

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E
INFORMÁTICA INDUSTRIAL - CPGEI**

ROSALBA DA COSTA

**NOVO MÉTODO PARA DETECÇÃO DE FALHAS EM ESTRUTURAS DE
ALUMÍNIO UTILIZANDO-SE IMPEDÂNCIA ELÉTRICA DE CERÂMICAS
PIEZOELÉTRICAS E ATENUAÇÃO DAS ONDAS ULTRASSÔNICAS**

TESE DE DOUTORADO

CURITIBA

2020

ROSALBA DA COSTA

**NOVO MÉTODO PARA DETECÇÃO DE FALHAS EM ESTRUTURAS DE
ALUMÍNIO UTILIZANDO-SE IMPEDÂNCIA ELÉTRICA DE CERÂMICAS
PIEZOELÉTRICAS E ATENUAÇÃO DAS ONDAS ULTRASSÔNICAS**

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial da Universidade Tecnológica Federal do Paraná como requisito parcial para obtenção do título de “Doutor em Ciências” – Área de Concentração: Engenharia Biomédica.

Orientador: Prof. Dr. Joaquim Miguel Maia

CURITIBA

2020

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

Costa, Rosalba da

Novo método para detecção de falhas em estruturas de alumínio utilizando-se impedância elétrica de cerâmicas piezoelétricas e atenuação das ondas ultrassônica [recurso eletrônico] / Rosalba da Costa.-- 2020.

1 arquivo texto (91 f.): PDF; 6,96 MB.

Modo de acesso: World Wide Web

Título extraído da tela de título (visualizado em 24 jun. 2020)

Texto em português com resumo em inglês

Tese (Doutorado) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, Curitiba, 2020

Bibliografia: f. 84-91.

1. Engenharia elétrica - Teses. 2. Falhas estruturais. 3. Alumínio - Estruturas - Falhas. 4. Impedância (Eletricidade). 5. Ondas ultrassônicas. 6. Monitoramento de integridade estrutural. 7. Testes não-destrutivos. 8. Ultrassom. I. Maia, Joaquim Miguel. II. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial. III. Título.

CDD: Ed. 23 – 621.3

Biblioteca Central da UTFPR, Campus Curitiba

Bibliotecário: Adriano Lopes CRB-9/1429



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Diretoria de Pesquisa e Pós-Graduação

TERMO DE APROVAÇÃO DE TESE Nº 214

A Tese de Doutorado intitulada "**NOVO MÉTODO PARA DETECÇÃO DE FALHAS EM ESTRUTURAS DE ALUMÍNIO UTILIZANDO-SE IMPEDÂNCIA ELÉTRICA DE CERÂMICAS PIEZOELÉTRICAS E ATENUAÇÃO DAS ONDAS ULTRASSÔNICAS**", defendida em sessão pública pelo(a) candidato(a) **Rosalba da Costa**, no dia **29 de maio de 2020**, foi julgada e aprovada em sua forma final para obtenção do título de Doutor em Ciências, Área de Concentração – **Engenharia Biomédica**, Linha de Pesquisa – **Sensores e Instrumentos de Aplicações Biomédicas**, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial - CPGEI.

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Joaquim Miguel Maia / UTFPR – Presidente
Prof. Dr. Wagner Coelho de Albuquerque Pereira / UFRJ
Prof. Dr. José Carlos da Cunha / UFPR
Prof. Dr. Pedro Miguel Gewehr / UTFPR
Prof. Dr. Amauri Amorin Assef / UTFPR

A via original deste documento encontra-se arquivada na Secretaria do Programa, contendo a assinatura da Coordenação após a entrega da versão corrigida do trabalho.

Curitiba, 29 de maio de 2020.

Carimbo e Assinatura do(a) Coordenador(a) do Programa

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, pela saúde, força e persistência e por ter me propiciado chegar até o presente momento.

Ao amigo e orientador professor Dr. Joaquim Miguel Maia pela oportunidade, colaboração e por me manter firme e encorajada a realizar este trabalho.

Ao amigo e professor Dr. Amauri Amorin Asséf pelo auxílio, sugestões e apoio.

Ao professor Dr. Pedro Miguel Gewehr pela colaboração em ceder o espaço em seu Laboratório de Óptica Biomédica para a realização deste trabalho.

Ao professor Dr. Sergio Francisco Pichorim por dedicar tempo aos estudos relacionados a esta pesquisa e pelo empréstimo do Analisador de Impedância utilizado para realizar os testes feitos durante este trabalho.

Ao Prof. Dr. Jean Carlos Cardoso pelo auxílio na parte administrativa do CPGEI.

Ao colega professor Dr. Alexandre Francisco de Moraes Filho pela motivação e companhia no Laboratório de Óptica Biomédica, tornando as horas de investigação mais animadas.

Ao doutorando Rafael Pomorski Linessio pela realização das simulações no software de análise de elementos finitos ANSYS.

À Anna Lívia Maia ao colaborar no trabalho de solda de algumas cerâmicas.

Aos meus pais Franquelina Nascimento e Urias da Costa e ao meu irmão Rosaldo N. Fonseca, a quem devo tudo que sou.

Ao amigo e fisioterapeuta Dr. Francisco H. Sens Jr. que em momentos de fragilidade física me ajudou a suportar e a manter-me em pé possibilitando-me a dar continuidade ao meu trabalho e à qualidade de vida.

Aos amigos que em algum momento, durante a realização desta tese, me deram suporte e motivação: Carlos H. K. Salata, Célia C. B. Fioravante, Claudete de Fátima Tomelin, Elisabete N. Moraes, Faimara Do Rocio Strauhs, Maiara Rodrigues, Mirian M. Gabilan, Marcos Lemos, Rosana Mayer e Rosangela Winter.

Aos meus eternos amores: Jojou, Dudalina, Vick, Docinho, Sophye e Raica.

À UTFPR, CAPES, CNPq, FINEP, Fundação Araucária e ao Ministério da Educação pelo apoio financeiro.

“É preciso força pra sonhar e perceber que a estrada vai além do que se vê”.

(Los Hermanos)

RESUMO

DA COSTA, Rosalba. **Novo método para detecção de falhas em estruturas de alumínio utilizando-se impedância elétrica de cerâmicas piezoelétricas e atenuação das ondas ultrassônicas.** 2020. 91 f. Tese (Doutorado em Ciências) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial (CPGEI), Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Curitiba, 2020. Área de Concentração: Engenharia Biomédica.

A liga de alumínio é essencialmente utilizada na fabricação de estruturas aéreas, automotivas, próteses, órteses, entre outras. O monitoramento e detecção de danos nessas estruturas é importante para a garantia da qualidade dos dispositivos. Assim, vários sistemas baseados em cerâmicas piezoelétricas têm sido utilizados para monitorar falhas nessas estruturas, no entanto, eles operam com sinais de alta frequência. Este trabalho teve por objetivo propor uma nova metodologia para ensaios não destrutivos e caracterização de materiais utilizando a atenuação das ondas ultrassônicas e a impedância elétrica de cerâmicas piezoelétricas acopladas a barras e placas de alumínio. Foram utilizadas 18 amostras (barras de alumínio de dimensões 250 mm × 50 mm × 50 mm), sendo que em quatorze foram feitos três furos separados de 50 mm com diferentes diâmetros simulando falhas e quatro delas foram mantidas intactas e utilizadas como referência. Também foram realizados testes em cinco amostras de placas de alumínio com dimensões de 500 mm × 500 mm × 4 mm, sendo uma de referência e outras quatro com três furos separados de 125 mm simulando falhas. Um transdutor com frequência central de 1,6 MHz e três cerâmicas piezoelétricas (APC 855 quadradas de dimensões 12,7 mm × 12,7 mm × 0,52 mm e circulares de 12,7 mm × 0,267 mm e 12,7 mm × 1 mm) foram acopladas em cada barra, próximas às falhas e na mesma posição para a referência. Nas placas de alumínio foram utilizadas três cerâmicas circulares de 19,05 mm de diâmetro e 3 mm de espessura. A impedância elétrica foi medida com o analisador Agilent 4294A e a comparação dos sinais entre as amostras de referência e as que apresentavam falhas foi feita utilizando-se o índice RMSD (*Root Mean Square Deviation*). Para quantificar a atenuação das ondas ultrassônicas foi utilizado um gerador de função Tektronix AFG3021 para excitação das cerâmicas piezoelétricas acopladas às barras de alumínio com um pulso único senoidal de 20 Vpp nos modos transmissão-recepção e pulso-eco, nas frequências de 90 kHz, 145 kHz, 230 kHz e 376 kHz. As cerâmicas piezoelétricas acopladas às placas de alumínio foram excitadas com o mesmo tipo de pulso e frequência de 104 kHz. A avaliação da atenuação em banda larga (BUA) foi feita utilizando-se dois pares de transdutores de frequência central de 500 kHz e 5 MHz, excitados com pulsos negativos de -100 V e duração de 1 μs e 100 ns para 500 kHz e 5 MHz, respectivamente, utilizando-se um pulser/receiver Olympus 5077PR. Os sinais foram adquiridos em um osciloscópio digital Tektronix TDS2022 e transferidos a um computador para serem processados no MATLAB®. Também foram realizadas simulações no ANSYS utilizando o método de elementos finitos. A análise dos resultados mostrou que houve um aumento do índice RMSD com o aumento do diâmetro das falhas de maiores dimensões (5 mm, 8 mm e 11 mm) e que o mesmo não ocorreu para amostras com falhas de menores dimensões (1 mm, 2,5 mm e 3 mm). No entanto, em todos os casos foi possível detectar as falhas com a técnica de impedância. Verificou-se também que houve alteração da atenuação das ondas ultrassônicas que se propagaram nas amostras com falhas em relação às que se propagaram nas amostras de referência. Assim, foi possível concluir que a técnica proposta pode ser utilizada para detectar falhas de pequenas dimensões em estruturas metálicas de alumínio, permitindo a caracterização desses materiais utilizando-se baixas frequências.

Palavra-chave: Ultrassom. Caracterização de materiais. Impedância elétrica. Atenuação.

ABSTRACT

DA COSTA, Rosalba. **New method for fault detection in aluminum structures using electrical impedance of piezoelectric ceramics and attenuation of ultrasonic waves**. 2019. 91 p. Tese (Doutorado em Ciências) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial (CPGEI), Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Curitiba, 2020. Área de Concentração: Engenharia Biomédica.

The aluminum alloy is mainly used in the manufacture of aerial, automotive, prosthetic and orthotic structures, among others. Monitoring and damage detection of these structures is important to ensure the quality of the devices. Thus, many systems based on piezoelectric ceramics have been used to monitor flaws in these structures, however, they operate with high frequency signals. This study proposes a new methodology for nondestructive testing and characterization of these materials using attenuation of ultrasonic waves and electrical impedance of piezoelectric ceramics attached to aluminum alloy bars and plates. Eighteen solid aluminum bars measuring 250 mm × 50 mm × 50 mm were used; in fourteen, three holes of varying diameters and depths were drilled to simulate defects, while four bars were left intact as a reference. Tests were also carried out on five samples of aluminum plates with dimensions of 500 mm × 500 mm × 4 mm, one being a reference and the other four with three holes separated by 125 mm. A 1.6 MHz center frequency transducer, three piezoelectric ceramic plates measuring 12.7 mm × 12.7 mm × 0.52 mm, three ceramic discs of 12.7 mm × 0.267 mm and of 12.7 mm × 1.0 mm were attached to each bar near the manufactured defects and at the same position in the reference sample. To evaluate the aluminum plates, three circular piezoelectric ceramics of 19.05 mm in diameter and 3 mm in thickness were attached to each plate. The electrical impedance was measured with the Agilent 4294A analyzer and the comparison of the signals between the reference samples and those with faults has been done using the RMSD (Root Mean Square Deviation) index. The attenuation of the ultrasonic waves was measured using a Tektronix AFG3021 function generator to excite the ceramic plates attached to the aluminum bars with a single 20 Vpp sine pulse in transmit/receive and pulse-echo modes at 90 kHz, 145 kHz, 230 kHz, and 376 kHz. The piezoelectric ceramics attached to the aluminum plates were excited with the same type of pulse at 104 kHz. Broadband attenuation was assessed using two pairs of transducers with center frequency of 500 kHz and 5 MHz, excited with negative pulses of -100 V and duration of 1 μs and 100 ns for 500 kHz and 5 MHz, respectively, using an Olympus 5077PR pulser/receiver. The signals were acquired using a Tektronix TDS2022 digital oscilloscope and then transferred to a computer to be processed in MATLAB®. Finite element simulations were also carried out in ANSYS software. The analysis of the results showed that there was an increase in the RMSD index with the increase in the diameter of the largest flaws (5 mm, 8 mm and 11 mm) and that the same did not occur for samples with smaller flaws (1 mm, 2,5 mm and 3 mm). However, in all cases it was possible to detect the failures with the impedance technique. It was also found that there was a change in the attenuation of the ultrasonic waves that propagated in the damaged samples in relation to those that propagated in the reference ones. Thus, it was possible to conclude that the proposed technique can be used to detect small flaws in aluminum metallic structures, allowing the characterization of these materials using low frequencies.

Keywords: Ultrasound. Material characterization. Electric impedance. Attenuation.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 - Sistema de coordenadas utilizado para o conjunto específico de equações constitutivas dos efeitos piezoelétricos direto e reverso. 29
- Figura 2 - (a) Circuito equivalente simplificado de Mason. R_0 representa as perdas elétricas, C_0 é a capacitância intrínseca, L_r , C_r e R_r representam os efeitos inerciais, elásticos e de atrito, respectivamente, do elemento transdutor na ressonância (MASON, 1935; CHURCH & PINCOCK, 1985); (b) Cerâmica piezoelétrica de comprimento l , largura w e espessura t , excitada com um campo elétrico perpendicular à sua face; (c) Representação de uma cerâmica com impedância Z_C , carregada em uma das faces com uma impedância Z_1 (correspondendo ao ar) e na outra face com uma impedância Z_2 (correspondendo ao alumínio) e (d) Sistema de coordenadas adotado no equacionamento. 31
- Figura 3 - Curvas de módulo ($|Z|$) da impedância e do ângulo de fase (Fase) de um disco cerâmico com 19,05 mm de diâmetro e 4 mm de espessura mostrando as frequências de ressonância (f_r) e anti-ressonância (f_{ar}) para os modos de vibração radial (f_{r1} e f_{ar1}) e espessura (f_{r2} e f_{ar2}). 34
- Figura 4 - Método para determinação da Atenuação em Banda Larga (BUA), mostrando: Sinais de ultrassom obtidos a partir de uma amostra de referência e de amostras a serem caracterizadas (a) com falhas menores e (c) maiores; (b) e (d) FFT dos sinais de referência e das amostras a serem caracterizadas com falhas, mostrando a diferença entre os espectros (atenuação) e a região linear, próxima à ressonância de 5 MHz, à qual foi aplicada a regressão linear para obter o coeficiente (BUA), que corresponde aos coeficientes angulares das retas obtidas ($Atten_{Linear}$). 36
- Figura 5 - (a) Barras de alumínio de dimensões 250 mm x 50 mm x 50 mm utilizadas como amostras indicando a posição das falhas (furos vazados de diâmetros de 5 mm, 8 mm, 11 mm) e estrutura sem falhas, utilizada como referência (Ref), com o transdutor de 1,6 MHz acoplado em uma das posições onde foram realizadas as medições; (b) Posicionamento das cerâmicas piezoelétricas (P1, P2 e P3) na estrutura de alumínio íntegra (Ref) e nas estruturas com furos de diâmetros de 1 mm, 2,5 mm e 3 mm com profundidade de 10 mm e estrutura com furos de 3 mm totalmente vazados; (c) Ilustração sobre o posicionamento das cerâmicas piezoelétricas (C1, C2 e C3) nas placas de alumínio de 500 mm x 500 mm x 4 mm. Uma das estruturas foi mantida sem furos (Referência) e nas outras foram inseridos furos de diâmetros de 1 mm, 5 mm,

8 mm e 11 mm; (d) Placa de alumínio com furos de 8 mm de diâmetro incluindo as cerâmicas coladas.....	41
Figura 6 - (a) Configuração para realizar os testes e medição da impedância elétrica com transdutor acoplado às amostras por meio de gel neutro; (b) com as cerâmicas acopladas às amostras por meio da cola epóxi.	43
Figura 7 - (a) Transdutor FUNBEC, modelo 163629H, 6 mm de diâmetro, 5 MHz de frequência central; (b) Transdutor OLYMPUS, modelo V318, 19 mm de diâmetro, 500 kHz de frequência central; (c) Transdutor FUNBEC, modelo 15700IH, 19 mm de diâmetro, 1,6 MHz de frequência central; (d) Cerâmica circular APC 855 de 12,7 mm × 0,267 mm; (e) Cerâmica circular APC 855 de 12,7 mm × 1 mm; (f) Cerâmica circular APC 855 de 19,05 mm × 3 mm; (g) Cerâmica quadrada APC 855 de 12,7 mm × 12,7 mm × 0,52 mm.	43
Figura 8 - Diagrama em blocos do sistema para aquisição de dados nos modos (a) transmissão-recepção e (b) pulso-eco.....	45
Figura 9 - Curvas de módulo e ângulo de fase da impedância em função da frequência para: (a) Transdutor de 1,6 MHz de frequência central (modelo 15700IH, 19 mm de diâmetro, FUNBEC); (b) Um dos transdutores de frequência central de 5 MHz (modelo Med. I.F., 6 mm de diâmetro, FUNBEC) utilizados nos testes; (c) Um dos transdutores de frequência central de 500 kHz (modelo V318, 19 mm de diâmetro, Olympus Corp.); (d) Uma das cerâmicas piezoelétricas quadradas APC 855 com 12,7 mm × 12,7 mm × 0,52 mm; (e) Uma das cerâmicas circulares APC 855 de 12,7 mm × 0,267 mm; (f) Uma das cerâmicas circulares APC 855 de 12,7 mm × 1 mm; (g) Uma das cerâmicas circulares APC 855 de 19,05 mm × 3 mm.	48
Figura 10 - Curvas do módulo da impedância elétrica em função da frequência obtidas com o transdutor livre (<i>Transducer</i>) e posicionado na região P1 (ver Figuras 5(a) e 5(b)) das quatro barras de alumínio (Ref. e com furos de 5 mm, 8 mm e 11 mm).....	50
Figura 11 - Índice RMSD calculado para as amostras de alumínio com furos de 5 mm, 8 mm e 11 mm em relação à amostra de referência (Ref.). O transdutor foi posicionado na região P1 das quatro amostras (ver Figuras 5(a) e 5(b)).....	50
Figura 12 - Curvas de módulo da impedância elétrica em função da frequência obtidas com (a) cerâmicas piezoelétricas APC 855 circulares com diâmetro de 12,7 mm e 0,267 mm de espessura e (b) com diâmetro de 12,7 mm e 1 mm de espessura. As primeiras curvas nas legendas correspondem às cerâmicas livres (PZT – 0,267 mm e PZT – 1 mm) e as demais	

correspondem às cerâmicas posicionadas na região P1 (ver Figura 5(b)) das quatro amostras de alumínio (referência e danificadas por orifícios de 5 mm, 8 mm e 11 mm).	51
Figura 13 - Índice RMSD calculado entre as amostras de alumínio de referência e as amostras com falhas de 5 mm, 8 mm e 11 mm. O transdutor e os discos cerâmicos PZT com 12,7 mm de diâmetro e 0,267 mm (PZT-0.267 mm) ou 1 mm (PZT-1 mm) de espessura foram colados na posição P1 (ver Figura 5(a) e 5(b)) das quatro amostras avaliadas.	52
Figura 14 - (a, c, e) Curvas de módulo da impedância em função da frequência (faixa de 40 kHz a 500 kHz) para as cerâmicas piezoelétricas quadradas de 12,7 mm × 12,7 mm × 0,52 mm acopladas às amostras de referência e nas com falhas de 1 mm, 2,5 mm e 3 mm com profundidade de 10 mm e de 3 mm totalmente vazadas (<i>Fully Drilled</i>) nas posições P1, P2 e P3 (ver Figura 5(b)); (b, d, f) Índices RMSD calculados entre o módulo das impedâncias das amostras de referência e das amostras com falhas.....	54
Figura 15 - (a, c, e) Curvas de módulo da impedância em função da frequência (faixa de 3,5 MHz a 5 MHz) para as cerâmicas piezoelétricas quadradas de 12,7 mm × 12,7 mm × 0,52 mm acopladas à amostra de referência e nas com falhas de 1 mm, 2,5 mm e 3 mm com profundidade de 10 mm e de 3 mm totalmente vazadas (<i>Fully Drilled</i>) nas posições P1, P2 e P3 (ver Figura 5(b)), respectivamente; (b, d, f) Índices RMSD calculados entre o módulo das impedâncias da amostra de referência e das amostras com falhas.	55
Figura 16 - (a, c, e) Curvas de módulo da impedância em função da frequência (faixa de 80 kHz a 880 kHz) para as cerâmicas circulares APC 855 de 19,05 mm de diâmetro e 3 mm de espessura acopladas à placa de alumínio de referência e nas com falhas de 1 mm, 5 mm, 8 mm e 11 mm nas posições C1, C2 e C3 (ver Figura 5(c)); (b, d, f) Índices RMSD calculados entre o módulo das impedâncias das amostras de referência e das amostras com falhas.....	56
Figura 17 - Curvas ampliadas dos módulos das impedâncias em função da frequência para as cerâmicas piezoelétricas circulares APC 855 de 19,05 mm de diâmetro e 3 mm de espessura acopladas nas posições C1 (a), C2 (b) e C3 (c) da amostra (placa de alumínio) de referência e das que apresentam furos simulando falhas de 1 mm, 5 mm, 8 mm e 11 mm para as faixas de frequências de ressonância e antirressonâncias nos modos de vibração radial (faixa de 80 kHz a 150 kHz).	58
Figura 18 - Curvas ampliadas dos módulos das impedâncias em função da frequência para as cerâmicas piezoelétricas circulares APC 855 de 19,05 mm de diâmetro e 3 mm de espessura acopladas nas posições C1 (a), C2 (b) e C3 (c) da amostra (placa de alumínio) de referência e	

das que apresentam furos simulando falhas de 1 mm, 5 mm, 8 mm e 11 mm para as faixas de frequências de ressonância e antirressonâncias nos modos de vibração espessura (faixa de 680 kHz a 800 kHz).	59
Figura 19 - Índices RMSD para as faixas ampliadas de frequências dos módulos das impedâncias em função da frequência para as cerâmicas piezoelétricas circulares APC 855 de 19,05 mm de diâmetro e 3 mm de espessura acopladas nas posições C1 (a, b), C2 (c, d) e C3 da amostra de referência (REF) e das que apresentam furos simulando falhas de 1 mm, 5 mm, 8 mm e 11 mm nos modos de vibração radial (a, c, e) (80 kHz a 150 kHz) e espessura (b, d, f) (680 kHz a 800 kHz).	60
Figura 20 - Atenuação da amplitude para as amostras com falhas de 1 mm, 2,5 mm, 3 mm e 10 mm de profundidade e de 3 mm totalmente vazadas em comparação à amostra de referência para as cerâmicas quadradas de 12,7 mm × 12,7 mm × 0,52 mm acopladas nas posições P1, P2 e P3 (ver Figura 5(b)) utilizando-se as frequências de 90 kHz, 145 kHz, 230 kHz e 376 kHz: (a) Transmissão em P1 e recepção em P2 (TR1-2); (b) Transmissão em P2 e recepção em P1 (TR2-1); (c) Transmissão em P1 e recepção em P3 (TR1-3); (d) Transmissão em P3 e recepção em P1 (TR3-1); (e) Transmissão em P2 e recepção em P3 (TR2-3); (f) Transmissão em P3 e recepção em P2 (TR3-2).	62
Figura 21 - Atenuação da amplitude em uma janela de tempo entre 100 μs e 200 μs para as amostras com falhas de 1 mm, 5 mm, 8 mm e 11 mm em comparação à amostra de referência para as cerâmicas circulares de 19,05 mm de diâmetro e 3 mm de espessura acopladas nas posições C1, C2 e C3 (ver Figura 5(c)) utilizando-se a frequência de 104 kHz: (a) Transmissão em C1 e recepção em C2 (TR1-2); (b) Transmissão em C2 e recepção em C1 (TR2-1); (c) Transmissão em C1 e recepção em C3 (TR1-3); (d) Transmissão em C3 e recepção em C1 (TR3-1); (e) Transmissão em C2 e recepção em C3 (TR2-3); (f) Transmissão em C3 e recepção em C2 (TR3-2).	63
Figura 22 - Resultados dos testes de BUA para o par de transdutores de 500 kHz operando no modo transmissão-recepção. (a) Sinal de referência no domínio do tempo obtido na posição P1 (ver Figura 5) da amostra de referência; (b) FFT do sinal de referência; (c) Sinal que se propagou na amostra com falhas de 3 mm de diâmetros e 10 mm de profundidades; (d) FFT do sinal que se propagou na amostra; (e) BUA para o sinal que se propagou na amostra com falhas em relação à amostra de referência; (f) Resultados de BUA obtidos para todas as amostras com os transdutores acoplados nas posições P1, P2 e P3.	65

Figura 23 - Resultados dos testes de BUA para o par de transdutores de 5 MHz operando no modo transmissão-recepção. (a) Sinal de referência no domínio do tempo obtido na posição P1 (ver Figura 5) da amostra de referência; (b) FFT do sinal de referência; (c) Sinal que se propagou na amostra com falhas de 3 mm totalmente vazadas; (d) FFT do sinal que se propagou na amostra; (e) BUA para o sinal que se propagou na amostra com falhas em relação à amostra de referência; (f) Resultados de BUA obtidos para todas as amostras com os transdutores acoplados nas posições P1, P2 e P3..... 66

Figura 24 - Resultados dos testes de BUA para o transdutor de 500 kHz operando no modo pulso-eco. (a) Sinal de referência no domínio do tempo obtido na posição P2 (ver Figura 5) da amostra de referência; (b) FFT do sinal de referência; (c) Sinal que se propagou na amostra com falhas de 3 mm de diâmetro e 10 mm de profundidade; (d) FFT do sinal que se propagou na amostra; (e) BUA para o sinal que se propagou na amostra com falhas em relação à amostra de referência; (f) Resultados de BUA obtidos para todas as amostras com os transdutores acoplados nas posições P1, P2 e P3..... 67

Figura 25 - Resultados dos testes de BUA para o transdutor de 5 MHz operando no modo pulso-eco. (a) Sinal de referência no domínio do tempo obtido na posição P2 (ver Figura 5(b)) da amostra de referência; (b) FFT do sinal de referência; (c) Sinal que se propagou na amostra com falhas de 3 mm totalmente vazadas; (d) FFT do sinal que se propagou na amostra; (e) BUA para o sinal que se propagou na amostra com falhas em relação à amostra de referência; (f) Resultados de BUA obtidos para todas as amostras com o transdutor acoplado nas posições P1, P2 e P3..... 68

Figura 26 - Respostas harmônicas usando análise de elementos finitos para um estímulo de 0,1 N com frequências de 90 kHz (a, c, e, g, i) e 500 kHz (b, d, f, h, j) aplicadas na posição P1 (ver Figura 5(b)) da amostra de referência (a, b) e nas perfuradas para simular defeitos de 10 mm de profundidade e diâmetros de 1 mm (c, d), 2,5 mm (e, f) e 3 mm (g, h) e perfurados totalmente com uma broca de 3 mm (i, j)..... 70

Figura 27 - Respostas harmônicas usando análise de elementos finitos para um estímulo de 0,1 N com frequências de 90 kHz (a, c, e, g, i) e 500 kHz (b, d, f, h, j) aplicadas na posição P2 (ver Figura 5(b)) da amostra de referência (a, b) e nas perfuradas para simular defeitos de 10 mm de profundidade e diâmetros de 1 mm (c, d), 2,5 mm (e, f) e 3 mm (g, h) e perfurados totalmente com uma broca de 3 mm (i, j)..... 71

Figura 28 - Respostas harmônicas usando análise de elementos finitos para um estímulo de 0,1 N com frequências de 90 kHz (a, c, e, g, i) e 500 kHz (b, d, f, h, j) aplicadas na posição P3 (ver Figura 5(b)) da amostra de referência (a, b) e nas perfuradas para simular defeitos de 10 mm de profundidade e diâmetros de 1 mm (c, d), 2,5 mm (e, f) e 3 mm (g, h) e perfurados totalmente com uma broca de 3 mm (i, j).....	72
Figura 29 - Respostas harmônicas usando análise de elementos finitos para um estímulo de 0,1 N com frequência de 104 kHz aplicado nas posições C1 (ver Figuras 5(c) e 5(d)) da amostra de referência (a) e nas perfuradas para simular defeitos com diâmetros de 1 mm (b), 5 mm (c), 8 mm (d) e 11 mm (e).	73
Figura 30 - Respostas harmônicas usando análise de elementos finitos para um estímulo de 0,1 N com frequência de 104 kHz aplicado nas posições C2 (ver Figuras 5(c) e 5(d)) da amostra de referência (a) e nas perfuradas para simular defeitos com diâmetros de 1 mm (b), 5 mm (c), 8 mm (d) e 11 mm (e).	74
Figura 31 - Respostas harmônicas usando análise de elementos finitos para um estímulo de 0,1 N com frequência de 104 kHz aplicado nas posições C3 (ver Figuras 5(c) e 5(d)) da amostra de referência (a) e nas perfuradas para simular defeitos com diâmetros de 1 mm (b), 5 mm (c), 8 mm (d) e 11 mm (e).	75

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades físicas, mecânicas e térmicas de barras de alumínio do tipo liga 6351-T6 e placas de alumínio tipo liga 5052-F (ROBINSON, 1990).....	37
Tabela 2 - Principais propriedades físicas e piezoelétricas da cerâmica APC 855 (APC, 2019).	40
Tabela 3 - Resumo da metodologia adotada para caracterização das estruturas de alumínio..	46
Tabela 4 - Parâmetros teóricos (V_t), experimentais (V_e) e erro percentual [$E\% = 100(V_t - V_e)/V_t$] para as cerâmicas piezoelétricas APC 855 e os transdutores de ultrassom utilizados neste trabalho.	49

LISTA DE ABREVIATURA E ACRÔNIMOS

APC	<i>American Piezo Ceramics</i>
BT	Titanato de Bário
BUA	<i>Broadband Ultrasound Attenuation</i> – Atenuação em Banda Larga
END	Ensaio Não Destrutivo
EUA	Estados Unidos da América
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i> – Transformada Rápida de Fourier
IACS	<i>International Association of Classification Societies</i>
LiNbO ₃	Niobato de Lítio
LiTaO ₃	Tantalato de Lítio
MIT	<i>Massachusetts Institute of Technology</i>
PZT	Titanato Zirconato de Chumbo - Pb(ZrTi)O ₃
RMSD	<i>Root Mean Square Deviation</i> – Raiz do Desvio Médio Quadrático
US	Ultrassom
USA	<i>United States of America</i> – Estados Unidos da América

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área da cerâmica
A_0	Amplitude inicial da onda do sinal ultrassônico
A_z	Amplitude do sinal da onda ultrassônica a uma determinada distância z
a	Ponto de interseção da reta de atenuação linear com o eixo vertical
C'	Capacitância da cerâmica em uma frequência abaixo da ressonância
C_0	Capacitância elétrica ou intrínseca da cerâmica
C_c	Capacitância do transdutor acoplado à placa
C_r	Capacitância série na ressonância - efeito da elasticidade
c	Velocidade de propagação das ondas ultrassônicas no meio
$\{D\}$	Vetor deslocamento dielétrico ou densidade de fluxo elétrico
D	Deslocamento dielétrico
$[d]$	Matriz de constantes piezoelétricas
d	Constante piezoelétrica
$\{E\}$	Vetor campo elétrico
E	Campo elétrico
F	Força
f	Frequência em MHz
f_{ar}	Frequência de ressonância paralela, f_p , ou de anti-ressonância
f_c	Frequência central do transdutor
f_r	Frequência de ressonância série, f_s
k_{eff}	Fator de acoplamento eletromecânico eficaz
k_t	Fator de acoplamento no modo espessura da cerâmica
k_{31}	Fator de acoplamento lateral
k_T	Fator de acoplamento eletromecânico para um determinado modo de vibração da cerâmica
l	Comprimento cerâmica
L_r	Indutância em série na ressonância
R_0	Perdas elétricas na cerâmica

