos práticos, o valor da frequência em cada ponto da assinatura de impedância não é relevante, mas sim que a diferença de frequência entre dois pontos consecutivos da assinatura seja constante (i.e, resolução em frequência constante em toda a assinatura).

#### 4.7.1. Coeficiente de Hurst de Assinaturas de Impedância

Para demonstrar a aplicação do método de Hurst em assinaturas de impedância, a Figura 4.11 mostra uma assinatura de referência, obtida por um PZT colado em uma viga de alumínio sem dano. A faixa de frequência da assinatura é de 20 a 180kHz, com 16000 pontos, 128 médias por ponto e resolução em frequência de 10Hz por ponto. A Tabela 4.7 e a Figura 4.11 apresentam os resultados do coeficiente de Hurst estimado para a assinatura considerando um fator de escala de 200: 12 (doze) séries de dados e tamanho do menor bloco de 80 pontos.

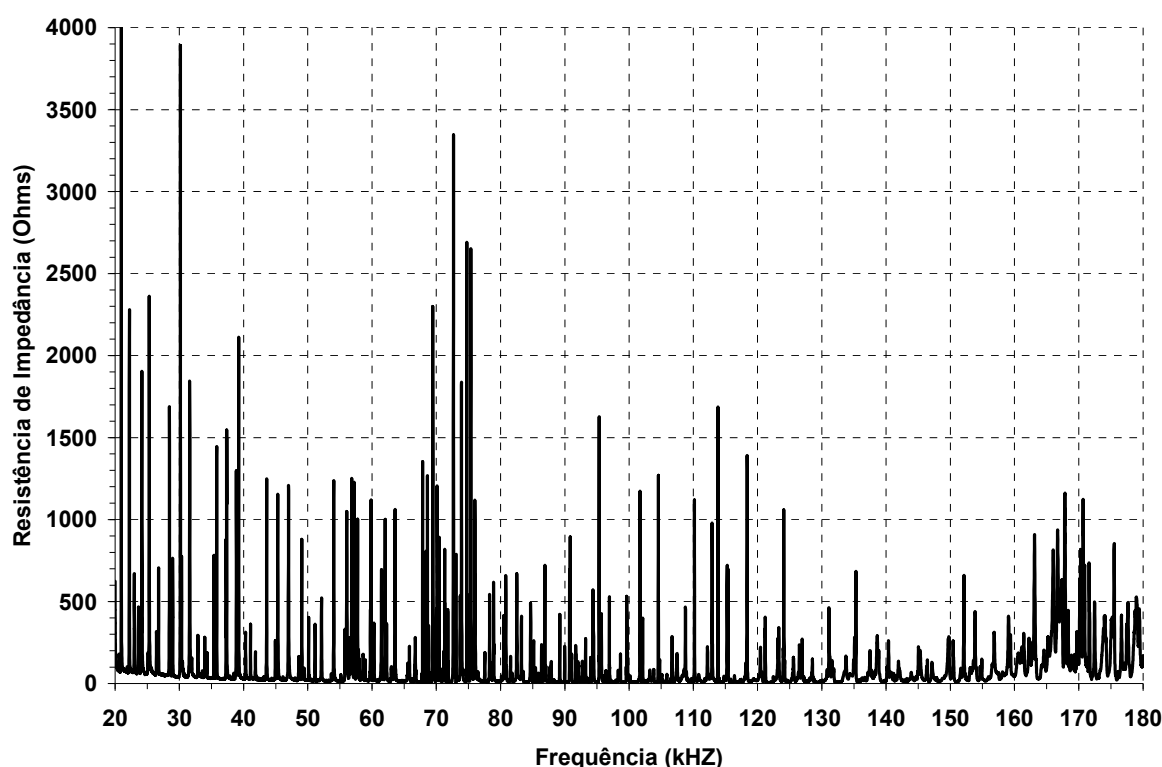


Figura 4.11 - Assinatura de Impedância de 20 a 180kHz @ 16000 pontos

O método de Hurst aplicado nesta assinatura mostra que os valores de resistência seguem um comportamento quase persistente de decaimento. De acordo com a interpretação do coeficiente de Hurst obtido ( $H$  igual a 0,8) e conforme mostrado na Figura 4.11, os valores de pico de resistência de impedância seguem um padrão de decaimento na medida em que se aumenta a frequência.

Tabela 4.7 - Método de Hurst para Assinatura de 20 a 180kHz

série	blocos na série	tamanho dos blocos (n)	log (n)	log (R/S)
1	1	16000	4,204	3,282
2	2	8000	3,903	3,041
3	4	4000	3,602	2,655
4	5	3200	3,505	2,464
5	8	2000	3,301	2,293
6	10	1600	3,204	2,242
7	20	800	2,903	2,022
8	25	640	2,806	1,953
9	40	400	2,602	1,853
10	50	320	2,505	1,795
11	100	160	2,204	1,624
12	200	80	1,903	1,404

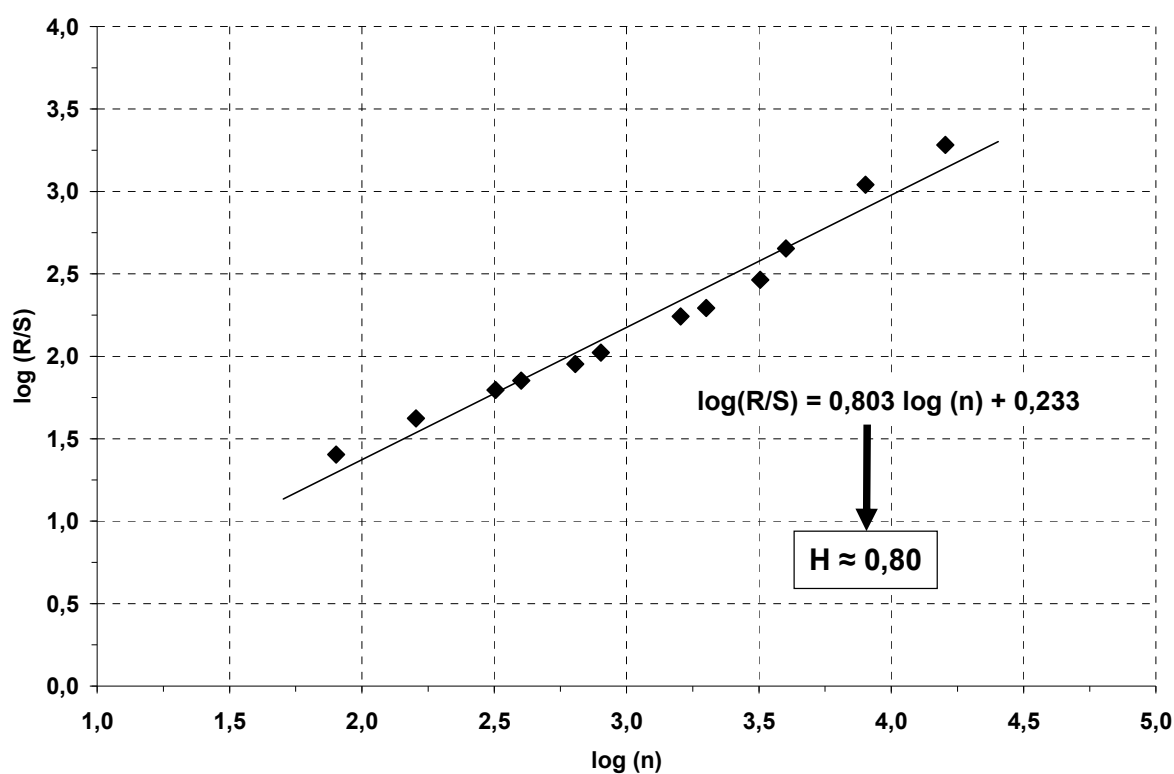


Figura 4.12 - Coeficiente de Hurst para Assinatura de 20 a 180kHz

Uma forma alternativa de analisar as assinaturas de impedância é reduzir uma ampla faixa de frequência em faixas de frequência menores, mas de mesma resolução em frequência. Em termos práticos, a redução da faixa de frequência implica na divisão da assinatura original em assinaturas reduzidas, cada uma com menor número de pontos em relação à assinatura original. No caso da assinatura de referência, a ampla faixa de frequência de 20 a 180kHz, largura de 160kHz e 16000 pontos pode ser dividida em quatro faixas reduzidas de 40kHz cada, dando origem a quatro assinaturas de impedância reduzidas. Dessa forma, cada assinatura reduzida passa a ter 4000 pontos. Em cada assinatura reduzida aplica-se o método de Hurst a fim de avaliar o coeficiente em cada faixa de frequência, conforme figuras a seguir.

Para garantir compatibilidade no método estatístico, a determinação do coeficiente de Hurst das assinaturas reduzidas deve ser realizada considerando o mesmo fator de escala da assinatura original: fator de escala de 200 (i.e, 12 séries de dados e tamanho do menor bloco de 20 em cada assinatura reduzida). Os coeficientes de Hurst das assinaturas reduzidas são apresentados na Tabela 4.8.

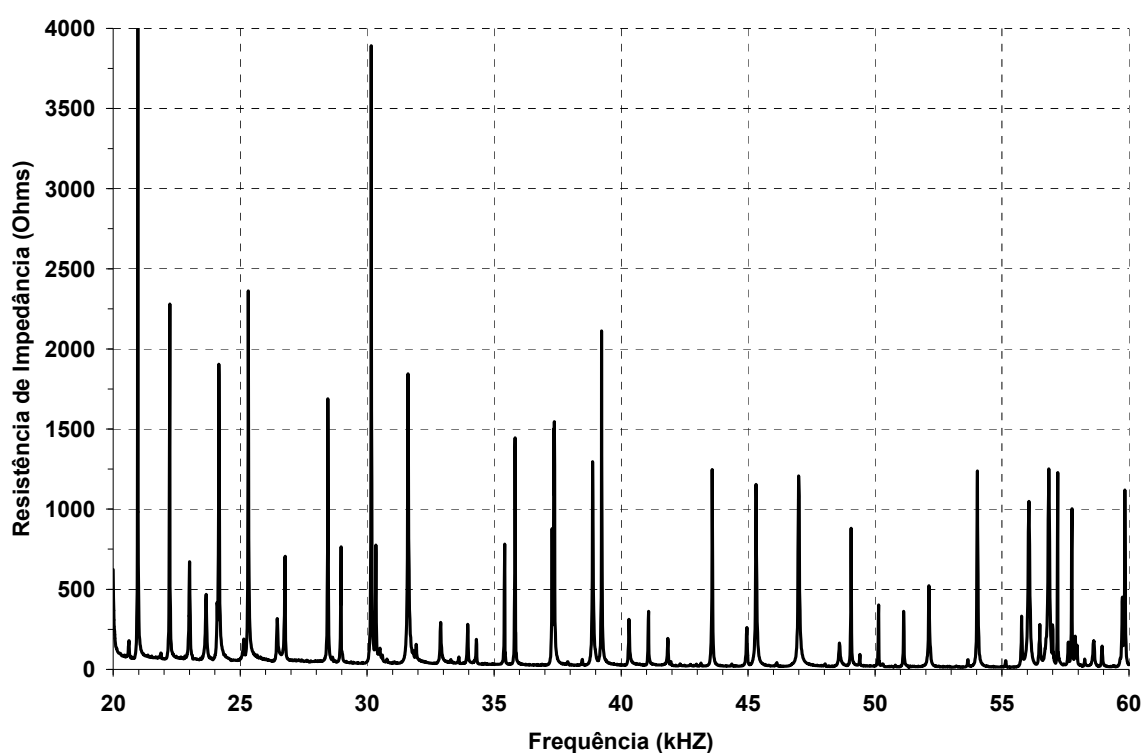


Figura 4.13 - Assinatura de Impedância de 20 a 60kHz @ 4000 pontos

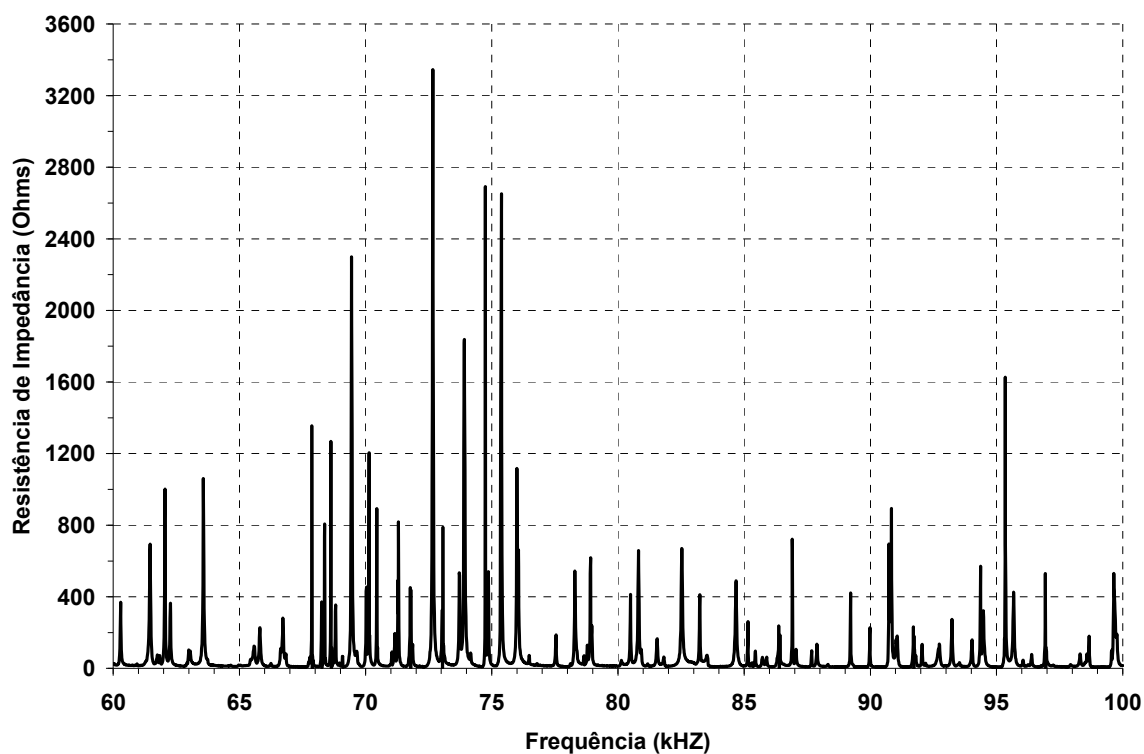


Figura 4.14 - Assinatura de Impedância de 60 a 100kHz @ 4000 pontos

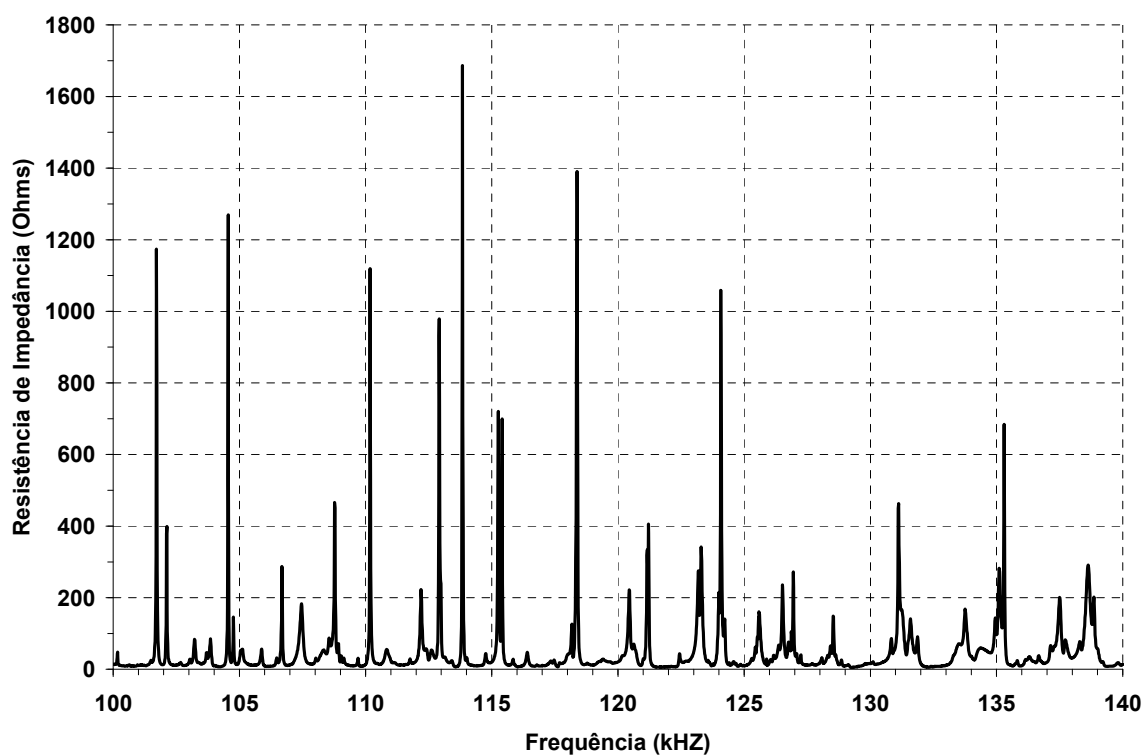


Figura 4.15 - Assinatura de Impedância de 100 a 140kHz @ 4000 pontos

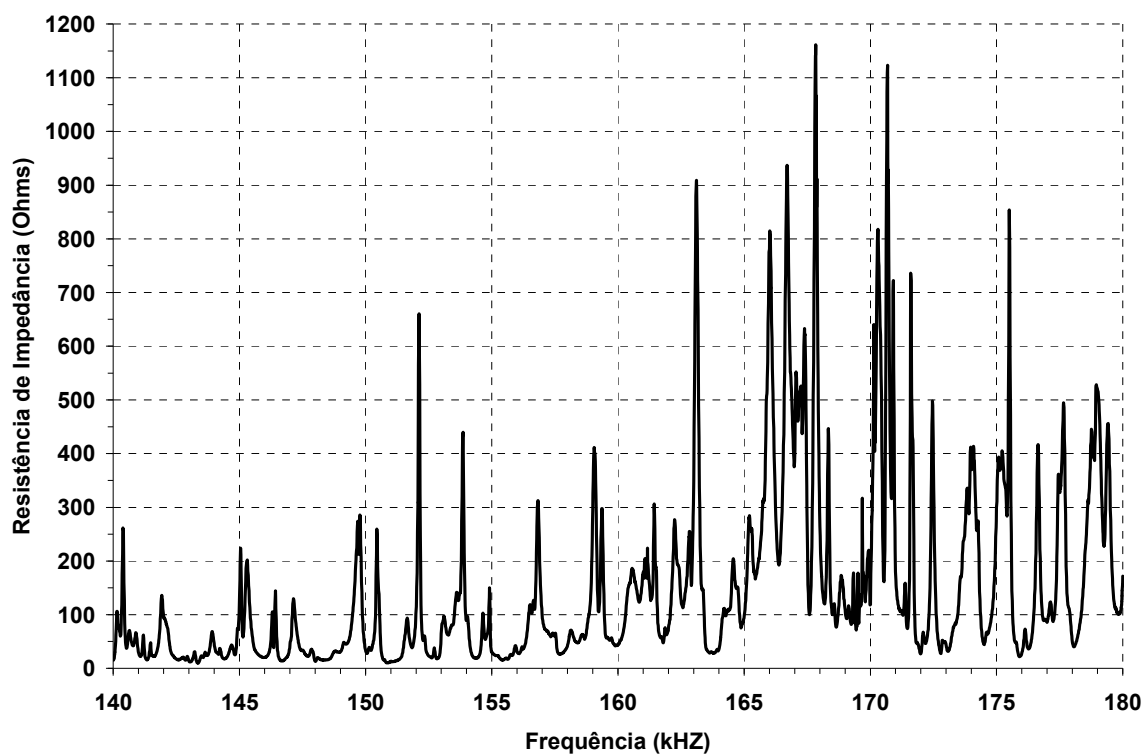


Figura 4.16 - Assinatura de Impedância de 140 a 180kHz @ 4000 pontos

Tabela 4.8 - Coeficientes de Hurst para Assinaturas Original e Reduzidas

faixa de frequência	número de pontos	coeficiente de Hurst
20 a 180kHz	16000	0,8031
20 a 60kHz	4000	0,6612
60 a 100kHz	4000	0,6723
100 a 140kHz	4000	0,5677
140 a 180kHz	4000	0,8265

Analisando os valores obtidos, verifica-se que o coeficiente de Hurst das assinaturas reduzidas são diferentes do valor obtido para a assinatura original e também são diferentes entre si. A mudança no coeficiente de Hurst indica uma mudança de comportamento dos valores de resistência de impedância nas diferentes faixas de frequência de análise.



Na assinatura de impedância utilizada como referência pode-se verificar que os valores de resistência de impedância, bem como a alternância de picos e vales, tendem a possuir comportamentos ora mais aleatório (três das quatro faixas) ora mais persistente (uma das quatro faixas) para diferentes faixas de frequência.

As análises de Hurst a partir de assinaturas de impedância em diferentes condições de ensaios (por exemplo, temperatura, número de pontos e número de médias) devem ser realizadas sempre nas mesmas faixas de frequência e utilizando o mesmo fator de escala de análise, a fim de refletir a real mudança de comportamento somente em relação às mudanças na condição de ensaio.

#### **4.7.2. Efeito da Compensação de Temperatura no Coeficiente de Hurst**

O método estatístico de Hurst é utilizado para analisar a tendência de comportamento de um dado fenômeno, o qual corresponde aos padrões de aumento e decréscimo da variável de interesse ao longo do conjunto de dados. Em relação às assinaturas de impedância, o comportamento da assinatura corresponde aos padrões de aumento e decréscimo da impedância resistiva em função da frequência. Como já apresentado, o processo de compensação de temperatura promove deslocamentos horizontais e verticais nas amplitudes de impedância. No entanto, o comportamento das amplitudes não sofre alteração, não devendo afetar significativamente o coeficiente de Hurst em uma faixa restrita de deslocamentos.

Para ilustrar e comprovar esse fato, a assinatura de impedância apresentada na Figura 4.15 é propositalmente deslocada horizontalmente e verticalmente a fim de simular um processo de compensação de temperatura, permitindo determinar e analisar os coeficientes de Hurst das assinaturas deslocadas. A faixa de deslocamento horizontal corresponde de -50 a +50 pontos em frequência, em intervalos de 10 pontos (cada ponto em frequência corresponde a 10Hz). A faixa de deslocamento vertical corresponde de -50 a +50 valores de impedância resistiva, em intervalos de 10 valores (cada valor de impedância corresponde a  $0,1\Omega$ ). A Tabela 4.9 e a Figura 4.17 fornecem os valores do coeficiente de Hurst para cada combinação de deslocamentos.

Tabela 4.9 - Coeficientes de Hurst para Assinaturas Deslocadas

desloc. vertical	deslocamento horizontal da assinatura										
	-50	-40	-30	-20	-10	0	+10	+20	+30	+40	+50
-50	0,8258	0,8259	0,8261	0,8263	0,8263	0,8265	0,8266	0,8265	0,8264	0,8264	0,8264
-40	0,8258	0,8259	0,8261	0,8263	0,8263	0,8265	0,8266	0,8265	0,8264	0,8264	0,8264
-30	0,8258	0,8259	0,8261	0,8263	0,8263	0,8265	0,8266	0,8265	0,8264	0,8264	0,8264
-20	0,8258	0,8259	0,8261	0,8263	0,8263	0,8265	0,8266	0,8265	0,8264	0,8264	0,8264
-10	0,8258	0,8259	0,8261	0,8263	0,8263	0,8265	0,8266	0,8265	0,8264	0,8264	0,8264
0	0,8258	0,8259	0,8261	0,8263	0,8263	0,8265	0,8266	0,8265	0,8264	0,8264	0,8264
+10	0,8258	0,8259	0,8261	0,8263	0,8263	0,8265	0,8266	0,8265	0,8264	0,8264	0,8264
+20	0,8258	0,8259	0,8261	0,8263	0,8263	0,8265	0,8266	0,8265	0,8264	0,8264	0,8264
+30	0,8258	0,8259	0,8261	0,8263	0,8263	0,8265	0,8266	0,8265	0,8264	0,8264	0,8264
+40	0,8258	0,8259	0,8261	0,8263	0,8263	0,8265	0,8266	0,8265	0,8264	0,8264	0,8264
+50	0,8258	0,8259	0,8261	0,8263	0,8263	0,8265	0,8266	0,8265	0,8264	0,8264	0,8264

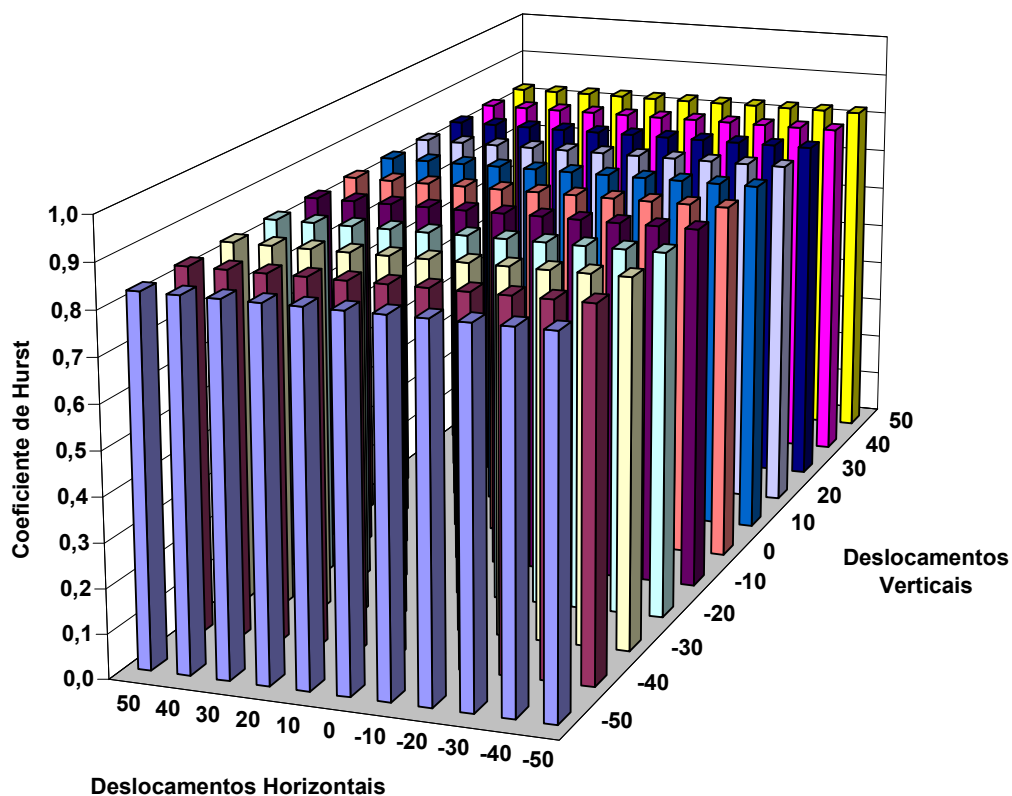


Figura 4.17 - Coeficientes de Hurst das Assinaturas Deslocadas

Analisando os resultados obtidos verifica-se que o deslocamento vertical da assinatura de impedância não altera o seu coeficiente de Hurst. Isso ocorre pois o deslocamento vertical da assinatura de impedância implica no mesmo deslocamento vertical do valor médio e no método estatístico de Hurst os parâmetros estatísticos são referenciados à media. O deslocamento horizontal da assinatura altera o coeficiente de Hurst, mas de forma muito pouco sensível, da ordem da quarta casa decimal. A pequena alteração do coeficiente de hurst ocorre devido a repetição do último valor de impedância resistiva ao se deslocar a assinatura, alterando assim o valor médio de impedância na assinatura, alterando os demais parâmetros estatísticos do método de hurst e consequentemente o coeficiente de Hurst.

De forma geral, a utilização do método estatístico de Hurst nesse trabalho de tese aplicado às assinaturas de impedância visa os seguintes objetivos:

- Avaliar a sensibilidade do coeficiente de Hurst das assinaturas de impedância em função do número de pontos de aquisição em uma dada faixa de frequência. A partir da análise de sensibilidade será definido a melhor relação entre o número de pontos de aquisição e a faixa de frequência de interesse para obtenção das assinaturas de impedância.
- Avaliar a repetibilidade do coeficiente de Hurst das assinaturas de impedância em função do número de assinaturas obtidas e do número de pontos de aquisição em uma dada faixa de frequência. A partir da análise de repetibilidade será definido o número de assinaturas para caracterizar as condições de ensaio.
- Caracterizar o coeficiente de Hurst das assinaturas de impedância em diferentes condições de ensaio para vigas de alumínio, utilizando as assinaturas originais obtidas no analisador de impedância, sem processo de compensação de temperatura.
- Comparar os valores dos coeficientes de Hurst obtidos para assinaturas de impedância em diferentes condições de ensaio, sem presença de dano e com presença de dano, em relação às métricas de dano tradicionais apresentadas na literatura.

## 5.

### APARATO EXPERIMENTAL PARA ANÁLISES DE IMPEDÂNCIA

#### 5.1. Estrutura de Monitoramento e Analisador de Impedância

No desenvolvimento desse trabalho de tese a estrutura física escolhida para estudo foram vigas de alumínio. Para gerar um volume de informação maior a respeito das assinaturas de impedância e permitir análises mais amplas do coeficiente de Hurst e das métricas de dano, foram utilizadas 8 (oito) vigas de alumínio de mesmas dimensões.

As vigas de alumínio possuem 500mm de comprimento, 37mm de largura, 3mm de espessura e o material de fabricação é a liga de alumínio aeronáutica Al2024-T3, conforme mostrado na Figura 5.1. As pastilhas circulares de PZT inseridas em todas as vigas de alumínio são semelhantes e possuem dimensões de 20x0,1mm. As pastilhas são fixadas às vigas de alumínio através de colagem epóxi a uma distância de 100mm de uma das extremidades sobre a linha de centro da pastilha, conforme mostrado na Figura 5.2.



Figura 5.1 - Viga de Alumínio com PZT

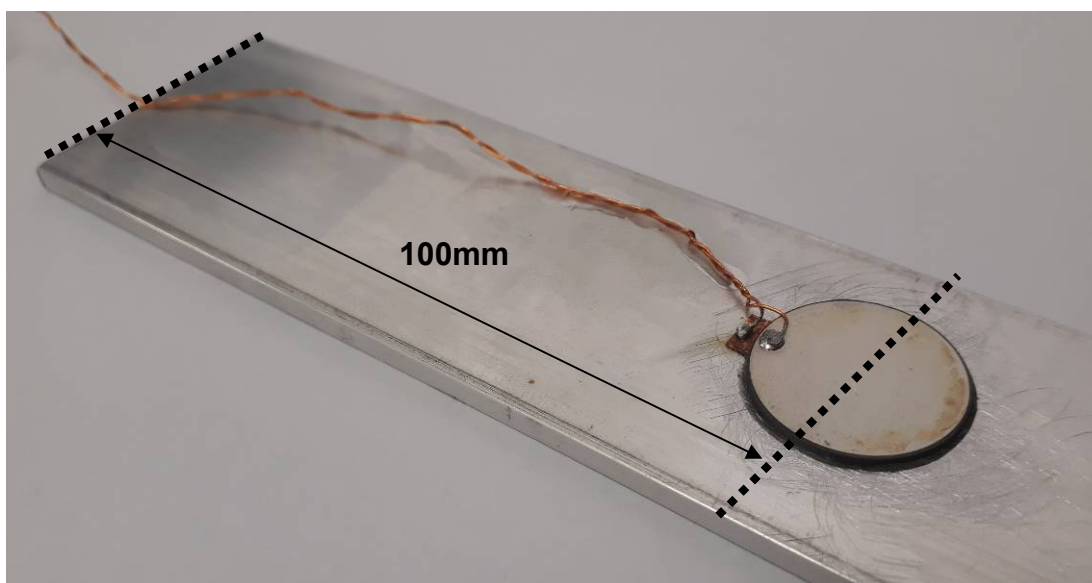


Figura 5.2 - Detalhe da Pastilha Circular de PZT na Viga de Alumínio

Para realização dos ensaios de obtenção das assinaturas de impedância as oito vigas de alumínio foram apoiadas e numeradas sobre um suporte de isopor, confeccionado de forma a garantir a mesma condição de apoio (condição de contorno) para todas as vigas, conforme mostrado na Figura 5.3.



Figura 5.3 - Vigas de Alumínio Montadas no Suporte de Isopor

Para obtenção das assinaturas de impedância em todas as condições de ensaio apresentadas nesse trabalho foi utilizado o equipamento analisador de impedância SySHM desenvolvido no Laboratório de Mecânica de Estruturas (LMEest), mostrado na Figura 5.4. O analisador de impedância possui capacidade de realizar 10k medições em 5min, gerando sinais a uma taxa de 2,86MS/s e realização aquisição a uma taxa de 1,25MS/s. Os sinais de excitação e resposta são gerados e calculados diretamente no hardware (FINZI NETO *et al.*, 2011).



Figura 5.4 - Analisador de Impedância SySHM do LMEest/FEMEC

O analisador de impedância SySHM é conectado a um computador para configuração dos dados de entrada e para armazenamento das assinaturas de impedância. O software de monitoramento e aquisição de dados foi desenvolvido em plataforma Java e é de uso dedicado ao analisador de impedância SySHM.

## 5.2. Montagem Experimental para Ensaios em Temperatura Controlada

Para avaliar o efeito da temperatura sobre as assinaturas de impedância, permitindo análises mais abrangentes referentes ao coeficiente de Hurst e das respectivas métricas de dano, foram realizados ensaios em condições de temperatura controlada.

Nos ensaios com controle de temperatura foi utilizado a câmara de controle climática Espec EPL-4H, Série Platinus, pertencente ao Laboratório de Mecânica de Estruturas (LMEst) da Faculdade de Engenharia Mecânica, mostrada na Figura 5.5. O compartimento interno da câmara climática possui dimensões de 100x900x100cm, totalizando um volume de trabalho de 900L. A faixa de temperatura de operação é de  $-35^{\circ}\text{C}$  a  $180^{\circ}\text{C}$  com variação de  $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ . A taxa de aquecimento é de  $5,2^{\circ}\text{C}/\text{min}$  e a taxa de resfriamento é de  $1,4^{\circ}\text{C}/\text{min}$ . A faixa de umidade relativa é de 10% a 98% com variação de  $\pm 3\%$ . O sistema de controle de temperatura e umidade da câmara realiza o equilíbrio termodinâmico entre temperatura e umidade a fim de atingir os parâmetros de ajuste de operação.



Figura 5.5 - Câmara Climática Espec EPL-4H do LMEst/FEMEC

### 5.3. Montagem Experimental para Ensaios de Dano

Para realização dos ensaios de dano nas vigas de alumínio utilizou-se como representação do dano na estrutura a adição de uma porca de aço inoxidável de diâmetro nominal de 1/4". As porcas de aço foram coladas nas vigas de alumínio através de um adesivo universal a base de cianoacrilato.



As porcas foram posicionadas a 200mm de distância da extremidade das vigas, sobre a linha de centro e na face oposta ao PZT. As porcas foram posicionadas dessa forma para garantir a mesma distância entre elas e o PZT em relação à distância do PZT e a extremidade da viga (100mm da porca ao PZT e 100mm do PZT à extremidade). A Figura 5.6 mostra o detalhe das porcas de aço inoxidável nas vigas de alumínio para a realização dos ensaios de dano.

