



**Isabel Giron Camerini**

**Caracterização da comunicação entre  
transdutores ultrassônicos piezocerâmicos sob  
influência da deformação mecânica e da  
variação de temperatura**

**Dissertação de Mestrado**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica Aplicada, do Departamento de Engenharia Mecânica da PUC-Rio.

Orientador : Prof. Arthur Martins Barbosa Braga  
Coorientador: Dra. Paula Medeiros Proença de Gouvêa

Rio de Janeiro  
Setembro de 2021



**Isabel Giron Camerini**

**Caracterização da comunicação entre  
transdutores ultrassônicos piezocerâmicos sob  
influência da deformação mecânica e da  
variação de temperatura**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica Aplicada da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora:

**Prof. Arthur Martins Barbosa Braga**

Orientador

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

**Dra. Paula Medeiros Proença de Gouvêa**

Coorientador

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

**Prof. Julio Cezar Adamowski**

Universidade de São Paulo – USP

**Prof. Alan Conci Kubrusly**

Departamento de Engenharia Elétrica – PUC-Rio

**Prof. José Luiz de França Freire**

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 29 de Setembro de 2021

Todos os direitos reservados. A reprodução, total ou parcial do trabalho, é proibida sem a autorização da universidade, do autor e do orientador.

**Isabel Giron Camerini**

Graduada em Engenharia Mecânica pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio), Rio de Janeiro - Brasil

Ficha Catalográfica

Camerini, Isabel

Caracterização da comunicação entre transdutores ultrassônicos piezocerâmicos sob influência da deformação mecânica e da variação de temperatura / Isabel Giron Camerini; orientador: Arthur Martins Barbosa Braga; coorientador: Paula Medeiros Proença de Gouvêa. – 2021.

125 f: il. color. ; 30 cm

Dissertação (mestrado) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Mecânica, 2021.

Inclui bibliografia

1. Engenharia Mecânica – Teses. 2. Telemetria ultrassônica. 3. Propagação de Ondas Elásticas. 4. Transdutores Piezo-cerâmicos. 5. Comunicação ultrassônica. 6. Ondas ultrassônicas..

I. Braga, Arthur. II. Gouvêa, Paula. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Mecânica. IV. Título.

CDD: 621

Para Lucas, Bernardo e Davi.

## Agradecimentos

Eu gostaria de agradecer primeiramente ao meu orientador Arthur Braga, por todo apoio e suporte.

À minha coorientadora Paula Gouvêa, por todas as orientações, ajuda, paciência e principalmente pela amizade que foi criada durante esse tempo que trabalhamos juntas.

A todos os meus colegas e amigos de trabalho que dividem comigo o dia a dia do LSFO, em especial os que ajudaram diretamente com o projeto, Luis Paulo Brasil, Leonardo Campos, Sávio W. Figueiredo, Luiz Fabiano de Moura, Aldo Sola, Mateus Gheorghe, Juan Andrés, Bruno "Bento" Sena, Tiago Magalhães, Hugo Gomes e André dos Anjos.

Ao Adrian Giassone e toda equipe do ITUC - PUC-Rio, por toda ajuda e disponibilidade para realização de alguns dos testes no laboratório.

Ao Renan Fraga, Mariana Gioia e toda equipe do laboratório de prototipação do TECGRAF - PUC-Rio, pela ajuda e disponibilidade.

Gostaria de agradecer também à minha família. Ao meu pai Claudio Camerini por ser o meu maior exemplo de "colocar o mundo no mudo e escutar o coração". À minha mãe Cristina Camerini por sempre ser meu exemplo de paciência. Aos meus irmãos Cesar, Murilo e Flavia Camerini, por sempre me apoiarem e serem meus melhores amigos. Ao Raphael Carvalho, por ser mais que um namorado e sim um companheiro.

Aos meus sobrinhos, Lucas, Bernardo e Davi, pois foram eles que me apresentaram o amor mais puro e verdadeiro.

À minha avó Esther (*In Memoriam*), pois foi ela que me ensinou que estudar vem sempre em primeiro lugar.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001

## Resumo

Camerini, Isabel; Braga, Arthur; Gouvêa, Paula. **Caracterização da comunicação entre transdutores ultrassônicos piezocerâmicos sob influência da deformação mecânica e da variação de temperatura.** Rio de Janeiro, 2021. 125p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Ondas acústicas, sônicas ou ultrassônicas, podem ser empregadas para a telemetria sem fio como alternativa a sistemas eletromagnéticos, transferindo dados e energia ao longo de um canal formado por uma ou mais camadas de sólidos elásticos ou fluidos acústicos. Um exemplo é a interrogação de sensores passivos através de uma parede metálica. Nesta configuração, pelo menos um transdutor acústico é fixado em um lado da parede (face externa), onde uma fonte de alimentação elétrica é disponível. No lado oposto (face interna), onde os sensores estão instalados, são fixados um ou mais transdutores. Na maioria das aplicações estes transdutores são cerâmicas piezelétricas que geram e recebem sinais ultrassônicos. Ondas acústicas ultrassônicas se propagam ao longo do sólido elástico, transferindo energia e dados entre as duas faces, possibilitando a alimentação e interrogação dos sensores. Este tipo de configuração pode ser empregado em aplicações onde o uso de penetradores elétricos ou ópticos não é recomendado. Entretanto, a resposta das piezocerâmicas pode sofrer influências de variações de temperatura e da própria deformação mecânica da parede metálica na qual são fixados.

O presente trabalho procurou quantificar a influência da deformação mecânica e da variação de temperatura na comunicação entre dois transdutores piezocerâmicos ultrassônicos, aderidos à uma placa metálica por meio de adesivo epóxi. No estudo, tomou-se como parâmetro quantitativo o sinal S21, que é o logaritmo da razão entre a potência recebida pela saída do sistema (face interna da parede) pela potência transmitida pela entrada (face externa da parede). O trabalho apresenta comparações entre resultados experimentais e simulados através de um modelo numérico de elementos finitos desenvolvido no COMSOL Multiphysics®.

Os ensaios experimentais foram realizados com pastilhas piezocerâmicas circulares, do tipo PZT4, com diâmetro e espessura de 25 e 2 mm, respectivamente. Os transdutores foram fixados, de forma concêntrica alinhada e por meio de um adesivo epóxi, nas duas superfícies de uma placa de aço inoxidável AISI 316 L com 6 mm de espessura. O trabalho apresenta tabelas e funções para a

amplitude do sinal S21 na frequência onde a transferência de potência é maximizada. Para os casos estudados, observou-se que a frequência ideal muda muito pouco com a temperatura ou a deformação da placa sobre a qual os transdutores são fixados, permanecendo com valores entre 0,988 e 0,995 MHz em todas as condições avaliadas. Em função da deformação da placa metálica, a amplitude do sinal S21 também variou muito pouco, de -3,70 para -3,14 dB, desde a condição indeformada da placa até a máxima deformação aplicada, que foi de 1250  $\mu\text{m}/\text{m}$ . Quanto à variação com a temperatura, na faixa de 30 a 100 °C, mais uma vez observou-se apenas um pequeno aumento de 0,8 dB na amplitude do sinal S21. Entretanto, para temperaturas acima de 100 °C, o sinal passa a cair rapidamente. Em nenhuma das condições estudadas neste trabalho foi observado prejuízo na transferência de potência entre os transdutores, indicando que este tipo de comunicação pode ser uma alternativa robusta ao uso de penetradores elétricos.

### **Palavras-chave**

Telemetria ultrassônica; Propagação de Ondas Elásticas; Transdutores Piezo-cerâmicos; Comunicação ultrassônica; Ondas ultrassônicas.;

## Abstract

Camerini, Isabel; Braga, Arthur (Advisor); Gouvêa, Paula (Co-Advisor). **Characterization of data communication between piezoceramic ultrasonic transducers under the influence of mechanical strain and temperature changes**. Rio de Janeiro, 2021. 125p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Acoustic, sonic or ultrasonic waves can be used for wireless telemetry as an alternative to electromagnetic systems, transferring data and energy along a channel formed by one or more layers of elastic solids or acoustic fluids. An example of this is the interrogation of passive sensors through a metallic wall. In this configuration, at least one acoustic transducer is attached to one face of the wall (external face) where electrical power supply is available. One or more transducers are also attached to its other side (internal face) where the sensors are installed. In most applications, these transducers are piezoelectric ceramics that generate and receive ultrasonic signals. Ultrasonic acoustic waves propagate along the elastic solid, transferring energy and data between both sides, which enables the power supply and interrogation of the sensors. This type of configuration can be used in applications where the use of an electrical or optical penetrator is not suitable. However, the response of piezoceramics may be affected by temperature variations and mechanical deformations of the metallic wall on which they are attached.

The present work sought to quantify the influence of mechanical deformation and temperature changes on the communication between two ultrasonic piezo ceramic transducers, adhered to a metal plate by using an epoxy adhesive. The parameter used to quantify this influence was the S21 signal, which is the logarithm of the ratio between the power received from the output of the system (internal face of the wall) to the power transmitted by the input (external face of the wall). The work presents comparisons between experimental and simulated results obtained by using a finite element model developed through the commercial software COMSOL Multiphysics®.

In the configuration experimentally tested, two PZT-4 disks with diameter and thickness of, respectively, 25 and 2 mm were concentrically attached to both sides of a 6 mm thick, AISI 316 L stainless steel plate. Amplitudes of the S21 signal measured at the frequency where power transfer is maximized were obtained for different temperature and strain levels. Results for all of the evaluated conditions showed that the impedance matching frequency suffers



little influence from temperature variations or strain in the plate on which the transducers are attached, having remained within a range from 0.988 to 0.995 MHz in all tests. As mechanical strains were applied to the metal plate, the amplitude of the S21 signal varied from -3.70 dB to -3.14 dB, from the undeformed condition to the maximum applied deformation (1250  $\mu\text{m}/\text{m}$ ). Regarding temperature changes, a small increase of 0.8 dB in the amplitude of the S21 signal was observed when increasing temperature from 30 °C to 100 °C. However, for temperatures above 100°C, the signal was found to quickly decay. None of the conditions studied in this work brought any impairment to the power transfer between the transducers, indicating that this type of communication can be a robust alternative to electrical penetrators.

## **Keywords**

Ultrasonic Telemetry; Elastic Wave Propagation; Piezoceramic Transducers; Ultrasonic communication; Ultrasonic waves.; .

# Sumário

|          |                                                                  |           |
|----------|------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>Introdução</b>                                                | <b>19</b> |
| 1.1      | Considerações Iniciais                                           | 19        |
| 1.2      | Objetivos                                                        | 21        |
| 1.2.1    | Objetivos Gerais                                                 | 21        |
| 1.2.2    | Objetivos Específicos                                            | 21        |
| 1.3      | Roteiro da Dissertação                                           | 22        |
| <b>2</b> | <b>Revisão Bibliográfica e Fundamentação Teórica</b>             | <b>23</b> |
| 2.1      | O Ultrassom e a Utilização para Transmissão de Dados             | 23        |
| 2.2      | Ondas Acústicas e o Efeito Acustoelástico                        | 25        |
| 2.2.1    | Propagação de Ondas Elásticas                                    | 26        |
| 2.2.2    | Ondas Elásticas sob Tensão                                       | 29        |
| 2.2.3    | Ondas Elásticas sob Temperatura                                  | 31        |
| 2.3      | Materiais piezelétricos                                          | 31        |
| 2.3.1    | Frequência Natural                                               | 34        |
| 2.3.2    | Transmissão do sinal piezelétrico                                | 36        |
| 2.3.3    | Impedância do Transdutor Piezelétrico                            | 38        |
| 2.3.4    | Acoplamento Acústico                                             | 39        |
| 2.3.5    | Adesivos Epóxi                                                   | 41        |
| 2.3.6    | Adesivos Fenólicos                                               | 41        |
| 2.3.7    | Adesivos Cianoacrilatos                                          | 41        |
| 2.4      | Modelo Numérico                                                  | 42        |
| 2.4.1    | Mecânica dos Sólidos                                             | 42        |
| 2.4.2    | Transferência de Calor                                           | 43        |
| 2.4.3    | Eletroestática                                                   | 45        |
| 2.4.4    | Modelagem - Multi-física e Processamento Utilizado               | 45        |
| <b>3</b> | <b>Materiais e Método</b>                                        | <b>47</b> |
| 3.1      | Materiais                                                        | 47        |
| 3.1.1    | Adesivo Epóxi                                                    | 47        |
| 3.1.2    | Cerâmica Piezelétrica                                            | 49        |
| 3.1.3    | Corpos de Provas                                                 | 51        |
| 3.2      | Instrumentação dos Corpos de Prova                               | 52        |
| 3.3      | Bancada Experimental                                             | 57        |
| 3.4      | Descrição dos Testes                                             | 60        |
| 3.4.1    | Caracterização da Variação do Sinal pela Variação da Temperatura | 60        |
| 3.4.2    | Testes de Tração e Testes de Tração com Variação de Temperatura  | 61        |
| 3.5      | Modelagem Numérica                                               | 64        |
| 3.5.1    | Condições de Contorno Aplicadas no Modelo                        | 64        |
| 3.5.1.1  | Mecânica dos sólidos                                             | 64        |
| 3.5.1.2  | Transferência de Calor                                           | 65        |
| 3.5.1.3  | Eletrostático                                                    | 65        |
| 3.5.2    | Excitação Piezelétrica                                           | 67        |
| 3.5.3    | Malha e Outras Propriedades Utilizadas                           | 69        |

|          |                                                                                  |            |
|----------|----------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>4</b> | <b>Análise e Resultados</b>                                                      | <b>72</b>  |
| 4.1      | Análise Experimental                                                             | 72         |
| 4.1.1    | Teste de Tração - Modelo 1                                                       | 72         |
| 4.1.2    | Caracterização da Variação do Sinal pela Variação da Temperatura                 | 74         |
| 4.1.3    | Teste de Tração - Modelo 2                                                       | 75         |
| 4.1.4    | Teste de Tração - Modelo 3                                                       | 77         |
| 4.2      | Simulação e Análise da Frequência Natural                                        | 85         |
| 4.2.1    | $PZT_1$                                                                          | 85         |
| 4.2.2    | $PZT_2$                                                                          | 88         |
| 4.3      | Validação do Modelo Numérico do Corpo de Prova - Com e sem Cerâmica Piezelétrica | 91         |
| 4.3.1    | Tensão Mecânica - Sem PZT                                                        | 91         |
| 4.3.2    | Tensão Mecânica - Com PZT                                                        | 93         |
| 4.3.3    | Transferência de Calor- Sem PZT                                                  | 94         |
| 4.3.4    | Transferência de Calor - Com PZT                                                 | 96         |
| 4.3.5    | Tensão Elétrica e Análise Piezelétrica                                           | 97         |
| 4.3.5.1  | Comparação de Excitação Piezelétrica                                             | 97         |
| 4.3.5.2  | Comparação Propriedades de Simulação                                             | 99         |
| 4.3.5.3  | Variações nas Propriedades da Camada de Adesivo                                  | 102        |
| 4.3.5.4  | Modelo com deformação Mecânica, Temperatura e Tensão Elétrica                    | 104        |
| 4.4      | Análise Comparativa entre o Modelo Simulado e o Experimental                     | 106        |
| 4.4.1    | Tensão Mecânica                                                                  | 106        |
| 4.4.2    | Variação de Temperatura                                                          | 109        |
| 4.4.3    | Tensão Mecânica e Variação de Temperatura                                        | 111        |
| <b>5</b> | <b>Conclusões e Trabalhos Futuros</b>                                            | <b>115</b> |

## Lista de figuras

|             |                                                                                                                                                                                                                       |    |
|-------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1.1  | Figura ilustrativa da configuração dos transdutores ultrassônicos como sanduíche. [Baseado em [13]]                                                                                                                   | 20 |
| Figura 2.1  | Figura ilustrativa da seção transversal da configuração dos transdutores ultrassônicos paralelos, transmitindo o sinal elétrico e convertendo em sinal ultrassônico.[Baseado em [27]]                                 | 24 |
| Figura 2.2  | Geometria do corpo de massa contínua deformável.                                                                                                                                                                      | 26 |
| Figura 2.3  | Equacionamento com relação à propagação da onda. (a) Propagação da onda paralela à tensão aplicada; (b) Propagação da onda perpendicular à tensão aplicada.                                                           | 30 |
| Figura 2.4  | Ilustração da forma de propagação ultrassônica por pulso-eco.                                                                                                                                                         | 36 |
| Figura 2.5  | Ilustração da forma de propagação por <i>pitch-catch</i> .                                                                                                                                                            | 36 |
| Figura 2.6  | Ilustração das curvas de S11 e S22.                                                                                                                                                                                   | 37 |
| Figura 2.7  | Ilustração do acoplador acústico, sendo o da esquerda sem o casamento da impedância e o da direita com o adesivo que faz a transição aumentando o sinal transmitido ao material.                                      | 39 |
| Figura 2.8  | Ilustração 2D da transferência de calor. (Figura baseada na referência [64])                                                                                                                                          | 43 |
| Figura 3.1  | Propriedades do adesivo - Módulo de elasticidade do adesivo por temperatura fornecido pelo fabricante.                                                                                                                | 48 |
| Figura 3.2  | Dimensões dos PZTs utilizados; (a) $PZT_1$ (b) $PZT_2$ .                                                                                                                                                              | 49 |
| Figura 3.3  | $PZT_2$ em 3 perspectiva para colocar em evidência o Wrap.                                                                                                                                                            | 50 |
| Figura 3.4  | Dimensões do CPP fabricado com aço SAE 1020 em milímetro.                                                                                                                                                             | 51 |
| Figura 3.5  | Dimensões do $CP_{CHAPA}$ fabricado com aço INOX em milímetro.                                                                                                                                                        | 52 |
| Figura 3.6  | Dimensões do CPC fabricado com aço INOX em milímetro.                                                                                                                                                                 | 52 |
| Figura 3.7  | $PZT_2$ pós mensurado.                                                                                                                                                                                                | 53 |
| Figura 3.8  | (a) CP antes de lixar e logo após ser usinado, (b) CP após a primeira etapa da lixação e (c) CP após ser lixado, polido, limpo e pronto para a próxima etapa.                                                         | 54 |
| Figura 3.9  | CPP pós marcação do local do $PZT_1$ .                                                                                                                                                                                | 54 |
| Figura 3.10 | Preparação e centralização do CPC para colar o $PZT_2$ .                                                                                                                                                              | 55 |
| Figura 3.11 | As 4 quatro fases de colagem e centralização final do CPC.                                                                                                                                                            | 55 |
| Figura 3.12 | CPC após todo o procedimento de colagem e pronto para uso.                                                                                                                                                            | 56 |
| Figura 3.13 | Problemas encontrados na instrumentação do PZT pequeno. (a) PZT solto após a realização do primeiro teste de tração; (b) PZT após a cura onde o adesivo fluiu para a proteção, impossibilitando a sua instrumentação. | 57 |
| Figura 3.14 | Analizador de Redes da Série VNA, modelo E5061B                                                                                                                                                                       | 57 |
| Figura 3.15 | Câmara Climática Vötsch, modelo VCL 4010.                                                                                                                                                                             | 58 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 3.16 Diagrama de blocos do ensaio. (1) Rede de controle da máquina de tração e do VNA; (2) Máquina de tração; (3) câmera de temperatura controlada; (4) VNA; (5) Corpo de prova.                                                                                                                                             | 59 |
| Figura 3.17 Máquina universal Instron Electroplus E10000 com uma câmara de temperatura acoplada. (1) Rede de controle da máquina de tração e do VNA; (2) Máquina de tração; (3) câmera de temperatura controlada; (4) VNA; (5) Visão detalhada dentro da câmara de temperatura, em evidência o local de inserção do corpo de prova. | 59 |
| Figura 3.18 Gráfico ilustrativo da realização do teste de calibração de temperatura.                                                                                                                                                                                                                                                | 61 |
| Figura 3.19 Gráfico ilustrativo da realização do teste de carga. (a) Teste utilizado nos testes de Modelo 1, com carga até 3 kN e temperatura até 50 °C; (b) Teste utilizado nos testes de Modelo 3, com carga até 6 kN e temperatura até 140 °C.                                                                                   | 62 |
| Figura 3.20 Gráfico ilustrativo da realização do teste de carga utilizado nos testes de Modelo 2, com carga até 60 kN.                                                                                                                                                                                                              | 63 |
| Figura 3.21 Condições de contorno aplicadas para o modelo sólido mecânico em 2D.                                                                                                                                                                                                                                                    | 64 |
| Figura 3.22 Condição de contorno aplicada para a transferência de calor - em todo o sólido, incluindo PZTs.                                                                                                                                                                                                                         | 65 |
| Figura 3.23 Condições de contorno eletroestáticos aplicados no modelo.                                                                                                                                                                                                                                                              | 66 |
| Figura 3.24 Piezelétricos inseridos nos circuitos. (a) Circuito em série com fonte voltagem e resistor de 50 $\Omega$ ; (b) Circuito em paralelo com voltímetro e resistor de 50 $\Omega$ .                                                                                                                                         | 67 |
| Figura 3.25 Equação de excitação do terminal 1 para a solução dependente do tempo.                                                                                                                                                                                                                                                  | 68 |
| Figura 3.26 Equação Wavelet Morlet com 25 períodos antes.                                                                                                                                                                                                                                                                           | 68 |
| Figura 3.27 Modelo 2D simulado.                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 69 |
| Figura 3.28 Malha aplicada nas 3 regiões do corpo de prova.                                                                                                                                                                                                                                                                         | 70 |
| Figura 4.1 Gráfico de S21 - Valores que maximizam o sinal. (a) S21 (dB) $\times$ Deformação ( $\mu m/m$ ); (b) S21 (dB) $\times$ Temperatura (°C)                                                                                                                                                                                   | 72 |
| Figura 4.2 Sinal de S11 e Z1, para todas as 7 temperaturas e 3 deformações (0; 56 $\mu m/m$ ; 111 $\mu m/m$ e 167 $\mu m/m$ ). Sem diferenciação na amplitude dos sinais. (a) S11 (dB) $\times$ Frequência (MHz); (b) Z1 ( $\Omega$ ) $\times$ Frequência (MHz).                                                                    | 73 |
| Figura 4.3 Gráfico dos valores que maximizam o sinal de S21, para a Variação de temperatura da chapa.                                                                                                                                                                                                                               | 74 |
| Figura 4.4 Gráfico de S21 para o CPC6. S21 (dB) $\times$ Deformação ( $\mu m/m$ ).                                                                                                                                                                                                                                                  | 75 |
| Figura 4.5 Gráfico de S21 para o CPC7. S21 (dB) $\times$ Deformação ( $\mu m/m$ ).                                                                                                                                                                                                                                                  | 76 |
| Figura 4.6 Sinal de S11 e Z1 para o CPC6, com ênfase na frequência ideal, para cada deformação mecânica, de 0 $\mu m/m$ até 1250 $\mu m/m$ . Sinal de S11 e Z1 decrescendo conforme aumenta-se a deformação. (a) S11 (dB) $\times$ Frequência (MHz); (b) Z1 ( $\Omega$ ) $\times$ Frequência (MHz).                                 | 76 |

- Figura 4.7 Sinal de S11 e Z1 para o CPC7, com ênfase na frequência ideal, para cada deformação mecânica, de  $0 \mu m/m$  até  $1250 \mu m/m$ . Sinal de S11 e Z1 decrescendo conforme aumenta-se a deformação. (a) S11 (dB)  $\times$  Frequência (MHz); (b) Z1 ( $\Omega$ )  $\times$  Frequência (MHz). 77
- Figura 4.8 Gráfico de S21 para o CPC1. (a) S21 (dB)  $\times$  Deformação ( $\mu m/m$ ); (b) S21 (dB)  $\times$  Temperatura ( $^{\circ}C$ ), para deformação  $= 0 \mu m/m$  78
- Figura 4.9 Gráfico de S21 para o CPC2. ((a) S21 (dB)  $\times$  Deformação ( $\mu m/m$ ); (b) S21 (dB)  $\times$  Temperatura ( $^{\circ}C$ ), para deformação  $= 0 \mu m/m$  78
- Figura 4.10 Gráfico de S21 para o CPC3. ((a) S21 (dB)  $\times$  Deformação ( $\mu m/m$ ); (b) S21 (dB)  $\times$  Temperatura ( $^{\circ}C$ ), para deformação  $= 0 \mu m/m$  78
- Figura 4.11 Gráfico de S21 para o CPC4. (a) S21 (dB)  $\times$  Deformação ( $\mu m/m$ ); (b) S21 (dB)  $\times$  Temperatura ( $^{\circ}C$ ), para deformação  $= 0 \mu m/m$  79
- Figura 4.12 Gráfico de S21 para o CPC5. (a) S21 (dB)  $\times$  Deformação ( $\mu m/m$ ); (b) S21 (dB)  $\times$  Temperatura ( $^{\circ}C$ ), para deformação  $= 0 \mu m/m$  79
- Figura 4.13 Foto do corpo de prova CPC4 antes e depois de ser testado, com evidência no adesivo e transdutor. (a) Antes e (b) Depois. 81
- Figura 4.14 Gráfico de S11 e Z1 para o CPC1, com zoom. (a) S11 (dB)  $\times$  Frequência (MHz) ; (b) Z1 ( $\Omega$ )  $\times$  Frequência (MHz) 82
- Figura 4.15 Gráfico de S11 e Z1 para o CPC2, com zoom. S11 (dB)  $\times$  Frequência (MHz) ; (b) Z1 ( $\Omega$ )  $\times$  Frequência (MHz) 82
- Figura 4.16 Gráfico de S11 e Z1 para o CPC3, com zoom. S11 (dB)  $\times$  Frequência (MHz) ; (b) Z1 ( $\Omega$ )  $\times$  Frequência (MHz) 82
- Figura 4.17 Gráfico de S11 e Z1 para o CPC4, com zoom. S11 (dB)  $\times$  Frequência (MHz) ; (b) Z1 ( $\Omega$ )  $\times$  Frequência (MHz) 83
- Figura 4.18 Gráfico de S11 e Z1 para o CPC5, com zoom. S11 (dB)  $\times$  Frequência (MHz) ; (b) Z1 ( $\Omega$ )  $\times$  Frequência (MHz) 83
- Figura 4.19 Modelo utilizado no COMSOL Multiphysics® para a simulação da frequência natural do  $PZT_1$ . 85
- Figura 4.20 Ilustração dos quatro primeiros modos de vibração do  $PZT_1$ . (a) Modo de vibração desconsiderado -  $S = 3,15361 \times 10^{-9} \pm 0,02145i$ ; (b) Primeiro modo de vibração -  $S = 82997,6425 \pm 1,6428i$ ; (c) Segundo modo de vibração -  $S = 188935,51684 \pm 11,22864i$ ; (d) Terceiro modo de vibração -  $S = 259076,83119 \pm 16,97699i$ . 86
- Figura 4.21 Ilustração dos modos de vibração do  $PZT_1$  com frequência em torno de 1 MHz. (a) 19º modo de vibração -  $S = 1074942,63 \pm 316,55i$ ; (b) 20º modo de vibração -  $S = 1075804,80 \pm 314,22i$ . 87
- Figura 4.22 Gráfico da excitação do  $PZT_1$  - Amplitude (dB)  $\times$  Frequência (MHz). 88

- Figura 4.23 Modelo utilizado no COMSOL®, para a simulação da frequência natural do  $PZT_2$ . 89
- Figura 4.24 Ilustração dos quatro primeiros modos de vibração do  $PZT_2$ . (a) Modo de vibração desconsiderado -  $S = 2,4842 \times 10^{-9} \pm 0,0157i$ ; (b) Primeiro modo de vibração -  $S = 21200,07322 \pm 0,1162i$ ; (c) Segundo modo de vibração -  $S = 78650,4462 \pm 1,6223i$ ; (d) Terceiro modo de vibração -  $S = 91520,0481 \pm 2,6288i$ . 90
- Figura 4.25 Ilustração dos modos de vibração do  $PZT_1$  com frequência em torno de 1 MHz. (a) 36º modo de vibração -  $S = 1017753,15 \pm 297,06i$ ; (b) 37º modo de vibração -  $S = 1036520 \pm 318,46i$ . 90
- Figura 4.26 Gráfico da excitação do  $PZT_2$  - Frequência (MHz)  $\times$  Amplitude (dB). 91
- Figura 4.27 Modelo sem PZT deformado devido atuação da tensão mecânica. (a) 0  $\mu m/m$ ; (b) 42  $\mu m/m$ ; (c) 83  $\mu m/m$ ; (d) 125  $\mu m/m$ . 92
- Figura 4.28 Modelo com PZT deformado devido as tensões. (a) 0  $\mu m/m$ ; (b) 42  $\mu m/m$ ; (c) 83  $\mu m/m$ ; (d) 125  $\mu m/m$ . 93
- Figura 4.29 Modelo sem PZT apresentando a variação de temperatura por escala de cores. (a) 31 °C; (B) 60 °C; (c) 80 °C; (d) 100 °C; (e) 120 °C; (f) 140 °C. 95
- Figura 4.30 Modelo com PZT apresentando a variação de temperatura por escala de cores. (a) 31 °C; (B) 60 °C; (c) 80 °C; (d) 100 °C; (e) 120 °C; (f) 140 °C. 96
- Figura 4.31 Modelo com PZT apresentando a variação da tensão criada no CP devido a condição de contorno fixa e à atuação dos PZTs. (a) 31 °C; (B) 60 °C; (c) 80 °C; (d) 100 °C; (e) 120 °C; (f) 140 °C. 97
- Figura 4.32 Funções inseridas no modelo. (a) As 3 funções comparadas a 2 resultados experimentais; (b) Zoom na área de interesse. 98
- Figura 4.33 Variações no amortecimento associado ao PZT e adesivo. (a) Comparação entre amortecimentos (b) zoom na área de interesse. 99
- Figura 4.34 Variações na amplitude do sinal de excitação, em Volts. (a) Amplitude Variando (b) Zoom na área de interesse. 99
- Figura 4.35 Variação no tamanho da malha - Excitado com a função Wavelet Morlet. (a) 2 tamanhos de malhas diferentes comparados com 2 curvas experimentais; (b) Zoom na área de interesse. 100
- Figura 4.36 Variação no tamanho da malha - Excitado com a função Pulso de seno. (a) 2 tamanhos de malhas diferentes comparados com 2 experimentais; (b) Zoom na área de interesse. 100
- Figura 4.37 Tempo de simulação para a função Wavelet Morlet. (a) 4 tempos de simulação diferentes comparado com 2 experimentais; (b) Zoom na área de interesse. 101
- Figura 4.38 Tempo de simulação para a função pulso de seno. (a) 4 tempos de simulação diferentes comparado com 2 experimentais; (b) Zoom na área de interesse. 101

|                                                                                                                                                                                                                                             |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 4.39 Variação da espessura para a camada de adesivo -<br>Excitado com a função Wavelet Morlet. (a) 5 espessuras para a<br>camada de adesivo diferentes comparados com 2 experimentais;<br>(b) Zoom na área de interesse.             | 102 |
| Figura 4.40 Variação da espessura para a camada de adesivo -<br>Excitado com a função pulso de seno. (a) 5 espessuras para a<br>camada de adesivo diferentes comparados com 2 experimentais;<br>(b) Zoom na área de interesse.              | 103 |
| Figura 4.41 Variação do módulo de elasticidade da camada de ade-<br>sivo - Excitado com a função Wavelet Morlet. (a) 5 módulos de<br>elasticidade diferentes comparados com 2 resultados experimen-<br>tais; (b) Zoom na área de interesse. | 103 |
| Figura 4.42 Variação do módulo de elasticidade da camada de ade-<br>sivo - Excitado com a função pulso de seno. (a) 5 módulos de<br>elasticidade diferentes comparados com 2 resultados experimen-<br>tais; (b) Zoom na área de interesse.  | 104 |
| Figura 4.43 Simulação com função Wavelet Morlet, 140 °C e 6 kN.                                                                                                                                                                             | 105 |
| Figura 4.44 Simulações com variações no tempo inserido antes da ex-<br>citação piezoeletrica. Modelo sem tensão mecânica e temperatura<br>de 140 °C.                                                                                        | 105 |
| Figura 4.45 Simulações para a variação de carga. (a) 0 $\mu m/m$ ; (b)<br>42 $\mu m/m$ ; (c) 83 $\mu m/m$ e (d) 125 $\mu m/m$                                                                                                               | 107 |
| Figura 4.46 Simulações para a variação de carga. (a) Visualização<br>geral da curva; (b) zoom na região de frequência ideal.                                                                                                                | 108 |
| Figura 4.47 Comparação entre o modelo numérico e o resultado<br>experimental do CPC2 e CPC5, para o parâmetro S21.                                                                                                                          | 108 |
| Figura 4.48 Simulações para a variação de temperatura. (a) 31 °C;<br>(b) 60 °C; (c) 80 °C e (d) 100 °C; (e) 120 °C e (f) 140 °C.                                                                                                            | 109 |
| Figura 4.49 Simulações para a variação de temperatura, simulada e<br>experimental.                                                                                                                                                          | 110 |
| Figura 4.50 Valores de máximos do S21 para as temperaturas simu-<br>ladas.                                                                                                                                                                  | 111 |
| Figura 4.51 Simulações no tempo para todas as cargas e temperaturas.                                                                                                                                                                        | 111 |
| Figura 4.52 Simulações no tempo para todas as cargas e temperatu-<br>ras. Com zoom na amplitude.                                                                                                                                            | 112 |
| Figura 4.53 Sinal S21 simulado, para todas as temperaturas e tensão<br>mecânicas aplicadas.                                                                                                                                                 | 112 |
| Figura 4.54 Sinal S21 simulado, para todas as temperaturas e tensão<br>mecânicas aplicadas, com zoom na frequência ideal.                                                                                                                   | 113 |
| Figura 4.55 Valores máximos do sinal S21 experimental, para todas<br>as temperaturas e tensão mecânicas aplicadas.                                                                                                                          | 114 |
| Figura 4.56 Valores máximos do sinal S21 experimental, para todas<br>as temperaturas e tensão mecânicas aplicadas, com zoom na<br>frequência que maximiza a impedância.                                                                     | 114 |



## Lista de tabelas

|            |                                                                                                                                                                              |    |
|------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 2.1 | Impedâncias acústicas e cálculos de coeficientes de transmissão e reflexão [41].                                                                                             | 39 |
| Tabela 3.1 | Propriedade do adesivo.                                                                                                                                                      | 48 |
| Tabela 3.2 | Propriedade Adesivo Epóxi                                                                                                                                                    | 49 |
| Tabela 3.3 | Propriedade piezelétricas - PZT4                                                                                                                                             | 50 |
| Tabela 3.4 | Propriedade Aço                                                                                                                                                              | 61 |
| Tabela 3.5 | Modelos dos testes Realizados.                                                                                                                                               | 63 |
| Tabela 3.6 | Propriedades e Variáveis da Simulação                                                                                                                                        | 70 |
| Tabela 4.1 | Variações da frequência e valores de pico do sinal S21 na temperatura de 30 °C quando os corpos de prova saem da condição indeformada para uma deformação de 125 $\mu m/m$ . | 80 |
| Tabela 4.2 | Variações da frequência e valores de pico do sinal S21 com a temperatura na condição indeformada.                                                                            | 80 |
| Tabela 4.3 | Primeiras Frequências Naturais do $PZT_1$ Modelo 12,5 x 2 mm                                                                                                                 | 87 |
| Tabela 4.4 | Primeiras Frequências Naturais do $PZT_2$ Modelo 25 x 2 mm                                                                                                                   | 89 |
| Tabela 4.5 | Deformação devido a influência da carga                                                                                                                                      | 92 |
| Tabela 4.6 | Comparação da tensão nos modelos com e sem PZT.                                                                                                                              | 93 |
| Tabela 4.7 | Deslocamento do corpo de prova devido à variação de temperatura - Modelo Sem PZT                                                                                             | 95 |
| Tabela 4.8 | Variação da tensão comparando os dois modelos                                                                                                                                | 96 |

*Se você der ao mundo o melhor que pode,  
o melhor voltará para você*

**Fe Del Mundo, .**

# 1

## Introdução

### 1.1

#### Considerações Iniciais

Uma das maiores potências que movimentam a economia mundial é a indústria de óleo e gás, sendo a maior produtora de energia [1]. Em 2016, mais da metade de toda a energia consumida nos EUA foi proveniente da indústria de óleo e gás [2]. E em dados mais recentes, segundo o relatório anual fornecido pela British Petroleum (BP), cerca de 57,3% de toda a energia mundial consumida em 2019 partiu da indústria de óleo e gás [3]. Entretanto, operações para a extração da matéria prima, principalmente *offshore*, são complexas e exigem que toda a estrutura e sistema estejam cooperando para que a extração do petróleo seja realizada com sucesso. O ambiente, muitas vezes inóspito, do mar torna difícil o acesso em algumas regiões, tornando a operação crítica e dependente de componentes adversos [1].