R_r	Valor da impedância na frequência de ressonância
$\{S\}$	Tensor deformação (tração mecânica) de 2ª ordem
$[s]$	Matriz de compliância ou elasticidade (rigidez - <i>stiffness</i>)
S	Deformação mecânica gerada em função da polarização
s	Coefficiente de compliância ou elasticidade (rigidez - <i>stiffness</i>)
S_R	Espectro de frequências do sinal que se propagou na estrutura de referência (sem danos)
S_D	Espectro de frequências do sinal que se propagou na estrutura a ser analisada (com falhas)
$\{T\}$	Tensor tensão mecânica (compressão) de 2ª ordem
T	Tensão mecânica
t	Espessura da cerâmica
V	Diferença de potencial
w	Largura da cerâmica
Y	Admitância
$ Z $	Módulo da impedância
Z	Impedância
Z_{Al}	Impedância acústica do alumínio
Z_{ar}	Impedância acústica do ar
Z_1	Impedância da face da cerâmica piezoelétrica em contato com o ar
Z_2	Impedância da face da cerâmica piezoelétrica em contato com o alumínio
Z_C	Impedância acústica da cerâmica piezoelétrica
z	Determinada distância em que a onda ultrassônica se propaga
α	Coefficiente de atenuação em dB/cm
β_{33}^S	Inverso da permissividade do transdutor preso à placa no modo da espessura
$[\mathcal{E}]$	Matriz dielétrica ou permissividade, valores obtidos sob deformação constante
ε	Permissividade elétrica
ε_0	Permissividade elétrica no vácuo
ε^S	Permissividade elétrica sob deformação constante
ε_{33}^T	Permissividade do meio
ρ	Densidade do meio

ν	Coeficiente de Poisson
ν_b^E	Velocidade da onda longitudinal na direção lateral da cerâmica piezoelétrica
ν^D	Velocidade da onda longitudinal na direção da espessura da cerâmica
ω	Frequência angular ($2\pi f$)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	21
1.1	OBJETIVOS	23
1.1.1	Objetivo Geral	23
1.1.2	Objetivos Específicos.....	23
1.2	ESTRUTURA DA TESE.....	23
2	FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	24
2.1	MATERIAIS PIEZOELÉTRICOS	24
2.1.1	Propriedades dos materiais piezoelétricos	25
2.2	TÉCNICAS DE ANÁLISE DA IMPEDÂNCIA E ATENUAÇÃO ULTRASSÔNICA PARA DETECÇÃO DE FALHAS	29
2.2.1	TÉCNICA DE ANÁLISE DA IMPEDÂNCIA	29
2.2.2	TÉCNICA DE ANÁLISE DA ATENUAÇÃO.....	34
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	37
3.1	PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS DE ALUMÍNIO PARA REALIZAR OS TESTES	37
3.2	CONFIGURAÇÃO UTILIZADA PARA REALIZAR OS TESTES DE ANÁLISE DE IMPEDÂNCIA DOS TRANSDUTORES E DAS CERÂMICAS PIEZOELÉTRICAS ..	41
3.3	CONFIGURAÇÃO UTILIZADA PARA REALIZAR OS TESTES DE ATENUAÇÃO DAS ONDAS ULTRASSÔNICAS	44
3.4	SIMULAÇÕES UTILIZANDO O MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS	45
3.5	RESUMO DA METODOLOGIA ADOTADA NO TRABALHO.....	45
4	RESULTADOS.....	47
4.1	RESULTADOS PARA A CARACTERIZAÇÃO DOS TRANSDUTORES E CERÂMICAS PIEZOELÉTRICAS UTILIZADAS NOS TESTES.....	47
4.2	RESULTADOS PARA A ANÁLISE DAS CURVAS DO MÓDULO DA IMPEDÂNCIA EM FUNÇÃO DA FREQUÊNCIA PARA O TRANSDUTOR DE 1,6 MHz ACOPLADO AO PRIMEIRO CONJUNTO DE AMOSTRAS E PARA AS CERÂMICAS PIEZOELÉTRICAS CIRCULARES ACOPLADAS AO SEGUNDO CONJUNTO DE AMOSTRAS	49
4.3	RESULTADOS PARA A ANÁLISE DAS CURVAS DE MÓDULO DA IMPEDÂNCIA EM FUNÇÃO DA FREQUÊNCIA DAS CERÂMICAS PIEZOELÉTRICAS QUADRADAS ACOPLADAS AO TERCEIRO CONJUNTO DE AMOSTRAS.....	53

4.4	RESULTADOS PARA A ANÁLISE DAS CURVAS DE MÓDULO DA IMPEDÂNCIA EM FUNÇÃO DA FREQUÊNCIA DAS CERÂMICAS PIEZOELÉTRICAS CIRCULARES ACOPLADAS AO QUINTO CONJUNTO DE AMOSTRAS (PLACAS DE ALUMÍNIO).....	53
4.5	RESULTADOS PARA A ANÁLISE DA ATENUAÇÃO DA AMPLITUDE DAS ONDAS ULTRASSÔNICAS GERADAS E RECEBIDAS PELAS CERÂMICAS PIEZOELÉTRICAS QUADRADAS ACOPLADAS AO TERCEIRO CONJUNTO DE AMOSTRAS (BARRAS DE ALUMÍNIO).....	61
4.6	RESULTADOS PARA A ANÁLISE DA ATENUAÇÃO DA AMPLITUDE DAS ONDAS ULTRASSÔNICAS GERADAS E RECEBIDAS PELAS CERÂMICAS PIEZOELÉTRICAS CIRCULARES ACOPLADAS AO QUINTO CONJUNTO DE AMOSTRAS (PLACAS DE ALUMÍNIO).....	61
4.7	RESULTADOS PARA A ANÁLISE DA ATENUAÇÃO EM BANDA LARGA DAS ONDAS ULTRASSÔNICAS GERADAS E RECEBIDAS PELOS TRANSDUTORES ACOPLADOS AO QUARTO CONJUNTO DE AMOSTRAS	64
4.8	RESULTADOS PARA AS SIMULAÇÕES REALIZADAS UTILIZANDO-SE O MÉTODO DE ANÁLISE DE ELEMENTOS FINITOS.....	69
5	DISCUSSÃO E CONCLUSÕES.....	76
5.1	DISCUSSÃO.....	76
5.2	CONCLUSÕES.....	82
5.3	TRABALHOS FUTUROS	83
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	84

1 INTRODUÇÃO

A técnica de ultrassom (US) é muito utilizada como ensaio não destrutivo (END) desde 1928, quando Sergey Y. Sokolov, pela primeira vez, propôs aplicá-la no monitoramento da integridade das estruturas metálicas (DONALD, 1974). Após aplicação na indústria bélica, durante a segunda guerra mundial, a técnica teve seu desenvolvimento ampliado e aplicado na área da instrumentação biomédica. Na área médica, desde 1940, o uso do ultrassom tem contribuído para acompanhar a evolução de fetos, detecção de tumores e avaliação do estado clínico de diferentes órgãos do paciente. Nas décadas posteriores à descoberta da utilização do transdutor de ultrassom, uma ampla gama de materiais foi pesquisada e submetida a testes por meio de técnicas e métodos que avançaram de acordo com o desenvolvimento tecnológico. Tipicamente, observa-se que a faixa de frequência utilizada varia entre 300 kHz e 100 MHz, de acordo com a área de aplicação e as características dos materiais que compõem o tecido biológico (HOLMES et al., 1954; MAIA et al., 2008; GAO et al., 2014).

Por ser capaz de fornecer informações sobre as propriedades elásticas dos materiais e apresentar características não ionizantes e minimamente invasivas, o ultrassom tornou-se uma alternativa atraente também devido ao seu baixo custo quando associado ao número de aplicações relevantes às quais se destina (MAIA et al., 2008; ASSEF et al., 2013).

Na área industrial, as faixas de frequências variam muito em função do tipo de material a ser caracterizado, sendo utilizadas frequências mais baixas (20 kHz a 1 MHz) para materiais com elevado índice de atenuação tais como madeira, concreto, materiais porosos ou compostos (frequências na faixa entre 20 kHz e 300 kHz) e frequências maiores (500 kHz a 10 MHz) para materiais que apresentem menores índices de atenuação, tais como os metais, polímeros e líquidos (SUN et al., 1995; ADAMOWSKI et al., 1995; HIGUTI & ADAMOWSKI, 2002; PARK et al., 2006; BAPTISTA et al., 2011).

Na área de ensaios não destrutivos, os transdutores piezoelétricos são utilizados para detectar discontinuidades ou defeitos em estruturas, por meio de princípios físicos definidos, sem alterar suas características físicas, químicas, mecânicas ou dimensionais, e sem interferir em seu uso posterior (PARK et al., 2006).

No contexto da caracterização de estruturas, a técnica de ultrassom tem como princípio a utilização de ondas ultrassônicas com comprimentos de onda menores que as dimensões das

falhas a serem detectadas e a frequência utilizada define o grau de sensibilidade e resolução da onda que se propaga no meio. Este fato permite explorar uma larga faixa de frequências de interação entre dispositivos piezoelétricos e demais materiais. O desafio da utilização desta técnica está em relacionar a capacidade de processamento do sinal e respectiva resposta em tempo real (NOKES & CLOUDS, 1993).

Pesquisas têm sido realizadas com o intuito de explorar as propriedades dos transdutores de ultrassom, a fim de expandir o desenvolvimento de técnicas e metodologias para caracterizar materiais biológicos e não biológicos inseridos em diferentes compostos utilizados em diversas áreas da engenharia, tais como a civil, mecânica, elétrica, biomédica, automação, aeronáutica e áreas afins. Esta concatenação entre diferentes áreas de pesquisas vem gerando bons resultados com a aplicação de transdutores ultrassônicos na manutenção preventiva industrial, na detecção de trincas e rachaduras responsáveis por vazamento de gás, ar ou líquido em tubulações e juntas de distribuição, além de apontar prováveis falhas em estruturas sólidas (BESSA et al., 2015).

Muitos trabalhos comprovam a eficiência da utilização do sistema ultrassônico por meio de cerâmicas piezoelétricas no monitoramento de estruturas de alumínio, todavia as dimensões da peça a ser monitorada são essenciais para se determinar o tamanho, a composição e a espessura das cerâmicas a serem aplicadas no sistema de caracterização (BAPTISTA et al., 2011). As cerâmicas piezoelétricas são fabricadas em grandes quantidades (da ordem de milhares), possuem custo de produção relativamente baixo e atualmente podem ser adquiridas por valores em torno de 10 dólares por unidade, dependendo da quantidade e características. A escolha da forma geométrica é limitada em função da frequência de ressonância, da maneira que será manuseada e está inversamente relacionada à sua espessura, ou seja, quanto menor a espessura, maior é a frequência de ressonância para o modo espessura de vibração (QIU et al., 2015).

O uso de cerâmicas piezoelétricas ou transdutores de ultrassom de frequências maiores (na faixa de MHz) para o monitoramento e caracterização de materiais implica na necessidade de circuitos de transmissão e condicionamento dos sinais mais complexos e de custos mais elevados em relação aos sistemas que operam em baixas frequências (na faixa de alguns kHz).

Os sistemas ultrassônicos utilizados atualmente na monitoração de falhas em diversos tipos de estruturas operam em altas frequências, permitem obtenção de imagens de alta resolução e a detecção de pequenos defeitos nestas estruturas (WANG et al., 2018; TAKIY et

al., 2017; PRADO et al., 2015; BESSA et al., 2015; SHARIF-KHODAEI & ALIABADI, 2014; LEONG et al., 2005). No entanto, muitos desses sistemas são de custo elevado para algumas aplicações. Assim, este trabalho propõe uma nova técnica para ensaios não destrutivos e detecção de falhas utilizando-se a atenuação de ondas ultrassônicas e a impedância elétrica de cerâmicas piezoelétricas acopladas às amostras de alumínio, realizando-se as medições em baixas frequências, na faixa das ressonâncias para os modos de vibrações laterais/radiais e transversais dos sensores utilizados.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Desenvolver uma nova técnica para monitorar e identificar falhas em estruturas de alumínio a partir da análise da atenuação das ondas ultrassônicas e da impedância elétrica de cerâmicas piezoelétricas e transdutores de ultrassom acoplados a esses materiais.

1.1.2 Objetivos Específicos

- 1) Avaliar as técnicas de caracterização de materiais disponíveis utilizando-se cerâmicas piezoelétricas e transdutores ultrassônicos aplicados à detecção de falhas em amostras de alumínio;
- 2) Caracterizar, em termos de impedância elétrica e frequências de ressonâncias, os transdutores e cerâmicas piezoelétricas a serem utilizados durante os testes;
- 3) Estabelecer condições de ensaios para validação da metodologia proposta para detecção de falhas nas amostras;
- 4) Analisar os resultados para validação da técnica aplicada.

1.2 ESTRUTURA DA TESE

No Capítulo 2, apresenta-se uma revisão bibliográfica sobre as propriedades e princípios de funcionamento das cerâmicas piezoelétricas, utilizadas como dispositivos transdutores, necessários para a elaboração e determinação da metodologia a ser aplicada neste trabalho. O Capítulo 3 abrange os materiais e métodos utilizados no desenvolvimento do trabalho proposto. No Capítulo 4 apresentam-se os resultados da metodologia proposta para a caracterização e monitoramento das barras de alumínio e no Capítulo 5 são efetuadas as discussões e conclusões do trabalho final.

2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Neste capítulo serão descritas as propriedades e funcionalidades dos materiais piezoelétricos, a técnica da impedância elétrica, a atenuação da amplitude e a atenuação em banda larga (BUA - *Broadband Ultrasound Attenuation*). Esses fundamentos são necessários para entender o processo de monitoramento e caracterização das estruturas de alumínio pela metodologia desenvolvida.

2.1 MATERIAIS PIEZOELÉTRICOS

Com a descoberta do efeito piezoelétrico direto (a geração interna de carga elétrica resultante de uma força mecânica aplicada) pelos irmãos Curie, em 1880, é identificado o som na frequência superior a 20 kHz, definido como ultrassom. Após esta descoberta, em 1881, Gabriel Lippmann, ao realizar experimentos práticos, observa o efeito piezoelétrico reverso (a geração interna de uma deformação mecânica resultante de um campo elétrico aplicado). Até 1914, durante a Primeira Guerra Mundial, muitas pesquisas e práticas foram realizadas, porém devido a esse evento, a partir de 1917, recursos e investimentos políticos foram destinados para acelerar a aplicação do efeito piezoelétrico no desenvolvimento da tecnologia ultrassônica a fim de localizar submarinos alemães. Essa pesquisa envolveu pesquisadores de renome como Dr. Paul Langevin, Albert Einstein, Pierre Curie, Ernest Rutherford, entre outros (UCHINO, 2017).

Nesse período, materiais piezoelétricos foram descobertos, porém muitos foram descartados devido ao baixo desempenho. Durante a segunda guerra mundial foi dada continuidade aos estudos e pesquisas de compósitos, cerâmicas sintéticas de quartzo e perovskita, BT (Titanato de Bário), PZT (Titanato Zirconato de Chumbo) e, dando continuidade, a partir desse evento histórico, as cerâmicas PZT foram aplicadas à técnica ultrassônica em END. Os compósitos BT foram descobertos por Wainer e Salomon nos Estados Unidos da América (EUA), em 1941, e publicados em artigo no ano de 1943 (UCHINO, 2017).

Na área médica, desde 1940, a técnica ultrassônica muito contribuiu para o detalhamento e acompanhamento na evolução de fetos, na localização de tumores em vários órgãos e em outros casos clínicos (MILANI et al., 2015). Em 1944, dando prosseguimento às pesquisas, Ogawa e Waku, no Japão, divulgam seus resultados e, em seguida, Wul e Goldman (1945, apud UCHINO, 2017), na Rússia, apresentam os resultados referentes ao trabalho realizado. Em 1947, Shepard Roberts, no MIT (*Massachusetts Institute of Technology*) ressalta a relevância da piezoelectricidade em suas pesquisas (WIECZOREK et al., 2011).

Em 1954, Mason inicia estudos das cerâmicas PZT aplicadas em transdutores e verifica dois parâmetros de ajuste em função da temperatura: o alto coeficiente de acoplamento e a solubilidade não aquosa. Estabelecidos os limites de temperatura durante o processo de polarização e dopagem para os elementos Pb e Ba, vários elementos PZT são desenvolvidos, dando avanço na tecnologia semicondutora (MASON, 1955; BERLINCOURT & CURRAN, 1992). Além dos materiais estudados e aplicados à tecnologia semicondutora, estão o Niobato de Lítio (LiNbO_3), o Tantalato de Lítio (LiTaO_3), os polímeros, os filmes finos e demais compósitos. O Titanato Zirconato de Chumbo ($\text{Pb}(\text{ZrTi})\text{O}_3$) é o material piezoelétrico que mais tem se destacado na composição das cerâmicas piezoelétricas utilizadas como transdutores e sensores (JAFFE, 1971; GIURGIUTIU, 2003, QING et al., 2019).

2.1.1 Propriedades dos materiais piezoelétricos

Entre as principais propriedades dos materiais piezoelétricos estão anisotropia, leveza e maleabilidade, características que facilitam sua utilização na confecção de dispositivos ultrassônicos, em elemento sensor e/ou atuador, transformadores e outros (KHALID, et al., 2011). Os materiais piezoelétricos, além de não apresentarem simetria iônica, são sólidos compostos por partículas susceptíveis ao processo de polarização. Essa propriedade é definida como efeito piezoelétrico, definido como direto quando cargas elétricas são geradas em consequência da ação de uma força externa, característica principal dos sensores ultrassônicos compostos por cerâmicas piezoelétricas. O efeito piezoelétrico reverso decorre da ação do campo elétrico externo ao atuar sobre o material piezoelétrico, ocasionando um alinhamento dos dipolos resultando na alteração da estrutura cristalina que o compõem, princípio este do funcionamento dos atuadores. A concomitância do efeito piezoelétrico direto e reverso permite facilmente que os materiais piezoelétricos, tais como as cerâmicas PZT, sejam aplicados em ensaios não destrutivos e como dispositivos de detecção e localização de falhas, além de influenciar diretamente a resposta dinâmica dos elementos estruturais quando acoplados ou colados à superfície da estrutura a ser monitorada (XU et al., 2010).

Na área de Engenharia Biomédica, as cerâmicas PZT são empregadas em diversos equipamentos e funções, tais como sensores de deslocamento e pressão, na fabricação de transdutores para serem utilizados em equipamentos de auxílio ao diagnóstico por imagens, entre outros. Dispositivos piezoelétricos ultra-flexíveis possibilitam captar energia biomecânica do movimento do coração e do corpo humano para conduzir dispositivos implantáveis de maneira sustentável (LU et al., 2015).

As equações constitutivas do efeito piezoelétrico relacionam as variáveis elásticas, tensão mecânica (*stress* - T) e deformação mecânica (*strain* - S), às variáveis elétricas, campo elétrico (E) e deslocamento dielétrico (D). O deslocamento dielétrico é um vetor que representa a densidade do fluxo elétrico por unidade de área, enquanto a deformação (S) e a tensão (T) representam as magnitudes de seus respectivos tensores (JAFFE et al., 1971). Assim, as Equações 1 e 2 descrevem, de forma geral, o conjunto de relações entre as propriedades elásticas, piezoelétricas e elétricas do cristal piezoelétrico polarizado ao longo de uma de suas diferentes orientações. Por se tratar de um sólido piezoelétrico, essas propriedades podem variar ao longo de diferentes orientações e, desta forma, são expressas como tensores, matrizes e vetores.

O conjunto de Equações 1 representa o efeito piezoelétrico direto e o conjunto de Equações 2 representa o efeito reverso.

$$\left. \begin{aligned} D &= \varepsilon^T E + dT \\ \{D\} &= [\varepsilon]^T \{E\} + [d]\{T\} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

$$\left. \begin{aligned} S &= dE + s^E T \\ \{S\} &= [d]\{E\} + [s]^E \{T\} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Resumindo, as variáveis envolvidas nas Equações 1 e 2 são (JAFFE et al., 1971):

D = Deslocamento dielétrico;

E = Campo elétrico;

S = Deformação mecânica;

T = Tensão mecânica;

d = Constante piezoelétrica;

ε = Permissividade elétrica;

s = Coeficiente de compliância ou elasticidade (rigidez - *stiffness*);

$\{D\}$ = Vetor deslocamento dielétrico ou densidade de fluxo elétrico;

$\{E\}$ = Vetor campo elétrico;

$\{T\}$ = Tensor tensão mecânica (compressão) de 2ª ordem;

$\{S\}$ = Tensor deformação (tração mecânica) de 2ª ordem;

$[d]$ = Matriz de constantes piezoelétricas;

$[\varepsilon]$ = Matriz dielétrica ou permissividade, valores obtidos sob deformação constante;

$[s]$ = Matriz de compliância ou elasticidade (rigidez - *stiffness*) que representa a interação entre tração, compressão e o campo, valores obtidos com o campo elétrico constante.

Exponentes devem ser inseridos aos coeficientes em ocasiões que o valor da deformação, campo elétrico ou tensão sejam constantes. Estas equações podem ser representadas na forma matricial e se ajustar de acordo com as propriedades que compõem o sistema a ser analisado (JAFFE et al., 1971).

Os coeficientes piezoelétricos e respectivas constantes estão diretamente relacionados ao grau de absorção de energia elétrica fornecida para excitar a cerâmica PZT (JAFFE et al., 1971).

As propriedades elásticas, dielétricas e piezoelétricas dependem da orientação em todos os meios piezoelétricos. Desta forma, as Equações gerais 1 e 2 são substituídas por um conjunto específico de equações que levam em conta a simetria do sólido piezoelétrico (JAFFE et al., 1971). As Equações 3 a 5 representam o efeito piezoelétrico direto e as Equações 6 a 11 representam o efeito reverso (JAFFE et al., 1971; IEEE 176-1987, 1987).

$$D_1 = \varepsilon_1 E_1 + d_{15} T_5 \quad (3)$$

$$D_2 = \varepsilon_1 E_2 + d_{15} T_4 \quad (4)$$

$$D_3 = \varepsilon_3 E_3 + d_{31}(T_1 + T_2) + d_{33} T_3 \quad (5)$$

$$S_1 = d_{31} E_3 + s_{11}^E T_1 + s_{12}^E T_2 + s_{13}^E T_3 \quad (6)$$

$$S_2 = d_{31} E_3 + s_{11}^E T_2 + s_{12}^E T_1 + s_{13}^E T_3 \quad (7)$$

$$S_3 = d_{33} E_3 + s_{13}^E (T_1 + T_2) + s_{33}^E T_3 \quad (8)$$

$$S_4 = d_{15} E_2 + s_{44}^E T_4 \quad (9)$$

$$S_5 = d_{15} E_1 + s_{44}^E T_5 \quad (10)$$

$$S_6 = s_{66} T_6 \quad (11)$$

A Figura 1 apresenta o sistema de coordenadas utilizado no equacionamento. Para este caso, o subscrito 3 refere-se ao eixo correspondente à face polida, onde são colocados os eletrodos, enquanto os eixos 1 e 2 são ortogonais. Os subscritos 4, 5 e 6 referem-se à tensão de cisalhamento e deformação nos planos normais aos eixos 1, 2 e 3, respectivamente (JAFFE et al., 1971).

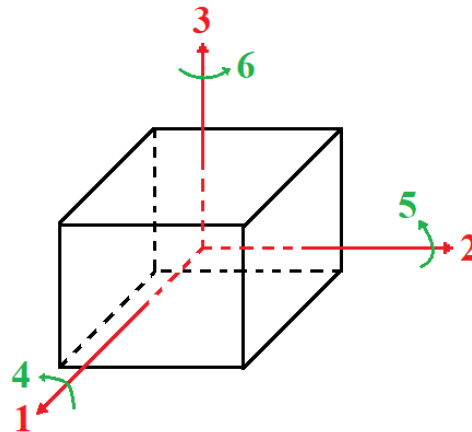
Uma tensão de deformação, como S_4 , é uma medida da mudança de ângulo entre os dois eixos inicialmente ortogonais ao plano perpendicular do eixo 1. Convencionalmente, o primeiro subscrito da constante d fornece a componente "elétrica" (campo ou deslocamento dielétrico) enquanto o segundo subscrito indica a componente da deformação mecânica. Como todas as tensões efetivas e as componentes do campo aparecem no lado direito das Equações de 3 a 11, as constantes são geradas a partir de derivadas parciais (JAFFE et al., 1971).

As permissividades ϵ_1 e ϵ_3 fornecem o deslocamento elétrico enquanto as tensões permanecem constantes, geralmente nulas. Da mesma forma, as compliâncias elásticas s_{11} , ... s_{66} denotam a interação de uma deformação e uma tensão na condição de campo constante; são as compliâncias de "curto-circuito" descritas, se necessário, pelo sobrescrito E , que indica um campo constante (geralmente zero). Além disso, cada coeficiente elástico s_{11} ... s_{66} refere-se à aplicação de uma única componente de tensão, enquanto os outros são mantidos fixos (condição de nenhuma restrição lateral). Dentro dessa limitação, tensão e deformação são intercambiáveis, $s_{31} = s_{13}$ (JAFFE et al., 1971).

Rigorosamente, a permissividade ϵ também é um tensor e poderia ter dois subscritos, entretanto, para cerâmicas sem a aplicação de forças oblíquas ou campo elétrico, um subscrito é suficiente para descrever completamente o sistema. Maiores detalhes sobre o equacionamento podem ser encontrados em Jaffe et al. (1971), IEEE 176-1987 (1987) e em Jordan e Ounaies (2001).

Os elementos cerâmicos polarizados compõem grande parte dos transdutores ultrassônicos e têm como propriedade gerar um campo acústico capaz de interagir com vários tipos de estruturas orgânicas e não orgânicas.

Figura 1 - Sistema de coordenadas utilizado para o conjunto específico de equações constitutivas dos efeitos piezoelétricos direto e reverso.



Fonte: Adaptado de Jordan e Ounaies (2001).

2.2 TÉCNICAS DE ANÁLISE DA IMPEDÂNCIA E ATENUAÇÃO ULTRASSÔNICA PARA DETECÇÃO DE FALHAS

2.2.1 TÉCNICA DE ANÁLISE DA IMPEDÂNCIA

A técnica de análise da impedância de cerâmicas piezoelétricas acopladas a estruturas para realização de ensaios não destrutivos já vem sendo utilizada há muito tempo, sendo que vários modelos de acoplamento eletromecânico têm sido propostos por diversos autores (KOSSOFF, 1966; CAWLEY, 1984; GIURGIUTIU & ZAGRAI, 2002; BHALLA et al., 2002a; PARK et al., 2006; ANNAMDAS et al., 2007; BAPTISTA et al., 2011; WONGI, 2017). Do ponto de vista prático, o que se procura é realizar uma adaptação do circuito de Mason para um ressonador piezoelétrico sem carga que, quando colado às estruturas a serem analisadas, terá sua impedância alterada de acordo com os defeitos presentes nessas estruturas.

Na Figura 2(a) é apresentado o modelo simplificado que representa um transdutor piezoelétrico vibrando em uma faixa limitada de frequências, próxima a uma de suas ressonâncias (MASON, 1935; CHURCH & PINCOCK, 1985). Este modelo é derivado do circuito equivalente de Mason e se caracteriza em duas partes: uma elétrica, representada por R_0 e C_0 e outra mecânica, representada por L_r , C_r e R_r . Mesmo sendo relativamente simples, este modelo representa bem a cerâmica piezoelétrica para valores de frequência próximos a cada uma de suas ressonâncias. A Figura 2(b) apresenta o modo de excitação de uma cerâmica piezoelétrica. A Figura 2(c) representa uma cerâmica com impedância Z_C , carregada em uma das faces com uma impedância Z_I (correspondendo ao ar) e na outra face com uma impedância

Z_2 (correspondendo ao material a ser caracterizado, o alumínio, por exemplo). A Figura 2(d) apresenta o sistema de coordenadas adotado no equacionamento.

Os parâmetros envolvidos são (BERLINCOURT et al., 1964):

$f_r = f_s$ = frequência de ressonância série, na qual a impedância atinge um valor mínimo R_r ;

$f_{ar} = f_p$ = frequência de ressonância paralela ou de anti-ressonância, na qual a impedância atinge um valor máximo;

R_r = valor da impedância na frequência de ressonância, que representa os efeitos de atrito na cerâmica;

C_r = capacitância série na ressonância, que representa os efeitos da elasticidade na cerâmica;

L_r = indutância série na ressonância, que representa os efeitos inerciais da cerâmica;

C_0 = capacitância elétrica ou intrínseca da cerâmica;

C' = capacitância da cerâmica em uma frequência bem abaixo da ressonância f_r ;

R_0 = representa as perdas elétricas na cerâmica.

Para o modelo simplificado de Mason (Figura 2(a)), tem-se as Equações 12 a 16.

$$C_r = C_0 \left(\frac{f_{ar}^2 - f_r^2}{f_r^2} \right) \quad (12)$$

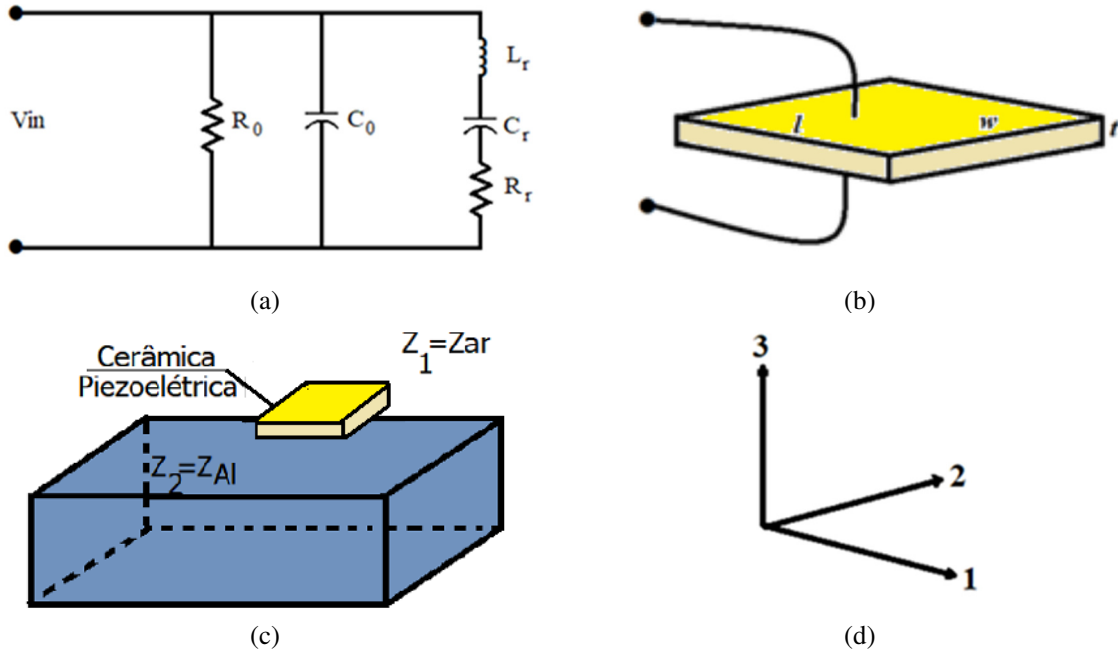
$$C_0 = C' - C_r \quad (13)$$

$$L_r = \frac{1}{(2\pi f_r)^2 C_r} \quad (14)$$

$$f_r = f_s = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_r C_r}} \quad (15)$$

$$f_{ar} = f_p = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_r \frac{C_0 C_r}{C_0 + C_r}}} \quad (16)$$

Figura 2 - (a) Circuito equivalente simplificado de Mason. R_0 representa as perdas elétricas, C_0 é a capacitância intrínseca, L_r , C_r e R_r representam os efeitos inerciais, elásticos e de atrito, respectivamente, do elemento transdutor na ressonância (MASON, 1935; CHURCH & PINCOCK, 1985); (b) Cerâmica piezoelétrica de comprimento l , largura w e espessura t , excitada com um campo elétrico perpendicular à sua face; (c) Representação de uma cerâmica com impedância Z_C , carregada em uma das faces com uma impedância Z_1 (correspondendo ao ar) e na outra face com uma impedância Z_2 (correspondendo ao alumínio) e (d) Sistema de coordenadas adotado no equacionamento.



Fonte: Adaptado de Mason (1935), Church e Pincock (1985).

Para uma cerâmica de área A e impedância acústica Z_C , carregada com impedâncias Z_1 e Z_2 em cada um dos lados, a resistência R_r série do modelo de Mason para a frequência angular $\omega_r = 2\pi f_r$ e o fator de acoplamento eletromecânico k_T para um determinado modo de vibração pode ser expressa pela Equação 17, quando $(Z_1 + Z_2) \ll Z_C$ (KINO, 1987).

Como exemplo, conforme a Figura 2(c), pode-se citar uma cerâmica piezoelétrica do tipo APC (*American Piezo Ceramics*) 855, equivalente à PZT 5H, com impedância acústica $Z_C \cong 34,7 \times 10^6 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{s})$, dada pela Equação 18 (onde ρ é a densidade e c é a velocidade de propagação das ondas no sólido piezoelétrico), acoplada em uma das faces a um material a ser caracterizado (por exemplo, o alumínio com impedância $Z_{Al} = 17,0 \times 10^6 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{s})$) e a outra face acoplada a um outro meio (por exemplo, o ar com impedância $Z_{ar} = 4,1 \times 10^2 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{s})$) (KINO, 1987).

$$R_r = \frac{(Z_1 + Z_2)}{4k_T^2 \omega_r C_0 Z_C} \quad (17)$$

$$Z_C = \rho c \quad (18)$$

Em termos dos parâmetros da cerâmica de espessura t , largura w e comprimento l , a impedância Z , para o modo de vibração lateral, pode ser obtida através da Equação 19 (BERLINCOURT et al., 1964).

$$Y = \frac{1}{Z} = j\omega \frac{lw}{t} \varepsilon_{33}^T \left\{ (1 - k_{31}^2) + k_{31}^2 \frac{\left(\tan \frac{\omega l}{2v_b^E} \right)}{\frac{\omega l}{2v_b^E}} \right\} \quad (19)$$

Sendo que:

Z = impedância;

Y = admitância;

k_{31} = fator de acoplamento lateral;

ε_{33}^T = permissividade do meio;

$\omega = 2\pi f$ = frequência angular;

w = largura da cerâmica;

l = comprimento ou perímetro da cerâmica;

v_b^E = velocidade das ondas longitudinais na direção lateral da cerâmica piezoelétrica.