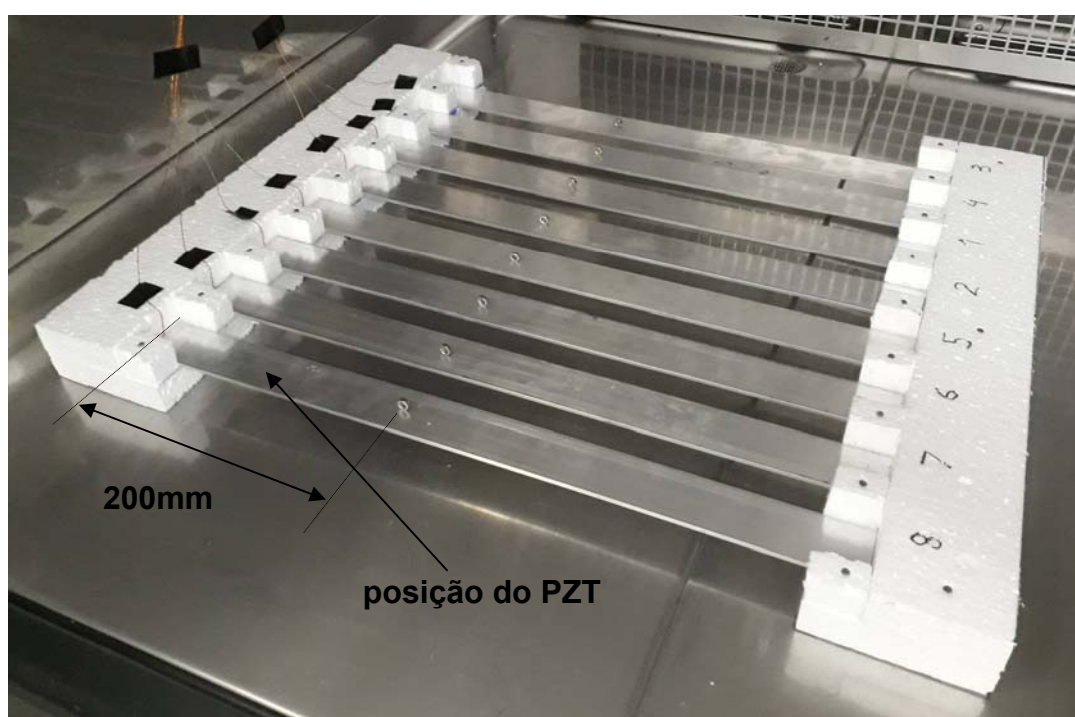


Figura 5.6 - Vigas de Alumínio com Presença de Porcas de Aço

#### 5.4. Programa Computacional para Análise de Resultados

As análises envolvendo o coeficiente de Hurst e as métricas de dano apresentadas nesse trabalho são realizadas a partir das assinaturas de impedância obtidas para os PZT em cada condição de ensaio. O software de monitoramento e aquisição das assinaturas do analisador de impedância SySHM permite salvar as todas as informações referentes às assinaturas de impedância em arquivos de extensão exclusiva .SySHM. Cada condição de ensaio dos PZT representa um único arquivo de salvamento.



O programa computacional utilizado para as análises de resultados foi desenvolvido no software LabVIEW 2012, da National Instruments, registrado através da licença permanente M75X88318, em nome da FEMEC/UFU.

O software LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Electronic Workbench) utiliza uma linguagem de programação visual orientada a objetos, representada por ícones que podem ser conectados de modo a compor o programa através de blocos. O método de programação permite que se crie sub-rotinas (sub-programas) a fim de modularizar a rotina de processamento e permitir execução em partes. A rotina de programação que foi desenvolvida pelo autor para a análise de resultados é dividida em 36 (trinta e seis) sub-rotinas de cálculos para cada etapa das análises.

A rotina simplificada de análise de resultados para os PZT, em cada condição de ensaio, consiste de sete etapas mostradas na Figura 5.7 e Figura 5.8. Primeiramente, os arquivos das assinaturas individuais ".SySHM" (PZT.SySHM) são convertidos em arquivos ".txt" delimitados em colunas (PZT.txt). As assinaturas individuais são combinadas em um único arquivo (PZT\_ORIGINAL.txt) para facilitar a manipulação matricial dos valores de impedância em cada assinatura.

As análises envolvendo o método estatístico de Hurst são realizadas através de sub-rotinas desenvolvidas pelo próprio autor e essas fornecem um arquivo de resultados para os coeficiente de Hurst (PZT\_HURST.txt).

As análises envolvendo às métricas de dano são realizadas através de sub-rotinas também desenvolvidas pelo próprio autor. Primeiramente é definida a assinatura de impedância média (PZT\_ORIGINAL\_MEAN.txt), obtida a partir da média ponto-a-ponto de todas as assinaturas do arquivo combinado. Em seguida realiza-se o processo de compensação de temperatura das assinaturas originais (PZT\_COMPENSATE.txt) a partir da assinatura média. A partir das assinaturas compensadas é definida uma nova assinatura de impedância média (PZT\_COMPENSATE\_MEAN.txt), obtida a partir da média ponto-a-ponto de todas as assinaturas compensadas. As métricas de dano em uma dada condição de ensaio são calculadas a partir das assinaturas compensadas e da assinatura média compensada para essa condição de ensaio, fornecendo um arquivo de resultados para as métricas de dano (PZT\_COMPENSATE\_METRICS).

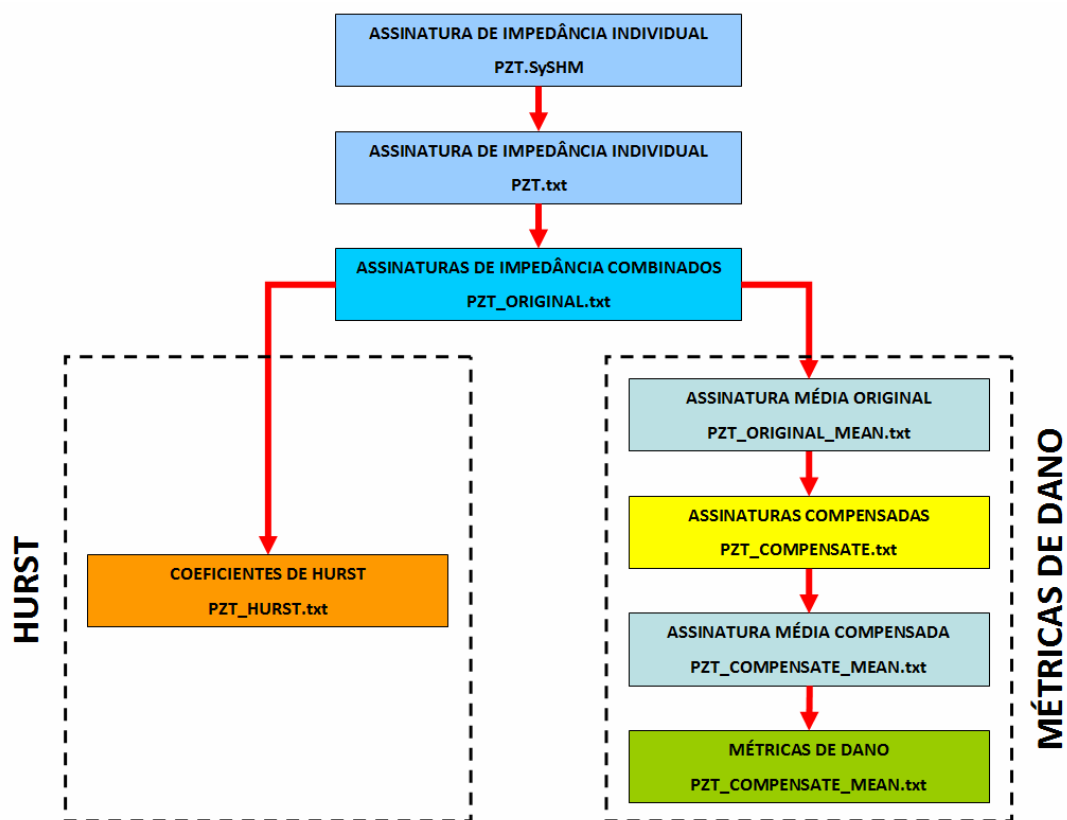


Figura 5.7 - Roteiro Simplificado do Processo de Análise de Resultados

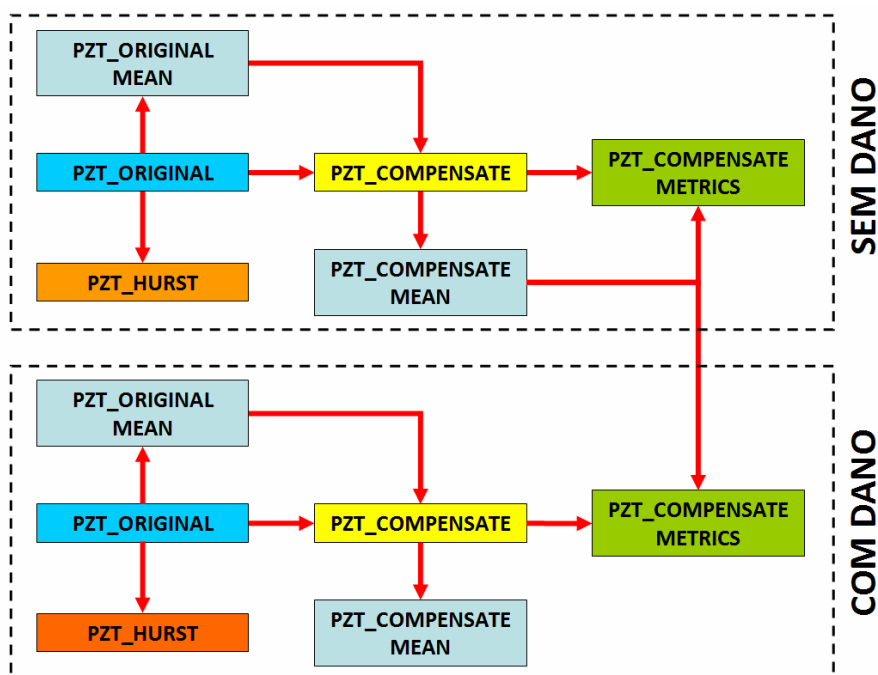


Figura 5.8 - Roteiro do Processo de Análise dos Ensaios de Dano

## 6.

# ANÁLISES PRELIMINARES DO COEFICIENTE DE HURST

### 6.1. Análises de Sensibilidade e Repetibilidade do Coeficiente de Hurst

Para garantir confiabilidade na utilização do coeficiente de Hurst para as análises de dano utilizando assinaturas de impedância (objetivo principal desse trabalho de tese) foram realizados ensaios e análises preliminares da aplicação do coeficiente de Hurst em assinaturas de impedância considerando as 8 (oito) vigas de alumínio do aparato experimental. Os objetivos dessas análises são avaliar e compreender o comportamento do coeficiente de Hurst em função do número de pontos das assinaturas e do número de assinaturas obtidas sequencialmente.

As análises realizadas considerando a variação do número de pontos das assinaturas, em uma dada faixa de frequência, é denominada **análise de sensibilidade**. As análises realizadas considerando a obtenção sequencial de várias assinaturas, em uma dada faixa de frequência, é denominada **análise de repetibilidade**. Em ambas as análises serão utilizadas as assinaturas originais, sem processo de compensação de temperatura das assinaturas. Nas análises será avaliado somente o comportamento do coeficiente de Hurst, sendo assim, não será avaliado nesse momento o comportamento dos valores das métricas de dano.

Para permitir uma compreensão mais ampla sobre a sensibilidade e a repetibilidade do coeficiente de Hurst, ambas as análises serão realizadas em duas condições de controle de temperatura: temperatura ambiente, sem controle de temperatura sobre as vigas de alumínio (e consequentemente, sobre a impedância) e temperatura controlada (temperatura constante) inserindo as vigas de alumínio do aparato experimental em uma câmara de controle climática, simulando quatro temperaturas de operação diferentes.

## **6.2. Sensibilidade do Coeficiente de Hurst em Temperatura Ambiente**

Para avaliar a sensibilidade do coeficiente de Hurst das assinaturas de impedância das vigas de alumínio submetidas a temperatura ambiente foram obtidas assinaturas com diferentes número de pontos, mantendo-se a mesma faixa de frequência. A faixa de frequência escolhida é de 100 a 140kHz. O número de pontos em cada assinatura varia de 1000 a 40000 pontos, conforme especificações apresentadas na Tabela 6.1.

Nos ensaios as vigas de alumínio foram submetidas à temperatura ambiente, sem controle de temperatura. Em cada condição de ensaio foi obtida uma única assinatura de impedância para cada PZT. Em termos gerais, foram obtidas 22 assinaturas para cada PZT, totalizando 176 assinaturas de impedância em um tempo de ensaio da ordem de 4h.

Para atender as condições de análise do método estatístico de Hurst foi definido um fator de escala de 100 para determinação dos coeficientes de Hurst em todas as assinaturas. O valor do fator de escala igual a 100 se deve ao fato da obtenção de assinaturas de impedância contendo 1000 pontos, nas quais não se pode empregar um fator de escala superior devido à restrição do número de pontos em cada bloco de dados (i.e, 1000 pontos, fator de escala igual a 100 e tamanho do menor bloco igual a 10). Para garantir compatibilidade do método de Hurst todas as assinaturas foram analisadas com o mesmo fator de escala.

Os resultados dos coeficientes de Hurst das assinaturas com diferentes número de pontos são apresentados para cada viga de alumínio contendo o respectivo PZT, enumerados de PZT #1 a PZT #8. Nas figuras foram demarcados os valores dos coeficientes de Hurst para cada assinatura com determinado número de pontos, conforme Tabela 6.1.

A partir dos valores dos coeficientes de Hurst obtidos nas assinaturas para cada PZT realizou-se uma análise de inferência estatística para determinar os intervalos de confiança dos valores médios e desvios-padrão. A análise estatística foi realizada considerando intervalos com nível de confiança de 95%. Os resultados para cada PZT são apresentados na Tabela 6.2.

Tabela 6.1 - Ensaios de Sensibilidade à Temperatura Ambiente

<b>condição</b>	<b>número de pontos</b>	<b>temperatura ambiente</b>	<b>tempo de aquisição para cada PZT</b>
1	1000	23,2 ± 1°C	11s
2	2000	23,2 ± 1°C	21s
3	3000	23,5 ± 1°C	32s
4	4000	23,5 ± 1°C	42s
5	5000	23,6 ± 1°C	53s
6	6000	23,6 ± 1°C	63s
7	7000	23,8 ± 1°C	1min 14s
8	8000	23,9 ± 1°C	1min 24s
9	9000	23,9 ± 1°C	1min 35s
10	10000	24,2 ± 1°C	1min 45s
11	11000	24,2 ± 1°C	1min 56s
12	12000	24,3 ± 1°C	2min 6s
13	13000	24,3 ± 1°C	2min 17s
14	14000	24,4 ± 1°C	2min 27s
15	15000	24,6 ± 1°C	2min 38s
16	16000	24,6 ± 1°C	2min 48s
17	17000	24,8 ± 1°C	2min 59s
18	18000	24,8 ± 1°C	3min 9s
19	19000	25,0 ± 1°C	3min 20s
20	20000	25,0 ± 1°C	3min 30s
21	30000	26,0 ± 1°C	5min 15s
22	40000	26,8 ± 1°C	7 min

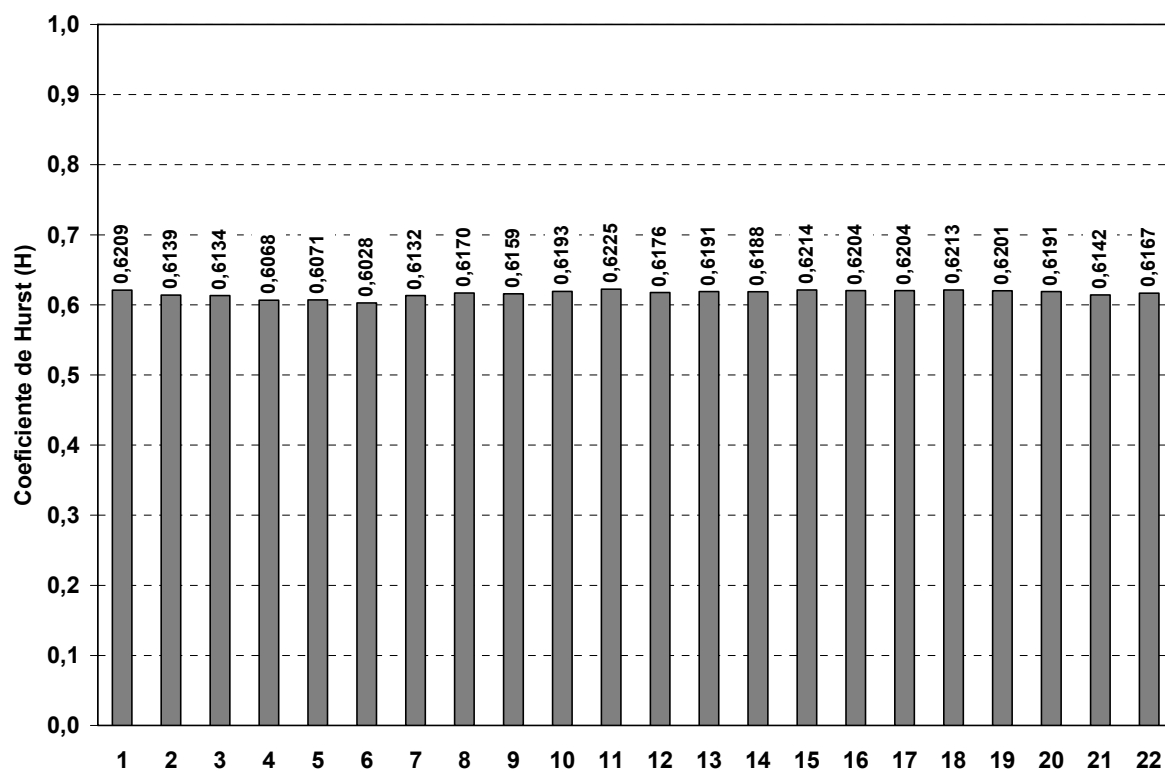


Figura 6.1 - Sensibilidade do Coeficiente de Hurst PZT #1

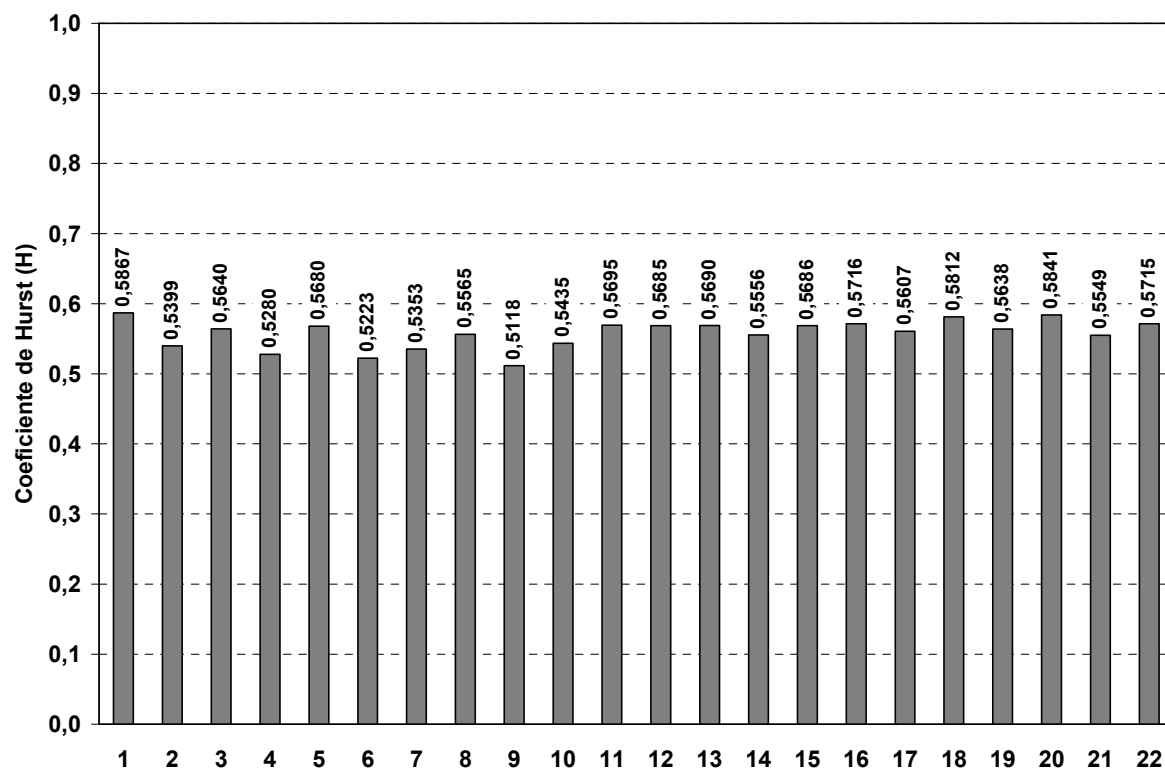


Figura 6.2 - Sensibilidade do Coeficiente de Hurst PZT #2

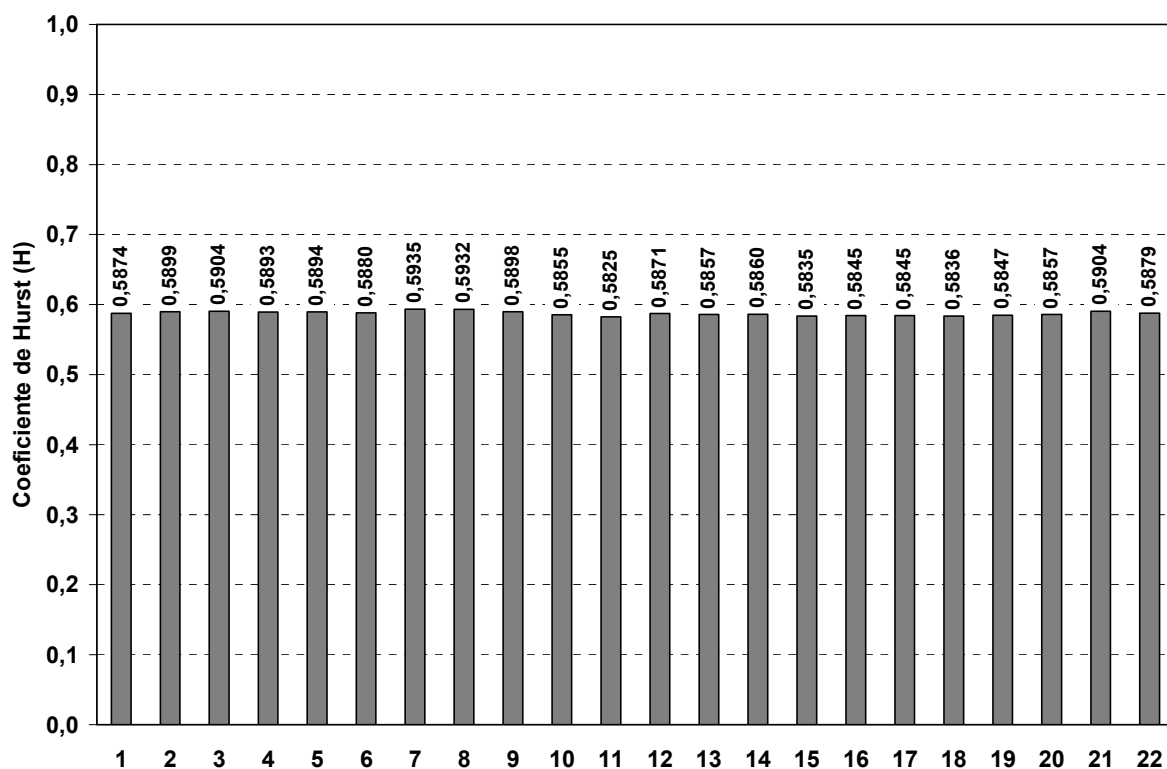


Figura 6.3 - Sensibilidade do Coeficiente de Hurst PZT #3

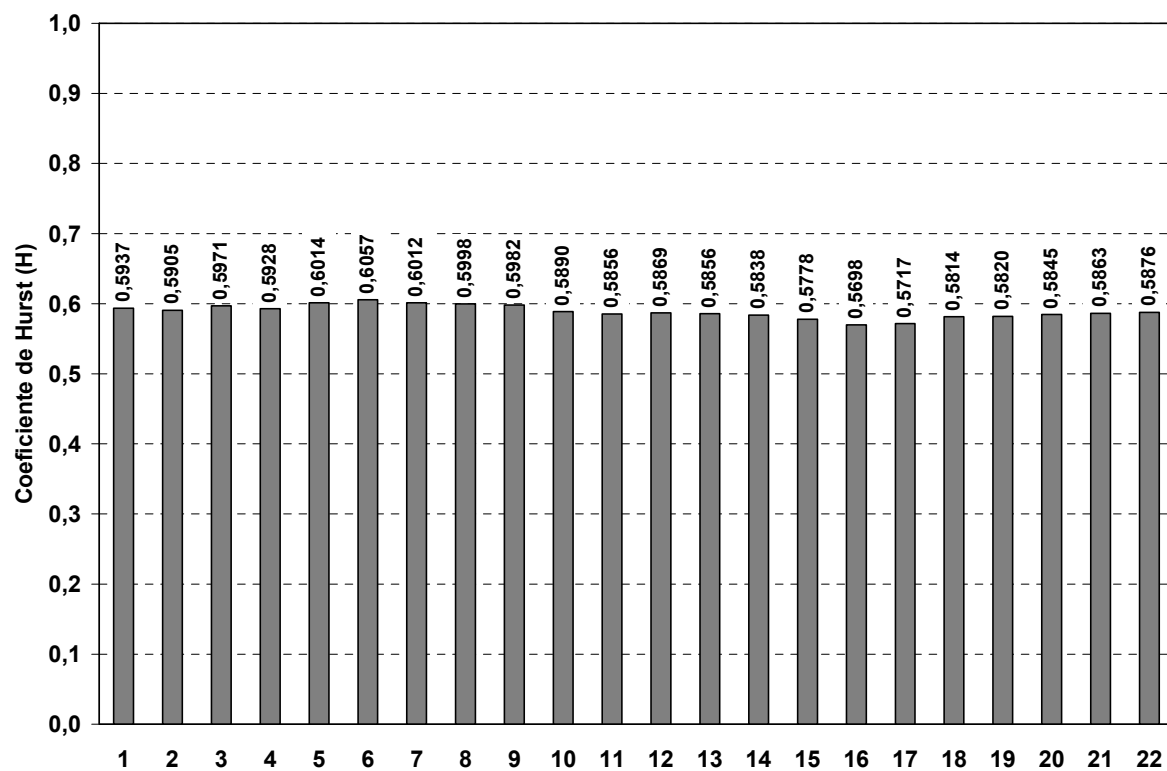


Figura 6.4 - Sensibilidade do Coeficiente de Hurst PZT #4

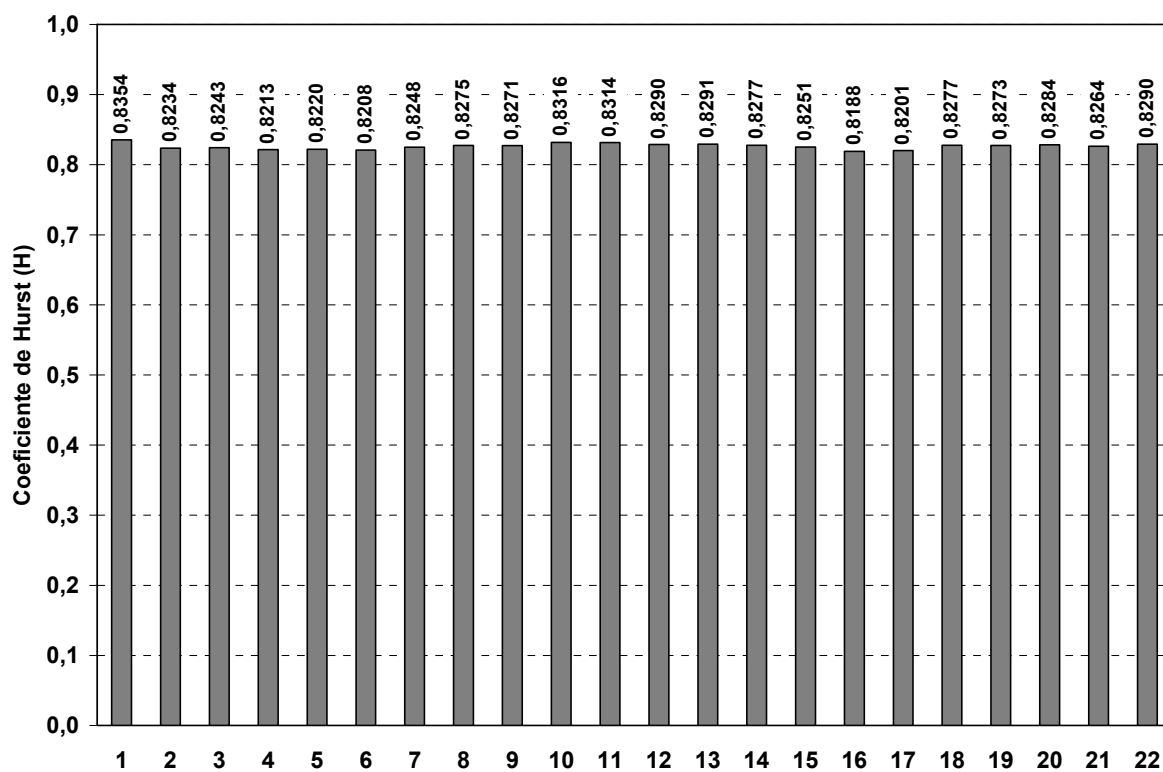


Figura 6.5 - Sensibilidade do Coeficiente de Hurst PZT #5

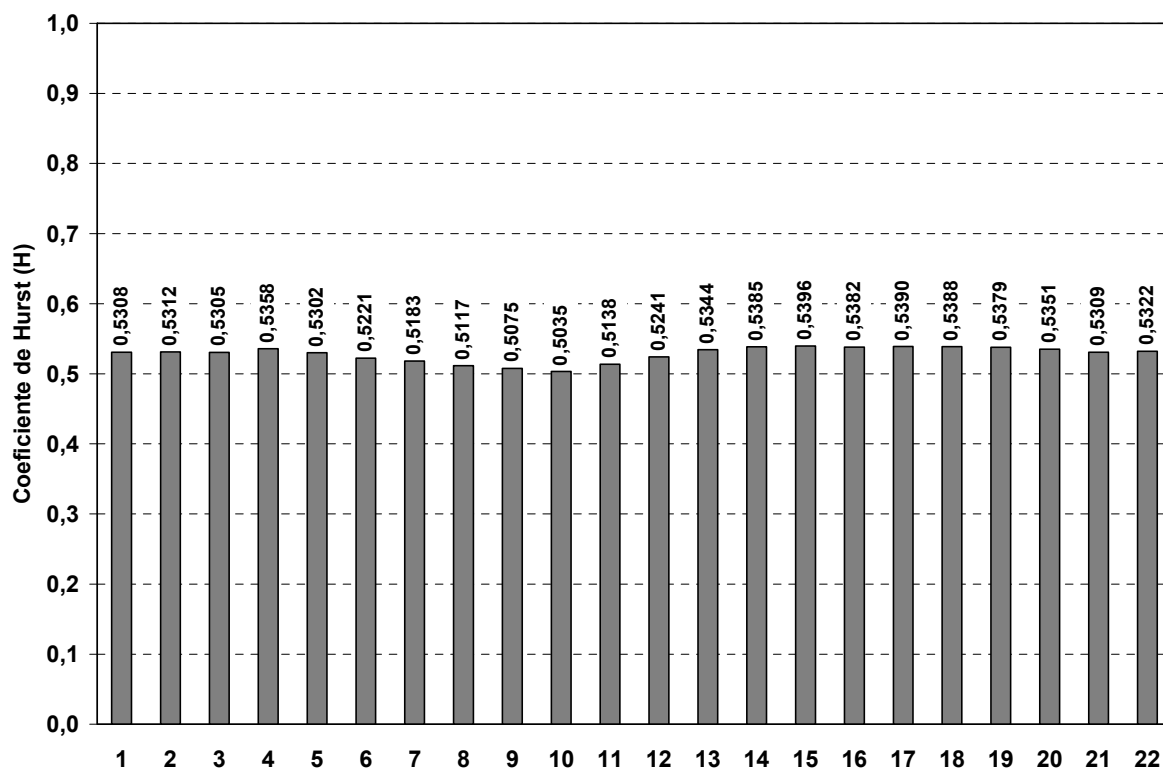


Figura 6.6 - Sensibilidade do Coeficiente de Hurst PZT #6



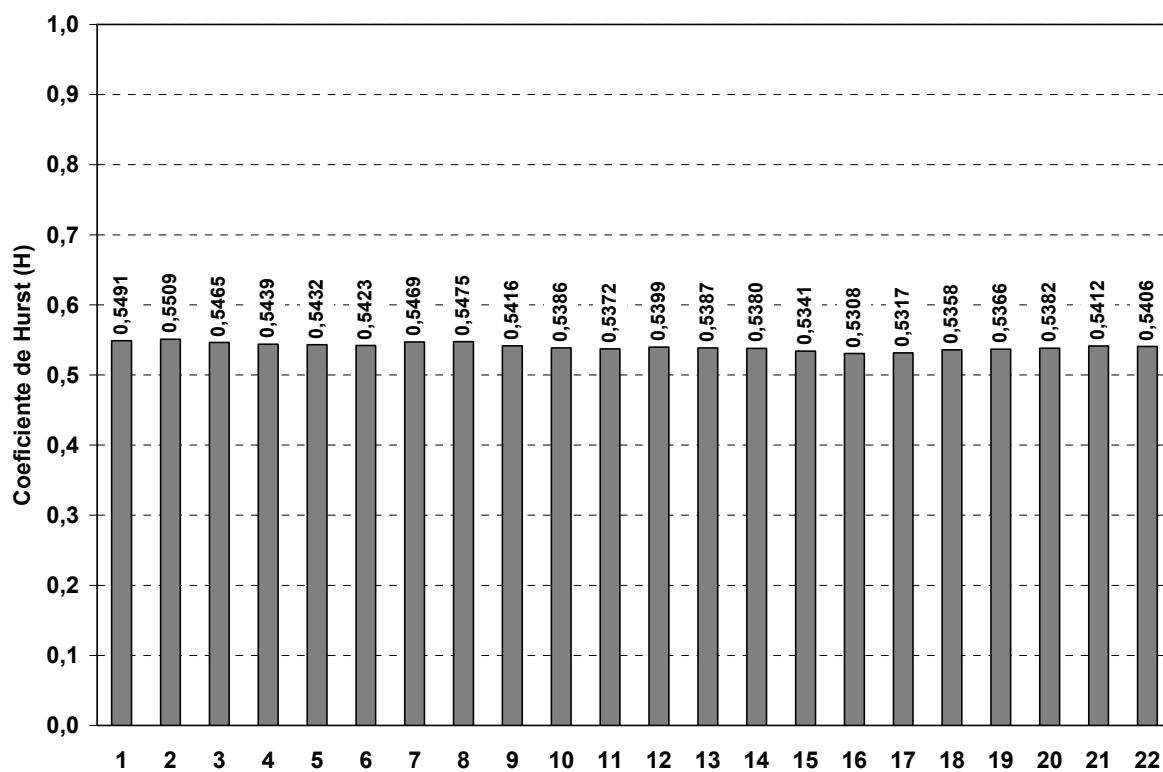


Figura 6.7 - Sensibilidade do Coeficiente de Hurst PZT #7

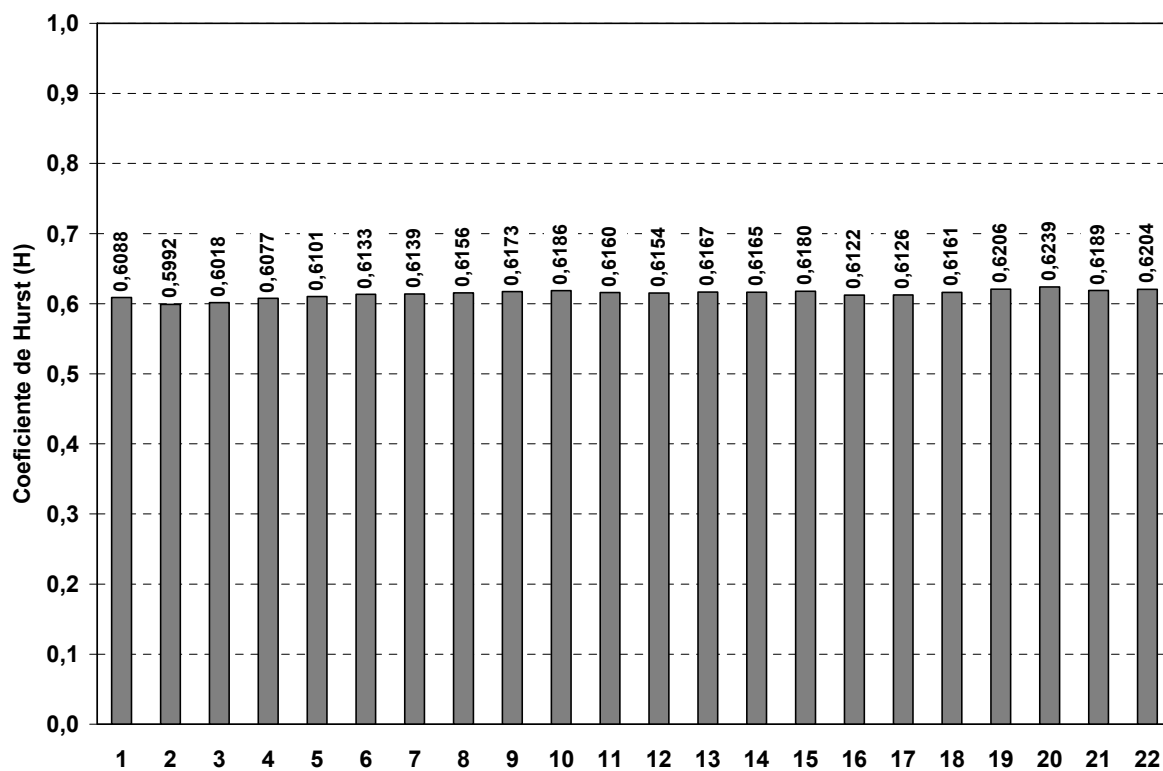


Figura 6.8 - Sensibilidade do Coeficiente de Hurst PZT #8

Tabela 6.2 - Análise Estatística da Sensibilidade do Coeficiente de Hurst

PZT	coeficiente de Hurst médio amostral	desvio-padrão amostral	intervalo de confiança do Hurst médio	intervalo de confiança do desvio-padrão
#1	0,6164	0,0052	[0,6141; 0,6188]	[0,0041 0,0078]
#2	0,5579	0,0201	[0,5491; 0,5668]	[0,0157; 0,0297]
#3	0,5873	0,0031	[0,5860; 0,5888]	[0,0024; 0,0046]
#4	0,5887	0,0094	[0,5846; 0,5929]	[0,0074; 0,0140]
#5	0,8262	0,0041	[0,8245; 0,8281]	[0,0032; 0,0061]
#6	0,5283	0,0109	[0,5235; 0,5332]	[0,0086; 0,0162]
#7	0,5405	0,0053	[0,5382; 0,5430]	[0,0042; 0,0080]
#8	0,6142	0,0059	[0,6116; 0,6169]	[0,0046; 0,0088]

Analisando os valores dos coeficientes de Hurst nas vigas de alumínio submetidas a temperatura ambiente verifica-se um comportamento estável do coeficiente de Hurst em função do número de pontos de cada assinatura. Com exceção dos PZT #2 e PZT #6, os intervalos de confiança dos valores médios do coeficiente de Hurst apresentam variação na terceira casa decimal, de forma semelhante aos intervalos de confiança dos desvios-padrão.