Na operação de plataformas *offshore*, tanto a rede elétrica quanto o monitoramento e o sistema de comunicação são realizados por equipamentos eletrônicos que ficam instalados de forma submersa apoiados no fundo do oceano [4]. Este fato impossibilita o alcance da alimentação de energia em certos locais. Outro fator é que na grande maioria das vezes, este sistema é instalado e operado por ROV (*Remotely Operated Vehicle* - Veículo Operado Remotamente) [5]. Porém, a utilização do ROV é uma operação cara - que pode custar cerca de 50.000 USD por dia [6] - exige a utilização de navios de apoio, com equipe e piloto do equipamento bem treinados. Uma solução para simplificar e expandir este processo, seria transmitir a energia e dados por comunicação sem fio. O que também permitiria a alimentação e a interrogação de sensores em ambientes nos quais não podem ser empregados o uso de penetradores elétricos ou ópticos [7].

A comunicação sem fio tem ganhado notoriedade nas últimas décadas e passou a fazer parte do dia a dia, em aplicações tais como a utilização do Wi-Fi, Bluetooth, 3G, 4G, entre outros. Estima-se que em 2020, cerca de 7,9 bilhões de celulares do tipo Smartphone fizeram o uso destas tecnologias [8]. Porém, estas tecnologias para comunicação, quando se tem a presença de

paredes metálicas, não conseguem ter uma boa propagação, principalmente pelo efeito de blindagem de Faraday [9].

Uma solução para estes meios envoltos por paredes metálicas, como no caso de transmissão de dados, monitoramento e fornecimento de energia elétrica em plataformas de petróleo, é a propagação de ondas acústicas. Pois estas utilizam o próprio meio para propagar ondas mecânicas [10, 11]. Com isso, em uma configuração mais comum, são compostas por dois transdutores do tipo piezocerâmicos em cada parte da estrutura, formando um “sanduíche” estrutural [12], como ilustrado na Figura 1.1.

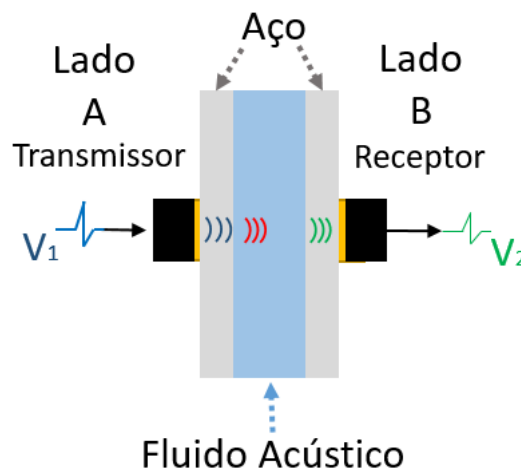


Figura 1.1: Figura ilustrativa da configuração dos transdutores ultrassônicos como sanduíche. [Baseado em [13]]

O lado A representado na Figura 1.1, seria o lado externo, alimentado por uma fonte elétrica disponível, emitindo um sinal e o lado B, o lado interno, recebendo um sinal ultrassônico. Neste caso eles são fixos, cada um de um lado da parede de metal, que serve também como o seu canal acústico, pois é nesta região que a onda ultrassônica se propaga. Com essa configuração, estima-se uma eficiência em transmissão de energia, que varia de 33% a 88% [10, 11], podendo haver uma barreira metálica com espessura de aproximadamente 1,6 mm a 63,5 mm [12, 14], havendo ainda, a possibilidade de ser formada por uma ou mais barreiras de sólidos ou de fluidos acústicos, como no caso da Figura 1.1. Ademais, ambos os Transdutores Ultrassônicos (UT) são fixados na estrutura por adesivos epóxi [12].

No caso de aplicações *offshore*, alguns detalhes devem ser levados em conta, como o local de aplicação do UT, que pode sofrer diretamente com a atuação de diferentes tipos de tensões mecânicas [15], além de variações da temperatura onde o sistema está alocado. A propagação da onda acústica sofre alterações sob a influência dessas condições externas, ou seja, sob deformação mecânica e variação de temperatura o sinal ultrassônico sofre variações e

por consequência, altera a amplitude do sinal podendo até alterar a sua característica [16–18], resultando também numa variação na comunicação dos transdutores e a transmissão de dados.

A caracterização da comunicação do sinal ultrassônico sob a influência e variação destes fatores externos - tensões mecânicas e temperatura - tem extrema importância para garantir a eficácia do sistema. Entendendo o quanto o sinal é afetado por estes fatores externos, é possível estabelecer um padrão de qualidade entre a comunicação dos transdutores. Para se caracterizar a comunicação, além da parte experimental é necessária uma avaliação por métodos de elementos finitos, que ajudará na avaliação e confiabilidade do modelo [19].

## 1.2

### Objetivos

#### 1.2.1

##### Objetivos Gerais

Visando caracterizar o comportamento da comunicação ultrassônica sob influências externas, o objetivo deste projeto é utilizar um corpo de prova de aço com transdutores ultrassônicos do tipo cerâmicas piezelétricas coladas com adesivo epóxi, em formato de *pitch-catch*. E então submetê-lo à influência de diferentes tensões mecânicas estáticas e também a variações de temperatura, para assim, compreender a interferência destes fatores externos na comunicação ultrassônica.

#### 1.2.2

##### Objetivos Específicos

- Caracterização do sinal ultrassônico sob a influência de tensões mecânicas e com a variação da temperatura atuante;
- Análise do parâmetro S11 e da impedância do sistema;
- Análise da comunicação entre transmissor e receptor, realizada pela variação do parâmetro S21;
- Modelagem numérica do parâmetro S21 com o auxílio do programa COMSOL Multiphysics ®;
- Comparação entre o modelo experimental e o numérico simulado.

### 1.3

#### Roteiro da Dissertação

Esta dissertação está organizada da seguinte forma:

Capítulo 1 detalha a contextualização do trabalho em cenário mundial e específico, incluindo os objetivos gerais e específicos deste. No Capítulo 2 é a revisão bibliográfica e contextualização de pesquisas sobre o tema já realizadas e também a fundamentação teórica, onde está explicitado todo o equacionamento necessário para uma análise teórica e matemática do problema. Neste Capítulo também é detalhadas as equações utilizadas pelo programa COMSOL Multiphysics®, na modelagem numérica. O Capítulo 3 apresenta a metodologia dos testes, como foram preparados os corpos de prova, planejamento de testes e a descrição dos equipamentos utilizados. Além disso, detalhes do desenvolvimento e condições de contorno utilizadas no modelo numérico. No Capítulo 4 são apresentadas as análises e resultados dos testes experimentais, do modelo numérico e comparação entre os dois. No Capítulo 5 as conclusões e sugestões de trabalhos futuros são apresentadas.

Nesta seção será detalhado o equacionamento necessário e utilizado para a análise do trabalho.

## 2.1

### O Ultrassom e a Utilização para Transmissão de Dados

A base principal do trabalho tem como princípio ondas ultrassônicas acústicas. O nome ultrassom deriva de uma faixa de frequência, tendo como referência o ouvido do ser humano, que tem a capacidade de escutar a variação de vibração em torno de 15 Hz a 20 kHz [20]. Sendo assim, abaixo deste intervalo, estão as ondas vibracionais que são chamadas de subsônicas e acima, as ultrassônicas, derivando daí o nome ultrassom. Já a ciência do som que descreve esses fenômenos de vibração e as suas propagações tanto em sólidos, como em líquidos e gases, é chamada de acústica [21].

O efeito do ultrassom foi constatado em 1793 por Lazzarro Spallanzini ao observar morcegos, que por terem uma péssima visão, utilizam-se da audição para caçar. Ele percebeu que ao emitirem som, o morcego recebia uma resposta vibracional diferente, que fazia com que o morcego localizasse a presa [22]. Porém, a comunicação por ondas ultrassônicas foi de fato difundida apenas durante a segunda guerra mundial, onde o ultrassom foi utilizado tanto para comunicação entre submarinos emergidos, como para detectar a presença de submarinos e navios inimigos [20].

Logo após a segunda guerra, o ultrassom passou a ser utilizado na medicina, principalmente como o substituto do raio x, e a ter mais visibilidade no mundo [22]. Hoje em dia o ultrassom possui diversas aplicações para além da medicina, tal como na indústria e na engenharia, onde o ultrassom permite monitorar estruturas em tempo real, sem afetar a sua integridade [23–25]. Esse tipo de monitoramento realizado, por ultrassom há 20 anos, vem ganhando mais visibilidade e crescendo significativamente [23], sendo uma forma de ensaio não-destrutivo para a prevenção de falhas [26].

No caso do trabalho o UT utilizado é do tipo piezelétrico. O fenômeno da piezelasticidade foi descoberta em 1880, pelos irmãos Pierre e Jacques Curie, que observaram que ao se aplicar pressão em cristais de quartzo, uma carga

elétrica era gerada. Esse fenômeno, foi chamado de piezelétrico, no qual a palavra "*piezo*" deriva do grego e significa "para pressionar" [20], ou seja, o nome significa: pressionar eletricamente.

Para a transmissão de energia e comunicação, a primeira patente referente ao assunto foi publicada em 1997 [27]. Esta utiliza dois UT horizontalmente alinhados, de modo que cada um está posicionado em um lado da parede metálica, como ilustra a Figura 2.1. Neste caso o UT localizado no lado A da estrutura é excitado com um sinal elétrico tipo onda contínua (CW) e pelo efeito piezelétrico converte-se o sinal elétrico em ondas ultrassônicas, se propagam através da parede. Sendo assim, a segunda cerâmica, lado B, recebe o sinal sônico e o converte novamente em sinal elétrico, permitindo a comunicação e energização do sistema mesmo com a barreira física.

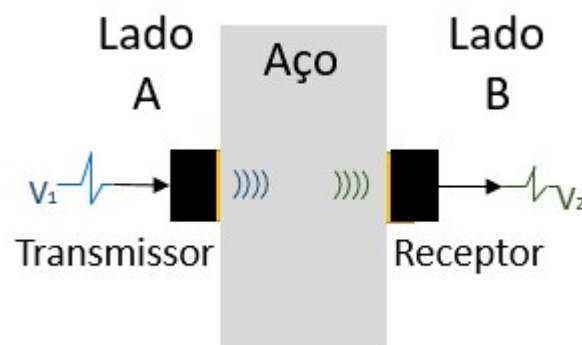


Figura 2.1: Figura ilustrativa da seção transversal da configuração dos transdutores ultrassônicos paralelos, transmitindo o sinal elétrico e convertendo em sinal ultrassônico.[Baseado em [27]]

Uma das primeiras publicações, realizada em 2003, por Hu et al. [28], onde caracterizaram a viabilidade de transmitir energia, em uma configuração semelhante a apresentada na figura 2.1. Porém, o sistema apenas funciona para as primeiras frequências de ressonância, não tendo êxito nas principais faixas de frequências naturais.

Mais tarde, em 2005 e 2006, Sherrit et al. [29,30], publicaram dois artigos, baseados em Hu et al [28], onde eles evidenciam o principal fato deles não terem obtido resultados tão satisfatórios para as principais faixas de frequência naturais, pois não colocaram uma camada de acoplamento, fazendo com que o sinal se refletisse quase por completo. Então, eles estudaram diversos tipos de acoplamento e aplicação de resina. Estimou-se, então que com a aplicação de adesivo epóxi, a eficiência do sistema aumenta 40%.



## 2.2

### Ondas Acústicas e o Efeito Acustoelástico

O efeito acustoelástico é o principal efeito identificado em testes de tração monitorada com ultrassom [31]. Esse estabelece uma relação não-linear entre a tensão em sólidos e a velocidade de onda elástica, ou seja, é o estudo da variação da velocidade de ondas elásticas, quando o corpo está submetido a um estado de tensão inicial [7, 32]. Essencialmente, a medição da tensão usando ultrassom parte do princípio da variação da velocidade ultrassônica em um estado de tensão [7]. Comparando com outras ondas ultrassônicas, as ondas longitudinais, possuem a maior sensibilidade para aplicações sob tensão mecânica [33]. Contudo, a onda longitudinal é relativamente pequena e tem seu decaimento consideravelmente rápido, tornando o efeito acustoelástico pequeno, quando relacionado com a tensão mecânica [33, 34].

Por exemplo, em metais a tensão mecânica causa uma variação na velocidade ultrassônica em torno de apenas 3%, sendo considerada uma pequena variação na medição, o que pode gerar erros grandes na medição da tensão mecânica. Outra questão é que o ultrassom também sofre influência de outros fatores externos, como temperatura, condições de acoplamento, propriedade anisotrópicas dos materiais, microtexturas, entre outros fatores. Desses listados, a temperatura e a condição de acoplamento têm sido os principais fatores que influenciam na medição da tensão mecânica [32, 35]. Para aprimorar esses passos, é preciso entender o modelo matemático entre a medição da tensão e da velocidade [34].

A teoria da elasticidade e sua modelagem teve seu desenvolvimento inicial na década de 1950 por Hughes e Kelly [36]. Anteriormente, o efeito era associado apenas a sólidos perfeitamente elásticos, nos quais, a deformação era função da tensão mecânica e da temperatura e que o modelo era baseado em deformações infinitesimais [31]. A teoria moderna de acustoelasticidade é completada com a teoria geral de deformações finitas e não lineares que foi apresentada por Murnaghan [36]. Porém, para esse efeito ser associado apenas a deformações linear elásticas, o modelo é baseado na lei de Hooke, que é a relação linear entre a tensão e a deformação [37]. Porém, esse modelo não consegue descrever a relação entre a tensão mecânica e as ondas acústicas observadas na prática. [31]

Com observações práticas, fica claro que as ondas acústicas ao se propagarem em um metal provocam deslocamento de partículas que se superpõem às tensões internas existentes. Olhando pela metodologia da relação linear elástica, a resposta seria apenas uma sobreposição de ondas, sem que uma tivesse influência sobre a outra, e após se cruzarem, seguiriam viajando sem ter a

influência de uma sob a outra [31].

No caso acustoelástico não é isso que acontece, a tensão mecânica influencia na onda acústica. E o modelo experimental somente conseguiu ser explicado matematicamente, com a introdução de um modelo não-linear elástico de deformações finitas [31,37]. Ou seja, a relação tensão deformação pode ser uma relação linear. Torna-se, contudo, necessário utilizar relação de deformação e tensão não-linear para poder linearizar um tensor de rigidez equivalente para deformação dinâmica das ondas [38] fazendo com que a formulação exija coeficientes de segunda e terceira ordem [31,35]

A seguir serão detalhadas as equações necessárias para o entendimento da propagação de ondas elásticas.

### 2.2.1

#### Propagação de Ondas Elásticas

Para o equacionamento da propagação de ondas elásticas, deve-se começar com a equação de quantidade de movimento linear no fluido. Esta equação dinâmica parte da segunda lei de Newton [39]. Sendo um volume  $V$  em uma superfície  $S$  de um corpo de massa contínua, como ilustrado na Figura 2.2 [40].

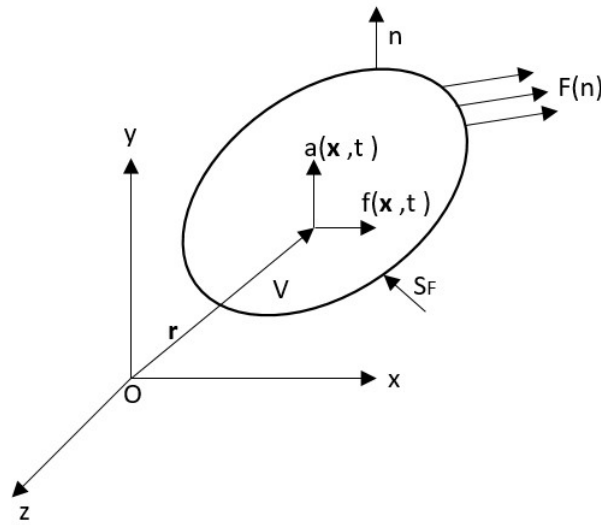


Figura 2.2: Geometria do corpo de massa contínua deformável.

A equação 2-1 representa a equação de balanço linear atuando no volume  $V$  [40,41].

$$\int_S \mathbf{r} \times \mathbf{t}(\mathbf{n}) dS + \int_V \mathbf{r} \times \mathbf{f} dV = \int_V \rho \mathbf{r} \times \ddot{\mathbf{u}} dV \quad (2-1)$$

Onde  $\mathbf{t}(\mathbf{n})$  é um vetor trativo atuando na superfície  $S$ , com uma área  $A$  e um volume  $V$ ,  $\mathbf{f}$  é a força de corpo (força/unidade de volume) atuando no volume,  $\rho$  é a densidade,  $\ddot{\mathbf{u}}$  é a aceleração, que representa a segunda derivada do deslocamento a respeito do tempo, e  $\mathbf{r}$  é o vetor diretor de um ponto  $\mathbf{x}$ , dentro do corpo.

Aplicando o teorema de Gauss na superfície da integral, (equação 2-1), obtém-se a equação de conservação de quantidade de movimento linear, explicitada na equação 2-2.

$$\int_S [\partial(\mathbf{r} \times \mathbf{t}_k) / \partial x_k + \mathbf{r} \times \mathbf{f} - \rho \mathbf{r} \times \ddot{\mathbf{u}}] dV = 0 \quad (2-2)$$

Sabendo que a equação constitutiva de tensão deformação é a definida na equação 2-3:

$$\sigma_{ij} = \lambda \varepsilon_{kk} \delta_{ij} + 2\mu \varepsilon_{ij} \quad (2-3)$$

Na equação 2-3,  $\lambda$  e  $\mu$  são as constantes de Lamè, que são constantes para materiais isotrópicos [41]. Além disso, a tensão também pode ser representada como a razão da força  $f$  pela área da face na qual a mesma é aplicada, como na equação 2-4. Ou então, a tensão também pode ser derivada baseando-se na lei de Hooke, que relaciona a tensão aplicada com a deformação [37], como representado na equação 2-5. Neste caso, a tensão  $\sigma_{ij}$  é o produto da deformação ( $\varepsilon_{ij}$ ) e a matriz de constantes elásticas do material.

$$\sigma_{ij} = \frac{f}{A_s} \quad (2-4)$$

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \varepsilon_{ij} \quad (2-5)$$

A deformação ( $\varepsilon_{ij}$ ), citada na equação 2-5 pode ser descrita por uma variação na área  $A$ , como na equação 2-6.

$$\varepsilon_{ij} = \frac{\Delta A}{A_0} \quad (2-6)$$

Para dar continuidade à modelagem matemática, algumas equações serão necessárias, como outra forma de descrever a deformação mecânica. Também como a equação de velocidade, aceleração e densidade, explicitadas

nas equações 2-7, 2-8, 2-9 e 2-10, respectivamente.

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2}(\partial u_i / \partial x_j + \partial u_j / \partial x_i) \quad (2-7)$$

$$\dot{u}_i = \partial u_i / \partial t \quad (2-8)$$

$$\ddot{u}_i = \partial \dot{u}_i / \partial t \quad (2-9)$$

$$\rho = \rho_0 \quad (2-10)$$

Utilizando as equações de deformação, velocidade, aceleração e densidade (Equações 2-7 a 2-10), com a equação de quantidade de movimento linear (2-2) e a constitutiva tensão-deformação (2-3), chega-se na equação de Navier, equação 2-11.

$$\mu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} + (\lambda + \mu) \frac{\partial^2 u_j}{\partial x_j \partial x_i} + f_i = \rho_0 \ddot{u}_i \quad (2-11)$$

Além disso, a equação 2-11 também pode ser escrita na forma vetorial, como representado na equação 2-12.

$$\mu \nabla^2 \mathbf{u} + (\lambda + \mu) \nabla (\nabla \cdot \mathbf{u}) + \mathbf{f} = \rho_0 \ddot{\mathbf{u}} \quad (2-12)$$

Porém, as equações de Navier não descrevem um equacionamento para deslocamento, mas sim de um campo de pressão em um fluido, que implicitamente está associado com o comportamento de dois tipos de onda. Para conseguir visualizar o comportamento é necessário decompor o deslocamento em potencial escalar ( $\Phi$ ) e vetorial ( $\Psi$ ), utilizando o teorema de decomposição descrito por Helmholtz, explícito na equação 2-13 [41].

$$\mathbf{u} = \nabla \Phi + \nabla \times \Psi \quad (2-13)$$

Aplicando o teorema de Helmholtz, equação 2-13, na equação de Navier vetorial, equação 2-11, considerando as forças de corpo e o gradiente de onda iguais a zero, chega-se na equação 2-14.

$$\nabla [(\lambda + 2\mu) \nabla^2 \Phi - \rho_0 \frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2}] + \nabla \times [\mu \nabla^2 \Psi - \rho_0 \frac{\partial^2 \Psi}{\partial t^2}] = 0 \quad (2-14)$$

A equação 2-14 pode ser separada nas equações de onda, 2-15 e 2-16.

$$\nabla^2 \Phi - \frac{1}{c_p^2} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} = 0 \quad (2-15)$$

$$\nabla^2 \Psi - \frac{1}{c_s^2} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial t^2} = 0 \quad (2-16)$$

Observa-se então que há duas ondas com velocidades distintas, a saber, velocidade longitudinal e a cisalhante, representadas por  $v_l$  e  $v_c$ , respectivamente. Os valores são:

$$v_l = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho_0}} \quad (2-17)$$

$$v_c = \sqrt{\frac{\mu}{\rho_0}} \quad (2-18)$$

As ondas longitudinais são consideradas ondas primárias, que estão relacionadas com o potencial escalar da equação.

### 2.2.2

#### Ondas Elásticas sob Tensão

Para introduzir o modelo do material constitutivo na propagação da onda ultrassônica, baseia-se o equacionamento na teoria da deformação finita da mecânica contínua com o estudo da relação entre o estado elástico sólido e a velocidade de onda elástica [32]. Sendo um material isotrópico e com deformação homogênea, a onda elástica pode ser definida analiticamente pela equação 2-19 [42].

$$\frac{\partial}{\partial X_j} \left[ \left( \delta_{ik} t_{jl}^i + C_{ijkl} \right) \frac{\partial u_k}{\partial X_0} \right] = \rho \ddot{u}_i \quad (2-19)$$

Na equação 2-19,  $\delta_{ik}$  representa o tensor delta de Kronecker,  $X_0$  representa a posição espacial do material em relação a uma configuração inicial, por exemplo, posição em relação à máquina de tração.  $u_k$  é o deslocamento,  $C_{ijkl}$  é a matriz de rigidez equivalente, que depende das propriedades do material tensionado. E por fim, a variável  $t_{jl}^i$ , que é o campo de tensão Cauchy, que está na coordenada inicial abaixo do estado sólido de carga.

Quando a onda é propagada em materiais sólidos, a vibração da partícula pode ser expressa seguindo a equação 2-20 [35].

$$u_i = U_i \exp_j [k (n_j u_0 - v_l)] \quad (2-20)$$

A amplitude de polarização em  $u_0$  é representada como  $U_i$ ,  $n_{\text{índice}}$  é a direção de propagação ultrassônica, nesse caso da equação 2-20 a onda está se propagando em  $j$  - direção  $y$ . Por fim,  $k$  é o número de onda.

Combinando as equações 2-19 e 2-20, chega-se na equação característica da propagação ultrassônica em materiais tensionados, 2-21.

$$\left[ (\delta_{ik} t_{JL}^i + C_{ijkl}) n_j u_l - \rho v^2 \delta_{ik} \right] U_i = 0 \quad (2-21)$$

Observa-se que na 2-21, a velocidade de fase não está relacionada apenas com as constantes elásticas, mas também com a tensão do material [32, 35]. As equações 2-22 e 2-23 permitem relacionar a tensão uniaxial trativa com a velocidade da onda longitudinal, equação 2-17 [32, 35] e as figuras 2.3 (a) e (b) ilustram essas propagações.

$$\rho v_{l_x}^2 = \lambda + 2\mu + \frac{\sigma_x}{3\lambda + 2\mu} \left[ 2l + \lambda + \frac{(\lambda + \mu)(4m + 4\lambda + 10\mu)}{\mu} \right] \quad (2-22)$$

$$\rho v_{l_y}^2 = \lambda + 2\mu + \frac{\sigma_x}{3\lambda + 2\mu} \left[ 2l - \frac{2\lambda}{\mu} (m + \lambda + 2\mu) \right] \quad (2-23)$$

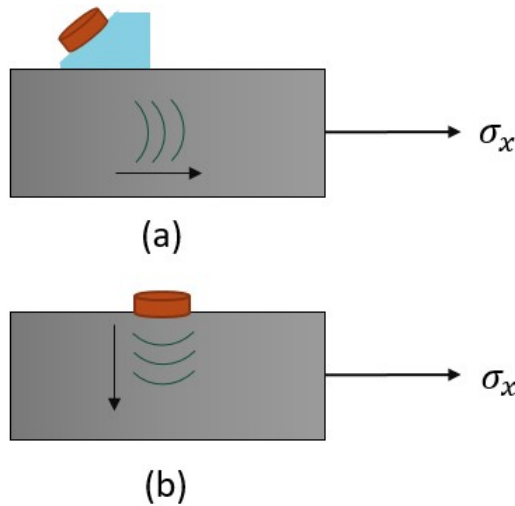


Figura 2.3: Equacionamento com relação à propagação da onda. (a) Propagação da onda paralela à tensão aplicada; (b) Propagação da onda perpendicular à tensão aplicada.

Sendo  $\lambda$  e  $\mu$  as constantes elásticas de Lamé de segunda ordem em meios isotrópicos, e  $l$  e  $m$  são constantes elásticas de terceira ordem, ou também conhecidas como contantes de Murnaghan. A equação 2-22 é o equacionamento para uma tensão trativa atuando no eixo  $x$  ( $\sigma_x$ ) e a propagação da onda ultrassônica também paralela ao eixo  $x$ , como representado na figura 2.3 (a). Já a equação 2-23 é o equacionamento para uma tensão trativa, também senso aplicada no eixo  $x$  e a propagação da onda ultrassônica perpendicular à esta tensão, como é apresentado na figura 2.3 (b), sendo válida para  $v_{ly}$  e  $v_{lz}$  [42].

### 2.2.3

#### Ondas Elásticas sob Temperatura

A temperatura do meio no qual o sistema está instalado influencia diretamente na velocidade [35]. Tendo destaque pois se altera em grande escala em ambientes abertos e/ou inóspitos e também faz variar significativamente o comprimento de onda. [18]

Geralmente, o efeito da temperatura é mensurado e empiricamente removido, porém ao realizar isto, certos efeitos provenientes da alternância da temperatura não são considerados, como por exemplo, podem comprimir ou alongar a resposta do sinal, ou até alterar a aparência do sinal [43]. A vantagem é que a velocidade longitudinal da onda ultrassônica varia linearmente com a variação de temperatura, e podem ser relacionadas como expressa na equação 2-24 [35].

$$v_l = k_l \Delta T + v_{lT_0} \quad (2-24)$$

Onde  $K_l$  é a sensibilidade à temperatura da velocidade longitudinal da onda,  $v_{lT_0}$  é a velocidade longitudinal para a temperatura de referência ( $T_0$ ), e por fim,  $\Delta T$  é a variação da temperatura de acordo com a temperatura de referência.

## 2.3

### Materiais piezelétricos

A piezeletricidade é uma propriedade presente em alguns materiais cristalinos, tais como, o quartzo e a perovskita, em cerâmicas a base de titanato de bário, ou então o mais usual, o titanato zirconato de chumbo, também conhecido como PZT [44, 45]. Estas cerâmicas pertencem à classe dos materiais ferroelétricos, que são materiais que possuem uma polarização espontânea em uma faixa de temperatura. Sua polarização pode ser invertida com a apli-

cação de um campo elétrico externo. Porém, quando recém produzidos, são isotrópicos e apresentam uma orientação macroscópica da polarização espontânea. Por isto, para serem utilizados como sensores piezelétricos, precisam ser polarizados sob a aplicação de campos elétricos elevados (kV/mm) à alta temperatura, em torno de 90°C, sendo assim, possível escolher a direção da polarização macroscópica [45].

Desta forma, a principal característica de uma cerâmica piezelétrica é apresentar uma polarização elétrica quando o material é submetido a uma deformação ou a carga mecânica. Em outras palavras, surge cargas e potenciais elétricos durante a aplicação de tensões e deformações mecânicas. Este fenômeno é denominado de efeito piezelétrico direto, também observa-se que a energia elétrica aplicada se transforma em energia mecânica, o que recebe o nome de efeito piezelétrico inverso [44].

Os materiais piezelétricos são exibidos com cerca de 20 a 32 classes de cristais e são sempre associados com cristais não-centro-simétricos [46], possuindo então a relação mecânica sendo simétrica e a relação elétrica antissimétrica. Todos os efeitos piezelétricos ocorrem em materiais que possuem uma rede assimétrica, de tal forma que é possível produzir momentos de dipolos elétricos enquanto se tem alguma deformação, sendo assim, todos os piezelétricos são anisotrópicos [47].

Para as equações constitutivas piezelétricas, primeiro entende-se que o campo elétrico  $E$  produz polarização dos átomos e moléculas, que incrementa a densidade do fluxo magnético ( $D$ ) [45]. Onde o vetor de polarização elétrica é definido como o momento de dipolo por unidade de volume, como pode-se observar pela equação 2-25.

$$\bar{P} = \epsilon_0 \chi_e \bar{E} \quad (2-25)$$

Sendo  $\epsilon_0$  a permissividade elétrica no vácuo e  $\chi_e$  é a susceptibilidade elétrica do meio. Com isso, define-se o campo de deslocamento elétrico  $\bar{D}$ , como apresenta a equação 2-26. [45]

$$\bar{D} = \epsilon_0 \bar{E} + \bar{P} = \epsilon_0 (1 + \chi_e) \bar{E} \quad (2-26)$$

Onde a permissividade do vácuo é  $\epsilon_0 = 8,854.10^{-12}$  [F/M] e o campo elétrico  $E_i$  é derivado do potencial elétrico escalar, ou seja,  $E_i = -\phi_{,i}$ . Para as considerações mecânicas, começa-se a modelar uma força trativa  $t(n)$  e um



campo de deformações mecânicas - tensor de deformações ( $\varepsilon_{ij}$ ) que foi definido na equação 2-7 [48].

A massa e o volume de todos os materiais em questão não sofrem variações significativas durante a realização dos testes. Por esse motivo, a densidade será para todo o estudo e para todos os materiais, constante. Sendo assim, a equação de balanço de momento linear, que é uma consideração de Navier (equação 2-2), pode ser representado pela equação 2-27.

$$\sigma_{ij,i} = \rho \ddot{u}_j \quad (2-27)$$

Para a modelagem da piezeletricidade linear, começa-se com a conservação de energia do transdutor, que deriva da primeira lei da termodinâmica, que afirma que a variação da energia interna é igual a diferença do trabalho realizado com a quantidade de calor absorvido [49]. Sendo assim, a densidade energética armazenada para um material piezelétrico - variável  $\dot{U}$  - está representada na equação 2-28 [48].

$$\dot{U} = \sigma_{ij} \dot{\varepsilon}_{ij} + E_i \dot{D}_i \quad (2-28)$$

A equação 2-29 mostra a entalpia de densidade elétrica, onde esta é uma função de duas variáveis,  $H = H(\varepsilon_{kl}, E_k)$ .

$$H = U - E_i D_i \quad (2-29)$$

Derivando a equação 2-29 e acrescentando a equação 2-28, chega-se na equação 2-30.

$$\dot{H} = \sigma_{ij} \dot{\varepsilon}_{ij} + D_i \dot{E}_i \quad (2-30)$$

Se  $D_i \dot{E}_i$  é constante, então:

$$\sigma_{ij} = \frac{\partial H}{\partial \varepsilon_{ij}} \quad (2-31)$$

E se,  $\sigma_{ij} \varepsilon_{ij}$  é constante, então:

$$D_i = \frac{-\partial H}{\partial E_i} \quad (2-32)$$

Com isso, a entalpia do sistema devido à teoria do piezelétrico linear é dada pela equação 2-33:

$$H = \frac{1}{2} C_{ijkl}^E \varepsilon_{ij} \varepsilon_{kl} - e_{kij} E_k \varepsilon_{ij} - \frac{1}{2} \epsilon_{ij}^S E_i E_j \quad (2-33)$$

Onde  $C_{ijkl}^E$  é a matriz de constantes elásticas do material, mesma matriz apresentada para a equação 2-19 para a modelagem do problema elástico,  $e_{kij}$  é a matriz de acoplamento e  $\epsilon_{ij}^S$  é a matriz de permissibilidade elétrica. Usualmente, são encontradas 21 constantes elásticas independentes, 18 constantes piezelétricas independentes e 6 constantes dielétricas independentes, em formas matriciais. Por fim, combinando as equações 2-31, 2-32 e 2-33, chega-se na equação 2-34, que é composta por uma dupla de equações, que são as constitutivas piezelétricas [47].

$$\begin{cases} \sigma_{ij} = C_{ijkl}^E \varepsilon_{kl} - e_{kij} E_k \\ D_i = e_{jkl} \varepsilon_{kl} + \epsilon_{ij}^S E_k \end{cases} \quad (2-34)$$

As equações constitutivas piezelétricas, permitem, por fim, uma modelagem do transdutor, relacionando a deformação mecânica com a tensão. Esse equacionamento é o utilizado pelo programa COMSOL Multiphysics®, *software* utilizado para a validação numérica do modelo. Na seção 2.4, serão apresentados mais detalhes sobre esta modelagem. Outros conceitos e equações piezelétricas serão necessários para a elaboração do trabalho, e estas vão estar detalhadas a seguir.