Na frequência de ressonância, a impedância de uma cerâmica ideal (sem perdas) se torna igual a zero ($R_0 = 0$) e, conseqüentemente, a admitância Y se torna infinita. Assim, tem-se as Equações 20 e 21 (BERLINCOURT et al., 1964).

$$\tan \frac{\omega l}{2v_b^E} = \infty \quad (20)$$

$$f_r = f_s = \frac{v_b^E}{2l} \quad (21)$$

Na frequência de antirressonância, a impedância se torna infinita e o valor de k_{31} pode ser determinado através da Equação 22 utilizando-se os valores experimentais de f_{ar} e f_r , por exemplo (BERLINCOURT et al., 1964).

$$k_{31}^2 = \frac{1}{1 - \frac{\tan\left(\frac{\pi f_{ar}}{2f_r}\right)}{\frac{\pi f_{ar}}{2f_r}}} \quad (22)$$

A impedância elétrica para o modo de vibração espessura da cerâmica piezoelétrica pode ser obtida a partir da Equação 23, sendo que C_c (Equação 24) é a capacitância do transdutor preso à placa, igual a C_o no circuito de Mason (Figura 2(a)), $\beta_{33}^S = \frac{1}{\epsilon^S}$ é o inverso da permissividade do transdutor preso à placa no modo da espessura, v^D é a velocidade das ondas longitudinais na direção da espessura da cerâmica, k_t é o fator de acoplamento no modo espessura (Equação 25) e f_a é a frequência de antirressonância para o modo espessura (Equação 26) (BERLINCOURT et al., 1964).

$$Z = \frac{1}{j\omega C_c} \left[1 - k_t^2 \frac{\tan\left(\frac{\omega t}{2v^D}\right)}{\frac{\omega t}{2v^D}} \right] \quad (23)$$

$$C_c = lw/t\beta_{33}^S \quad (24)$$

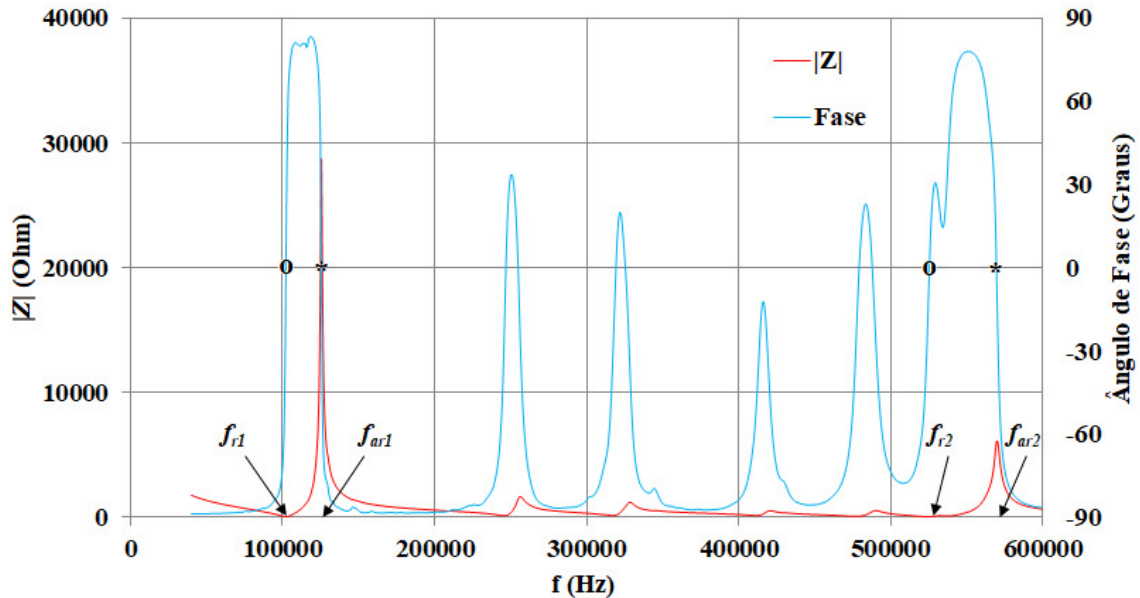
$$k_t^2 = \frac{\pi f_r}{2f_a} \cot \frac{\pi f_r}{2f_a} \quad (25)$$

$$f_a = \frac{v^D}{2t} \quad (26)$$

Para uma cerâmica de pequena espessura, vibrando livremente, é possível identificar vários modos de vibração, sendo que os de menores frequências correspondem aos modos laterais/radiais (aqueles nas quais as vibrações ocorrem nas direções laterais de cerâmicas quadradas (l ou w na Figura 2(b)) ou do raio de cerâmicas circulares), enquanto que o de maior frequência corresponde ao modo espessura (t na Figura 2(b)). Os modos de vibração intermediários correspondem aos transversais. Nestes casos, é possível determinar o fator de acoplamento eletromecânico eficaz para cada modo de vibração utilizando-se a Equação 27 (MASON, 1935; BERLINCOURT et al., 1964; KINO, 1987). A Figura 3 ilustra as curvas de módulo e ângulo de fase de um disco cerâmico de 19,05 mm de diâmetro e 4 mm de espessura, nas quais foram marcadas as frequências de ressonância (mínimo de $|Z|$ e fase igual a 0°) e antirressonância (máximo local de $|Z|$ e fase igual a 0°) do modo lateral/radial (f_{r1} e f_{ar1}) e do modo espessura (f_{r2} e f_{ar2}).

$$k_{eff}^2 = \frac{f_{ar}^2 - f_r^2}{f_{ar}^2} \quad (27)$$

Figura 3 - Curvas de módulo ($|Z|$) da impedância e do ângulo de fase (Fase) de um disco cerâmico com 19,05 mm de diâmetro e 4 mm de espessura mostrando as frequências de ressonância (f_r) e anti-ressonância (f_{ar}) para os modos de vibração radial (f_{r1} e f_{ar1}) e espessura (f_{r2} e f_{ar2}).



Fonte: Autoria própria.

2.2.2 TÉCNICA DE ANÁLISE DA ATENUAÇÃO

A atenuação de uma onda ultrassônica é definida como o efeito da diminuição da amplitude ao propagar-se através de um determinado meio. O efeito de atenuação da onda acústica está vinculado a vários fatores, entre eles cita-se: divergência do feixe em relação ao eixo central de propagação; espalhamento devido à não homogeneidade do meio; conversão em outros modos de vibração resultando no compartilhamento da energia com duas ou mais frentes de ondas propagando-se com velocidades e sentidos diferentes; absorção pelo meio, onde parte da energia é convertida em calor, principalmente devido às forças de atrito que agem em oposição ao movimento das partículas. A composição molecular da matéria e a frequência do sinal ultrassônico são variáveis que influenciam diretamente no efeito de atenuação. Matematicamente, a atenuação pode ser expressa pela Equação 28, em que α é o coeficiente de atenuação em dB/cm, calculado pela relação entre a amplitude inicial do sinal ultrassônico, A_0 , transmitido pelo transdutor, em uma dada frequência e a amplitude do sinal em uma determinada distância z , A_z (WELLS, 1977).

$$A_Z = A_0 e^{-\alpha z} \quad (28)$$

A atenuação do ultrassom tem sido explorada na área médica em pesquisas *in vivo*, servindo de parâmetro à variação da densidade e demais características anisotrópicas da estrutura óssea a ser investigada e auxiliar na triagem de pacientes com risco de fraturas devido à osteoporose (MAIA et al., 2008; FEHER et al., 2020). A aplicação da atenuação na detecção de falhas é mais difundida quando se avalia o seu efeito em função da frequência, denominada de atenuação em banda larga, do inglês *Broadband Ultrasound Attenuation* (BUA) (KAUFMAN & EINHORN, 1993; HULL et al., 1996; MAIA et al., 2008).

A BUA é obtida através da comparação espectral do sinal obtido em um meio de referência (geralmente uma estrutura intacta) e a estrutura a ser analisada (com danos), conforme Equação 29.

$$A_{\text{atten}} = 20 \log |S_R| - 20 \log |S_D|, \quad (29)$$

em que:

S_R = Espectro de frequências do sinal que se propagou na estrutura de referência (sem danos) obtido a partir do valor absoluto da FFT (*Fast Fourier Transform*);

S_D = Espectro de frequências do sinal que se propagou na estrutura a ser analisada.

A curva resultante da Equação 29 é a atenuação em função da frequência e, dependendo da largura de banda do transdutor, apresenta uma região linear para a qual pode ser realizada uma regressão linear ($Atten_{\text{Linear}}$). Assim, o coeficiente angular obtido pela Equação 30 representa a BUA em dB/MHz (HULL et al., 1996; MAIA, 2001), conforme ilustrado na Figura 4.

$$Atten_{\text{Linear}} = a + BUA \cdot f \quad (30)$$

Sendo que:

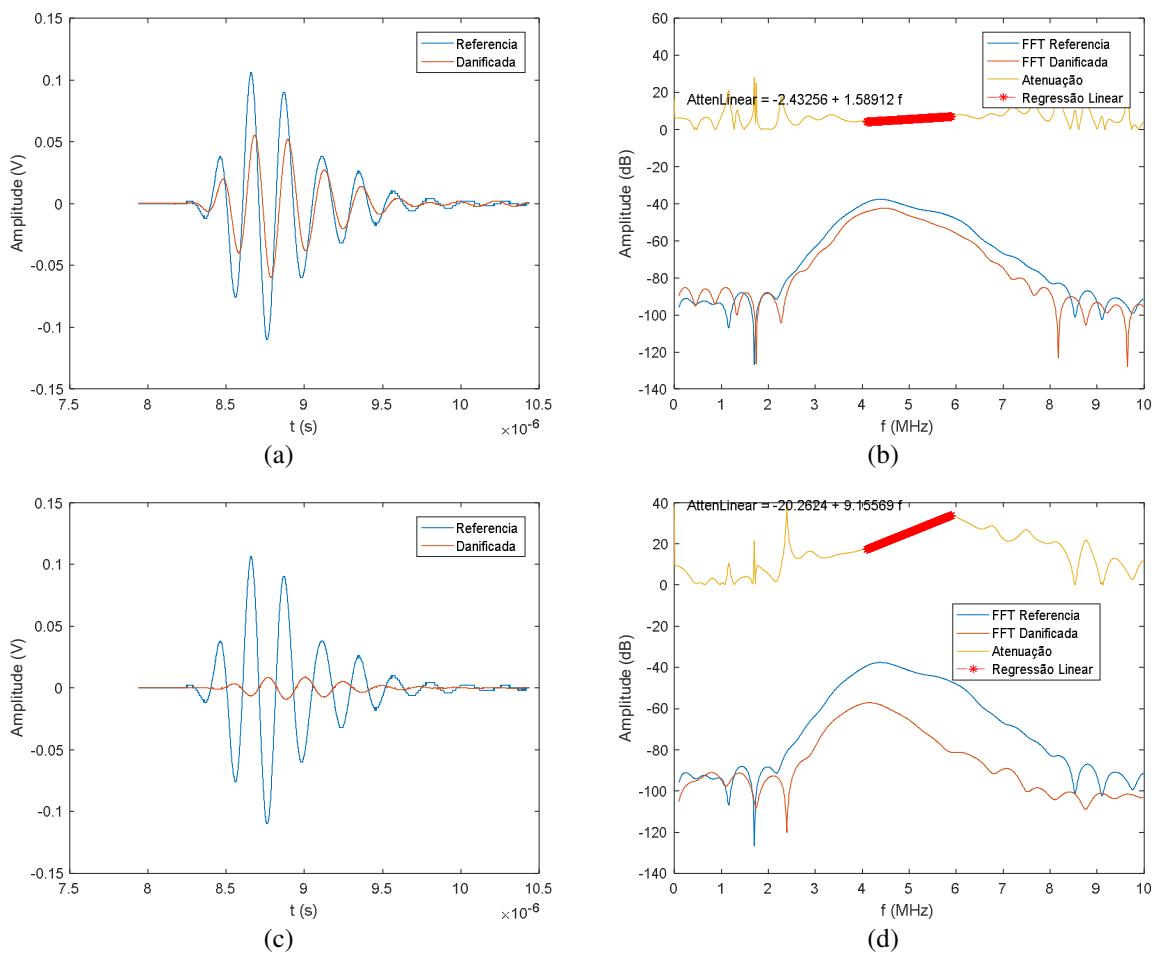
a = ponto de intersecção da reta $Atten_{\text{Linear}}$ com o eixo vertical;

f = frequência em MHz.

A faixa de frequências na qual poderá ser obtido o índice BUA está relacionada a uma das frequências de ressonância do transdutor a ser utilizado. Na área de END são utilizadas frequências mais baixas para materiais com elevado índice de atenuação e maiores para

materiais com menores índices, sendo utilizadas frequências entre 50 kHz e 10 MHz (NOKES & CLOUD 1993; PARK et al., 1999a; PARK et al., 1999b; PARK et al., 2003; MAIA et al., 2008).

Figura 4 - Método para determinação da Atenuação em Banda Larga (BUA), mostrando: Sinais de ultrassom obtidos a partir de uma amostra de referência e de amostras a serem caracterizadas (a) com falhas menores e (c) maiores; (b) e (d) FFT dos sinais de referência e das amostras a serem caracterizadas com falhas, mostrando a diferença entre os espectros (atenuação) e a região linear, próxima à ressonância de 5 MHz, à qual foi aplicada a regressão linear para obter o coeficiente (BUA), que corresponde aos coeficientes angulares das retas obtidas ($Atten_{Linear}$).



Fonte: Autoria própria.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo será apresentada a metodologia completa da técnica da impedância e da avaliação da atenuação de ondas ultrassônicas para o monitoramento da integridade de amostras de alumínio com falhas de diferentes dimensões. A caracterização das estruturas foi feita adquirindo-se os dados de uma amostra de referência (sem danos) e comparando-os com os dados adquiridos de amostras com furos de diferentes tamanhos, simulando falhas.

3.1 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS DE ALUMÍNIO PARA REALIZAR OS TESTES

Neste trabalho, os testes foram realizados em barras de alumínio do tipo liga 6351-T6 e placas de alumínio do tipo liga 5052-F. Os parâmetros desses materiais são apresentados na Tabela 1 (ROBINSON, 1990).

Tabela 1 - Propriedades físicas, mecânicas e térmicas de barras de alumínio do tipo liga 6351-T6 e placas de alumínio tipo liga 5052-F (ROBINSON, 1990).

Parâmetro	Valor Barras	Valor Placas
Densidade (g/cm ³)	2,71	2,68
Módulo de elasticidade (GPa)	69	72
Módulo de cisalhamento (GPa)	26,0	27,5
Resistência ao cisalhamento (MPa)	200	200
Resistência à tração, <i>Ultimate</i> (MPa)	310	170
Resistência à tração, <i>Yield</i> (MPa)	285	90
Dureza, HB	95	45
Razão de Poisson	0,33	0,33
Resistência à fadiga (MPa)	90	110
Condutividade térmica a 25 °C (W/(m·K))	176	138
Ponto de fusão (°C)	555 – 650	595-650
Coefficiente de expansão térmica média (µm/(m·°C))	23,40	23,75
Resistividade elétrica a 20 °C (Ω·mm ² /m)	0,038	0,050
Condutividade elétrica a 20 °C para o mesmo volume (% IACS - <i>International Association of Classification Societies</i>)	46	34
Comprimento (mm)	250	500
Largura (mm)	50	500
Espessura (mm)	50	4

Foram preparados quatro conjuntos de amostras formados por barras de alumínio, totalizando 18 unidades de dimensões 250 mm × 50 mm × 50 mm, sendo que quatro delas foram mantidas intactas e utilizadas como referência e nas demais foram inseridas falhas (furos utilizando-se brocas) em três posições pré-definidas, separadas de 50 mm entre cada falha.

Também foi preparado um conjunto de amostras formado por placas de alumínio, totalizando cinco unidades de dimensões 500 mm × 500 mm × 4 mm, sendo uma delas mantida intacta para ser utilizada como referência (sem furos) e em quatro delas foram inseridas falhas (furos utilizando-se brocas) em três posições pré-definidas, separadas de 125 mm entre cada falha.

Os conjuntos de amostras foram separados da seguinte forma:

- **Primeiro conjunto:** Quatro amostras de barras de alumínio, sendo uma de referência (1ª amostra) e as demais com três furos sempre de mesma dimensão, totalmente vazados e diâmetros de 5 mm (2ª amostra), 8 mm (3ª amostra) e 11 mm (4ª amostra) para serem avaliadas com um transdutor de ultrassom de elemento único (FUNBEC, 15700IH, 19 mm de diâmetro, 1,6 MHz de frequência central). O transdutor foi acoplado às amostras utilizando-se gel neutro para uso com transdutores de ultrassom, conforme exemplo apresentado na Figura 5(a);
- **Segundo conjunto:** Quatro amostras de barras de alumínio, sendo uma de referência (1ª amostra) e três barras contendo três furos de mesma dimensão, totalmente vazados e diâmetros de 5 mm (2ª amostra), 8 mm (3ª amostra) e 11 mm (4ª amostra) para serem avaliadas com cerâmicas circulares de 12,7 mm × 0,267 mm e de 12,7 mm × 1 mm do tipo APC 855 (APC, 2019), equivalentes à Navy VI e PZT 5H, Tabela 2. As cerâmicas foram coladas às amostras utilizando-se cola do tipo epóxi Loctite Power Crystal (Henkel Adhesive Technol., Itapevi, SP, Brasil) em três regiões diferentes (P1, P2 e P3), como exemplo apresentado na Figura 5(b);
- **Terceiro conjunto:** Cinco amostras de barras de alumínio, sendo uma de referência (1ª amostra) e as quatro demais contendo três furos de mesma dimensão, com diâmetros de 1 mm (2ª amostra), 2,5 mm (3ª amostra), 3 mm (4ª amostra) e profundidade de 10 mm e uma amostra com furos de diâmetros de 3 mm totalmente vazados (5ª amostra) para serem avaliadas com cerâmicas piezoelétricas quadradas APC 855 de 12,7 mm ×

12,7 mm × 0,52 mm (APC, 2019). As cerâmicas foram coladas e posicionadas da mesma forma que no segundo conjunto de amostras, conforme Figura 5(b);

- **Quarto conjunto:** Cinco amostras de barras de alumínio, sendo uma de referência (1ª amostra) e outras quatro contendo três furos de mesma dimensão, com diâmetros de 1 mm (2ª amostra), 2,5 mm (3ª amostra), 3 mm (4ª amostra) e profundidade de 10 mm e uma amostra com furos de diâmetros de 3 mm totalmente vazados (5ª amostra) para serem avaliadas utilizando-se um par de transdutores de ultrassom com frequência central de 500 kHz, 19 mm de diâmetro (modelo V318, Olympus Corp., Boston, MA, *United States of America* - USA) e um par de transdutores com frequência central de 5 MHz, 6 mm de diâmetro (Modelos MED. I.F. 161562H e 163629H, FUNBEC, São Paulo, Brasil). Os transdutores foram acoplados às amostras da mesma forma utilizada no primeiro conjunto de amostras;
- **Quinto conjunto:** Cinco amostras de placas de alumínio, sendo uma de referência (1ª amostra) e as quatro demais contendo três furos de mesma dimensão e totalmente vazados, com diâmetros de 1 mm (2ª amostra), 5 mm (3ª amostra), 8 mm (4ª amostra) e 11 mm (5ª amostra) para serem avaliadas com cerâmicas piezoelétricas circulares APC 855 de 19,05 mm × 3 mm (APC, 2019). As cerâmicas foram coladas e posicionadas conforme ilustração e imagem apresentadas nas Figuras 5(c) e 5(d).

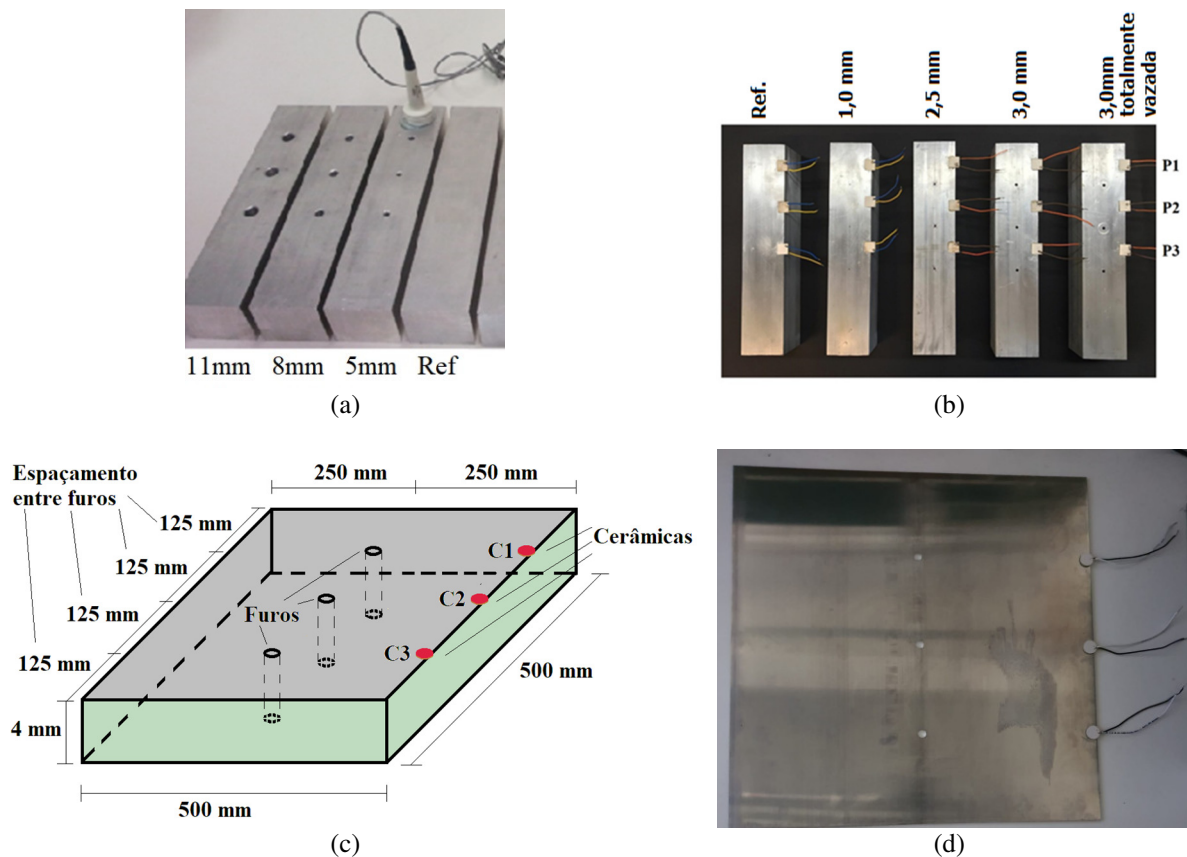
Todas as cerâmicas utilizadas neste trabalho apresentavam identificação do ponto de polaridade em uma de suas faces e os fios condutores foram soldados às duas faces para transmissão e recepção dos sinais.

Os valores teóricos das impedâncias das cerâmicas piezoelétricas quadradas utilizadas foram calculados através das Equações 19 e 23 para comparação com os valores obtidos experimentalmente.

Tabela 2 - Principais propriedades físicas e piezoelétricas da cerâmica APC 855 (APC, 2019).

Parâmetro		Símbolo	Valor
Módulo de Young (GPa)		Y_{11}^E	59
		Y_{33}^E	51
Constante dielétrica relativa		K^T	3300
Fator de dissipação dielétrica (Perda dielétrica (%))		$\tan \delta$	$\leq 2,50$
Ponto de Curie ($^{\circ}\text{C}$)		T_c	200
Máxima temperatura de operação ($^{\circ}\text{C}$)		T_{op}	100
Fator de acoplamento eletromecânico		k_p	0,68
		k_{33}	0,76
		k_{31}	0,40
		k_t	0,51
Constantes de tensão de transmissão ou piezoelétricas		d_{33}	630
		d_{31}	-276
		d_{15}	720
Constante de tensão piezoelétrica (10^{-3}Vm/N ou m^2/C)		g_{33}	21
		g_{31}	-9
		g_{15}	27
Densidade (g/cm^3)		ρ	7,6
Fator de qualidade mecânico		Q_m	65
Constantes de frequência ($\text{Hz}\cdot\text{m}$ ou m/s)		N_L (longitudinal)	1390
		N_T (espessura)	2079
		N_P (planar)	1920
Dimensões das cerâmicas quadradas	Comprimento (mm)	l	12,7
	Largura (mm)	w	12,7
	Espessura (mm)	t	0,52
Dimensões das cerâmicas circulares	Diâmetro (mm)	$d_{0,2}$	12,7
	Espessura (mm)	$t_{0,2}$	0,267
	Diâmetro (mm)	$d_{1,0}$	12,7
	Espessura (mm)	$t_{1,0}$	1
	Diâmetro (mm)	$d_{3,0}$	19,05
	Espessura (mm)	$t_{3,0}$	3

Figura 5 - (a) Barras de alumínio de dimensões 250 mm x 50 mm x 50 mm utilizadas como amostras indicando a posição das falhas (furos vazados de diâmetros de 5 mm, 8 mm, 11 mm) e estrutura sem falhas, utilizada como referência (Ref), com o transdutor de 1,6 MHz acoplado em uma das posições onde foram realizadas as medições; (b) Posicionamento das cerâmicas piezoelétricas (P1, P2 e P3) na estrutura de alumínio íntegra (Ref) e nas estruturas com furos de diâmetros de 1 mm, 2,5 mm e 3 mm com profundidade de 10 mm e estrutura com furos de 3 mm totalmente vazados; (c) Ilustração sobre o posicionamento das cerâmicas piezoelétricas (C1, C2 e C3) nas placas de alumínio de 500 mm x 500 mm x 4 mm. Uma das estruturas foi mantida sem furos (Referência) e nas outras foram inseridos furos de diâmetros de 1 mm, 5 mm, 8 mm e 11 mm; (d) Placa de alumínio com furos de 8 mm de diâmetro incluindo as cerâmicas coladas.



Fonte: Autoria própria.

3.2 CONFIGURAÇÃO UTILIZADA PARA REALIZAR OS TESTES DE ANÁLISE DE IMPEDÂNCIA DOS TRANSDUTORES E DAS CERÂMICAS PIEZOELÉTRICAS

Foram realizadas medições do módulo e ângulo de fase da impedância elétrica em cada uma das cerâmicas acopladas às amostras utilizando-se um analisador de impedância (modelo 4294A, Agilent Technologies, Santa Clara, CA, USA).

A comparação entre a impedância das cerâmicas acopladas em cada uma das posições da estrutura de referência e os valores das impedâncias medidas nas barras e placas de alumínio com imperfeições inseridas foi feita a partir do cálculo do índice RMSD (*Root Mean Square Deviation*), Equação 31, sendo que $Z_{n,h}$ está relacionado ao módulo da impedância da estrutura íntegra, $Z_{n,d}$ à estrutura com falha, n corresponde à medição obtida e p é o número total de

medições que compõem a faixa de frequências utilizada no sistema de aquisição dos dados (DONGYU et al., 2010).

$$RMSD = \sum_n^P \sqrt{\frac{(Z_{n,d} - Z_{n,h})^2}{Z_{n,h}^2}} \quad (31)$$

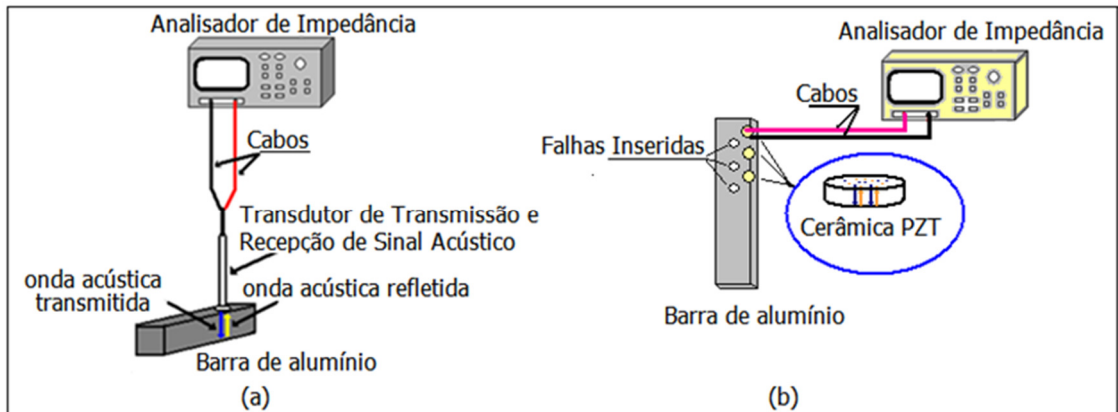
De forma a avaliar a influência do formato, dimensões e faixa de frequências de operação, foram utilizadas cerâmicas piezoelétricas de duas formas geométricas (quadradas e circulares) com diferentes dimensões e espessuras. Para definir a faixa de frequências a ser utilizada para avaliar as barras de alumínio, inicialmente foi realizada a medição da impedância elétrica de uma cerâmica livre na faixa de frequências entre 40 kHz e 5 MHz. Com base nos resultados da cerâmica livre, foram escolhidas faixas de frequências que englobassem as ressonâncias nos modos laterais/transversais e a principal do modo espessura. As faixas escolhidas foram: (1) 40 kHz a 500 kHz e (2) 3,5 MHz a 5 MHz. O analisador de impedância Agilent 4294A foi configurado para adquirir 800 pontos em cada faixa de frequências.

Para avaliar as placas de alumínio foi realizada a medição da impedância elétrica das cerâmicas piezoelétricas circulares de 19,05 mm de diâmetro e 3 mm de espessura na faixa de frequências entre 80 kHz e 880 kHz, que incorpora todos os modos de vibração dessas cerâmicas.

A configuração utilizada para realizar as medições de impedância elétrica dos transdutores e das cerâmicas acopladas às amostras de alumínio é apresentada nas Figuras 6(a) e 6(b), respectivamente. Os transdutores utilizados nos testes são de elemento cerâmico único e alguns deles são apresentados nas Figuras 7(a - c). As cerâmicas utilizadas nos testes são apresentadas nas Figuras 7(d - g).

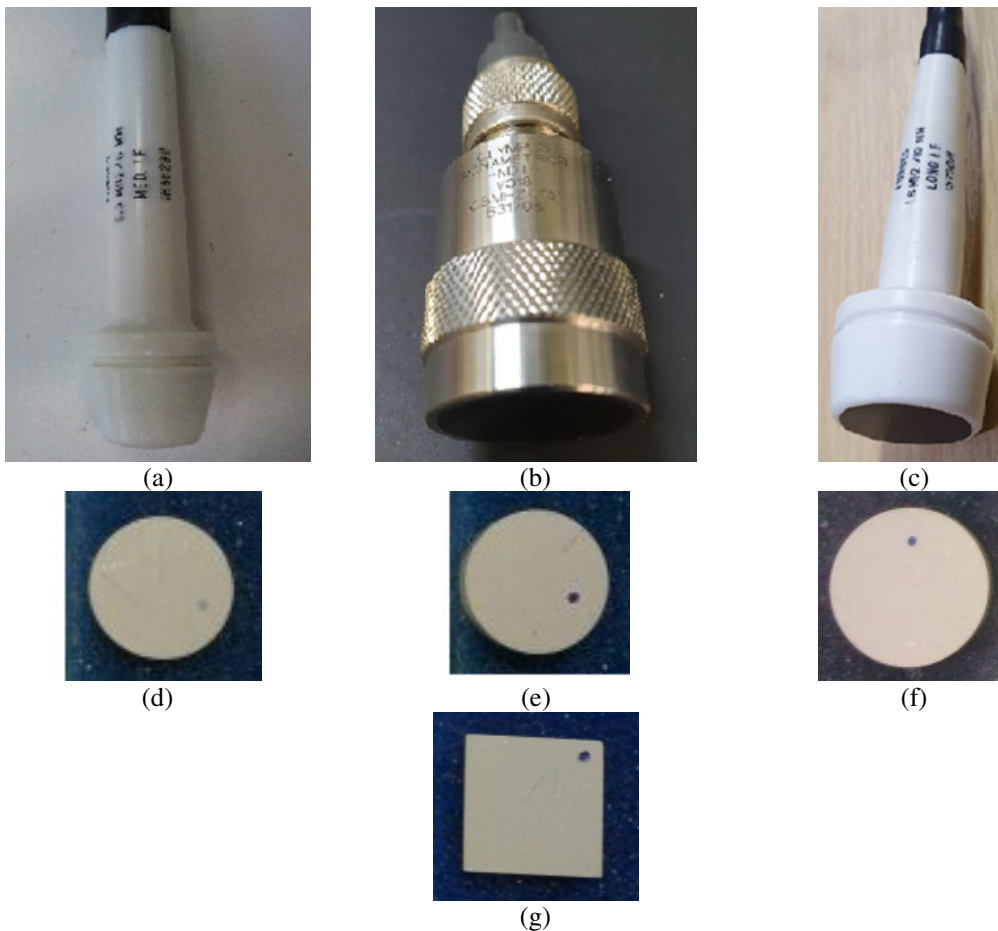
Os dados do analisador de impedância foram transferidos a um microcomputador via interface Ethernet para serem processados utilizando-se o programa Excel (Microsoft Inc.).