Em relação a temperatura, verifica-se que a pequena variação de temperatura ambiente durante os ensaios não demonstra influência sobre o coeficiente de Hurst visto que esse possui comportamento estável. Esse fato comprova que a utilização das assinaturas originais, sem processo de compensação de temperatura, é eficaz para determinação do coeficiente de Hurst.

Os resultados demonstram que a obtenção de assinaturas de impedância com menor número de pontos conseguem reproduzir o mesmo coeficiente de Hurst do que os obtidos com assinaturas com maior número de pontos. Dessa forma, com a aquisição de assinaturas de impedância com menor número de pontos, dentro da mesma faixa de frequência, consegue-se reduzir o tempo de obtenção de cada assinatura e consequentemente o tempo total de ensaio.

Outro comportamento importante de se verificar é que a pequena variação de temperatura (da ordem de  $5^{\circ}\text{C}$ , considerando a incerteza do sensor de temperatura) não influencia nos valores do coeficiente de Hurst das assinaturas de impedância mesmo com variação no número de pontos das assinaturas. Entretanto, conforme discutido anteriormente, sabe-se que o efeito da temperatura promove um deslocamento de amplitude e de frequência nas assinaturas. Para avaliar o comportamento do coeficiente de Hurst em função da temperatura uma análise apropriada será apresentada posteriormente nesse trabalho.

### **6.3. Sensibilidade do Coeficiente de Hurst em Temperatura Controlada**

Para avaliar o efeito da temperatura na sensibilidade do coeficiente de Hurst foram obtidas assinaturas de impedância das vigas de alumínio submetidas a uma condição de temperatura controlada utilizando a câmara climática. A temperatura de controle foi ajustada para  $25^{\circ}\text{C}$  ( $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ ).

As assinaturas foram obtidas assinaturas com diferentes números de pontos, mantendo-se a mesma faixa de frequência. A faixa de frequência escolhida é de 100 a 140kHz. O número de pontos em cada assinatura varia de 1000 a 20000 pontos, conforme especificações apresentadas na Tabela 6.3. Em cada condição de ensaio foi obtida uma única assinatura de impedância para cada PZT. Em termos gerais, foram obtidas 12 assinaturas para cada PZT, totalizando 96 assinaturas de impedância em um tempo de ensaio da ordem de 2,5h.

Para atender as condições de análise do método estatístico de Hurst foi definido um fator de escala de 100 para determinação dos coeficientes de Hurst em todas as assinaturas. O valor do fator de escala igual a 100 se deve ao fato da obtenção de assinaturas de impedância contendo 1000 pontos, nas quais não se pode empregar um fator de escala superior devido à restrição do número de pontos em cada bloco de dados (i.e, 1000 pontos, fator de escala igual a 100 e tamanho do menor bloco igual a 10). Para garantir compatibilidade do método de Hurst todas as assinaturas foram analisadas com o mesmo fator de escala.

Tabela 6.3 - Ensaios de Sensibilidade em Temperatura Controlada

<b>condição</b>	<b>número de pontos</b>	<b>temperatura controlada</b>	<b>tempo de aquisição para cada PZT</b>
1	1000	$25,1 \pm 0,5^{\circ}\text{C}$	11s
2	2000	$25,1 \pm 0,5^{\circ}\text{C}$	21s
3	3000	$25,1 \pm 0,5^{\circ}\text{C}$	32s
4	4000	$25,1 \pm 0,5^{\circ}\text{C}$	42s
5	5000	$25,1 \pm 0,5^{\circ}\text{C}$	53s
6	6000	$25,1 \pm 0,5^{\circ}\text{C}$	63s
7	7000	$25,1 \pm 0,5^{\circ}\text{C}$	1min 14s
8	8000	$25,2 \pm 0,5^{\circ}\text{C}$	1min 24s
9	9000	$25,2 \pm 0,5^{\circ}\text{C}$	1min 35s
10	10000	$25,2 \pm 0,5^{\circ}\text{C}$	1min 45s
11	15000	$25,2 \pm 0,5^{\circ}\text{C}$	2min 38s
12	20000	$25,2 \pm 0,5^{\circ}\text{C}$	3min 30s

Os resultados dos coeficientes de Hurst das assinaturas com diferentes número de pontos são apresentados para cada viga de alumínio contendo o respectivo PZT, enumerados de PZT #1 a PZT #8. Nas figuras foram demarcados os valores dos coeficientes de Hurst para cada assinatura com determinado número de pontos, conforme Tabela 6.3.

A partir dos valores dos coeficientes de Hurst obtidos nas assinaturas para cada PZT realizou-se uma análise de inferência estatística para determinar os intervalos de confiança dos valores médios e desvios-padrão. A análise estatística foi realizada considerando intervalos com nível de confiança de 95%. Os resultados para cada PZT são apresentados na Tabela 6.4.

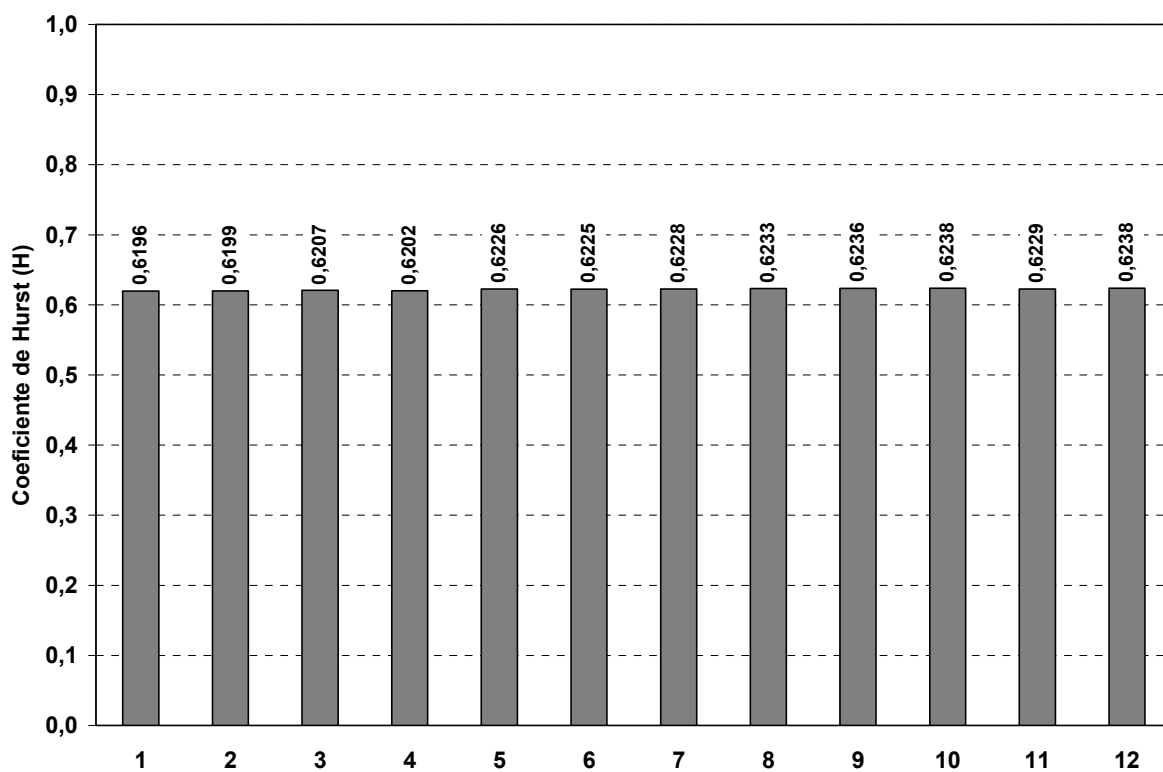


Figura 6.9 - Sensibilidade do Coeficiente de Hurst PZT #1

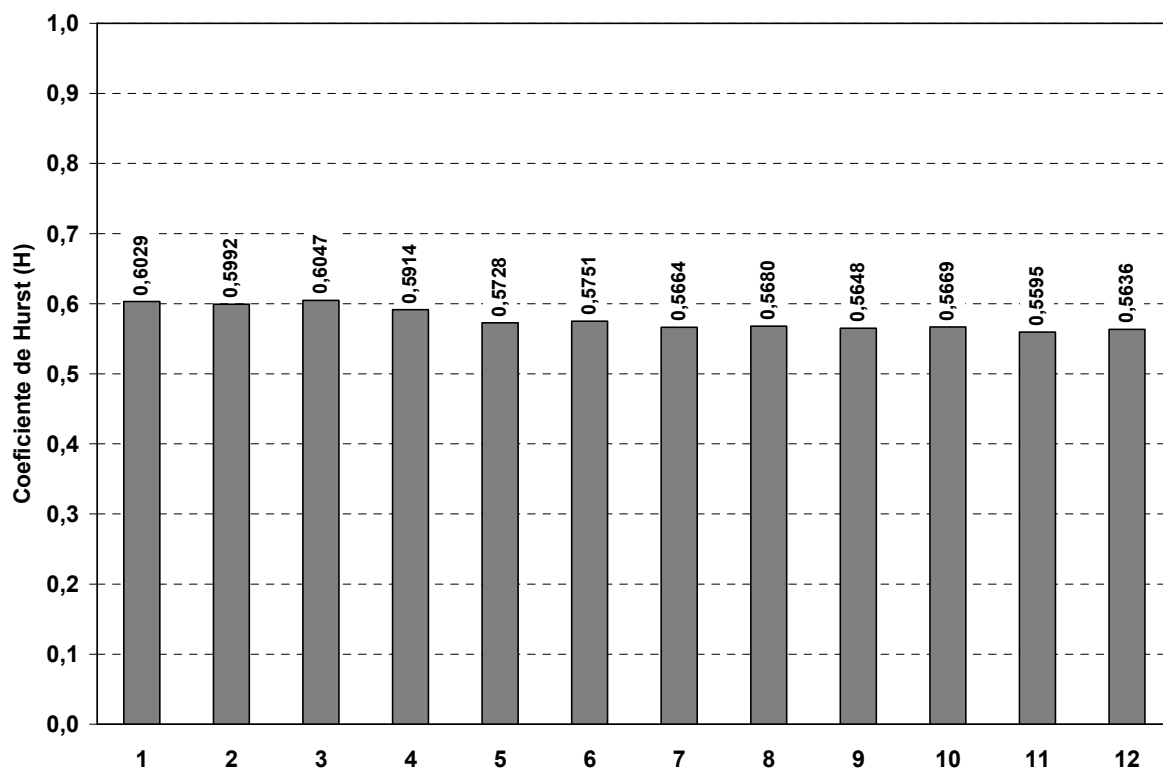


Figura 6.10 - Sensibilidade do Coeficiente de Hurst PZT #2

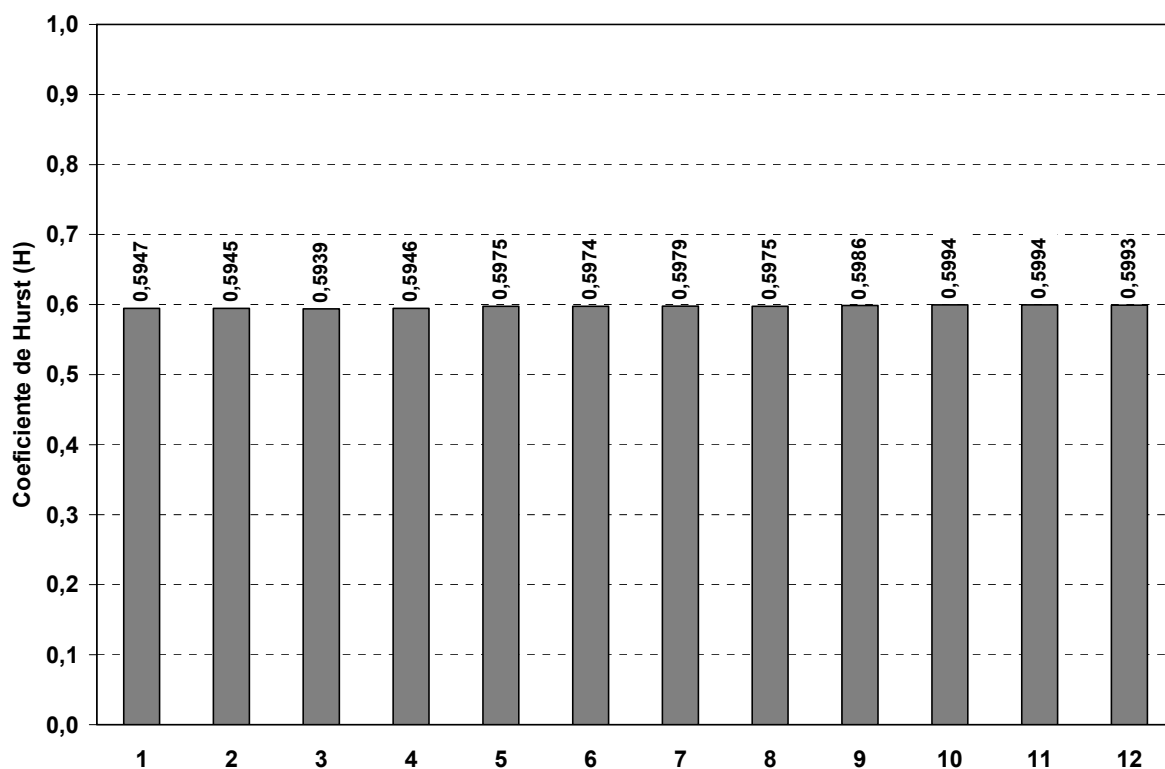


Figura 6.11 - Sensibilidade do Coeficiente de Hurst PZT #3

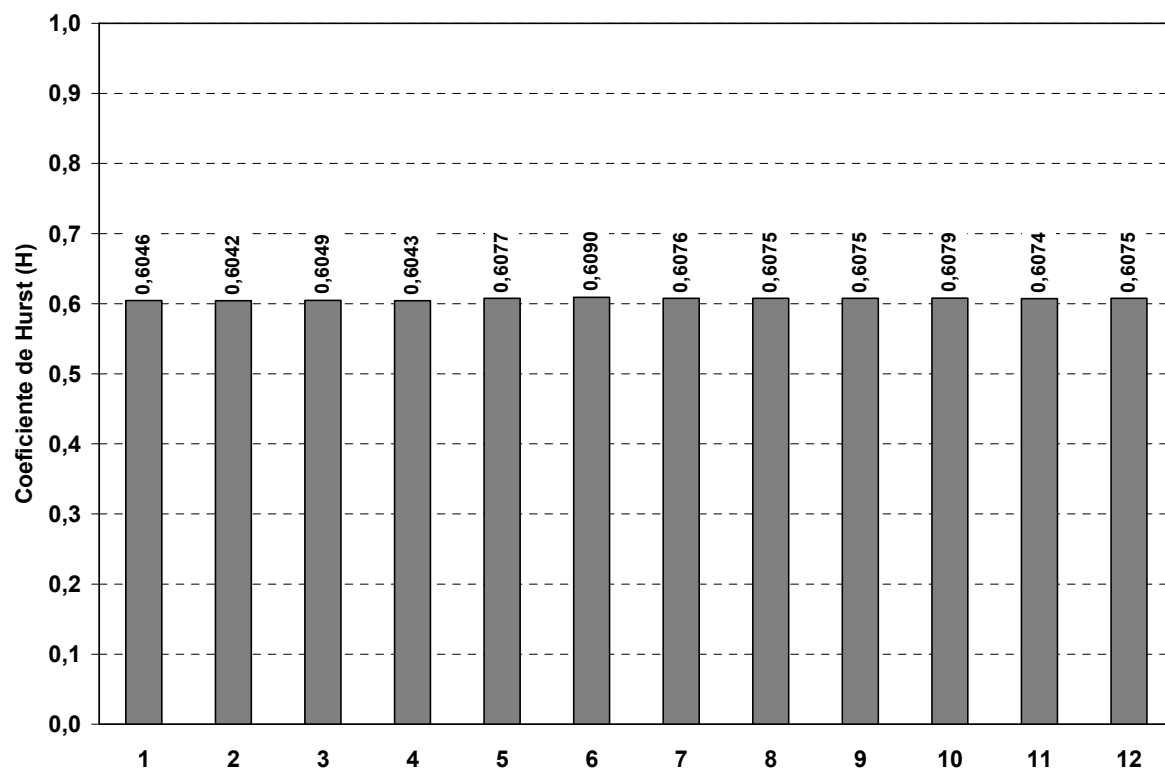


Figura 6.12 - Sensibilidade do Coeficiente de Hurst PZT #4

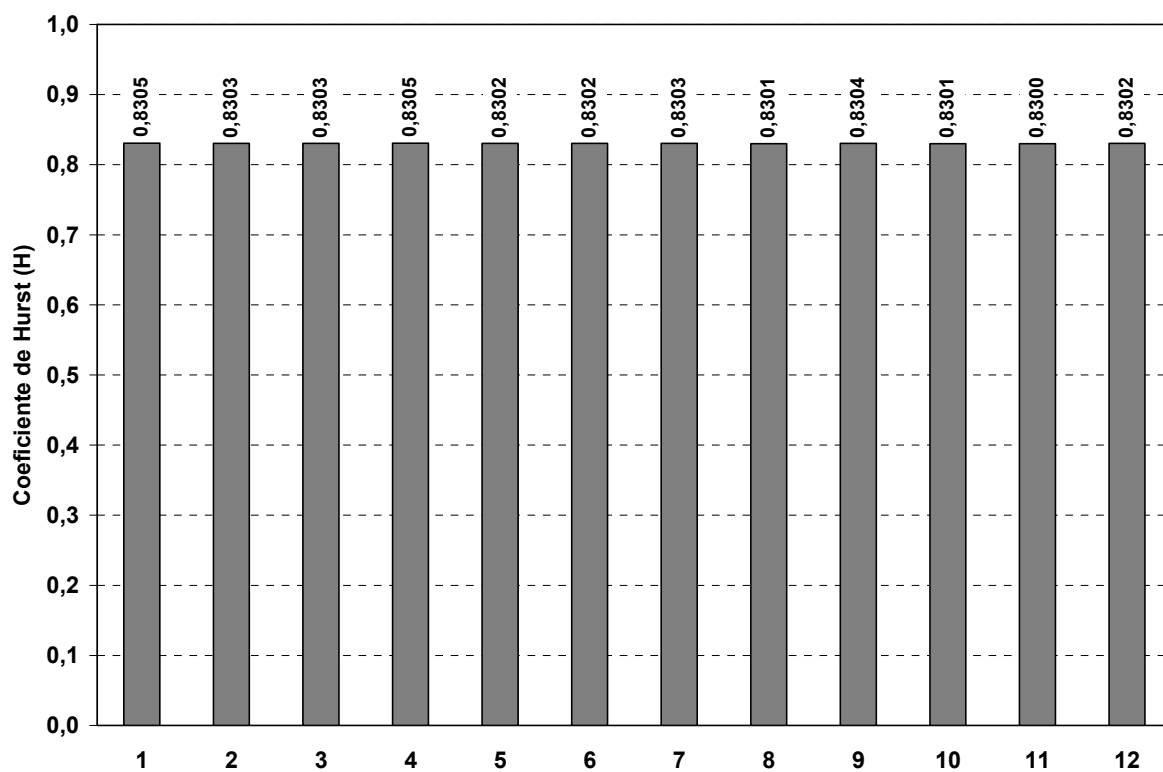


Figura 6.13 - Sensibilidade do Coeficiente de Hurst PZT #5

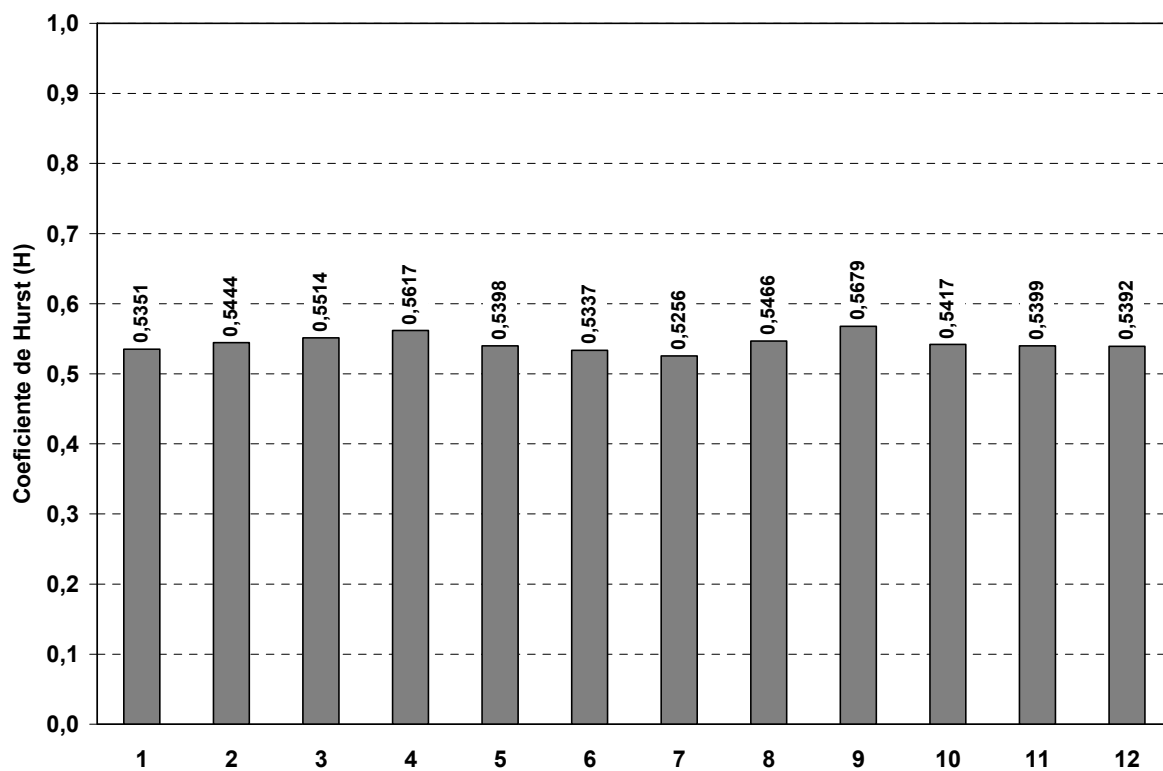


Figura 6.14 - Sensibilidade do Coeficiente de Hurst PZT #6

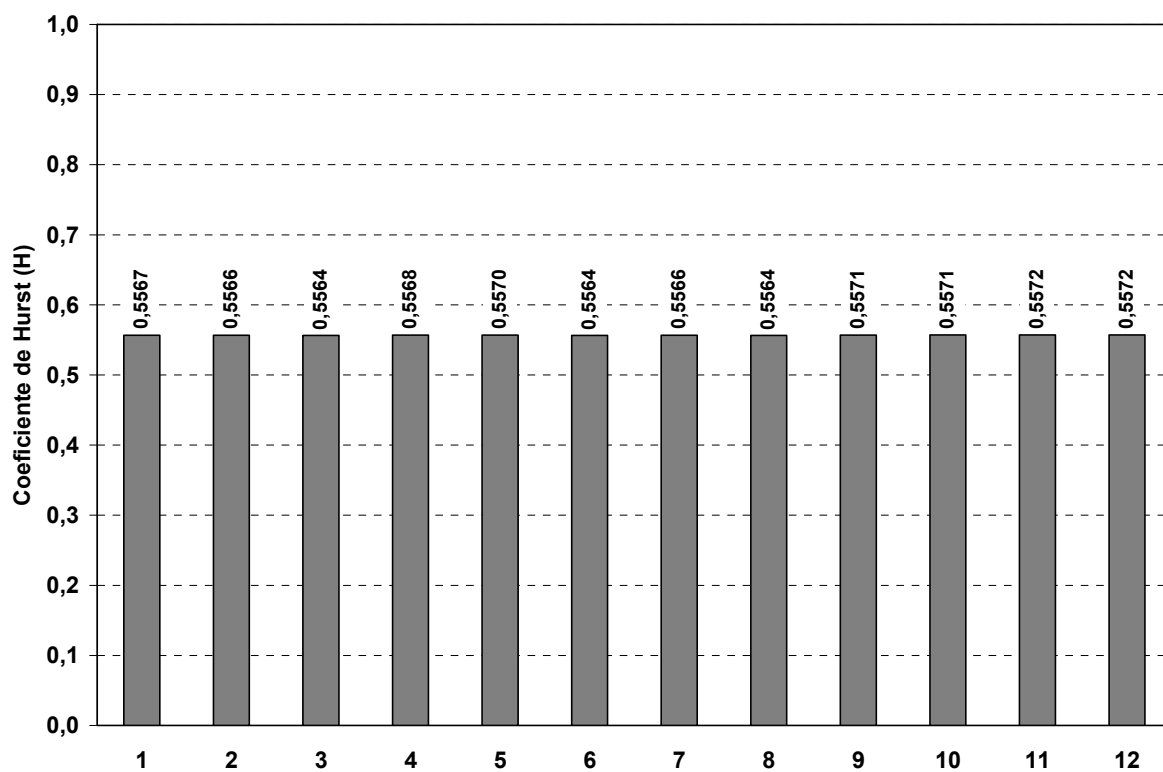


Figura 6.15 - Sensibilidade do Coeficiente de Hurst PZT #7

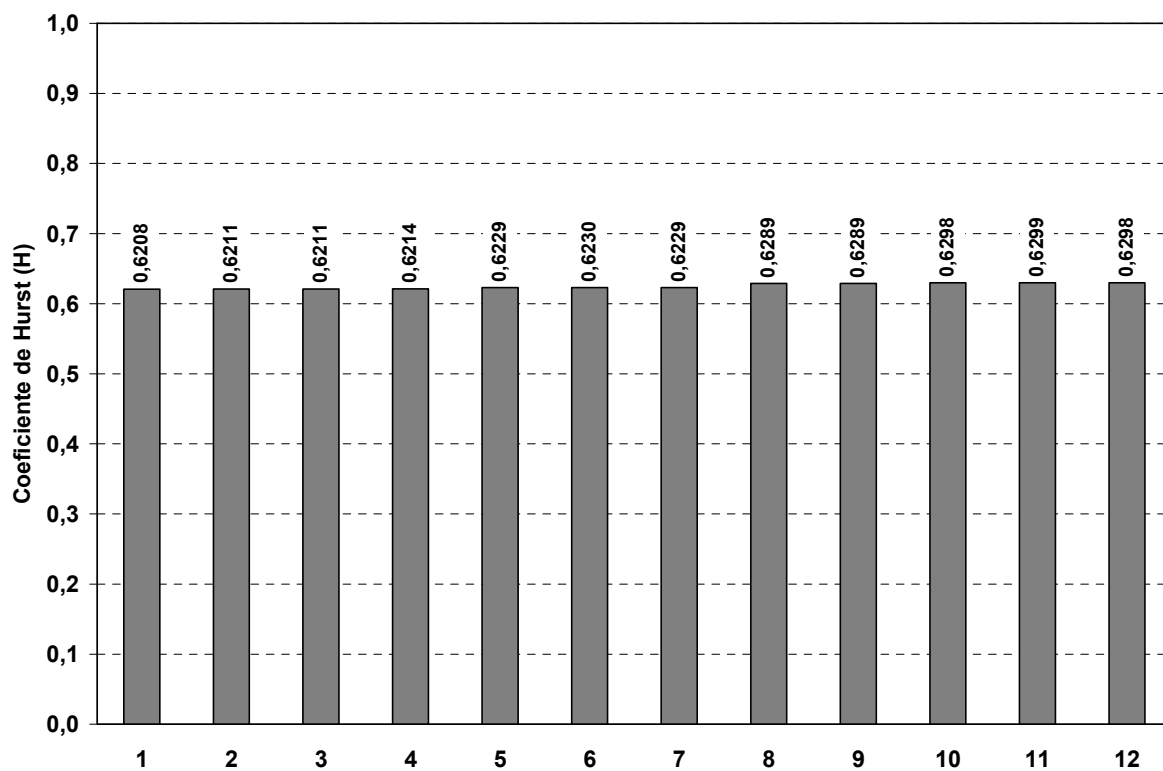


Figura 6.16 - Sensibilidade do Coeficiente de Hurst PZT #8



Tabela 6.4 - Análise Estatística da Sensibilidade do Coeficiente de Hurst

PZT	coeficiente de Hurst médio amostral	desvio-padrão amostral	intervalo de confiança do Hurst médio	intervalo de confiança do desvio-padrão
#1	0,6221	0,0015	[0,6211; 0,6232]	[0,0011; 0,0027]
#2	0,5779	0,0167	[0,5673; 0,5886]	[0,0119; 0,0284]
#3	0,5971	0,0020	[0,5957; 0,5984]	[0,0015; 0,0036]
#4	0,6066	0,0017	[0,6056; 0,6077]	[0,0012; 0,0028]
#5	0,8302	0,0002	[0,8299; 0,8306]	[0,0004; 0,0009]
#6	0,5439	0,0117	[0,5364; 0,5514]	[0,0083; 0,0200]
#7	0,5567	0,0004	[0,5562; 0,5574]	[0,0007; 0,0017]
#8	0,6250	0,0039	[0,6225; 0,6276]	[0,0028; 0,0068]

Analisando os valores dos coeficientes de Hurst nas vigas de alumínio submetidas a temperatura controlada verifica-se um comportamento estável do coeficiente de Hurst em função do número de pontos de cada assinatura. De forma semelhante aos ensaios em temperatura ambiente, com exceção dos PZT #2 e PZT #6, os intervalos de confiança dos valores médios e desvios-padrão do coeficiente de Hurst apresentam variação na terceira casa decimal.

Em relação aos ensaios em temperatura ambiente verifica-se que os coeficientes de Hurst seguem a mesma tendência de comportamento, entretanto, a condição de controle de temperatura indica uma redução nos intervalos de confiança. Devido a variação de temperatura na câmara climática ser muito pequena, os valores do coeficiente de Hurst foram determinados a partir das assinaturas originais, sem processo de compensação de temperatura

Os resultados demonstram novamente que a obtenção de assinaturas de impedância com menor número de pontos consegue reproduzir os mesmos coeficientes de Hurst do que os obtidos com assinaturas com maior número de pontos, permitindo redução no tempo total de ensaio.

#### **6.4. Repetibilidade do Coeficiente de Hurst em Temperatura Ambiente**

Para avaliar a repetibilidade do coeficiente de Hurst das assinaturas de impedância das vigas de alumínio submetidas a temperatura ambiente foram obtidas várias assinaturas nas mesmas condições de ensaios: mesmo número de pontos e mesma faixa de frequência. A faixa de frequência escolhida é de 100 a 140kHz. O número de pontos nas assinaturas é de 4000 pontos, gerando assim uma resolução em frequência de 10Hz por ponto.

Como demonstrado anteriormente nas análises de sensibilidade, o número de pontos da assinatura não tem impacto significativo na determinação do coeficiente de Hurst. O número de pontos citado foi escolhido a fim de permitir uma redução no tempo total de ensaio considerando todas as vigas de alumínio.

Nos ensaios de repetibilidade foram obtidas 48 assinaturas de impedância para cada PZT. Em termos gerais, foram obtidas 384 assinaturas totalizando um tempo de ensaio da ordem de 6h. Devido a duração estendida dos ensaios foram registradas os valores de temperatura ambiente a cada rodada de aquisição das assinaturas de impedância, conforme mostrado na Figura 6.17.

Os resultados dos coeficientes de Hurst das assinaturas sequenciais são apresentados para cada viga de alumínio contendo o respectivo PZT, enumerados de PZT #1 a PZT #8. Os coeficientes de Hurst foram determinados utilizando um fator de escala de 200. Dessa forma, cada assinatura foi analisada a partir de 12 séries de dados com tamanho do menor bloco igual a 20. Esse fator de escala escolhido para permitir um maior número de séries de dados (número de pontos) para o ajuste linear do coeficiente de Hurst.

A partir dos valores dos coeficientes de Hurst obtidos nas assinaturas para cada PZT realizou-se uma análise de inferência estatística para determinar os intervalos de confiança dos valores médios e desvios-padrão. A análise estatística foi realizada considerando intervalos com nível de confiança de 95%. Os resultados para cada PZT são apresentados na Tabela 6.5.