### 2.3.1

#### Frequência Natural

Um sistema dinâmico, perturbado, que oscila sobre sua posição de equilíbrio, possui frequências específicas, que são chamadas de frequências naturais [50]. A frequência natural para sistemas não amortecidos é uma relação entre a rigidez do sistema ( $k$ ) e a inércia, dada pela equação 2-35.

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (2-35)$$

Em sistemas de vibração livre subamortecidos, as frequências naturais são respostas harmônicas em função da frequência natural não amortecida ( $\omega_n$ ) e o fator de amortecimento ( $\zeta$ ), sendo representado na equação 2-36 [51].

$$\omega_d = \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2} \quad (2-36)$$

Onde o fator de amortecimento é adimensional e tem valor de  $0 < \zeta < 1$ . Sendo que, quanto mais próximo de 1, maior é o seu amortecimento, ou seja, mais próximo do valor 1, mais rápido a energia do sistema, se dissipará. A resposta em frequência fornecida para um sistema sub-amortecido parte de uma relação de autovalores e autovetores, onde a equação tem a resposta com a característica da equação 2-37 [50].

$$S = -\sigma \pm j\omega_d \quad (2-37)$$

Na equação 2-37,  $\sigma$  representa a parte real da frequência, que tem como relação com o fator de amortecimento com a frequência natural não amortecida, representada pela equação 2-38.

$$\sigma = \zeta\omega_n \quad (2-38)$$

Estas relações serão utilizadas junto com simulações geradas pelo *software* COMSOL®, para conseguir chegar-se nas frequências naturais e estas estão apresentadas na seção 4.

Além desse conceito básico para frequências naturais, sabe-se que cerâmicas piezelétricas vibram em 2 modos fundamentais, o modo radial e o longitudinal (esse também é chamado do modo cisalhante) [52]. O modo radial, excita principalmente por conta de vibrações mecânicas geradas no meio de propagação, enquanto o modo longitudinal domina ondas cisalhantes. No caso em questão, será utilizado um PZT no formato de disco - que será descrito melhor no Capítulo 3 - e para PZTs com estas geometrias, o modelo de ondas longitudinais aparecem em um ou duas ordens de magnitudes menores que a cisalhante.

### 2.3.2

#### Transmissão do sinal piezelétrico

A propagação da onda ultrassônica nesse trabalho é realizada por transdutores ultrassônicos do tipos cerâmicas piezelétricas PZT. A transmissão ultrassônica, geralmente é emitida por um pulso elétrico curto no UT, que é convertido em ondas acústicas [23].

Existem diversas técnicas para se coletar a resposta ultrassônica, como por exemplo, o pulso-eco, que usa o mesmo transdutor ultrassônico como transmissor e receptor. Nesse caso, o UT emite um pulso, que propaga-se no meio. Ao se colidir com alguma barreira, tal como um defeito apresentado na Figura 2.4 em azul claro ou uma troca de impedância acústica, há reflexão da onda em direção ao mesmo transdutor [53]. Na Figura 2.4, pode-se visualizar esse processo.

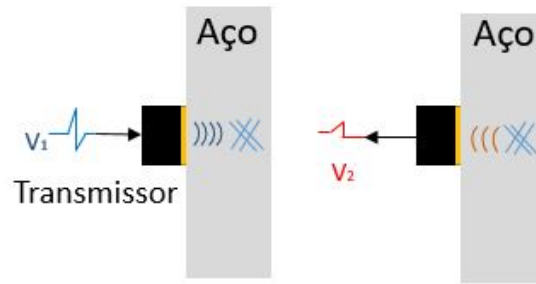


Figura 2.4: Ilustração da forma de propagação ultrassônica por pulso-eco.

No modelo *pitch-catch*, utiliza-se o transmissor e o receptor distintos. Cada um fica em uma zona do meio. O pulso elétrico é transformado pelo transmissor em onda ultrassônica a qual se propaga pelo material. O receptor - que de preferência deve estar o mais alinhado possível com o transmissor - faz o processo inverso, transformando a onda ultrassônica em pulso elétrico [23]. Esse é o modelo utilizado para a transferência de dados e está ilustrado na Figura 2.5.

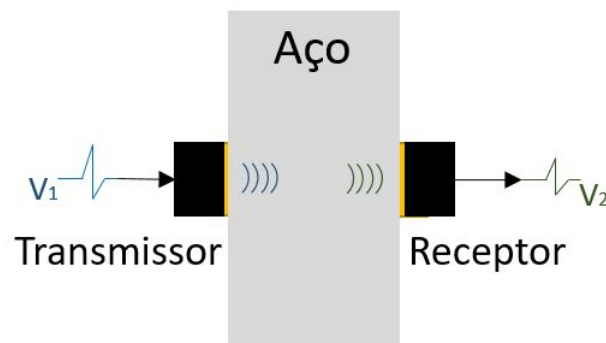


Figura 2.5: Ilustração da forma de propagação por *pitch-catch*.

A Figura 2.5 apresenta o modelo que será utilizado nos testes deste trabalho. Um pulso elétrico, denominado  $V_1$ , excita um dos PZTs que está acoplado no corpo de prova. Este PZT transforma o pulso de sinal elétrico em uma onda ultrassônica que irá se propagar pelo aço. Após ultrapassar toda esta região, o PZT receptor receberá esta onda ultrassônica e a transformará novamente em um sinal elétrico - representado na Figura como  $V_2$  [10,54].

A quantidade de energia transmitida entre os transdutores depende de diversos fatores, por exemplo, a forma do sinal de excitação e a frequência de excitação [52, 54]. A transmissão de energia é aperfeiçoada, conforme o transdutor é excitado próximo da sua frequência de ressonância, ou seja, quando se está na frequência ideal o PZT transmite mais energia [54].

No caso em questão, os dois transdutores serão excitados por pulsos de senoidais consecutivos que fazem uma varredura em frequência por uma janela em Hz previamente determinada, de acordo com a frequência de ressonância de interesse. Os sinais emitidos pelos transdutores variando na frequência são chamados de parâmetros de espelhamento  $S_{11}$  e  $S_{22}$ , que são excitados com um intervalo de 3 ms de um para o outro. O vale das curvas de  $S_{11}$  e  $S_{22}$  é onde ocorre a maior transmissão de energia. Esse valor também é o valor onde a impedância de transição é maximizada. A Figura 2.6 ilustra a propagação do sinal.

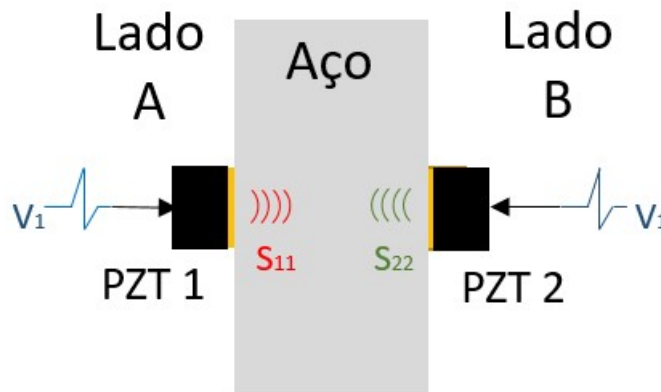


Figura 2.6: Ilustração das curvas de  $S_{11}$  e  $S_{22}$ .

Com a Figura 2.6 é possível observar que ambos os UT são excitados com o mesmo pulso elétrico. Porém, no meio de propagação a onda se propaga com velocidades diferentes. Isto ocorre por variações na frequência de ressonância que podem ser geradas devido a alguns fatores externos, tais como a má aderência do sistema, como o surgimento de bolhas ou alguma variação na geometria ou propriedade do material. Por este motivo, apenas analisar a máxima energia pelo vale dos parâmetros de espelhamento  $S_{11}$  ou  $S_{22}$  em sistemas de transmissão de energia e comunicação entre os UT é vago. É

necessário compreender a comunicação entre o emissor e o receptor, esta relação é feita pelo parâmetro chamado de  $S_{21}$ , quando compara-se a resposta do PZT1 como transmissor e o PZT2 como receptor, ou  $S_{12}$ , quando o contrário - PZT2 como transmissor e o PZT1 como receptor.

Essa relação entre transdutor-receptor é dada por uma função logarítmica da razão da transformada de Fourier do sinal que o UT receptor está recebendo pela transformada de Fourier do sinal que o UT está sendo excitado. Esta relação está expressa na equação 2-39.

$$S_{21} = 20 \log \left( \frac{fft(V2)}{fft(V1)} \right) \quad (2-39)$$

Os sinais  $S_{11}$ ,  $S_{22}$ ,  $S_{21}$  e  $S_{12}$ , são fornecidos pelo equipamento denominado VNA (*Vector Network Analyzers*), que tem as suas propriedades e características descritas no Capítulo 3.

### 2.3.3

#### Impedância do Transdutor Piezelétrico

A amplitude da onda ultrassônica ao se propagar pelo meio espera-se que esta se divida em duas componentes, uma parte que será propagada para o meio e outra que será refletida, retornando para o receptor. A amplitude dessa onda é uma relação entre o produto da densidade pela velocidade longitudinal da onda [41]. Obtém-se os coeficiente de transmissão e reflexão com uma relação entre as impedâncias do meio de propagação e do UT. Essas estão apresentadas nas equações 2-40 e 2-41 [14, 41, 52, 55].

$$T = \frac{2 \times z_2}{Z_1 + z_2} \quad (2-40)$$

$$R = \frac{z_2 - z_1}{z_1 + z_2} \quad (2-41)$$

A equação 2-40 apresenta o coeficiente de transmissão  $T$  que é relação entre as impedâncias do meio de propagação,  $z_2$  com a impedância do UT  $z_1$ . A equação 2-41 é a equação para o coeficiente de reflexão  $R$ . Com esses coeficiente, percebe-se que controlando a impedância acústica é possível controlar a relação entre a onda refletida e a propagada, melhorando a qualidade do sinal transmitido [52].

As impedâncias acústicas para o meio de propagação, aço inox e para o

UT do tipo cerâmica piezelétrica tipo 4 e os cálculos de  $T$  e  $R$  estão na Tabela 2.1.

Tabela 2.1: Impedâncias acústicas e cálculos de coeficientes de transmissão e reflexão [41].

| Material | Impedância (Z) | Coeficiente de Transmissão (T) | Coeficiente de Reflexão (R) |
|----------|----------------|--------------------------------|-----------------------------|
| Aço Inox | 47 MRayl       | 1,3                            | 0,13                        |
| PZT4     | 36,2 MRayl     |                                |                             |

### 2.3.4

#### Acoplamento Acústico

A confiabilidade do acoplamento do sistema é uma peça fundamental para garantir a comunicação entre os dois sensores, e neste caso, o adesivo que vai aderir os sensores no meio faz parte deste processo. Contudo, no caso dos sensores de ultrassom, o adesivo não funciona apenas para aderir o sensor no corpo que vai ser analisado, ele também funciona como um acoplador acústico. A ausência desse acoplador acaba na geração de ar entre o UT e o meio de propagação fazendo com que se perca energia nessa transição, o que pode gerar uma baixa amplitude do sinal, dificultando a sua leitura ou então impedindo completamente o sinal de ser transmitido [52].

Quando um sensor ultrassônico é utilizado diretamente no corpo do aço, ou seja, sem o acoplador acústico, estima-se que menos de 20% do sinal seja transmitido para o meio, sendo o restante espelhado de volta para a cerâmica transmissora. Muitas vezes esta má aderência faz com que cerâmica vibre até dissipar todo o sinal, muitas vezes em forma de calor [56]. A Figura 2.7 apresenta uma ilustração do acoplador acústico.



Figura 2.7: Ilustração do acoplador acústico, sendo o da esquerda sem o casamento da impedância e o da direita com o adesivo que faz a transição aumentando o sinal transmitido ao material.

Em muitos casos, esse acoplamento é feito com gel a base de álcool, para transmissão de energia e monitoramento da estrutura, o sensor fica aderido à superfície do equipamento por tempo indeterminado. Por isto o sensor é instalado de forma permanente na superfície e deve-se escolher um adesivo que faça corretamente esse acoplamento e permita uma melhor transmissão.

Estima-se que a espessura ideal, seja a menor possível afim de diminuir as reflexões. Consegue-se estimar a espessura de adesivo como representado na equação 2-42 [14, 52, 57].

$$Th_{Adesivo} = \frac{\lambda_{Adesivo}}{39} \quad (2-42)$$

Com a equação 2-42, a ordem de grandeza da espessura da camada de adesivo é em torno de 30 a 150  $\mu m$ . Mesmo com esta geometria significativamente pequena, quando comparado com a espessura do transdutor de 2 mm e do meio de propagação de 6 mm, o acoplamento gera um grande impacto na transmissão do sinal [31, 52].

Existem diversos métodos de acoplamento, sendo que o mais usual é o realizado por gel a base de água, como nos casos dos exames médicos. Entretanto, no caso de monitoramento da integridade estrutural, como também nos casos de inspeção de dutos ou no objetivo do trabalho, i.e. para transmissão de dados em regiões de difícil acesso, precisa-se de alguma medida na qual o sensor fique de forma definitiva acoplado ao equipamento. Para isso, esses sistemas geralmente são instrumentados com adesivos ou colas, que para ter uma boa aderência e resultado..

A primeira coisa em um estudo de adesivo é ver a sua classificação, que é feita a partir do objetivo. Podem ser classificados por: [58]

- Função - Estruturais ou Não-Estruturais
- Composição - Sintéticos ou Naturais
- Método de reação (cura)
- Aplicação
- entre outros

Os adesivos utilizados neste trabalho serão os classificados como adesivos estruturais, pois são adesivos de grande resistência e desempenho e que geralmente apresentam uma excelente resistência ao corte e a ambientes adversos, nos quais, tem a principal função de manter estruturas conectadas, sendo capazes de resistir a cargas elevadas, sem grandes deformações [59]. Para



compreender melhor o adesivo ideal a ser utilizado, a seguir serão detalhadas algumas características principais de alguns tipos de adesivos estruturais mais comuns na indústria.

### 2.3.5

#### Adesivos Epóxi

A resina epóxi começou efetivamente a ser comercializada há cerca de 65 anos, porém existem indícios de que ela teria sido desenvolvida em torno de 1891. Hoje o epóxi tem as mais diversas aplicações industriais, principalmente nas que exigem técnicas avançadas [60]. São encontrados no mercado tanto na forma de mono ou poli componentes, sendo os poli componentes geralmente constituídos de dois componentes, uma resina e um catalisador. [59]

O processo de cura de resinas epóxi geralmente não precisa de aplicação de pressão, e o tempo de cura deste varia bastante, podendo depender de sua viscosidade ou da quantidade de catalisador, geralmente estas partes variam de acordo com as especificações do fabricante. Possuem boa resistência mecânica, não produzem agentes voláteis durante o seu processo de cura, além de apresentarem baixa redução de tamanho no pós-cura [58].

### 2.3.6

#### Adesivos Fenólicos

Os primeiros estudos com adesivos fenólicos tiveram início em 1872, por A. Von Baeyer, como uma mistura de fenol com formaldeído [61], por isto são considerados os primeiros adesivos estruturais [58]. Sua cura deve ser realizada em altas temperaturas e com aplicação de pressão, pois durante o processo ocorre liberação de água que gera vazios nas superfícies e impossibilita a boa aderência. A vantagem é que geralmente são adesivos de baixo custo e com boa resistência mecânica e a altas temperaturas.

### 2.3.7

#### Adesivos Cianoacrilatos

São adesivos dentro da categoria dos adesivos acrílicos e também são conhecidos como supercola. Foram desenvolvidos durante a segunda guerra pelo químico Harry Coover [62]. São líquidos monocomponentes de cura rápida e a temperatura ambiente e que não precisam de solventes ou catalisadores. São adesivos com alta resistência à tração, apesar de serem frágeis. [63]

## 2.4

### Modelo Numérico

Visando uma validação do modelo e garantindo a sua confiabilidade, foi desenvolvido um modelo numérico no *software* COMSOL Multiphysics®, baseado no método de elementos finitos. O modelo é composto por 4 partes principais de construção: mecânica sólida; eletroestática; transferência de calor em sólidos; e equações piezelétricas.

Nesta seção estão detalhados as equações utilizada pelo *software*, além de detalhes do processamento.

#### 2.4.1

##### Mecânica dos Sólidos

O equacionamento do modelo mecânico parte da equação de movimento, descrito na seção 2.2.1 na equação

$$\rho \ddot{u} = \nabla \cdot \sigma_{ij} + fV \quad (2-43)$$

Na equação 2-43,  $\nabla \cdot \sigma_{ij}$  é o primeiro vetor de Piola-Kirchhoff, sendo o termo de tensor de tensões  $\sigma_{ij}$  o segundo tensor de Piola-Kirchhoff. Como todas as medições experimentais foram em regime permanente para a temperatura e tensão mecânica, ou seja, sem variações durante a medição, as simulações foram consideradas estacionárias para estas duas grandezas. Por isto, a aceleração é nula e, sendo assim, a equação 2-43 é simplificada pela equação 2-44.

$$0 = \nabla \cdot \sigma_{ij} + fV \quad (2-44)$$

Por ser um material elástico linear o tensor de tensões  $\sigma_{ij}$  pode ser representado segundo a equação 2-5. O tensor de tensões  $\sigma_{ij}$ , quando combinado com o vetor normal ao plano aplicado, como ilustrado na Figura ??, resulta na tensão normal, da força aplicada sob a área, que seguem as equações 2-3 e 2-4 da seção 2.2.1. A Figura ?? apresenta a superfície onde uma força  $\mathbf{f}$  é aplicada à uma área  $A$ , e o vetor normal à esta área  $\mathbf{t}(\mathbf{n})$ .

Retornando para a análise da equação 2-5,  $\varepsilon_{el}$  é a deformação elástica, que neste caso é a diferença da deformação total menos a deformação inelástica,  $\varepsilon_{el} = \varepsilon - \varepsilon_{inelástica}$ . A deformação total é metade do descolamento total, definido pela equação 2-7 apresentada na seção 2.2.1.

### 2.4.2

#### Transferência de Calor

O equacionamento da temperatura definido no domínio do sólido correspondente deriva da lei de Fourier, que pode também contribuir para fontes de calor. A lei de Fourier fornece a taxa de transferência de calor por condução [39], possibilitando também, calcular a quantidade de energia transferida por unidade de tempo, como pela equação 2-45 [64].

$$q''_x = -k_T \frac{dT}{dx} \quad (2-45)$$

Na equação 2-45,  $q''$  é o fluxo de calor por unidade de área, ( $W/m^2$ ),  $k_T$  é a condutividade térmica ( $W/mK$ ) e  $\frac{dT}{dx}$  é o gradiente de temperatura. O calor é transferido da região mais quente para a região mais fria, e esse processo é representado pelo sinal negativo na equação 2-45. A Figura 2.8 ilustra a transferência em um caso estacionário, onde  $T_1$  é a região onde o fluxo de calor  $q''$  está sendo inserido, com uma relação linear entre a variação de temperatura [64].

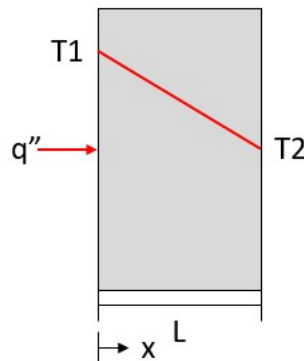


Figura 2.8: Ilustração 2D da transferência de calor. (Figura baseada na referência [64])

A equação de Fourier é uma generalização baseada em evidências experimentais, portanto não pode ser derivada a partir de princípios fundamentais [64]. Além disto, equação de Fourier é uma expressão vetorial que indica qual o fluxo térmico e o sentido da temperatura mais baixa.

Em sólidos, a transferência de calor pode se originar de duas formas: ou por elétrons livres ou por arranjos de átomos. Em materiais condutores, como o aço, a transferência de calor por elétrons livres - condução - predomina. Nesses casos, a equação de Fourier, se expande na equação 2-46.

$$\mathbf{Q} = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p \mathbf{u} \cdot \nabla T + \nabla \cdot \mathbf{q} \quad (2-46)$$

Na equação 2-46,  $\rho$  é a densidade,  $C_p$  é a capacidade de calor a pressão constante ( $J/(kg.k)$ ),  $\mathbf{u}$  é o campo de velocidade, definido pelo movimento de translação ( $m/s$ ),  $\mathbf{Q}$  é a fonte de calor ( $W/m^3$ ) e por fim,  $\mathbf{q}$  é o fluxo de calor. No COMSOL®, a equação de transferência de calor em sólidos, equação 2-46, é multiplicada pela espessura em Z ( $d_z$ ), como representado na equação 2-47.

$$d_z \cdot \mathbf{Q} + q_0 + d_z Q_{T_{ed}} = d_z \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + d_z \rho C_p \mathbf{u} \cdot \nabla T + \nabla \cdot \mathbf{q} \quad (2-47)$$

As constantes  $q_0$  e  $Q_{T_{ed}}$  são fluxos de calor iniciais ou fontes de calor externas, na qual o corpo está sob influência antes da análise. Como o sistema experimental foi calibrado antes de começar os experimentos, na simulação estas variações foram consideradas nulas. O vetor fluxo de calor ( $\mathbf{q}$ ) também é definido com uma relação do gradiente de temperatura com a condutividade térmica - definido pela variável  $k$  - esta relação está descrita na equação 2-48.

$$\mathbf{q} = -k_T \nabla T \quad (2-48)$$

A condutividade térmica é definida pelas propriedades do material. Para materiais isotrópicos, o caso do aço,  $k_T$  é um valor escalar, que pode ser usado para definir a diagonal de um tensor de condutividade térmica. A lei de Fourier assume que o tensor de condutividade térmica, é simétrico e que uma não simetria pode gerar resultados fisicamente impossíveis. Outra propriedade que é definida pelas propriedades do material é o coeficiente de dilatação térmica. Esse quantifica quanto que o corpo dilata-se de acordo com a influência da variação de temperatura. A relação da variação de temperatura, do coeficiente de dilatação térmico e da geometria é dado pela equação 2-49 [64].

$$\Delta L = L_0 \cdot \alpha \cdot \Delta T \quad (2-49)$$

A equação 2-49 é a equação para dilatação linear, ou seja, quanto a dilatação do CP submetida à temperatura varia o comprimento inicial  $L_0$ . Nesta mesma equação tem a variável  $\Delta L$ , que é o quanto que esse CP variou.  $\alpha$  é o coeficiente de dilatação térmica e  $\Delta T$  é a variação de temperatura. Para

uma dilatação de superfície, a equação é 2-50

$$\Delta S = S_0 \cdot \beta \cdot \Delta T \quad (2-50)$$

Sendo  $\beta$  o coeficiente de dilatação superficial, com o valor de  $\beta = 2 \cdot \alpha$ ,  $S_0$  é a área da seção transversal inicial, ou seja, antes de sofrer variações na temperatura e  $\Delta S$  é a área da seção transversal, pós dilatação térmica.

### 2.4.3

#### Eletróestática

Para início da montagem do modelo eletróestático, utiliza-se duas principais equações, a equação de campo elétrico e a de deslocamento elétrico, definidas respectivamente em 2-51 e 2-52.

$$\mathbf{E} = \nabla V \quad (2-51)$$

$$\mathbf{D} = \rho_V \quad (2-52)$$

Na equação 2-51,  $\mathbf{E}$  é o vetor campo elétrico e  $V$  é a tensão elétrica. E na equação 2-52,  $\mathbf{D}$  é o deslocamento elétrico e  $\rho_V$  é a densidade de fluxo elétrico, que em algumas notações também é representado como  $\bar{D}[C/m^2]$ . Além disto, a equação constitutiva que relaciona o campo elétrico com o deslocamento elétrico é apresentado na equação 2-53.

$$\mathbf{D} = \epsilon_0 \epsilon_r \mathbf{E} + P_{PZT} \quad (2-53)$$

Sendo  $\epsilon_r$  a permissividade relativa e  $\mathbf{P}_{PZT}$  alguma tensão elétrica que possa existir no PZT antes da simulação. Como no processo experimental, o PZT é forçado a fazer curto-circuito. Antes de iniciar o teste, considera-se  $P_{PZT} = 0$ , tornando então,  $\mathbf{D} = \epsilon_0 \epsilon_r \mathbf{E}$ .

### 2.4.4

#### Modelagem - Multi-física e Processamento Utilizado

Alguns outros passos e métodos foram necessários para a implementação do modelo, como a modelagem para o processamento. Este foi realizado pelo método matemático  $\alpha$ -Generalizado, que é uma modulação matemática pro-

cedida do método denominado "diferenciação retroativa"(do inglês *Backward Differentiation Formula* - BDF).

O método BDF possui uma precisão baixa, na ordem de 1 a 5 retornos - quando de primeira ordem, é conhecido como o método de Euler Retroativo. E resolve a solução utilizando diferenciação retroativa, ou seja, retorna um valor da equação diferencial a partir do gerado anteriormente. Por ser de baixa ordem, o método BDF é conhecido ser um método estável. Porém, por esse motivo, acaba gerando erros com relação ao amortecimento do sistema, por que para conseguir manter a modelagem estável, o método BDF amortece frequências altas.

Contudo, para o método  $\alpha$ -Generalizado o processamento é próximo ao BDF de segunda ordem, porém contém um parâmetro dominante -  $\alpha$  - que controla o amortecimento, principalmente em de altas frequências. Com isso, comparando o BDF de segunda ordem, o  $\alpha$ -Generalizado amortece menos o sistema tornando-o mais preciso e por consequência mais instável. Por este motivo, para o caso  $\alpha$ -Generalizado é recomendado pelo programa que o tempo de simulação seja pequeno e que o amortecimento também seja pequeno, sendo preferível para problemas com vibração pura. Além disto, no *software* COMSOL®, a implementação do  $\alpha$ -Generalizado ocorre selecionando uma variável de primeira ordem no tempo e quais serão de segunda ordem, aplicando nas fórmulas corretas, esse procedimento é realizada dentro de um comando de correlação do próprio COMSOL®, a multi-física.

O programa COMSOL®, consegue relacionar as diferentes propriedades do *software* - no caso, mecânica sólida, transferência de calor e eletroestática - por um comando interno denominado "multi-física". esse comando permite que em um só nó tenha mais de um efeito, ou seja, interligue as propriedades permitindo que seja possível haver mais de uma variável sendo calculada na equação diferencial pelo método de elementos finitos (Método de Elementos Finitos - MEF). Por exemplo, em um nó é possível ter deformações mecânicas e efeitos eletroestáticos. Sendo assim, o nó de acoplamento multi-físico passa a permissividade relativa apropriada para o nó e também da interface mecânica, que é definida junto com as demais propriedades do material. Ou então em um só nó ter deformações mecânicas e térmicas, relacionando as propriedades de mecânica dos sólidos e de transferência de calor.

A modelagem piezelétrica é feita pelo *software* COMSOL ® por uma combinação das equações 2-43, 2-51 e 2-52, inserindo na equação constitutiva piezelétrica 2-34. No Capítulo 4 serão apresentadas as CC eletroestáticas utilizadas no modelo e também da modelagem piezelétrica.

## 3

## Materiais e Método

Para a elaboração do trabalho foram realizados ao todo 23 ensaios, com 11 corpos de prova diferentes. E neste capítulo serão apresentados todos os procedimentos experimentais, materiais e o planejamento dos ensaios realizados no decorrer do mestrado. Para a análise numérica foram realizadas 102 simulações, sendo 76 delas para validação do modelo. A metodologia da simulação, assim como as suas condições de contorno também estão apresentadas neste capítulo.

### 3.1

#### Materiais

Os materiais utilizados foram adesivos epóxi de alta performance, corpos de prova confeccionados em aço inox ou aço carbono e cerâmicas piezelétricas do tipo 4. As subseções a seguir trazem informações mais detalhadas sobre estes materiais.

#### 3.1.1

##### Adesivo Epóxi

A propriedades dos adesivos epóxi são influenciadas diretamente por diversos fatores externos, como por exemplo o método de colagem, tempo de cura e pós cura, dosagem, temperatura externa, entre outros. No trabalho presente foi utilizado um adesivo epóxi cuja as propriedades estão apresentados na Tabela 3.1. Este é um adesivo epóxi obtido a partir da mistura de dois componentes, adesivo e catalisador. Ademais, o adesivo é sugerido pelo fornecedor para colagens de transdutores ultrassônicos e sensores de forma geral.

Tabela 3.1: Propriedade do adesivo.

| Propriedades                    |                        |
|---------------------------------|------------------------|
| Tipo                            | Termicamente Condutivo |
| Cura Temperatura                | 50 [°C]                |
| Cura Tempo                      | 1 [h]                  |
| Pós-Cura Temperatura            | 100 [°C]               |
| Pós-Cura Tempo                  | 1 [h]                  |
| Característica do Adesivo       | Viscoso e de cor bege  |
| Faixa de Temperatura de Atuação | -40 a 250 °C           |

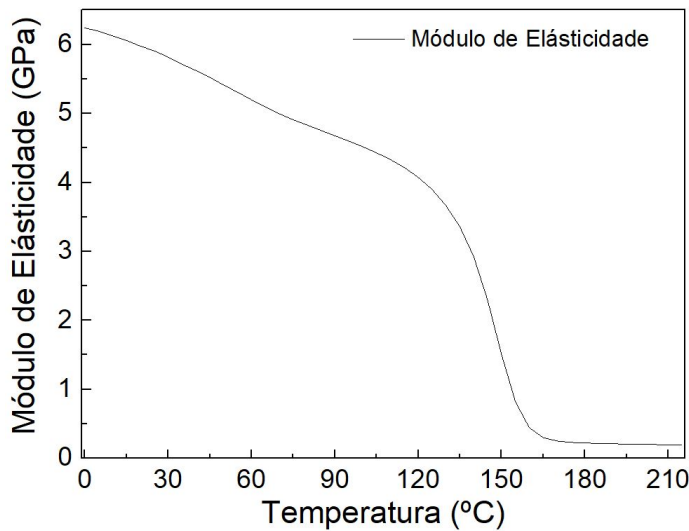


Figura 3.1: Propriedades do adesivo - Módulo de elasticidade do adesivo por temperatura fornecido pelo fabricante.

Na Figura 3.1 apresenta o gráfico com os valores para o módulo de elasticidade do adesivo em função da temperatura, segundo o fornecedor. Algumas outras propriedades teóricas, fornecidas pelo programa COMSOL<sup>®</sup> estão apresentadas na Tabela 3.2 [65].



Tabela 3.2: Propriedade Adesivo Epóxi

| Propriedade                         | Variável            | Valor                    | Unidade                    |
|-------------------------------------|---------------------|--------------------------|----------------------------|
| Densidade                           | $\rho$              | 1146                     | $[\text{kg}/(\text{m}^3)]$ |
| Coef. de Expansão Térmica*          | $\alpha$            | $20,7846 \times 10^{-6}$ | $[1/\text{k}]$             |
| Capacidade Térmica (Pressão const.) | $C_P$               | 1100                     | $[\text{J}/(\text{kg.k})]$ |
| Módulo de Young                     | E                   | $5,9093 \times 10^9$     | $[\text{Pa}]$              |
| Coef. de Poisson                    | $\mu$               | 0,3                      | -                          |
| Velocidade Longitudinal             | $v_{L\text{epoxy}}$ | 2344                     | $[\text{m/s}]$             |

### 3.1.2

#### Cerâmica Piezelétrica

Em todo o trabalho foram utilizados dois modelos de cerâmicas pieze-létricas para os testes, que serão intitulados de " $PZT_1$ " e " $PZT_2$ ", ambos em modelo de pastilha cilíndrica nas dimensões listadas na Figura 3.2. Além disso, ambos os modelos de cerâmica são de PZT4, que é uma cerâmica piezelétrica que possui como característica ser mais rígida que os demais modelos de ce-râmica piezelétrica, o que faz com que este UT possua melhor desempenho como transmissor de sinal [44, 66]. As principais propriedades dessa cerâmica piezelétrica estão listadas na Tabela 3.3.

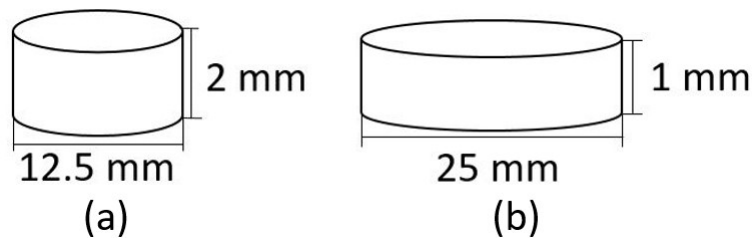
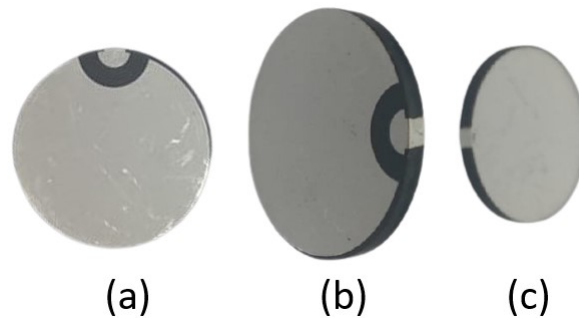


Figura 3.2: Dimensões dos PZTs utilizados; (a)  $PZT_1$  (b)  $PZT_2$ .

Tabela 3.3: Propriedade piezelétricas - PZT4

| Propriedade                         | Variável       | Valor                | Unidade                                                  |
|-------------------------------------|----------------|----------------------|----------------------------------------------------------|
| Densidade                           | $\rho$         | 7500                 | [kg/(m <sup>3</sup> )]                                   |
| Condutividade Térmica               | $k_{iso}$      | 1,25                 | [W/(m.k)]                                                |
| Coef. de Expansão Térmica*          | $\alpha$       | $3,8 \times 10^{-6}$ | [1/k]                                                    |
| Capacidade Térmica (Pressão const.) | $C_P$          | 420                  | [J/(kg.k)]                                               |
| Módulo de Young                     | E              | $51 \times 10^9$     | [Pa]                                                     |
| Velocidade Longitudinal             | $v_L PZT$      | 4671                 | [m/s]                                                    |
| Ponto de Curie                      | $T_C$          | 325                  | [°C]                                                     |
| Qualidade mecânica                  | $Q_m$          | 500                  | -                                                        |
| Fator de acoplamento eletromecânico | $K_p$          | 0,59                 | -                                                        |
| Fator de dissipação dielétrica      | $\tan(\alpha)$ | 0,6                  | [%]                                                      |
| Constante de carregamento           | $-d_{31}$      | 125                  | [10 <sup>-12</sup> C/N]<br>ou<br>[10 <sup>-12</sup> m/V] |

Ambos os modelos possuem "wrap", que também são chamados de orelha, que seria uma conexão que liga por uma faixa de cerâmica uma face à outra face. O que permite que a face oposta a face do wrap seja acoplada a algo e mesmo assim soldada e excitada por esta orelha. A Figura 3.3 ilustra o UT em 3 vistas afim de de evidenciar essa orelha.