Figura 6 - (a) Configuração para realizar os testes e medição da impedância elétrica com transdutor acoplado às amostras por meio de gel neutro; (b) com as cerâmicas acopladas às amostras por meio da cola epóxi.



Fonte: Autoria própria.

Figura 7 - (a) Transdutor FUNBEC, modelo 163629H, 6 mm de diâmetro, 5 MHz de frequência central; (b) Transdutor OLYMPUS, modelo V318, 19 mm de diâmetro, 500 kHz de frequência central; (c) Transdutor FUNBEC, modelo 15700IH, 19 mm de diâmetro, 1,6 MHz de frequência central; (d) Cerâmica circular APC 855 de 12,7 mm \times 0,267 mm; (e) Cerâmica circular APC 855 de 12,7 mm \times 1 mm; (f) Cerâmica circular APC 855 de 19,05 mm \times 3 mm; (g) Cerâmica quadrada APC 855 de 12,7 mm \times 12,7 mm \times 0,52 mm.



Fonte: Autoria própria.

3.3 CONFIGURAÇÃO UTILIZADA PARA REALIZAR OS TESTES DE ATENUAÇÃO DAS ONDAS ULTRASSÔNICAS

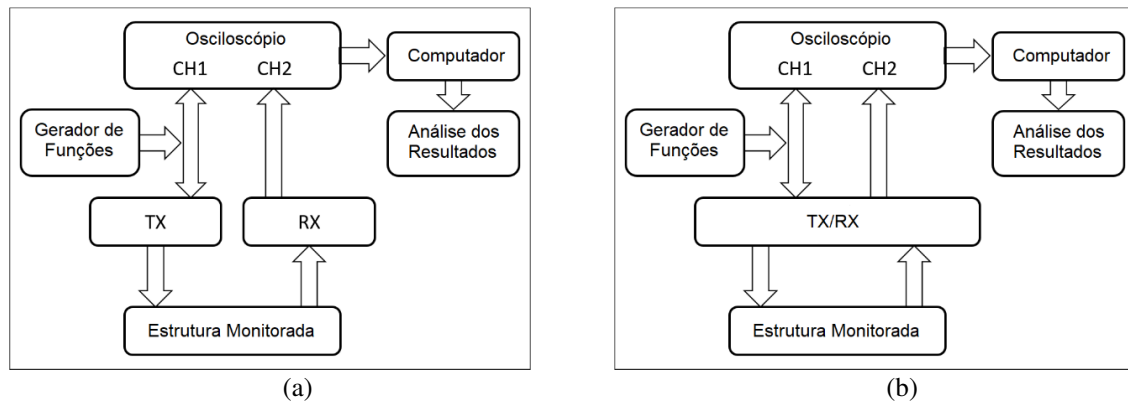
A avaliação da atenuação das ondas ultrassônicas foi feita utilizando-se um gerador de função (modelo AFG3021, fabricante Tektronix Inc., Beaverton, OR, USA) para excitação das cerâmicas com um pulso senoidal único de 20 Vpp nos modos transmissão-recepção e pulso-eco, nas frequências de 90 kHz, 145 kHz, 230 kHz e 376 kHz (frequências nas quais as cerâmicas apresentavam ressonâncias), com taxa de repetição de 100 Hz. Os sinais foram adquiridos em um osciloscópio digital Tektronix (modelo TDS2022, fabricante Tektronix Inc., Beaverton, OR, USA) e transferidos, via interface RS232 utilizando-se o programa OpenChoice, a um computador para serem processados no MATLAB® (versão 2014b, MathWorks Inc., Natick, MA, USA). Para caracterizar cada ponto das barras de alumínio foram realizadas cinco medições para cada uma das cerâmicas piezoelétricas acopladas ao segundo e terceiro conjuntos de amostras, mantendo-se as condições de temperatura e ambiente constantes. Para as placas de alumínio, quinto conjunto de amostras, foram realizadas medições em cada uma das cerâmicas acopladas às amostras nas três posições.

No modo pulso-eco, as cerâmicas de cada uma das posições P1, P2 e P3 foram excitadas e o sinal foi recebido pela mesma cerâmica para posterior análise. No modo transmissão-recepção, uma das cerâmicas foi utilizada como transmissora e a outra como receptora, sendo feitos testes com todas as possibilidades: P1-P2, P1-P3, P2-P1, P2-P3, P3-P1, P3-P2. A Figura 8 apresenta os diagramas em blocos para os modos de aquisição dos sinais transmissão-recepção, Figura 8(a), e pulso-eco, Figura 8(b).

Para a avaliação da BUA foi utilizado um par de transdutores comerciais com frequência central de 5 MHz, 6 mm de diâmetro (Modelos MED. I.F. 161562H e 163629H, FUNBEC, São Paulo, Brasil) e um par de transdutores com frequência de 500 kHz, 19 mm de diâmetro (modelo V318, Olympus Corp., Boston, MA, USA). Os transdutores foram acoplados ao quarto conjunto de barras de alumínio, em posições semelhantes às que foram colocadas as cerâmicas piezoelétricas, utilizando-se gel neutro para ultrassom. As medições foram realizadas utilizando-se um pulser/receiver (modelo 5077PR, Olympus Corp., Boston, MA, USA) operando nos métodos pulso-eco e transmissão-recepção, com cada par de transdutores posicionados um de frente para o outro em P1, P2 e P3 para transmissão-recepção. Os transmissores foram excitados com pulsos negativos de -100 V de amplitude, duração de 1 μ s e 100 ns para 500 kHz e 5 MHz, respectivamente, e os sinais dos receptores foram amplificados com ganho de 20 dB.

Para avaliar a atenuação da amplitude das ondas ultrassônicas que se propagaram nas placas de alumínio, a frequência de excitação das cerâmicas circulares de 19,05 mm × 3 mm utilizada foi 104 kHz, que corresponde à frequência do modo de vibração radial.

Figura 8 - Diagrama em blocos do sistema para aquisição de dados nos modos (a) transmissão-recepção e (b) pulso-eco.



Fonte: Autoria própria.

3.4 SIMULAÇÕES UTILIZANDO O MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

Para confirmar se haveria ou não alteração na atenuação das ondas ultrassônicas que se propagam nas estruturas de referência e naquelas com furos simulando defeitos, foi realizada uma simulação usando o *software* de Análise de Elementos Finitos ANSYS (Versão 17.1, ANSYS Inc., Canonsburg, PA, EUA). Estímulos de 0,1 N com frequências de 90 kHz e 500 kHz foram aplicados nas posições P1, P2 e P3 de cada amostra (barra) utilizada nos testes e as respostas harmônicas foram obtidas. O modelo estrutural das amostras foi configurado para 1865 nós e 320 elementos no *software* ANSYS. Os desenhos das barras foram feitos utilizando-se o *software* 3D CAD SOLIDWORKS 2018 (Dassault Systèmes SolidWorks Corporation, Waltham, MA, EUA).

Para as simulações das placas de alumínio foram utilizados os mesmos *softwares* e a configuração no ANSYS foi para 12312 nós, 1704 elementos, força de 0,1 N e frequência de 104 kHz.

3.5 RESUMO DA METODOLOGIA ADOTADA NO TRABALHO

A Tabela 3 apresenta o resumo da metodologia utilizada neste trabalho para a caracterização das amostras de alumínio e avaliação dos resultados obtidos.

Tabela 3 - Resumo da metodologia adotada para caracterização das estruturas de alumínio.

Passo	Descrição
1	Quatro conjuntos de amostras de barras de alumínio de dimensões 250 mm × 50 mm × 50 mm, totalizando 18 unidades, foram preparadas, mantendo-se quatro delas intactas para servirem de referência e as outras quatorze foram furadas em três posições (simulando falhas). Também foi preparado um conjunto de cinco amostras de placas de alumínio de dimensões 500 mm × 500 mm × 4 mm, mantendo-se uma delas como referência (intacta) e nas demais foram inseridas falhas em três posições;
2	Foram acoplados transdutores de ultrassom ou cerâmicas piezoelétricas APC 855 a cada uma das 18 amostras de barras e às cinco amostras de placas de alumínio em três posições;
3	Foram realizadas medições de impedância elétrica (módulo e ângulo de fase) em cada uma das cerâmicas acopladas a todas as barras de alumínio nas faixas de frequências de 40 kHz a 500 kHz e 3,5 MHz a 5 MHz e nas placas de alumínio foi utilizada a faixa de 80 kHz a 880 kHz. Para os transdutores, as faixas de frequências foram escolhidas de acordo com as especificações das frequências centrais (f_c) dos dispositivos, ou seja: para o transdutor de frequência central igual a 500 kHz, a faixa de frequências estabelecida nas medições foi selecionada entre 100 kHz e 700 kHz; para o transdutor de $f_c = 1,6$ MHz, a faixa de frequências ficou entre 500 kHz e 3 MHz e para o transdutor de $f_c = 5$ MHz, a faixa utilizada foi de 40 kHz a 10 MHz;
4	Foi feita a comparação entre a impedância das cerâmicas/transdutores acoplados nas estruturas de referência e as estruturas com falhas utilizando-se o índice RMSD, Equação 31, calculado em diferentes faixas de frequências para cada uma das cerâmicas/transdutores;
5	Foram calculados os valores teóricos dos parâmetros das cerâmicas quadradas para comparação com os valores obtidos experimentalmente;
6	As cerâmicas foram excitadas utilizando-se os métodos pulso-eco e transmissão-recepção para aquisição dos sinais que se propagaram em cada uma delas;
7	Calculou-se a atenuação da amplitude utilizando-se como base a amostra de referência;
8	Para o cálculo da BUA, foram utilizadas duas faixas de frequências e dois pares de transdutores de ultrassom com frequência central de 500 kHz e de 5 MHz acoplados a cada uma das amostras para adquirir os sinais no modo transmissão-recepção e pulso-eco;
9	Foram feitas simulações utilizando o método de elementos finitos para confirmar se haveria ou não alterações na atenuação das ondas ultrassônicas ao se propagarem nas amostras com falhas em relação às amostras de referência.

4 RESULTADOS

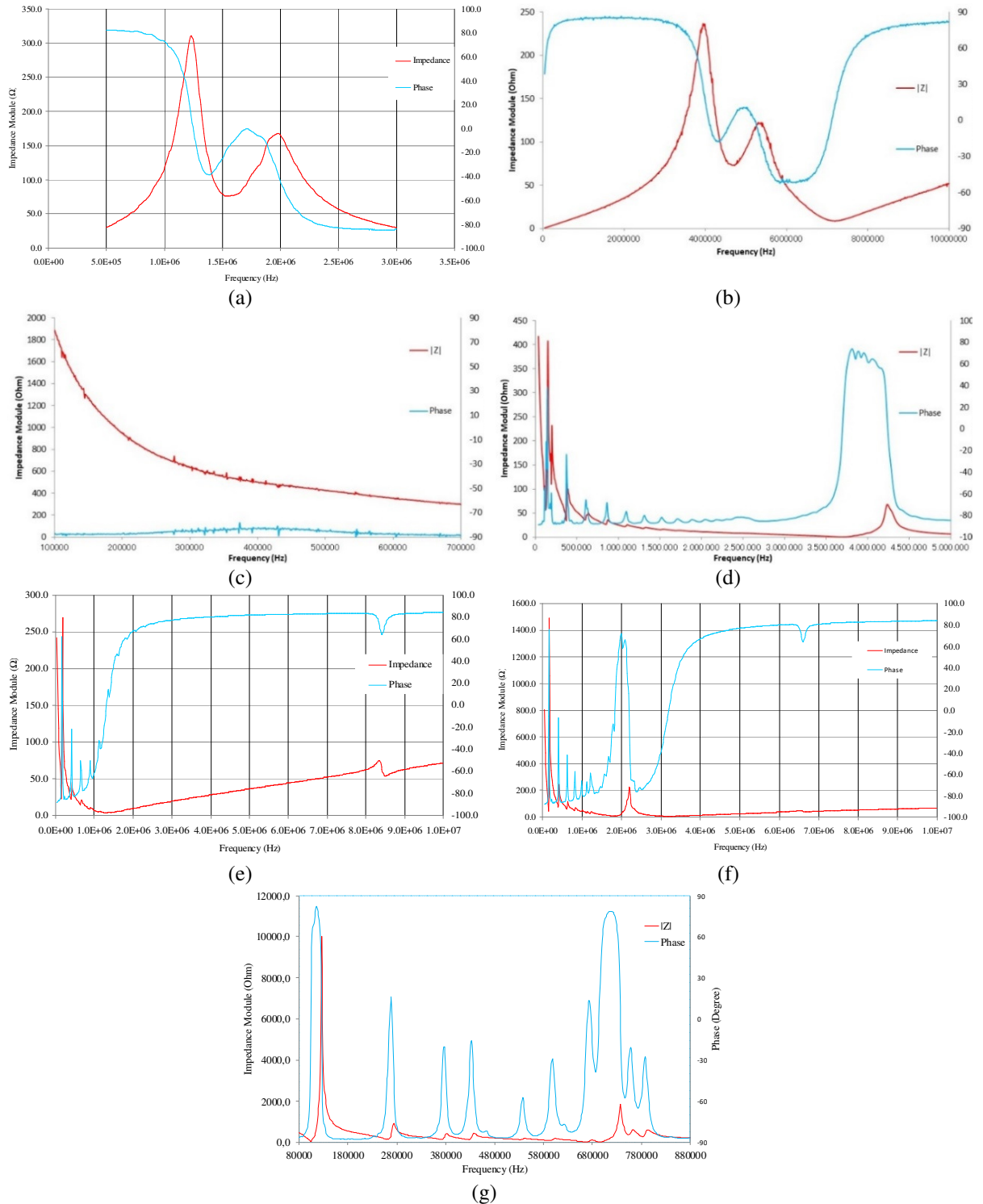
Neste capítulo são apresentados os resultados dos testes experimentais para o monitoramento das estruturas de alumínio com diferentes dimensões de falhas.

4.1 RESULTADOS PARA A CARACTERIZAÇÃO DOS TRANSDUTORES E CERÂMICAS PIEZOELÉTRICAS UTILIZADAS NOS TESTES

A Figura 9(a) apresenta as curvas de módulo e ângulo de fase da impedância em função da frequência para o transdutor de 1,6 MHz (modelo 15700IH, 19 mm de diâmetro, FUNBEC). Na Figura 9(b) são apresentadas as curvas para um dos transdutores de 5 MHz (modelo Med. I.F., 6 mm de diâmetro, FUNBEC) e na Figura 9(c) para um dos transdutores de frequência central nominal de 500 kHz (modelo V318, 19 mm de diâmetro, Olympus Corp.). As Figuras 9(d), 9(e) e 9(f) apresentam as curvas para uma das cerâmicas piezoelétricas quadradas APC 855 de 12,7 mm × 12,7 mm × 0,52 mm e circulares de 12,7 mm × 0,267 mm e de 12,7 mm × 1 mm, respectivamente, que foram utilizadas nos testes com as barras de alumínio. A Figura 9(g) apresenta as curvas para uma das cerâmicas circulares de 19,05 mm de diâmetro e 3 mm de espessura que foram utilizadas nos testes com as placas de alumínio. Essas curvas foram utilizadas para avaliar as ressonâncias e antirressonâncias dos transdutores e das cerâmicas livres presentes na faixa entre 40 kHz e 5 MHz e definir as frequências a serem utilizadas nos testes.

A Tabela 4 apresenta os valores teóricos e experimentais da impedância, dos fatores de acoplamento nos modos de vibração lateral, de espessura e outros parâmetros da cerâmica piezoelétrica APC 855, que apresenta a curva de módulo e ângulo de fase da impedância em função da frequência mostrada na Figura 9(d).

Figura 9 - Curvas de módulo e ângulo de fase da impedância em função da frequência para: (a) Transdutor de 1,6 MHz de frequência central (modelo 15700IH, 19 mm de diâmetro, FUNBEC); (b) Um dos transdutores de frequência central de 5 MHz (modelo Med. I.F., 6 mm de diâmetro, FUNBEC) utilizados nos testes; (c) Um dos transdutores de frequência central de 500 kHz (modelo V318, 19 mm de diâmetro, Olympus Corp.); (d) Uma das cerâmicas piezoelétricas quadradas APC 855 com 12,7 mm × 12,7 mm × 0,52 mm; (e) Uma das cerâmicas circulares APC 855 de 12,7 mm × 0,267 mm; (f) Uma das cerâmicas circulares APC 855 de 12,7 mm × 1 mm; (g) Uma das cerâmicas circulares APC 855 de 19,05 mm × 3 mm.



Fonte: Autoria própria.

É possível observar que as cerâmicas piezoelétricas apresentam algumas frequências de ressonância na faixa entre 40 kHz e 5 MHz, correspondentes aos modos radial/lateral (frequências mais baixas), espessura/axial (frequências mais altas) e outros modos de vibração transversais (frequências intermediárias), enquanto os transdutores de ultrassom apresentam as principais ressonâncias próximas às suas frequências centrais nominais (500 kHz, 1,6 MHz e 5 MHz), não aparecendo outros modos de vibração.

Tabela 4 - Parâmetros teóricos (V_t), experimentais (V_e) e erro percentual [$E\% = 100(V_t - V_e)/V_t$] para as cerâmicas piezoelétricas APC 855 e os transdutores de ultrassom utilizados neste trabalho.

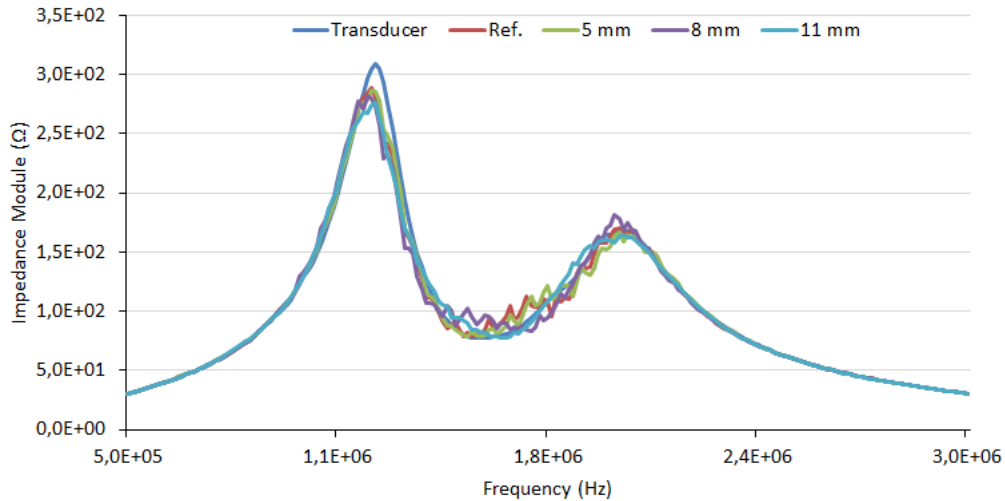
Parâmetro	Equação ou dados utilizados		Resultados		Erro
	V_t	V_e	V_t	V_e	$E\%$
Frequência de ressonância (espessura) (MHz)	N_T/t	Medido	3,998	3,693	7,63
Frequência de ressonância (lateral) (MHz)	N_L/l	Medido	0,109	0,117	-7,34
Fator de acoplamento (espessura)	APC 2019	Eq. 22	0,51	0,55	-7,84
Fator de acoplamento (lateral)	APC 2019	Eq. 19	0,40	0,24	40,00
Frequência de antirressonância (espessura) (MHz)	Eq. 26 $v^D = 4560 \text{ m/s}$	Medido	4,385	4,297	2,01
Frequência de antirressonância (lateral) (MHz)	Eq. 27	Medido	0,119	0,120	-0,84
Velocidade longitudinal espessura (m/s)	APC 2019	Eq. 23	4560	4469	2,00
Velocidade longitudinal lateral (m/s)	Eq. 21	Eq. 18	2780	3048	-9,64
Capacitância <i>clamp</i> (nF):	Eq. 24 $\epsilon_{33}^S = 1470\epsilon_0$, $\epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$	Medido	4,04	9,75	-141,34
Módulo da impedância na ressonância no modo espessura (Ω)	Eq. 23	Medido	4,04	0,66	83,66
Módulo da impedância na ressonância no modo lateral (Ω)	Eq. 19 $\epsilon_{33}^T = 3400\epsilon_0$	Medido	168,68	47,20	72,02
Frequência central para os transdutores V318 (kHz)	OLYMPUS	Medido	500,00	475,00	5,00
Frequência central para os transdutores MED I.F. 161562H (MHz)	FUNBEC	Medido	5,00	4,42	11,60

4.2 RESULTADOS PARA A ANÁLISE DAS CURVAS DO MÓDULO DA IMPEDÂNCIA EM FUNÇÃO DA FREQUÊNCIA PARA O TRANSDUTOR DE 1,6 MHz ACOPLADO AO PRIMEIRO CONJUNTO DE AMOSTRAS E PARA AS CERÂMICAS PIEZOELÉTRICAS CIRCULARES ACOPLADAS AO SEGUNDO CONJUNTO DE AMOSTRAS

A Figura 10 apresenta os resultados para uma das medições do módulo da impedância realizada com o transdutor colocado na região P1 (ver Figuras 5(a) e 5(b)) de cada uma das quatro amostras de alumínio utilizadas nos testes (tanto para a referência quanto para as com

furos de 5 mm, 8 mm e 11 mm totalmente vazados). A primeira curva (*Transducer*) corresponde à medição da impedância elétrica do transdutor FUNBEC com 1,6 MHz de frequência central sem acoplamento com as estruturas (livre), e as demais correspondem às curvas para o transdutor acoplado às barras de 5 mm, 8 mm e 11 mm, respectivamente.

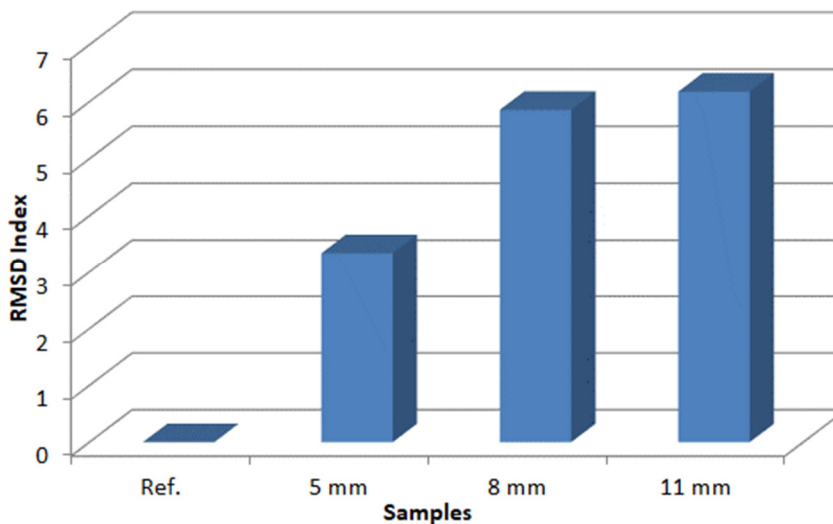
Figura 10 - Curvas do módulo da impedância elétrica em função da frequência obtidas com o transdutor livre (*Transducer*) e posicionado na região P1 (ver Figuras 5(a) e 5(b)) das quatro barras de alumínio (Ref. e com furos de 5 mm, 8 mm e 11 mm).



Fonte: Autoria própria.

A Figura 11 apresenta os resultados para o cálculo do índice RMSD dos dados apresentados na Figura 10, indicando um aumento no valor do índice de acordo com o aumento do diâmetro das falhas presentes nas estruturas de alumínio.

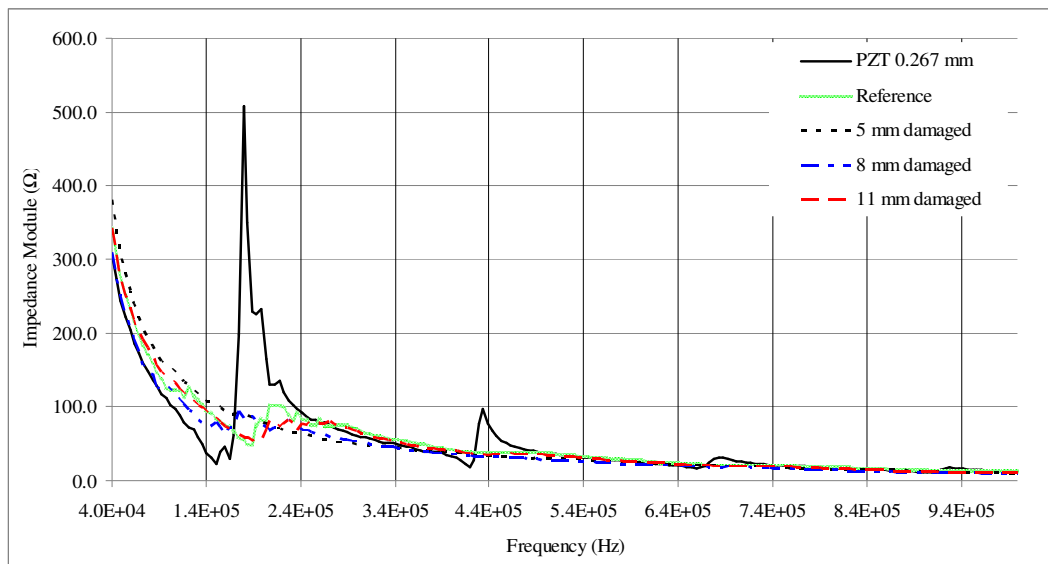
Figura 11 - Índice RMSD calculado para as amostras de alumínio com furos de 5 mm, 8 mm e 11 mm em relação à amostra de referência (Ref.). O transdutor foi posicionado na região P1 das quatro amostras (ver Figuras 5(a) e 5(b)).



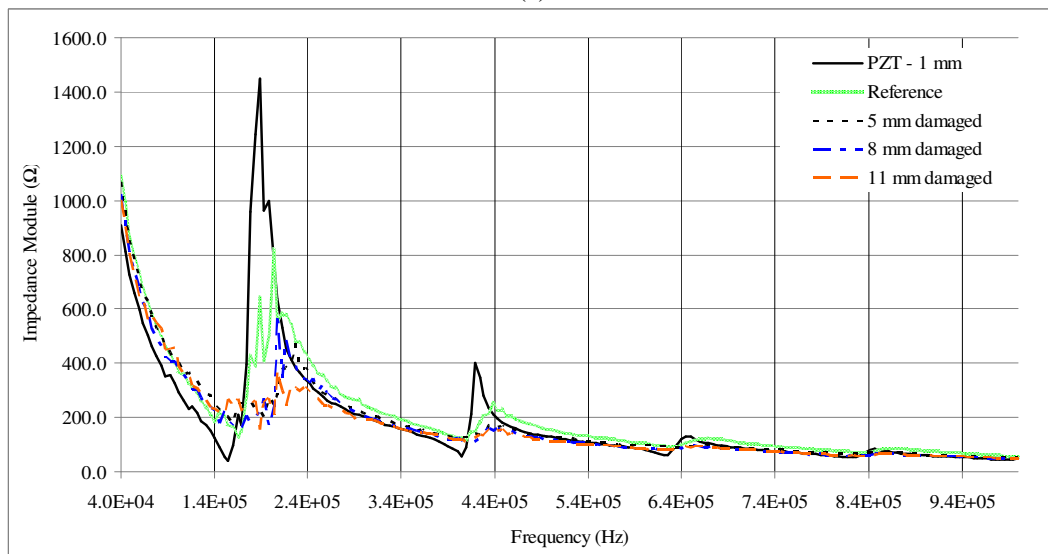
Fonte: Autoria própria.

A Figura 12(a) apresenta um dos resultados das curvas do módulo da impedância elétrica em função da frequência, obtidos para as cerâmicas circulares com diâmetro de 12,7 mm e 0,267 mm de espessura e a Figura 12(b) mostra as curvas para cerâmicas de mesmo diâmetro com 1 mm de espessura, coladas na posição P1 (ver Figuras 5(b)) do segundo conjunto de amostras, que inclui uma referência e as demais com falhas de diâmetros de 5 mm, 8 mm e 11 mm, respectivamente.

Figura 12 - Curvas de módulo da impedância elétrica em função da frequência obtidas com (a) cerâmicas piezoelétricas APC 855 circulares com diâmetro de 12,7 mm e 0,267 mm de espessura e (b) com diâmetro de 12,7 mm e 1 mm de espessura. As primeiras curvas nas legendas correspondem às cerâmicas livres (PZT – 0,267 mm e PZT – 1 mm) e as demais correspondem às cerâmicas posicionadas na região P1 (ver Figura 5(b)) das quatro amostras de alumínio (referência e danificadas por orifícios de 5 mm, 8 mm e 11 mm).



(a)



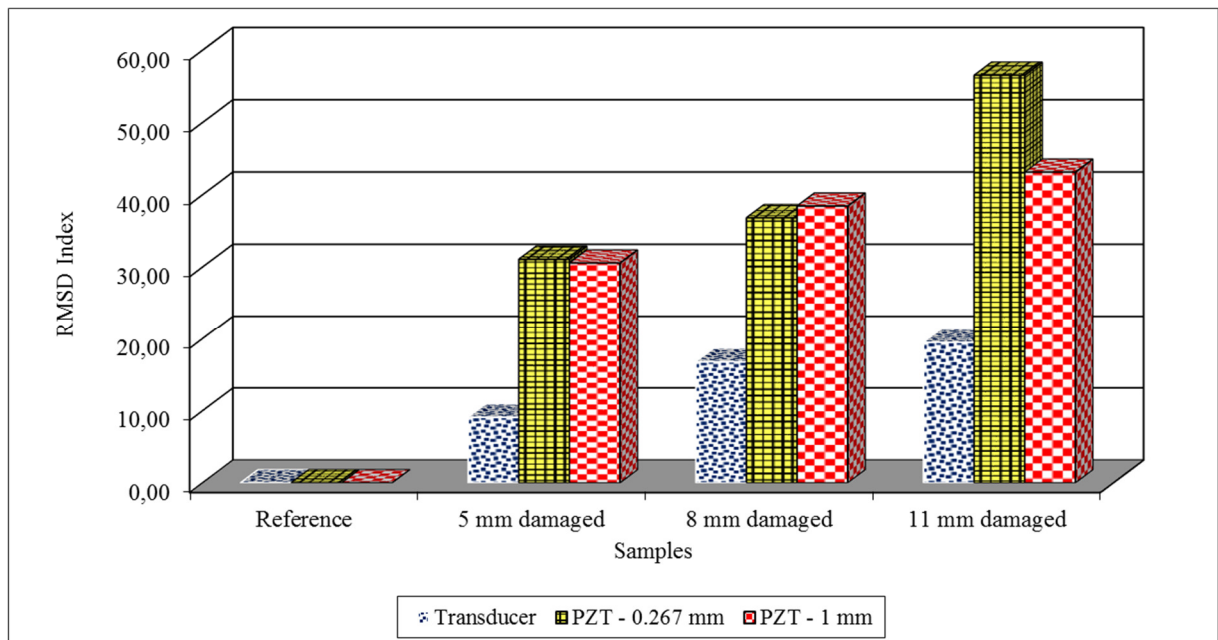
(b)

Fonte: Autoria própria.

É possível verificar na Figura 10 que, em algumas frequências, principalmente na faixa da frequência de ressonância do transdutor de 1,6 MHz, ocorre uma redução da impedância com o aumento do diâmetro das falhas. Resultados semelhantes foram obtidos com as cerâmicas circulares de 12,7 mm de diâmetro e 0,267 mm ou 1 mm de espessura, apresentados na Figura 12(a) e Figura 12(b), respectivamente. No entanto, essa relação é mais clara na faixa de frequências de 150 kHz a 450 kHz, que corresponde ao módulo radial dos discos PZT.

A Figura 13 mostra os resultados dos índices RMSD obtidos a partir dos dados mostrados nos gráficos da Figura 12, incluindo os do transdutor de 1,6 MHz, apresentados na Figura 10. Houve um aumento no valor do índice *RMSD* de acordo com o aumento no diâmetro dos danos nas amostras. De acordo com os valores dos índices RMSD calculados, observa-se na Figura 13 que a cerâmica de menor espessura (0,267 mm) apresentou maior sensibilidade para detectar as falhas de 5 mm e 11 mm, enquanto a cerâmica de 1 mm apresentou maior sensibilidade para as falhas de 5 mm (DA COSTA et al, 2014).