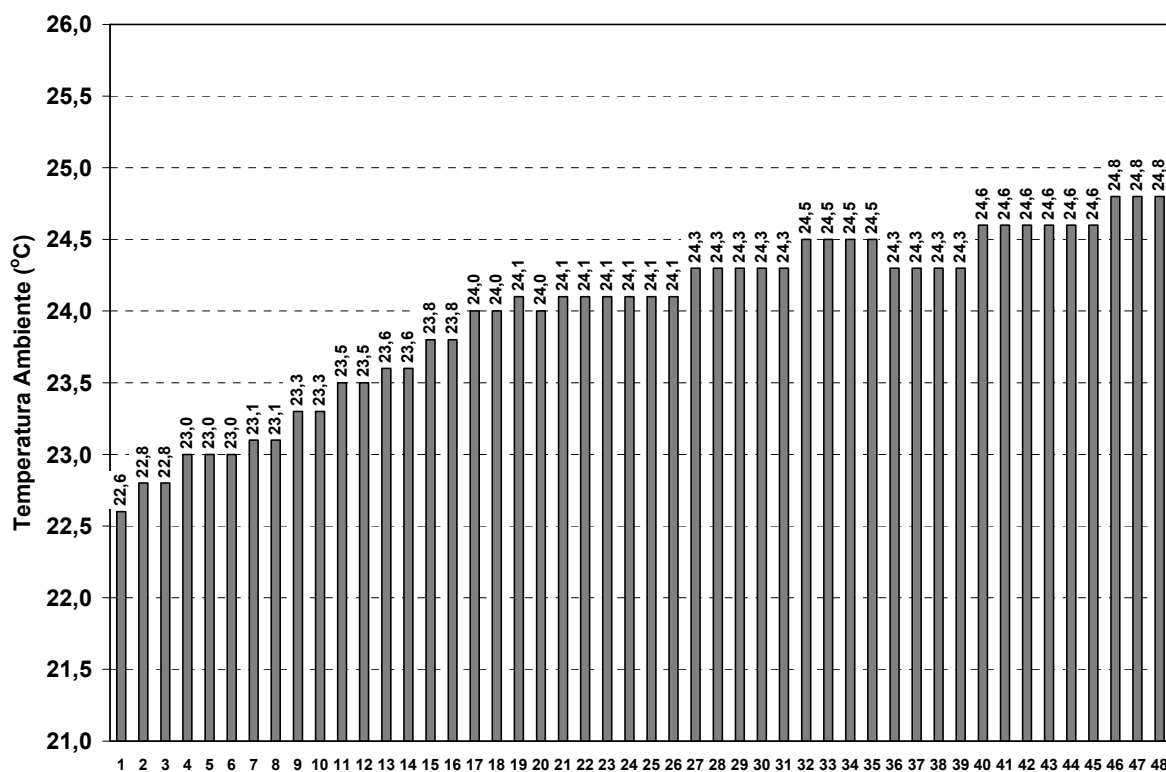


Figura 6.17 - Temperatura Ambiente durante os Ensaios

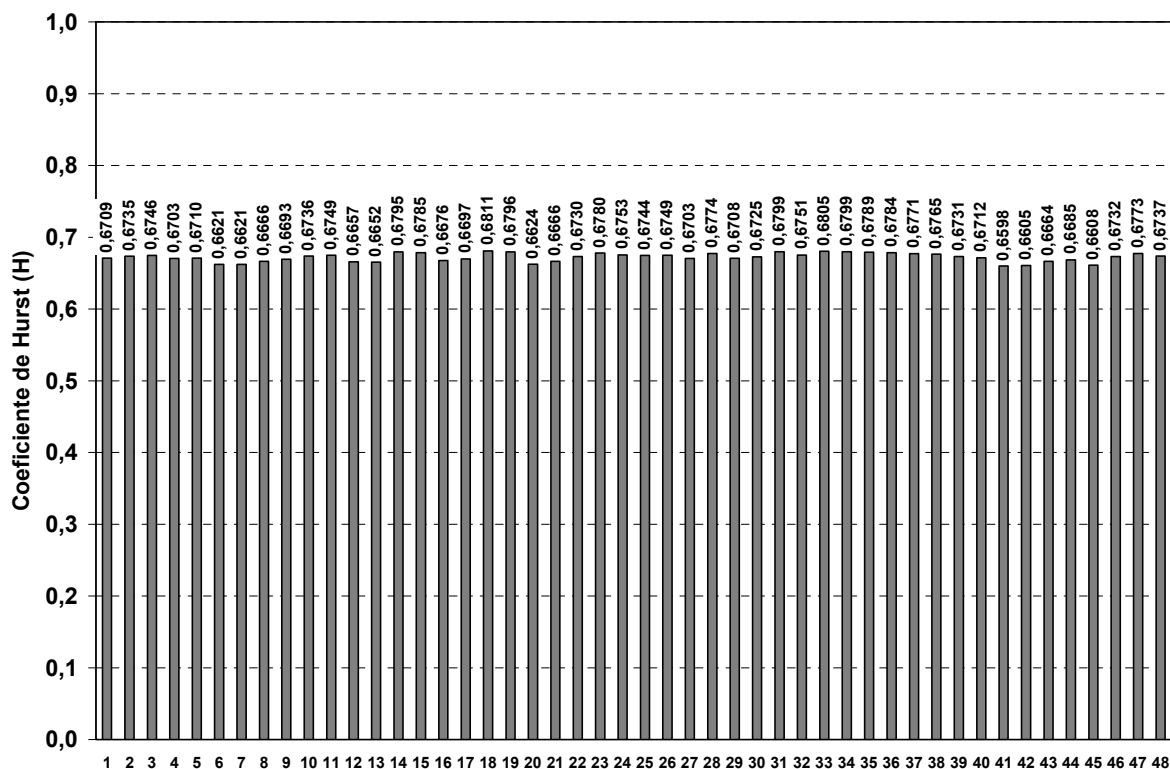


Figura 6.18 - Repetibilidade do Coeficiente de Hurst PZT #1

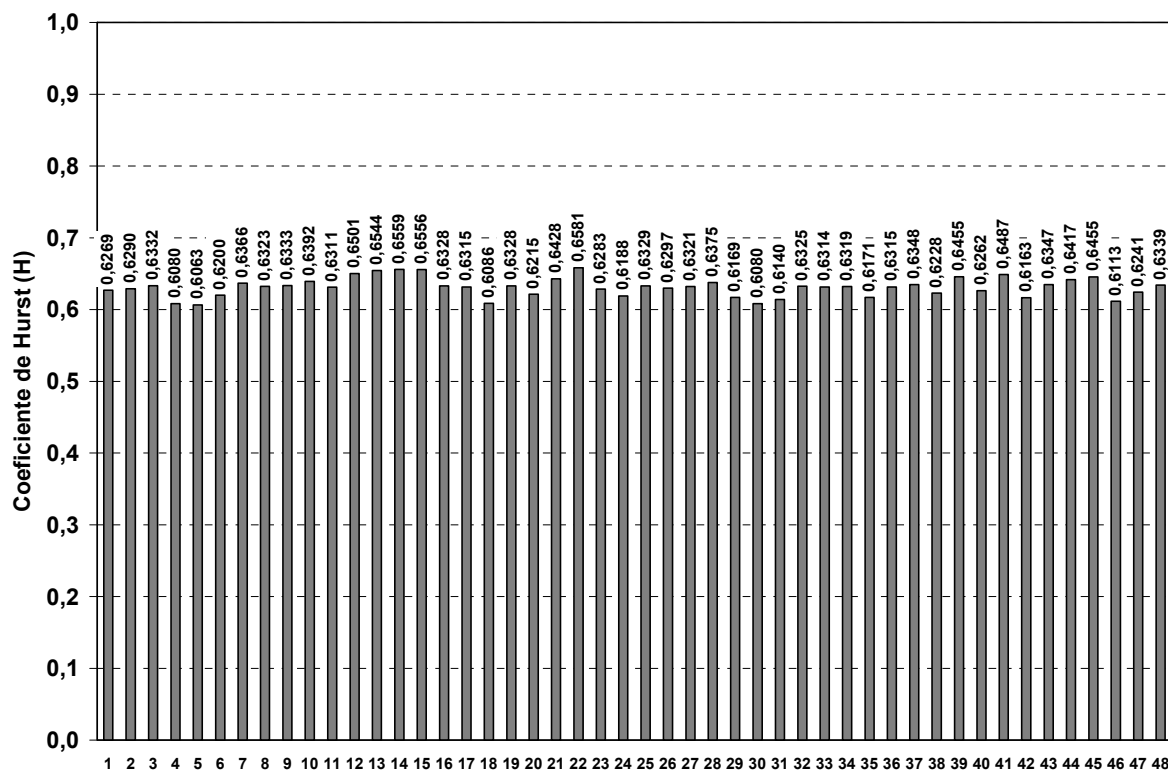


Figura 6.19 - Repetibilidade do Coeficiente de Hurst PZT #2

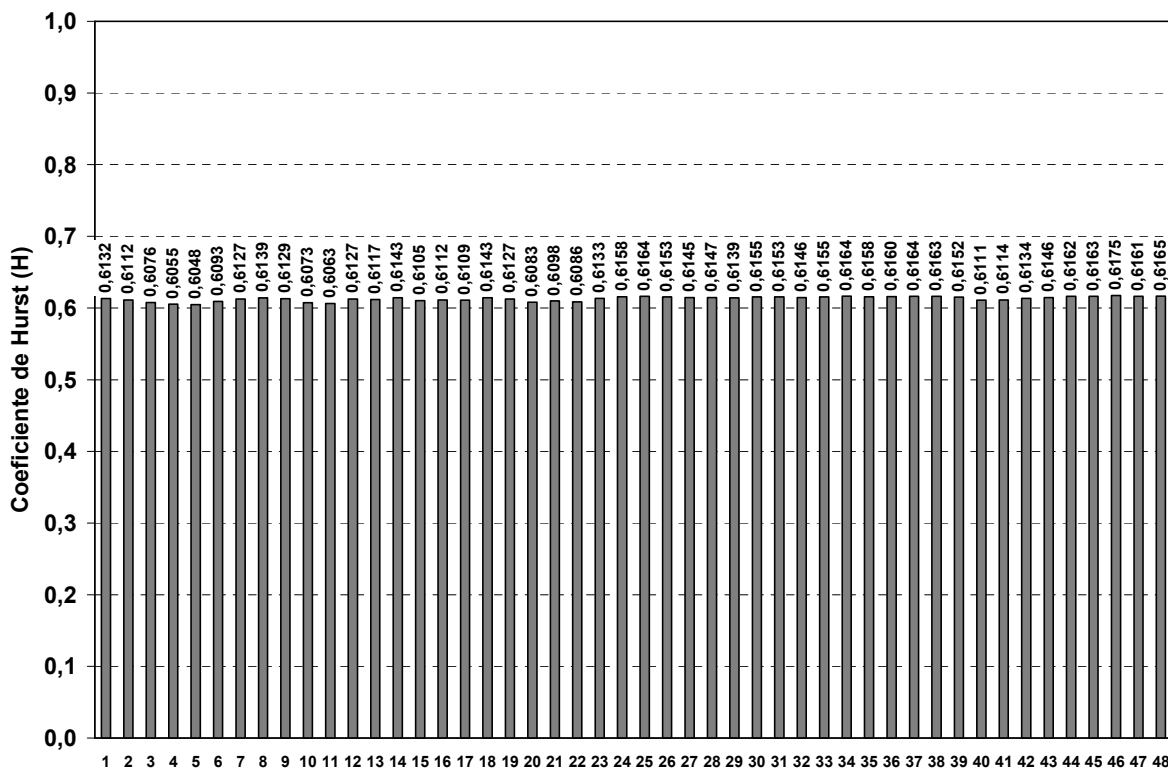


Figura 6.20 - Repetibilidade do Coeficiente de Hurst PZT #3

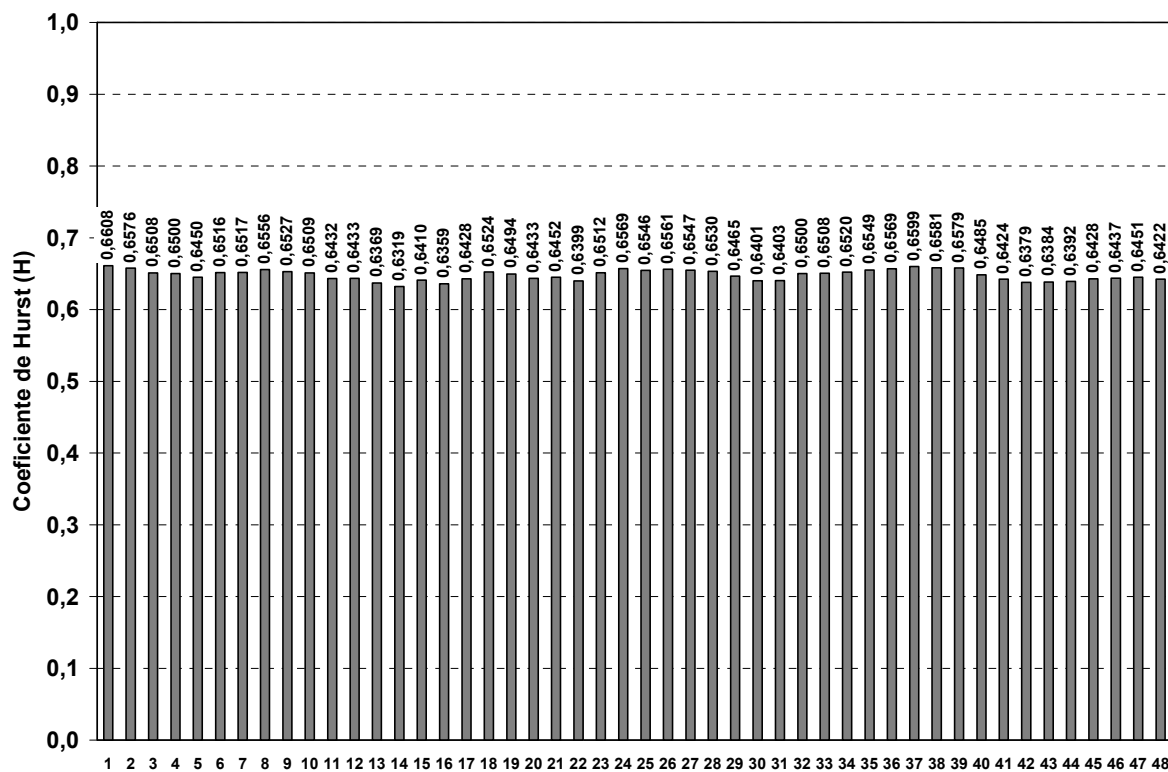


Figura 6.21 - Repetibilidade do Coeficiente de Hurst PZT #4

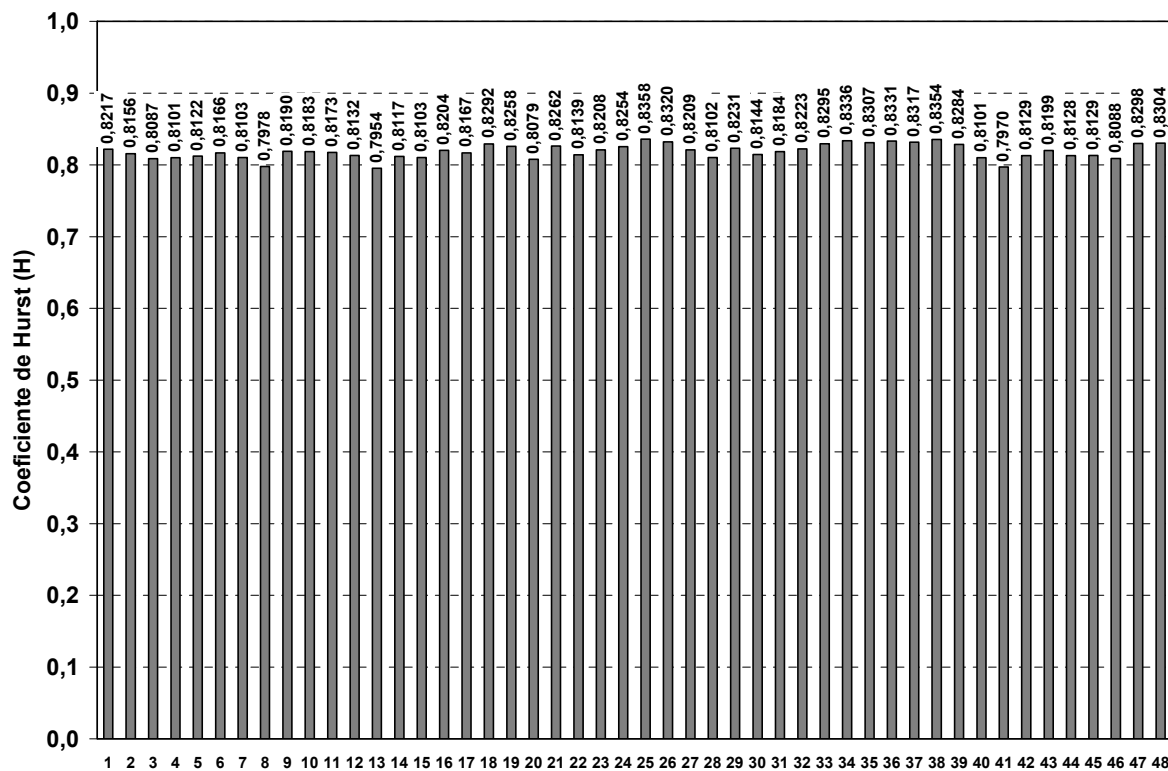


Figura 6.22 - Repetibilidade do Coeficiente de Hurst PZT #5

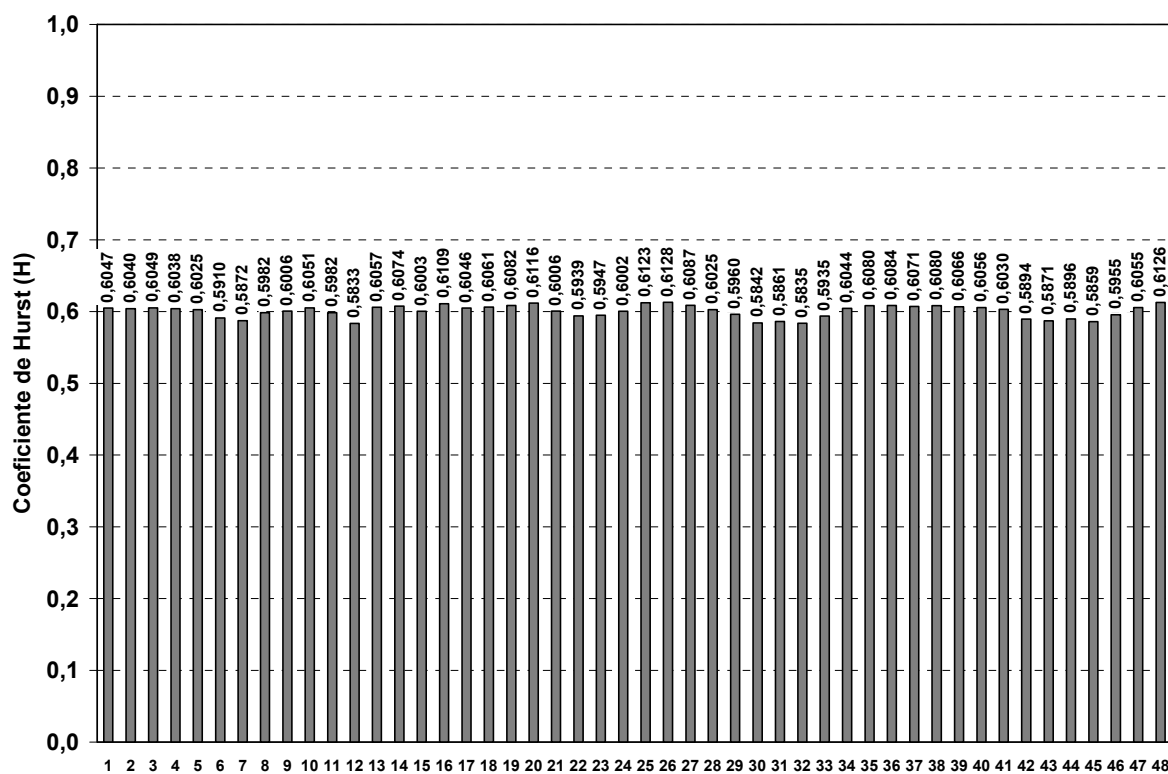


Figura 6.23 - Repetibilidade do Coeficiente de Hurst PZT #6

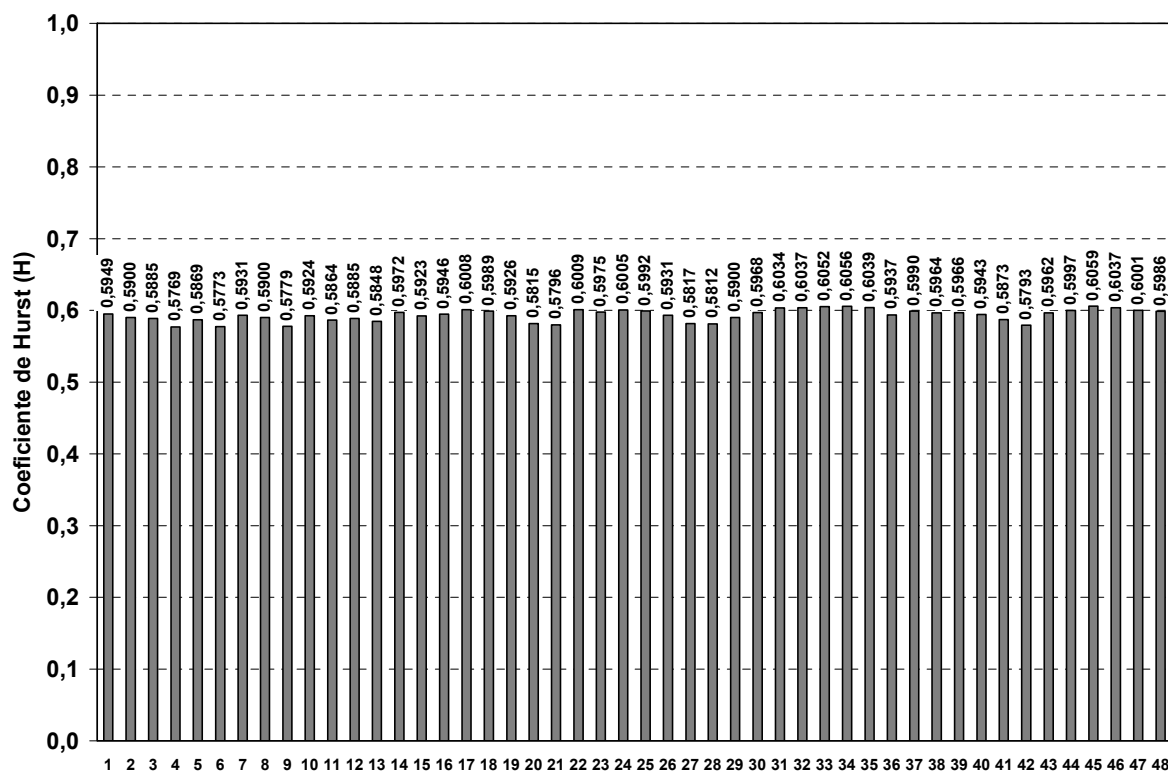


Figura 6.24 - Repetibilidade do Coeficiente de Hurst PZT #7

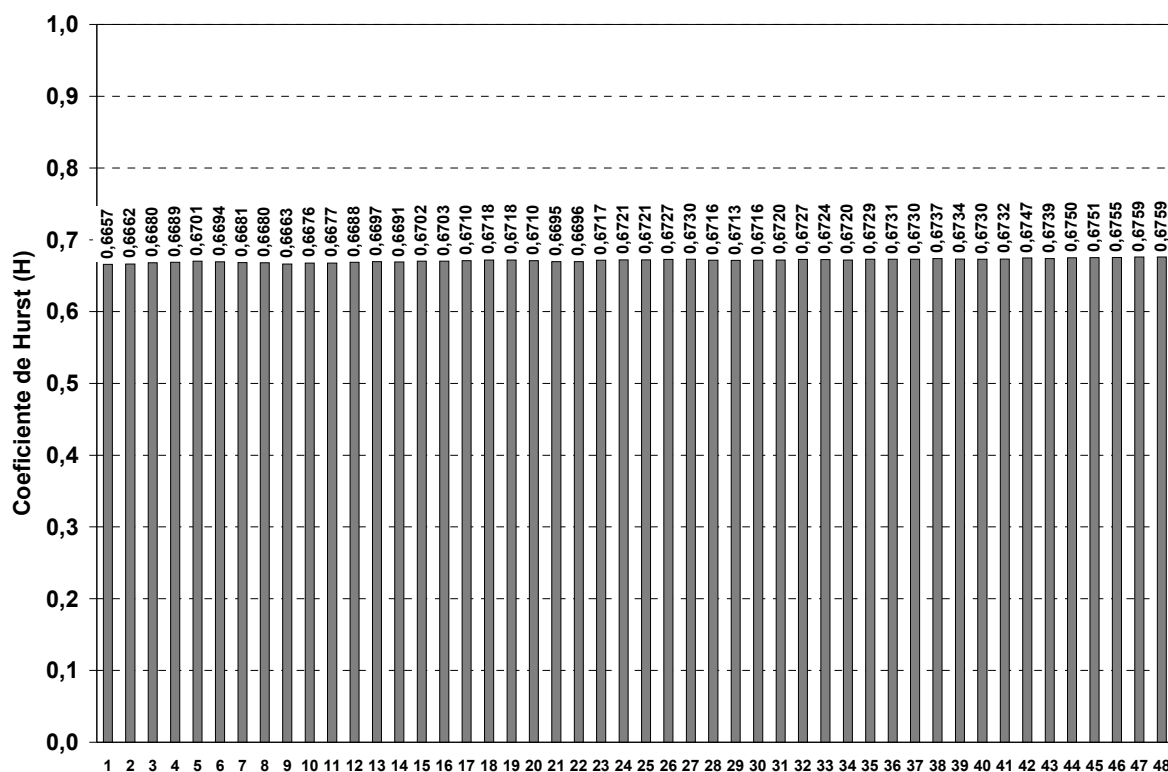


Figura 6.25 - Repetibilidade do Coeficiente de Hurst PZT #8

Tabela 6.5 - Análise Estatística da Repetibilidade do Coeficiente de Hurst

PZT	coeficiente de Hurst médio amostral	desvio-padrão amostral	intervalo de confiança do Hurst médio	intervalo de confiança do desvio-padrão
#1	0,6721	0,0059	[0,6704; 0,6738]	[0,0049; 0,0074]
#2	0,6310	0,0131	[0,6272; 0,6348]	[0,0109; 0,0164]
#3	0,6130	0,0032	[0,6121; 0,6139]	[0,0027; 0,0041]
#4	0,6480	0,0072	[0,6460; 0,6501]	[0,0060; 0,0090]
#5	0,8187	0,0086	[0,8158; 0,8216]	[0,0083; 0,0125]
#6	0,6005	0,0099	[0,5980; 0,6030]	[0,0072; 0,0108]
#7	0,5933	0,0082	[0,5909; 0,5957]	[0,0069; 0,0103]
#8	0,6713	0,0025	[0,6705; 0,6721]	[0,0022; 0,0033]

Analisando os valores do coeficiente de Hurst nas vigas de alumínio submetidas a temperatura ambiente verifica-se que um comportamento flutuante dos valores do coeficiente de Hurst ao longo das assinaturas sequenciais. Nesse ensaio de repetibilidade verifica-se também maior amplitude dos intervalos de confiança dos valores médios e desvios-padrão, mas ainda com variação na terceira casa decimal. De forma correspondente aos ensaios de sensibilidade, os PZT #2 e PZT #6 apresentam os maiores desvios dos valores médios. Esse fato pode indicar que a colagem e a interface entre os PZT e a estrutura das vigas talvez não esteja apresentando boas características de acoplamento.

Os resultados demonstram que os valores do coeficiente de Hurst obtidos para cada PZT através de repetidas assinaturas fornecem valores correspondentes aos obtidos através de assinaturas únicas, como apresentado nos ensaios de sensibilidade. A escolha da caracterização dos valores médios do coeficiente de Hurst através de 48 assinaturas fornece uma boa estimativa para os intervalos de confiança dos valores médios e desvios-padrão do coeficiente de Hurst. A obtenção de um número maior de assinaturas implica em um tempo maior de ensaio e na possibilidade de que outros efeitos possam vir alterar as assinaturas de impedância.

#### **6.5. Repetibilidade do Coeficiente de Hurst em Temperatura Controlada**

Para avaliar o efeito da temperatura na repetibilidade do coeficiente de Hurst foram obtidas várias assinaturas nas mesmas condições de ensaios: mesma temperatura, mesmo número de pontos e mesma faixa de frequência. O controle de temperatura foi obtido utilizando a câmara climática e a temperatura de controle foi ajustada para 25°C ( $\pm 0,5^\circ\text{C}$ ). A faixa de frequência escolhida é de 100 a 140kHz. O número de pontos nas assinaturas é de 4000 pontos, gerando uma resolução em frequência de 10Hz por ponto.

Nos ensaios de repetibilidade com temperatura controlada foram obtidas 48 assinaturas de impedância para cada PZT. Em termos gerais, foram obtidas 384 assinaturas totalizando um tempo de ensaio da ordem de 6h.



Devido a duração estendida dos ensaios foram registrados os valores de temperatura na câmara a cada rodada, para comprovar a estabilidade da temperatura, conforme Figura 6.26.

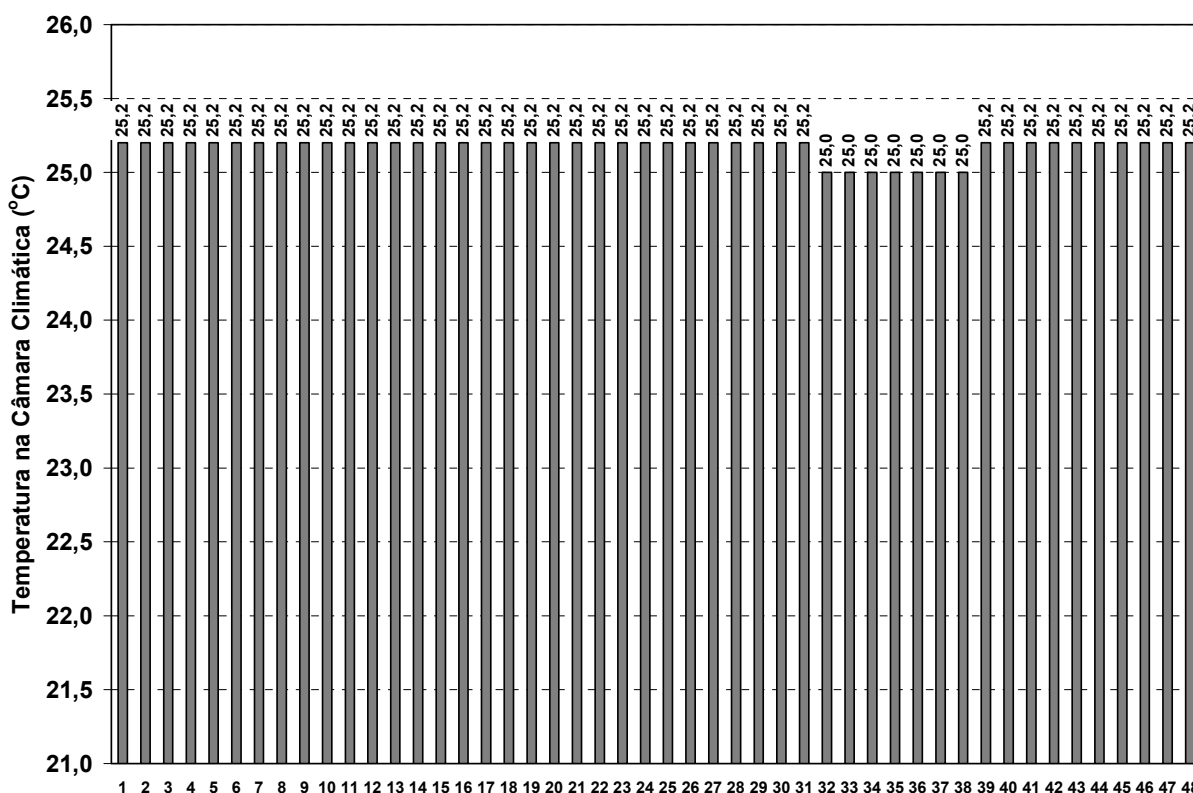


Figura 6.26 - Temperatura na Câmara Climática durante os Ensaios

Os resultados dos coeficientes de Hurst das assinaturas sequenciais são apresentados para cada viga de alumínio contendo o respectivo PZT, enumerados de PZT #1 a PZT #8. Os coeficientes de Hurst foram determinados utilizando um fator de escala de 200. Dessa forma, cada assinatura foi analisada a partir de 12 séries de dados com tamanho do menor bloco igual a 20.

A partir dos valores dos coeficientes de Hurst obtidos nas assinaturas para cada PZT realizou-se uma análise de inferência estatística para determinar o intervalo de confiança dos valores médios e dos desvios-padrão. A análise estatística foi realizada considerando um intervalo de confiança de 95%. Os resultados para cada PZT são apresentados na Tabela 6.6.