Figura 3.3:  $PZT_2$  em 3 perspectiva para colocar em evidência o Wrap.

A Figura 3.3 apresenta o  $PZT_2$  com o "wrap" sob 3 perspectivas, em Figura 3.3 (a) é a visão superior do PZT, onde é possível visualizar a divisão da Face superior do PZT, que ficará solta. Com item (b) é possível visualizar a faixa de cerâmica que conecta a parte que ficará fixa com a superior. E por fim no item (c) é possível ver a face que ficará fixa e a faixa de cerâmica que irá fazer a ligação com a face superior.

Os PZTs escolhidos foram selecionados por ressonarem na frequência natural de 1 MHz, frequência que será utilizada nos experimentos.

### 3.1.3

#### Corpos de Provas

Para o estudo principal foram desenvolvidos 3 modelos de corpos de prova (CP) - além do  $CP_{Adhesive}$ . O primeiro modelo de corpo de prova, intitulado CPP, foi desenvolvido com aço SAE 1020, esse aço carbono bastante comum com 20% de carbono em sua composição o mesmo possui uma boa relação de custo-benefício e uma boa capacidade de se deformar plasticamente [37, 67]. Neste caso, as dimensões do CP foram baseadas na norma ASTM E8/E8M-9 [68] a qual padroniza testes de tração em aços - e por fim, adaptada para as dimensões limitantes da máquina de tração utilizada. Estas dimensões estão demonstradas na Figura 3.4.

Foram realizados alguns cálculos para definir a deformação máxima que este CP sofrerá, de acordo com as equações 2-4 e 2-5. Na equação 2-4,  $f$  é a força aplicada dada uma tensão e  $A$  é área da seção transversal, que de acordo com a Figura 3.4 seria  $6 \times 15$  mm, resultando em  $A = 90 \text{ mm}^2$ .

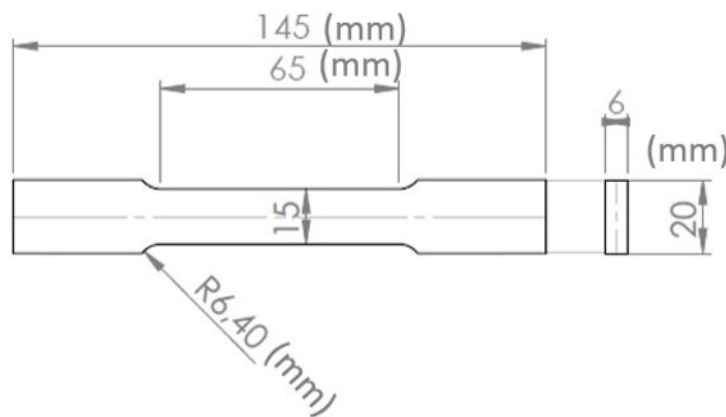


Figura 3.4: Dimensões do CPP fabricado com aço SAE 1020 em milímetro.

O módulo de Young do aço SAE 1020 é 200 GPa, e seu limite de escoamento é em torno de 200 MPa. Aplicando os valores na equação 2-4, chega-se ao valor da força máxima para não se ter deformação plástica no modelo, que é em torno de 26 kN, e pela equação 2-5 obtêm-se um valor máximo de deformação de  $1500 \mu\text{m}/\text{m}$ . Como margem de segurança, foi usado para este modelo de corpo de prova, uma força de 3 kN que representa em torno de 11,54% da força máxima, uma tensão de 33,33 MPa e uma deformação de  $166,65 \mu\text{m}/\text{m}$ .

O segundo CP -  $CP_{CHAPA}$  - é uma chapa quadrada em aço inox AISI 316, que é um tipo de aço, que a fim de melhorar a resistência à corrosão, possui em sua composição, pelo menos 10,5% de cromo [69]. As dimensões desse estão especificadas na Figura 3.5.

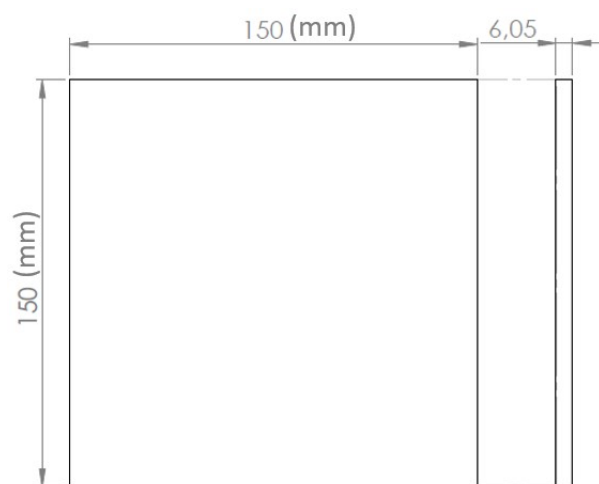


Figura 3.5: Dimensões do  $CP_{CHAPA}$  fabricado com aço INOX em milímetro.

O  $CP_{CHAPA}$ , foi somente utilizado nos testes de temperatura. Por fim, o terceiro CP - CPC - também foi confeccionado com aço INOX AISI 316 e segue as dimensões apresentadas na Figura 3.6.



Figura 3.6: Dimensões do CPC fabricado com aço INOX em milímetro.

A seção transversal do  $CPC$  é  $40 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$ , o que resulta em uma área de seção transversal de  $A = 240 \text{ mm}^2$ . O módulo de Young é 200 GPa, com a equação 2-4 é possível deduzir que a força máxima para este corpo de prova não se deformar plasticamente é de 69,9 kN, o que resulta em um limite de escoamento de 291 MPa e uma deformação de  $1456 \mu\text{m}/\text{m}$ .

O corpo de prova CPC foi projetado para o tamanho do PZT2, por limites na geometria da máquina Instron utilizada nos testes este não seguiu a norma padrão para ensaios de tração ASTM E8/E8M-9.

Além das propriedades mecânicas para os testes a serem realizados, outras considerações precisam ser feitas, tais estão na Tabela 3.4.

## 3.2

### Instrumentação dos Corpos de Prova

Visando a qualidade da instrumentação e do acoplamento PZT-CP, o processo de instrumentação dos CPs foi realizado seguindo um protocolo que segue as etapas listadas de 1 a 5, a seguir. Vale relembrar que o adesivo foi

aplicado de acordo com as especificações informadas na folha de dados do fornecedor, já havendo sido testado em [65].

1. **Seleção do PZT** Inicialmente, todos os PZTs que vão ser instrumentados são selecionados, catalogados e previamente mensurados para verificar o valor do parâmetro S11. Por serem uma cerâmica os PZTs são muito delicados e frágeis, então é comum alguns arranhados ou lascas denegrirem o sinal deste.

Além desta medição, a face do PZT que não será a que vai ser aderida ao CP, é revestida com fita mágica e com uma faixa de papel. Isso foi necessário pois é comum o excesso de adesivo escorrer pelo PZT ou então surgir sujeira de adesivo na hora da colagem, o que acaba impossibilitando o passo 5 de soldagem.

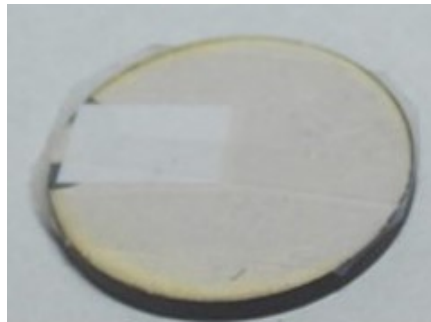


Figura 3.7: PZT<sub>2</sub> pós mensurado.

2. **Preparação do Corpo de Prova** A Próxima etapa é preparar os CPs, que têm a sua superfície, principalmente na região de instrumentação, lixada até serem retiradas o máximo das imperfeições da superfície. A Figura 3.8 apresenta lado a lado o CP antes, durante e depois deste processo. Vale ressaltar que na Figura 3.8 é exibido o CPP, porém, este processo foi semelhante para os 3 CPs utilizados.

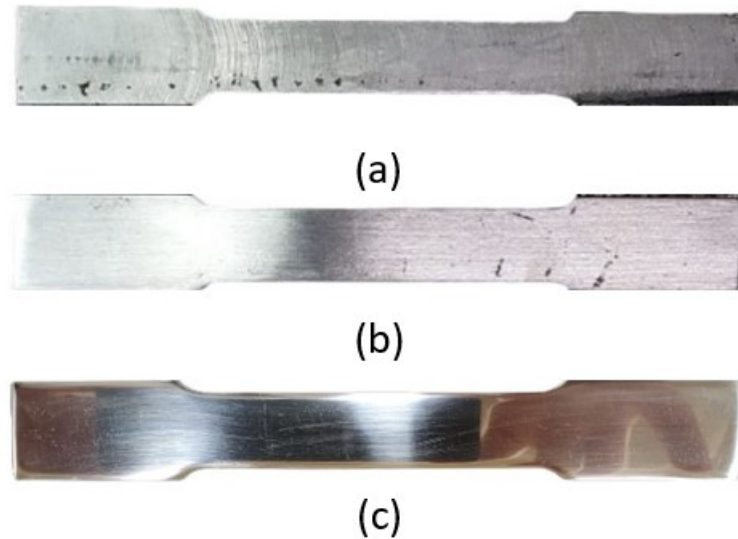


Figura 3.8: (a) CP antes de lixar e logo após ser usinado, (b) CP após a primeira etapa da lixação e (c) CP após ser lixado, polido, limpo e pronto para a próxima etapa.

**3. Marcação no CP para Centralização do PZT** Quanto mais os transdutores estiverem alinhados um com o outro, melhor será a resposta obtida. Para isso, são realizadas marcações no CP e depois fixadas fitas isolantes para manter o PZT durante o lugar no processo de cura. Como foram utilizados dois tipos de PZTs, a marcação e a centralização teve que ser diferenciada.

A marcação e centralização do  $PZT_1$  foi realizada pelo centro do CPP e depois pelas dimensões do PZT, como ilustrado na Figura 3.9.

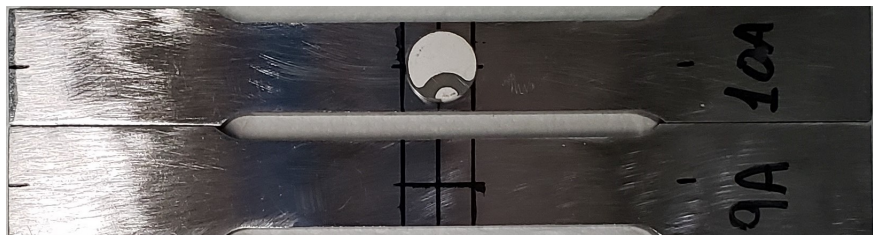


Figura 3.9: CPP pós marcação do local do  $PZT_1$ .

Para a colagem do  $PZT_2$  nos corpos de prova  $CP_{CHAPA}$  e no CPC, o procedimento foi semelhante ao realizado com o  $PZT_1$  no CPP. Foram realizadas marcações no CP, marcando a sua região central e após a colagem do PZT, utilizadas fitas isolantes para conter o PZT. A Figura 3.10 apresenta o CPC após a centralização para a colagem do  $PZT_2$ . Além das marcações na face frontal, também foram necessárias marcações na região lateral para centralizar o PZT, como também ilustra a Figura 3.10.



Figura 3.10: Preparação e centralização do CPC para colar o  $PZT_2$ .

4. **Preparação do Adesivo e Colagem** O próximo passo é a preparação do adesivo seguindo as especificações do fabricante. O adesivo, após a mistura e antes de serem aplicados, entra em uma câmara de vácuo para reduzir a quantidade de bolhas internas da mistura, garantindo uma melhor aderência do adesivo.

O processo de colagem constitui em 4 fases, ilustradas na Figura 3.11.

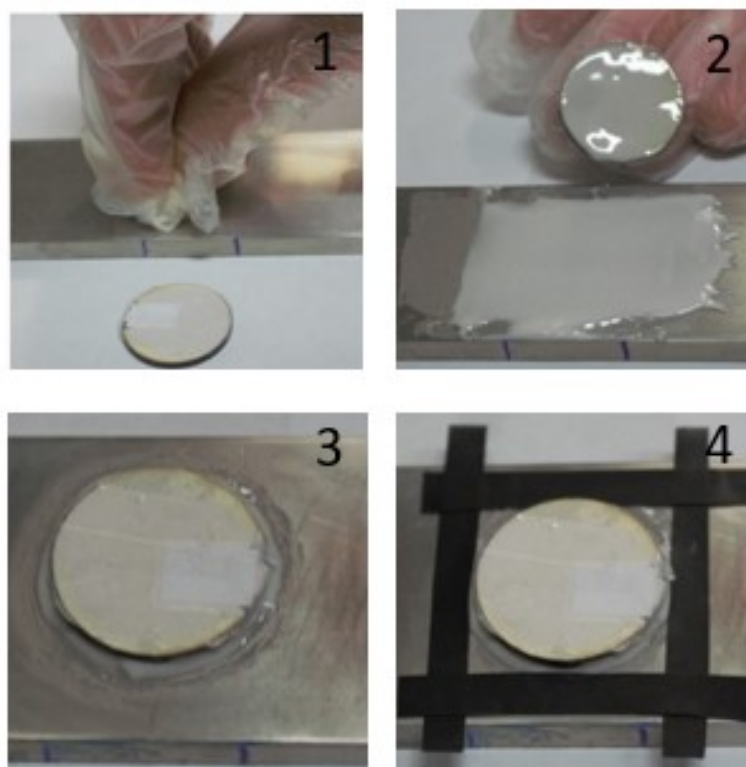


Figura 3.11: As 4 quatro fases de colagem e centralização final do CPC.

A primeira fase, representada na foto 1 da Figura 3.11, que é limpar com álcool isopropílico e acetona na a superfície do aço e, com apenas álcool, no PZT. Em seguida o adesivo deve ser inserido com o auxílio de uma espátula tanto na superfície do CP quanto do PZT e com todos os cuidados para que a superfície esteja limpa e sem bolhas, como é possível observar na Figura 3.11 2.

O terceiro passo é acoplar o PZT na superfície e se retira o excesso de adesivo da região do entorno, tomando cuidado para que não seja retirado o adesivo debaixo do PZT, apenas nas laterais. A Figura 3.11 3, apresenta o CPC após este passo. E por fim, coloca se fitas isolantes para evitar que o PZT escorregue, 3.11 4.

Após estas 4 etapas o CP vai para a câmara climática para a cura e pós cura, cujo o tempo e temperaturas estão especificados na Tabela 3.1.

5. **Soldagem do PZT** O último passo do procedimento é a soldagem dos cabos no PZT já instrumentado no CP. O CP após este processo está pronto para ser utilizado, conforme na Figura 3.12.

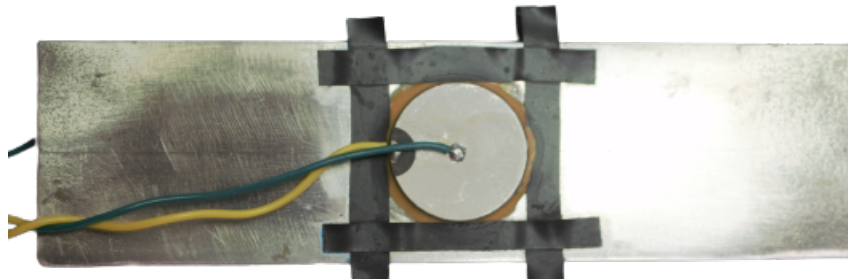


Figura 3.12: CPC após todo o procedimento de colagem e pronto para uso.

Depois desses 5 passos, que foram realizados primeiramente no lado A, são refeitos do lado oposto, lado B, tomando cuidado para que os transdutores fiquem perfeitamente alinhados. Em seguida, o CP está pronto para ser utilizado.

**Problemas na instrumentação** Na instrumentação alguns fatores tiveram que ser contornados. Ao colar o  $PZT_1$ , por sua pequena geometria que dificulta no seu manuseio, foram apresentados alguns empecilhos tais como o seu posicionamento. A Figura 3.13 mostra dois tipos de defeitos encontrados na instrumentação com o PZT pequeno.

Em alguns casos o PZT acabou ficando sobreposto na fita de posicionamento, o que impediu o PZT de ser fixado. A Figura 3.13 (a) apresenta um dos CPP, com o PZT solto, após a realização do primeiro teste de tração. A Figura 3.13 (b) mostra outro tipo de defeito na instrumentação que aconteceu. O CPP é pequeno e tem pouca área para aderir, o que dificulta na limpeza do adesivo, e com isso o adesivo acabou escorrendo pelas laterais e indo para a face superior do  $PZT_1$ , impossibilitando sua soldagem.



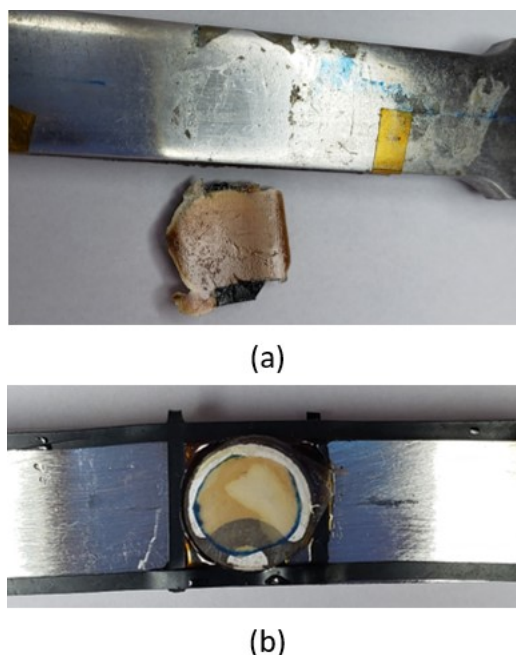


Figura 3.13: Problemas encontrados na instrumentação do PZT pequeno. (a) PZT solto após a realização do primeiro teste de tração; (b) PZT após a cura onde o adesivo fluíu para a proteção, impossibilitando a sua instrumentação.

### 3.3

#### Bancada Experimental

Esta seção detalha os equipamentos utilizados no projeto, com o intuito de melhor entender as características de cada teste.

**Analizador de Redes VNA** A Figura 3.14 apresenta o Analisador de Redes da Série *Vector Network Analyzers*, modelo E5061B, fabricado pela Keysight. Esse equipamento que enviará e receberá o sinal elétrico no UT.



Figura 3.14: Analisador de Redes da Série VNA, modelo E5061B

Esse equipamento pode medir a impedância em uma faixa de frequência de 5 Hz a 3 GHz, e segundo as especificações do fabricante, tem uma ampla faixa dinâmica, em torno de 125 dB, uma velocidade de medição 3 ms e um ruído de traço de 0,0005 dBrms. Também é informado que a estabilidade de temperatura é de 0,005 dB/°C. O VNA tem a função de enviar um pulso para a cerâmica piezelétrica e ler a sua resposta, com isto o equipamento é conectado

por cabos elétricos que foram anteriormente soldados no piezelétrico. Para fazer a comunicação e coleta de dados, junto ao VNA é utilizado um computador com MATLAB® que fará um pré processamento dos dados.

**Câmara Climática.** O equipamento utilizado tanto para a cura, quanto para a caracterização térmica dos sensores foi uma câmara climática, modelo VCL4010 fabricada pelo Vötsch, ilustrada na Figura 3.15. Este modelo permite controlar a temperatura entre  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $180\text{ }^{\circ}\text{C}$ , com uma taxa de  $3\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$  e uma estabilidade de  $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ .



Figura 3.15: Câmara Climática Vötsch, modelo VCL 4010.

**Máquina de Tração.** O equipamento utilizado para a realização dos testes de tração com temperatura foi uma máquina de tração elétrica, modelo Electroplus E10000, fabricada pela Instron e localizada no Laboratório de Sensores a Fibra Óptica (LSFO) da PUC-Rio. À esta máquina está acoplada uma câmara térmica que permite controlar a temperatura durante os testes de tração. Esta máquina permite fazer testes dinâmicos com uma frequência máxima de 100 Hz e uma carga máxima 10 kN, para testes estáticos a carga máxima permitida pela máquina é de 7 kN. Já a câmara térmica tem uma faixa de operação entre  $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$  e  $350\text{ }^{\circ}\text{C}$  e uma estabilidade de  $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

A Figura 3.16 apresenta o diagrama de blocos da configuração desta bancada experimental e a Figura 3.17 a bancada experimental.

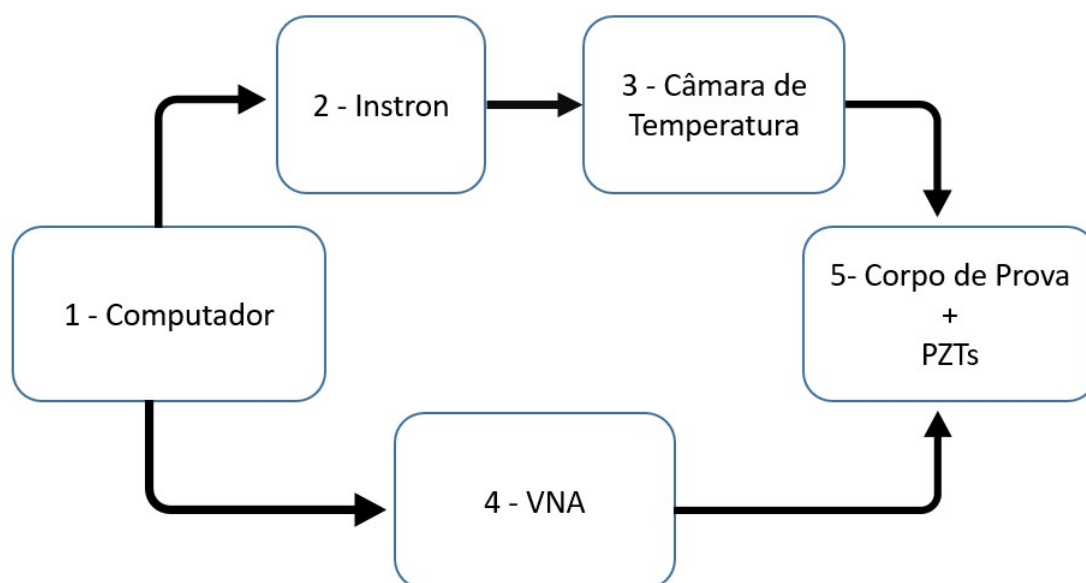


Figura 3.16: Diagrama de blocos do ensaio. (1) Rede de controle da máquina de tração e do VNA; (2) Máquina de tração; (3) câmara de temperatura controlada; (4) VNA; (5) Corpo de prova.

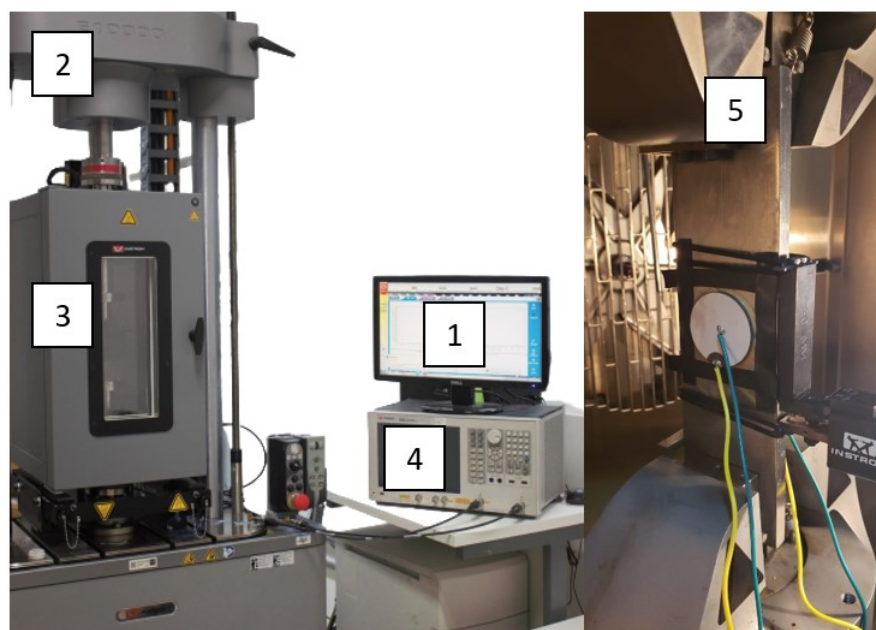


Figura 3.17: Máquina universal Instron Electropius E10000 com uma câmara de temperatura acoplada. (1) Rede de controle da máquina de tração e do VNA; (2) Máquina de tração; (3) câmara de temperatura controlada; (4) VNA; (5) Visão detalhada dentro da câmara de temperatura, em evidência o local de inserção do corpo de prova.

As Figuras 3.16 e 3.17 mostram um esquemático da realização dos testes e a banca experimental, respectivamente. Onde em 1 é o computador operacional que controla a máquina, o VNA e realiza a aquisição de dados, em 2 é a máquina universal Instron Electropius E10000, 3 é a câmara de temperatura

acoplada à máquina de tração, 4 é o VNA que fará a interrogação ultrassônica. Em 5 é o corpo de prova, com os UT já acoplados ao aço. Os UT também são conectados ao VNA para ter a excitação ultrassônica e a leitura dos parâmetros de S11, S21 e impedância acústica. A Figura (5) apresenta em evidência o corpo de prova, preso pelas garras da máquina de tração, com o clip-gage elétrico inserido.

### 3.4

#### Descrição dos Testes

Foram realizados ao todo 23 testes necessários para a avaliação da comunicação dos PZTs, que será feita basicamente seguindo as 2 etapas listadas a seguir:

- **Caracterização da Variação do Sinal pela Variação da Temperatura:** Inicialmente foi realizado uma caracterização de temperatura a fim de determinar a sensibilidade e a polarização da comunicação para cada temperatura, sem qualquer influência da tensão.
- **Testes de Tração e Testes de Tração com Variação de Temperatura:** em seguida foram realizados testes de tração a fim de determinar as alterações na comunicação do sistema ao variar a tensão e a temperatura.

#### 3.4.1

##### Caracterização da Variação do Sinal pela Variação da Temperatura

Os testes de calibração de temperatura foram realizados na câmara Vötsch 4010, os quais foram efetuados em um ciclo entre as temperaturas de 40 °C a 140 °C com patamares em intervalos de 20 °C, nos quais permaneciam por duas horas. O intervalo de temperatura foi escolhido de acordo com a polarização do PZT, que segundo a dados da literatura após temperatura 80 °C o PZT começa a se despolarizar [70, 71]. Com testes preliminares, foi percebido que a amplitude do sinal de S21 foi otimizada até 100 °C e após essa temperatura o parâmetro tem uma deterioração na sua resposta. Por esse motivo, foram realizados testes com temperaturas até 140 °C, para mostrar esse decaimento no parâmetro. A Figura 3.18 apresenta a curva típica da variação de temperatura, sendo a temperatura em graus Celsius (°C) ao longo do teste em horas (h).

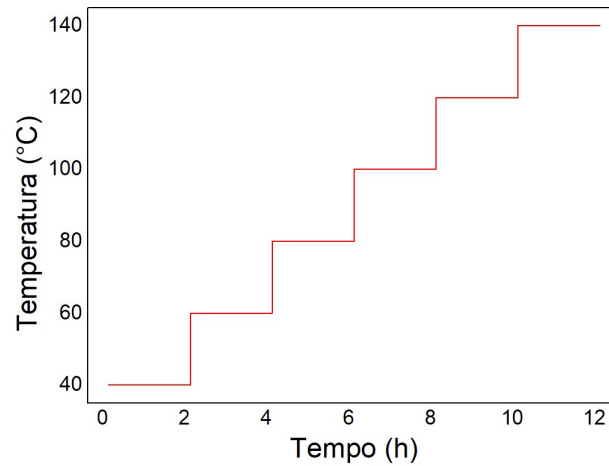


Figura 3.18: Gráfico ilustrativo da realização do teste de calibração de temperatura.

As regiões horizontais presentes na Figura 3.18 representam os patamares onde a temperatura mantém-se estável.

### 3.4.2

#### Testes de Tração e Testes de Tração com Variação de Temperatura

Foram realizados 3 modelos de teste de tração para se estudar a variação do parâmetro S21 com a influência da deformação mecânica, que estão resumidos na Tabela 3.5.

Tabela 3.4: Propriedade Aço

| Propriedade                         | Variável       | Valor                 | Unidade                |
|-------------------------------------|----------------|-----------------------|------------------------|
| Densidade                           | $\rho$         | 7850                  | [kg/(m <sup>3</sup> )] |
| Condutividade Térmica               | $k_{iso}$      | 44,5                  | [W/(m.k)]              |
| Coef. de Expansão Térmica*          | $\alpha$       | $12,3 \times 10^{-6}$ | [1/k]                  |
| Capacidade Térmica (Pressão const.) | $C_P$          | 475                   | [J/(kg.k)]             |
| Módulo de Young                     | E              | $200 \times 10^9$     | [Pa]                   |
| Coef. de Poisson                    | $\mu$          | 0,3                   | -                      |
| Permissividade Relativa             | $\epsilon$     | 1                     | -                      |
| Condutividade Elétrica              | $\sigma_{ISO}$ | 4,032                 | [S/m]                  |
| Murnaghan                           | l              | $-3 \times 10^{11}$   | [Pa]                   |
| Murnaghan                           | m              | $-6,2 \times 10^{11}$ | [Pa]                   |
| Murnaghan                           | n              | $-7,2 \times 10^{11}$ | [Pa]                   |
| Lamé                                | $\lambda_L$    | $1,15 \times 10^{11}$ | [Pa]                   |
| Lamé                                | $\mu_L$        | $7,69 \times 10^{10}$ | [Pa]                   |
| Velocidade Longitudinal             | $v_{Lsteel}$   | 5874                  | [m/s]                  |

\* A variável  $\alpha$  é uma matriz diagonal para materiais isotópicos.

O primeiro teste realizado, Modelo 1 foi realizado com o corpo de prova CPP e o  $PZT_1$  e os testes com os Modelo 2 e 3 com o CPC e o  $PZT_2$ . Os testes com os modelos 1 e 3 foram realizados na máquina elétrica universal Instron Electropius E10000 com uma câmara de temperatura própria acoplada ao sistema, como ilustrado na Figura 3.17. Além disto, estes testes foram realizados seguindo uma sequência onde aguardava-se a estabilização da temperatura do sistema para então aplicar uma carga mecânica estática de forma gradual. Independente do teste a carga retorna para 0 MPa de forma gradual.

A máquina de tração Instron Electropius E10000, só permite cargas estáticas até 7 kN. Por este motivo, a carga máxima utilizada foi de 6 kN. Essa carga máxima, para o CPC que possui uma seção transversal com maior área, gera uma tensão mecânica máxima de 25 MPa e uma deformação de 125  $\mu\text{m}/\text{m}$ , o que corresponde a 8,62% do limite de escoamento. A carga máxima aplicada para o CPP foi de 3 kN, de forma que a tensão atingia um valor em torno de 33,3 MPa e uma deformação nominal de 167  $\mu\text{m}/\text{m}$  e que representa cerca de 11,5% do limite de escoamento - descrito na Seção 3.1.3

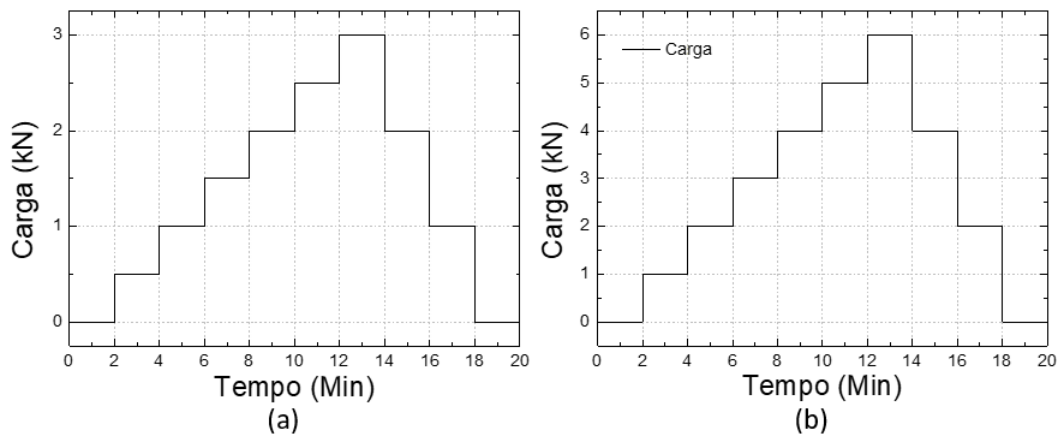


Figura 3.19: Gráfico ilustrativo da realização do teste de carga. (a) Teste utilizado nos testes de Modelo 1, com carga até 3 kN e temperatura até 50 °C; (b) Teste utilizado nos testes de Modelo 3, com carga até 6 kN e temperatura até 140 °C.

Para os testes com a carga até 6 kN, o carregamento foi realizado em incrementos de 1 kN, partindo da carga neutra - 0 kN - até a carga máxima - 6 kN. O descarregamento foi realizado em decréscimos de 2 kN. A Figura 3.19(b) apresenta a característica deste carregamento.

O teste de modelo 2 foi realizado com tensões próximas do limite de escoamento do CPC para se entender o comportamento do sinal ultrassônico sob deformações elevadas. Este foi realizado utilizando a máquina de tração Instron modelo 8502, de acionamento servo-hidráulico, localizada no Laboratório

de Fadiga da PUC-Rio. Esta máquina pode exercer testes estáticos e dinâmicos até 100 kN. Para este teste foi utilizado o  $PZT_2$  e o corpo de prova modelo CPC, que tem limite de escoamento de 291 MPa, o que resulta em uma deformação de  $1460\text{ }\mu\text{m}/\text{m}$ . O teste foi realizado com controle de carga que foi sendo adquirida de forma gradual conforme apresentado na Figura 3.20.

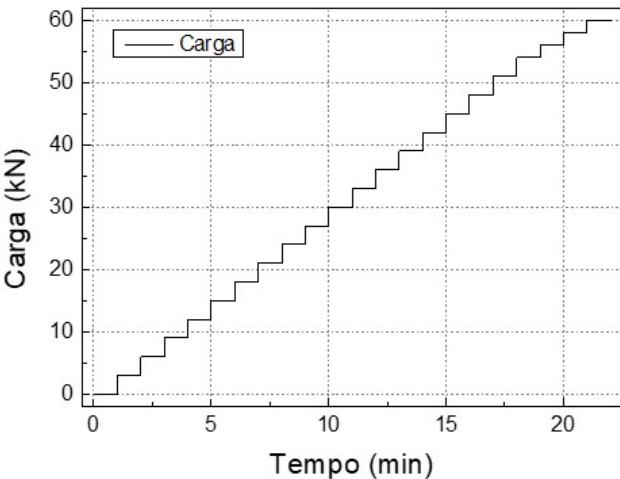


Figura 3.20: Gráfico ilustrativo da realização do teste de carga utilizado nos testes de Modelo 2, com carga até 60 kN.

A carga máxima utilizada foi de 60 kN, gerando no CPC uma tensão de 250 MPa, que corresponde à 85,8% da tensão de escoamento. Com esta tensão mecânica gerou-se uma deformação máxima de  $1250\text{ }\mu\text{m}/\text{m}$ .