Figura 13 - Índice RMSD calculado entre as amostras de alumínio de referência e as amostras com falhas de 5 mm, 8 mm e 11 mm. O transdutor e os discos cerâmicos PZT com 12,7 mm de diâmetro e 0,267 mm (PZT-0,267 mm) ou 1 mm (PZT-1 mm) de espessura foram colados na posição P1 (ver Figura 5(a) e 5(b)) das quatro amostras avaliadas.



Fonte: Autoria própria.

4.3 RESULTADOS PARA A ANÁLISE DAS CURVAS DE MÓDULO DA IMPEDÂNCIA EM FUNÇÃO DA FREQUÊNCIA DAS CERÂMICAS PIEZOELÉTRICAS QUADRADAS ACOPLADAS AO TERCEIRO CONJUNTO DE AMOSTRAS

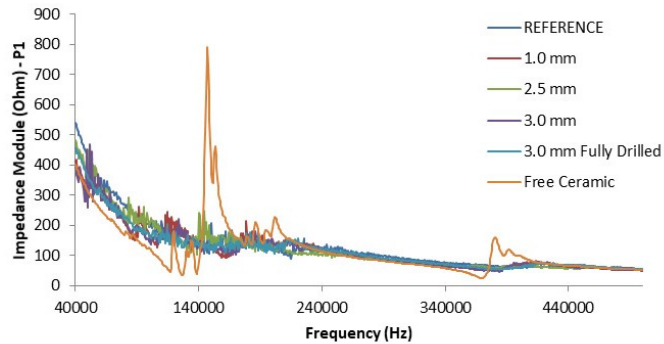
As curvas do módulo da impedância elétrica em função da frequência (faixa de 40 kHz a 500 kHz) para as cerâmicas acopladas à amostra de referência e às amostras nas quais foram inseridas falhas com profundidade de 10 mm e diâmetros de 1 mm, 2,5 mm, 3 mm e uma de 3 mm totalmente vazadas, nas posições P1, P2 e P3 (ver Figura 5(b)), são apresentadas nas Figuras 14(a, c, e), respectivamente. Os respectivos índices RMSD obtidos através da comparação das curvas de módulo da impedância elétrica das cerâmicas acopladas às amostras com falhas em relação à amostra de referência são apresentados nas Figuras 14(b, d, f).

As curvas das cerâmicas livres foram incluídas nas Figuras 14(a, c, e) apenas para mostrar que, quando estas são coladas às estruturas de alumínio, alguns modos de vibração diminuem ou acabam sendo anulados. Os resultados dos testes de impedância para a faixa de frequências de 3,5 MHz a 5 MHz são apresentados na Figura 15.

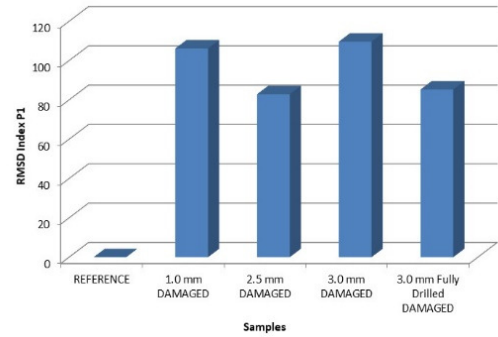
4.4 RESULTADOS PARA A ANÁLISE DAS CURVAS DE MÓDULO DA IMPEDÂNCIA EM FUNÇÃO DA FREQUÊNCIA DAS CERÂMICAS PIEZOELÉTRICAS CIRCULARES ACOPLADAS AO QUINTO CONJUNTO DE AMOSTRAS (PLACAS DE ALUMÍNIO)

As curvas do módulo da impedância elétrica em função da frequência (faixa de 80 kHz a 880 kHz) para as cerâmicas circulares de 19,05 mm de diâmetro e 3 mm de espessura acopladas à placa de alumínio de referência e às amostras nas quais foram inseridas falhas (furos totalmente vazados) com diâmetros de 1 mm, 5 mm, 8 mm e 11 mm, nas posições C1, C2 e C3 (ver Figura 5(c)), são apresentadas nas Figuras 16(a, c, e), respectivamente. Os respectivos índices RMSD obtidos através da comparação das curvas de módulo da impedância elétrica das cerâmicas acopladas às amostras com falhas em relação à amostra de referência são apresentados nas Figuras 16(b, d, f).

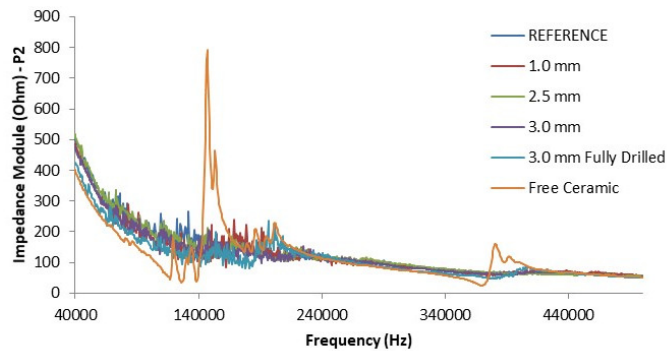
Figura 14 - (a, c, e) Curvas de módulo da impedância em função da frequência (faixa de 40 kHz a 500 kHz) para as cerâmicas piezoelétricas quadradas de 12,7 mm × 12,7 mm × 0,52 mm acopladas às amostras de referência e nas com falhas de 1 mm, 2,5 mm e 3 mm com profundidade de 10 mm e de 3 mm totalmente vazadas (*Fully Drilled*) nas posições P1, P2 e P3 (ver Figura 5(b)); (b, d, f) Índices RMSD calculados entre o módulo das impedâncias das amostras de referência e das amostras com falhas.



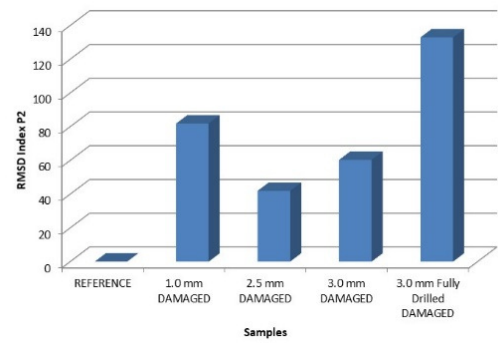
(a)



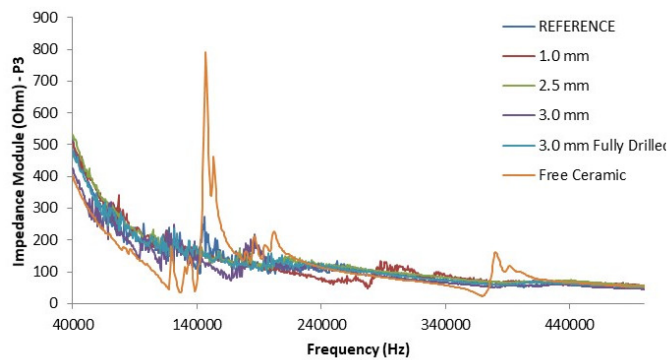
(b)



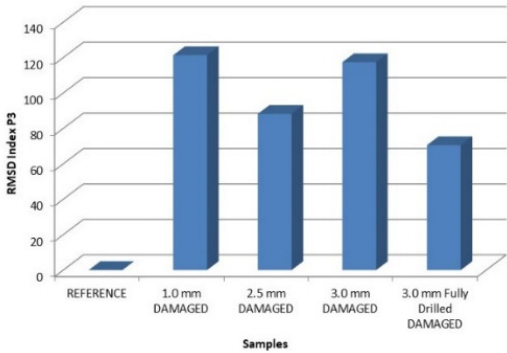
(c)



(d)



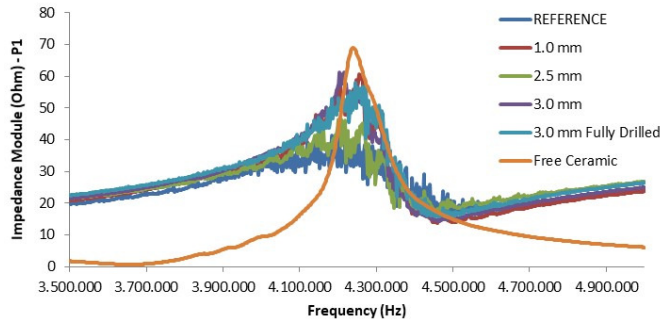
(e)



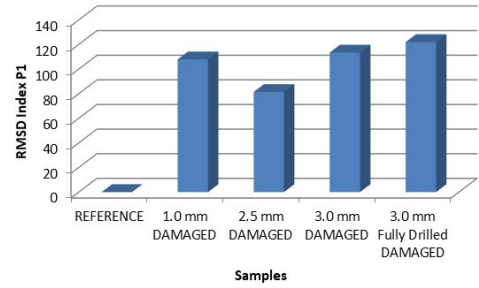
(f)

Fonte: Autoria própria.

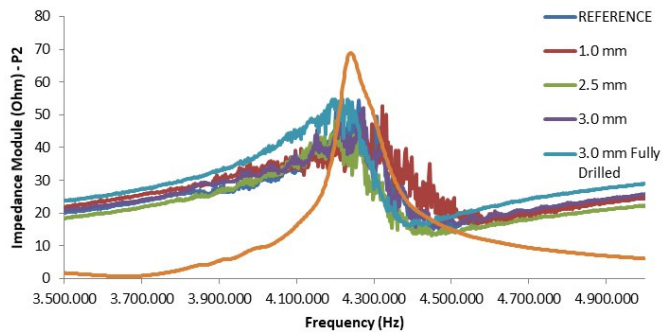
Figura 15 - (a, c, e) Curvas de módulo da impedância em função da frequência (faixa de 3,5 MHz a 5 MHz) para as cerâmicas piezoelétricas quadradas de 12,7 mm × 12,7 mm × 0,52 mm acopladas à amostra de referência e nas com falhas de 1 mm, 2,5 mm e 3 mm com profundidade de 10 mm e de 3 mm totalmente vazadas (*Fully Drilled*) nas posições P1, P2 e P3 (ver Figura 5(b)), respectivamente; (b, d, f) Índices RMSD calculados entre o módulo das impedâncias da amostra de referência e das amostras com falhas.



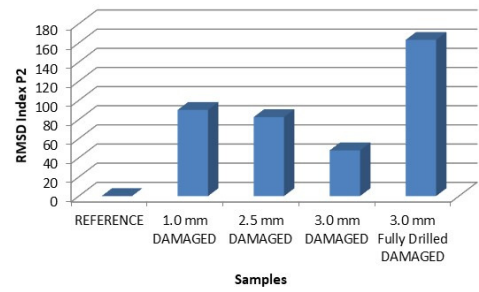
(a)



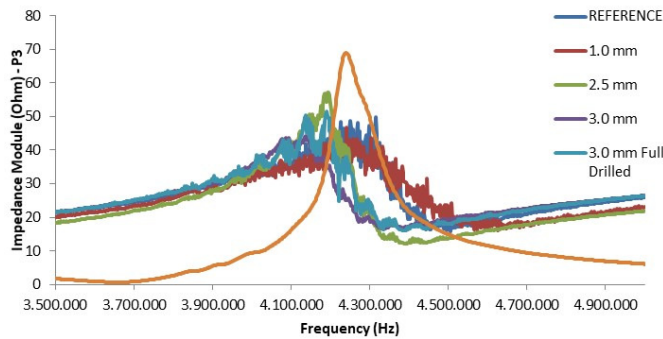
(b)



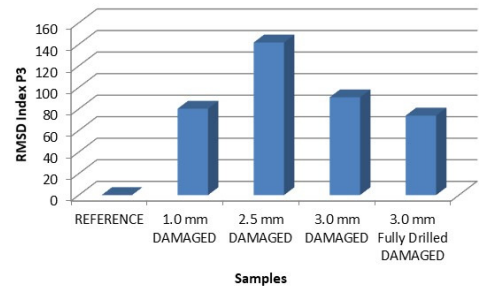
(c)



(d)



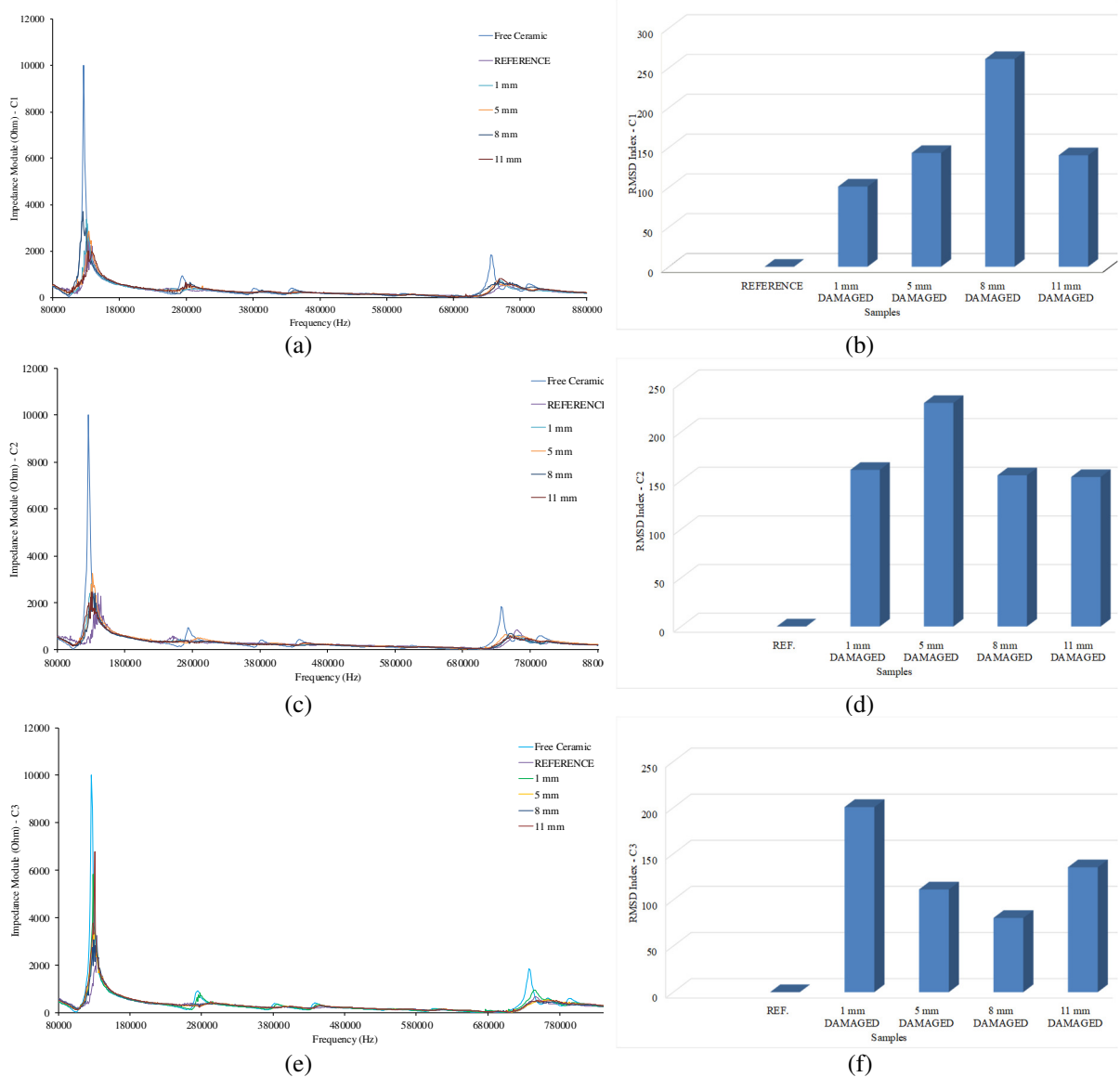
(e)



(f)

Fonte: Autoria própria.

Figura 16 - (a, c, e) Curvas de módulo da impedância em função da frequência (faixa de 80 kHz a 880 kHz) para as cerâmicas circulares APC 855 de 19,05 mm de diâmetro e 3 mm de espessura acopladas à placa de alumínio de referência e nas com falhas de 1 mm, 5 mm, 8 mm e 11 mm nas posições C1, C2 e C3 (ver Figura 5(c)); (b, d, f) Índices RMSD calculados entre o módulo das impedâncias das amostras de referência e das amostras com falhas.



Fonte: Autoria própria.

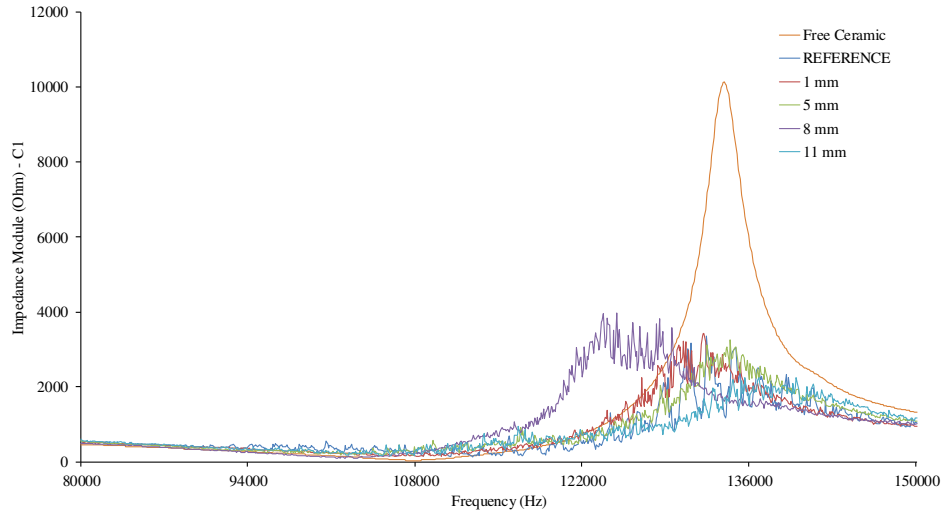
A Figura 17 apresenta, de forma ampliada (faixa de 80 kHz a 150 kHz), as curvas dos módulos das impedâncias em função da frequência para as cerâmicas acopladas às posições C1 (Figura 17(a)), C2 (Figura 17(b)) e C3 (Figura 17(c)) (ver Figura 5(c)) das placas de alumínio de referência (íntegra) e para aquelas com furos simulando falhas de 1 mm, 5 mm, 8 mm e 11 mm de diâmetro. As curvas ampliadas para a faixa de 680 kHz a 800 kHz são apresentadas na Figura 18.

Verifica-se que, nas frequências de ressonâncias para os modos de vibração radial das cerâmicas na posição C1 (Figura 17(a) - valores de menores módulos das impedâncias - aproximadamente 104 kHz), as variações dos módulos das impedâncias com as dimensões dos furos são relativamente pequenas. No entanto, nas frequências de antirressonância para as mesmas cerâmicas (Figura 17(a) - valores de maiores módulos das impedâncias – na faixa entre 120 kHz e 130 kHz) as variações ficam evidentes. A cerâmica livre possui frequências de ressonância e antirressonância no modo de vibração radial de aproximadamente 108 kHz e 134 kHz, respectivamente.

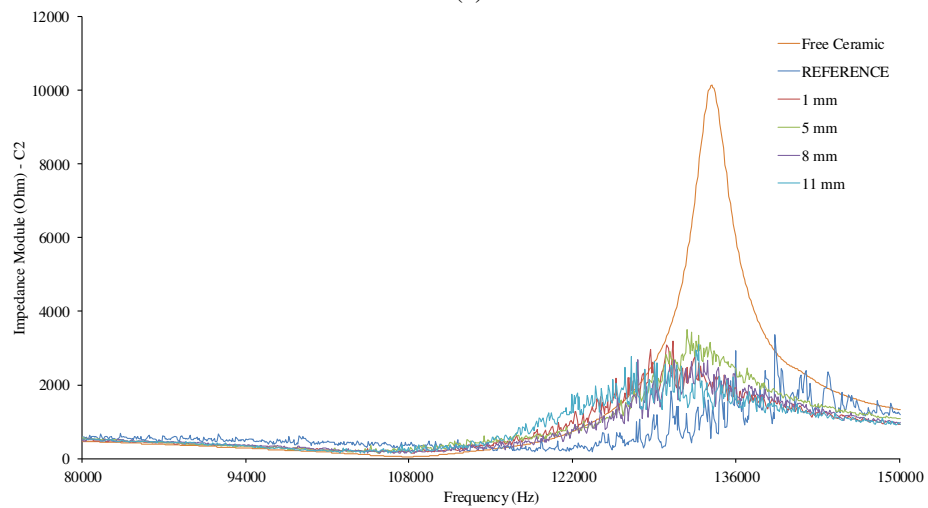
A Figura 18 apresenta os resultados, de forma ampliada (faixa de 680 kHz a 800 kHz), para os modos de vibração espessura das cerâmicas acopladas às posições C1 (Figura 18(a)), C2 (Figura 18(b)) e C3 (Figura 18(c)) (ver Figura 5(c)) das cinco amostras. Verifica-se, neste caso, para as cerâmicas na posição C1 (Figura 18(a)) que as frequências de ressonâncias variaram ligeiramente conforme a amostra (na faixa entre 695 kHz e 720 kHz). Há também variação nas frequências de antirressonância (na faixa entre 743 kHz e 768 kHz). A cerâmica livre possui frequências de ressonância e antirressonância no modo de vibração espessura de aproximadamente 704 kHz e 778 kHz, respectivamente. Da mesma forma que no modo de vibração radial, é possível verificar que as maiores variações nos valores dos módulos das impedâncias elétricas das cerâmicas piezoelétricas ocorrem para as frequências de antirressonância destas.

As curvas obtidas para as cerâmicas acopladas às posições C2 e C3 para os modos de vibração radial (Figura 17(b) e Figura 17(c), respectivamente) e para os modos de vibração espessura (Figura 18(b) e Figura 18(c), respectivamente) mostram frequências de ressonâncias próximas às obtidas para as cerâmicas acopladas à posição C1. No entanto, as frequências de antirressonâncias e os módulos das impedâncias são diferentes.

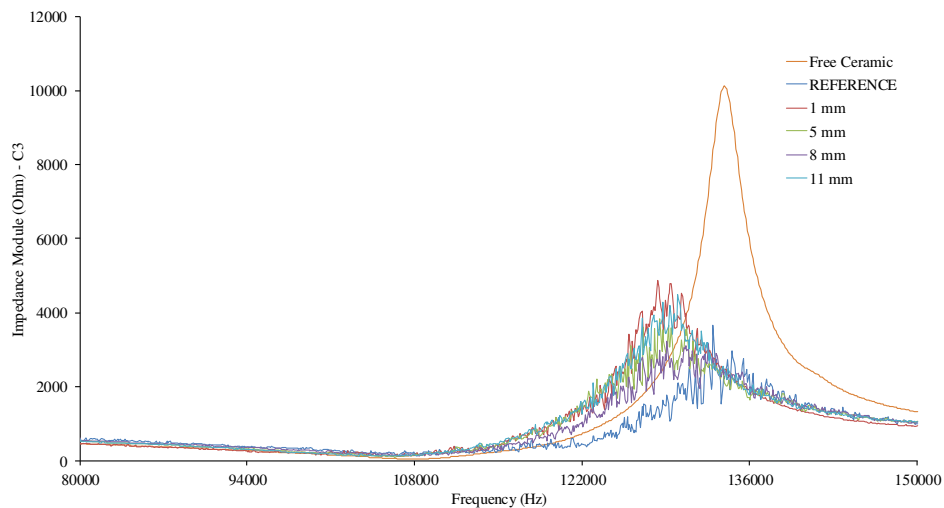
Figura 17 - Curvas ampliadas dos módulos das impedâncias em função da frequência para as cerâmicas piezoelétricas circulares APC 855 de 19,05 mm de diâmetro e 3 mm de espessura acopladas nas posições C1 (a), C2 (b) e C3 (c) da amostra (placa de alumínio) de referência e das que apresentam furos simulando falhas de 1 mm, 5 mm, 8 mm e 11 mm para as faixas de frequências de ressonância e antirressonâncias nos modos de vibração radial (faixa de 80 kHz a 150 kHz).



(a)



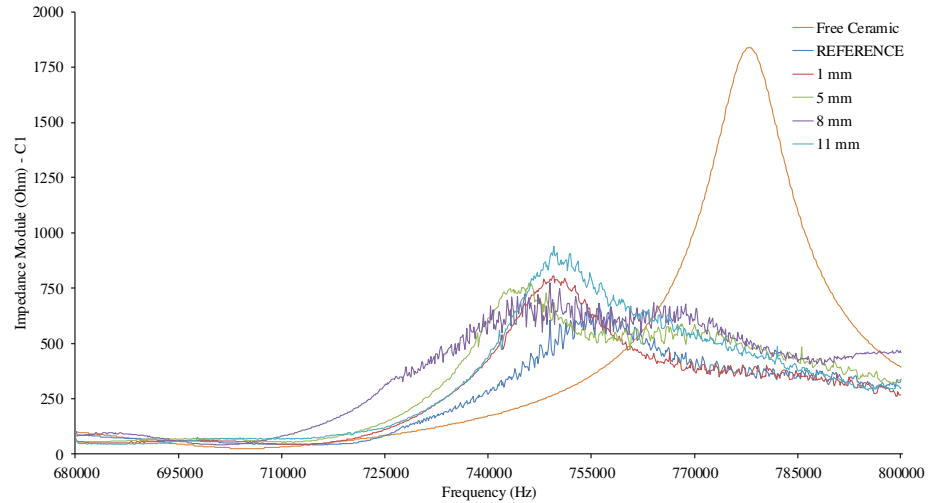
(b)



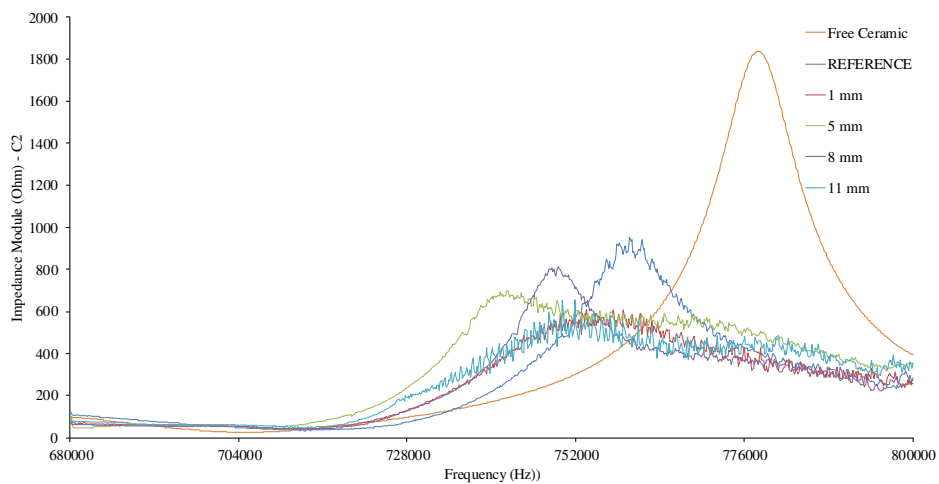
(c)

Fonte: Autoria própria.

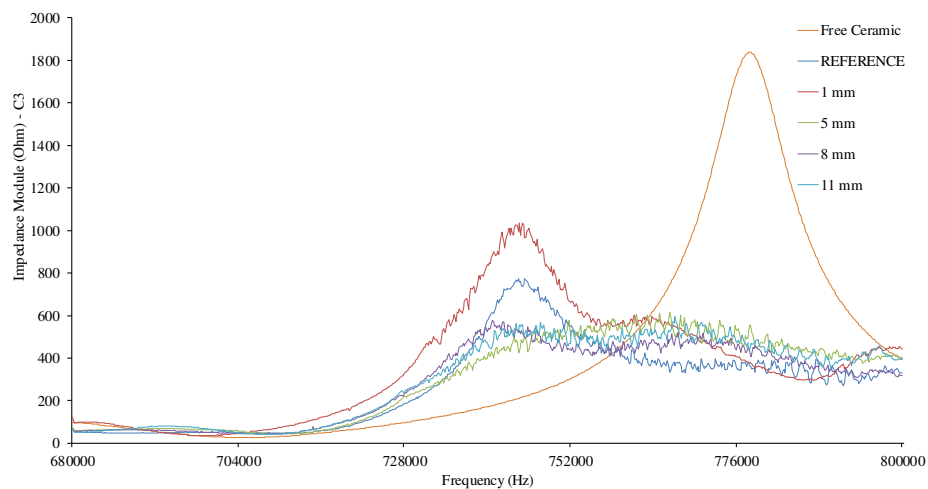
Figura 18 - Curvas ampliadas dos módulos das impedâncias em função da frequência para as cerâmicas piezoelétricas circulares APC 855 de 19,05 mm de diâmetro e 3 mm de espessura acopladas nas posições C1 (a), C2 (b) e C3 (c) da amostra (placa de alumínio) de referência e das que apresentam furos simulando falhas de 1 mm, 5 mm, 8 mm e 11 mm para as faixas de frequências de ressonância e antirressonâncias nos modos de vibração espessura (faixa de 680 kHz a 800 kHz).



(a)



(b)

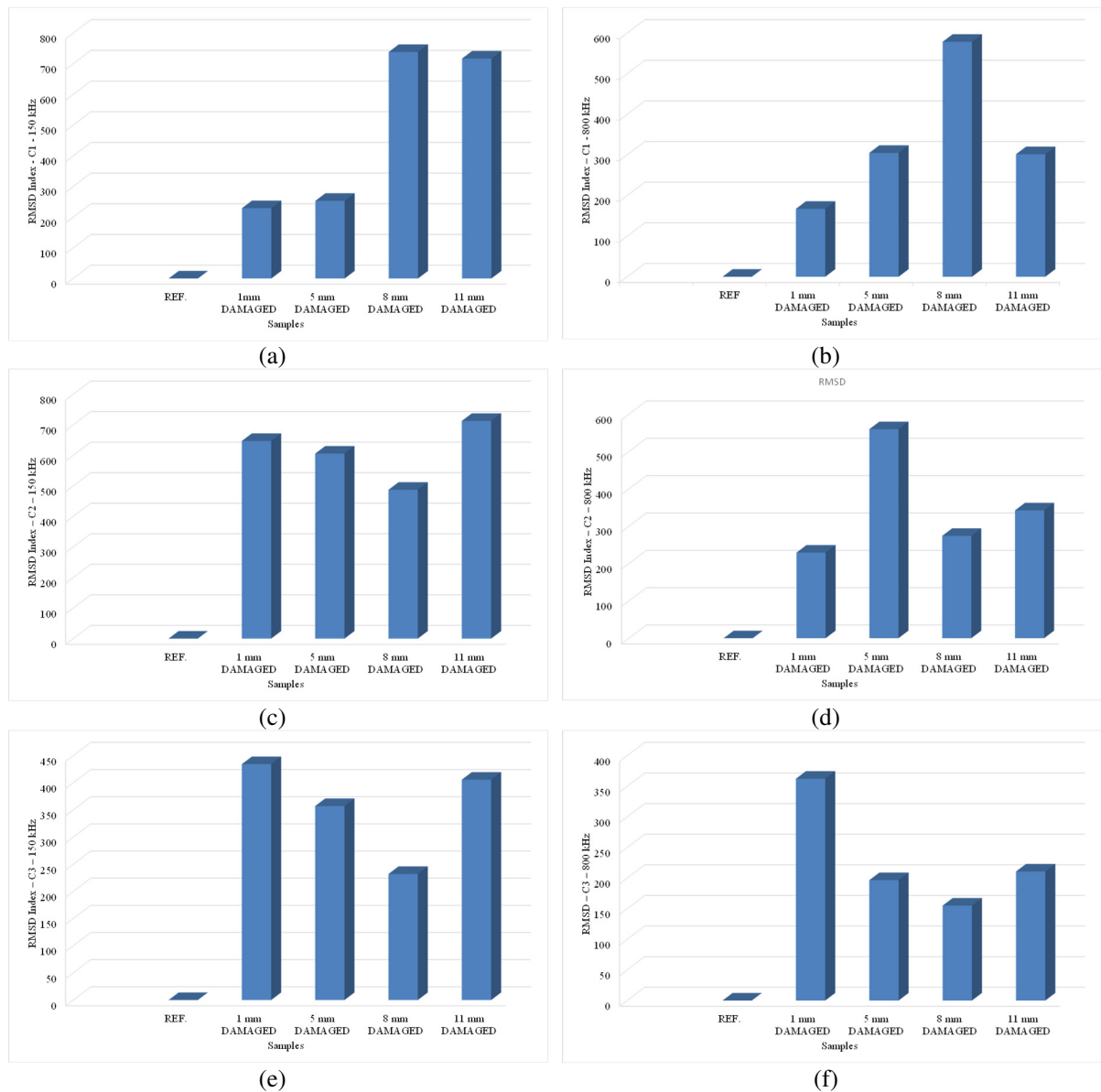


(c)

Fonte: Autoria própria.