Figura 6.27 - Repetibilidade do Coeficiente de Hurst PZT #1

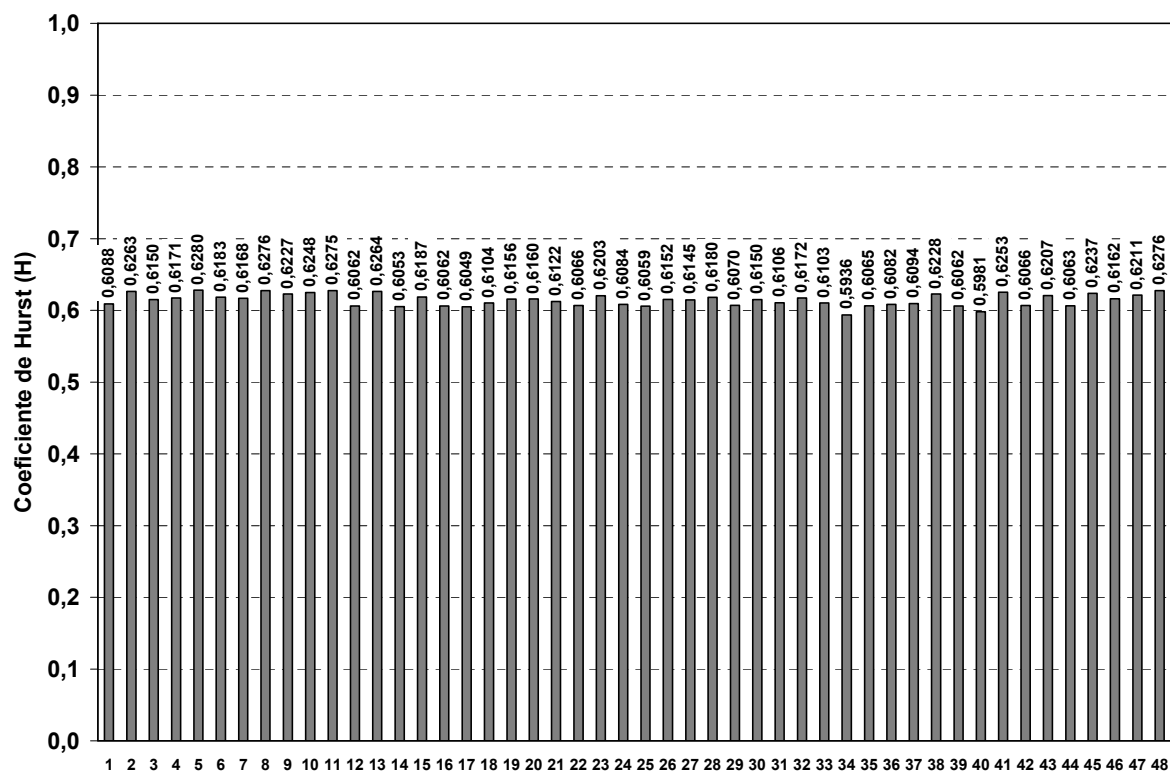


Figura 6.28 - Repetibilidade do Coeficiente de Hurst PZT #2

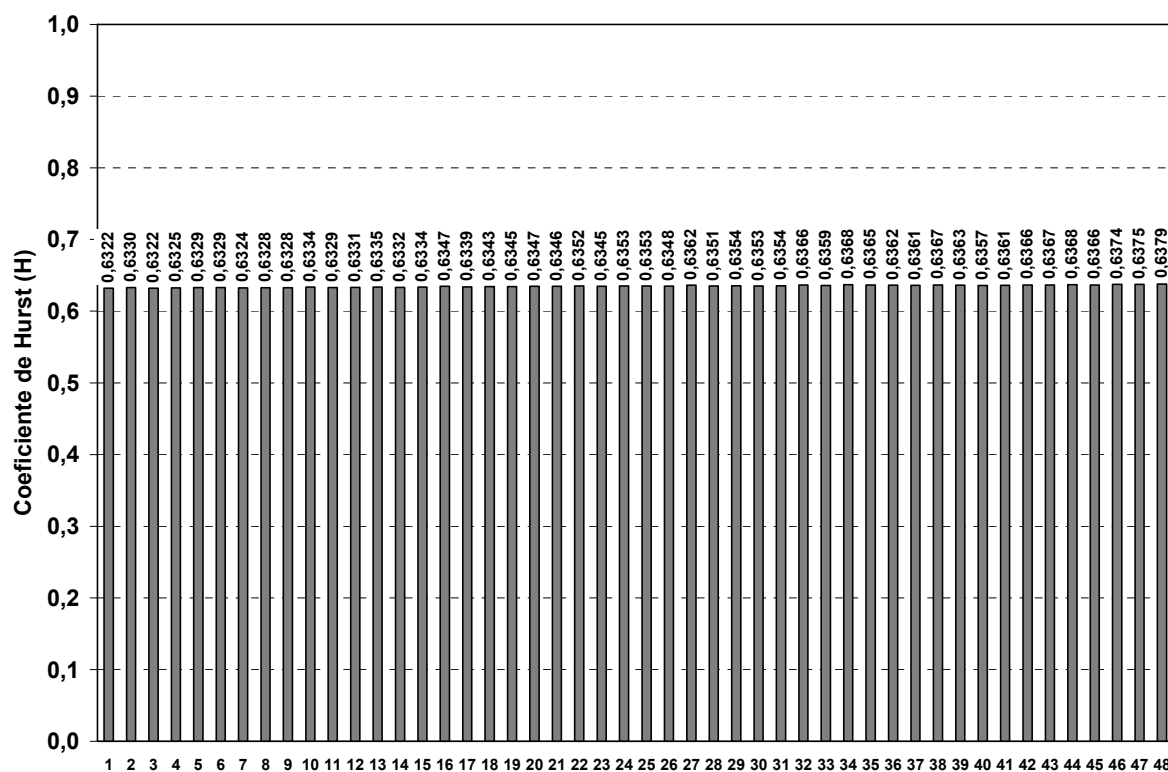


Figura 6.29 - Repetibilidade do Coeficiente de Hurst PZT #3

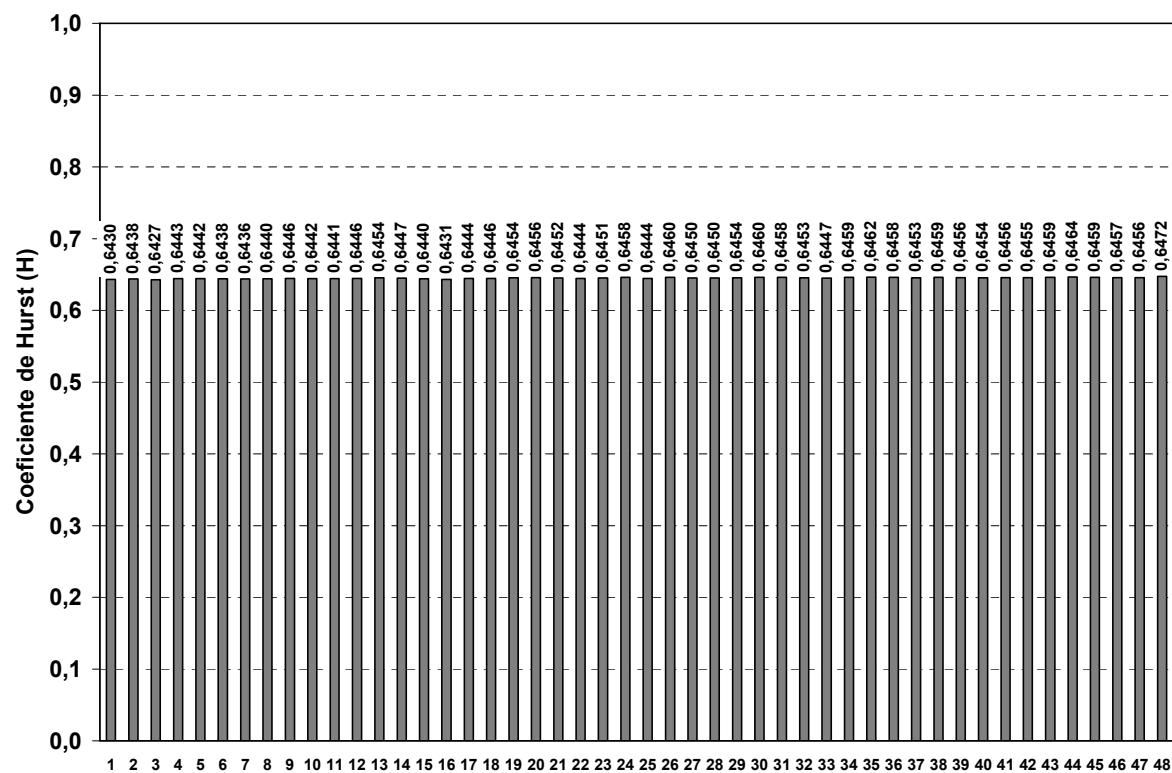


Figura 6.30 - Repetibilidade do Coeficiente de Hurst PZT #4

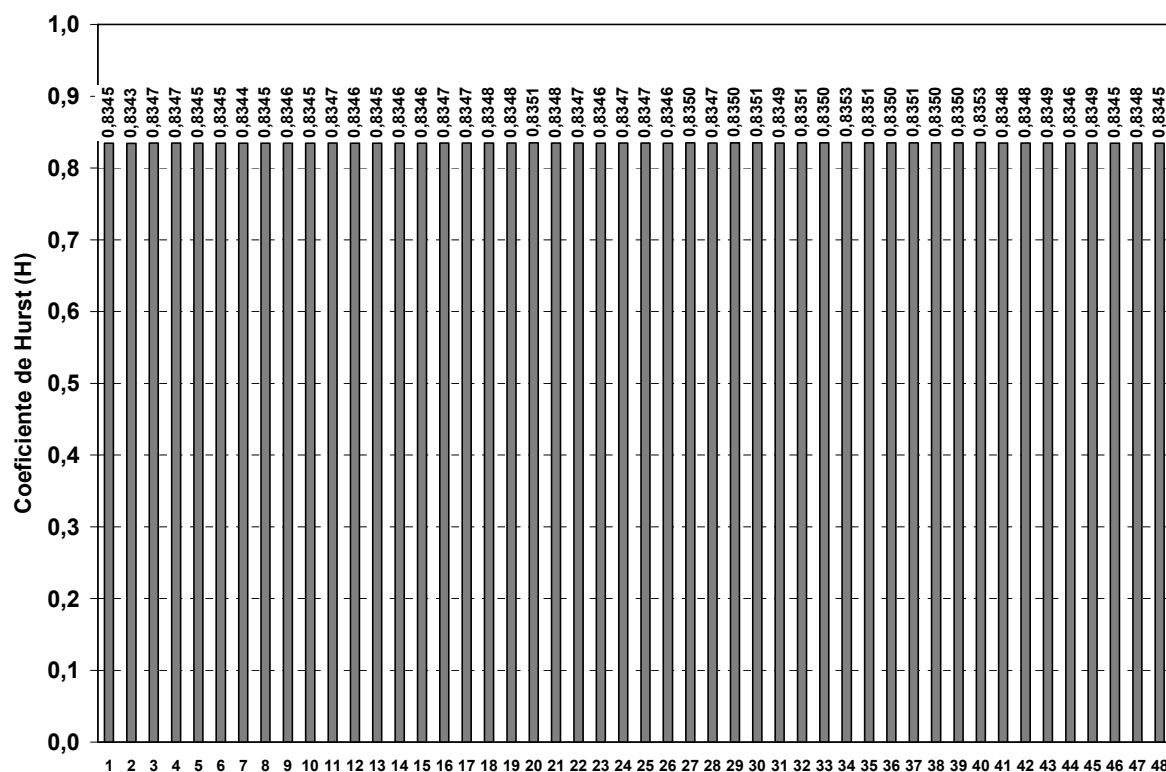


Figura 6.31 - Repetibilidade do Coeficiente de Hurst PZT #5

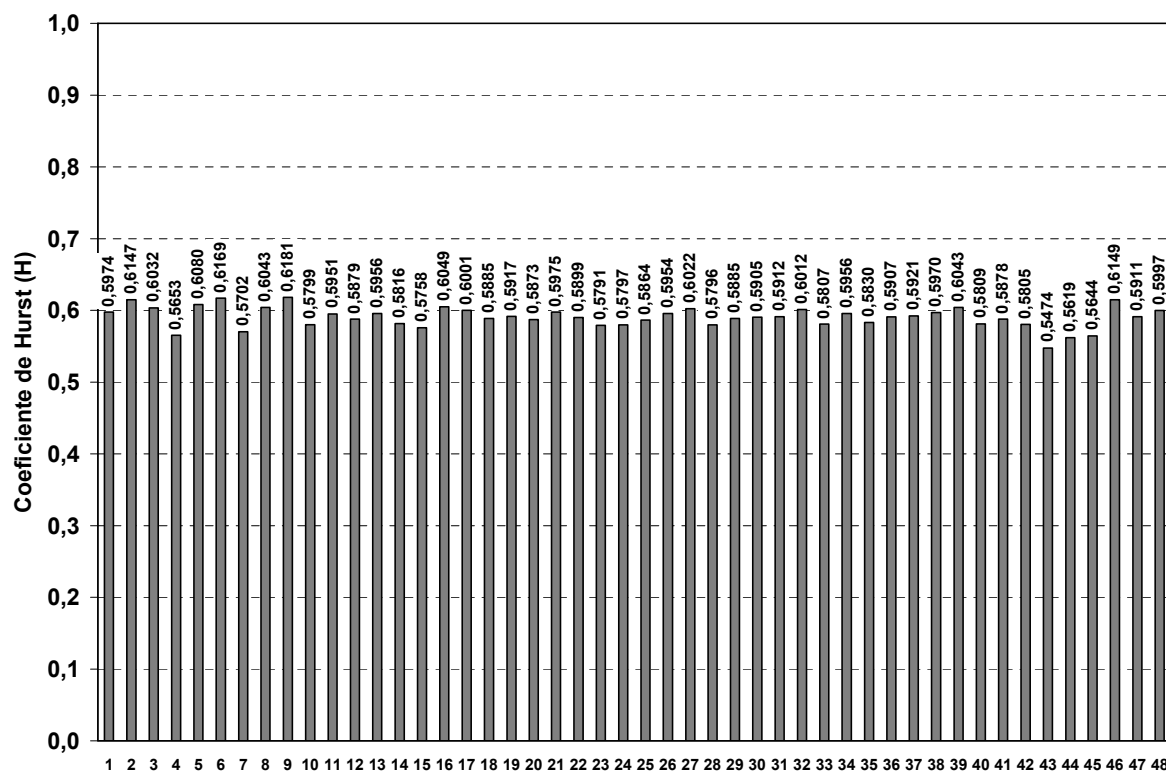


Figura 6.32 - Repetibilidade do Coeficiente de Hurst PZT #6

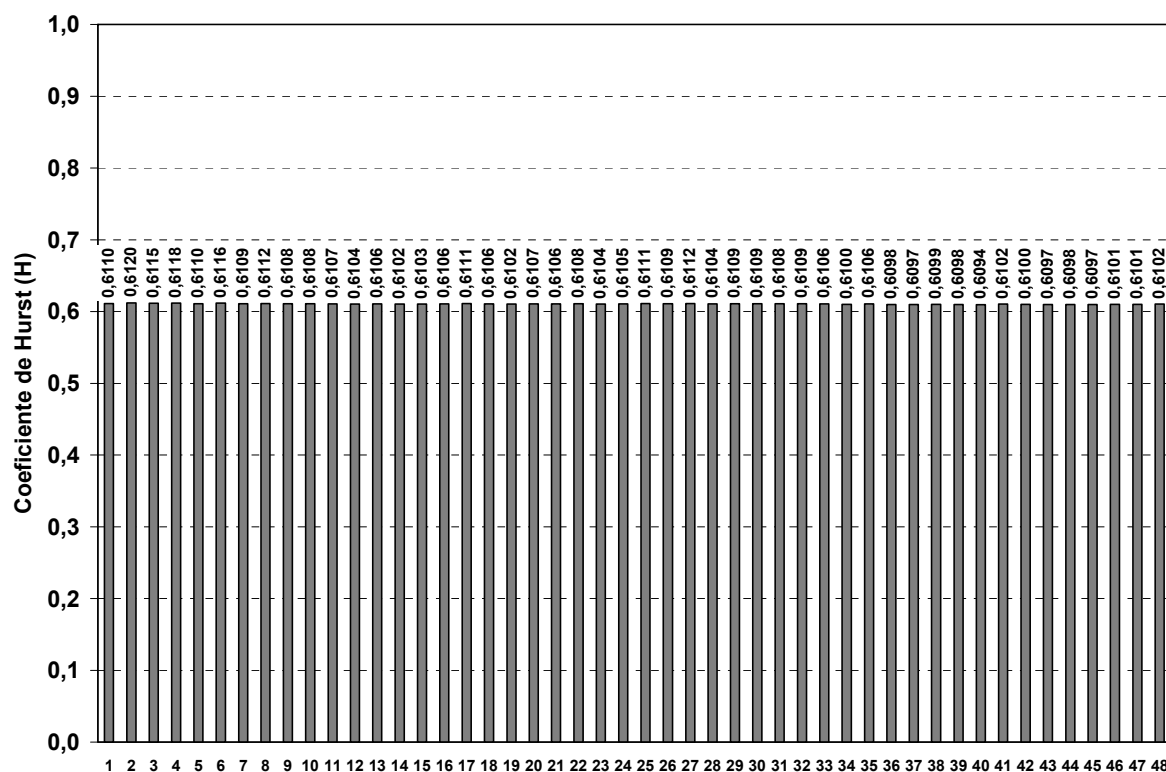


Figura 6.33 - Repetibilidade do Coeficiente de Hurst PZT #7

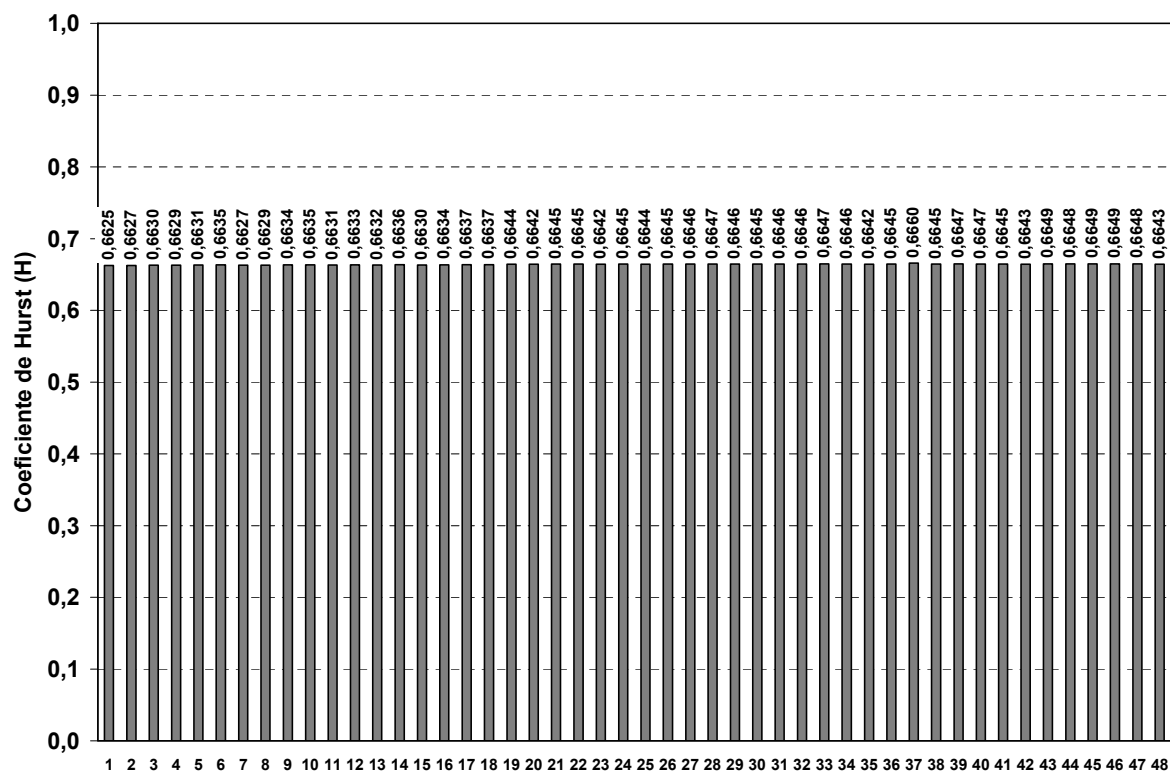


Figura 6.34 - Repetibilidade do Coeficiente de Hurst PZT 8

Tabela 6.6 - Análise Estatística da Repetibilidade do Coeficiente de Hurst

PZT	coeficiente de Hurst médio amostral	desvio-padrão amostral	intervalo de confiança do Hurst médio	intervalo de confiança do desvio-padrão
#1	0,6628	0,0007	[0,6627; 0,6631]	[0,0006; 0,0008]
#2	0,5145	0,0083	[0,6121; 0,6169]	[0,0069; 0,0104]
#3	0,6348	0,0016	[0,6344; 0,6354]	[0,0014; 0,0020]
#4	0,6450	0,0009	[0,6447; 0,6453]	[0,0008; 0,0012]
#5	0,8347	0,0002	[0,8347; 0,8348]	[0,0002; 0,0003]
#6	0,5904	0,0145	[0,5862; 0,5946]	[0,0121; 0,0182]
#7	0,6106	0,0006	[0,6104; 0,6107]	[0,0005; 0,0007]
#8	0,6640	0,0008	[0,6638; 0,6643]	[0,0006; 0,0010]

Analisando os valores do coeficiente de Hurst nas vigas submetidas a temperatura controlada verifica-se um comportamento muito estável do coeficiente de Hurst nas assinaturas para quase todos os PZT, com exceção dos PZT #2 e PZT #6. Assim como nos ensaios em temperatura ambiente, esses PZT apresentam os maiores desvios dos valores médios. Esse fato novamente indica que a fixação desses PZT talvez não esteja apresentando boas características de acoplamento.

Nos demais PZT a variação do coeficiente de Hurst é mínima para a temperatura constante. Os intervalos de confiança dos valores médios e desvios-padrão do coeficiente de Hurst apresentam variação na terceira casa e quarta casa decimal, demonstrando que a escolha de 48 assinaturas fornece uma boa estimativa para o valor médio do coeficiente de Hurst.

Da mesma forma como nos ensaios de repetibilidade em temperatura ambiente, os resultados demonstram que os valores do coeficiente de Hurst obtidos para cada PZT através de repetidas assinaturas fornecem valores correspondentes aos obtidos através de assinaturas únicas.

## 7.

# ANÁLISES DE DANO EM VIGAS DE ALUMÍNIO

### 7.1. Descrição do Procedimento de Ensaios

A proposta desse trabalho de tese é avaliar e comprovar que o coeficiente de Hurst pode ser empregado como ferramenta para detecção de dano em estruturas a partir do método da impedância eletromecânica. Para avaliar o coeficiente de Hurst na detecção de dano realizou-se um conjunto de ensaios em uma estrutura típica.

A estrutura utilizada nos ensaios corresponde 8 vigas de alumínio (contendo pastilhas de PZT semelhantes) e a finalidade dos ensaios é a obtenção das assinaturas de impedância nas diferentes condições de ensaio. O aparato experimental utilizado está apresentado na Seção 4.3 desse trabalho.

Os ensaios foram divididos em dois grandes grupos: ensaios na estrutura **SEM PRESENÇA DE DANO** e ensaios na estrutura **COM PRESENÇA DE DANO**. O dano na estrutura é representado pela adição de massa nas vigas de alumínio através da colagem de porcas de aço inoxidável. Em cada grupo de ensaio foram realizados ensaios em diferentes **TEMPERATURAS CONTROLADAS: -5°C, 10°C, 25°C e 40°C**. Dessa forma, cada condição de ensaio é definida por uma condição de dano (com ou sem presença de dano) e por uma condição de temperatura (quatro temperaturas). Em termos práticos, cada viga contendo PZT foi ensaiada em 8 (oito) condições de ensaios, conforme apresentado na Tabela 7.1.

Em cada condição de ensaio são obtidas 48 assinaturas de impedância na mesma faixa de frequência e mesmo número de pontos. Esse número de assinaturas foi definido para permitir boa estimativa e representatividade dos intervalos de confiança (do valor médio e do desvio-padrão do valor médio) bem como permitir uma boa estimativa do limiar de detecção de dano (*threshold*). A faixa de frequência escolhida é de 100 a 140kHz e as assinaturas contém 4000 pontos, gerando assim uma resolução em frequência de 10Hz por ponto.

Tabela 7.1 - Condições de Ensaio nas Vigas de Alumínio

ensaio	PZT	condição de dano	condição de temperatura
#A	todos	SEM DANO	-5°C ( $\pm 0,5^\circ\text{C}$ )
#B	todos	SEM DANO	10°C ( $\pm 0,5^\circ\text{C}$ )
#C	todos	SEM DANO	25°C ( $\pm 0,5^\circ\text{C}$ )
#D	todos	SEM DANO	40°C ( $\pm 0,5^\circ\text{C}$ )
#E	todos	COM DANO	-5°C ( $\pm 0,5^\circ\text{C}$ )
#F	todos	COM DANO	10°C ( $\pm 0,5^\circ\text{C}$ )
#G	todos	COM DANO	25°C ( $\pm 0,5^\circ\text{C}$ )
#H	todos	COM DANO	40°C ( $\pm 0,5^\circ\text{C}$ )

Para permitir uma melhor interpretação e facilitar a compreensão dos resultados obtidos a partir do coeficiente de Hurst primeiramente são realizadas às análises de dano utilizando as métricas de dano já consolidadas na literatura. As métricas de dano estão apresentadas na Seção 2.5 desse trabalho. Após a apresentação dos resultados das métricas de dano são apresentados os resultados obtidos através dos coeficientes de Hurst.

A comprovação da eficácia do coeficiente de Hurst como parâmetro quantitativo para detecção de dano utilizando assinaturas de impedância (objetivo principal desse trabalho de tese) é obtida através da análise comparativa dos resultados obtidos através do coeficiente Hurst com as métricas de dano.

## 7.2. Análise de Dano Utilizando Métricas de Dano

Para as análises de dano através das métricas de dano deve-se realizar o processo de compensação de temperatura e definição das assinaturas *baseline*.



### 7.2.1. Processo de Compensação de Temperatura

Para analisar assinaturas de impedância obtidas em diferentes temperaturas é necessário primeiramente realizar um processo de compensação de temperatura nas assinaturas obtidas. O método de compensação de temperatura utilizado está apresentado na Seção 2.7 desse trabalho. No processo de compensação de temperatura das assinaturas obtidas nas condições de ensaios sem dano (ensaios #A a #D) a assinatura *baseline* corresponde à assinatura média obtida na temperatura de 25°C sem dano. Essa assinatura média é obtida através da média ponto-a-ponto nas 48 assinaturas de impedâncias obtidas em #C para cada PZT. No processo de compensação de temperatura das assinaturas obtidas nas condições de ensaios com dano (ensaios #E a #H) a assinatura *baseline* corresponde à assinatura média obtida na temperatura de 25°C com dano. Essa assinatura média é obtida através da média ponto-a-ponto nas 48 assinaturas de impedâncias obtidas em #G para cada PZT.

Tabela 7.2 - Referência de Baseline para Compensação de Temperatura

ensaio	PZT	condição de dano	condição de temperatura	baseline compensação
#A	todos	SEM DANO	-5°C ( $\pm 0,5^\circ\text{C}$ )	assinatura média em #C
#B	todos		10°C ( $\pm 0,5^\circ\text{C}$ )	assinatura média em #C
#C	todos		25°C ( $\pm 0,5^\circ\text{C}$ )	assinatura média em #C
#D	todos		40°C ( $\pm 0,5^\circ\text{C}$ )	assinatura média em #C
#E	todos	COM DANO	-5°C ( $\pm 0,5^\circ\text{C}$ )	assinatura média em #G
#F	todos		10°C ( $\pm 0,5^\circ\text{C}$ )	assinatura média em #G
#G	todos		25°C ( $\pm 0,5^\circ\text{C}$ )	assinatura média em #G
#H	todos		40°C ( $\pm 0,5^\circ\text{C}$ )	assinatura média em #G

### 7.2.2. Assinaturas Baseline para Métricas de Dano

Para determinação das métricas de dano das assinaturas compensadas é necessário estabelecer assinaturas *baseline* para utilização nas respectivas equações das métricas de dano. As assinaturas *baseline* devem estar relacionadas à condição saudável da estrutura, sem a presença de dano. Dessa forma, para cada condição de ensaio a assinatura *baseline* corresponde a assinatura compensada média obtida na mesma temperatura sem a presença de dano. A Tabela 7.3 apresentada as assinaturas *baseline* utilizadas para cada condição de ensaio.

Tabela 7.3 - Referência de Baseline para Métricas de Dano

ensaio	PZT	condição de dano	condição de temperatura	baseline compensação
#A	todos	SEM DANO	-5°C ( $\pm 0,5^\circ\text{C}$ )	assinatura média em #A
#B	todos		10°C ( $\pm 0,5^\circ\text{C}$ )	assinatura média em #B
#C	todos		25°C ( $\pm 0,5^\circ\text{C}$ )	assinatura média em #C
#D	todos		40°C ( $\pm 0,5^\circ\text{C}$ )	assinatura média em #D
#E	todos	COM DANO	-5°C ( $\pm 0,5^\circ\text{C}$ )	assinatura média em #A
#F	todos		10°C ( $\pm 0,5^\circ\text{C}$ )	assinatura média em #B
#G	todos		25°C ( $\pm 0,5^\circ\text{C}$ )	assinatura média em #C
#H	todos		40°C ( $\pm 0,5^\circ\text{C}$ )	assinatura média em #D

### 7.2.3. Determinação das Métricas de Dano

A determinação das métricas de dano para cada condição de temperatura em cada PZT é realizado a partir das assinaturas *baseline* e das respectivas assinaturas de impedância compensadas.

Em cada temperatura primeiramente determina-se o valor médio amostral das métricas e o limite superior de controle do desvio-padrão considerando a **CONDIÇÃO SEM DANO** da estrutura. A partir desses valores determina-se o valor do limiar de detecção de dano (*threshold*) para cada métrica. O processo de determinação do *threshold* está apresentado na Seção 2.9 desse trabalho. Em seguida determina-se o valor médio amostral das métricas considerando a **CONDIÇÃO COM DANO** da estrutura, verificando-se assim se o dano é detectado pelas respectivas métricas. A condição de detecção de dano em cada PZT é verificada caso o valor da métrica na condição com dano for significativamente maior do que o valor do *threshold*.

As Figuras 7.1 a 7.8 mostram o processo de detecção de dano nas vigas de alumínio através da métrica de dano CCD considerando a condição de temperatura de 25°C. Os valores das demais métricas de dano para todos os PZT em todas as temperaturas são apresentados da Tabelas 7.4 a 7.11.