A fim de uma melhor compreensão, os testes estão resumidos na Tabela 3.5. Na Tabela é possível observar qual CP foi utilizado em cada teste, incluindo o modelo de PZT, além das temperaturas e tensão mecânica aplicadas.

Tabela 3.5: Modelos dos testes Realizados.

| Modelo de Teste: | Tipo de PZT | CPs Utilizados | Temperaturas (° C)                              | Tensão Aplicada (MPa)                                       | Deformação ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )                              |
|------------------|-------------|----------------|-------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|
| Modelo 1         | $PZT_1$     | CPP            | 30, 40<br>50, 60, 70, 80                        | 0, 11<br>22, 33                                             | 56<br>111, 167                                                     |
| Modelo 2         | $PZT_2$     | CPC            | 30                                              | 0, 25, 50, 75<br>100, 125, 150<br>175, 200, 221<br>242, 250 | 0, 125, 250, 375<br>500, 625, 750<br>875, 1000, 1104<br>1208, 1250 |
| Modelo 3         | $PZT_2$     | CPC            | 30, 40, 50<br>60, 70, 80<br>90, 100<br>120, 140 | 0, 4, 8<br>12, 17<br>21, 25                                 | 0, 21, 42<br>63, 83,<br>104, 125                                   |

### 3.5

#### Modelagem Numérica

Nesta seção são apresentadas o método das 102 simulações. Bem como, estarão detalhados todos os processos da montagem do modelo, montagem da malha e evolução da simulação, condições de contorno aplicadas, funções utilizadas, entre outros.

#### 3.5.1

##### Condições de Contorno Aplicadas no Modelo

O procedimento para inserir as condições de contorno (CC) seguiu a ordem proposta pelo próprio software COMSOL®. Isto é, primeiro define-se as condições de contorno para sólidos, pois é necessário definir o meio a ser trabalhado. Depois são inseridas as condições de transferência de calor e por fim as CCs piezelétricas. Nas próximas subseções serão apresentadas as condições de contorno aplicadas para essas 3 etapas.

##### 3.5.1.1

##### Mecânica dos sólidos

O primeiro modelo simulado foi apenas a região central do CP, sem os PZTs inseridos. Ou seja, um modelo bem simples, apenas um retângulo em aço nas dimensões e características da seção transversal como são apresentadas na Seção 3.1.3. Após esta verificação, foram inseridos no modelo, os transdutores, as CCs aplicadas para este estão apresentadas na Figura 3.21.

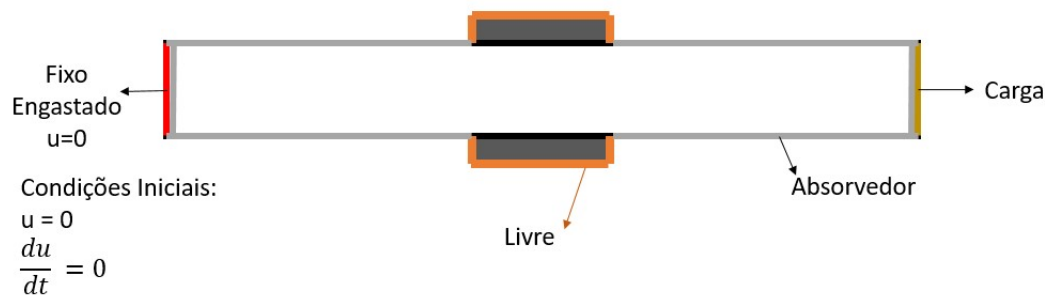


Figura 3.21: Condições de contorno aplicadas para o modelo sólido mecânico em 2D.

Na Figura 3.21 é possível observar as regiões nas quais foram inseridas as condições de contorno, ilustradas de forma 2D. A região vermelha ilustrada à esquerda é a face fixa - engastada- que impõe deslocamento nulo,  $u = 0$ .

A região em amarelo, à direita, é onde a força é aplicada sob uma superfície, seguindo a equação 2-4. A região cinza é a localização dos PZTs. Nos contornos das faces externas do PZT utiliza-se a condição de contorno



livre, permitindo que estes possam vibrar livremente. Esta condição está representada pela cor laranja na Figura 3.21. As demais CCs aplicadas são de absorvedoras, para se ter uma melhor resposta na propagação da onda ultrassônica.

### 3.5.1.2

#### Transferência de Calor

Para a implementação da variação de temperatura no modelo desenvolvido, foi necessário estipular uma temperatura de referência, que no caso foi 30 °C (303 K), temperatura mínima utilizada nos testes experimentais. A outra condição aplicada segue a expressão  $-n \cdot \mathbf{q} = 0$ . Essa condição de contorno impede que haja fluxo de calor através das bordas. Intuitivamente, impõe que o gradiente de temperatura entre as paredes é zero, logo a temperatura de uma borda deve ser igual a temperatura de outra borda. Seguindo essa condição, todo o corpo é aplicado a condição de temperatura constante, uma vez que não se tem fontes de calor internas e sem fluxo de calor, como ilustrado na Figura 3.22

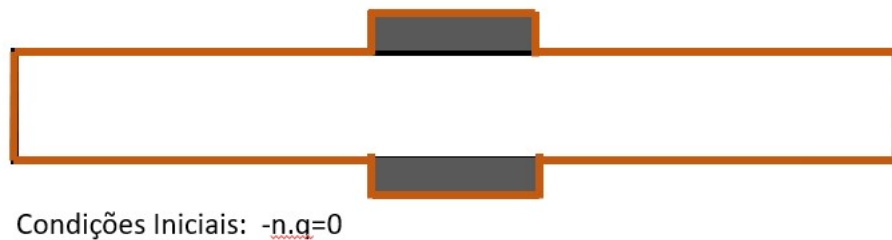


Figura 3.22: Condição de contorno aplicada para a transferência de calor - em todo o sólido, incluindo PZTs.

A Figura 3.22 mostra o modelo, sendo em marrom a condição que impede o fluxo de calor através da borda, aplicada por todo o contorno do corpo - CP e PZTs. As demais propriedades para a transmissão de calor necessárias para a simulação estão detalhadas nas Tabelas 3.2, 3.3 e 3.4.

### 3.5.1.3

#### Eletrostático

As CCs aplicadas para o modelo eletrostático estão ilustradas na Figura 3.23, em um modelo 2D.

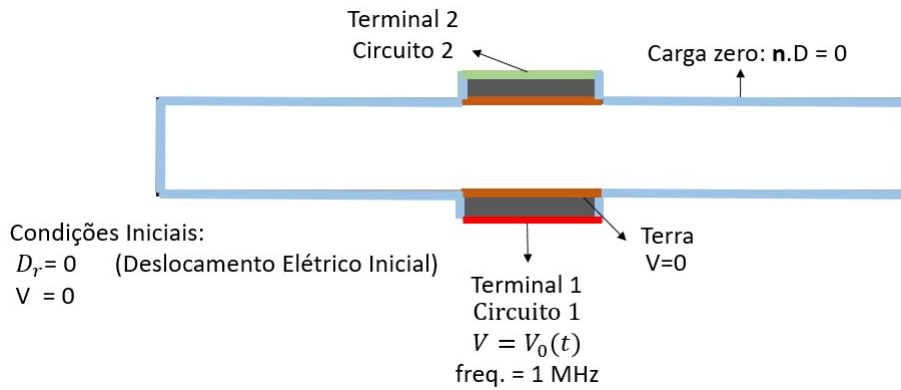


Figura 3.23: Condições de contorno eletrostáticos aplicados no modelo.

Na Figura 3.23, é possível observar as condições piezelétricas aplicadas, sendo a região em vermelho, o terminal piezelétrico de excitação. O corpo de prova está representado na Figura 3.23 como a região branca, este tem uma condição de contorno de conservação de carga aplicado por todo o corpo, representado na cor azul claro. Essa condição é um princípio físico que garante que uma corrente ou campo elétrico não pode surgir, acumular ou desaparecer em um certo ponto [72]. Essa propriedade também garante que há conservação de carga, ao campo se deslocar pelo meio. Além disso, essa CC garante que antes de se começar a excitação piezelétrica esses não possuam correntes ou campos elétricos.

Para se simular o modelo *pitch-catch*, detalhado na Seção 2.3.2, são necessários dois PZTs, o transmissor e o receptor. Estes, na modelagem necessitam de condições de contorno diferentes. Na ilustração - Figura 3.23 - apresenta em vermelho a região na qual o PZT é excitado, ou seja, onde o transdutor piezelétrico, recebe a corrente elétrica. A fim de aperfeiçoar o modelo é inserido um circuito interno em série nesta face, como detalhado na Figura 3.24 (a). A região verde da Figura 3.23 é face receptora, este tem a condição de carga zero e além disso um circuito resistivo em paralelo como ilustrado na Figura 3.24 (b). Por fim, a região laranja da Figura 3.23 são as regiões aterradas do piezelétrico.

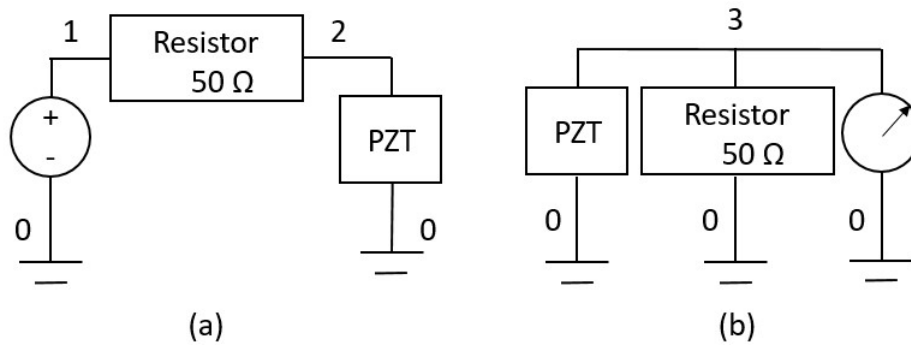


Figura 3.24: Piezelétricos inseridos nos circuitos. (a) Circuito em série com fonte voltagem e resistor de 50  $\Omega$ ; (b) Circuito em paralelo com voltímetro e resistor de 50  $\Omega$ .

O PZT transmissor na simulação é excitado pela fonte de tensão elétrica, representado por 0-1 na Figura 3.24 (a). Tanto o PZT receptor quanto o transmissor, estão conectados a um resistor com 50  $\Omega$ , resistência com valor da impedância elétrica de referência.

### 3.5.2 Excitação Piezelétrica

Para a modelagem, o problema então foi dividido em dois, um estacionário e um dependente do tempo. O problema estacionário, serve para preparar o modelo - pré-análise de tensão e temperatura - que auxiliará no estudo dependente do tempo. O segundo estudo, então "chama" o estudo estacionário, e excita a cerâmica piezelétrica com uma função no tempo. Três funções foram utilizadas: uma senoide, uma Gaussiana e uma curva Wavelet do tipo Morlet. As equações das funções estão representadas nas equações 3-1, 3-2 e 3-3, respectivamente. Além disso, as curvas característica estão presentes na Figura 3.25.

$$func1(t) = -200.\sin(2.\pi.f.t) \quad (3-1)$$

$$func2(t) = 200.\exp\left(-\left(\frac{t-T0}{T0/2}\right)^2\right) \quad (3-2)$$

$$func3(t) = 200.\exp\left(-\left(\frac{t}{T0/2}\right)^2\right).\cos(2.\pi.f.t.) \quad (3-3)$$

As 3 curvas apresentam uma amplitude de 200 V, excitados à uma frequência de 1 MHz e nas equações 3-1, 3-2 e 3-3, T0 é o período inicial, que neste caso é 0 s.

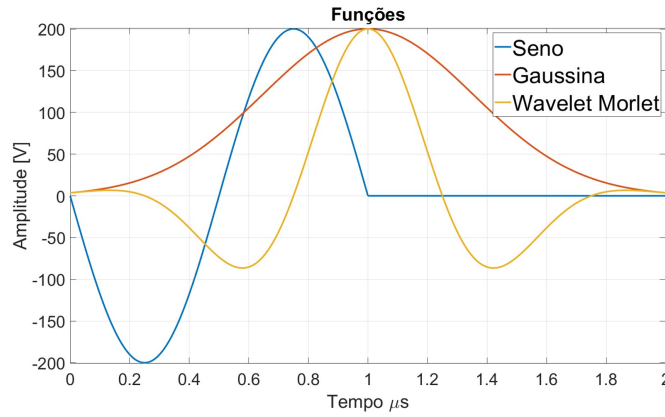


Figura 3.25: Equação de excitação do terminal 1 para a solução dependente do tempo.

A Figura 3.25 apresenta as 3 funções que serão utilizadas nas simulações, sendo a curva azul a senoide - equação 3-1, a curva laranja a Gaussiana - equação 3-2 - e por fim, em amarelo a Wavelet Morlet - equação 3-3.

Com análises prévias, que serão apresentadas na Seção 4.3, foi notado que para a simulação, assim como no experimental, também era necessário um tempo de estabilização do sistema após a inserção da temperatura ou da carga. Para isso, foi inserido um tempo  $T_{shift}$ , de 25 períodos na função Wavelet Morlet. A expressão da função ficou como apresentado na equação 3-4 e uma curva característica como apresentado na Figura 3.26.

$$func(t) = 200.exp\left(-\left(\frac{t - T_{shift}}{T0/2}\right)^2\right).cos(2.\pi.f.t.) \quad (3-4)$$

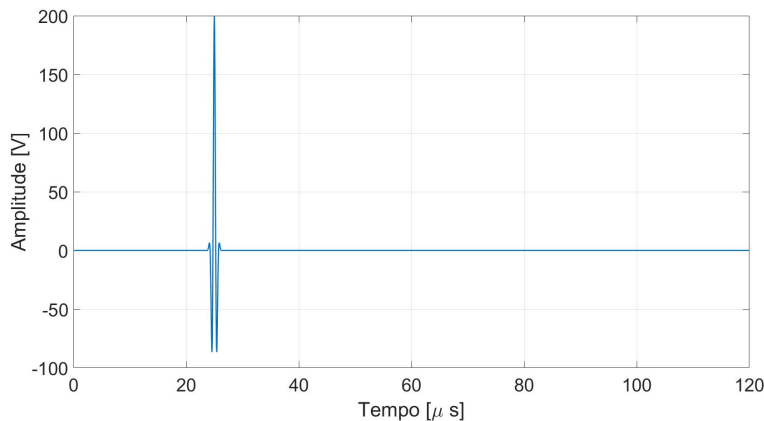


Figura 3.26: Equação Wavelet Morlet com 25 períodos antes.

### 3.5.3

#### Malha e Outras Propriedades Utilizadas

O modelo implementado é composto por 3 regiões, como ilustrado na Figura 3.27.

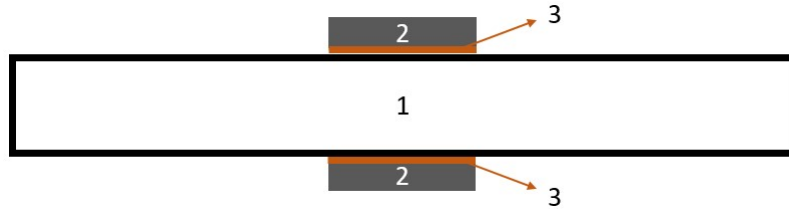


Figura 3.27: Modelo 2D simulado.

A região 1 é representada pela cor branca da Figura 3.27 que é o corpo de prova e meio de propagação acústica, a região 2 é composta pelas duas regiões em cinza, que representam os PZTs e a região laranja, representa os adesivos epóxi. Cada região deve conter pelo menos 4 elementos. A quantidade ideal de elementos para propagação de ondas acústicas é dado por uma relação da velocidade da onda longitudinal do meio, dividido pela frequência de excitação e por  $n$  partes, sendo este  $n$  um valor entre 15 e 20 [14,52,54], como representado na equação 3-5.

$$Tamanho\ da\ malha = \frac{\lambda_{Meio\ de\ Propagação}}{f.n} \quad (3-5)$$

A malha construída está ilustrada na Figura 4.35, que é um recorte da figura 3.27. Vale ressaltar que a mesma está com um zoom, a fim de mostrar detalhadamente a malha nas 3 regiões.

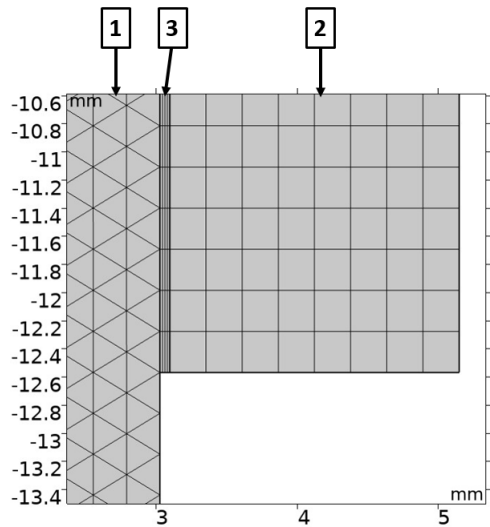


Figura 3.28: Malha aplicada nas 3 regiões do corpo de prova.

Como a menor região é a do adesivo - região 3, a malha deste foi diferenciada das demais, com uma malha de elementos quadráticos, limitando para 4 elementos nesta região. A região 2, também é pequena com relação a geometria da região 1, por isso, este também foi utilizado uma malha quadrática com 8 elementos por região. A malha da região 1, é composta com elementos triangulares e segue a equação 3-5. Ao todo são 15208 elementos e 92478 graus de liberdade, para a simulação principal que demora em torno 1 hora e 20 minutos para ficar completa.

Tabela 3.6: Propriedades e Variáveis da Simulação

| Propriedade              | Variável   | Equação               | Valor                                          | Unidade |
|--------------------------|------------|-----------------------|------------------------------------------------|---------|
| Frequência de Excitação  | f          | -                     | $1 \times 10^6$                                | [Hz]    |
| Período                  | $T_0$      | $1/f$                 | $1 \times 10^{-6}$                             | [s]     |
| n                        | n          | -                     | 15<br>20                                       | -       |
| Tamanho da Malha         | $d_{mesh}$ | $(C_{Lsteel}/f)/n$    | $3,9 \times 10^{-4}$<br>$2,925 \times 10^{-4}$ | [m]     |
| Período Inicial          | p-ini      | -                     | 0                                              | [s]     |
| Variação do Período      | dT         | $0,01 * p$            | $1 \times 10^{-8}$                             | [s]     |
| Tempo Final de Simulação | TF         | 20<br>50<br>70<br>100 | -                                              | [s]     |

Outras propriedades precisaram ser atribuídas ao programa para a validação do modelo e estas estão nas Tabelas 3.2, 3.3 e 3.4 para o adesivo

epóxi, PZT e aço, respectivamente [65, 66, 70, 73]. Além das propriedades dos materiais, algumas configurações da simulação, já comentadas no texto, estão resumidas na Tabela 3.6.

Foi realizado um estudo para a melhor convergência do sinal detalhado na Seção 4.3 do Capítulo 4. Nesse estudo foi variado a função de excitação, o número de períodos, otimização da malha, espessura do adesivo e módulo de elasticidade do adesivo, entre outros.

## 4

## Análise e Resultados

Neste capítulo serão apresentados todos os resultados obtidos, tanto numéricos quanto experimentais, e também análises e comparação dos resultados.

### 4.1

#### Análise Experimental

A seguir são discutidos os resultados obtidos nos testes com o corpo de prova de aço.

##### 4.1.1

##### Teste de Tração - Modelo 1

A metodologia para os testes discutidos nesta seção encontra-se na Seção 3.4 (Tabela 3.2). O teste de Modelo 1 foi realizado utilizando o  $PZT_1$  e com o CP modelo CPP. Ao todo, foram testados 9 CPPs com a mesma configuração. O CPP foi testado com temperaturas de 25 a 80 °C e cargas de até 3 kN, o que representa uma tensão mecânica de 33 MPa e uma deformação de  $167 \mu m/m$ . A curva da carga aplicada em função do tempo encontra-se na Figura 3.19(a).

Foram coletados os valores de máximo do sinal S21 e plotados nas Figuras 4.1 (a) e (b) respectivamente em função da deformação mecânica e da temperatura do teste.

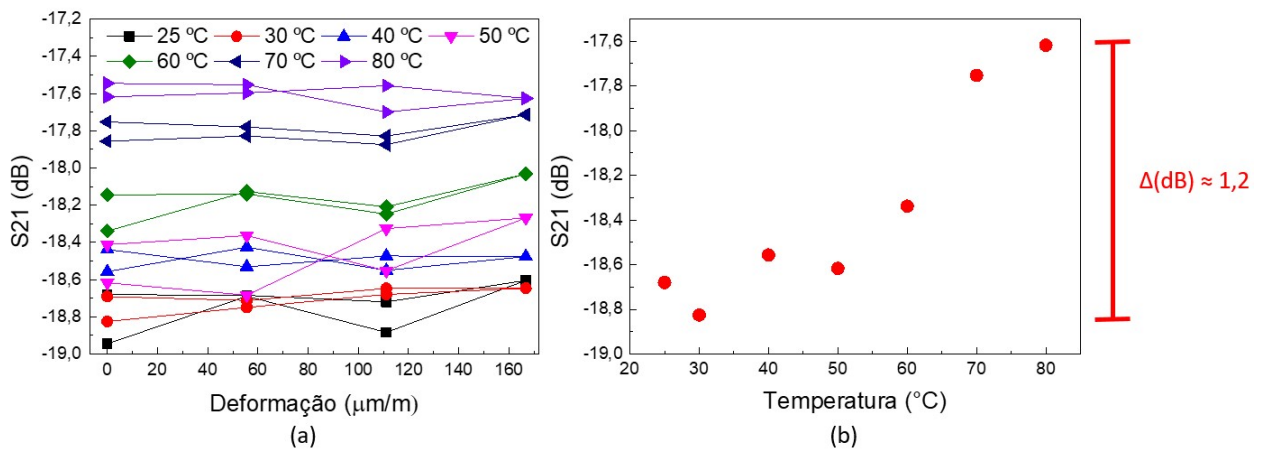


Figura 4.1: Gráfico de S21 - Valores que maximizam o sinal. (a) S21 (dB)  $\times$  Deformação ( $\mu m/m$ ); (b) S21 (dB)  $\times$  Temperatura (°C)



A Figura 4.1 (a) apresenta os valores que maximizam o sinal de S21 para o CPP1, pela deformação mecânica aplicada e por temperatura. É possível observar que o teste não apresentou um padrão e que o sinal de S21 apresentou valores muito baixos, em torno de -17,6 a -19 dB. Idealmente o sinal de S21, deve ser o mais próximo de zero possível, seguindo a equação 2-39, e um sinal, como o apresentado em torno de -18 dB a -20 dB é considerado um sinal pequeno, demonstrando a não comunicação entre os transdutores e que impossibilita a comunicação entre os sensores.

As curvas estão sobrepostas e com uma diferença de aproximadamente 1,2 dB, mesmo com uma deformação máxima aplicada bem pequena,  $167 \mu m/m$ . Pela curva 4.1 (b), que apresenta os valores que maximizam o sinal de S21, apenas para a temperatura, antes da aplicação da carga, é possível confirmar essa falta de regularidade presente na Figura 4.1 (a).

Essas características representam uma avaliação ruim do sistema, sendo impossível caracterizar ou definir qualquer sinal a partir disto. Porém, "condenar" o sistema apenas por esta avaliação, é errôneo, por isto, também será avaliado o sinal S11 e o Z1, para tentar entender o que está acontecendo com o sistema. As Figuras 4.2 (a) e (b) apresentam as curvas de S11 e a impedância Z1 para todas as 7 temperaturas e 3 deformações ( $0$ ;  $56 \mu m/m$ ;  $111 \mu m/m$  e  $167 \mu m/m$ ).

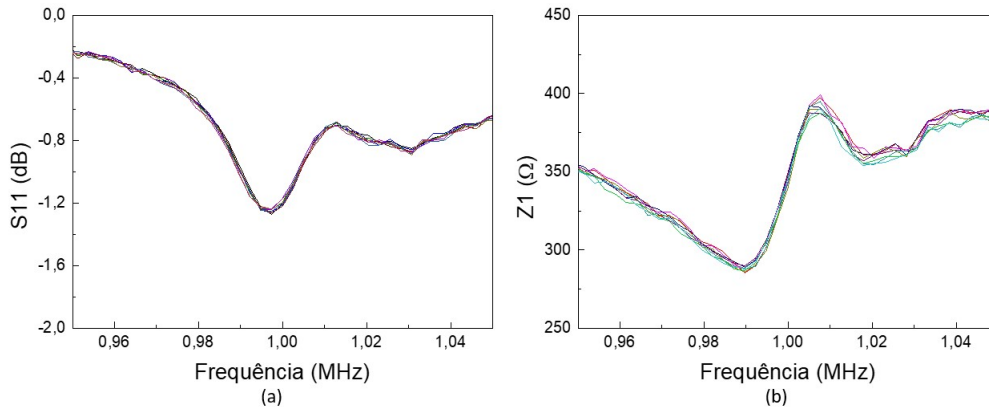


Figura 4.2: Sinal de S11 e Z1, para todas as 7 temperaturas e 3 deformações ( $0$ ;  $56 \mu m/m$ ;  $111 \mu m/m$  e  $167 \mu m/m$ ). Sem diferenciação na amplitude dos sinais. (a) S11 (dB)  $\times$  Frequência (MHz); (b) Z1 ( $\Omega$ )  $\times$  Frequência (MHz).

A Figura 4.2 apresenta as curvas de S11 e Z1 do teste. Já pela primeira visualização repara-se uma incoerência no sistema, pois a impedância de referência do sistema é de  $50 \Omega$ , e neste gráfico, em torno de 1 MHz, está apresentando um valor próximo de  $350 \Omega$ .

Outro detalhe é o alto valor para o vale do sinal S11. O ideal para o S11 associado com um transdutor com boa fixação sobre a base metálica seria

em torno de -10 a -20 dB. Porém, neste caso o amplitude mínima de S11 está próxima de -1 dB, como observa-se na Figura 4.2 (a), caracterizando um sinal muito fraco que impediria uma transmissão ou comunicação de dados através da parede metálica utilizando-se este transdutor.

Essas três características, ou seja, impedância muito alta, alta amplitude do vale no sinal de S11, baixa amplitude no pico do sinal de S21 e a falta de tendência na variação do pico de S21 com a deformação, impossibilitam a utilização e a caracterização da variação do CPP1. Outros 8 CPs foram testados com essa configuração, e todos apresentaram as mesmas características, comprovando que este  $PZT_1$ , para esta aplicação, não seria adequado. Por apresentarem uma resposta ruim, os resultados obtidos com estes outros 8 CPs não serão mostrados no trabalho.

#### 4.1.2

##### Caracterização da Variação do Sinal pela Variação da Temperatura

Com a resposta insatisfatória do  $PZT_1$ , foi necessário recorrer a novos meios para analisar a transmissão do sinal ultrassônico sob influência da deformação mecânica e da temperatura. Por este motivo foi necessário elaborar um novo CP adequado a um transdutor de maior área, aqui denominado  $PZT_2$ . De forma a realizar uma análise preliminar deste transdutor, utilizou-se a câmara climática Vötsh para a execução de um teste de temperatura no novo CP, conforme descrito na Seção 3.4. A resposta do sistema para temperaturas variando de 40 °C até 140 °C é apresentada na Figura 4.3.

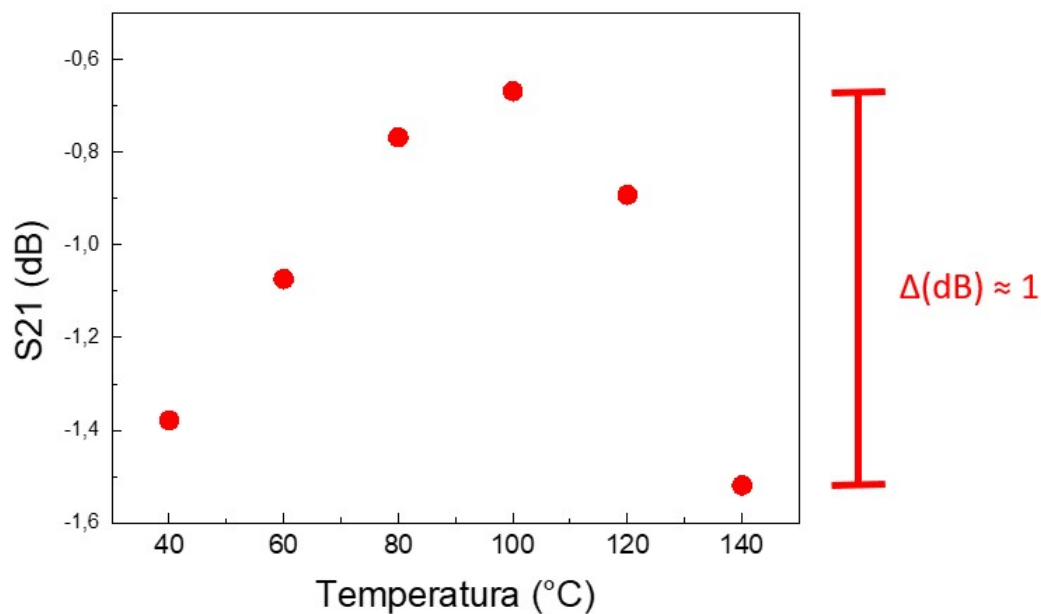


Figura 4.3: Gráfico dos valores que maximizam o sinal de S21, para a Variação de temperatura da chapa.

Para a faixa de temperatura entre 40 e 100 °C, S21 aumenta continuamente, de -1,4 a -0,65 dB, com uma variação de + 0,71 dB indicando que para este conjunto transdutor/corpo de prova, há uma pequena melhora na transmissão do sinal até aproximadamente 100 °C. Acima desta temperatura esta melhora é menos significativa e a eficiência da transmissão de potência entre os transdutores passa a decair rapidamente a partir de 100 °C, porém ainda mantendo a comunicação até a temperatura máxima testada, de 140 °C. e com um decaimento no sinal de aproximadamente - 1 dB.

Cabe ressaltar que este sinal permanece robusto para a aplicação proposta, pois apresenta valores que maximizam o sinal de S21 variando de -1,6 dB até quase 0,6 dB, o que se traduz em uma excelente comunicação entre os transdutores.

#### 4.1.3

##### Teste de Tração - Modelo 2

O modelo CPC, foi projetado para comportar todo o PZT em sua superfície central, como apresentado na Figura 3.6, o que evita o efeito de borda, reduzindo as reflexões e melhora a propagação da onda ultrassônica. Como especificado na Tabela 3.5 da Seção 3.4, foram testados dois CPs com o teste de Modelo 2 que foi testado com tensões mecânicas até 250 MPa, o que corresponde a 85,8% do limite de escoamento do aço inox e gerando uma deformação de aproximadamente 1250  $\mu\text{m}/\text{m}$ . A curva dos valores que maximizam o sinal de S21 para o CPC6 e CPC7 estão apresentados nos gráficos das Figuras 4.4 e 4.5, respectivamente.

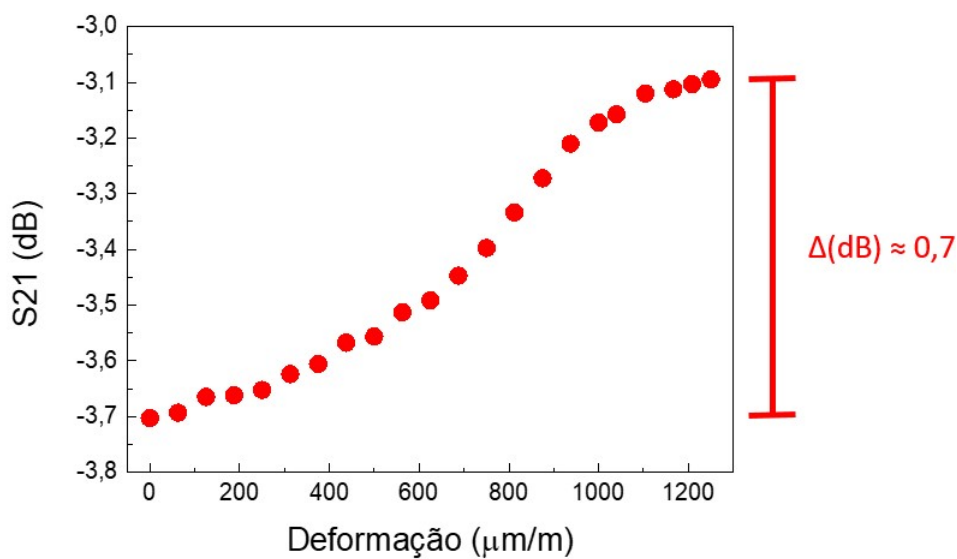


Figura 4.4: Gráfico de S21 para o CPC6. S21 (dB)  $\times$  Deformação ( $\mu\text{m}/\text{m}$ ).

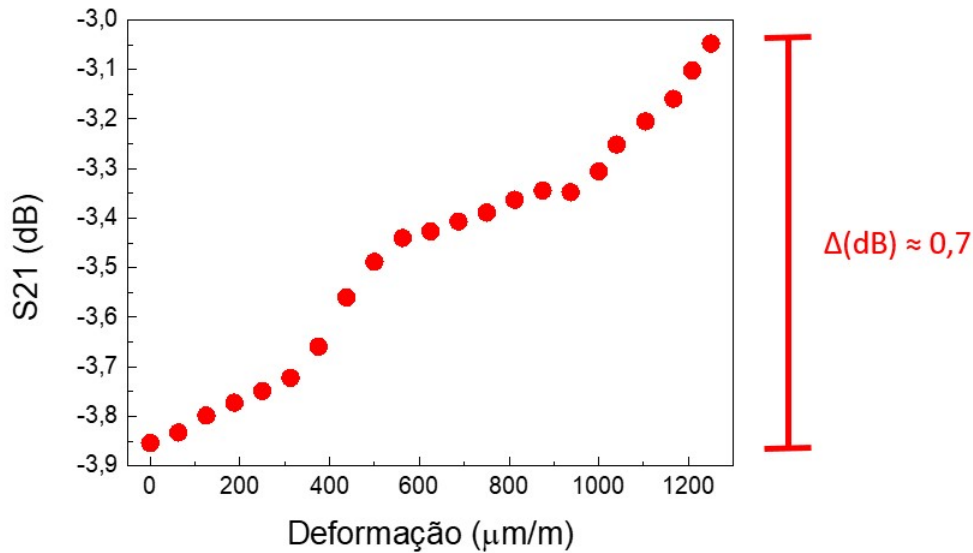


Figura 4.5: Gráfico de S21 para o CPC7. S21 (dB)  $\times$  Deformação ( $\mu\text{m}/\text{m}$ ).

Cada ponto presente nos gráficos das Figuras 4.4 e 4.5 representa o valor máximo de S21 para cada deformação testada. Da condição indeformada até a maior deformação aplicada, 1250  $\mu\text{m}/\text{m}$ , em ambos os corpos de prova, a variação no pico de S21 foi positiva e em torno de 0,7 dB (+ 0,67 dB para o CPC6 e + 0,71 dB para o CPC7).