Os índices RMSD calculados através da comparação das curvas dos módulos das impedâncias elétricas das cerâmicas acopladas às amostras (placas de alumínio) com falhas em relação à amostra de referência para as faixas ampliadas de frequências nos modos de vibração radial (faixa de 80 kHz a 150 kHz – Figura 17(a, c, e)) e para os modos de vibração espessura (faixa de 680 kHz a 800 kHz – Figura 18(b, d, f)) são apresentados nas Figuras 19(a, c, e) e 19(b, d, f), respectivamente.

Figura 19 - Índices RMSD para as faixas ampliadas de frequências dos módulos das impedâncias em função da frequência para as cerâmicas piezoelétricas circulares APC 855 de 19,05 mm de diâmetro e 3 mm de espessura acopladas nas posições C1 (a, b), C2 (c, d) e C3 da amostra de referência (REF) e das que apresentam furos simulando falhas de 1 mm, 5 mm, 8 mm e 11 mm nos modos de vibração radial (a, c, e) (80 kHz a 150 kHz) e espessura (b, d, f) (680 kHz a 800 kHz).



Fonte: Autoria própria.

4.5 RESULTADOS PARA A ANÁLISE DA ATENUAÇÃO DA AMPLITUDE DAS ONDAS ULTRASSÔNICAS GERADAS E RECEBIDAS PELAS CERÂMICAS PIEZOELÉTRICAS QUADRADAS ACOPLADAS AO TERCEIRO CONJUNTO DE AMOSTRAS (BARRAS DE ALUMÍNIO)

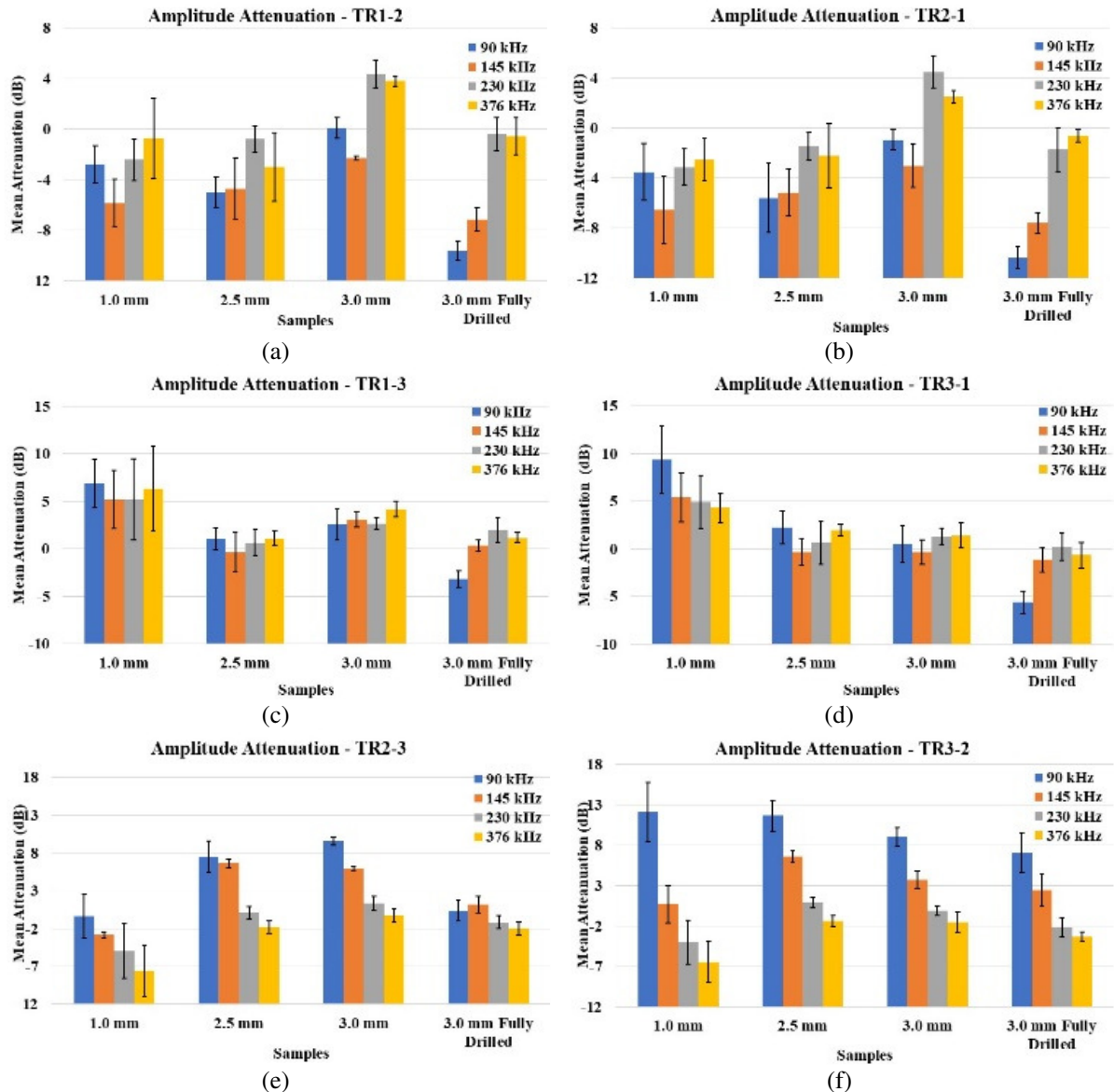
A Figura 20 apresenta os resultados para a atenuação da amplitude, quando comparadas as amostras com falhas (1 mm, 2,5 mm e 3 mm com 10 mm de profundidade e de 3 mm totalmente vazadas) à amostra de referência, para os testes realizados utilizando-se o método transmissão-recepção e as cerâmicas acopladas nas posições P1, P2 e P3 (ver Figura 5(b)). Neste caso, os testes foram feitos para quatro frequências de 90 kHz, 145 kHz, 230 kHz e 376 kHz, sendo que a Figura 20(a) apresenta os resultados para a cerâmica transmissora na posição P1 e a receptora na posição P2 (TR1-2). Na Figura 20(b) a transmissão é feita pela cerâmica da posição P2 e recepção pela cerâmica P1 (TR2-1) e, assim, sucessivamente para todas as combinações transmissão-recepção.

4.6 RESULTADOS PARA A ANÁLISE DA ATENUAÇÃO DA AMPLITUDE DAS ONDAS ULTRASSÔNICAS GERADAS E RECEBIDAS PELAS CERÂMICAS PIEZOELÉTRICAS CIRCULARES ACOPLADAS AO QUINTO CONJUNTO DE AMOSTRAS (PLACAS DE ALUMÍNIO)

A Figura 21 apresenta os resultados para a atenuação da amplitude, quando comparadas as amostras (placas de alumínio) com falhas (1 mm, 5 mm, 8 mm e 11 mm) à amostra de referência. Os testes foram realizados utilizando-se o método transmissão-recepção e as cerâmicas acopladas nas posições C1, C2 e C3 (ver Figura 5(c)) e excitadas utilizando-se a frequência de 104 kHz. A Figura 21(a) apresenta os resultados para a cerâmica transmissora na posição C1 e a receptora na posição C2 (TR1-2). Na Figura 21(b) a transmissão é feita pela cerâmica da posição C2 e recepção pela cerâmica C1 (TR2-1) e, assim, sucessivamente para todas as combinações transmissão-recepção. Devido ao tamanho das placas de alumínio (500 mm × 500 mm × 4 mm), foi feita a aquisição dos sinais em uma janela de tempo entre 100 µs e 200 µs de forma a permitir que as ondas se propagassem por toda a amostra antes de serem captadas pela cerâmica receptora. Considerando a velocidade de propagação no alumínio de 6420 m/s (KINO, 1987; ROSSING, 2007) o tempo de 200 µs é suficiente para que as ondas se propaguem por uma distância de aproximadamente 1284 mm, sendo que a maior distância de ida e volta entre uma das cerâmicas e o canto das placas de alumínio é de 1250 mm. O tempo

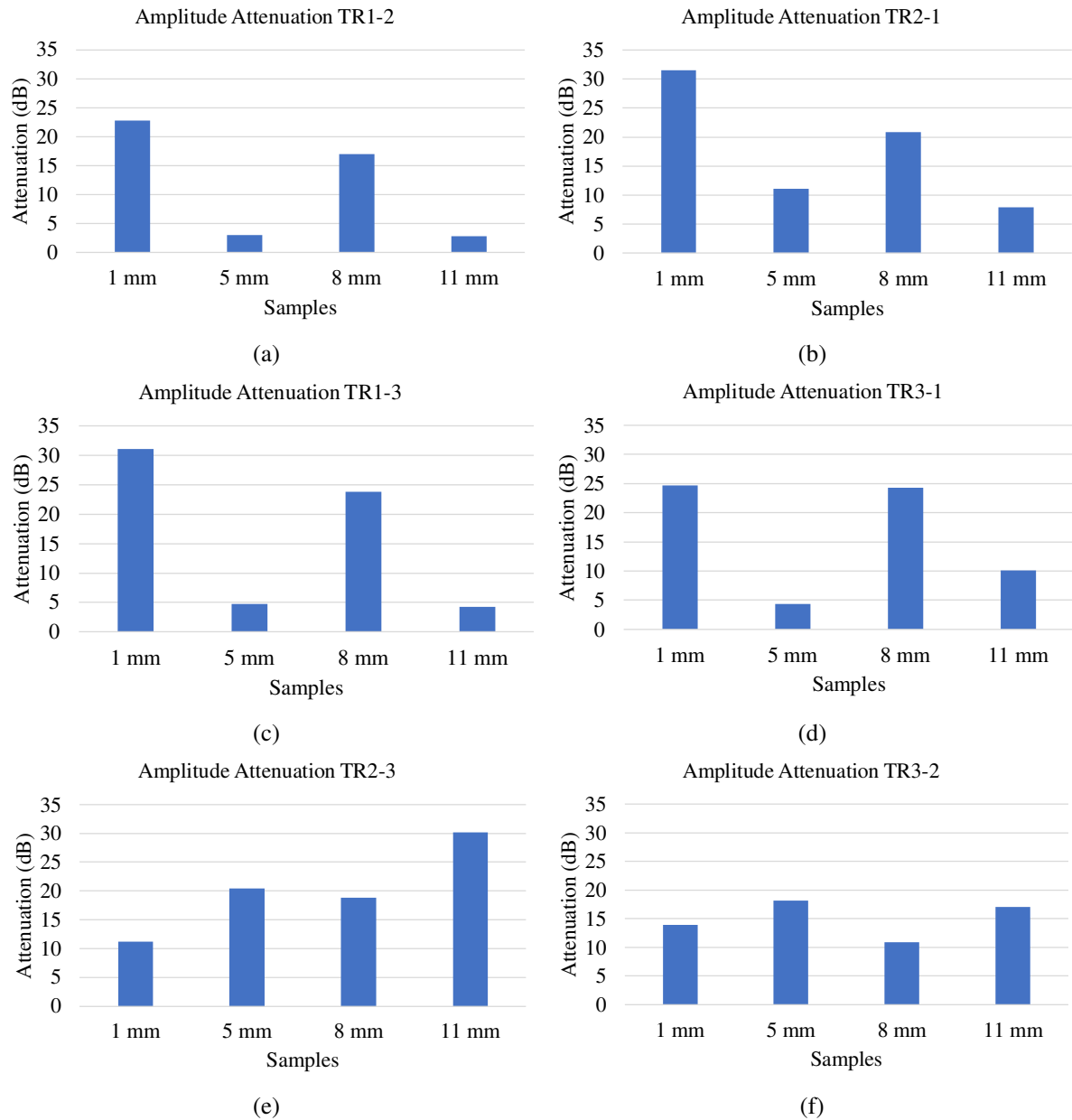
mínimo de 100 μ s é suficiente para que as ondas se propaguem da cerâmica transmissora até a falha mais distante e retornar até uma das receptoras.

Figura 20 - Atenuação da amplitude para as amostras com falhas de 1 mm, 2,5 mm, 3 mm e 10 mm de profundidade e de 3 mm totalmente vazadas em comparação à amostra de referência para as cerâmicas quadradas de 12,7 mm \times 12,7 mm \times 0,52 mm acopladas nas posições P1, P2 e P3 (ver Figura 5(b)) utilizando-se as frequências de 90 kHz, 145 kHz, 230 kHz e 376 kHz: (a) Transmissão em P1 e recepção em P2 (TR1-2); (b) Transmissão em P2 e recepção em P1 (TR2-1); (c) Transmissão em P1 e recepção em P3 (TR1-3); (d) Transmissão em P3 e recepção em P1 (TR3-1); (e) Transmissão em P2 e recepção em P3 (TR2-3); (f) Transmissão em P3 e recepção em P2 (TR3-2).



Fonte: Autoria própria.

Figura 21 - Atenuação da amplitude em uma janela de tempo entre 100 μ s e 200 μ s para as amostras com falhas de 1 mm, 5 mm, 8 mm e 11 mm em comparação à amostra de referência para as cerâmicas circulares de 19,05 mm de diâmetro e 3 mm de espessura acopladas nas posições C1, C2 e C3 (ver Figura 5(c)) utilizando-se a frequência de 104 kHz: (a) Transmissão em C1 e recepção em C2 (TR1-2); (b) Transmissão em C2 e recepção em C1 (TR2-1); (c) Transmissão em C1 e recepção em C3 (TR1-3); (d) Transmissão em C3 e recepção em C1 (TR3-1); (e) Transmissão em C2 e recepção em C3 (TR2-3); (f) Transmissão em C3 e recepção em C2 (TR3-2).



Fonte: Autoria própria.

4.7 RESULTADOS PARA A ANÁLISE DA ATENUAÇÃO EM BANDA LARGA DAS ONDAS ULTRASSÔNICAS GERADAS E RECEBIDAS PELOS TRANSDUTORES ACOPLADOS AO QUARTO CONJUNTO DE AMOSTRAS

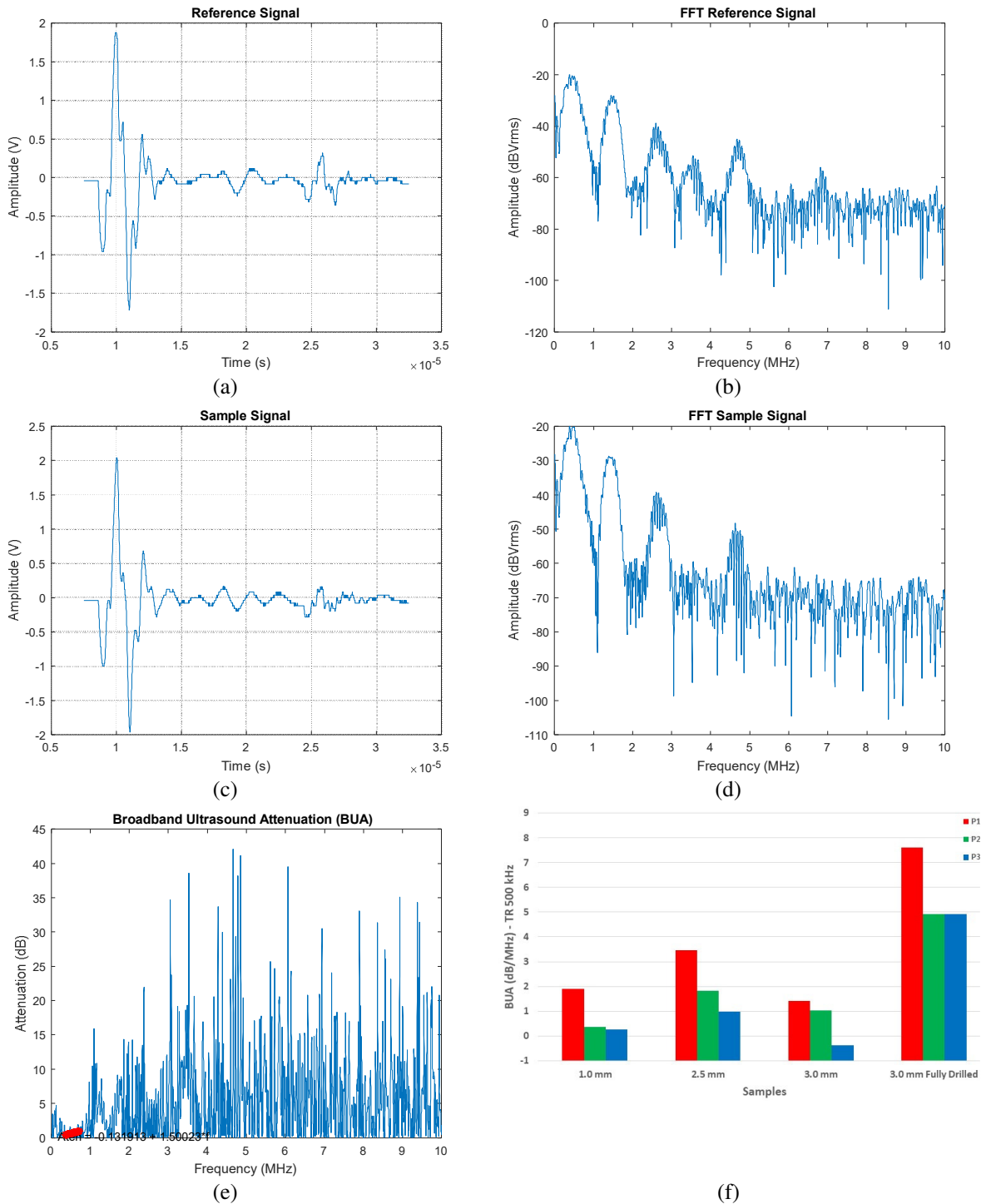
A Figura 22 apresenta os resultados dos testes de atenuação em banda larga para os transdutores de 500 kHz, de 19 mm de diâmetro, operando no modo transmissão-recepção, acoplados ao quarto conjunto formado por cinco amostras, sendo uma de referência e as demais com furos simulando falhas de diâmetros de 1 mm, 2,5 mm e 3 mm com profundidade de 10 mm e de 3 mm totalmente vazadas. A Figura 22(a) mostra a amplitude do sinal no domínio do tempo obtida ao posicionar o transdutor transmissor e o transdutor receptor na lateral da amostra de referência (na posição da primeira falha mostrada nas amostras apresentadas na Figura 5(b)). A Figura 22(b) apresenta o espectro da amplitude no domínio da frequência após a aplicação da FFT no sinal recebido pelo transdutor. O sinal que se propagou através da amostra com falhas de 3 mm de diâmetro e profundidade de 10 mm e sua FFT são apresentados na Figura 22(c) e 22(d), respectivamente. A Figura 22(e) apresenta o resultado de BUA, obtido após o cálculo efetuado através das Equações 29 e 30 (exemplificados na Figura 4), para os sinais anteriores. A Figura 22(f) apresenta o resumo dos resultados de BUA obtidos para todas as amostras com os transdutores acoplados nas posições P1, P2 e P3, sendo que o transdutor transmissor foi colocado de um lado da amostra e o receptor no lado oposto, e a falha ao meio.

Os resultados de BUA para o par de transdutores de 5 MHz operando no modo transmissão-recepção são apresentados na Figura 23, onde os sinais apresentados na Figura 23(a) foram obtidos na posição P1 para a amostra de referência e na Figura 23(c) para a amostra com falhas de 3 mm totalmente vazadas.

Os resultados dos testes para os transdutores de 500 kHz e 5 MHz operando no modo pulso-eco são apresentados nas Figuras 24 e 25, respectivamente.

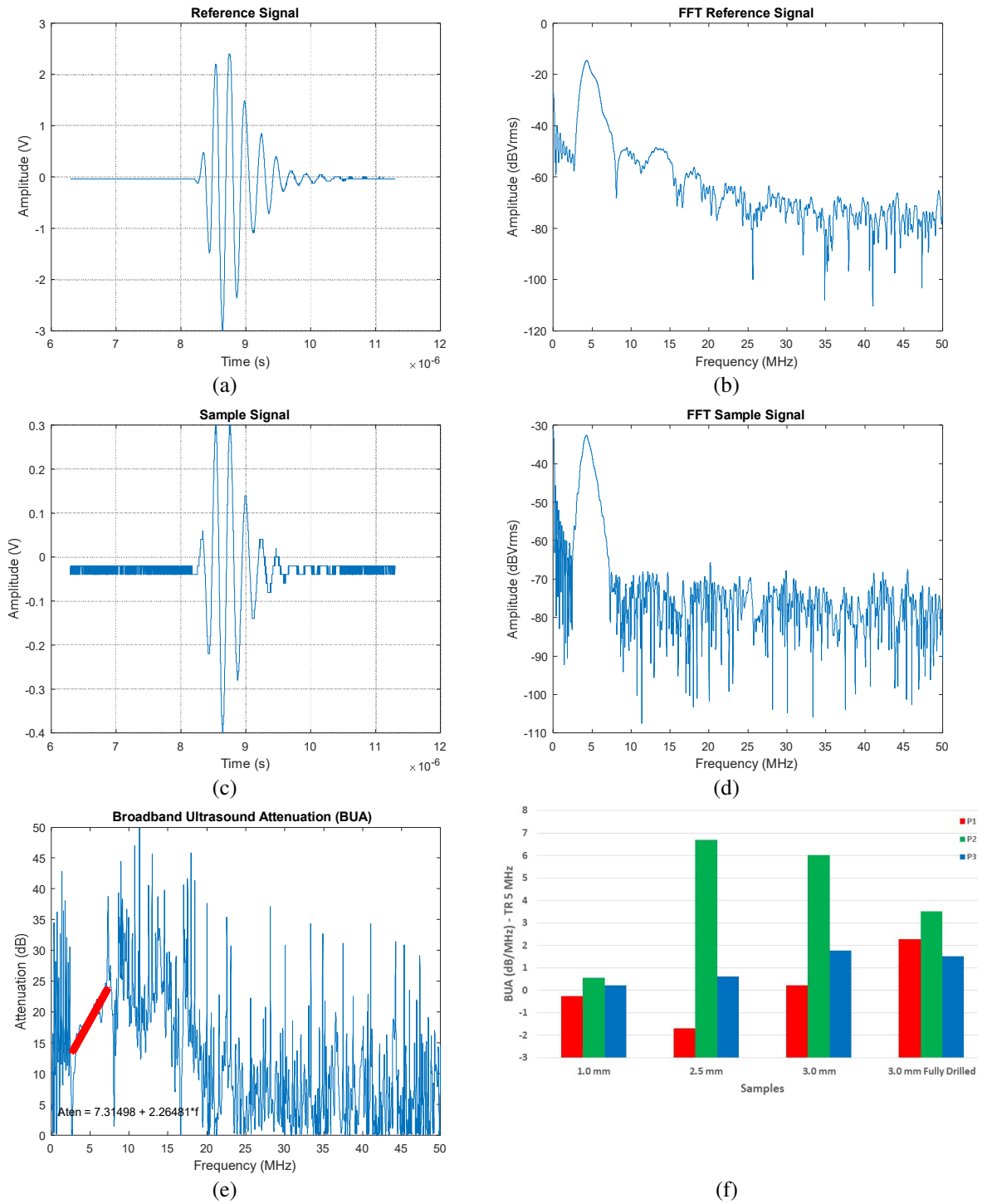
Os resultados para o transdutor de 500 kHz foram obtidos na posição P2 da amostra de referência (Figura 24(a)) e da amostra com falhas de 3 mm de diâmetros e profundidades de 10 mm (Figura 24(c)). As FFTs dos sinais que se propagaram através da amostra de referência e das com falhas são apresentadas nas Figuras 24(b) e 24(d), respectivamente. O resultado de BUA para esses sinais é apresentado na Figura 24(e) e o resumo para todas as amostras é apresentado na Figura 24(f).

Figura 22 - Resultados dos testes de BUA para o par de transdutores de 500 kHz operando no modo transmissão-recepção. (a) Sinal de referência no domínio do tempo obtido na posição P1 (ver Figura 5) da amostra de referência; (b) FFT do sinal de referência; (c) Sinal que se propagou na amostra com falhas de 3 mm de diâmetros e 10 mm de profundidades; (d) FFT do sinal que se propagou na amostra; (e) BUA para o sinal que se propagou na amostra com falhas em relação à amostra de referência; (f) Resultados de BUA obtidos para todas as amostras com os transdutores acoplados nas posições P1, P2 e P3.



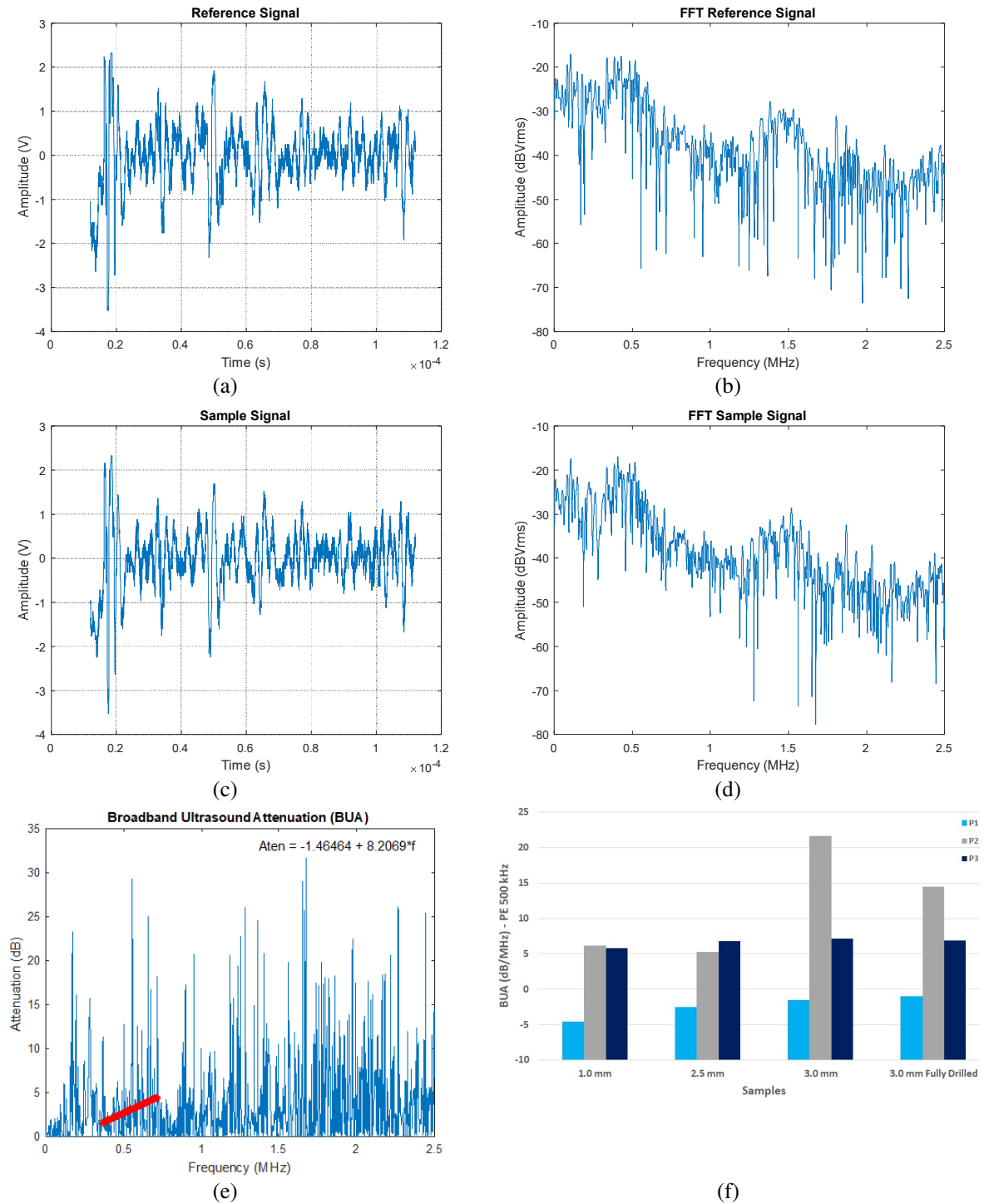
Fonte: Autoria própria.

Figura 23 - Resultados dos testes de BUA para o par de transdutores de 5 MHz operando no modo transmissão-recepção. (a) Sinal de referência no domínio do tempo obtido na posição P1 (ver Figura 5) da amostra de referência; (b) FFT do sinal de referência; (c) Sinal que se propagou na amostra com falhas de 3 mm totalmente vazadas; (d) FFT do sinal que se propagou na amostra; (e) BUA para o sinal que se propagou na amostra com falhas em relação à amostra de referência; (f) Resultados de BUA obtidos para todas as amostras com os transdutores acoplados nas posições P1, P2 e P3.



Fonte: Autoria própria.

Figura 24 - Resultados dos testes de BUA para o transdutor de 500 kHz operando no modo pulso-eco. (a) Sinal de referência no domínio do tempo obtido na posição P2 (ver Figura 5) da amostra de referência; (b) FFT do sinal de referência; (c) Sinal que se propagou na amostra com falhas de 3 mm de diâmetro e 10 mm de profundidade; (d) FFT do sinal que se propagou na amostra; (e) BUA para o sinal que se propagou na amostra com falhas em relação à amostra de referência; (f) Resultados de BUA obtidos para todas as amostras com os transdutores acoplados nas posições P1, P2 e P3.

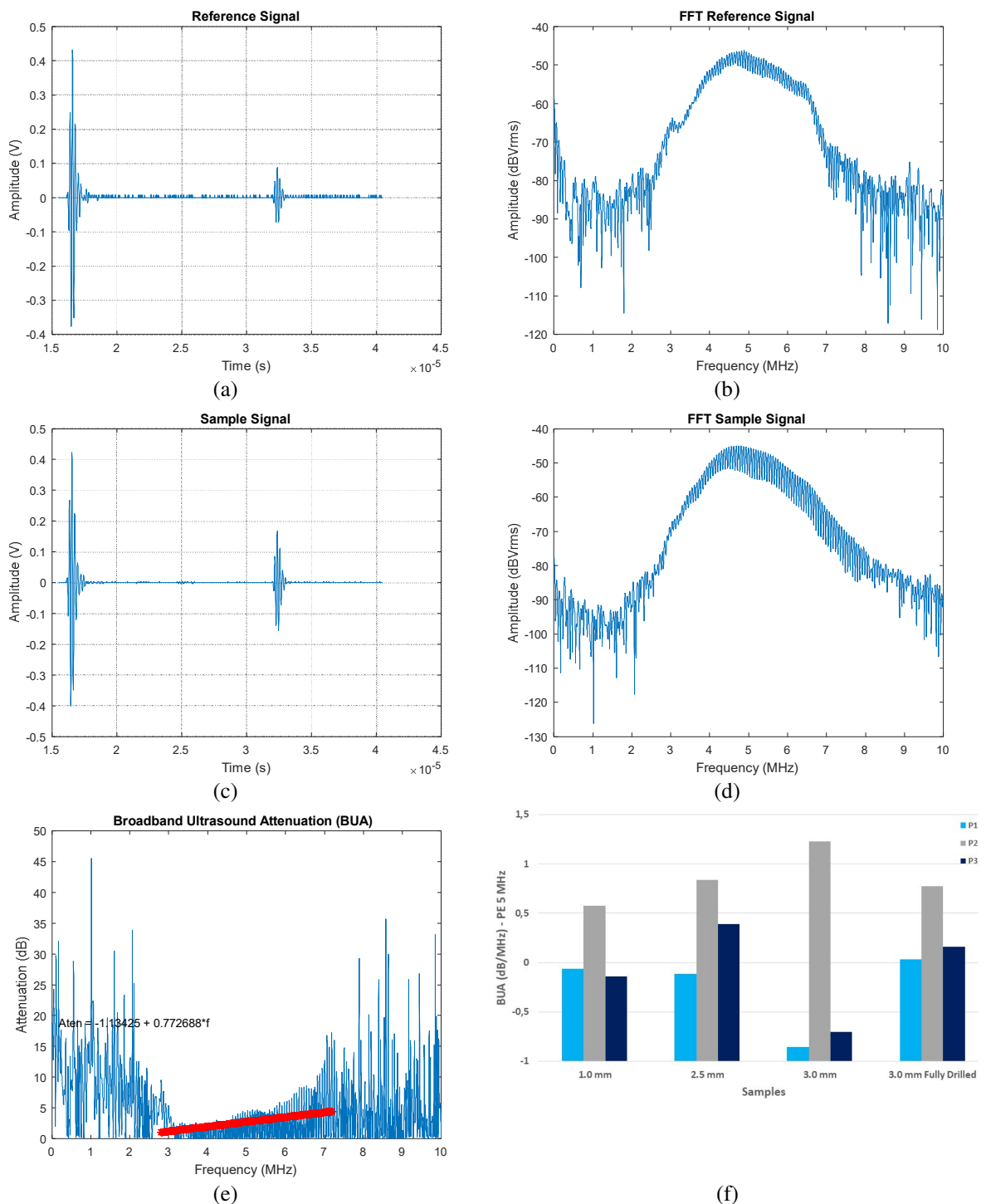


Fonte: Autoria própria.

Os resultados para o transdutor de 5 MHz foram obtidos nas posições P2 da amostra de referência (Figura 25(a)) e da amostra com falhas de 3 mm totalmente vazadas (Figura 25(c)). As FFTs dos sinais que se propagaram através da amostra de referência e das com falhas são

apresentadas nas Figuras 25(b) e 25(d), respectivamente. O resultado de BUA para esses sinais é apresentado na Figura 25(e) e a Figura 25(f) apresenta os resultados dos testes realizados em todas as amostras nas posições P1, P2 e P3.