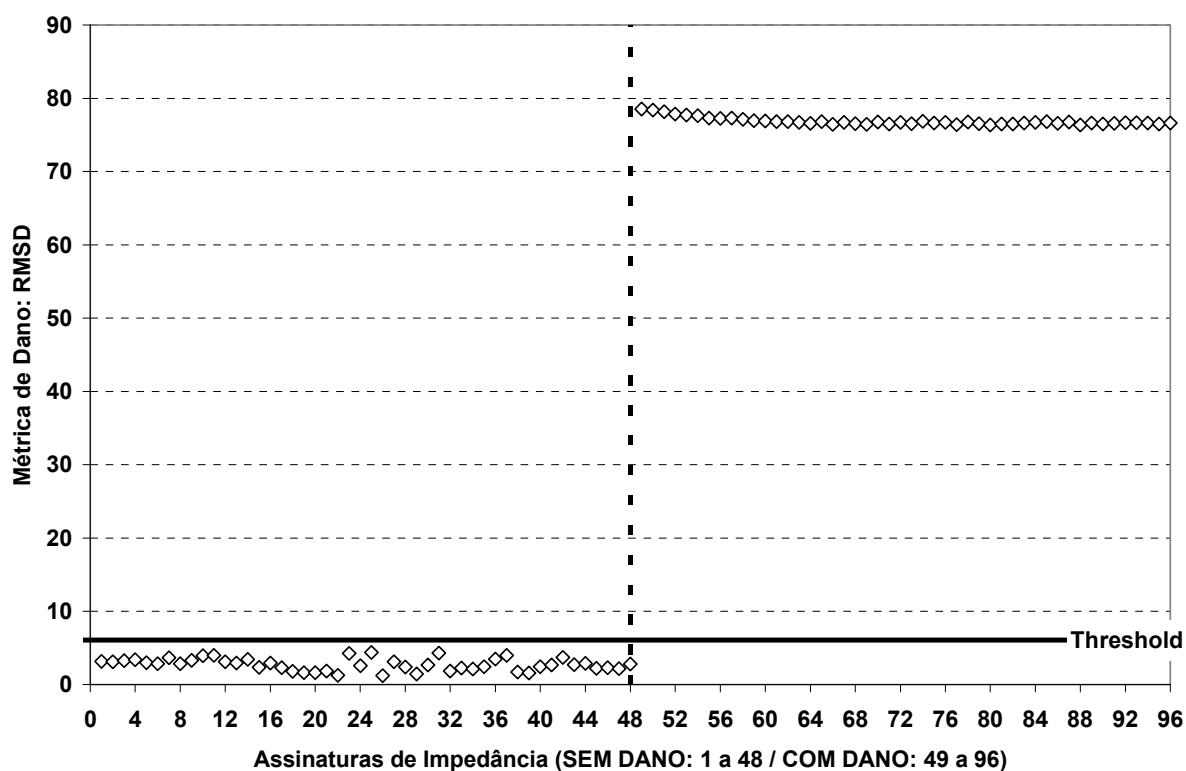


Figura 7.1 - Detecção de Dano Através da Métrica RMSD no PZT #1

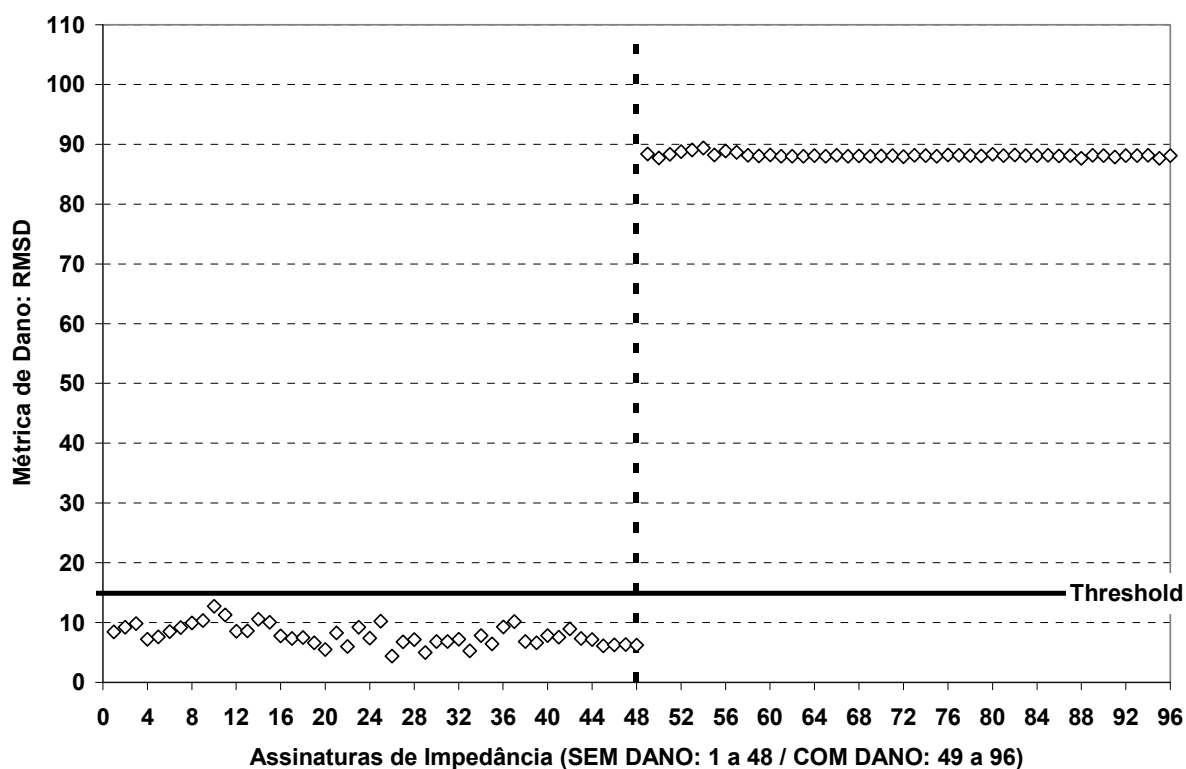


Figura 7.2 - Detecção de Dano Através da Métrica RMSD no PZT #2

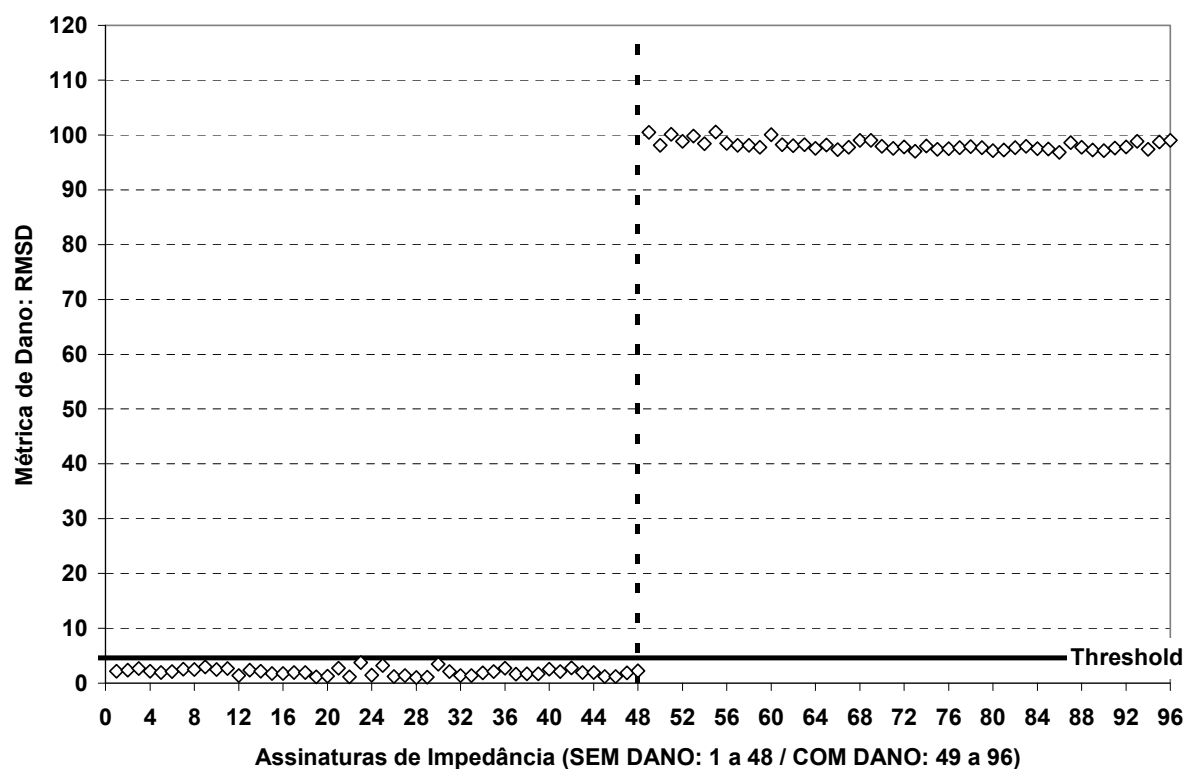


Figura 7.3 - Detecção de Dano Através da Métrica RMSD no PZT #3

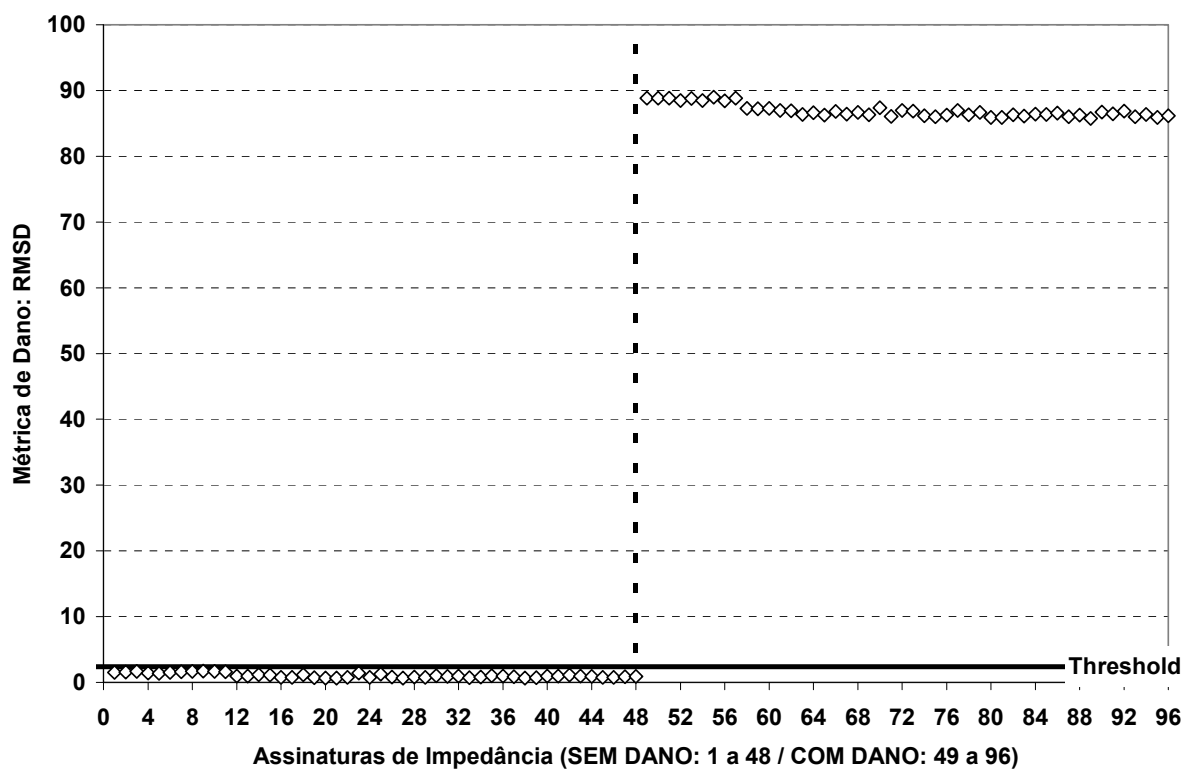


Figura 7.4 - Detecção de Dano Através da Métrica RMSD no PZT #4

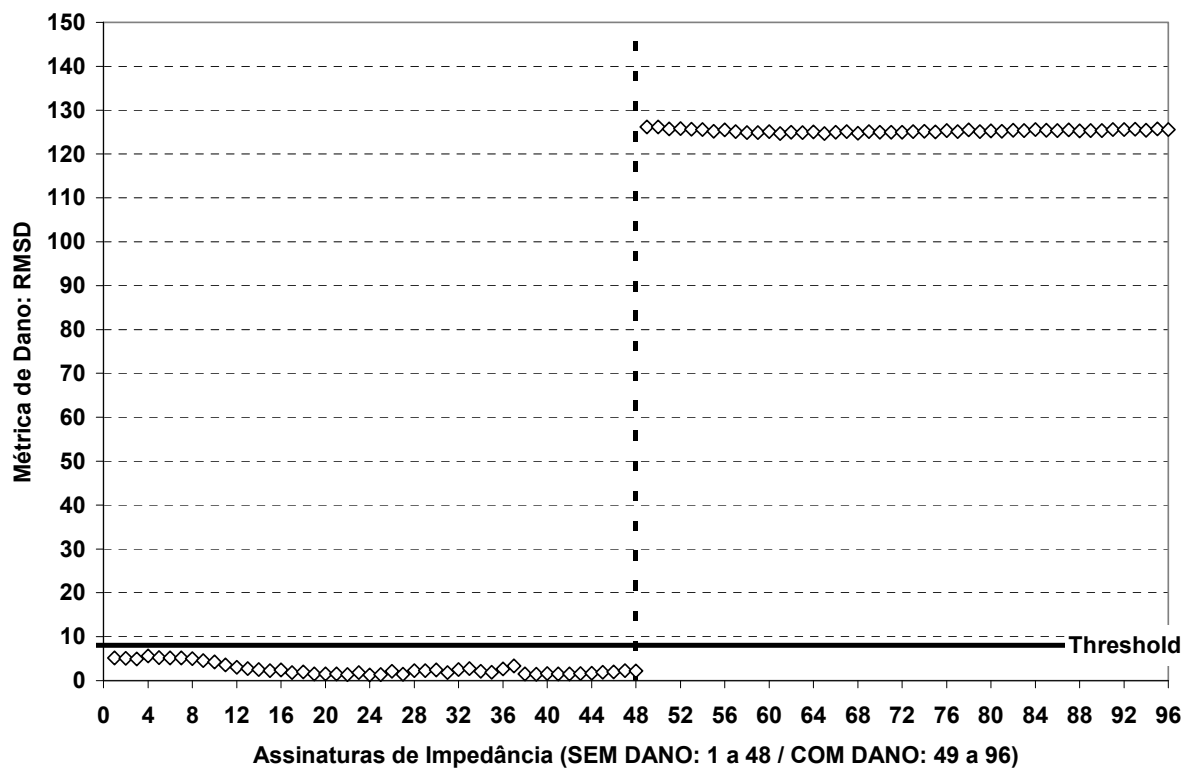


Figura 7.5 - Detecção de Dano Através da Métrica RMSD no PZT #5

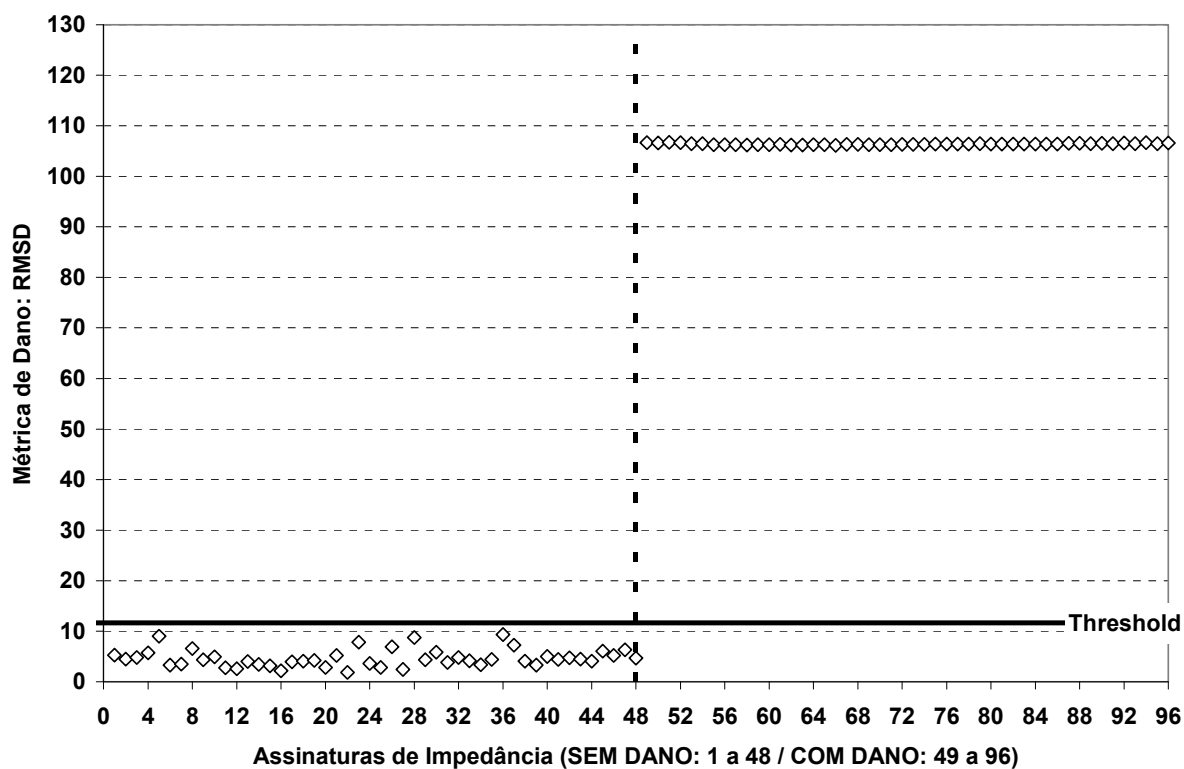


Figura 7.6 - Detecção de Dano Através da Métrica RMSD no PZT #6

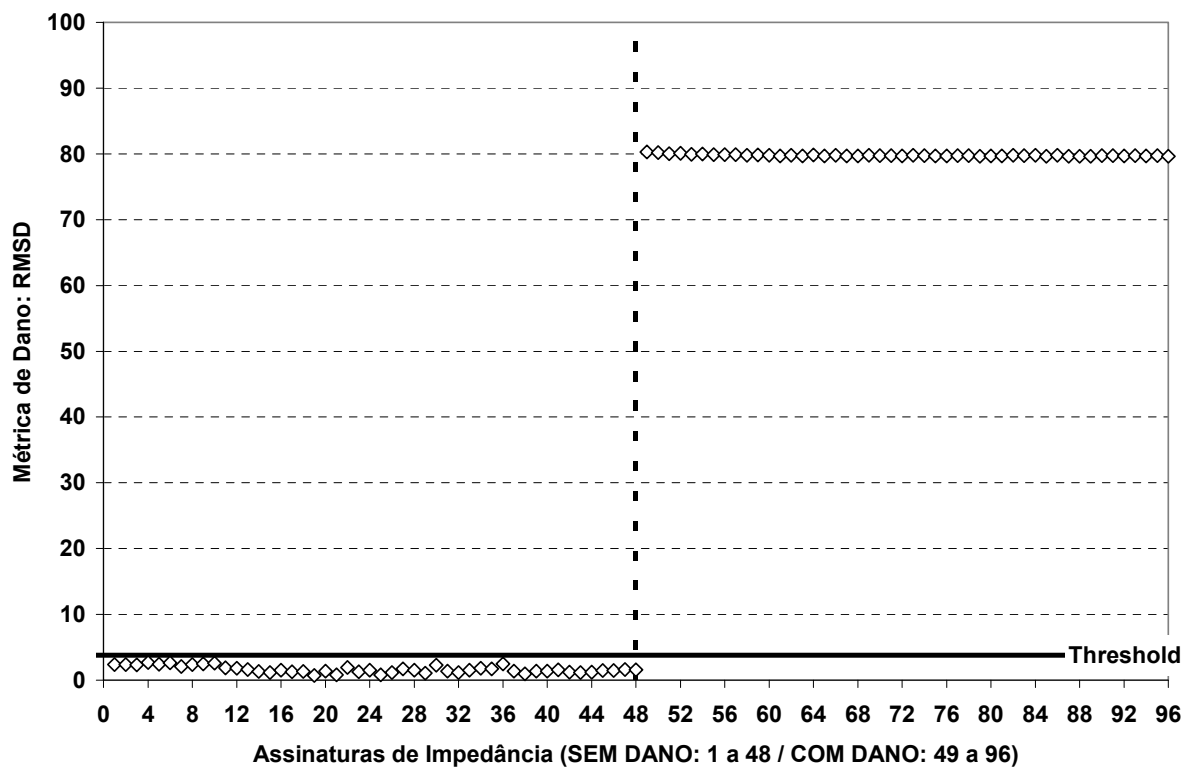


Figura 7.7 - Detecção de Dano Através da Métrica RMSD no PZT #7

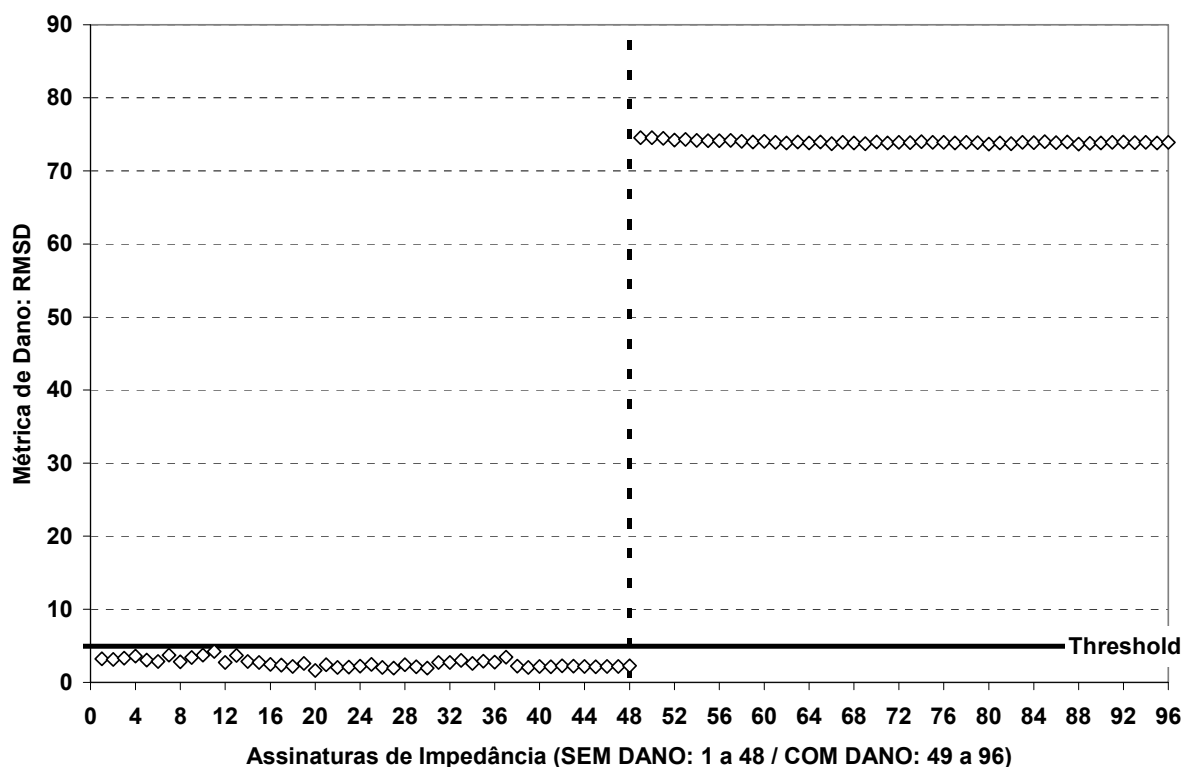


Figura 7.8 - Detecção de Dano Através da Métrica RMSD no PZT #8

Analisando os resultados obtidos verifica-se que em todas as condições de temperatura as métricas de dano foram capazes de indicar a presença de dano nas vigas de alumínio. Os resultados comprovam que a faixa de frequência escolhida para os ensaios e o número de pontos por assinatura se mostram adequados para determinação das métricas de dano. Como o método de compensação de temperatura proporciona uma harmonização nas assinaturas de impedância, em nenhuma condição de ensaio ocorre sobreposição dos intervalos de confiança das métricas obtidas na condição sem dano em relação à condição com dano.

Os resultados obtidos para os PZT #2 e PZT #6 em algumas condições de ensaio apresentam as menores diferenças entre o *threshold* e as métricas com dano. Esse comportamento é condizente com o comportamento apresentado nas análises preliminares do coeficiente de Hurst, indicando novamente que a fixação desses PZT talvez não esteja apresentando boas características de acoplamento.

Tabela 7.4 - Métricas de Dano para Temperatura de -5°C (PZT #1 a PZT #4)

métrica	condição	PZT #1	PZT #2	PZT #3	PZT #4
RMSD	SEM DANO	14,373	15,824	18,329	13,647
	THRESHOLD	47,845	55,886	58,953	35,064
	COM DANO	143,2	135,1	117,5	135,0
RMSD1	SEM DANO	3,068	4,706	5,228	3,444
	THRESHOLD	7,850	20,561	24,693	7,303
	COM DANO	233,4	283,3	338,4	363,6
RMSD2	SEM DANO	0,113	0,128	0,140	0,113
	THRESHOLD	0,377	0,451	0,451	0,290
	COM DANO	1,127	1,091	0,899	1,115
RMSD3	SEM DANO	133,1	139,3	203,3	160,6
	THRESHOLD	317,6	366,7	763,2	358,9
	COM DANO	4398	5916	6647	8211
RMSD4	SEM DANO	14,372	15,823	18,309	13,647
	THRESHOLD	47,845	55,886	58,865	35,063
	COM DANO	143,2	135,1	117,5	135,0
RMSD5	SEM DANO	0,126	0,140	0,154	0,125
	THRESHOLD	0,418	0,494	0,496	0,320
	COM DANO	1,251	1,195	0,989	1,234
CCD	SEM DANO	0,0106	0,0132	0,0152	0,0087
	THRESHOLD	0,0513	0,0767	0,0995	0,0371
	COM DANO	0,8498	0,8440	0,6123	0,9374
ASD (10 <sup>6</sup> )	SEM DANO	1,094	1,385	1,734	0,855
	THRESHOLD	5,338	8,335	11,180	3,524
	COM DANO	82,010	73,023	55,336	72,905
MAPD	SEM DANO	133,1	139,3	203,3	160,6
	THRESHOLD	317,6	366,7	763,2	358,9
	COM DANO	4398	5916	6647	8211
SSD (10 <sup>6</sup> )	SEM DANO	1,094	1,385	1,738	0,855
	THRESHOLD	5,338	8,335	11,216	3,524
	COM DANO	82,011	73,037	55,339	72,905



Tabela 7.5 - Métricas de Dano para Temperatura de -5°C (PZT #5 a PZT #8)

métrica	condição	PZT #5	PZT #6	PZT #7	PZT #8
RMSD	SEM DANO	21,236	39,018	9,852	16,175
	THRESHOLD	31,543	102,234	19,897	54,228
	COM DANO	142,2	115,9	96,7	131,9
RMSD1	SEM DANO	6,291	6,229	2,979	4,267
	THRESHOLD	9,983	17,209	4,758	8,379
	COM DANO	90,0	256,9	249,7	229,0
RMSD2	SEM DANO	0,097	0,338	0,093	0,127
	THRESHOLD	0,144	0,885	0,188	0,426
	COM DANO	0,651	1,003	0,913	1,039
RMSD3	SEM DANO	265,5	226,5	132,6	136,192
	THRESHOLD	433,0	620,5	216,4	342,162
	COM DANO	2467	5613	5970	5157
RMSD4	SEM DANO	21,224	39,014	9,849	15,538
	THRESHOLD	31,553	102,238	19,894	49,415
	COM DANO	142,1	115,9	96,6	132,7
RMSD5	SEM DANO	0,132	0,374	0,107	0,136
	THRESHOLD	0,196	0,979	0,215	0,432
	COM DANO	0,885	1,110	1,047	1,167
CCD	SEM DANO	0,0090	0,0067	0,0062	0,0130
	THRESHOLD	0,0177	0,0203	0,0188	0,0758
	COM DANO	0,3903	0,6671	0,6824	0,7687
ASD (10 <sup>6</sup> )	SEM DANO	1,827	7,044	0,412	25,396
	THRESHOLD	3,585	29,549	1,262	52,968
	COM DANO	80,787	53,793	37,315	83,077
MAPD	SEM DANO	265,5	226,5	132,6	825,3
	THRESHOLD	433,0	620,5	216,4	1116,2
	COM DANO	2467	5613	5970	7538
SSD (10 <sup>6</sup> )	SEM DANO	1,829	7,045	0,412	25,398
	THRESHOLD	3,585	29,551	1,262	52,976
	COM DANO	80,834	53,793	37,410	83,127

Tabela 7.6 - Métricas de Dano para Temperatura de 10°C (PZT #1 a PZT #4)

métrica	condição	PZT #1	PZT #2	PZT #3	PZT #4
RMSD	SEM DANO	2,364	7,237	3,075	1,515
	THRESHOLD	11,388	38,082	12,227	5,593
	COM DANO	97,5	114,2	126,6	103,8
RMSD1	SEM DANO	1,446	2,192	1,735	1,684
	THRESHOLD	3,293	6,445	3,132	2,635
	COM DANO	161,9	216,1	349,1	264,7
RMSD2	SEM DANO	0,021	0,062	0,026	0,015
	THRESHOLD	0,103	0,324	0,102	0,057
	COM DANO	0,884	0,973	1,060	1,057
RMSD3	SEM DANO	58,4	81,2	66,6	65,1
	THRESHOLD	147,0	236,1	143,3	127,2
	COM DANO	3378	4881	6814	6207
RMSD4	SEM DANO	2,363	7,237	3,075	1,515
	THRESHOLD	11,385	38,082	12,226	5,592
	COM DANO	97,4	114,2	126,6	103,8
RMSD5	SEM DANO	0,025	0,069	0,029	0,019
	THRESHOLD	0,120	0,364	0,117	0,068
	COM DANO	1,028	1,091	1,207	1,270
CCD	SEM DANO	0,0008	0,0051	0,0009	0,0005
	THRESHOLD	0,0086	0,0632	0,0079	0,0025
	COM DANO	0,5542	0,6618	0,7920	0,7516
ASD (10 <sup>6</sup> )	SEM DANO	0,042	0,437	0,058	0,013
	THRESHOLD	0,596	5,665	0,671	0,123
	COM DANO	37,982	52,223	64,209	43,131
MAPD	SEM DANO	58,4	81,2	66,6	65,1
	THRESHOLD	147,0	236,1	143,3	127,2
	COM DANO	3378	4881	6814	6207
SSD (10 <sup>6</sup> )	SEM DANO	0,042	0,437	0,058	0,013
	THRESHOLD	0,596	5,665	0,671	0,123
	COM DANO	38,000	52,225	64,209	43,132

Tabela 7.7 - Métricas de Dano para Temperatura de 10°C (PZT #5 a PZT #8)

métrica	condição	PZT #5	PZT #6	PZT #7	PZT #8
RMSD	SEM DANO	6,087	5,618	2,084	10,055
	THRESHOLD	10,824	21,137	8,160	59,012
	COM DANO	135,7	118,1	89,3	105,5
RMSD1	SEM DANO	1,771	2,909	1,892	2,667
	THRESHOLD	3,048	24,133	3,185	21,247
	COM DANO	89,9	447,0	287,5	258,7
RMSD2	SEM DANO	0,028	0,051	0,021	0,086
	THRESHOLD	0,050	0,190	0,082	0,507
	COM DANO	0,628	1,062	0,893	0,906
RMSD3	SEM DANO	82,5	76,4	75,1	70,5
	THRESHOLD	142,3	176,6	157,2	281,9
	COM DANO	2148	6838	6019	5346
RMSD4	SEM DANO	6,087	5,617	2,083	10,053
	THRESHOLD	10,824	21,134	8,158	59,007
	COM DANO	135,7	118,1	89,3	105,5
RMSD5	SEM DANO	0,039	0,057	0,024	0,098
	THRESHOLD	0,069	0,214	0,093	0,574
	COM DANO	0,864	1,197	1,023	1,027
CCD	SEM DANO	0,0010	0,0025	0,0007	0,0110
	THRESHOLD	0,0024	0,0149	0,0049	0,1734
	COM DANO	0,3793	0,7368	0,6330	0,6656
ASD (10 <sup>6</sup> )	SEM DANO	0,154	0,184	0,026	0,977
	THRESHOLD	0,426	1,189	0,285	15,272
	COM DANO	73,702	55,802	31,918	44,538
MAPD	SEM DANO	82,5	76,4	75,1	70,5
	THRESHOLD	142,3	176,6	157,2	281,9
	COM DANO	2148	6838	6019	5346
SSD (10 <sup>6</sup> )	SEM DANO	0,154	0,184	0,026	0,977
	THRESHOLD	0,426	1,190	0,285	15,273
	COM DANO	73,705	55,811	31,918	44,541

Tabela 7.8 - Métricas de Dano para Temperatura de 25°C (PZT #1 a PZT #4)

métrica	condição	PZT #1	PZT #2	PZT #3	PZT #4
RMSD	SEM DANO	2,751	7,886	2,030	1,044
	THRESHOLD	6,096	14,920	4,637	2,399
	COM DANO	76,9	88,2	98,1	86,9
RMSD1	SEM DANO	1,539	1,904	1,580	1,397
	THRESHOLD	4,513	5,735	4,273	3,263
	COM DANO	116,7	147,3	178,3	157,1
RMSD2	SEM DANO	0,044	0,106	0,033	0,022
	THRESHOLD	0,186	0,417	0,152	0,102
	COM DANO	0,750	0,790	0,873	0,918
RMSD3	SEM DANO	67,4	79,7	65,5	57,3
	THRESHOLD	204,4	237,3	200,2	161,3
	COM DANO	2669	3653	4783	4497
RMSD4	SEM DANO	4,540	11,915	3,749	2,067
	THRESHOLD	19,037	46,728	17,138	9,616
	COM DANO	76,9	88,4	98,1	86,9
RMSD5	SEM DANO	0,054	0,124	0,040	0,027
	THRESHOLD	0,228	0,487	0,182	0,127
	COM DANO	0,919	0,921	1,040	1,147
CCD	SEM DANO	0,0026	0,0110	0,0016	0,0009
	THRESHOLD	0,0175	0,0781	0,0110	0,0055
	COM DANO	0,4485	0,4942	0,5667	0,6453
ASD (10 <sup>6</sup> )	SEM DANO	0,133	0,858	0,099	0,031
	THRESHOLD	0,987	6,489	0,769	0,242
	COM DANO	23,631	31,254	38,526	30,208
MAPD	SEM DANO	67,4	79,7	65,5	57,3
	THRESHOLD	204,4	237,3	200,2	161,3
	COM DANO	2669	3653	4783	4497
SSD (10 <sup>6</sup> )	SEM DANO	0,133	0,858	0,099	0,031
	THRESHOLD	0,987	6,490	0,769	0,242
	COM DANO	23,631	31,254	38,526	30,208

Tabela 7.9 - Métricas de Dano para Temperatura de 25°C (PZT #5 a PZT #8)

métrica	condição	PZT #5	PZT #6	PZT #7	PZT #8
RMSD	SEM DANO	2,662	4,671	1,641	2,632
	THRESHOLD	8,060	11,662	3,777	4,979
	COM DANO	125,3	106,4	79,8	73,9
RMSD1	SEM DANO	1,082	1,984	1,816	1,511
	THRESHOLD	3,364	5,133	4,404	5,230
	COM DANO	65,7	204,1	152,6	136,9
RMSD2	SEM DANO	0,018	0,075	0,030	0,045
	THRESHOLD	0,056	0,301	0,128	0,178
	COM DANO	0,593	0,997	0,833	0,754
RMSD3	SEM DANO	53,1	75,9	74,9	66,1
	THRESHOLD	166,9	209,3	205,6	240,6
	COM DANO	1842	4947	4356	3734
RMSD4	SEM DANO	3,719	7,982	2,902	4,445
	THRESHOLD	11,912	32,125	12,222	17,443
	COM DANO	125,3	106,4	79,8	73,9
RMSD5	SEM DANO	0,025	0,087	0,036	0,058
	THRESHOLD	0,080	0,350	0,151	0,227
	COM DANO	0,840	1,161	0,987	0,963
CCD	SEM DANO	0,0006	0,0058	0,0013	0,0028
	THRESHOLD	0,0023	0,0365	0,0078	0,0180
	COM DANO	0,3617	0,7276	0,5809	0,5528
ASD (10 <sup>6</sup> )	SEM DANO	0,071	0,394	0,054	0,119
	THRESHOLD	0,371	2,594	0,398	0,851
	COM DANO	62,760	45,276	25,459	21,858
MAPD	SEM DANO	53,1	75,9	74,9	66,1
	THRESHOLD	166,9	209,3	205,6	240,6
	COM DANO	1842	4947	4356	3734
SSD (10 <sup>6</sup> )	SEM DANO	0,071	0,394	0,054	0,120
	THRESHOLD	0,371	2,595	0,398	0,852
	COM DANO	62,783	45,278	25,459	21,859

Tabela 7.10 - Métricas de Dano para Temperatura de 40°C (PZT #1 a PZT #4)

métrica	condição	PZT #1	PZT #2	PZT #3	PZT #4
RMSD	SEM DANO	2,022	2,855	4,005	1,544
	THRESHOLD	11,492	15,250	17,033	7,359
	COM DANO	53,9	78,6	90,2	82,3
RMSD1	SEM DANO	0,915	0,891	1,473	1,056
	THRESHOLD	3,158	3,189	4,758	2,963
	COM DANO	70,2	89,6	117,5	110,3
RMSD2	SEM DANO	0,022	0,029	0,038	0,017
	THRESHOLD	0,126	0,154	0,160	0,082
	COM DANO	0,591	0,796	0,847	0,922
RMSD3	SEM DANO	36,7	36,8	61,5	46,1
	THRESHOLD	116,7	123,2	199,2	140,2
	COM DANO	1886	2537	3727	3635
RMSD4	SEM DANO	2,021	2,855	4,005	1,543
	THRESHOLD	11,493	15,250	17,034	7,360
	COM DANO	53,9	78,6	90,2	82,3
RMSD5	SEM DANO	0,032	0,038	0,048	0,024
	THRESHOLD	0,182	0,201	0,206	0,113
	COM DANO	0,854	1,035	1,092	1,267
CCD	SEM DANO	0,0014	0,0017	0,0021	0,0008
	THRESHOLD	0,0139	0,0227	0,0153	0,0061
	COM DANO	0,4020	0,6539	0,6880	0,8128
ASD (10 <sup>6</sup> )	SEM DANO	0,038	0,069	0,105	0,018
	THRESHOLD	0,442	1,054	0,829	0,199
	COM DANO	11,605	24,713	32,555	27,115
MAPD	SEM DANO	36,7	36,8	61,5	46,1
	THRESHOLD	116,7	123,2	199,2	140,2
	COM DANO	1886	2537	3727	3635
SSD (10 <sup>6</sup> )	SEM DANO	0,038	0,069	0,105	0,018
	THRESHOLD	0,442	1,054	0,829	0,199
	COM DANO	11,605	24,713	32,555	27,115

Tabela 7.11 - Métricas de Dano para Temperatura de 40°C (PZT #5 a PZT #8)

métrica	condição	PZT #5	PZT #6	PZT #7	PZT #8
RMSD	SEM DANO	2,124	5,666	1,655	2,959
	THRESHOLD	8,216	15,047	6,815	10,420
	COM DANO	105,6	89,7	75,4	59,8
RMSD1	SEM DANO	0,737	2,043	1,051	1,167
	THRESHOLD	2,539	4,926	2,456	2,912
	COM DANO	42,8	121,8	108,2	70,2
RMSD2	SEM DANO	0,011	0,060	0,018	0,029
	THRESHOLD	0,041	0,159	0,075	0,101
	COM DANO	0,530	0,946	0,828	0,582
RMSD3	SEM DANO	35,0	68,7	43,8	48,8
	THRESHOLD	116,4	170,6	122,6	125,0
	COM DANO	1330	3529	3282	2292
RMSD4	SEM DANO	2,083	5,666	1,653	2,957
	THRESHOLD	8,137	15,047	6,815	10,420
	COM DANO	105,6	89,7	75,4	59,7
RMSD5	SEM DANO	0,017	0,075	0,023	0,041
	THRESHOLD	0,067	0,199	0,096	0,145
	COM DANO	0,857	1,189	1,060	0,832
CCD	SEM DANO	0,0005	0,0034	0,0006	0,0014
	THRESHOLD	0,0021	0,0155	0,0038	0,0105
	COM DANO	0,3651	0,7140	0,6882	0,3823
ASD (10 <sup>6</sup> )	SEM DANO	0,026	0,149	0,017	0,048
	THRESHOLD	0,227	0,710	0,160	0,425
	COM DANO	44,582	32,216	22,727	14,281
MAPD	SEM DANO	35,0	68,7	43,8	48,8
	THRESHOLD	116,4	170,6	122,6	125,0
	COM DANO	1330	3529	3282	2292
SSD (10 <sup>6</sup> )	SEM DANO	0,027	0,149	0,017	0,048
	THRESHOLD	0,230	0,710	0,160	0,425
	COM DANO	44,604	32,220	22,728	14,283

### 7.3. Análise de Dano Utilizando o Coeficiente de Hurst

As análises de dano utilizando o coeficiente de Hurst são realizadas considerando as assinaturas de impedância originais, sem processo de compensação de temperatura. Conforme apresentado e discutido na Seção 4.7.2, os valores do coeficiente de Hurst não sofrem variação significativa para pequenas variações de temperatura (pequenos deslocamentos horizontais e verticais).

#### 7.3.1. Coeficiente de Hurst das Assinaturas

A determinação do coeficiente de Hurst das assinaturas de impedância nas condições **SEM DANO** e **COM DANO** na estrutura, para cada PZT e temperatura é realizada utilizando um fator de escala de 200. Dessa forma, cada assinatura individual contendo 4000 pontos é analisada a partir de 12 séries de dados. A partir dos valores individuais do coeficiente de Hurst das assinaturas é calculado o valor médio amostral e os respectivos intervalos de confiança (IC) para os valores médios e desvios-padrão. Os resultados dos coeficientes de Hurst sem dano e com dano são apresentados nas Tabelas 7.12 a 7.15.

#### 7.3.2. Detecção de Dano Utilizando o Coeficiente de Hurst

Para avaliar a aplicabilidade do coeficiente de Hurst como ferramenta de detecção de dano na estrutura empregou-se o conceito do limiar de detecção de dano. A partir dos valores médios e dos desvios-padrão em cada temperatura é determinado o coeficiente de Hurst no limiar de detecção de dano. Nas Tabelas 7.12 a 7.15 são apresentados os valores de *threshold* com destaque para o critério de detecção de dano (SIM ou NÃO), o qual é baseado na análise dos valores individuais do coeficiente de Hurst sem e com dano em relação ao *threshold*. Para ilustrar os resultados, as Figuras 7.9 a 7.16 mostram os valores do coeficiente de Hurst na temperatura de 25°C considerando os valores sem dano, com dano e *threshold*.