Continuando a análise, estuda-se agora a amplitude do sinal S11 e da impedância do sistema. As Figuras 4.6 e 4.7 apresentam as medidas obtidas para S11 e Z1 com os corpos de prova CPC6 e CPC7, respectivamente.

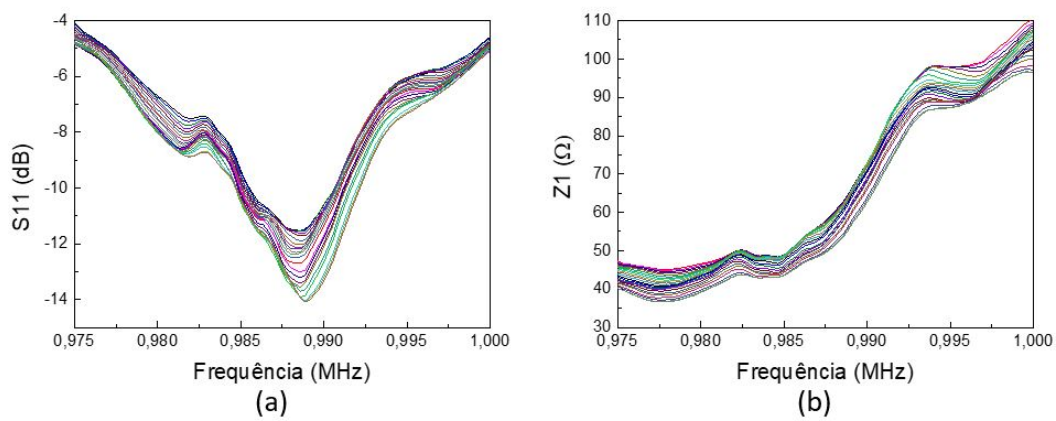


Figura 4.6: Sinal de S11 e Z1 para o CPC6, com ênfase na frequência ideal, para cada deformação mecânica, de 0  $\mu\text{m}/\text{m}$  até 1250  $\mu\text{m}/\text{m}$ . Sinal de S11 e Z1 decrescendo conforme aumenta-se a deformação. (a) S11 (dB)  $\times$  Frequência (MHz); (b) Z1 ( $\Omega$ )  $\times$  Frequência (MHz).

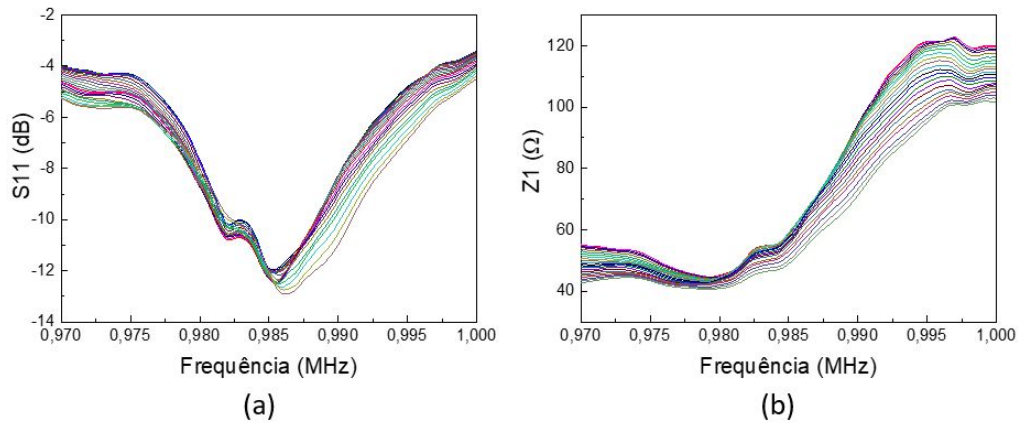


Figura 4.7: Sinal de  $S_{11}$  e  $Z_1$  para o CPC7, com ênfase na frequência ideal, para cada deformação mecânica, de  $0 \mu m/m$  até  $1250 \mu m/m$ . Sinal de  $S_{11}$  e  $Z_1$  decrescendo conforme aumenta-se a deformação. (a)  $S_{11}$  (dB)  $\times$  Frequência (MHz); (b)  $Z_1$  ( $\Omega$ )  $\times$  Frequência (MHz).

Para o CPC6, na Figura 4.6(a), nota-se que para o sinal de  $S_{11}$  a frequência ideal, onde  $S_{11}$  é mínimo, se manteve bem estável em torno de 0,989 MHz e sem grandes variações. Nesta frequência, conforme mostra a Figura 4.6(b), a impedância manteve-se com valores muito próximos do valor de referência de  $50 \Omega$ . Para o CPC7, o sinal de  $S_{11}$ , Figura 4.7 (a) também se manteve estável em torno de 0,986 MHz. Já a impedância, como mostra Figura 4.7 (b), manteve-se próxima do seu valor de referência ( $50 \Omega$ ) em torno da ótima frequência de operação. Observa-se, portanto, que mesmo para deformações mais altas e tensões mecânicas próximas do limite de escoamento do corpo de prova, a transferência de potência entre os transdutores manteve-se satisfatória com  $S_{21}$  entre -3,9 e -3,0 dB.

#### 4.1.4

##### Teste de Tração - Modelo 3

Como especificado na Tabela 3.5 da seção 3.4 do Capítulo 3, , foram ensaiados cinco corpos de prova, com temperatura variando até  $140^\circ\text{C}$  e carga até 6 kN, gerando uma tensão mecânica máxima em torno de 25 MPa correspondendo a uma deformação de  $125 \mu m/m$ , para o CPC que tem a área da seção transversal de  $240 \text{ mm}^2$ . As Figuras 4.8 a 4.12 apresentam as curvas de variação do pico no sinal de  $S_{21}$  para os corpos de prova de CPC1 a CPC5 sob a influência combinada da deformação mecânica e da variação de temperatura.

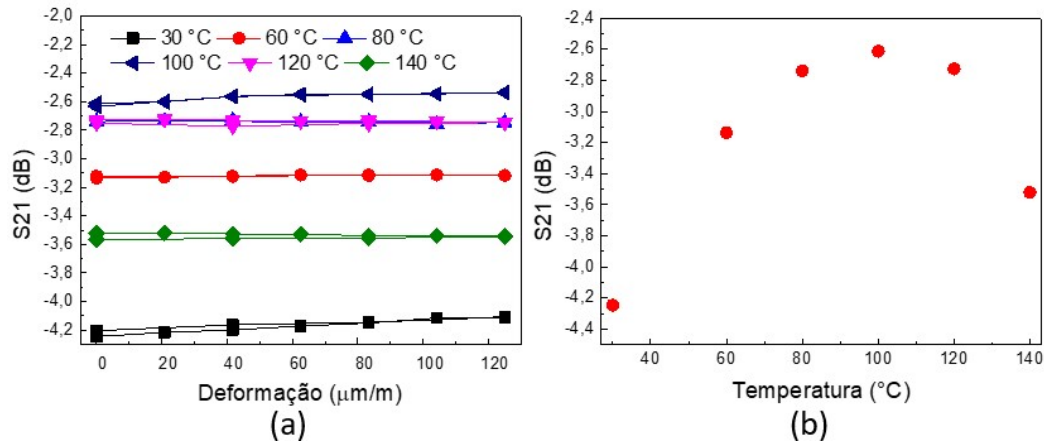


Figura 4.8: Gráfico de S21 para o CPC1. (a) S21 (dB)  $\times$  Deformação ( $\mu\text{m}/\text{m}$ ); (b) S21 (dB)  $\times$  Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ), para deformação =  $0 \mu\text{m}/\text{m}$

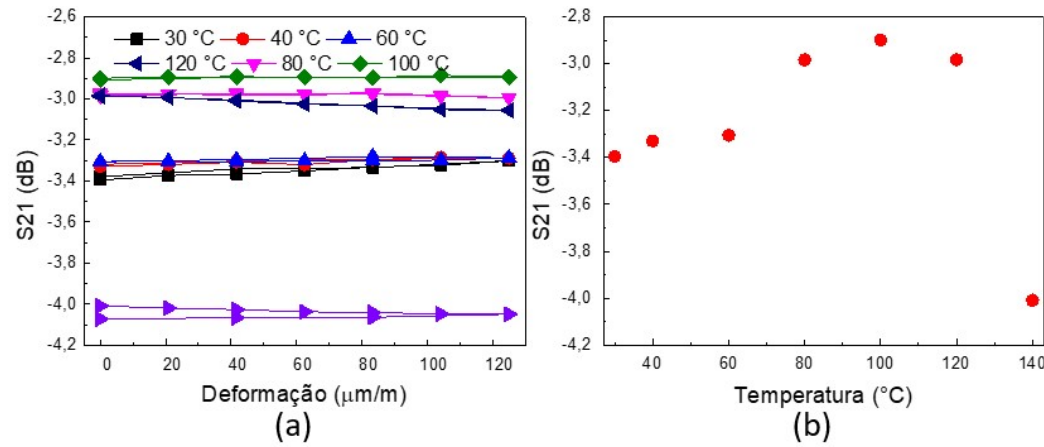


Figura 4.9: Gráfico de S21 para o CPC2. ((a) S21 (dB)  $\times$  Deformação ( $\mu\text{m}/\text{m}$ ); (b) S21 (dB)  $\times$  Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ), para deformação =  $0 \mu\text{m}/\text{m}$

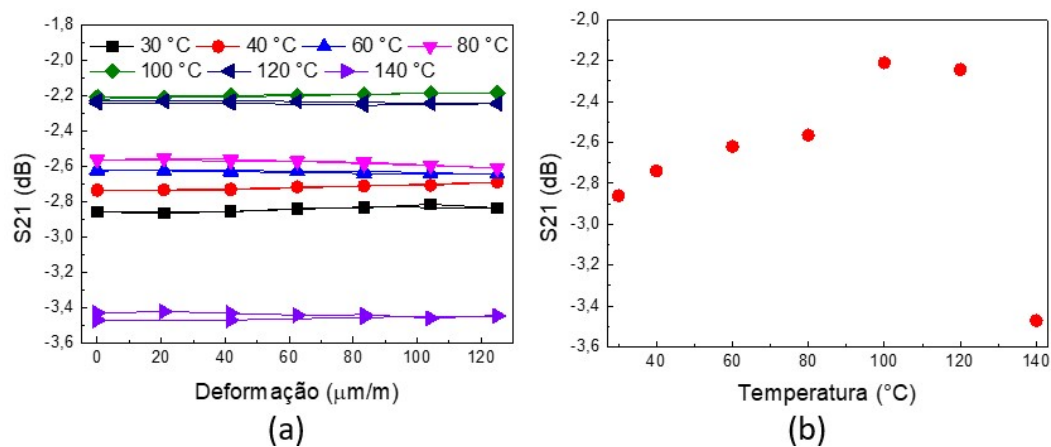


Figura 4.10: Gráfico de S21 para o CPC3. ((a) S21 (dB)  $\times$  Deformação ( $\mu\text{m}/\text{m}$ ); (b) S21 (dB)  $\times$  Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ), para deformação =  $0 \mu\text{m}/\text{m}$

Nas Figuras (a) de 4.8 a 4.12 são apresentadas as variações dos valores de pico do sinal S21 em função da deformação mecânica. Cada cor representa



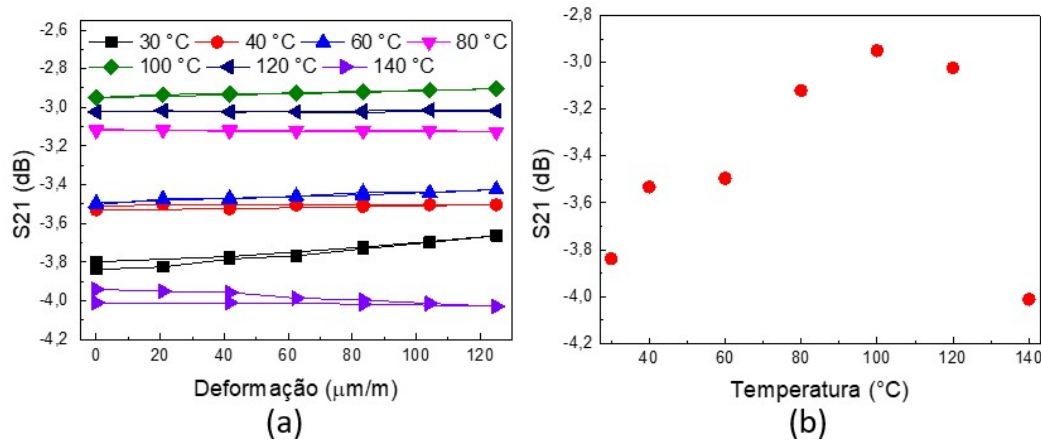


Figura 4.11: Gráfico de S21 para o CPC4. (a) S21 (dB)  $\times$  Deformação ( $\mu\text{m}/\text{m}$ ); (b) S21 (dB)  $\times$  Temperatura (°C), para deformação = 0  $\mu\text{m}/\text{m}$

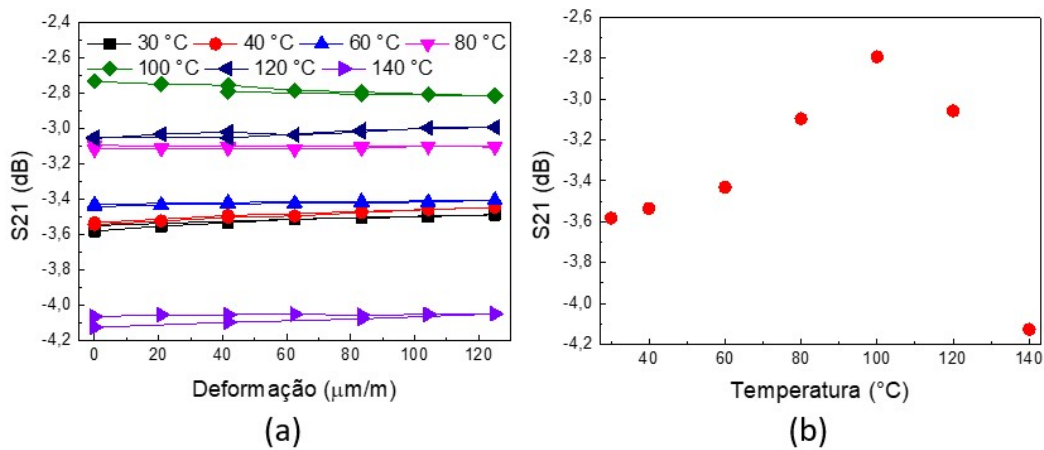


Figura 4.12: Gráfico de S21 para o CPC5. (a) S21 (dB)  $\times$  Deformação ( $\mu\text{m}/\text{m}$ ); (b) S21 (dB)  $\times$  Temperatura (°C), para deformação = 0  $\mu\text{m}/\text{m}$

uma temperatura diferente. Em todas as curvas observa-se que a variação de S21 com a deformação é muito pequena para esta faixa de deformações, de 0 a 125  $\mu\text{m}/\text{m}$ . Um resultado compatível com o observado para os corpos de prova CPC6 e CPC7. Nota-se um pequeno nível de histerese no sinal durante os ciclos de carregamento, que, entretanto, não traz prejuízo para a eficiência na transmissão de potência entre os transdutores. As variações da frequência de pico e respectiva amplitude máxima do sinal S21 quando a deformação muda de 0 para 125  $\mu\text{m}/\text{m}$  na temperatura de 30 °C são listadas na Tabela 4.1.

Pela Tabela 4.1 é possível perceber que, com exceção do CPC3, todos os corpos de prova tiveram uma variação próxima de + 0,1 dB no valor de pico de S21 quando a deformação excursiona de 0 a 125  $\mu\text{m}/\text{m}$ . O valor de pico de S21 no teste com o corpo de prova CPC3 apresentou uma variação ainda menor nesta faixa de deformação, em torno de + 0,02 dB. Observa-se também que a frequência de pico varia muito pouco em todos os casos testados.

Com a variação da temperatura, todos os cinco corpos de prova testados

Tabela 4.1: Variações da frequência e valores de pico do sinal S21 na temperatura de 30 °C quando os corpos de prova saem da condição indeformada para uma deformação de 125  $\mu m/m$ .

| CPC  | Variação de S21 (dB)<br>para a deformação<br>máxima (125 $\mu m/m$ ) | Variação da frequência (MHz)<br>para a deformação<br>máxima (125 $\mu m/m$ ) |      |
|------|----------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|------|
| CPC1 | + 0,15                                                               | 0,996 $\rightarrow$ 0,994                                                    | 0,2% |
| CPC2 | + 0,09                                                               | 0,981 $\rightarrow$ 0,981                                                    | 0%   |
| CPC3 | + 0,02                                                               | 0,985 $\rightarrow$ 0,985                                                    | 0%   |
| CPC4 | + 0,17                                                               | 0,990 $\rightarrow$ 0,989                                                    | 0,1% |
| CPC5 | + 0,09                                                               | 0,989 $\rightarrow$ 0,988                                                    | 0,1% |

apresentam curvas de amplitude do pico de S21 com comportamento semelhante. Para os corpos de prova CPC2, CPC4 e CPC5, estas curvas sofrem uma variação brusca, positiva, no intervalo entre 60 e 80 °C. Para o CPC3, este salto é observado entre as temperaturas de 80 e 100 °C. Este efeito parece não ocorrer no caso do CPC1, o que, entretanto, pode ser atribuído ao fato de não ter sido realizada uma medição de S21 na temperatura de 40 °C, o que esconderia este salto caso ele viesse a ocorrer na faixa entre 30 e 60 °C.

Para todos os cinco corpos de prova testados, 100 °C foi a temperatura na qual o sinal S21 apresentou os valores de pico mais elevados. Na excursão de temperatura de 30 a 100 °C, a mudança no valor de pico do sinal S21 ficou em torno de + 0,8 dB para três dos corpos de prova testados, CPC3, CPC4 e CPC5. Esta variação foi ainda maior para o CPC1, de +1,6 dB. Já para o CPC3, observou-se uma mudança próxima de 0,5 dB. Estes valores estão listados na Tabela 4.2. Nesta Tabela também são apresentados a variação da frequência da temperatura inicial de 30 °C para a máxima temperatura 140 °C.

Tabela 4.2: Variações da frequência e valores de pico do sinal S21 com a temperatura na condição indeformada.

| CPC  | Variação de S21 (dB)<br>para a temperatura<br>de 30 °C a 100 °C | Variação da frequência<br>para a temperatura<br>de 30 °C a 140 °C |      |
|------|-----------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|------|
| CPC1 | +1,6                                                            | 0,996 $\rightarrow$ 0,988                                         | 0,8% |
| CPC2 | +0,52                                                           | 0,982 $\rightarrow$ 0,986                                         | 0,4% |
| CPC3 | +0,77                                                           | 0,985 $\rightarrow$ 0,985                                         | 0%   |
| CPC4 | +0,89                                                           | 0,990 $\rightarrow$ 0,982                                         | 0,8% |
| CPC5 | +0,85                                                           | 0,989 $\rightarrow$ 0,989                                         | 0%   |

Nota-se na segunda coluna da Tabela 4.2 que, ao longo de toda a faixa de temperatura dos testes realizados com os cinco corpos de prova, a frequência



de pico do sinal S21 variou muito pouco, mantendo-se em torno de 0,99 MHz em todos os casos.

Mais uma vez, cabe-se ressaltar que em todos os testes, o valor de pico de S21 permaneceu entre -4,0 e -2,5 dB, indicando que para a aplicação em pauta, a interrogação de sensores por telemetria ultrassônica através da parede metálica, a configuração aqui estudada cumpre eficientemente a função proposta. As pequenas variações no parâmetro S21, da ordem de 1 dB nos piores casos, não traz prejuízo para a transferência de energia e dados entre o par transmissor-receptor.

Um ponto relevante a ser reportado, é que a partir de 120 °C o adesivo começa a alterar significativamente as suas propriedades, inclusive a sua coloração, surgindo ainda um odor de queimado.

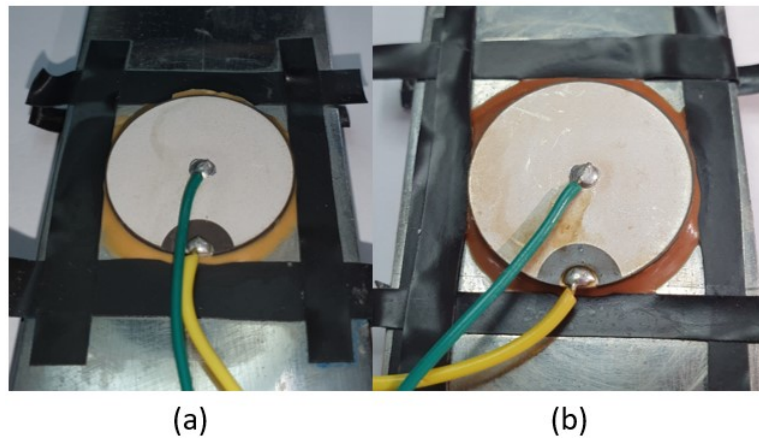


Figura 4.13: Foto do corpo de prova CPC4 antes e depois de ser testado, com evidência no adesivo e transdutor. (a) Antes e (b) Depois.

Nas Figuras 4.13 (a) e (b) é possível ver o corpo de prova CPC4, antes e depois de ser testado. Ou seja, o corpo de prova "depois" passou pela temperatura de 140 °C. A Figura 4.13 (a) apresenta o corpo de prova CPC4 antes do teste, repara-se na sua cor mais clara quando comparado com a Figura 4.13 (b) que é o mesmo corpo de prova após o teste. Além da sua variação na coloração, é possível reparar na diferença entre as soldas, que no segundo caso parecem que também sofreram danos.

Para se ter uma ideia do ocorrido e concluir sobre a comunicação dos sensores, é necessário a análise da amplitude do sinal S11 e também da impedância Z1. Os gráficos presentes nas Figuras 4.14 a 4.18 apresentam estas curvas para os CPs de CPC1 ao CPC5.

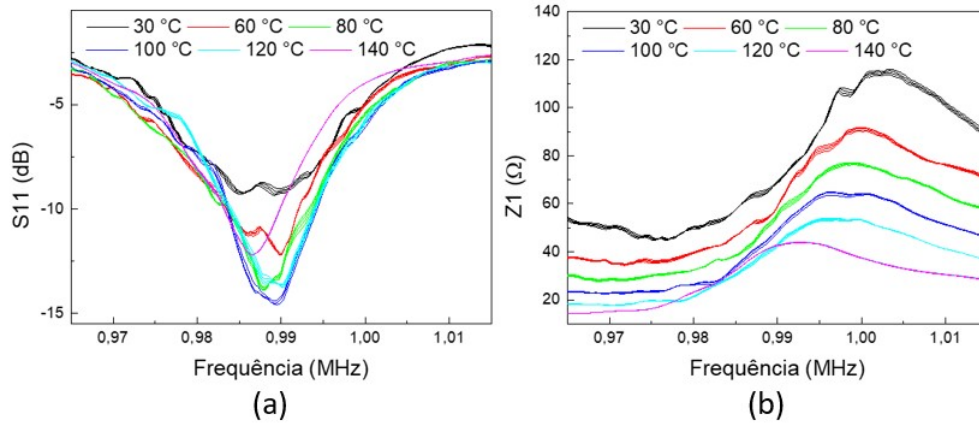


Figura 4.14: Gráfico de  $S_{11}$  e  $Z_1$  para o CPC1, com zoom. (a)  $S_{11}$  (dB)  $\times$  Frequência (MHz) ; (b)  $Z_1$  ( $\Omega$ )  $\times$  Frequência (MHz)

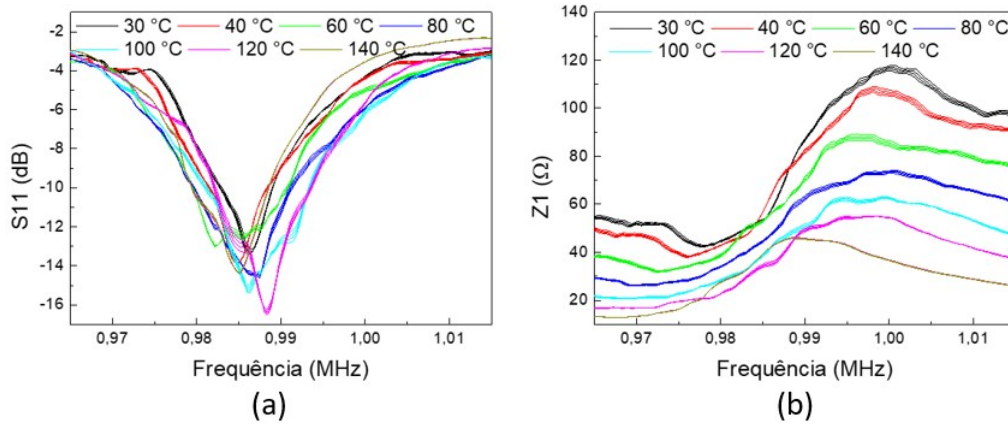


Figura 4.15: Gráfico de  $S_{11}$  e  $Z_1$  para o CPC2, com zoom.  $S_{11}$  (dB)  $\times$  Frequência (MHz) ; (b)  $Z_1$  ( $\Omega$ )  $\times$  Frequência (MHz)

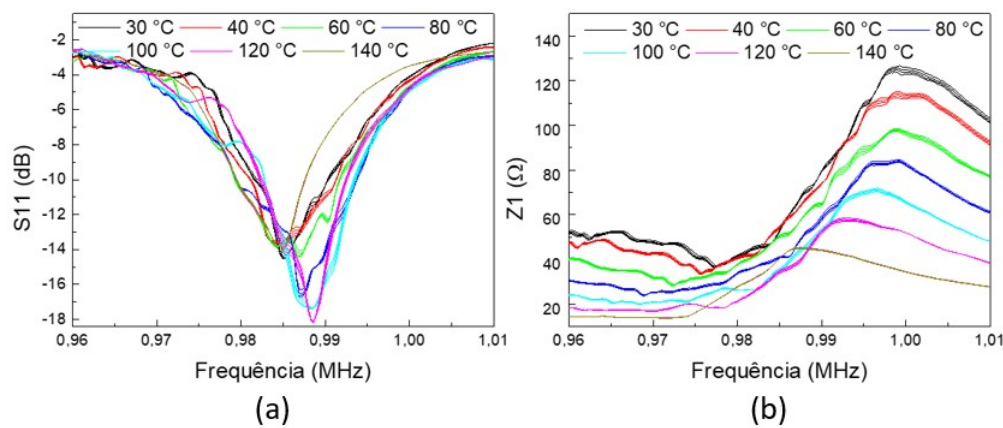


Figura 4.16: Gráfico de  $S_{11}$  e  $Z_1$  para o CPC3, com zoom.  $S_{11}$  (dB)  $\times$  Frequência (MHz) ; (b)  $Z_1$  ( $\Omega$ )  $\times$  Frequência (MHz)

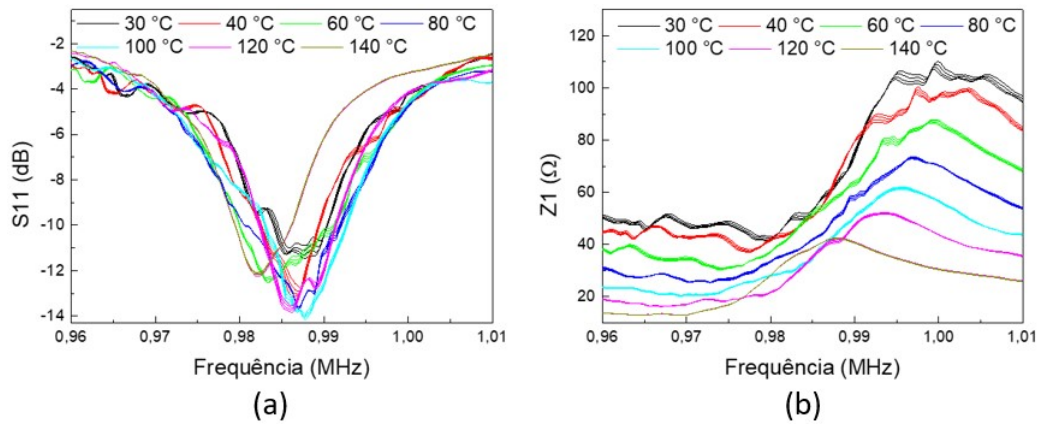


Figura 4.17: Gráfico de S11 e Z1 para o CPC4, com zoom. S11 (dB) × Frequência (MHz) ; (b) Z1 ( $\Omega$ ) × Frequência (MHz)

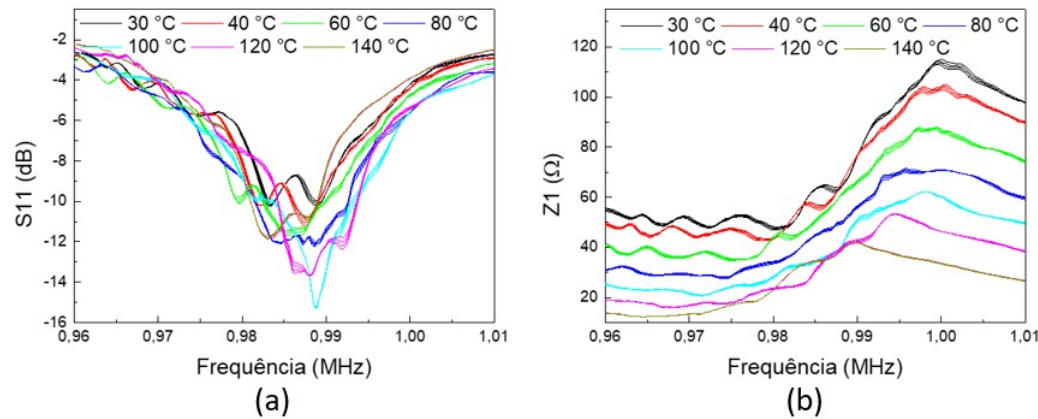


Figura 4.18: Gráfico de S11 e Z1 para o CPC5, com zoom. S11 (dB) × Frequência (MHz) ; (b) Z1 ( $\Omega$ ) × Frequência (MHz)

Para os 5 CPCs para todas as temperaturas, nenhuma das curvas de S11 em função da frequência deixou de apresentar um vale, ou seja, mesmo com a degradação do adesivo a 140 °C, todos os 5 corpos de prova ainda foram capazes de transmitir energia e sinal. As menores amplitudes no vale de S11 foram observadas a 120 °C para os CPC1, CPC2 e CPC3 e a 100 °C para CPC4 e CPC5. As amplitudes do sinal variam entre -8 dB a -12 dB para a temperatura ambiente, e caem em torno de -6 dB na faixa de 30 °C a 120 °C ou 140 °C dependendo do corpo de prova. Como comentado na seção 2.3.2 do Capítulo 2, quanto menor a amplitude do parâmetro de S11, melhor a transmissibilidade do sensor. Porém, deve se tomar cuidado pois a amplitude pequena demais significa que o UT está vibrando livremente, pois não teria o acoplamento com o aço para impedir o transdutor de vibrar livremente, ou seja, uma baixa amplitude no sinal de S11 significa que o transdutor perdeu o acoplamento com a base sobre a qual está fixado.

A maior amplitude do vale de S21 é para o CPC3 a 120 °C com aproximadamente -18 dB, como se pode observar na Figura 4.17 (a). Esse CP parte de -14 dB e tem uma variação de aproximadamente -4 dB. Comparando a resposta de S21 do CPC3 com os demais, percebe-se que ele foi o que apresentou a curva de S21 mais distante das demais, o que pode ser atribuído a um mau acoplamento do sistema.

Pela análise de variação de S11 com a temperatura, para todos os corpos de prova, as curvas a 30 °C e 40 °C são as que apresentam as maiores larguras de banda nos vales. Porém, à medida que a temperatura vai aumentando até atingir 110/120 °C, estas larguras de banda dos vales vão se estreitando. Isso significa que mais energia está sendo transferida para o canal de comunicação. Pode-se inferir a eficiência da transmissão também se observando a medida de impedância.

Como observado na 2.3.4, a impedância de referência do equipamento VNA é de 50  $\Omega$ . Próximo deste valor da impedância o sistema é mais eficiente na transmissão de energia, pois não tem mais a "barreira" da impedância. Porém, na frequência do vale de S11 que está sendo transmitida a maior quantidade de energia, ou seja, onde o transmissor está ressonando. Observando as curvas de S11 e Z1 obtidas para o CPC1, Figuras Figuras 4.14 (a) e (b), nota-se que a frequência deste vale está em torno de 0,99 MHz. Nesta frequência, para as curvas das temperaturas de 30 °C a 100 °C, a impedância está entre a ressonância e antirressonância e com valores próximos a 50  $\Omega$ . Quando a amplitude do sinal está entre a ressonância e a antirressonância significa que a reatância indutiva domina, portanto o transdutor tende a bloquear a corrente proporcionalmente. Bloqueando a corrente, a impedância tende a aumentar e com isso cresce o fluxo de energia.

Para todos os 5 CPCs, a curva de impedância vai se aproximando do valor de referência conforme a temperatura do sistema vai aumentando e, com isso, os sinais de S21 e S11 vão melhorando. Voltando para a análise individual do CPC1, a impedância para 80°C e 100 °C são as mais próximas da de referência e por consequência os melhores sinais de S11 e S21 são observados na temperatura de 100 °C, logo, quando o maior fluxo de energia do transmissor para o receptor irá ocorrer. Uma possível explicação para essa melhora no sinal quando a temperatura do sistema aumenta está relacionada com mudanças nas propriedades reológicas do adesivo, seguindo as informações fornecidas pelo fabricante ( figura 3.1). Com o aquecimento ocorre uma cura contínua do polímero, o que melhora o acoplamento do transdutor com a placa metálica.

Analizando o CPC2, Figura 4.15 (a), os valores que minimizam o sinal de S11 estão variando próximos à 0,987 MHz. Quanto à impedância, como pode

ser observado na Figura 4.15(b), nas temperaturas de 30 °C a 80 °C estão acima de 50  $\Omega$ . Conforme a temperatura vai aumentando a curva de impedância vai abaixando se aproximando do valor de 50  $\Omega$ , até as temperaturas de 100 °C e 120 °C, onde a impedância está perto da referência. Ou seja, estima-se que o maior fluxo de energia esteja entre 100 e 120°C para este caso. O vale de S11, está em 120 °C, Figura 4.15 (a) e a comunicação entre receptor e transdutor - S21, Figura 4.9 - está com o menor valor do vale em 100 °C. De 120 para 140° a amplitude do sinal cai bruscamente, tanto em S11 quanto em S21. Analisando a impedância, repara-se que este se afastou significativamente da referência.

O gráfico da Figura 4.16 (a), mostra a curva de S11 para o teste com o CPC3. Este tem uma variação maior na frequência quando comparado com o CPC1 e o CPC2. A frequência de amplitude do S11 varia entre 0,985 MHz a 0,99 MHz. Quanto o valor da impedância, tanto a 100 °C quanto a 120 °C, está próxima do valor de referência e o valor que otimiza o S11 em 120 °C. A impedância para os CPC4 e CPC5 também têm valores próximos da referência nas temperaturas de 100 e 120 °C, porém os vales de S11 são ambas em 100 °C.