Figura 25 - Resultados dos testes de BUA para o transdutor de 5 MHz operando no modo pulso-eco. (a) Sinal de referência no domínio do tempo obtido na posição P2 (ver Figura 5(b)) da amostra de referência; (b) FFT do sinal de referência; (c) Sinal que se propagou na amostra com falhas de 3 mm totalmente vazadas; (d) FFT do sinal que se propagou na amostra; (e) BUA para o sinal que se propagou na amostra com falhas em relação à amostra de referência; (f) Resultados de BUA obtidos para todas as amostras com o transdutor acoplado nas posições P1, P2 e P3.



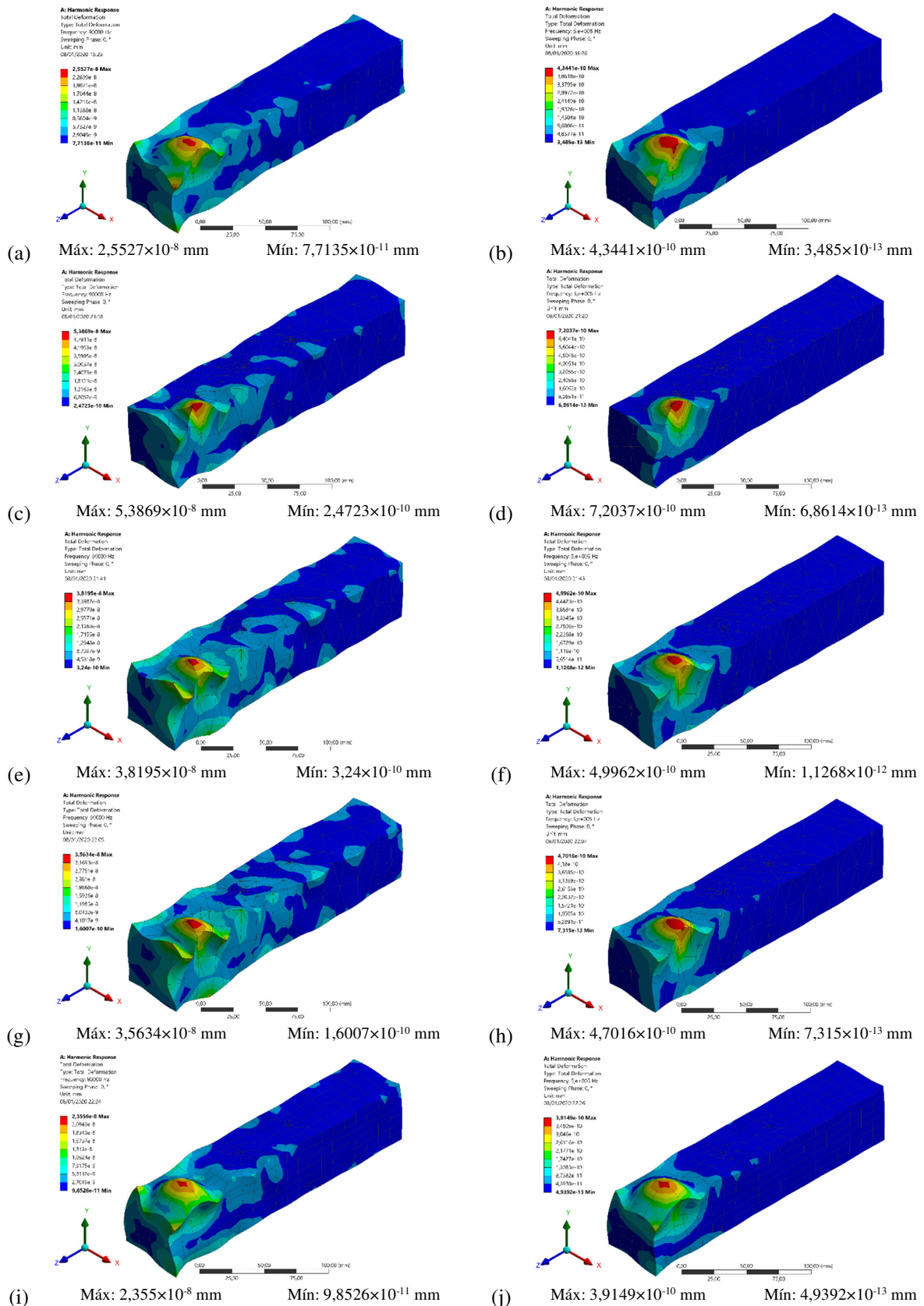
Fonte: Autoria própria.

4.8 RESULTADOS PARA AS SIMULAÇÕES REALIZADAS UTILIZANDO-SE O MÉTODO DE ANÁLISE DE ELEMENTOS FINITOS

A Figura 26 mostra as respostas harmônicas (deformações) obtidas utilizando-se a análise de elementos finitos realizada no *software* ANSYS para estímulos de 0,1 N com frequências de 90 kHz Figura 26(a, c, e, g, i) e 500 kHz Figura 26(b, d, f, h, j) aplicadas na posição P1 (ver Figura 5(b)) da barra de alumínio de referência Figura 26(a, b) e das barras perfuradas (três furos) para simular defeitos de 10 mm de profundidade e diâmetros de 1 mm Figura 26(c, d), 2,5 mm Figura 26(e, f) e 3 mm Figura 26(g, h) e perfuradas completamente com uma broca de 3 mm Figura 26(i, j). As Figuras 27 e 28 apresentam as respostas para os mesmos estímulos realizados nas posições P2 e P3 da estrutura de referência e das com falhas. Os valores máximos (Máx) e mínimos (Mín) das deformações, conforme a escala de cores do ANSYS, são apresentados na parte inferior de cada uma das figuras (Max. = vermelho, Mín. = azul escuro).

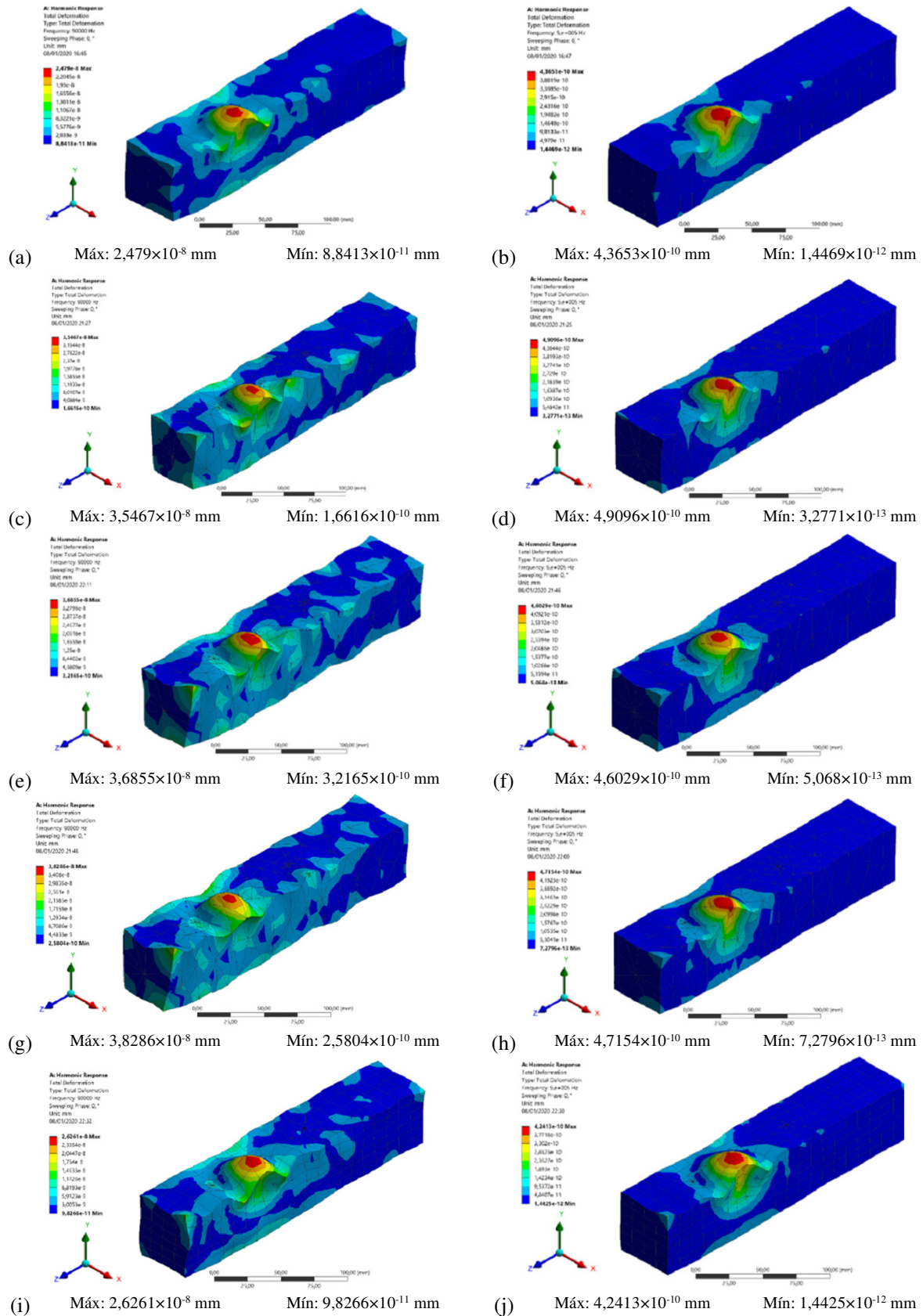
A Figura 29 apresenta as respostas harmônicas utilizando-se a análise de elementos finitos no *software* ANSYS para estímulos de 0,1 N com frequência de 104 kHz aplicados na posição C1 da placa de alumínio (ver Figuras 5(c) e 5(d)) de referência (Figura 29(a)) e das amostras com falhas (três furos) de 1 mm (Figura 29(b)), 5 mm (Figura 29(c)), 8 mm (Figura 29(d)) e 11 mm (Figura 29(e)). As Figuras 30 e 31 apresentam as respostas para os mesmos estímulos aplicados nas posições C2 e C3 da amostra de referência e das que apresentam falhas.

Figura 26 - Respostas harmônicas usando análise de elementos finitos para um estímulo de 0,1 N com frequências de 90 kHz (a, c, e, g, i) e 500 kHz (b, d, f, h, j) aplicadas na posição P1 (ver Figura 5(b)) da amostra de referência (a, b) e nas perfuradas para simular defeitos de 10 mm de profundidade e diâmetros de 1 mm (c, d), 2,5 mm (e, f) e 3 mm (g, h) e perfurados totalmente com uma broca de 3 mm (i, j).



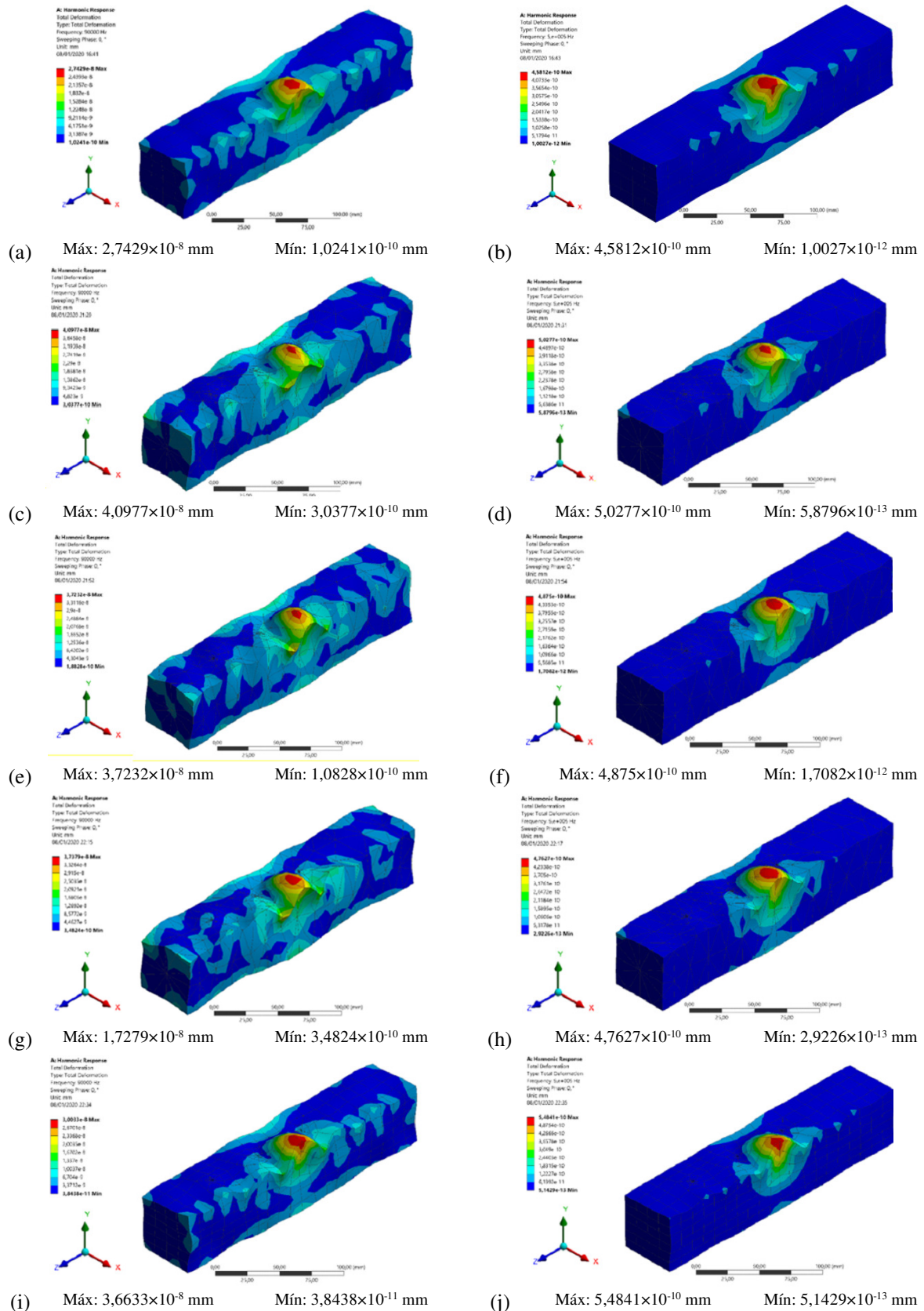
Fonte: Autoria própria.

Figura 27 - Respostas harmônicas usando análise de elementos finitos para um estímulo de 0,1 N com frequências de 90 kHz (a, c, e, g, i) e 500 kHz (b, d, f, h, j) aplicadas na posição P2 (ver Figura 5(b)) da amostra de referência (a, b) e nas perfuradas para simular defeitos de 10 mm de profundidade e diâmetros de 1 mm (c, d), 2,5 mm (e, f) e 3 mm (g, h) e perfurados totalmente com uma broca de 3 mm (i, j).



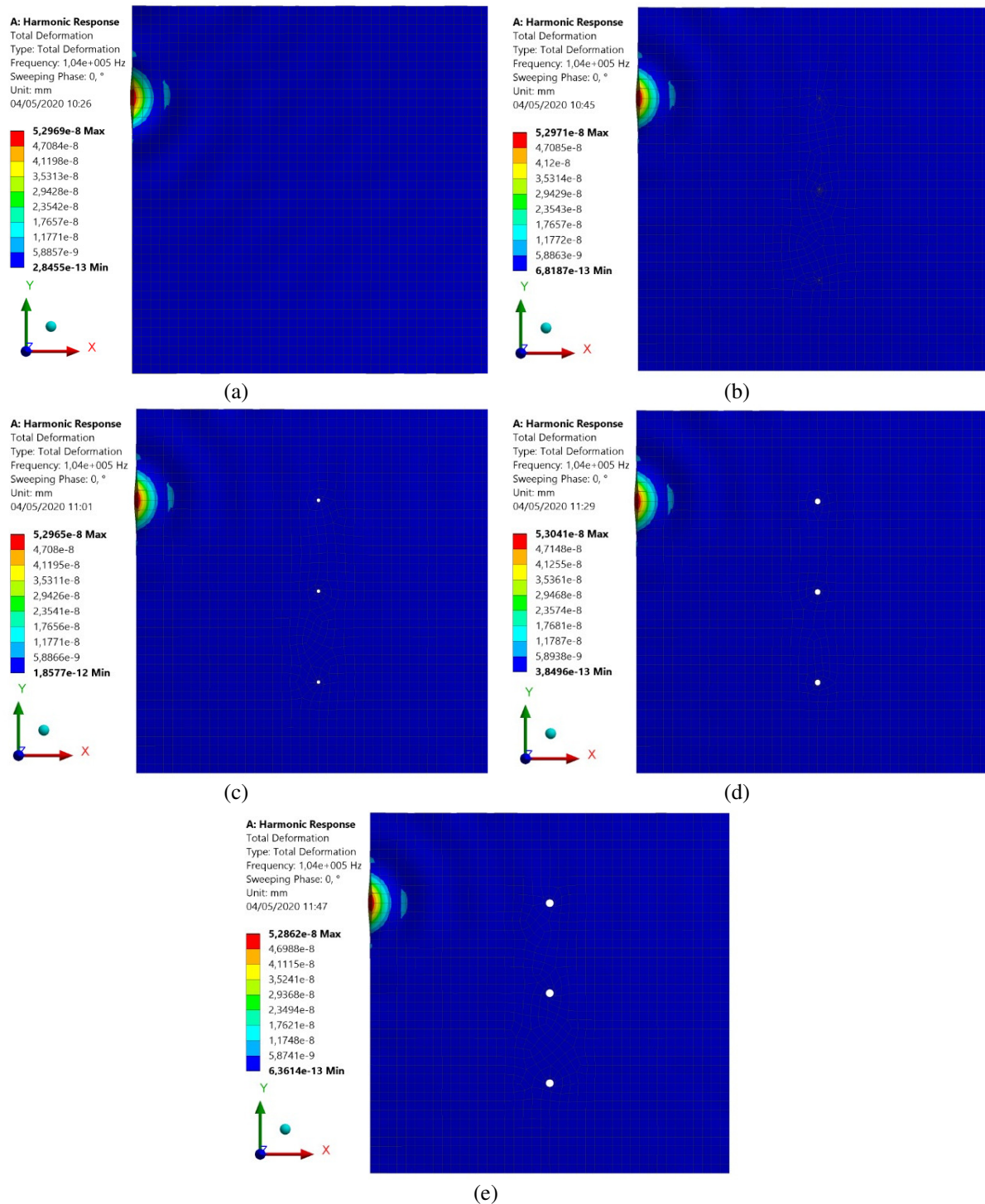
Fonte: Autoria própria.

Figura 28 - Respostas harmônicas usando análise de elementos finitos para um estímulo de 0,1 N com frequências de 90 kHz (a, c, e, g, i) e 500 kHz (b, d, f, h, j) aplicadas na posição P3 (ver Figura 5(b)) da amostra de referência (a, b) e nas perfuradas para simular defeitos de 10 mm de profundidade e diâmetros de 1 mm (c, d), 2,5 mm (e, f) e 3 mm (g, h) e perfurados totalmente com uma broca de 3 mm (i, j).



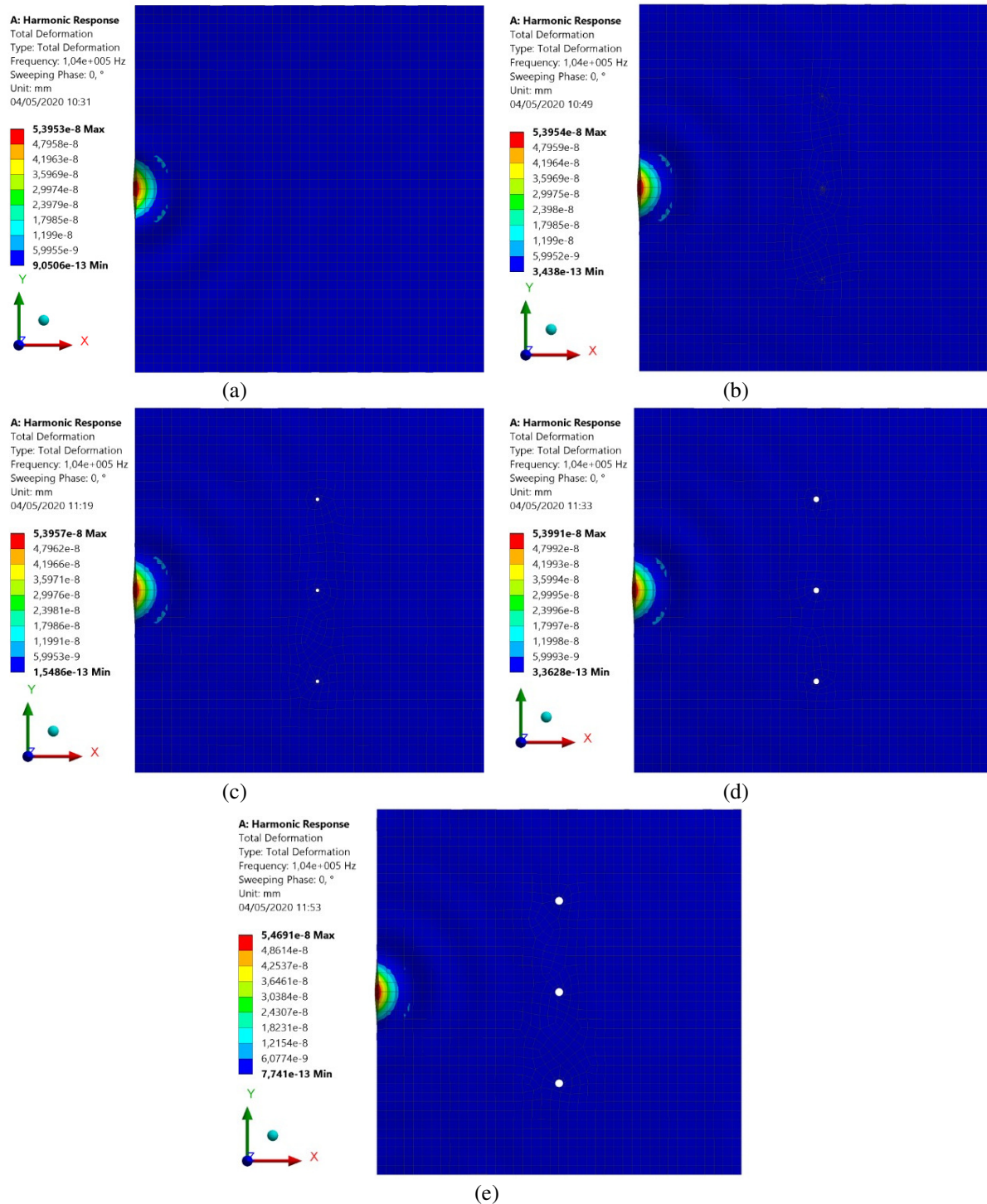
Fonte: Autoria própria.

Figura 29 - Respostas harmônicas usando análise de elementos finitos para um estímulo de 0,1 N com frequência de 104 kHz aplicado nas posições C1 (ver Figuras 5(c) e 5(d)) da amostra de referência (a) e nas perfuradas para simular defeitos com diâmetros de 1 mm (b), 5 mm (c), 8 mm (d) e 11 mm (e).



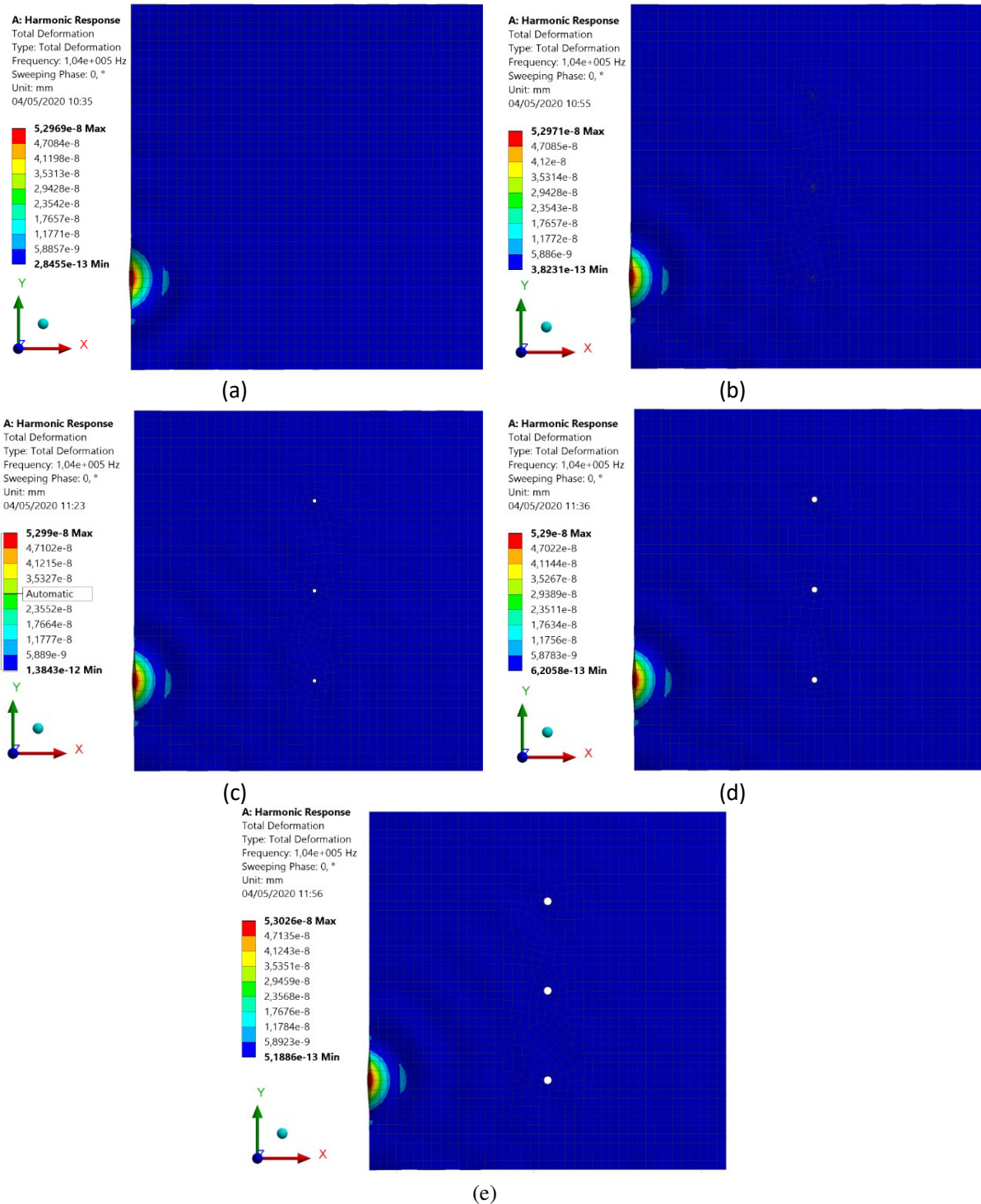
(e)
Fonte: Autoria própria.

Figura 30 - Respostas harmônicas usando análise de elementos finitos para um estímulo de 0,1 N com frequência de 104 kHz aplicado nas posições C2 (ver Figuras 5(c) e 5(d)) da amostra de referência (a) e nas perfuradas para simular defeitos com diâmetros de 1 mm (b), 5 mm (c), 8 mm (d) e 11 mm (e).



Fonte: Autoria própria.

Figura 31 - Respostas harmônicas usando análise de elementos finitos para um estímulo de 0,1 N com frequência de 104 kHz aplicado nas posições C3 (ver Figuras 5(c) e 5(d)) da amostra de referência (a) e nas perfuradas para simular defeitos com diâmetros de 1 mm (b), 5 mm (c), 8 mm (d) e 11 mm (e).



(e)
 Fonte: Autoria própria.

5 DISCUSSÃO E CONCLUSÕES

Neste capítulo são discutidos os resultados relacionados às técnicas utilizadas para a detecção das falhas nas amostras de alumínio por meio das técnicas utilizadas. Também são apresentadas as conclusões do trabalho.

5.1 DISCUSSÃO

Na primeira fase deste trabalho foi possível avaliar a eficiência da técnica de medição da impedância elétrica, juntamente com o cálculo do índice RMSD para a caracterização de estruturas de alumínio com a presença de falhas de diferentes tamanhos. Os resultados deste trabalho estão de acordo com os obtidos por outros autores (PARK et al., 2003; PARK et al., 2006), que avaliaram outros tipos de materiais e observaram que a impedância elétrica é um método adequado para identificar falhas em estruturas como as amostras de alumínio, material amplamente utilizado em áreas como a construção de aviões, nas empresas navais e na engenharia biomédica.

Analisando-se os resultados, é possível verificar que alguns parâmetros experimentais apresentam erros percentuais relativamente altos (acima de 40 %) em relação aos valores teóricos ou fornecidos pelo fabricante das cerâmicas piezoelétricas APC 855 utilizadas neste trabalho. A Tabela 4 apresenta os valores experimentais obtidos a partir das curvas de módulo e ângulo de fase da impedância das cerâmicas utilizadas, Figura 8(a), e pode-se verificar que os fatores de acoplamento nos modos espessura e lateral apresentam erros de -7,84 % e 40,00 %, respectivamente, em relação aos valores fornecidos pelo fabricante (APC, 2019). Como o cálculo de outros parâmetros teóricos/experimentais dependem destes valores, como por exemplo as frequências de antirressonância, cálculos de velocidade e os módulos das impedâncias, os erros percentuais podem ser elevados para alguns destes parâmetros. No caso da capacitância grampeada, que apresentou o maior erro percentual (-141,34 %), este é devido ao valor da permissividade da cerâmica transdutora acoplada no modo de espessura utilizado nos cálculos, que é equivalente ao da Navy VI e PZT 5H (APC, 2019).

O próprio fabricante das cerâmicas indica que os valores fornecidos são apenas para os propósitos de referência e que podem variar de acordo com as dimensões, formatos e acabamento das superfícies, entre outros parâmetros. Além disso, alguns parâmetros podem ter sido alterados em função do tempo e da quantidade de solda utilizada na conexão dos fios para a realização das medições, assim como na quantidade de cola utilizada para fixar as cerâmicas

nas amostras, entre outros fatores. Em relação à diferença entre a frequência central medida para os transdutores e os valores indicados pelos fabricantes, explica-se pela dificuldade em reproduzir o processo de fabricação desses transdutores, podendo apresentar frequências centrais ligeiramente diferentes. No entanto, estes fatos não invalidam a metodologia aplicada neste trabalho, pois todas as análises foram realizadas em função dos valores experimentais obtidos utilizando-se equipamentos de elevada precisão e exatidão, entre eles o analisador de impedância e o osciloscópio digital.

Nas Figuras 14(a, c, e) e 15(a, c, e) ficam evidentes as alterações das curvas dos módulos das impedâncias elétricas, dos ângulos de fase e das frequências de ressonância e antirressonância para as cerâmicas coladas às amostras (barras de alumínio) com falhas de profundidade 10 mm e diâmetros de 1 mm, 2,5 mm, 3 mm e de 3 mm totalmente vazadas nas posições P1, P2 e P3 (ver Figura 5(b)) quando comparadas às cerâmicas fixadas na estrutura íntegra, utilizada como referência. Os testes de impedância foram realizados em dois intervalos de frequências (40 kHz - 500 kHz e 3,5 MHz - 5 MHz) que englobam todas as faixas de frequências utilizadas nos testes de atenuação das ondas ultrassônicas (90 kHz, 145 kHz, 230 kHz, 376 kHz, e de 3,5 MHz a 5 MHz). Analisando-se os resultados apresentados na Figura 16(a, c, e) para a faixa de frequências entre 80 kHz a 880 kHz e nas Figuras 17 e 18 (faixa de frequências ampliadas de 80 kHz a 150 kHz e de 680 kHz a 800 kHz, respectivamente), também ficam evidentes as alterações nos módulos das impedâncias elétricas em função da frequência para as cerâmicas circulares de 19,05 mm de diâmetro e 3 mm de espessura acopladas à placa de alumínio de referência e às amostras nas quais foram inseridas falhas (furos totalmente vazados) com diâmetros de 1 mm, 5 mm, 8 mm e 11 mm, nas posições C1, C2 e C3 (ver Figura 5(c) e 5(d)).

Os índices RMSD obtidos através da comparação das curvas de impedância das cerâmicas acopladas às amostras com falhas em relação à amostra de referência são apresentados nas Figuras 15(b, d, f) para as barras de alumínio e nas Figuras 16(b, d, f) e Figura 19 para as placas de alumínio. Analisando-se os resultados, é possível indicar que, em todos os tipos de falhas, houve diferença da impedância elétrica em relação à amostra de referência, indicando que a técnica pode ser empregada para detectar falhas em estruturas de alumínio (DA COSTA et al., 2014).