Tabela 7.12 - Coeficientes de Hurst para Temperatura de -5°C

PZT	SEM DANO		COM DANO		LIMITE	
	coeficiente de Hurst médio	IC(95%) do valor médio IC(95%) do desvio-padrão	coeficiente de Hurst médio	IC(95%) do valor médio IC(95%) do desvio-padrão	threshold	dano detectável?
#1	0,5861	[0,5861; 0,5862] [0,0003; 0,0004]	0,6036	[0,6035; 0,6038] [0,0005; 0,0008]	0,5874	SIM
#2	0,5993	[0,5989; 0,5998] [0,0012; 0,0018]	0,6468	[0,6464; 0,6471] [0,0011; 0,0016]	0,6050	SIM
#3	0,5975	[0,5966; 0,5985] [0,0028; 0,0042]	0,6332	[0,6330; 0,6334] [0,0006; 0,0008]	0,6111	SIM
#4	0,5867	[0,5860; 0,5873] [0,0018; 0,0027]	0,6582	[0,6578; 0,6585] [0,0010; 0,0015]	0,5953	SIM
#5	0,8066	[0,8065; 0,8067] [0,0002; 0,0003]	0,8178	[0,8176; 0,8179] [0,0004; 0,0006]	0,8075	SIM
#6	0,5632	[0,5625; 0,5640] [0,0022; 0,0033]	0,6148	[0,6143; 0,6154] [0,0015; 0,0023]	0,5737	SIM
#7	0,5717	[0,5714; 0,5719] [0,0008; 0,0011]	0,6242	[0,6240; 0,6244] [0,0007; 0,0010]	0,5753	SIM
#8	0,5760	[0,5755; 0,5765] [0,0014; 0,0022]	0,6354	[0,6348; 0,6361] [0,0018; 0,0027]	0,5829	SIM

Tabela 7.13 - Coeficientes de Hurst para Temperatura de 10°C

PZT	SEM DANO		COM DANO		LIMITE	
	coeficiente de Hurst médio	IC(95%) do valor médio IC(95%) do desvio-padrão	coeficiente de Hurst médio	IC(95%) do valor médio IC(95%) do desvio-padrão	threshold	dano detectável?
#1	0,6284	[0,6282; 0,6286] [0,0005; 0,0007]	0,6583	[0,6580; 0,6586] [0,0007; 0,0011]	0,6306	SIM
#2	0,6088	[0,6084; 0,6092] [0,0012; 0,0018]	0,6598	[0,6593; 0,6603] [0,0014; 0,0021]	0,6144	SIM
#3	0,6166	[0,6164; 0,6168] [0,0006; 0,0009]	0,6559	[0,6557; 0,6561] [0,0006; 0,0009]	0,6196	SIM
#4	0,6236	[0,6235; 0,6238] [0,0005; 0,0007]	0,6728	[0,6726; 0,6731] [0,0007; 0,0011]	0,6260	SIM
#5	0,8260	[0,8259; 0,8261] [0,0003; 0,0005]	0,8404	[0,8402; 0,8405] [0,0004; 0,0007]	0,8275	SIM
#6	0,5807	[0,5804; 0,5809] [0,0008; 0,0012]	0,6242	[0,6239; 0,6245] [0,0009; 0,0014]	0,5846	SIM
#7	0,5923	[0,5920; 0,5925] [0,0006; 0,0009]	0,6442	[0,6438; 0,6445] [0,0011; 0,0016]	0,5952	SIM
#8	0,6043	[0,6039; 0,6047] [0,0011; 0,0017]	0,6674	[0,6671; 0,6676] [0,0007; 0,0011]	0,6098	SIM

Tabela 7.14 - Coeficientes de Hurst para Temperatura de 25°C

PZT	SEM DANO		COM DANO		LIMITE	
	coeficiente de Hurst médio	IC(95%) do valor médio IC(95%) do desvio-padrão	coeficiente de Hurst médio	IC(95%) do valor médio IC(95%) do desvio-padrão	threshold	dano detectável?
#1	0,6612	[0,6610; 0,6613] [0,0004; 0,0006]	0,6930	[0,6930; 0,6931] [0,0002; 0,0003]	0,6632	SIM
#2	0,6290	[0,6287; 0,6293] [0,0004; 0,0006]	0,6808	[0,6805; 0,6811] [0,0009; 0,0014]	0,6330	SIM
#3	0,6379	[0,6378; 0,6381] [0,0004; 0,0006]	0,6858	[0,6857; 0,6859] [0,0004; 0,0005]	0,6398	SIM
#4	0,6559	[0,6557; 0,6561] [0,0006; 0,0008]	0,6965	[0,6962; 0,6967] [0,0007; 0,0011]	0,6586	SIM
#5	0,8320	[0,8319; 0,8321] [0,0003; 0,0005]	0,8534	[0,8533; 0,8534] [0,0002; 0,0003]	0,8336	SIM
#6	0,6160	[0,6157; 0,6185] [0,0009; 0,0013]	0,6547	[0,6545; 0,6548] [0,0006; 0,0009]	0,6208	SIM
#7	0,6183	[0,6180; 0,6185] [0,0009; 0,0013]	0,6813	[0,6812; 0,6814] [0,0003; 0,0004]	0,6224	SIM
#8	0,6609	[0,6608; 0,6611] [0,0004; 0,0006]	0,7103	[0,7102; 0,7104] [0,0002; 0,0003]	0,6629	SIM

Tabela 7.15 - Coeficientes de Hurst para Temperatura de 40°C

PZT	SEM DANO		COM DANO		LIMITE	
	coeficiente de Hurst médio	IC(95%) do valor médio IC(95%) do desvio-padrão	coeficiente de Hurst médio	IC(95%) do valor médio IC(95%) do desvio-padrão	threshold	dano detectável?
#1	0,7216	[0,7216; 0,7217] [0,0002; 0,0003]	0,7381	[0,7380; 0,7382] [0,0003; 0,0004]	0,7225	SIM
#2	0,6834	[0,6831; 0,6837] [0,0008; 0,0012]	0,7375	[0,7374; 0,7376] [0,0003; 0,0005]	0,6872	SIM
#3	0,6574	[0,6571; 0,6576] [0,0007; 0,0011]	0,7309	[0,7306; 0,7313] [0,0010; 0,0015]	0,6610	SIM
#4	0,6893	[0,6891; 0,6895] [0,0005; 0,0008]	0,7345	[0,7342; 0,7347] [0,0008; 0,0012]	0,6918	SIM
#5	0,8382	[0,8382; 0,8383] [0,0001; 0,0002]	0,8660	[0,8660; 0,8661] [0,0001; 0,0002]	0,8388	SIM
#6	0,6554	[0,6550; 0,6557] [0,0010; 0,0014]	0,7083	[0,7082; 0,7084] [0,0003; 0,0004]	0,6600	SIM
#7	0,6723	[0,6722; 0,6724] [0,0004; 0,0005]	0,7000	[0,6999; 0,7002] [0,0004; 0,0006]	0,6741	SIM
#8	0,6819	[0,6816; 0,6822] [0,0009; 0,0014]	0,7485	[0,7483; 0,7488] [0,0007; 0,0011]	0,6864	SIM

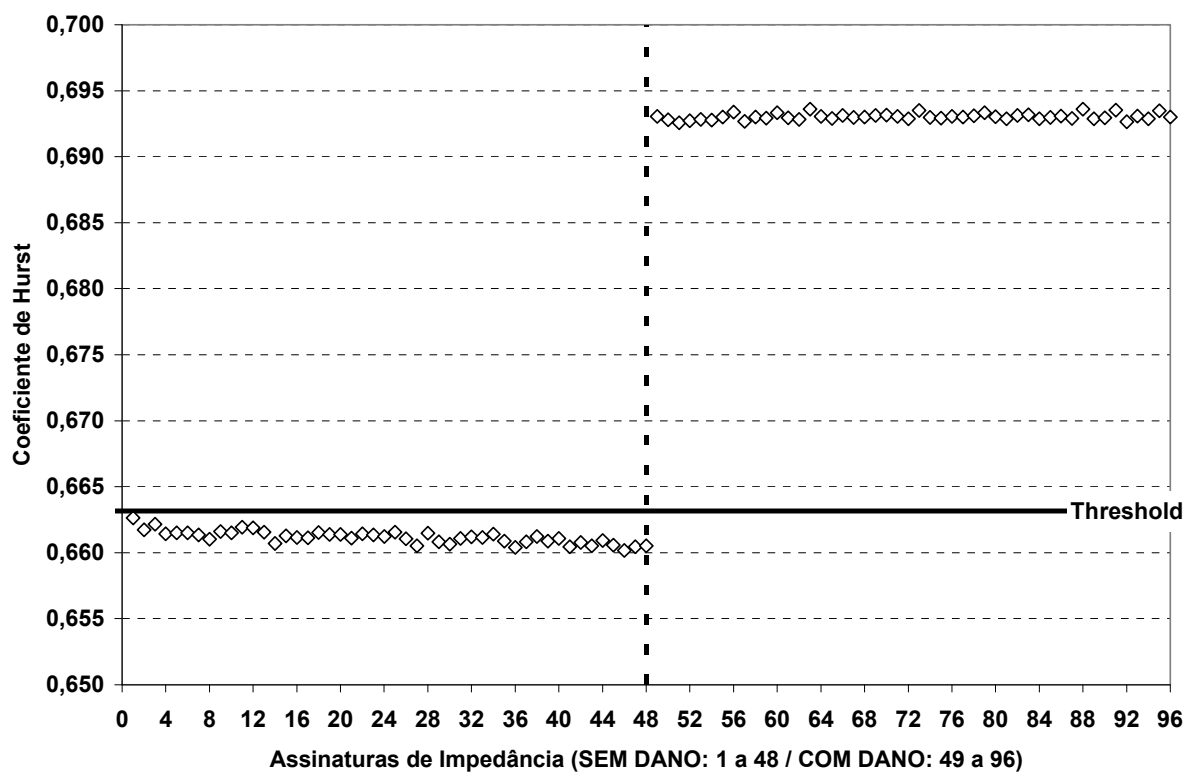


Figura 7.9 - Detecção de Dano: Coeficiente de Hurst PZT#1 a 25°C

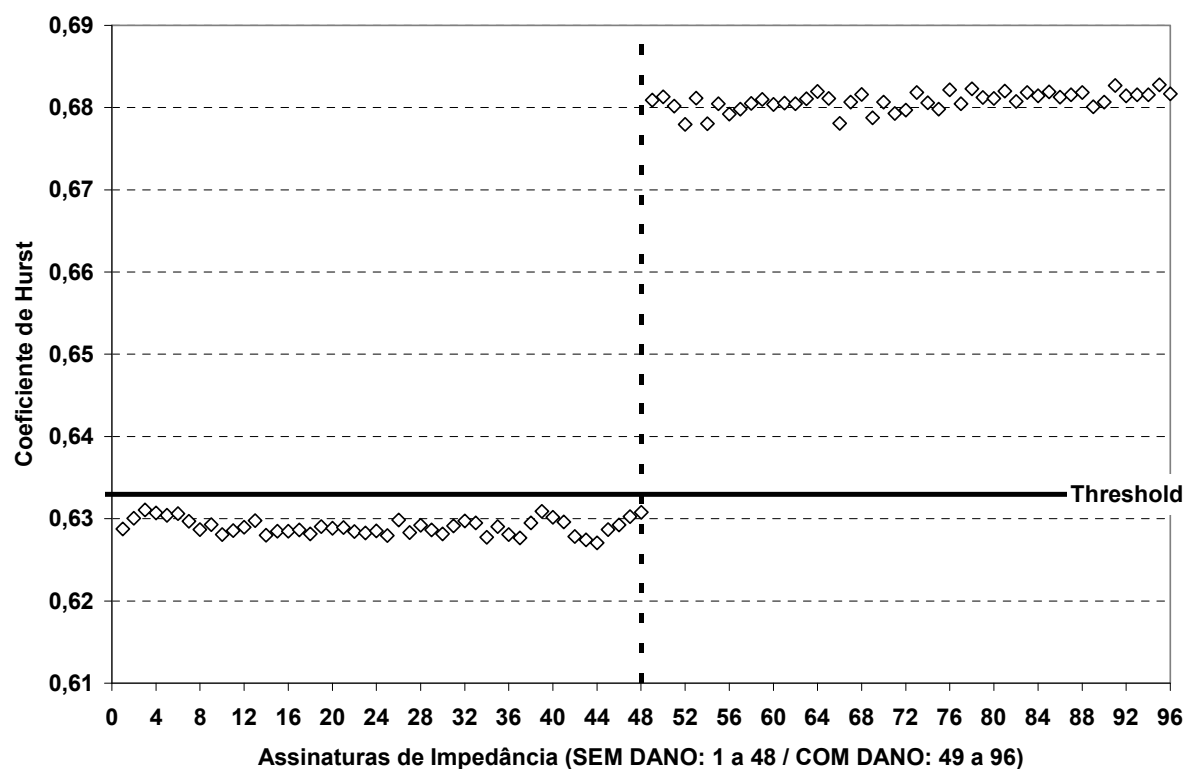


Figura 7.10 - Detecção de Dano: Coeficiente de Hurst PZT#2 a 25°C

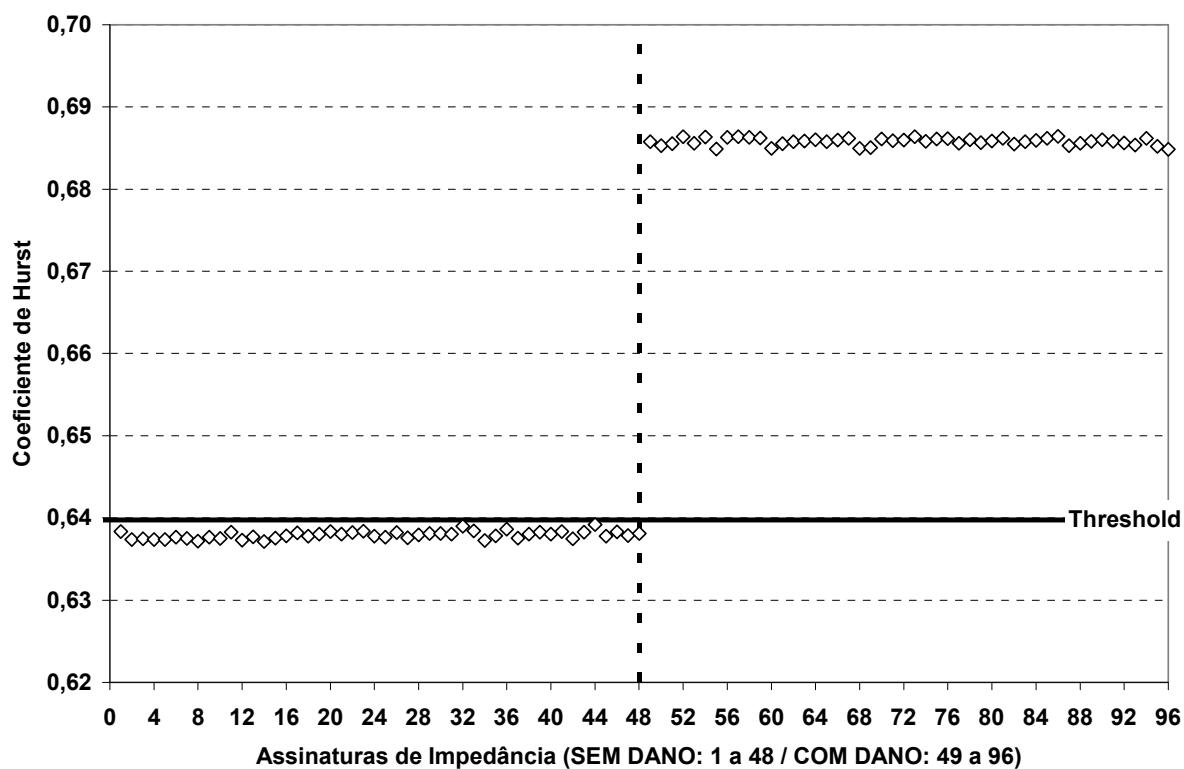


Figura 7.11 - Detecção de Dano: Coeficiente de Hurst PZT#3 a 25°C

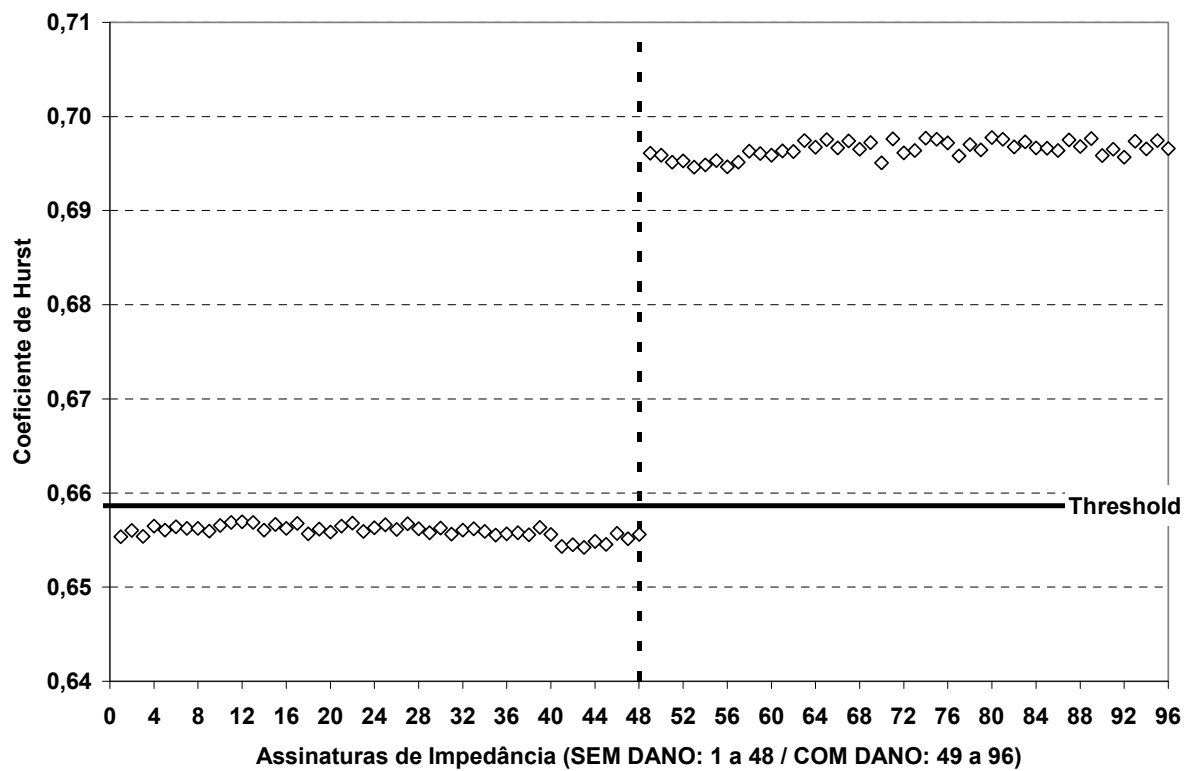


Figura 7.12 - Detecção de Dano: Coeficiente de Hurst PZT#4 a 25°C

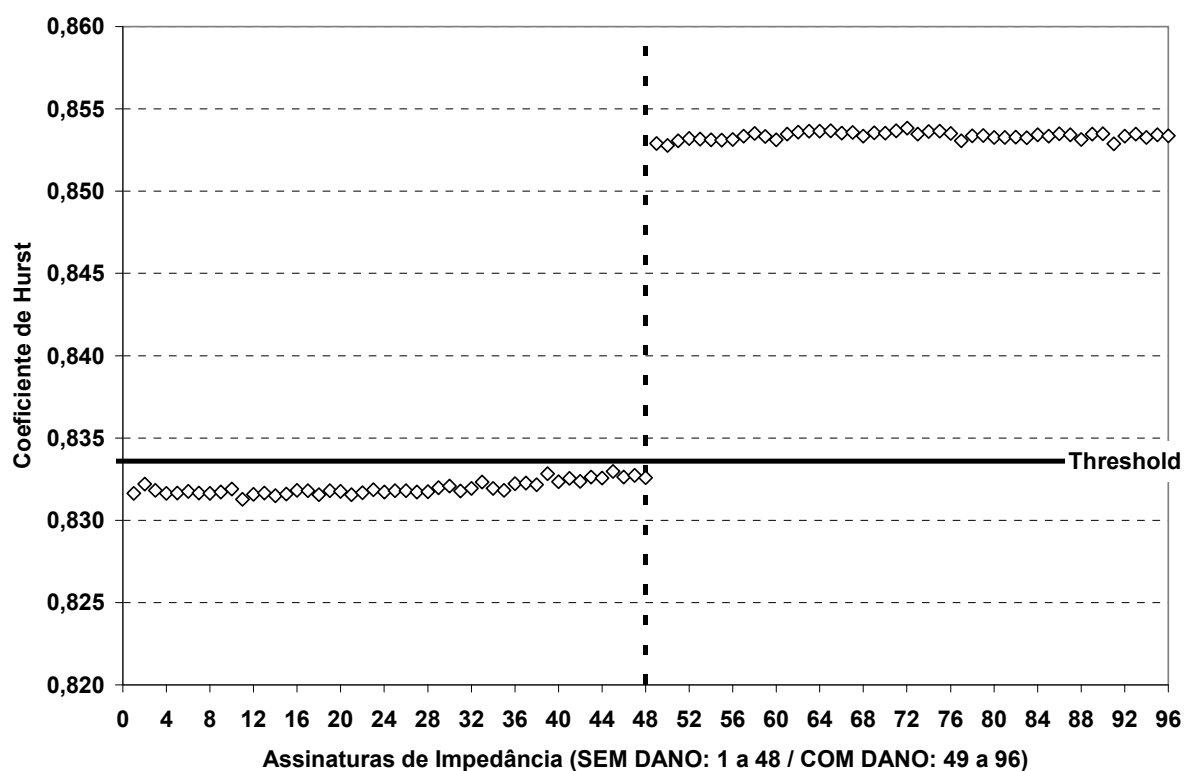


Figura 7.13 - Detecção de Dano: Coeficiente de Hurst PZT#5 a 25°C

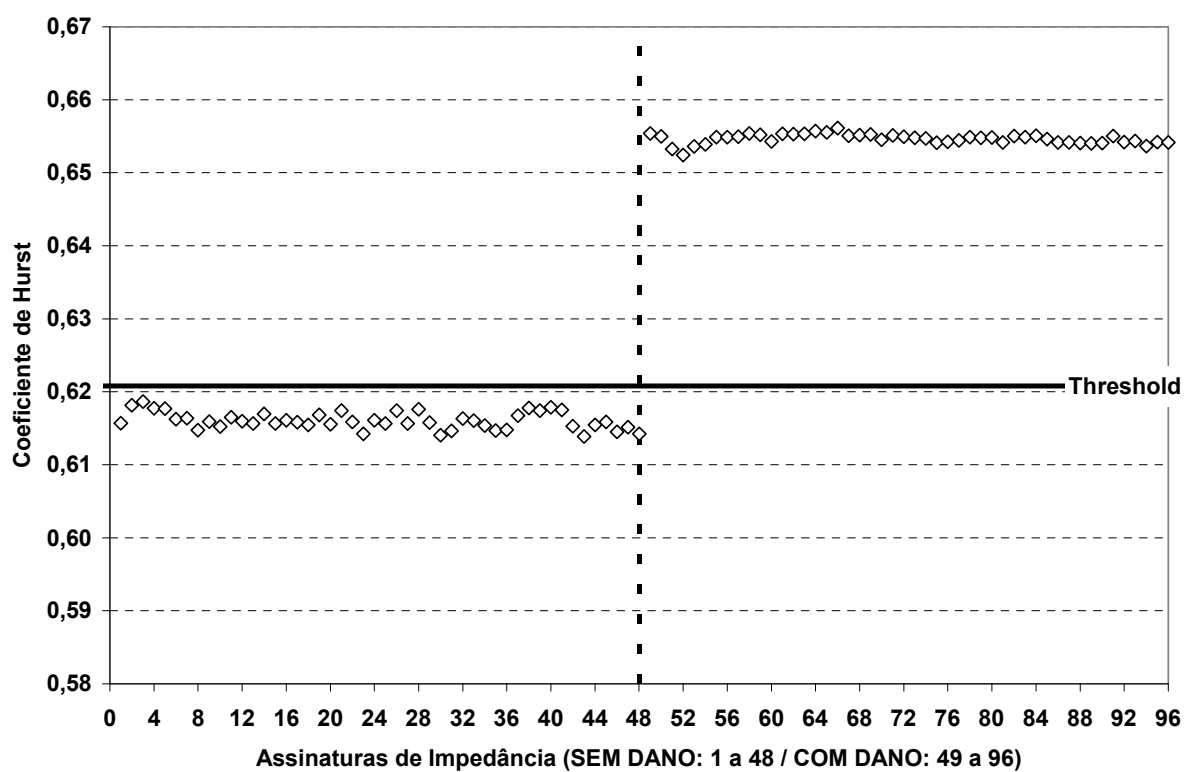


Figura 7.14 - Detecção de Dano: Coeficiente de Hurst PZT#6 a 25°C

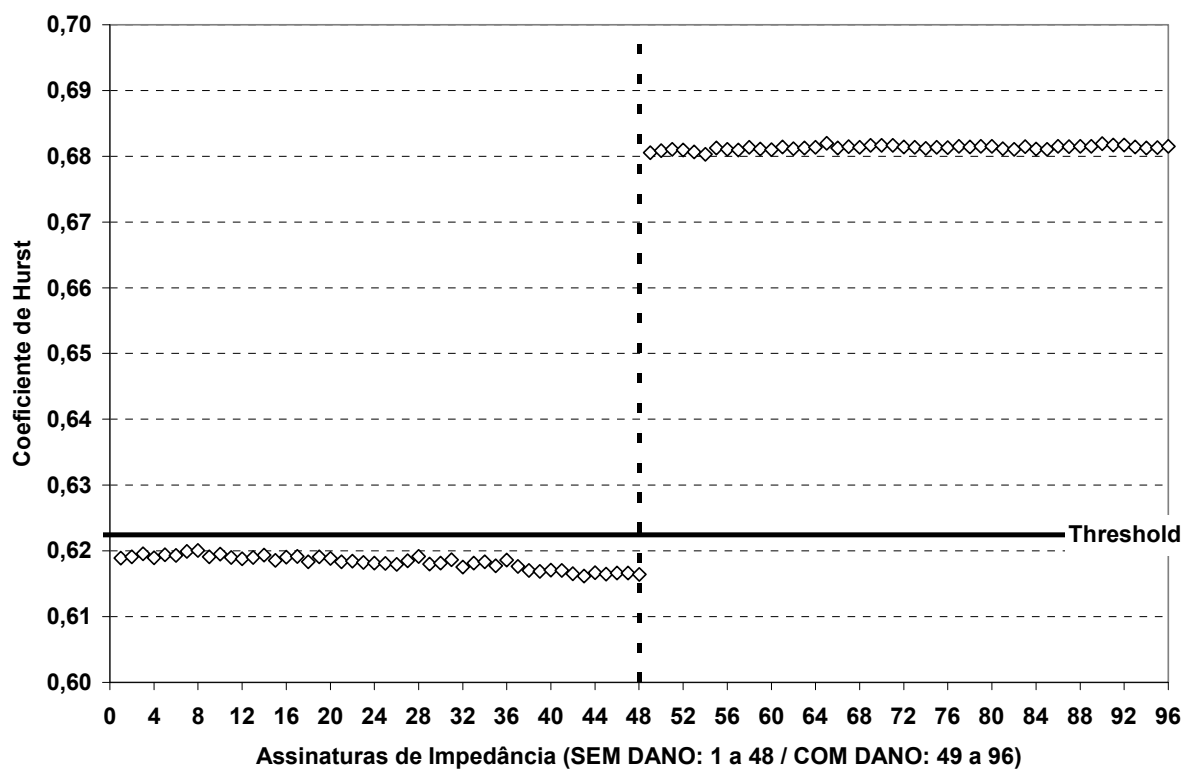


Figura 7.15 - Detecção de Dano: Coeficiente de Hurst PZT#7 a 25°C

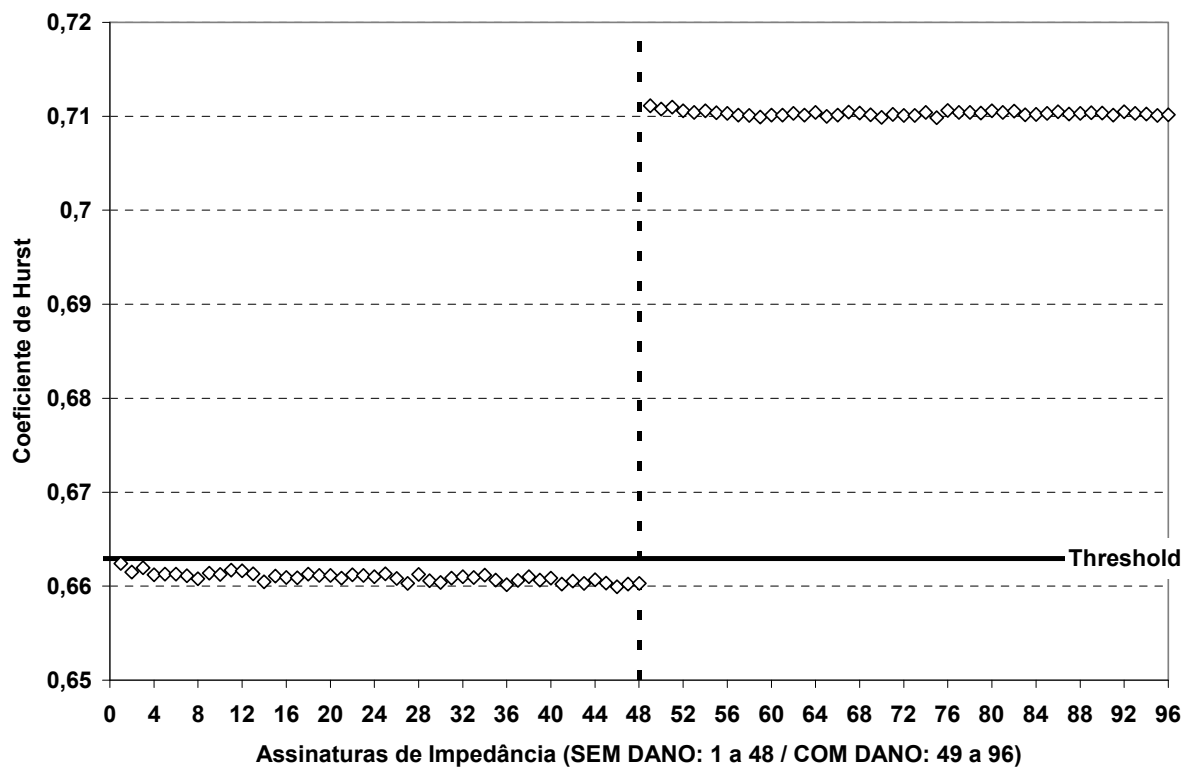


Figura 7.16 - Detecção de Dano: Coeficiente de Hurst PZT#8 a 25°C



Analisando os resultados apresentados nas Tabelas 7.12 a 7.15 verifica-se que o coeficientes de Hurst médios das condições de ensaio **COM DANO** superam significativamente os coeficientes do limiar de detecção de dano *threshold*. A partir dos valores médios e dos intervalos de confiança pode-se afirmar que a partir de um conjunto significativo de assinaturas é possível concluir sobre a presença de dano utilizando o coeficiente de Hurst.

Analisando as Figuras 7.9 a 7.16 para a condição de temperatura de 25°C, verifica-se que em todas as condições **COM DANO** (assinaturas numeradas de 49 a 96) os valores individuais do coeficiente de Hurst são significativamente maiores do que o valor do *threshold*. Os valores limites do coeficiente de Hurst para cada assinatura considerando os desvios-padrão não são representados nas figuras por estarem em uma ordem de grandeza inferior aos valores nominais.

Para as vigas de alumínio contendo os PZT #2 e PZT #6 verificam-se que os valores individuais do coeficiente de Hurst possuem grande flutuação nas condições **SEM DANO** e **COM DANO**, implicando em um deslocamento maior do limiar de detecção de dano *threshold* para ambos os PZT. No entanto, apesar dos maiores desvios dos valores médios, os valores do coeficiente de Hurst nas condições **COM DANO** são significativamente maiores do que o *threshold*.

Adicionalmente, em nenhuma outra condição de ensaio nas demais temperaturas foi verificado que os valores individuais do coeficiente de Hurst na condição **COM DANO** estão próximos ao *threshold*.

A Figura 7.17 ilustra os coeficientes de Hurst agrupados por temperatura para cada PZT na condição **SEM DANO**. A Figura 7.18 ilustra os coeficientes de Hurst agrupados por temperatura para cada PZT na condição **COM DANO**. Através dessas figuras pode-se verificar que em cada temperatura ocorre um aumento do coeficiente de Hurst **COM DANO** em relação ao coeficiente de Hurst **SEM DANO** em todos dos PZT. Esse comportamento permite concluir que o coeficiente de Hurst pode ser uma ferramenta eficiente para detecção de dano. A discussão apropriada sobre o efeito da temperatura será apresentado na sequência. A análise comparativa do coeficiente de Hurst com as métricas de dano está apresentada na Seção 7.4 desse trabalho.

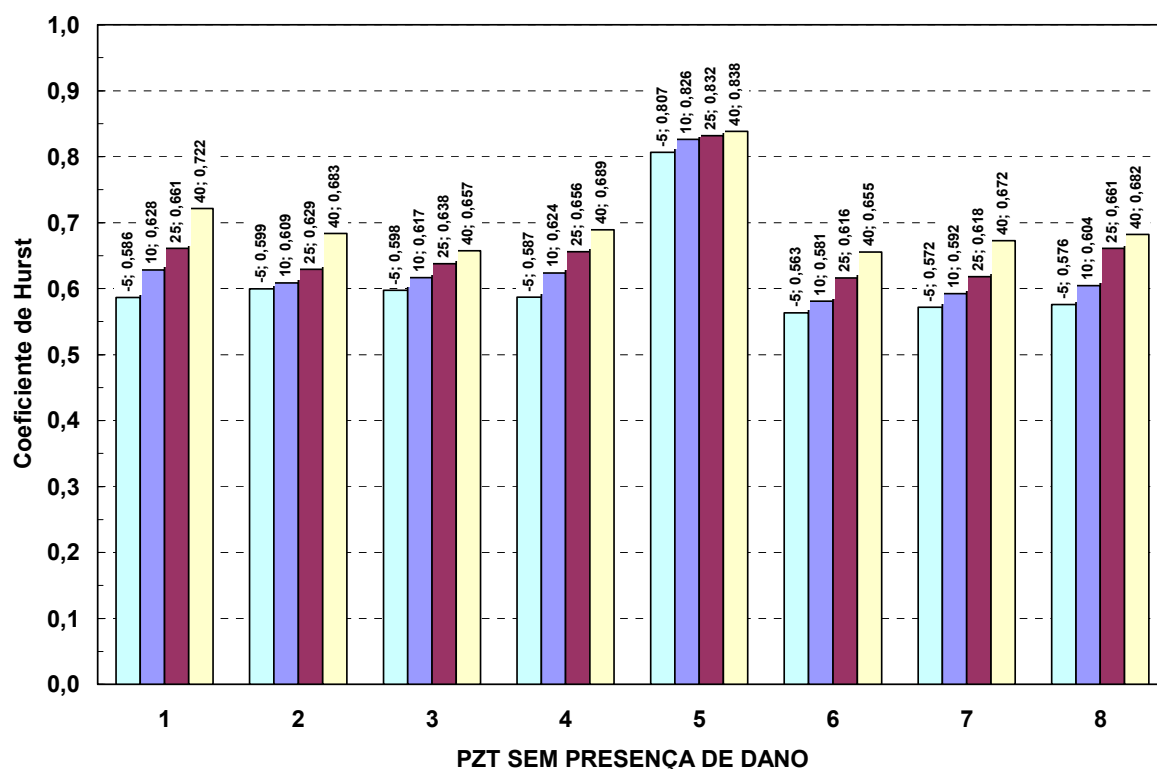


Figura 7.17 - Coeficientes de Hurst SEM Presença de Dano

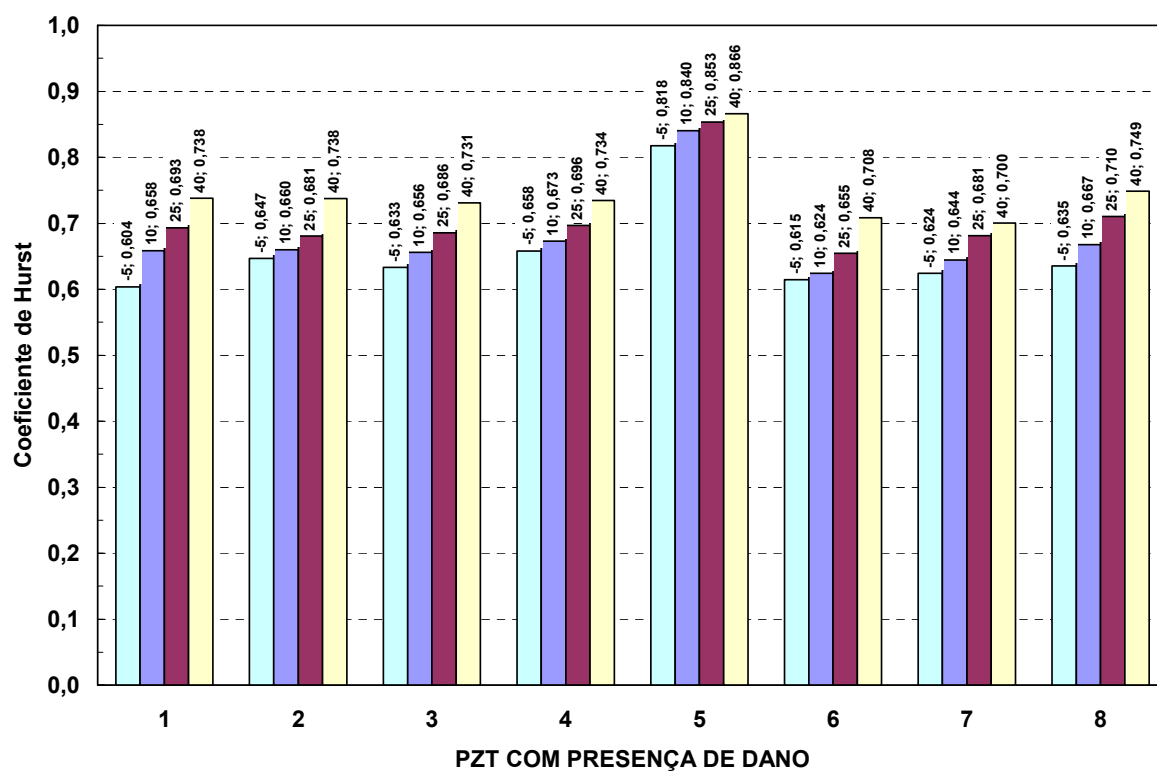


Figura 7.18 - Coeficientes de Hurst COM Presença de Dano

### 7.3.3. Efeito da Temperatura no Coeficiente de Hurst

A determinação dos coeficientes de Hurst das assinaturas de impedância são realizadas considerando as impedância originais, sem processo de compensação de temperatura. Analisando a Figura 7.17 (coeficiente de Hurst **SEM DANO**) e a Figura 7.18 (coeficiente de Hurst **COM DANO**) verifica-se que em todos os PZT a variação de temperatura influencia no valor do coeficiente. Nas temperaturas ensaiadas, um aumento da temperatura implica no aumento do coeficiente de Hurst, tanto na condição **SEM DANO** como na condição **COM DANO**. De forma análoga, a presença de dano também implica no aumento do coeficiente de Hurst.