## 4.2

### Simulação e Análise da Frequência Natural

Visando começar o desenvolvimento do modelo numérico foi realizado uma análise de frequência natural para as cerâmicas piezelétricas de forma livre, para ambos os PZTs listados na Seção 3.1.2 (Figura 3.4).

#### 4.2.1

##### $PZT_1$

Primeiramente a Figura 4.19, apresenta o modelo 2D, axi-simétrico desenhado no COMSOL Multiphysics® para o  $PZT_1$ , nas dimensões de 12,5x2 mm.

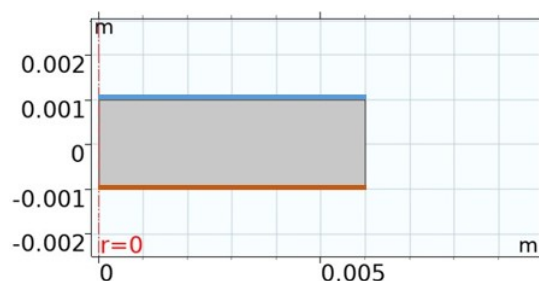


Figura 4.19: Modelo utilizado no COMSOL Multiphysics® para a simulação da frequência natural do  $PZT_1$ .



Na Figura 4.19 a linha vermelha localizada na esquerda da Figura representa a região de simetria, a linha azul o terminal que está sendo excitado e em laranja, é o terminal com a CC de amortecido. Em casos amortecidos, não se pode simplificar o  $\omega_d$  como sendo a frequência exata, pois pela análise de Fourier, existe um número infinito de frequências relacionadas a este [51]. Com a simulação foi possível obter a equação das primeiras frequências naturais amortecidas ( $\omega_d$ ) - primeira coluna da Tabela 4.3. Sendo possível pelas equações 2-36, 2-37 e 2-38, se chegar aos valores da frequência natural, não amortecida ( $\omega_n$ ), que são os valores da segunda coluna da Tabela 4.3. Os primeiros modos de vibração para a simulação do  $PZT_1$  estão apresentados na Figura 4.20.

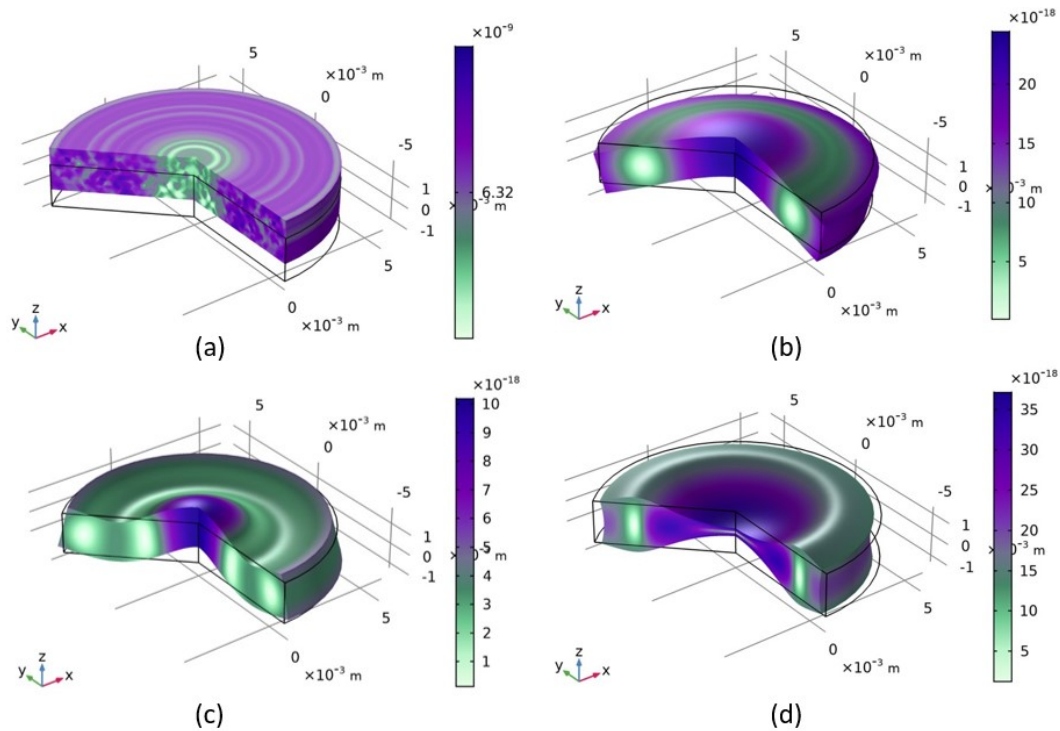


Figura 4.20: Ilustração dos quatro primeiros modos de vibração do  $PZT_1$ . (a) Modo de vibração desconsiderado -  $S = 3,15361 \times 10^{-9} \pm 0,02145i$ ; (b) Primeiro modo de vibração -  $S = 82997,6425 \pm 1,6428i$ ; (c) Segundo modo de vibração -  $S = 188935,51684 \pm 11,22864i$ ; (d) Terceiro modo de vibração -  $S = 259076,83119 \pm 16,97699i$ .

É possível observar na Figura 4.20(a) que a primeira frequência reconhecida na simulação é muito pequena, e não faz com que o  $PZT_1$  tenha uma vibração uniforme. Isto acontece porque a sua parte real é muito pequena - em torno de  $10^{-9}$  como apresenta a Tabela 4.3, sendo desconsiderada até pelo próprio programa. Sendo assim, considera-se a segunda frequência - Tabela 4.3, valor 82997,64 Hz - como a primeira frequência natural. Esta possui o seu modo de vibração cisalhante - vibrando verticalmente - como é possível observar na Figura 4.20 (b).

Tabela 4.3: Primeiras Frequências Naturais do  $PZT_1$  Modelo 12,5 x 2 mm

|                 | Equação<br>( $S = \sigma \pm \omega_d i$ ) | $\omega_n$<br>(Hz)     |
|-----------------|--------------------------------------------|------------------------|
| -               | $S = 3,15 \times 10^{-9} \pm 0,021i$       | $2,13 \times 10^{-19}$ |
| 1 <sup>a</sup>  | $S = 82997,64 \pm 1,64i$                   | 58657,95               |
| 2 <sup>a</sup>  | $S = 188935,52 \pm 11,22i$                 | 133339,45              |
| 3 <sup>a</sup>  | $S = 259076,83 \pm 16,98i$                 | 182848,65              |
| 4 <sup>a</sup>  | $S = 447492,76 \pm 46,42i$                 | 315374,99              |
| ...             | ...                                        | ...                    |
| 17 <sup>a</sup> | $S = 986551,04 \pm 284,04i$                | 685340,11              |
| 18 <sup>a</sup> | $S = 1045098,82 \pm 322,73i$               | 724956,67              |
| 19 <sup>a</sup> | $S = 1074942,63 \pm 316,55i$               | 744572,85              |
| 20 <sup>a</sup> | $S = 1075804,80 \pm 314,22i$               | 744083,48              |

Assim como a primeira frequência, a segunda frequência (Figura 4.20 (c)) também possui o modo de vibração cisalhante. Já o modo de vibração da terceira frequência natural, como ilustrado na Figura 4.20 (d), possui modo de vibração radial, ou seja vibra horizontalmente. Seria possível fazer esta análise para todas as infinitas frequências naturais definidas como solução da simulação. Porém, na parte prática do projeto, este modelo é excitado com 1 MHz, então é importante que a cerâmica tenha algum modo de vibração em torno de 1 MHz.

Segundo a Tabela 4.3, é possível verificar que o  $PZT_1$  tem um modo de vibração em torno de 1 MHz, a partir do 17º modo de vibração. A Figura 4.21 apresenta os modos 19º e 20º de vibração.

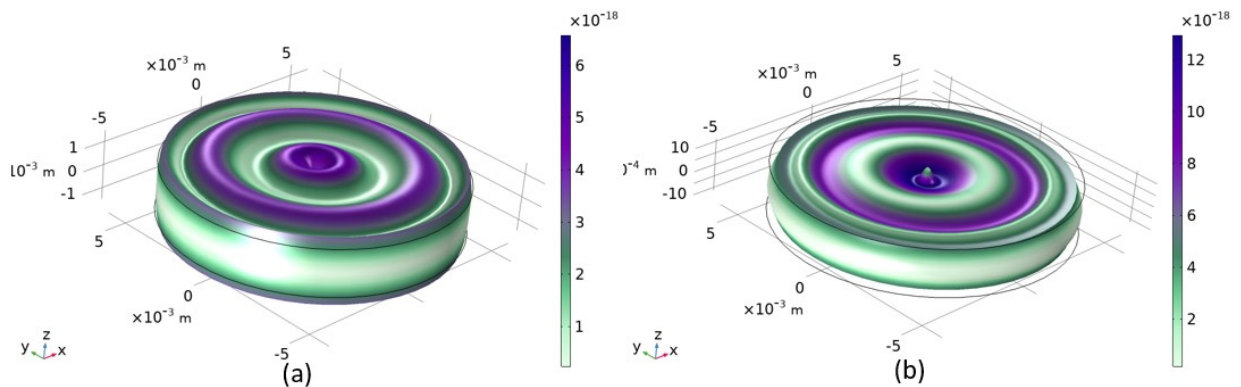


Figura 4.21: Ilustração dos modos de vibração do  $PZT_1$  com frequência em torno de 1 MHz. (a) 19º modo de vibração -  $S = 1074942,63 \pm 316,55i$ ; (b) 20º modo de vibração -  $S = 1075804,80 \pm 314,22i$ .

Com a simulação é possível perceber que o 19º modo de vibração ressona radialmente com uma frequência de 1074942,63 Hz e que 20º modo de vibração tem seus modos de vibração cisalhante em torno de 1075804,80

Hz, respectivamente.

O  $PZT_1$  foi soldado de forma livre com o intuito de se obter a resposta harmônica em frequência do PZT solto. Esta resposta está apresentada no gráfico da Figura 4.22.

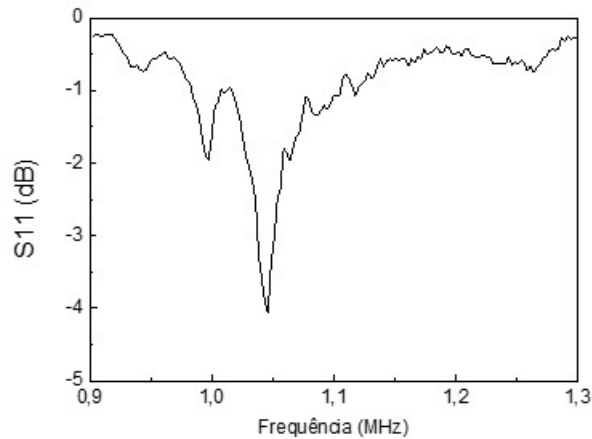


Figura 4.22: Gráfico da excitação do  $PZT_1$  - Amplitude (dB)  $\times$  Frequência (MHz).

Pelo gráfico da Figura 4.22 é possível confirmar que o  $PZT_1$  tem amplitude máxima em torno de 1 MHz. Isso é medido com o menor valor de  $S_{11}$  -, comprovando então que o modelo desenvolvido para este está coerente. Porém, este valor para a vibração de um PZT livre está muito pequena, o ideal seria em torno de -20 a -40 dB, visto que o  $PZT_1$  está vibrando livremente, e o maior valor de  $S_{11}$  está em aproximadamente -4 dB. Com este sinal seria muito difícil ter uma comunicação entre os transdutores. Esta análise justifica o comportamento não satisfatório do CPP nos testes de tração.

#### 4.2.2

##### $PZT_2$

Para o desenvolvimento do modelo do  $PZT_2$ , nas dimensões  $25 \times 2$  mm, também foi utilizado um modelo axi-simétrico para a simulação dos seus modos de vibração. A Figura 4.23 apresenta o modelo desenhado no programa COMSOL ®.

Igualmente para o  $PZT_1$ , para o  $PZT_2$  também foi simulado em um modelo axi-simétrico, sendo a linha vermelha vertical na Figura 4.23 a curva de simetria, a linha horizontal azul a CC que determina que nesta face é o terminal de excitação e a linha laranja a face que recebeu a CC de aterramento. Com isso foram simulados os 39º primeiros modos de vibração e com eles calculados as frequências naturais não amortecidos ( $\omega_n$ ) baseados pelas equações 2-36,



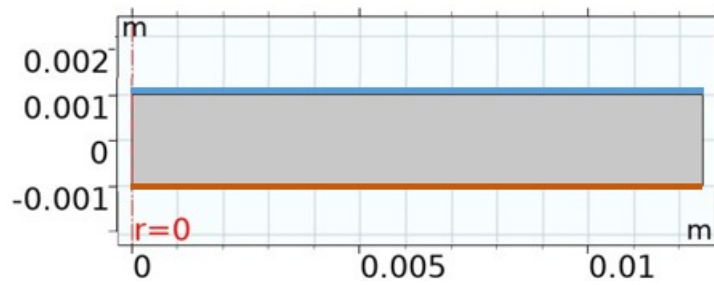


Figura 4.23: Modelo utilizado no COMSOL®, para a simulação da frequência natural do  $PZT_2$ .

2-37 e 2-38. Estes valores são os que constituem a terceira coluna da Tabela 4.4. E pela Figura 4.24 são apresentados os 4 primeiros modos de vibração para o  $PZT_2$ .

Tabela 4.4: Primeiras Frequências Naturais do  $PZT_2$  Modelo 25 x 2 mm

|                 | Equação<br>( $S = \sigma \pm \omega_d i$ ) | $\omega_n$<br>(Hz)     |
|-----------------|--------------------------------------------|------------------------|
| -               | $S = 2,48 \times 10^{-9} \pm 0,016i$       | $9,68 \times 10^{-20}$ |
| 1 <sup>a</sup>  | $S = 21200,07 \pm 0,12i$                   | 14990,54               |
| 2 <sup>a</sup>  | $S = 78650,45 \pm 1,62i$                   | 55615,20               |
| 3 <sup>a</sup>  | $S = 91520,05 \pm 2,63i$                   | 64716,46               |
| 4 <sup>a</sup>  | $S = 156830,29 \pm 5,65i$                  | 110900,80              |
| ...             | ...                                        | ...                    |
| 35 <sup>a</sup> | $S = 995190,14 \pm 291,19i$                | 701747,28              |
| 36 <sup>a</sup> | $S = 1017753,15 \pm 297,06i$               | 716629,41              |
| 37 <sup>a</sup> | $S = 1036520 \pm 318,46i$                  | 728797,06              |

Repara-se na Figura 4.24 (a) que igualmente ao o  $PZT_1$ , a primeira frequência natural amortecida ( $\sigma$ ) do  $PZT_2$ , também é pequena demais - em torno de  $S = 2,48 \times 10^{-9}$  e o próprio programa não a reconhece como uma frequência, pois este não consegue ter uma resposta harmônica. Sendo assim, apenas a partir da primeira frequência natural é associada a um modo de vibração. A Figura 4.24 (b) mostra este primeiro modo de vibração, na qual é possível afirmar que possui um modo de vibração cisalhante com frequência de 21200,07 Hz.

A segunda possui um modo de vibração radial, como ilustra a Figura 4.24 (c), na frequência de 78650,45 Hz. A terceira frequência natural possui um modo de vibração cisalhante, com curvas mais definidas que o 2º modo, e com frequência em torno de 91520,05 Hz, Figura 4.24 (d).

Ambos os PZTs foram excitados com uma frequência em torno de 1 MHz, então para a melhor eficiência do modelo, é esperado que este também tenha uma "melhor frequência" em torno deste, ou seja, uma frequência de

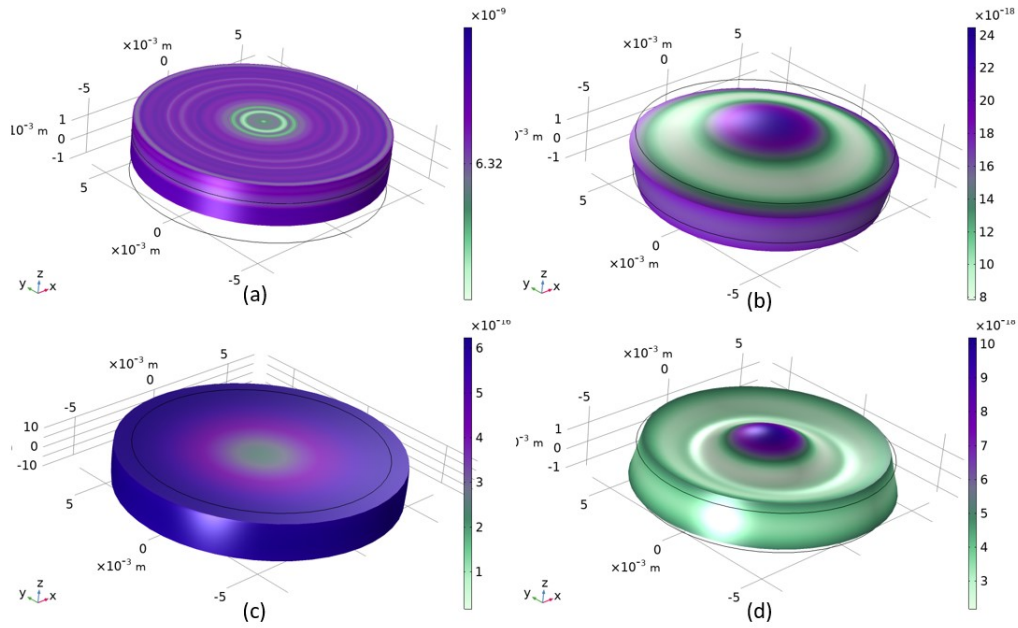


Figura 4.24: Ilustração dos quatro primeiros modos de vibração do  $PZT_2$ . (a) Modo de vibração desconsiderado -  $S = 2,4842 \times 10^{-9} \pm 0,0157i$ ; (b) Primeiro modo de vibração -  $S = 21200,07322 \pm 0,1162i$ ; (c) Segundo modo de vibração -  $S = 78650,4462 \pm 1,6223i$ ; (d) Terceiro modo de vibração -  $S = 91520,0481 \pm 2,6288i$ .

ressonância em torno deste valor. Seguindo a Tabela 4.4, as frequências naturais  $36^a$  e  $37^a$  apresentaram frequências amortecidas em torno de 1 MHz. As Figuras 4.25 (a) e (b), mostram as simulações para o modo para estas duas frequências, respectivamente.

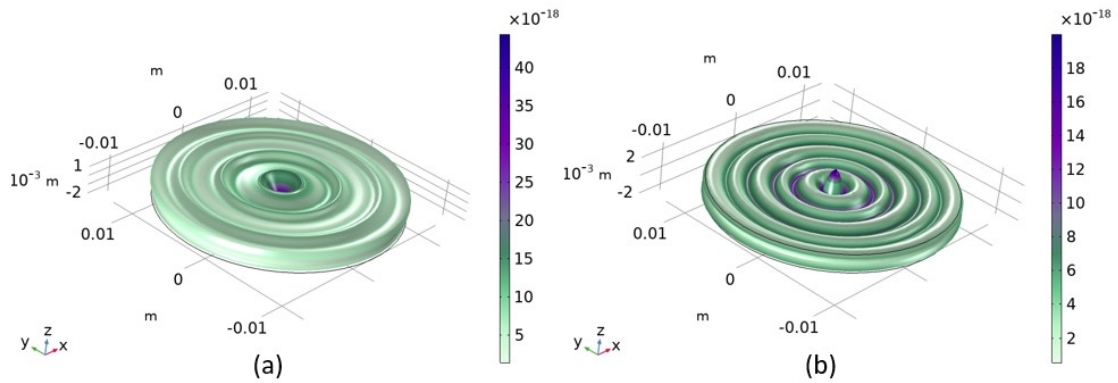


Figura 4.25: Ilustração dos modos de vibração do  $PZT_1$  com frequência em torno de 1 MHz. (a)  $36^o$  modo de vibração -  $S = 1017753,15 \pm 297,06i$ ; (b)  $37^o$  modo de vibração -  $S = 1036520 \pm 318,46i$ .

Analisando a Figura 4.25 (a) e (b) percebe-se que o  $36^o$  modo vibra radialmente e que o  $37$  modo é cisalhante.

Testando o  $PZT_2$  em uma análise de frequência por amplitude e verifica-se que esta cerâmica possui o valor que minimiza  $S_{11}$  perto de 1MHz.

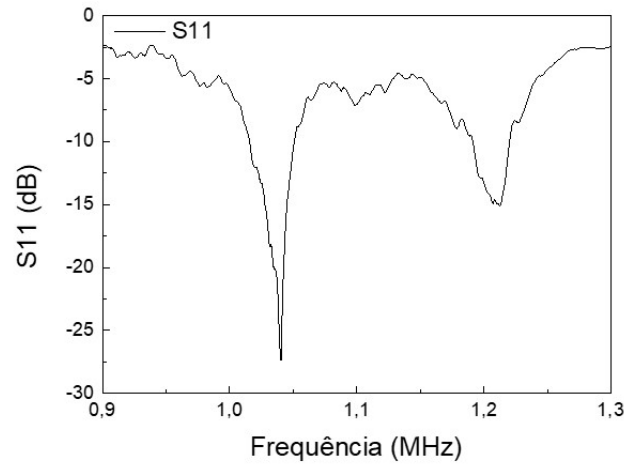


Figura 4.26: Gráfico da excitação do  $PZT_2$  - Frequência (MHz)  $\times$  Amplitude (dB).

Pelo gráfico Amplitude (dB)  $\times$  Frequência (MHz) da Figura 4.26, confirma-se que a cerâmica  $PZT_2$  tem a maior amplitude em torno de 1,04 MHz, frequência dos modos  $36^a$  e  $37^a$ . Isto confirma também que o modelo para as cerâmicas, desenvolvido no COMSOL®, possui uma boa coerência. E que a amplitude de -28 dB para o  $PZT_2$  permite que este seja usado como transmissão de energia, possibilitando os testes realizados anteriormente.

### 4.3

#### Validação do Modelo Numérico do Corpo de Prova - Com e sem Cerâmica Piezelétrica

Nesta subseção serão apresentados os valores simulados usados para validar a simulação. Primeiramente, foi realizado um modelo sem o PZT e depois com, como descrito anteriormente. Para facilitar o entendimento, esta validação será dividida em sub-seções.

#### 4.3.1

##### Tensão Mecânica - Sem PZT

Como descrito na Seção 2.4.1, o modelo simulado foi o CPC 2D, primeiro sem os PZTs acoplados ao sistema, a fim de validar sistema do mais simples dos problemas para o mais complexo.

Com o auxílio das equações 2-4 e 2-5, que são respectivamente, tensão (força) e tensão (deformação), foi possível validar este modelo para tensões simples com as forças simuladas de 1 N, 2 kN, 4 kN e 6 kN - Por motivos de

convergência do modelo transiente no COMSOL®, não é possível utilizar carga zero. Como a menor carga possível de se utilizar no modelo é 1 N.

As tensões teóricas para essas cargas são 0, 8, 17 e 25 MPa. E a deformação para a seção transversal de  $240 \text{ mm}^2$  é de 0, 42, 83 e  $125 \mu\text{m}/\text{m}$ , respectivamente. A Tabela 4.5 apresenta os valores de tensão teórica e as simuladas. Para validar o modelo simulado e as Figuras 4.27 (a) a (d) apresentam as deformações simuladas para cada carga aplicada, sendo possível observar a diferença em cada simulação.

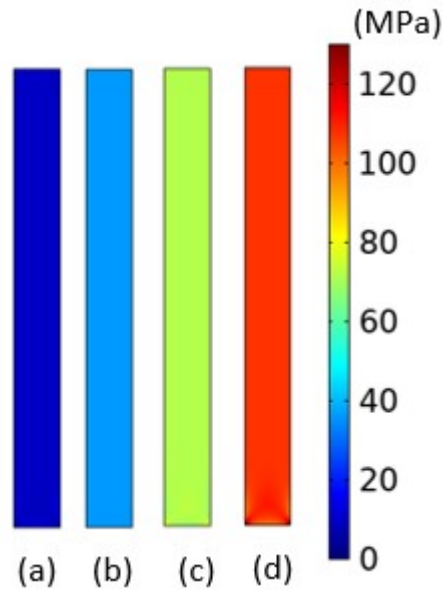


Figura 4.27: Modelo sem PZT deformado devido atuação da tensão mecânica. (a)  $0 \mu\text{m}/\text{m}$ ; (b)  $42 \mu\text{m}/\text{m}$ ; (c)  $83 \mu\text{m}/\text{m}$ ; (d)  $125 \mu\text{m}/\text{m}$ .

Tabela 4.5: Deformação devido a influência da carga

| Carga (kN) | Tensão Teórica (MPa) | Tensão Simulada (MPa) | Erro (%) |
|------------|----------------------|-----------------------|----------|
| 2,0        | 8,33                 | 8,264                 | 0,83     |
| 4,0        | 16,67                | 16,529                | 0,85     |
| 6,0        | 25,00                | 24,793                | 0,82     |

A diferença entre as tensões teóricas e as simuladas são bem pequenas. Como se pode observar na quarta coluna da Tabela 4.5, o erro da simulada em relação a teórica é em torno de 0,83%. Este resultado é uma validação positiva para este primeiro passo da simulação.

A Figura 4.27 é a simulação para a tensão mecânica em escala de cores, em (a) é a deformação próxima a  $0 \mu\text{m}/\text{m}$ . A Figura 4.27 (b), exibe a deformação de  $53,59 \mu\text{m}/\text{m}$  para uma tensão de 8,33 MPa, atuando no corpo. As Figuras 4.27 (c) e (d), são para as deformações para as tensões de 17 MPa

e 25 MPa, sendo 91,197 e 128  $\mu m/m$ , respectivamente. Para a tensão de 25 MPa começa a surgir uma deformação não uniforme na borda inferior, devida a CC de engaste nesta região.

4.3.2  
Tensão Mecânica - Com PZT

Avançando nas simulações, os transdutores foram inseridos no modelo. Com isso, a tensão sofreu alterações, pois a cerâmica não permite que o CP se deforme livremente. A Figura 4.28 é a ilustração da deformação simulada para cada carga aplicada. E a Tabela 4.6 apresenta diferença entre a tensão mecânica simulada sem PZT e a com PZT.

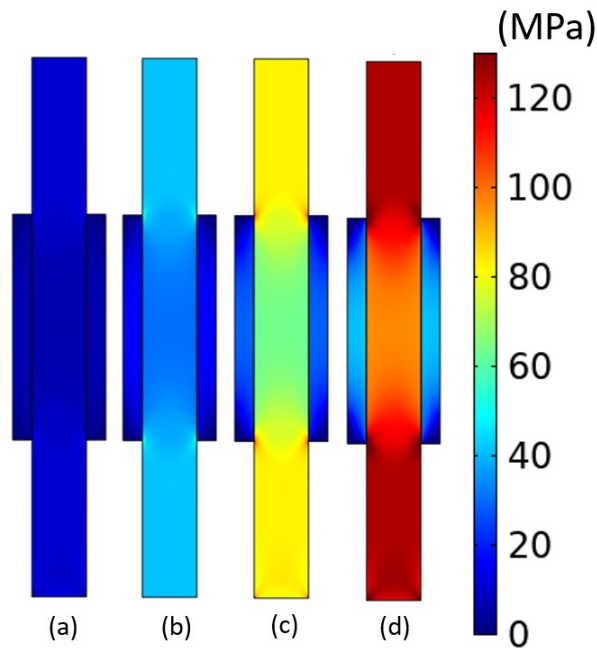


Figura 4.28: Modelo com PZT deformado devido as tensões. (a) 0  $\mu m/m$ ; (b) 42  $\mu m/m$ ; (c) 83  $\mu m/m$ ; (d) 125  $\mu m/m$ .

Tabela 4.6: Comparação da tensão nos modelos com e sem PZT.

| Tensão Sem PZT (MPa) | Tensão Com PZT (MPa) | Diferença (%) |
|----------------------|----------------------|---------------|
| 8,264                | 6,166                | 25,39         |
| 16,529               | 12,695               | 23,20         |
| 24,793               | 19,263               | 22,30         |

Com os valores da Tabela 4.6 é possível observar que conforme carga é aplicada, a diferença entre as duas tensões diminui, isso seria porque o PZT funciona como uma barreira que segura o CP impossibilitando que este se

deforme. Este impedimento causado pelo PZT, acaba gerando uma variação na distribuição da tensão pelo corpo de prova e uma deformação não uniforme, como é possível notar nas Figuras 4.28 (b), (c) e (d) .

Na Figura 4.28 (b) é possível observar a região azul mais clara no topo do CP. Essa região não sofre tanto com a influência do PZT, e por isso tem uma tensão maior. Este efeito também ocorre 4.28 (c), onde a região verde - região central ao CP - tem uma tensão menor, por conta dessa mesma influência. Da mesma forma, o efeito ocorre também na Figura 4.28 (d), na qual a região vermelha mais clara - região central do CP - tem uma tensão menor que as pontas do CP.

### 4.3.3

#### Transferência de Calor- Sem PZT

Utilizando as equações que definem a deformação de um corpo por dilatação devido a temperatura - equações 2-49 e 2-50 - foi possível encontrar o deslocamento do corpo de prova devido à influência da temperatura no modelo. O modelo foi desenvolvido em 2D e todas as condições de contorno foram adaptadas para ser livre, este corpo terá deslocamento e deformação, porém não terá tensão mecânica. Isso porque um corpo apenas terá tensão mecânica devido à influência da dilatação térmica se for impedido de se expandir. Como comentado na metodologia, a temperatura de referência foi de 30 °C, no entanto, por motivos de convergência, a menor temperatura possível para ser inserida no modelo simulado é 31 °C. Por este motivo, as temperaturas simuladas para este modelo inicial foram: 31 °C, 50 °C, 80 °C, 100 °C, 120 °C e 140 °C. A Figura 4.29, apresenta em escala de cores a variação de temperatura em °C, apenas para ilustrar que as temperaturas simuladas estão de acordo com o citado.

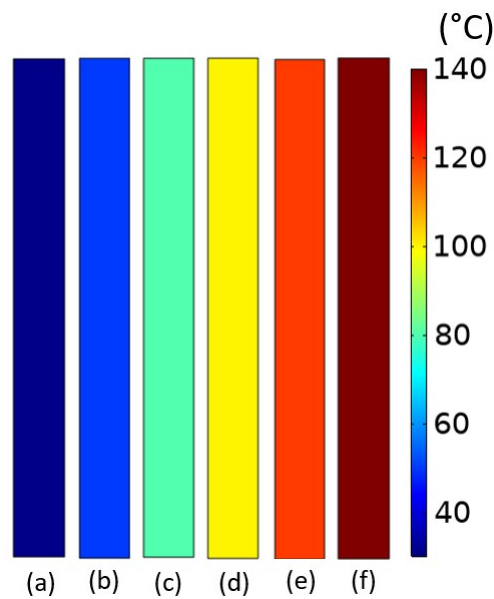


Figura 4.29: Modelo sem PZT apresentando a variação de temperatura por escala de cores. (a)31 °C; (B) 60 °C; (c) 80 °C; (d) 100 °C; (e) 120 °C; (f) 140 °C.

A Tabela 4.7 apresentada os valores para o deslocamento em y, ocasionado devido à dilatação do corpo pela influência da temperatura. A segunda coluna da esquerda para a direita da Tabela mostra o deslocamento teórico, calculado com a equação 2-49. Já a terceira coluna mostra os valores simulados pelo COMSOL®. A quarta coluna da Tabela 4.7 mostra a porcentagem de diferença entre os valores teóricos e simulados do deslocamento, tendo como referência o valor teórico.

Tabela 4.7: Deslocamento do corpo de prova devido à variação de temperatura - Modelo Sem PZT

| Temperatura<br>(°C) | Deslocamento<br>Teórico<br>( $\mu m$ ) | Deslocamento<br>Simulado<br>( $\mu m$ ) | Erro<br>(%) |
|---------------------|----------------------------------------|-----------------------------------------|-------------|
| 31                  | 0,000738                               | 0,000967                                | 31,03       |
| 60                  | 0,0227                                 | 0,0289                                  | 27,31       |
| 80                  | 0,0369                                 | 0,0483                                  | 30,89       |
| 100                 | 0,0516                                 | 0,0676                                  | 31,01       |
| 120                 | 0,06640                                | 0,0869                                  | 30,87       |
| 140                 | 0,08118                                | 0,106                                   | 30,57       |

Com a Tabela 4.7 é possível visualizar os deslocamentos devido a dilatação térmica. Todas as simulações apresentaram um erro em torno de 30 %. Além disso observa-se que o deslocamento para 31 °C é aproximadamente 0, o que é coerente, pois tem uma variação de apenas 1 °C. Foi necessário simu-

lar nesta temperatura, pois por problema de convergência do software, não é possível simular com 30 °C, que é a mesma temperatura dada como inicial.

4.3.4  
Transferência de Calor - Com PZT

Nesta subseção será apresentada a resposta da simulação para a inserção de temperatura com o PZT acoplado no modelo e a comparação entre eles. A Figura 4.30 (a) a (f), apresentam a variação de temperatura por cores. E a Tabela 4.8 apresenta esta comparação para as 6 temperaturas estudadas.

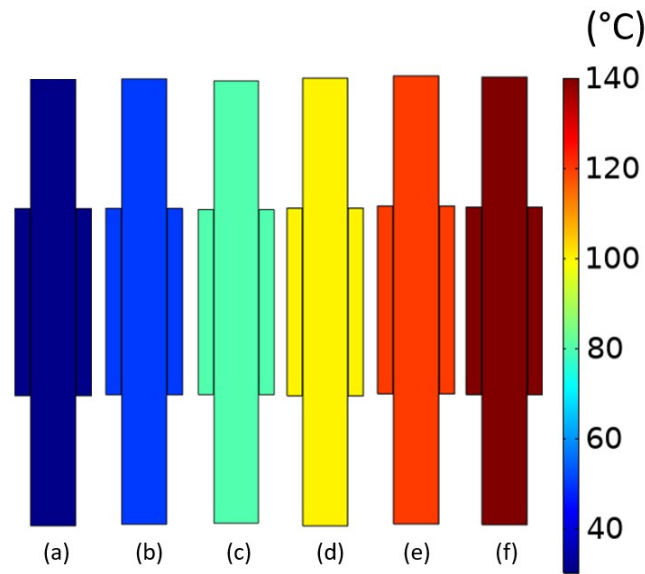


Figura 4.30: Modelo com PZT apresentando a variação de temperatura por escala de cores. (a)31 °C; (B) 60 °C; (c) 80 °C; (d) 100 °C; (e) 120 °C; (f) 140 °C.