Todavia, neste trabalho, utilizando-se as cerâmicas quadradas acopladas às barras de alumínio com falhas de menores dimensões (1 mm a 3 mm) pertencentes ao terceiro conjunto

ou as cerâmicas circulares acopladas às placas de alumínio com falhas de 1 mm, 5 mm, 8 mm e 11 mm (quinto conjunto de amostras), não foi possível verificar a diferença entre as dimensões das falhas detectadas devido à variação dos valores dos índices RMSD. No entanto, analisando-se os resultados para o segundo conjunto de amostras (Figura 11 e Figura 13), nas quais foram avaliadas falhas de maiores dimensões (5 mm, 8 mm e 11 mm) e em amostras totalmente vazadas (DA COSTA et al., 2015), verificou-se que o RMSD aumenta em função do tamanho da falha. Ressalta-se que, mesmo para falhas de pequenas dimensões como as avaliadas no terceiro e quarto conjunto (1 mm a 3 mm), a técnica de impedância permite a detecção destas em relação a uma amostra íntegra, o que está de acordo com estudos realizados por outros autores (PARK et al., 1999a; PARK et al., 2001; PARK et al., 2006; BAPTISTA et al., 2011).

A análise referente ao modo transmissão-recepção para a atenuação da amplitude das ondas ultrassônicas recebidas, quando comparadas as amostras com falhas (1 mm, 2,5 mm e 3 mm com profundidade de 10 mm e de 3 mm totalmente vazadas) à amostra de referência, enfatiza a validade da metodologia empregada neste trabalho. A partir das frequências de 90 kHz, 145 kHz, 230 kHz e 376 kHz, que foram utilizadas para excitar as cerâmicas acopladas nas posições P1, P2 e P3 (ver Figura 5(b)), observa-se um comportamento “similar” aos pares na atenuação da amplitude ao se comparar os valores obtidos para a cerâmica transmissora na posição P1 e a receptora na posição P2 (TR1-2), ver Figura 20(a), em relação à cerâmica transmissora na posição P2 e a receptora em P1 (TR2-1), Figura 20(b). Esta similaridade foi constatada nas medições tanto para TR1-3, Figura 20(c), em relação a TR3-1, Figura 20(d), quanto para TR2-3, Figura 20(e), e TR3-2, na Figura 20(f). Devido às pequenas dimensões das amostras, às velocidades de propagação das ondas ultrassônicas longitudinais e de cisalhamento no material serem aproximadamente 6420 m/s e 3040 m/s (KINO, 1987), respectivamente, e às distâncias das posições de acoplamento das cerâmicas (P1, P2 e P3) serem diferentes em relação às bordas das amostras (ver Figura 5(b)), não foi possível determinar a trajetória de propagação dos sinais de transmissão e recepção para todos os pontos. No entanto, os resultados indicaram que foi possível diferenciar as amostras com falhas das amostras de referência por meio da comparação dos sinais que se propagaram nelas.

O mesmo tipo de análise feita para a atenuação da amplitude das ondas ultrassônicas nas barras de alumínio, Figura 20, pode ser verificada para as amostras formadas por placas de alumínio, Figura 21, onde é possível observar os comportamentos “similares” quando se avalia os pares TR1-2/TR2-1, Figura 21(a, b), TR1-3/TR3-1, Figura 21(c, d) e TR2-3/TR3-2, Figura 21(e, f)), sendo que as placas que apresentam dimensões (500 mm × 500 mm × 4 mm) bem

diferentes das barras de alumínio (250 mm × 50 mm × 50 mm), indicando que a técnica pode ser utilizada para detectar falhas em materiais com outros formatos e diferentes.

Neste trabalho não foi feita a atenuação em banda larga - BUA, descrita na Equação 30 e Figura 4, para as cerâmicas piezoelétricas acopladas às barras e placas de alumínio, pois a banda de passagem das cerâmicas nas frequências utilizadas nos testes era estreita. Isto ocorreu pois, de forma a avaliar a viabilidade de um sistema de detecção de falhas mais simples e de menor custo, não foi acoplado qualquer tipo de camada de retaguarda (*backing*) ou feito qualquer cálculo para determinar a espessura adequada da camada de acoplamento dessas aos materiais, o que tornaria a banda de passagem maior (KOSSOF, 1966). Desta forma, os testes de BUA foram realizados utilizando-se os pares de transdutores com frequências centrais nominais de 500 kHz e 5 MHz, operando nos modos transmissão-recepção e pulso-eco.

Os resultados para o par de transdutores de 500 kHz, no modo transmissão-recepção, apresentados na Figura 22(f), mostram que os maiores índices de BUA ocorreram na amostra com falhas de 3 mm totalmente vazadas, enquanto os menores valores estão relacionados às falhas de menores dimensões e não vazadas. Estes resultados são considerados coerentes, pois a atenuação no alumínio é relativamente baixa, em torno de 0,018 dB/(cm·MHz), em relação à atenuação no ar, em torno de 12 dB/cm a 1 MHz e que possui dependência da frequência ao quadrado (BRONZINO, 1986). Desta forma, quanto maior a dimensão da falha e da quantidade de ar presente nesta, maior será a atenuação da amplitude da onda ultrassônica.

No entanto, o mesmo padrão não se repetiu quando utilizado o transdutor de 5 MHz, Figura 23(f). Esta alteração no resultado explica-se pelo fato de que os transdutores de 500 kHz possuem maior área de contato (diâmetro de 19 mm) em comparação aos transdutores de 5 MHz disponíveis para os testes (diâmetro de 6 mm). Os transdutores foram acoplados manualmente às amostras utilizando-se gel neutro, não sendo possível manter a pressão e a angulação constantes para realizar as medições com o par de transdutores de menor diâmetro. Ressalta-se que, mesmo com esses problemas, foi possível verificar diferenças entre as amostras com falhas e a amostra de referência.

Os resultados finais para BUA utilizando-se o método pulso-eco e os transdutores de 500 kHz e 5 MHz de frequência nominal, Figura 24(f) e Figura 25(f), respectivamente, são similares aos obtidos quando utilizado o método transmissão-recepção e foram verificados os mesmos problemas. No entanto, pode-se observar que os sinais obtidos tanto para a amostra de referência quanto para as amostras com falhas (Figuras 24(a), 24(c) e Figuras 25(a) e 25(c)) são

bem diferentes. Isto se deve ao fato que, no método pulso-eco, o mesmo transdutor é utilizado para transmitir e receber os sinais. Assim, as amplitudes dos sinais recebidos são menores e há maior presença de ruído (baixa relação sinal/ruído), conforme pode ser observado pelas FFTs apresentadas nas Figuras 24(b), 24(d), 25(b) e 25(d).

Como as dimensões das amostras de alumínio utilizadas neste trabalho são relativamente pequenas (250 mm × 50 mm × 50 mm para as barras e 500 mm × 500 mm × 4 mm para as placas de alumínio) em relação às utilizadas em outros trabalhos (PARK et al., 2006; ANNAMDAS et al., 2007, BAPTISTA et al., 2011), ocorrem várias reflexões nas bordas e nas falhas presentes nas amostras, gerando interferências construtivas e destrutivas entre as ondas longitudinais e de cisalhamento propagando-se com diferentes velocidades e em várias direções, que permitiram identificar as falhas mesmo para frequências baixas como as utilizadas neste trabalho (faixa de 90 kHz a 500 kHz). Para a velocidade de propagação do ultrassom no alumínio (6420 m/s) e a frequência de 500 kHz, o comprimento de onda do sinal é de aproximadamente 12,84 mm, maior do que as dimensões das falhas de diâmetros de 1 mm a 11 mm, o que gera também um efeito de difração da onda ultrassônica nas falhas. O mesmo não acontece com o transdutor de frequência central de 5 MHz, em que o comprimento de onda é de aproximadamente 1,28 mm, sendo possível visualizar os ecos das bordas, Figuras 25(a) e 25(c).

Avaliando-se as respostas harmônicas obtidas através da simulação de elementos finitos (Figuras 26, 27 e 28 para as barras e Figuras 29, 30 e 31 para as placas de alumínio) foi possível comprovar que há diferença no padrão de propagação das ondas ultrassônicas nas amostras com furos simulando defeitos em relação à amostra de referência. Foram realizadas simulações utilizando-se a mesma força aplicada nas três posições de testes (onde as cerâmicas foram coladas) P1, P2 e P3 para as barras de alumínio (Figuras 26, 27 e 28, respectivamente) e C1, C2 e C3 para as placas (Figuras 29, 30 e 31, respectivamente) em cada amostra com as frequências de 90 kHz e 500 kHz para as barras e de 104 kHz para as placas de alumínio.

Mesmo no ponto de aplicação da força (posição P1 de cada amostra) é possível verificar que as deformações máximas e mínimas obtidas através das análises são diferentes em cada uma das amostras. No entanto, da mesma forma como nos resultados obtidos através dos testes experimentais de atenuação realizados neste trabalho, não houve um padrão de aumento ou diminuição da deformação nas posições P1, P2 ou P3 em função do aumento dos furos. Por exemplo, para os estímulos na posição P1, a deformação máxima na amostra de referência foi

de $2,55 \times 10^{-8}$ mm para a frequência de 90 kHz (Figura 26(a)) e de $4,34 \times 10^{-10}$ mm para a frequência de 500 kHz (Figura 26(b)), enquanto que para a amostra com furos de 1 mm os valores foram de $5,39 \times 10^{-8}$ mm (Figura 26(c)) e $7,20 \times 10^{-10}$ mm (Figura 26(d)), respectivamente. Para a amostra com furos de 3 mm, os valores foram de $3,56 \times 10^{-8}$ mm (Figura 26(g)) e $4,70 \times 10^{-10}$ mm (Figura 26(h)), respectivamente, indicando que há um padrão complexo de propagação das ondas nas estruturas.

Por apresentar simetria entre as distâncias das cerâmicas em relação às bordas das placas de alumínio, as respostas harmônicas dos estímulos nas posições C1 (Figura 29(a)) e C3 (Figura 31(a)) da amostra de referência possuem valores de deformação mínimos e máximos ($2,8455 \times 10^{-13}$ mm e $5,2969 \times 10^{-8}$ mm, respectivamente) idênticos para as duas posições. No entanto, o mesmo não se repete quando há a presença de falhas de diferentes tamanhos nas amostras, indicando que o padrão de propagação das ondas nas placas varia conforme os tamanhos das falhas (ver Figuras 29(b, c, d, e), 30(b, c, d, e) e 31(b, c, d, e)).

A detecção de falhas em estruturas utilizando-se cerâmicas piezoelétricas já vem sendo aplicada há muito tempo e por diversos autores (CAWLEY, 1984; CHAUDHRY et al., 1995a; CHAUDHRY et al., 1995b; ZAGRAI & GIURGIUTIU, 2001; GIURGIUTIU & ZAGRAI, 2002; BHALLA et al., 2002a; BHALLA et al., 2002b; GIURGIUTIU, 2003; PARK et al., 2006; GIURGIUTIU & LIN, 2006; ANNAMDAS et al., 2007; DONGYU et al., 2010; XU et al., 2010; BAPTISTA et al., 2011; PRADO et al., 2015; WONGI, et al., 2017; LIU et al., 2019). No entanto, nesses trabalhos, os autores utilizaram frequências mais altas, com comprimentos de onda menores do que as dimensões das falhas analisadas, diferentemente do que foi realizado neste trabalho.

Diversas técnicas para END foram avaliadas e validadas por muitos autores, com excelentes resultados. Isso inclui o uso de sondas para corrente de Foucault pulsada (PEC), transdutores acústicos eletromagnéticos (EMAT) ou uma combinação de ambas as técnicas, como proposto por Edwards et al. (2006), avaliação de ondas de Rayleigh, refletividade de ângulo crítico (CAR), ondas Lambda (LLW), entre outros (CHEEKE, 2016). No entanto, o objetivo deste trabalho foi encontrar um sistema relativamente mais simples, usando frequências abaixo das que são normalmente usadas em END e transdutores/cerâmicas de baixo custo que, embora não tão robustos quanto os métodos tradicionais, permitem a identificação de falhas em amostras de teste (DA COSTA et al., 2020).

O monitoramento de estruturas utilizando-se cerâmicas PZT ou transdutores de baixas frequências implica o uso de circuitos de transmissão/recepção dos sinais menos complexos, e um custo menor em relação aos circuitos de altas frequências e apresentam maior relação sinal/ruído.

5.2 CONCLUSÕES

Neste trabalho foi proposta uma nova técnica baseada na análise da impedância e da atenuação das ondas ultrassônicas para monitoramento da presença de danos em amostras de alumínio no formato de barras de dimensões 250 mm × 50 mm × 50 mm e placas de dimensões 500 mm × 500 mm × 4 mm.

Foram utilizadas cerâmicas piezoelétricas APC 855 acopladas às amostras de alumínio, no formato de barras e placas, mantendo-se uma das amostras íntegra e nas demais foram inseridos furos, simulando falhas, de diferentes dimensões. Os testes de impedância das cerâmicas foram realizados em baixas frequências (40 kHz a 500 kHz), que correspondem às ressonâncias e antirressonâncias nos modos de vibrações laterais e transversais, assim como em altas frequências (3,5 MHz a 5 MHz) que correspondem ao modo espessura de vibração. A análise dos resultados indicou que a técnica pode ser utilizada para detectar falhas de pequenas dimensões.

Os testes para avaliação da atenuação da amplitude das ondas ultrassônicas foram realizados utilizando-se os métodos transmissão-recepção e pulso-eco com as cerâmicas excitadas em baixas frequências (90 kHz, 145 kHz, 230 kHz e 376 kHz) para as barras de alumínio e 104 kHz para as placas de alumínio, dentro da faixa dos modos de vibração laterais/radiais e transversais, sendo que o método transmissão-recepção foi mais adequado pois foi possível obter uma melhor relação sinal/ruído.

A atenuação em banda larga (BUA) só foi possível ser avaliada com transdutores comerciais de frequências nominais de 500 kHz e 5 MHz, visto que a banda de passagem das cerâmicas era estreita para os testes. Os resultados obtidos para as análises de atenuação da amplitude ou BUA também mostraram que é possível detectar falhas utilizando-se o método proposto.

Desta forma, a inovação deste trabalho está relacionada à faixa de frequências utilizadas para realizar os testes de detecção de falhas em estruturas de alumínio, sendo possível detectar danos com pequenas dimensões (1 mm a 3 mm) utilizando-se baixas frequências (na faixa entre

90 kHz e 376 kHz), que correspondem aos modos de vibração laterais/radiais e transversais das cerâmicas piezoelétricas APC 855 (APC, 2019) utilizadas.

Os métodos aqui propostos, ou seja, a impedância elétrica de cerâmicas piezoelétricas e a atenuação de ondas ultrassônicas geradas por transdutores/cerâmicas que operam em frequências na faixa de 40 kHz a 500 kHz (menores que 1 MHz a 100 MHz, geralmente utilizadas em END (CHEEKE, 2016)) são complementares e podem ser combinados para desenvolver equipamentos de baixo custo para detectar defeitos em estruturas.

A técnica proposta poderá ser avaliada no futuro para a caracterização de outros materiais biológicos e não biológicos em testes não destrutivos.

5.3 TRABALHOS FUTUROS

Como sugestão para dar continuidade a este trabalho, pode-se citar:

- Avaliar a técnica proposta com outros materiais sólidos (não biológicos e biológicos), como por exemplo: tecido ósseo, polímeros, outras ligas metálicas (latão, ferro, etc.);
- Avaliar a técnica proposta em estruturas maiores (próteses ortopédicas, vigas metálicas, placas de grandes dimensões, etc.) utilizando-se cerâmicas piezoelétricas ou transdutores comerciais de baixa frequência e de baixo custo (semelhantes aos que são utilizados em alarmes de carro, por exemplo) acoplados a uma única estrutura íntegra (sem falhas), na qual serão inseridas falhas de pequenas dimensões que serão aumentadas e os novos sinais serão comparados aos obtidos quando a amostra se encontrava intacta. Assim, a mesma estrutura pode ser utilizada como amostra de referência e amostra com falhas;
- Avaliar a deterioração ao longo do tempo (período de pelo menos um ano) e a influência do tipo de cola utilizado para fixar as cerâmicas às amostras;
- Implementar e testar circuitos eletrônicos de baixo custo que operem em baixas frequências e possam ser utilizados para substituir o analisador de impedância e o sistema de medição da atenuação ultrassônica (gerador de funções e osciloscópio digital) para realizar a caracterização dos materiais utilizando-se tensões mais altas para excitação das cerâmicas/transdutores e também a operação em corrente contínua.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADAMOWSKI, J. C.; BUIOCHI, F.; SIMON, C.; SILVA, E. C. N.; SIGELMANN, R. A. Ultrasonic measurement of density of liquids. **J. Acoust. Soc. Am.**, v. 97, n. 1, p. 354-361, 1995.

ANNAMDAS, V. G. M.; YANG., Y.; SOH, K. C. Influence of loading on the electromechanical admittance of piezoceramic transducers. **Smart Mater. Struct.**, v. 16, n. 5, p.1888–1897, 2007.

APC (2019). Physical and piezoelectric properties of APC materials. **Resource document. APC International Ltd.** Disponível em: https://www.americanpiezo.com/images/APC_materials_properties-compressed.pdf. Acesso em: 14 Mar. 2019.

ASSEF, A. A.; MAIA J. M., SCHNEIDER, F. K.; BUTTON V. L. S. N.; COSTA, T. E. A reconfigurable arbitrary waveform generator using PWM modulation for ultrasound research. **Bio Medical Engineering On Line**, v. 12, n. 24, 2013, Disponível em: <https://doi.org/10.1186/1475-925X-12-24>.

BAPTISTA, F. G.; FILHO, J. V.; INMAN, D. J. Sizing PZT transducers in impedance-based structural health monitoring. **IEEE Sensors Journal**, v. 11, n. 6, p. 1405-14, 2011.

BERLINCOURT, D.; CURRAN D. R.; JAFFE, H. Piezoelectric and piezomagnetic materials and their function in transducers. **In Physical Acoustics (W. P. Mason, ed.) 1B**, 169-270, Academic Press, New York, 1964.

BERLINCOURT, D.; CURRAN, D. R. Ultrahigh strain and piezoelectric behavior in relaxor based ferroelectric single crystals. **Journal of the Acoustical Society of America**, v. 91, n. 3034, 1992, Disponível em: <https://doi.org/10.1121/1.402938>

BESSA, J. A; BARROSO D. A.; DA ROCHA NETO A. R.; DE ALEXANDRIA A. R. Global location of mobile robots using artificial neural networks in omnidirectional images. **IEEE Latin America Transactions**, v.13, n. 10, p. 3405-3414, 2015.

BHALLA, S.; NAIDU, A. S. K.; SOH, C. K. Influence of structure actuator interactions and temperature on piezoelectric mechatronic signatures for NDE. **In Proceedings of ISSS-SPIE**

2002 International Conference on Smart Materials Structures and Systems, December 12–14, Bangalore, India, 2002a, Disponível em: <https://doi.org/10.1117/12.514762>.

BHALLA, S.; NAIDU, A. S. K.; ONG, C. W.; SOH, C. K. Practical issues in the implementation of electro-mechanical impedance technique for NDE. **In Proceedings of the SPIE International Symposium on Smart Materials, Nano-, and Micro-Smart Systems**, December 16–18, Melbourne, Australia, 4935(77), 2002b, Disponível em: <https://doi.org/10.1117/12.479821>.

BRONZINO, J. D. **Biomedical engineering and instrumentation: Basic concepts and application**. BWS-Kent, p. 347-386, 1986.

CAWLEY, P. The impedance method of non-destructive inspection. **In NDT Int., Ann Arbor, MI**, v.17, n. 2, p. 59–65, 1984.

CHAUDHRY, Z.; JOSEPH, T.; SUN, F.; ROGERS, C. Local-area health monitoring of aircraft via piezoelectric actuator/sensor patches. **In Smart Structures and Integrated Systems, SPIE Conference**, San Diego, CA. Proceedings of the SPIE, 2443, 1995a.

CHAUDHRY, Z.; LALANDE, F.; GANINO, A.; ROGERS, C. Monitoring the integrity of composite patch structural repair via piezoelectric actuators/sensors. **AIAA-95-1074**, 1995b, Disponível em: <https://doi.org/10.2514/6.1995-1074>.

CHEEKE, J. D. N., Nondestructive evaluation (NDE) of materials. In: **Fundamentals and applications of ultrasonic waves**, CRC Press LLC, p. 342-373, 2016.

CHURCH, D.; PINCOCK, D. Predicting the electrical equivalent of piezoceramic transducers for small acoustic transmitters. **IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics**, v. 32, n. 1, p. 61-64, 1985.

COHEN, Y. B.; STUBBS, D. A.; HOPPE, W. C. Multiphase backing materials for piezoelectric broadband transducers. **Journal of the Acoustical Society of America**, v. 75, n. 5, p. 1629-1633, 1984.

DA COSTA, R.; MAIA, J. M.; PICHORIM, S. F.; ASSEF, A. A.; BUTTON, V. L. S. N.; COSTA, E. T. Detecção de falhas em estruturas maciças de alumínio utilizando a técnica da impedância. In: **XXIV Congresso Brasileiro de Engenharia Biomédica - CBEB2014**, 2014, Uberlândia. Anais do CBEB2014, 2014. p. 1212-1215.

DA COSTA, R.; MAIA J. M.; ASSEF, A. A.; PICHORIM, S. F.; COSTA, E. T.; BUTTON, V. L. S. N. Monitoring the integrity of massive aluminum structures using PZT transducers and the technique of impedance. **SPIE Conference. Proceedings of the SPIE**, 2015, Disponível em: <https://doi.org/10.1117/12.2084397>.

DA COSTA, R.; MAIA, J. M.; ASSEF, A. A.; PICHORIM, S. F.; GEWEHR, P. M.; COSTA, E. T. Defect detection in aluminum bars using impedance and ultrasonic attenuation. **IEEE Sensors Journal**. 2020. Disponível em: <https://DOI: 10.1109/JSEN.2020.2978427>.

DONALD, I. Sonar. The Story of an experiment. Pergamon Press. Printed in Great Britain. **Ultrasound in Med. Biol.**, v. 1, p. 109-117, 1974.

DONGYU, X.; XIN, C.; SHIFENG, H.; MINHUA, J. Identifying technology for structural damage based on the impedance analysis of piezoelectric sensor. **Construction and Building Materials**. v. 24, n. 12, p. 2522-2527, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.06.004>.

EDWARDS, R. S.; SOPHIAN, A.; DIXON, S.; TIAN, G. T.; JIAN, X. Dual EMAT and PEC non-contact probe: applications to defect testing. **NDT&E International**, v. 39, no. 1, p. 45-52, 2006.

FEHER, P.; ANNAR, D.; ZSAKAI, A.; BODZSAR, E. The body composition analysis as a complementary tool in the screening of bone structural abnormalities. **Anthropologischer Anzeiger; Bericht Uber die Biologisch-anthropologische Literatur**. v. 77 n. 2, p. 161-171. Apr. 2020. DOI: 10.1127 / anthranz / 2020/1136.

GAO, F.; FENG, X.; ZHENG, Y.; OHL, C. Photoacoustic resonance spectroscopy for biological tissue characterization. **Journal of Biomedical Optics**. v. 19, n. 6, p. 067006_1-067006_6, Jun. 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1117/1.JBO.19.6.067006>

GIURGIUTIU, V. Embedded NDE with piezoelectric wafer active sensors in aerospace applications. **Journal of Materials (JOM-e), Special Issue on NDE**, v. 55, n. 1, 2003.

GIURGIUTIU, V.; LIN, B. Modeling and testing of PZT and PVDF piezoelectric wafer active sensors. **Smart Materials and Structures**, v. 15, n. 4, Jul. 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/0964-1726/15/4/022>.

GIURGIUTIU, V.; ZAGRAI, A. N. Embedded self-sensing piezoelectric active sensors for online structural identification. **ASME Journal of Vibration and Acoustics**, v.124, p. 116–125, 2002.

GRAY, R. B. **Transducer and method of making the-same**. U.S. Patent 2,486,560, Nov. 1, 1949; filed Sept. 20, 1946.

HIGUTI, R. T.; ADAMOWSKI, J. C. Ultrasonic densitometer using a multiple reflection technique. **IEEE Trans. Ultras. Ferroelec. Freq. Contr.**, v. 29, n. 9, p.1260-1268, 2002.

HOLMES, J. H.; HOWRY, D. H.; POSAKONY, G. J.; CUSHMAN, C. R. The ultrasonic visualization of soft tissue structures in the human body. **Transm. Am. Clin. Climatol. Assoc.**, 66, p. 208-223, 1954.

HULL, J. B.; LANGTON, C. M.; BARKER, S.; JONES, A. R. Identification and characterization of materials by broadband ultrasonic attenuation analysis. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 56, n 3, p. 148-157, 1996.

IEE 176-1987. **IEEE Standard on piezoelectricity**. The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., IEEE UFFC Standards Committee, 1987.

JAFFE, B.; COOK, W. R.; JAFFE, H. **Piezoelectric ceramics**. Academic Press Inc. New York, 1971.

JORDAN, T. L.; OUNAIES, Z. **Piezoelectric Ceramics Characterization**. NASA/CR-2001-211225 ICASE report to NASA Langley Research Center. Report No. 2001-28, September 2001.

KAUFMAN, J. J.; EINHORN, T. A. Perspectives ultrasound assessment of bone. **Journal of Bone and Mineral Research**, v. 8, p. 517-525, 1993.

KHALID, M.; SHOAI B, M.; KHAN, A.; Strontion doped lead zirconate titanate ceramics: study of calcination and sintering process to improve piezo effect. **Journal. Nanoscience**, v. 11, n. 6, p.5440-5445, 2011.

KINO, G. S. **Acoustic waves: Devices, imaging and analog signal processing**. Prentice-Hall. Englewood Cliffs. New Jersey. Prentice Hall. XXI, 601, 1987.

KOSSOFF, G. The effects of backing and matching on the performance of piezoelectric ceramic transducers. **IEEE Transactions Sonics and Ultrasonics**, v.1 3, n. 1, p. 20–30, 1966, Disponível em: <https://doi.org/10.1109/T-SU.1966.29370>.

LEONG, W. H.; STASZEWSKI, W. J.; LEE, B. C.; SCARPA, F. Structural health monitoring using scanning laser vibrometry: III. Lamb waves for fatigue crack detection. **Smart Materials and Structures**. 2005, Disponível em: <https://doi.org/10.1088/0964-1726/14/6/031>.

LIU, H.; GENG, J.; ZHU, Q.; ZHANG, L.; WANG, F.; CHEN, T.; SUN, L. (2020). Flexible Ultrasonic Transducer Array with Bulk PZT for Adjuvant Treatment of Bone Injury. **Sensors**, v. 20, n. 1, 86, 2019, DOI: 10.3390/S20010086.

LU, B.; CHEN, Y.; OU, D.; CHEN, H.; DIAO, L.; ZHANG, W.; ZHENG, J.; MA, W.; SUN, L.; FENG X. Ultra-flexible Piezoelectric Devices Integrated with Heart to Harvest the Biomechanical Energy. **Sci Rep.**, v. 5, n. 16065, 2015, DOI: 10.1038/srep16065.

MAIA, J. M. **Sistema ultra-sônico para auxílio ao diagnóstico da osteoporose**. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, Campinas, 2001.

MAIA, M. J.; COSTA, E. T.; MARQUES NETO, J. F. M.; BUTTON, V. L. S. N. Broadband ultrasound attenuation in the calcaneal region: A comparative study of single-position versus scanning systems. **IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control**, v. 55, n. 1, p. 64-73, 2008.

MASON, W. P. **An electromechanical representation of a piezoelectric crystal used as a transducer**. Proceedings of the IRE, v. 23, n. 10, p. 1252-1263, 1935.

MASON, W. P. Aging of the Properties of Barium Titanate and Related Ferroelectric Ceramics. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 27, n. 1, p. 73-85, 1955.

MILANI, H. J.; ARAUJO J. E.; CARVALHO, S.; OLIVEIRA, P. S.; HISABA, W. J. Fetal Brain Tumors: Prenatal diagnosis by ultrasound and magnetic resonance imaging. **World J. Radiol**, v. 7, p17-21, 2015.

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

PARK, G.; CUDNEY, H.; INMAN D. J. Developing a model based health monitoring technique using structural impedance sensors. **Proceedings, 2nd Conference on Identification in Engineering Systems**, in press, Swansea, UK. p. 506-515, 1999a.

PARK, G.; CUDNEY, H. H.; INMAN, D. J. Impedance-based health monitoring technique for massive structures and high-temperature structures. **In Smart Structures and Materials. Proceedings of the SPIE**, v. 3670, p. 461–469, 1999b.

PARK, G.; CUDNEY, H.; INMAN, D. J. Feasibility of using impedance-based damage assessment for pipeline structures. **Earthquake Engineering and Structural Dynamics Journal**, v.30, n.10, p.1463–1474, 2001.

PARK, G.; SOHN, H.; FARRAR, C. R.; INMAN, D. J. **Overview of piezoelectric impedance-based health monitoring and path forward**. The Shock and Vibration Digest, v. 35, n. 6, p. 451-463, 2003.

PARK, G.; FARRAR, C. R.; SCALEA, F. L.; COCCIA, S. Performance assessment and validation of piezoelectric active-sensors in structural health monitoring. LA-UR-06-2431, **Smart Materials and Structures**, v. 15, n. 6, p. 1673-1683, 2006.

PRADO, V. T.; GRANJA, S. C. G.; HIGUTI, R. T.; KITANO, C.; MARTINEZ-GRAULLERA, O.; ELVIRA, L. Defect detection in anisotropic plates based on the instantaneous phase of signals. **IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control**. v. 62, no. 10, pp. 1888-1894, 2015, Disponível em: <https://doi.org/10.1109/TUFFC.2014.006955>.

QIU, Y. Piezoelectric micromachined ultrasound transducer (PMUT) arrays for integrated sensing, actuation and imaging. **Sensors**, v.15, n. 4, p. 8020-8041, 2015.

QING, X.; LI, W.; Wang, Y.; Sun, H. Piezoelectric Transducer-Based Structural Health Monitoring for Aircraft Applications. **Sensors**, 2019, v.19, n.3, jan. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/s19030545>.

ROBINSON, P. **Properties and selection: Nonferrous alloys and special-purpose materials**. Publisher: Properties of Wrought Coppers and Copper Alloys. ASM International, 10th Ed. Published: October 01, 1990; 2, 1328, ISBN: 978-0-87170-378-1.

ROSSING, T. D. **Springer Handbook of Acoustics**. Springer Science & Business Media, Part B. Physical and Nonlinear Acoustics Springer, New York, N. Y.: p. 8, Jun. 21, 1182, 2007.

SHARIF-KHODAEI, Z.; ALIABADI, M. H. Assessment of delay-and-sum algorithms for damage detection in aluminum and composite plates. **Smart Mater. Struct.**, v.23, n. 7, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/TUFFC.2014.006955>.

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, n. 1, p. 134-139, 1995a.

TAKIY, A. E.; KITANO, C.; HIGUTI, R. T.; GRANJA, S. C. G.; PRADO, V. T.; ELVIRA, L.; MARTÍNEZ-GRAULLERA, O. Ultrasound imaging of immersed plates using high-order Lamb modes at their low attenuation frequency bands. **Mechanical Systems and Signal Processing**, v. 96, p. 321-332, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2017.04.021>.

UCHINO, K. **Advanced Piezoelectric Materials: Science and Technology**. Elsevier LTD, 2017.

WANG, H.; YUANYUAN, Y.; ZHEN, F. C.; HAO, Y. Design and fabrication of a piezoelectric micromachined ultrasonic transducer array based on ceramic PZT. **IEEE Sensors**, 2018, Disponível em: <https://doi.org/10.1109/ICSENS.2018.8589693>.

WELLS, P.N.T. **Biomedical ultrasonics**. London, Academic Press Inc, 635p, 1977, Disponível em: <https://doi.org/10.1002/jcu.1870060221>.

WIECZOREK, K.; ZIEBINSK, A.; UJMA, Z.; SZOT, K.; GÓRNY, M.; FRANKE, I.; KOPERKI, J.; SOSZYNKI, S.; ROLEDER, K. Electrostrictive and Piezoelectric Effect in BaTiO₃ and PbZrO₃. **Ferroelectrics**, v. 536, n. 1, p. 61-67, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/00150190600695743>.

WONGI, S. N. Distinguishing crack damage from debonding damage of glass fiber reinforced polymer plate using a piezoelectric transducer based nondestructive testing method. **Composite Structures**, v. 159, n. 1, p. 517-527, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.10.005>.

WONGI, S. N.; JONGDAE, B. Impedance-Based Non-Destructive Testing Method Combined with Unmanned Aerial Vehicle for Structural Health Monitoring of Civil Infrastructures. **Appl. Sci.** v. 7, n. 1, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/app7010015>.

XU, D.; CHENG, X.; HUANG, S.; JIANG, M. Identifying technology for structural damage based on the impedance analysis of piezoelectric sensor. **Construction and Building Materials**, v. 24, p. 2522-2527, 2010.

ZAGRAI, A. N.; GIURGIUTIU, V. Electromechanical impedance method for crack detection in thin plates. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, v. 12, p. 709–718, 2001.