Esse comportamento de aumento do coeficiente de Hurst com a temperatura pode ser interpretado e confundido com a presença de dano na estrutura mesmo que essa estrutura não apresente dano. Por exemplo: analisando o **PZT #4** na condição **SEM DANO** à 10°C têm-se um coeficiente de Hurst médio igual a 0,624 e na condição **COM DANO** à 10°C tem-se um coeficiente médio igual a 0,673. Entretanto, nesse mesmo **PZT #4 SEM DANO** à 40°C tem-se um coeficiente de Hurst médio igual a 0,689, o qual pode ser facilmente confundido e interpretado como uma condição de dano na estrutura.

A técnica de aplicação do coeficiente de Hurst em assinaturas de impedância que é abordada nesse trabalho é efetiva para detecção de dano nas vigas de alumínio caso a condição sem dano seja previamente conhecida, permitindo isolar assim o efeito da temperatura.

## 7.4. Análise Comparativa do Coeficiente Hurst e Métricas de Dano

As Figuras 7.17 e 7.18 fornecem a indicação da variação do coeficiente de Hurst nas vigas de alumínio em função da mudança de temperatura e da presença de dano. Para comparar os resultados do coeficiente de Hurst com às métricas de dano, as Figuras 7.19 e 7.20 mostram a variação da métrica de dano CCD nas vigas de alumínio em função da mudança de temperatura e da presença de dano já considerados os efeitos do processo de compensação de temperatura.

Devido a realização do processo de compensação de temperatura para determinação das métricas de dano, verifica-se na condição sem dano os valores da métrica de dano CCD, em diferentes temperaturas, não sofrem variação significativa, estando todos muito próximos a zero. A interpretação da métrica CCD muito próxima a zero significa que as assinaturas de impedância compensadas são muito semelhantes a assinatura *baseline* escolhida para o processo de compensação de temperatura. Conforme apresentado anteriormente, a Tabela 7.2 fornece as correlações de assinaturas para compensação de temperatura.

Com a introdução do dano na estrutura os valores da métrica de dano CCD em todos os PZT sofrem aumento significativo, muito acima dos valores do limiar de detecção *threshold*. Esse fato demonstra que a métrica de dano CCD fornece indicações confiáveis da presença de dano nas vigas de alumínio. Os valores de CCD na condição com dano são calculados utilizando como referência as assinaturas *baseline* da mesma condição de ensaio sem dano.

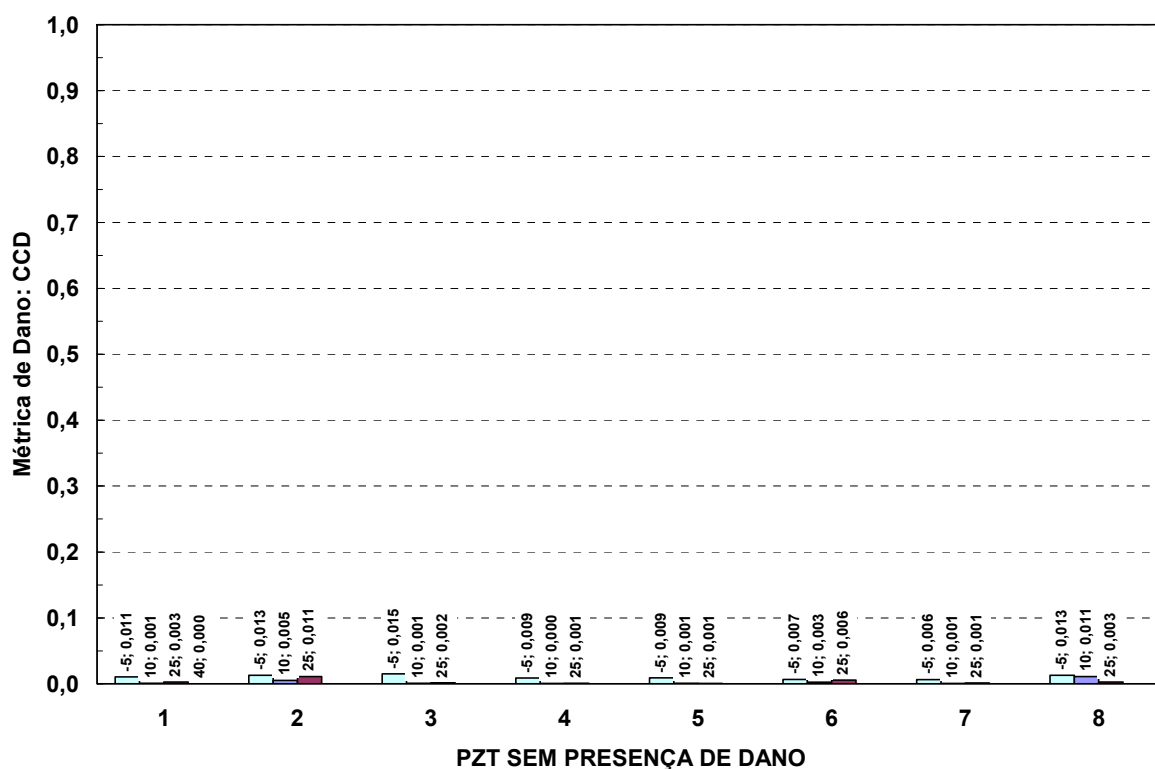


Figura 7.19 - Métrica de Dano CCD SEM Presença de Dano

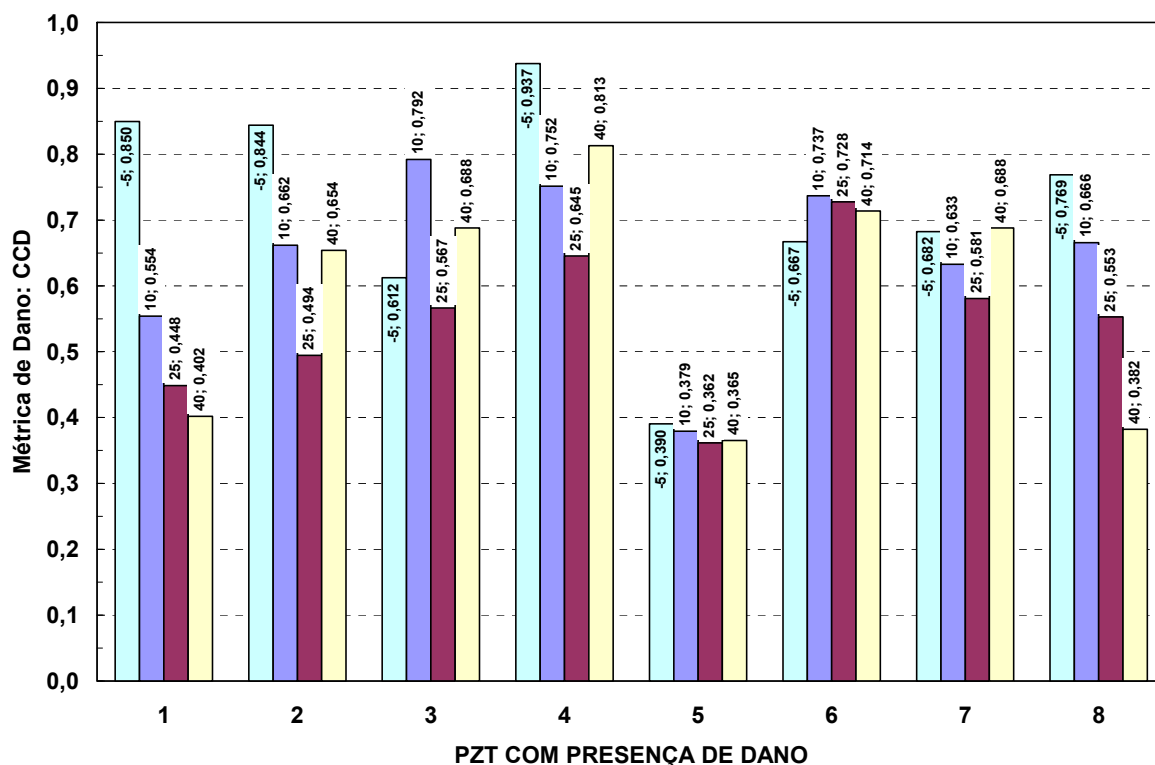


Figura 7.20 - Métrica de Dano CCD COM Presença de Dano

O comportamento da mudança dos valores de CCD com dano em relação os valores sem dano em função da temperatura é aleatório, diferentemente dos valores de Hurst, os quais sugerem um crescimento linear. Analisando as Figuras 7.17 e 7.18 verifica-se que tanto na condição sem dano quando na condição com dano, o aumento de temperatura implica no crescimento regular do coeficiente de Hurst em todos os PZT. Esse mesmo comportamento não é observado na métrica de dano CCD, bem como em nenhuma das outras métricas de dano analisadas.

Os ensaios e análises de dano apresentados nesse trabalho utilizando o Hurst e as métricas são realizados em vigas de alumínio. Entretanto, em estruturas complexas (chapas, painéis, tubos e outras combinações) as análises similares podem indicar um comportamento diferente do coeficiente de Hurst e das métricas de dano, tanto em função da temperatura quanto em função da presença de dano. Uma investigação mais ampla a respeito de outras estruturas também deve ser realizada, mas não fazem parte do escopo deste trabalho de tese.

## 8.

# CONSIDERAÇÕES FINAIS

### 8.1. Conclusões e Contribuições do Trabalho de Tese

Esse trabalho apresenta o coeficiente de Hurst do método estatístico de Hurst como uma nova métrica de dano em comparação às métricas de dano já consolidadas na literatura. Através dos resultados apresentados para vigas de alumínio, com PZT incorporado à estrutura, verifica-se que é possível concluir sobre a presença de dano utilizando o coeficiente de Hurst. Em todas as condições de ensaio apresentadas e analisadas nesse trabalho o coeficiente de Hurst foi capaz de detectar a presença de dano. Para fornecer informação adicional sobre a presença de dano nas vigas de alumínio, métricas de dano já consolidadas na literatura foram determinadas e comparadas ao comportamento do coeficiente de Hurst.

A partir de todas as análises e observações realizadas verificou-se que as vantagens do coeficiente de Hurst como métrica de dano são: (i) os coeficientes de Hurst são calculados individualmente para cada assinatura, sem necessidade de uma assinatura *baseline*; (ii) os coeficientes são obtidos a partir das assinaturas originais, da forma como elas são obtidas no analisador de impedância, sem realização do processo de compensação de temperatura; (iii) conhecendo-se o comportamento do coeficiente de Hurst para a condição sem dano na estrutura é possível acompanhar as mudanças no coeficiente de Hurst ao longo do tempo para avaliar sobre a presença de dano.

As desvantagens do coeficiente de Hurst como métrica de dano são: (i) o comportamento do coeficiente de Hurst para a condição sem dano na estrutura deve ser conhecido para permitir afirmar que a alteração no seu valor indica a presença de dano; (ii) grandes variações de temperatura implicam na alteração do coeficiente de Hurst mesmo para a condição sem dano na estrutura; (iii) possibilidade de má

interpretação do coeficiente de Hurst caso seja alterado o fator de escala de análise para um conjunto de assinaturas.

Em relação a temperatura, o aumento do coeficiente de Hurst em função do aumento de temperatura sugere um comportamento linear, tanto nas condições de ensaio sem dano e quanto nas condições de ensaio com dano. Em cada temperatura o coeficiente de Hurst da condição com dano é significativamente maior do que os limiares de detecção de dano. A técnica de aplicação do coeficiente que é abordada nesse trabalho é efetiva para detecção de dano nas vigas de alumínio caso o comportamento da temperatura na condição sem dano seja previamente conhecida, permitindo isolar assim o efeito da temperatura.

A principal contribuição desse trabalho de tese é demonstrar que o coeficiente de Hurst pode ser utilizado como métrica de dano para detecção de dano em estruturas. Em outras áreas do conhecimento o Hurst é utilizado como parâmetro estatístico de decisão e pode ser utilizado também no contexto da técnica de monitoramento da integridade estrutural a partir de assinaturas de impedância.

## **8.2. Perspectivas para Trabalhos Futuros**

Considerando as limitações do comportamento do coeficiente de Hurst em função da temperatura, na qual uma condição sem dano em temperatura elevada pode ser interpretada com uma condição de dano em uma temperatura menor, uma perspectiva de trabalho futuro é uma análise mais aprimorada do efeito da temperatura utilizando menores intervalos de temperatura nas condições de ensaio.

Os ensaios e análises de dano apresentados nesse trabalho se limitaram a vigas de alumínio com dano representado por pequenas porcas de aço inox. Em estruturas mais complexas (chapas, painéis, tubos e outras combinações) e com outros tipos de danos, os resultados podem implicar em um comportamento diferente do coeficiente de Hurst e das métricas de dano. Dessa forma, uma investigação mais ampla, considerando estruturas complexas e outros tipos de dano, pode ser realizada em trabalhos futuros para avaliar a sensibilidade do coeficiente de Hurst em função da severidade do dano.

O comportamento do coeficiente de Hurst como métrica de dano é avaliado a partir de inferência estatística baseada no valor médio dos coeficientes para diferentes condições de ensaio. O conjunto de assinaturas obtido para determinação do coeficiente de Hurst envolve a utilização de um aparato experimental que fornece uma combinação limitada de condições de ensaio. Uma perspectiva para trabalhos futuros na avaliação do comportamento do coeficiente de Hurst, em um número maior de condições de operação, é a utilização de modelagens numéricas para obtenção das assinaturas de impedância, gerando assim um número maior de informação para as análises envolvendo o coeficiente de Hurst.

Nesse trabalho a avaliação do comportamento do coeficiente de Hurst e das métricas de dano foi realizado a partir da totalidade das assinaturas obtidas. Uma perspectiva para trabalhos futuros é introduzir no conjunto de assinaturas uma ou mais assinaturas com características distintas em relação às demais, ou seja, contaminação proposital da amostra de assinaturas, para avaliar a possibilidade de alteração do comportamento do coeficiente de Hurst e das assinaturas.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AI, D.; ZHU, H.; LUO, H.; YANG, J. **An effective electromechanical impedance technique for steel structural health monitoring.** Journal of Construction and Building Materials 73 (2014) 97–104. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.09.029>.

AL-YAHYAE, K. H.; MENS, W.; YOON, S. M. **Efficiency, multifractality, and the long-memory property of the Bitcoin market: A comparative analysis with stock, currency, and gold markets.** Journal of Finance Research Letters 27 (2018) 228–234. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.frl.2018.03.017>.

AMJADIAN, M., AGRAWAL, A. K., **A passive electromagnetic eddy current friction damper (PEMECFD): Theoretical and analytical modeling.** Journal of Structural Control and Health Monitoring (2017) Volume 24, Issue 10.

ANTUNES, P., TRAVANCA, R., RODRIGUES, H., MELO, J., JARA, J., VARUM, H., ANDRÉ, P. **Dynamic Structural Health Monitoring of Slender Structures Using Optical Sensors.** Journal of Sensors (2012) 12 6629-6644. DOI: <https://doi.org/10.3390/s120506629>.

ASAMENE, K., HUDSON, L., SUNDARESAN, M. **Influence of attenuation on acoustic emission signals in carbon fiber reinforced polymer panels.** Journal of Ultrasonics 59 (2015) 86–93. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2015.01.016>.

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

BAPTISTA, F.; VIEIRA, J.; INMAN, D. J. **Influence of Excitation Signal on Impedance-Based Structural Health Monitoring**. Journal of Intelligent Material Systems and Structures. v. 21, n. 14, p. 1409-1416, nov. 2010.

BHALLA, S.; NAIDU, A. S. K.; SOH, C. K. **Influence of Structure-Actuator Interactions and Temperature on Piezoelectric Mechatronic Signatures for NDE**. Proceedings of ISSSSPIE 2002 International Conference on Smart Materials Structures and Systems. Bangalore, India, 2002a.

BHALLA, S.; NAIDU, A. S. K.; ONG, C. W.; SOH, C. K.. **Practical Issues in the Implementation of Electromechanical Impedance Technique for NDE**. Proceedings of the SPIE International Symposium on Smart Materials, Nano-Smart and Micro-Smart Systems. Melbourne, Austrália, 2002b.

BUSSAB, W. O.; MORETTIN, P. A. **Estatística Básica**. 9ª Edição. Editora Saraiva. 568 p. 2017.

CAMPEIRO, L. M.; SILVEIRA, R. Z. M.; BAPTISTA, F. G. **Impedance-based damage detection under noise and vibration effects**. Journal of Structural Health Monitoring (2018), Vol. 17(3) 654–667. DOI: <https://doi.org/10.1177/1475921717715240>.

CARBONI, M., GIANNEO, A., GIGLIO, M. **Lamb waves based statistical approach to structural health monitoring of carbon fibre reinforced polymer composites**. Journal of Ultrasonics 60 (2015) 51–64.

CASTRO, B. A., BAPTISTA, F. G., CIAMPA, F. **Comparative analysis of signal processing techniques for impedance-based SHM applications in noisy environments**. Mechanical Systems and Signal Processing 126 (2019) 326–340. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2019.02.034>.

CAVALINI JR., A. A.; FINZI NETO, R. M.; STEFFEN JR., V. S. **A Impedance-based fault detection methodology for rotating machines**. *Journal of Structural Health Monitoring* (2015), Vol. 14(3) 228–240. DOI: <https://doi.org/10.1177/1475921714564639>.

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

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

CHAVES, H. M. L.; LORENA, D. R. **Assessing reservoir reliability using classical and long-memory statistics**. *Journal of Hydrology: Regional Studies* 26 (2019) 100641. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2019.100641>.

CHIGANSKY, P.; KLPETSYNA, M.; MARUSHKEVYCH, D. **Mixed fractional Brownian motion: A spectral take**. *Journal of Mathematical Analysis and Applications* 482 (2020) 123558. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmaa.2019.123558>.

COUILLARD, M.; DAVISON, M. **A comment on measuring the Hurst exponent of financial time series**. *Journal of Physica A* 348 (2005) 404–418. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.physa.2004.09.035>.

DUGNANI, R.; ZHUANG, Y.; KOPDSAFTOPOULOS, F.; CHANG, F. **Adhesive bond-line degradation detection via a cross-correlation electromechanical impedance-based approach**. *Journal of Structural Health Monitoring* (2016), Vol. 15(6) 650–667. DOI: <https://doi.org/10.1177/1475921716655498>.

ELLIS, C. **The sampling properties of Hurst exponent estimates**. Journal of Physica A 375 (2007) 159–173. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.physa.2006.08.046>.

FAN, Q.; LIU, S.; WANG, K. **Multiscale multifractal detrended fluctuation analysis of multivariate time series**. Journal of Physica A 532 (2019) 121864. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.physa.2019.121864>.

FERNANDES, L. H. S.; ARAUJO, F. H. A.; SILVA, I. E. M.; LEITE, U. P. S.; LIMA, N. F.; STOSIC, T.; FERREIRA, T. A. E. **Multifractal behavior in the dynamics of Brazilian inflation indices**. Journal of Physica A (2020) 124158, <https://doi.org/10.1016/j.physa.2020.124158>.

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

GAGAR, D., MARTINEZ, M., FOOTE, P. **Development of generic methodology for designing a Structural Health Monitoring installation based on the Acoustic Emission technique**. 3rd International Conference on Through-life Engineering Services. Procedia CIRP 22 (2014) 103-108.

GARNIER, J; SOLNA, K. **Chaos and order in the bitcoin market**. Journal of Physica A 524 (2019) 708–721. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.physa.2019.04.164>.

GIBILISCO, S. **Manual de Eletrônica e de Telecomunicações**. Editora: Reichman e Autores, Brasil. 2002. 560p. ISBN: 8587148559.

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

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

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

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

GRAVES, T.; GRAMACY, R. B.; WATKINS, N.; FRANZKE, C. **A Brief History of Long Memory: Hurst, Mandelbrot and the Road to ARFIMA**. Journal of Entropy Entropy. 19(9), (2017) 437. 28 feb. 2016. DOI 10.3390/e19090437.

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

GUEMES, A., FERNANDEZ-LOPEZ, A., DIAZ-MAROTO, P., LOZANO, A., SIERRA-PEREZ, J. **Structural Health Monitoring in Composite Structures by Fiber-Optic Sensors**. Journal of Sensors (2018), 18, 1094. DOI: <https://doi.org/10.3390/s18041094>.

HOTT, M. C.; CARVALHO, L. M. T.; ANTUNES, M. A. H.; ALVES, H. M. R.; ROCHA, W. S. D. **Estimativa de Expoentes de Hurst para séries temporais de imagens NDVI / MODIS em regiões de pastagens da Zona da Mata de Minas Gerais**. XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (2015).

HURST, H. E. (1951). **Long-Term Storage Capacity of Reservoirs**. Transactions of the American Society of Civil Engineers, v. 116, p. 770-808. *apud* MANSUKHANI, S. (2012). **Predictability of Time Series**. Analytics Magazine. Ed. July/August 2012. p30-32. 2012.

JANOVEC, M.; BUGAJ, M.; SMETANA, M. **Eddy Current Array Inspection of Riveted Joints**. 8th International Conference on Air Transport – INAIR 2019. Transportation Research Procedia 43 (2019) 48–56.

KONONOVICIUS, A. **Illusion of persistence in NBA 1995–2018 regular season data**. Physica A 520 (2019) 250–256. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.physa.2019.01.039>.

LAI, D. **Estimating the Hurst effect and its application in monitoring clinical trials**. Journal of Computational Statistics & Data Analysis (2004) Volume 45, Issue 3, 10 April 2004, Pages 549-562. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0167-9473\(03\)00085-9](https://doi.org/10.1016/S0167-9473(03)00085-9).

LAUDANI, R.; OSTOJA, M. **Fracture of beams with random field properties: Fractal and Hurst effects**. International Journal of Solids and Structures (2019). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2019.12.002>.

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 (1994). v. 5. p. 12-20.

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

LIU, H.; ZHANG, X.; ZHANG, X. **Multiscale multifractal analysis on air traffic flow time series: A single airport departure flight case.** Journal of Physica A (2019) 123585. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.physa.2019.123585>.

MALINOWSKI, P.; WANDOWSKI, T.; OSTACHOWICZ, W. **The use of electromechanical impedance conductance signatures for detection of weak adhesive bonds of carbon fibre–reinforced polymer.** Journal of Structural Health Monitoring (2015), Vol. 14(4) 332–344. DOI: <https://doi.org/10.1177/1475921715586625>.

MANSUKHANI, S. **Predictability of Time Series.** Analytics Magazine (2012) Ed. July/August, p30-32. 2012.

MARTINS, L. G. A.; FINZI NETO, R. M.; STEFFEN JR., V. S.; PALOMINO, L. V.; RADE, D. A. **Architecture of a remote impedance-based structural health monitoring system for aircraft applications.** Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering (2012) Vol. 34.

MARUO, I. I. C.; GIACHERO, G. F.; STEFFEN JR., V. S.; FINZI NETO, R. M. **Electromechanical Impedance-Based Structural Health Monitoring Instrumentation System Applied to Aircraft Structures and Employing a Multiplexed Sensor Array.** Journal of Aerospace Technology and Management (2015) Vol. 7 No. 3. DOI: <https://doi.org/10.5028/jatm.v7i3.447>.

MATOS, J. A. O.; GAMA, S. M. A.; RUSKIN, H. J.; SHARKASI, A.; CRANE, M. **Time and scale Hurst exponent analysis for financial markets.** Journal Physica A 387 (2008) 3910–3915. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.physa.2008.01.060>.

MCCAULEY, J. L.; GUNARATNE, G. H.; BASSLER, K. E. **Hurst exponents, Markov processes, and fractional Brownian motion.** Journal of Physica A 379 (2007) 1–9. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.physa.2019.121864>.

MCKENZIE, I., JONES, R., MARSHALL, I. H., GALEA, S. **Optical Fibre sensors for health monitoring of bonded repair systems**. Journal of Composite Structures 50 (2000) 405-416.

MENEGAZ, G. L.; TSURUTA, K. M.; FINZI NETO, R. M.; STEFFEN JR., V. S.; ARAUJO, C. A.; GUIMARAES, G. **Use of the electromechanical impedance method in the detection of inclusions: application to mammary tumors**. Journal of Structural Health Monitoring 1–16 (2019). DOI: <https://doi.org/10.1177/1475921718825138>.

MIN, J.; PARK, S.; YUN, C. B.; LEE, C. G.; LEE, C. **Impedance-based structural health monitoring incorporating neural network technique for identification of damage type and severity**. Journal of Engineering Structures 39 (2012) 210–220. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2012.01.012>.

MISHRA, S., KUMAR, A., MISHRA, R. K., SHARMA, S., SINGH, S. **Structural health monitoring and Propagation of lamb waves to identification of crack**. 4th International Conference on Materials Processing and Characterization. Materials Today: Proceedings 2 (2015) 1833- 1840.

MOURA JR., J. R. V.; STEFFEN JR., V. S. **Impedance-based Health Monitoring for Aeronautic Structures using Statistical Meta-modeling**. Journal of Intelligent Material Systems and Structures (2006), Vol. 17. DOI: <https://doi.org/10.1177/1045389X06063087>.

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



NADERLOO, M. MOOSAVI, M., AHMADI, M. **Using acoustic emission technique to monitor damage progress around joints in brittle materials.** Journal of Theoretical and Applied Fracture Mechanics 104 (2019) 102368. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2019.102368>.

NASA. National Aeronautics and Space Administration. **Macro-Fiber Composite (MFC) Actuator Fact Sheet.** LAR-TOPS-209. (2007). Disponível online em: [ntrs-prod.s3.amazonaws.com/t2p/prod/t2media/tops/pdf/LAR-TOPS-209.pdf](https://ntrs-prod.s3.amazonaws.com/t2p/prod/t2media/tops/pdf/LAR-TOPS-209.pdf).

NAVARRO, X.; POREE, F.; BEUCHEE, A.; CARRAULT, G. **Performance analysis of Hurst exponent estimators using surrogate-data and fractional lognormal noise models: Application to breathing signals from preterm infants.** Digital Signal Processing 23 (2013) 1610–1619. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dsp.2013.04.007>.

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

PALOMINO, L. V.; MOURA JR., J. R. V.; TSURUTA, K. M.; RADE, D. A.; STEFFEN JR, V. **Impedance-based Health Monitoring and Mechanical Testing of Structures.** Smart Structures and Systems. v. 7, n. 1, p. 15-25, 2011.

PALOMINO, L. .V.; STEFFEN JR., V. S.; FINZI NETO, R. M. **Probabilistic Neural Network and Fuzzy Cluster Analysis Methods Applied to Impedance-Based SHM for Damage Classification.** Journal of Shock and Vibration (2014). DOI: <https://doi.org/10.1155/2014/401942>.

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

PARK, G.; CUDNEY, H.; INMAN, D. J. **Impedance-Based Health Monitoring Technique for Massive Structures and High-Temperature Structures**. Smart Structures and Materials. v. 3670, p. 461-469. 1999.

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

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

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

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

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

PEAIRS, D. M. **High Frequency Modeling and Experimental Analysis for Implementation of Impedance-based Structural Health Monitoring**. 2006. 150 f. PhD. Thesis. Virginia Polytechnic Institute, Virginia, EUA.

RABELO, D. S. **Monitoramento de Integridade Estrutural Baseado na Técnica da Impedância Eletromecânica Incorporando Compensação do Efeito da Variação da Temperatura**. 2014. 102 f. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

RABELO, D. S. **Técnicas Avançadas de Normalização de Dados Aplicadas ao Método de Monitoramento de Integridade Estrutural Baseado em Impedância Eletromecânica**. 2017. 164 f. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

RABELO, D. S.; STEFFEN JR., V. S.; FINZI NETO, R. M.; LACERDA, H. B. **Impedance-based structural health monitoring and statistical method for threshold-level determination applied to 2024-T3 aluminum panels under varying temperature**. Journal of Structural Health Monitoring (2017a), Vol. 16(4) 365–381. DOI: <https://doi.org/10.1177/1475921716671038>.

RABELO, D. S.; HOBECK, J. D.; INMAN, D. J.; FINZI NETO, R. M.; STEFFEN JR., V. S. **Real-time structural health monitoring of fatigue crack on aluminum beam using an impedance-based portable device**. Journal of Intelligent Material Systems (2017b), Vol. 28(20) 3152–3162. DOI: <https://doi.org/10.1177/1045389X17705213>.

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

RAMIREZ, J.; ALVAREZ, J.; RODRIGUEZ, E.; ANAYA, G. F. **Time-varying Hurst exponent for US stock markets**. Journal of Physica A 387 (2008) 6159–6169. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.physa.2008.06.056>.

SANCHEZ-GRANERO, M. A.; BALLADARES, K. A.; RAMOS-REQUENA, J. P.; TRINDAD-SEGOVIA, J. E. **Testing the efficient market hypothesis in Latin American stock markets**. Journal of Physica A 540 (2020) 123082. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.physa.2019.123082>.

SELVA, P.; CHERRIER, O.; BUDINGER, V.; LACHAUD, F.; MORLIER, J. **Smart monitoring of aeronautical composites plates based on electromechanical impedance measurements and artificial neural networks.** Engineering Structures 56 (2013) 794–804. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2013.05.025>.

SENSOY, A. **Generalized Hurst exponent approach to efficiency in MENA (Middle East and North Africa) markets.** Journal of Physica A 392 (2013) 5019–5026. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.physa.2013.06.041>.

SILVEIRA, R. Z. M.; CAMPEIRO, L. M.; BAPTISTA, F. G. **Performance of three transducer mounting methods in impedance-based structural health monitoring applications.** Journal of Intelligent Material Systems and Structures (2017), Vol. 28(17) 2349–2362. DOI: <https://doi.org/10.1177/1045389X17689942>.

SOARES, H. C.; SILVA, L.; LOBÃO, D. C.; CAETANO, D. P.; HUGUENIN, J. A. O. **Hurst exponent analysis of moving metallic surfaces.** Journal of Physica A 392 (2013) 5307–5312. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.physa.2013.07.005>.

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

STAN, C.; MARMUREANU, L.; MARIN, C.; CRISTESCU, C. **Investigation of multifractal cross-correlation surfaces of Hurst exponents for some atmospheric pollutants.** Journal of Physica A (2020) 123799. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.physa.2019.123799>.

STOEV, S.; TAQQU, M.; PARK, C.; MARRON, J. S. **On the wavelet spectrum diagnostic for Hurst parameter estimation in the analysis of Internet traffic.** Computer Networks 48 (2005) 423–445. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2004.11.017>.

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

THOMAS, A. J.; KIM, J. J.; TALLMAN, T. N.; BAKIS, C. E. **Damage detection in self-sensing composite tubes via electrical impedance tomography**. Journal of Composites Part B 177 (2019) 107276. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107276>.

TIAN, Z. **Chaotic characteristic analysis of network traffic time series at different time scales**. Journal of Solitons and Fractals 130 (2020) 109412. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2019.109412>.

TSANG, D. J.; LUKAC, M.; MARTIN, A. E. **Characterization of statistical persistence in joint angle variation during walking**. Journal of Human Movement Science 68 (2019) 102528. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.humov.2019.102528>.

TSENG, K.; NAIDU, A. .S. K. **Non-parametric damage detection and characterization using smart piezoceramic material**. Journal of Smart Mater. Struct. 11 (2002) 317–329.

TZOURAS, S.; MCCOY, E. **Financial time series modeling using the Hurst exponent**. Journal of Physica A 425 (2015) 50–68. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.physa.2015.01.031>.

VIEIRA FILHO, J.; BAPTISTA, F. G.; INMAN, D. J. **Time-domain analysis of piezoelectric impedance-based structural health monitoring using multi level wavelet decomposition**. Journal of Mechanical Systems and Signal Processing 25 (2011) 1550–1558. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2010.12.003>.

WANG, Y.; LI, B.; WANG.; R.; SU, J.; RONG, X. **Application of the Hurst exponent in ecology**. Journal of Computers and Mathematics with Applications 61 (2011) 2129–2131. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.camwa.2010.08.095>.

WANG, H. Y.; WANG, T. T. **Multifractal analysis of the Chinese stock, bond and fund markets**. Journal of Physica A 512 (2018) 280–292. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.physa.2018.08.067>.

WANG, Z., YU, Y. **Traditional Eddy Current–Pulsed Eddy Current Fusion Diagnostic Technique for Multiple Micro-Cracks in Metals**. Journal of Sensors (2018) Sep; 18(9): 2909. DOI: <https://doi.org/10.3390/s18092909>.

YADAV, K. R. P.; KUMAR, M.; RAJDUT, P.; TOMAR, D. S.; PANDEY, S. N.; PRIYA, P. K.; MITTAL, A. K. **Effect of angle of deposition on the Fractal properties of ZnO thin film surface**. Journal of Applied Surface Science 416 (2017) 51–58. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.04.098>.

YADAV, K. R. P.; PARVEEN, S.; JOSHI, L. P.; PANDEY, S. N. **Fractal characterization of flakes covered tuberose structured Cu:Sr(OH)<sub>2</sub> thin film as supercapacitive electrode**. Journal of Materials Research Bulletin 120 (2019) 110574. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2019.110574>.

YU, F., WU, Q., OKABE, Y., KOBAYASHI, S. SAITO, K. **The identification of damage types in carbon fiber–reinforced plastic cross-ply laminates using a novel fiber-optic acoustic emission sensor**. Journal of Structural Health Monitoring (2016), Vol. 15(1) 93–103.

ZENG, L., HUANG, L., LIN, J. **Damage imaging of composite structures using multipath scattering Lamb waves**. Journal of Composite Structures 216 (2019) 331–339. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.03.008>.