Tabela 4.8: Variação da tensão comparando os dois modelos

| Temperatura (°C) | Deslocamento Teórico (μm) | Deslocamento Simulado (μm) | Erro (%) |
|------------------|---------------------------|----------------------------|----------|
| 31               | 0,000738                  | 0,000925                   | 25,339   |
| 50               | 0,02268                   | 0,02773                    | 22,266   |
| 80               | 0,0369                    | 0,04622                    | 25,257   |
| 100              | 0,0517                    | 0,06471                    | 25,164   |
| 120              | 0,0664                    | 0,08319                    | 25,286   |
| 140              | 0,0812                    | 0,1017                     | 25,246   |

É possível observar comparando as Tabelas 4.8 e 4.7 que o erro para o modelo com PZT diminui 5%o que não é uma diminuição significativa, mas se dá pelo fato do PZT dilatar menos que o aço e, por estar acoplado, impede que o aço de expanda livremente



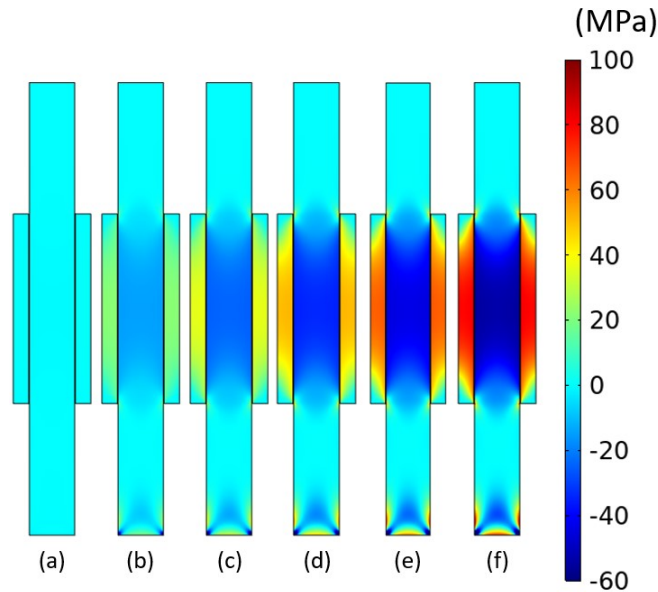


Figura 4.31: Modelo com PZT apresentando a variação da tensão criada no CP devido a condição de contorno fixa e à atuação dos PZTs. (a) 31 °C; (B) 60 °C; (c) 80 °C; (d) 100 °C; (e) 120 °C; (f) 140 °C.

A Figura 4.31 mostra a resposta da tensão mecânica para cada temperatura atuando. Observa-se que a região entre os PZTs sofre uma alta tensão mecânica compressiva que aumenta a medida que temperatura aumenta. Isto ocorre porque os PZTs não permitem que o aço se expanda livremente. Além disso, uma tensão surge na região inferior do CP porque o corpo de prova tem a face inferior fixa como condição de contorno.

### 4.3.5

#### Tensão Elétrica e Análise Piezelétrica

Pela análise piezelétrica e metodologia da modelagem descritas na subseção 3.5.3, foi possível adquirir os resultados para a simulação piezelétrica. Para a melhor compreensão e aprimoramento do modelo, diversas adaptações e comparações foram necessárias, tais como comparação da função de excitação, da malha, do tempo de simulação, espessura do adesivo, propriedades dos materiais, entre outras. Nesta seção serão apresentadas essas comparações.

#### 4.3.5.1

##### Comparação de Excitação Piezelétrica

O modelo foi excitado com 3 funções diferentes, uma curva do tipo Wavelet Morlet, um pulso de seno e uma Gaussiana. Também foram inseridos amortecimentos na camada de adesivo do modelo, seguindo o proposto no artigo [52]. E assim, foi variada a amplitude de excitação, de forma a simular

o mais próximo possível os resultados experimentais com corpo de prova CPC. Para se calcular o parâmetro  $S_{21}$ , foi utilizada a equação 2-39

A Figura 4.32 apresenta as simulações para as 3 funções sugeridas e uma amplitude de 200 Volts, em comparação com 2 resultados experimentais escolhidos aleatoriamente (CPC2 e CPC5).

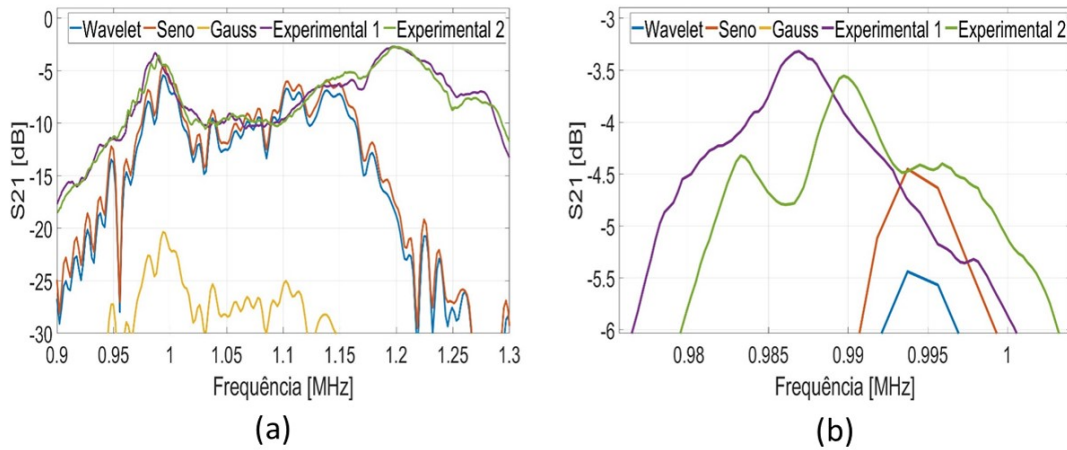


Figura 4.32: Funções inseridas no modelo. (a) As 3 funções comparadas a 2 resultados experimentais; (b) Zoom na área de interesse.

Em escala de cores, os gráficos das Figuras 4.32 (a) e (b), sendo em azul a simulação com a função Wavelet Morlet, em laranja para o pulso de seno, em amarelo a Gaussiana e em verde e roxo as curvas para os resultados experimentais. A Gaussiana ficou com a amplitude do sinal bastante distante do resultado experimental e por isso foi descartada. Aplicando o zoom na região de interesse - Figura 4.32 (b), as simulações com Wavelet Morlet e pulso de seno, ficaram bem semelhantes, porém com uma leve melhora em amplitude da pulso de seno. Observando apenas esta característica não é possível afirmar que o sinal com a pulso de seno é levemente melhor com relação à Wavelet Morlet e por este motivo outras comparações e adaptações devem ser utilizadas.

A Figura 4.33 apresenta a variação do amortecimento adicionado ao PZT e à camada de adesivo, com um valor de referência  $\beta = 1 \times 10^{-11}$ , inserido como forma de amortecimento de Rayleigh, em ambos os PZTs e no adesivo [52].

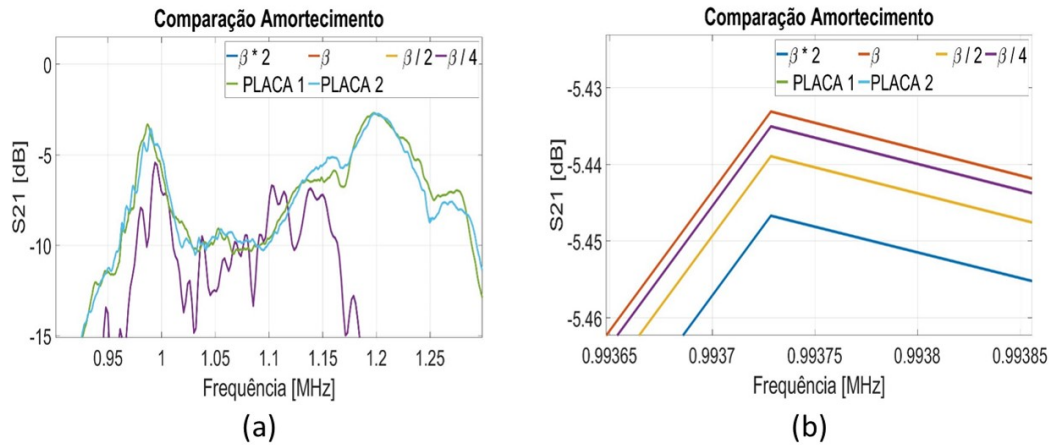


Figura 4.33: Variações no amortecimento associado ao PZT e adesivo. (a) Comparação entre amortecimentos (b) zoom na área de interesse.

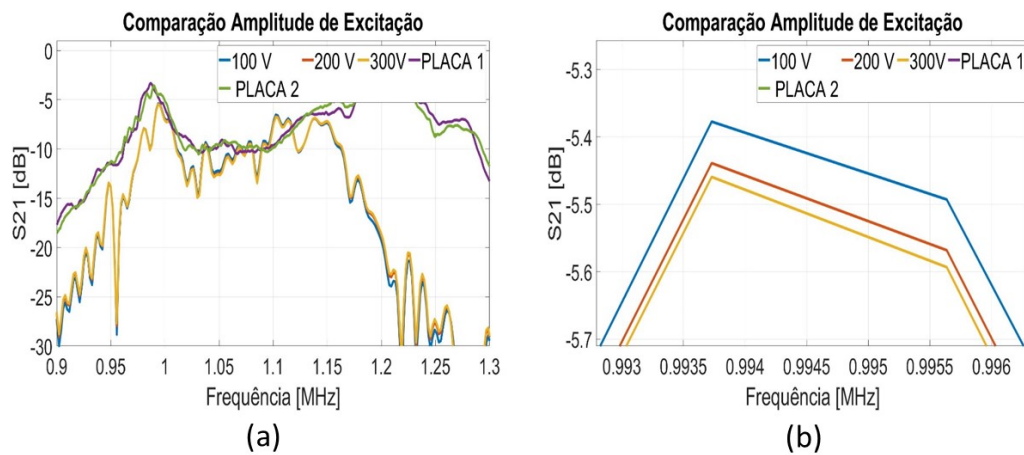


Figura 4.34: Variações na amplitude do sinal de excitação, em Volts. (a) Amplitude Variando (b) Zoom na área de interesse.

Observa-se uma pequena variação no sinal para os diferentes amortecimentos utilizados. Por este motivo foi escolhido para o sistema utilizar apenas o  $\beta$ . Para a amplitude do sinal, a Figura 4.34 apresenta que também não se tem grandes variações no sinal quanto às amplitudes do sinal. Por este motivo foi escolhido uma amplitude de 200 Volts.

#### 4.3.5.2

##### Comparação Propriedades de Simulação

Para aprimorar a simulação e ajustar o esforço computacional necessário, alguns ajustes na simulação foram utilizados, tais com o tempo de simulação e o tamanho da malha. Seguindo a referência [52] e como explicito na Seção 3.5.3, foram utilizados dois tipos de malhas, com constante  $n = 15$  e com  $n = 20$ , baseando-se na equação 3-5. Ambas as simulações foram comparadas

com os experimentais do CPC2 e CPC5, apresentados na Figura 4.35 para o sistema excitado com a função Wavelet Morlet e 4.36 para a excitação com pulso de seno.

A malha com  $n = 15$ , contém 642 elementos para a simulação em 2D e com uma camada de  $70 \mu\text{m}$  de adesivo epóxi. Com o TF sendo 100 períodos o tempo total de simulação resultou em 1 hora e 06 minutos. Já a malha com  $n = 20$ , nas mesmas condições descritas anteriormente, contém 846 elementos e realiza toda a simulação em 1 hora e 29 minutos.

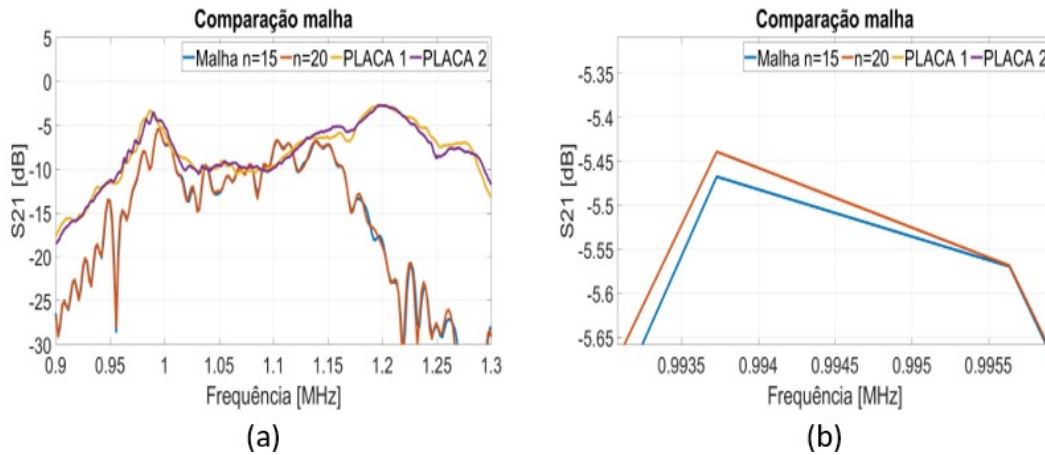


Figura 4.35: Variação no tamanho da malha - Excitado com a função Wavelet Morlet. (a) 2 tamanhos de malhas diferentes comparados com 2 curvas experimentais; (b) Zoom na área de interesse.

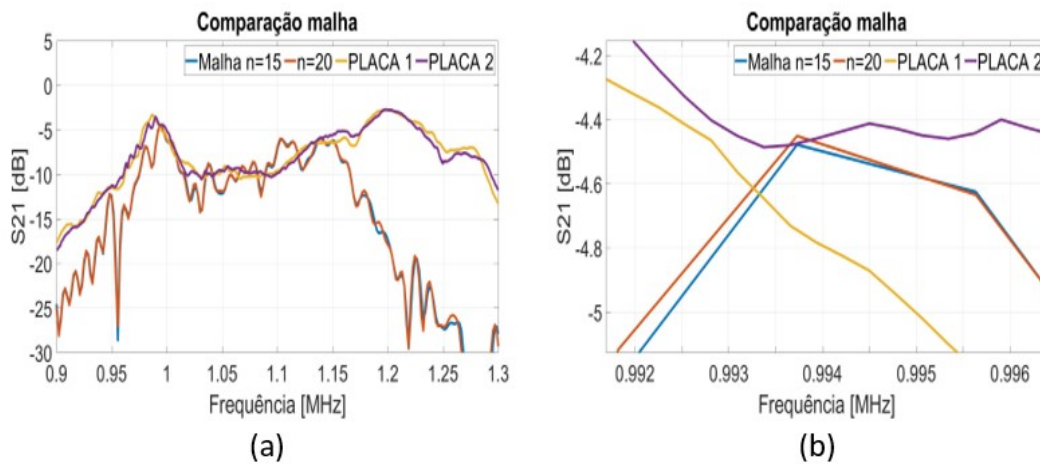


Figura 4.36: Variação no tamanho da malha - Excitado com a função Pulso de seno. (a) 2 tamanhos de malhas diferentes comparados com 2 experimentais; (b) Zoom na área de interesse.

Nas simulações excitadas com Wavelet e com o pulso de seno (Figuras 4.35 (a) e 4.36 (a)) não se tem uma diferença significativa entre as simulações com a variação de malha. Nas Figuras com zoom (Figura 4.35 (b) e 4.36 (b))

confirma-se que a diferença é muito pequena. Como o tempo de simulação com  $n = 15$  é 20 minutos menor que o tempo com  $n = 20$ , e a diferença dos resultados é quase imperceptível, as demais simulações foram realizadas com  $n = 15$ .

Além da variação do tamanho da malha, como pode ser visto na Tabela 3.6, foram realizados 4 tempos finais de simulação (TF), 20, 50, 70 e 100 períodos. As Figuras 4.37 e 4.38 apresentam as curvas para estas simulações.

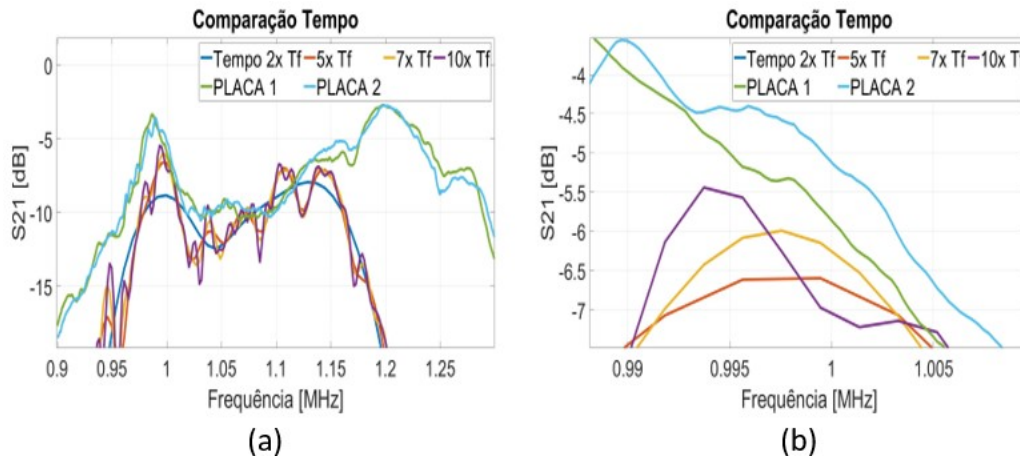


Figura 4.37: Tempo de simulação para a função Wavelet Morlet. (a) 4 tempos de simulação diferentes comparado com 2 experimentais; (b) Zoom na área de interesse.

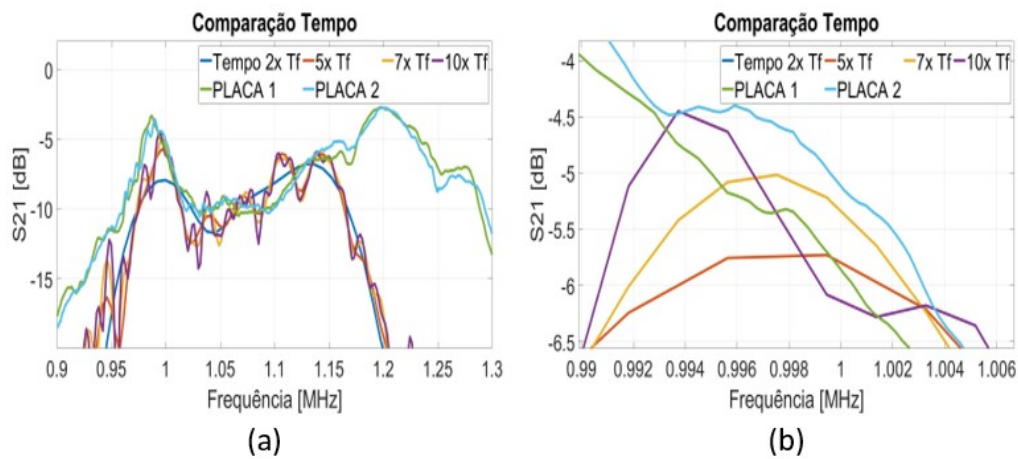


Figura 4.38: Tempo de simulação para a função pulso de seno. (a) 4 tempos de simulação diferentes comparado com 2 experimentais; (b) Zoom na área de interesse.

O tempo de simulação altera significativamente a curva de  $S_{21}$ . Repara-se pelas Figuras 4.37 e 4.38 que quando maior o tempo de simulação, mais semelhante fica a curva simulada com a experimental. Pelo tempo computacional, não se achou necessidade de se aumentar o tempo de simulação, pois com 100 períodos chegou-se a uma curva próxima e suave da experimental.



### 4.3.5.3

#### Variações nas Propriedades da Camada de Adesivo

O adesivo epóxi é um material que tem propriedades difíceis de se quantificar. Por se ter uma camada muito pequena, mas que mesmo assim possui grande influência na propagação da onda ultrassônica, o conhecimento de suas propriedades é importante.

Para as simulações realizadas neste trabalho, foi necessário variar duas propriedades do adesivo para se chegar a um valor mais próximo da curva do S21 do resultado experimental, espessura da camada e o módulo de elasticidade do adesivo.

A primeira propriedade variada foi a espessura da camada de adesivo. Como o processo de instrumentação do PZT é manual, mesmo o processo sendo realizado com todos os cuidados e procedimentos pré-definidos, controlar e mensurar o tamanho da espessura da camada de adesivo é difícil. Por este motivo, as Figuras 4.39 e 4.40, mostram os resultados para esta primeira propriedade variada.

Os artigos [54] e [52], estipulam que a camada de adesivo varia em torno de 30  $\mu\text{m}$  a 150  $\mu\text{m}$ . Nas Figuras 4.39 e 4.40 é possível observar que a espessura parte de 30  $\mu\text{m}$  variando até 150  $\mu\text{m}$ . Para ambos os sinais a característica da curva vai se alterando de forma semelhante conforme a espessura de altura. A amplitude do sinal vai subindo até 100  $\mu\text{m}$ , e em 150  $\mu\text{m}$  cai bruscamente. Apesar de 100  $\mu\text{m}$  ser a maior amplitude, a curva que apresenta a forma mais parecida com o sinal experimental é quando a simulação foi realizada com a espessura de 70  $\mu\text{m}$ . Por este motivo, esta espessura será a utilizada nas demais simulações.

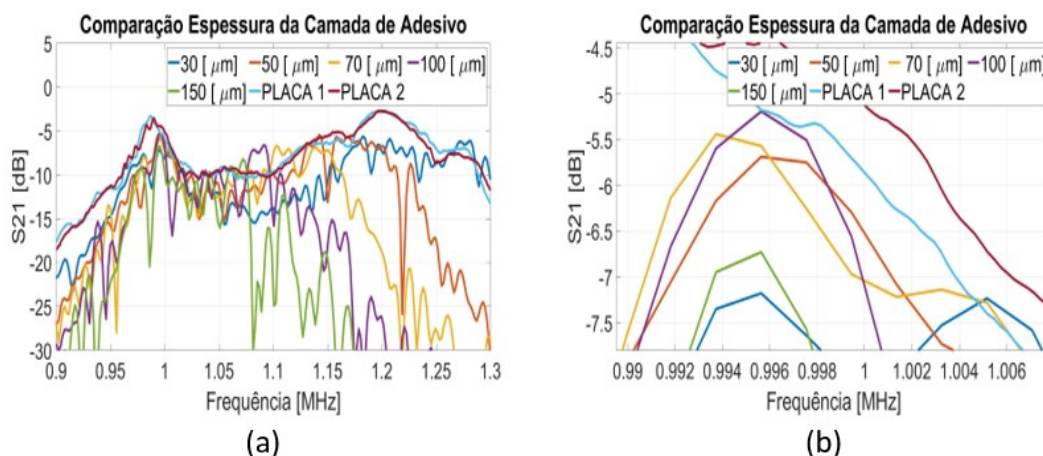


Figura 4.39: Variação da espessura para a camada de adesivo - Excitado com a função Wavelet Morlet. (a) 5 espessuras para a camada de adesivo diferentes comparados com 2 experimentais; (b) Zoom na área de interesse.

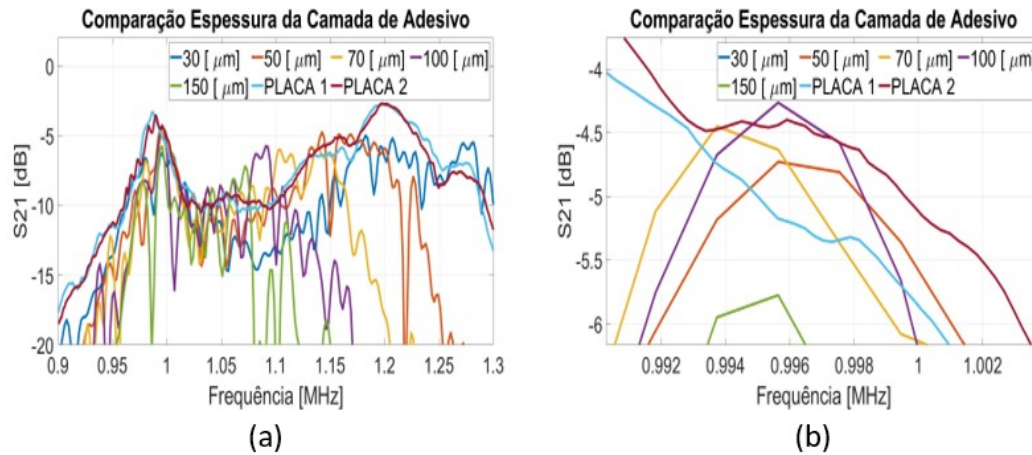


Figura 4.40: Variação da espessura para a camada de adesivo - Excitado com a função pulso de seno. (a) 5 espessuras para a camada de adesivo diferentes comparados com 2 experimentais; (b) Zoom na área de interesse.

A última alteração realizada foi no módulo de elasticidade do adesivo, também testada com o sinal Wavelet e com o pulso de seno. Os resultados estão nas Figuras 4.41 e 4.42. Algumas referências foram necessárias para a escolha do módulo de elasticidade. O primeiro valor de módulo de elasticidade simulado foi o fornecido pelo fabricante, que disse que nas condições ideais e em temperatura ambiente o adesivo deverá ter 5,9609 GPa de módulo de elasticidade.

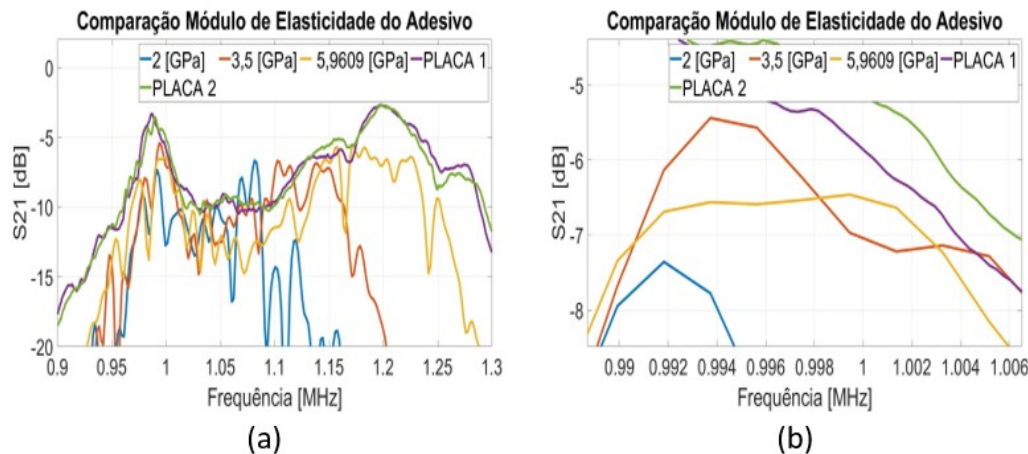


Figura 4.41: Variação do módulo de elasticidade da camada de adesivo - Excitado com a função Wavelet Morlet. (a) 5 módulos de elasticidade diferentes comparados com 2 resultados experimentais; (b) Zoom na área de interesse.

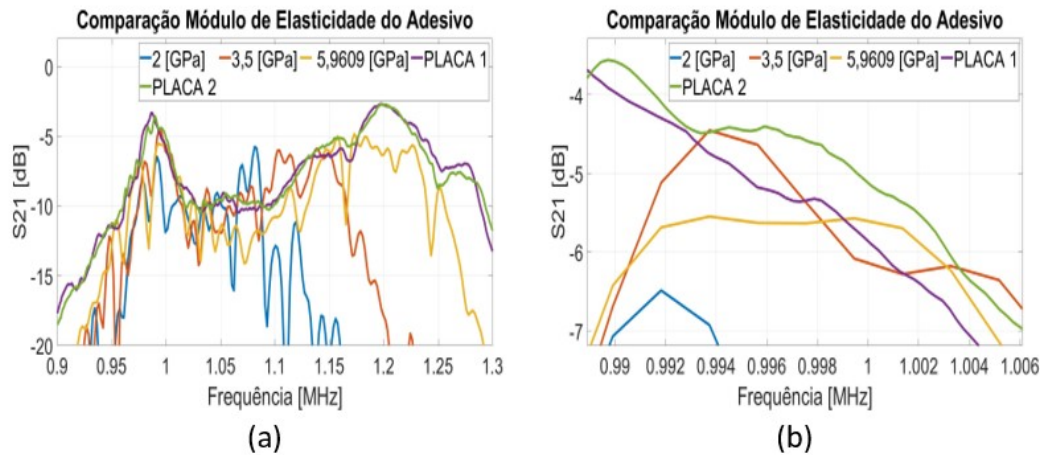


Figura 4.42: Variação do módulo de elasticidade da camada de adesivo - Excitado com a função pulso de seno. (a) 5 módulos de elasticidade diferentes comparados com 2 resultados experimentais; (b) Zoom na área de interesse.

Observa-se pelas Figuras 4.41 e 4.42 que a simulação com esse valor ficou com uma característica diferente e amplitude baixa. Isso pode ocorrer, pois como a preparação do adesivo é manual, mesmo seguindo todo o protocolo e metodologia, acaba ocorrendo variações no preparo.

O artigo [65], resolve o problema com o módulo de elasticidade de 3,5 GPa. Os resultados nas Figuras 4.41 e 4.42, mostram que este foi o módulo com maior amplitude e característica mais próxima do experimental. Como houve uma melhora do sinal de 5,9609 GPa para 3,5 GPa, o módulo de 2 GPa foi simulado apenas para verificar o que acontece com o sinal se continuarmos baixando o módulo. E pela amplitude ter caído muito, foi desconsiderada essa possibilidade.

#### 4.3.5.4

##### Modelo com deformação Mecânica, Temperatura e Tensão Elétrica

Para a realização das simulações com temperatura e/ou tensão foi necessário acrescentar um tempo antes de excitar o PZT, pois ao ter a influência destas propriedades, o UT apresentou uma instabilidade. No experimento a tensão e/ou temperatura são aplicadas e espera-se um tempo de estabilização para se coletar os dados. Se o UT no modelo matemático é excitado no tempo igual a zero, essa instabilidade ocasionada no transdutor no início ocasiona erros na leitura do sistema.

A Figura 4.43 apresenta a resposta ultrassônica para a temperatura de 140 °C e carga de 6 kN aplicada. Nesse caso é apenas a leitura do transdutor sem ser excitado.



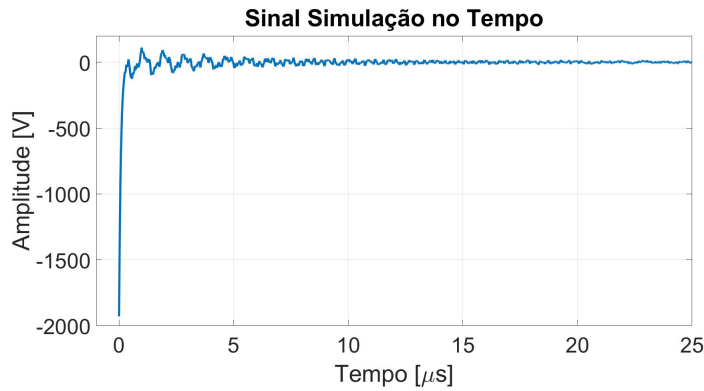


Figura 4.43: Simulação com função Wavelet Morlet, 140 °C e 6 kN.

Pela Figura 4.43 é possível observar que o sinal do transdutor parte de uma amplitude muito baixa, mesmo sem o transdutor estar excitado, apenas pela influência da temperatura e da tensão mecânica. Isso influencia na excitação piezelétrica, quando esta é realizada no tempo igual a zero. Foram feitas comparações com modelos excitado sem estabilizar, tempo igual a zero e excitado depois do sistema estar estabilizado, apresentados na Figura 4.44. Estas simulações foram excitados seguindo a equação 3-3 e a equação 3.26 para uma simulação com 140 °C e sem tensão mecânica. A Figura 4.44 apresenta 4 curvas S21 obtidas através de 4 simulações realizadas com 6 kN de tensão mecânica e 140°C.

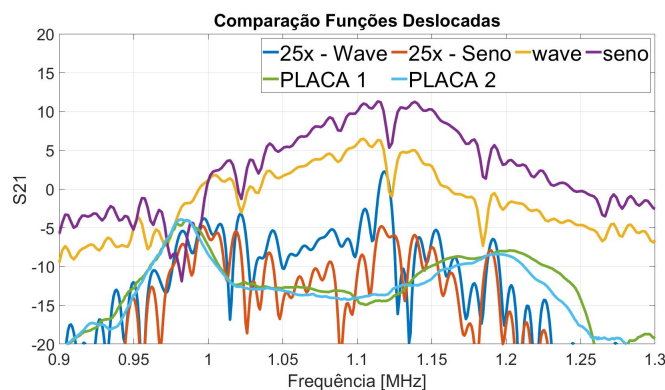


Figura 4.44: Simulações com variações no tempo inserido antes da excitação piezelétrica. Modelo sem tensão mecânica e temperatura de 140 °C.

A curva azul representa a função de excitação com 25 períodos adicionados antes da excitação com a função Wavelet e a laranja 25 períodos adicionados antes da excitação com a função pulso de seno. As curvas amarela e roxa, estão sem tempo antes da excitação e são referentes as funções Wavelet Morlet e pulso de seno, respectivamente. Além destas curvas foram adicionadas duas curvas S21 retiradas dos resultados experimentais para comparar com a resposta das simulações. É possível observar pelo gráfico que as curvas simuladas

sem o tempo adicional antes da excitação do PZT ultrapassam o zero, tendo valores positivos para S21. De acordo com a equação 2-39, e levando em conta que o transdutor receptor terá sempre uma curva menor que a do emissor, deduz-se que ter valores positivos de S21 seria impossível, uma vez que esse é  $20 \times \log(\frac{V_2}{V_1})$ .

Outra análise importante dos resultados mostrados na Figura 4.44 é a comparação dos sinais simulados com os sinais experimentais. Pode-se observar que as simulações realizadas sem o tempo anterior à excitação dos PZTs são muito diferentes das curvas experimentais. Outra análise que é possível fazer é a diferença entre as curvas com o tempo adicional entre as funções Wavelet e o pulso de seno. Com essa comparação é possível observar uma sutil melhora entre a curva Wavelet quando comparada a do pulso de seno.

Utilizando esse resultado e as comparações anteriores, foi escolhido para as demais simulações utilizar a função Wavelet Morlet com uma amplitude de 200 Volts; malha com  $n = 15$ ; amortecimento Rayleigh Beta =  $1 \times 1011$  em ambos os PZTs e nos adesivos, e Beta/100 no aço; um tempo inicial de  $10 \times t_f$ ; e um tempo de espera antes da excitação de 25 períodos. Além disso, foi usado uma camada de adesivo com 70  $\mu m$  de espessura e com o módulo de elasticidade de 3,5 GPa.

#### 4.4

#### Análise Comparativa entre o Modelo Simulado e o Experimental

Na Seção 4.3 apresentada a validação do modelo matemático realizado no programa COMSOL ®. Nesta seção serão apresentadas as respostas e análises das 26 simulações realizadas em comparação com os resultados experimentais.

##### 4.4.1

##### Tensão Mecânica

A seguir serão apresentadas as respostas das simulações para a variação da tensão mecânica em comparação com os resultados experimentais dos 5 corpos de prova. O objetivo é entender o comportamento do sistema sem a variação da temperatura. Assim, todos os testes apresentados aqui foram simulados com 31 °C, que por motivos de convergência é a temperatura mínima do modelo, assim como a carga mínima é de 1N. A Figura 4.45 apresenta as simulações para as deformações de 0  $\mu m/m$ , 42  $\mu m/m$ , 83  $\mu m/m$  e 125  $\mu m/m$  comparadas com os 5 resultados experimentais.

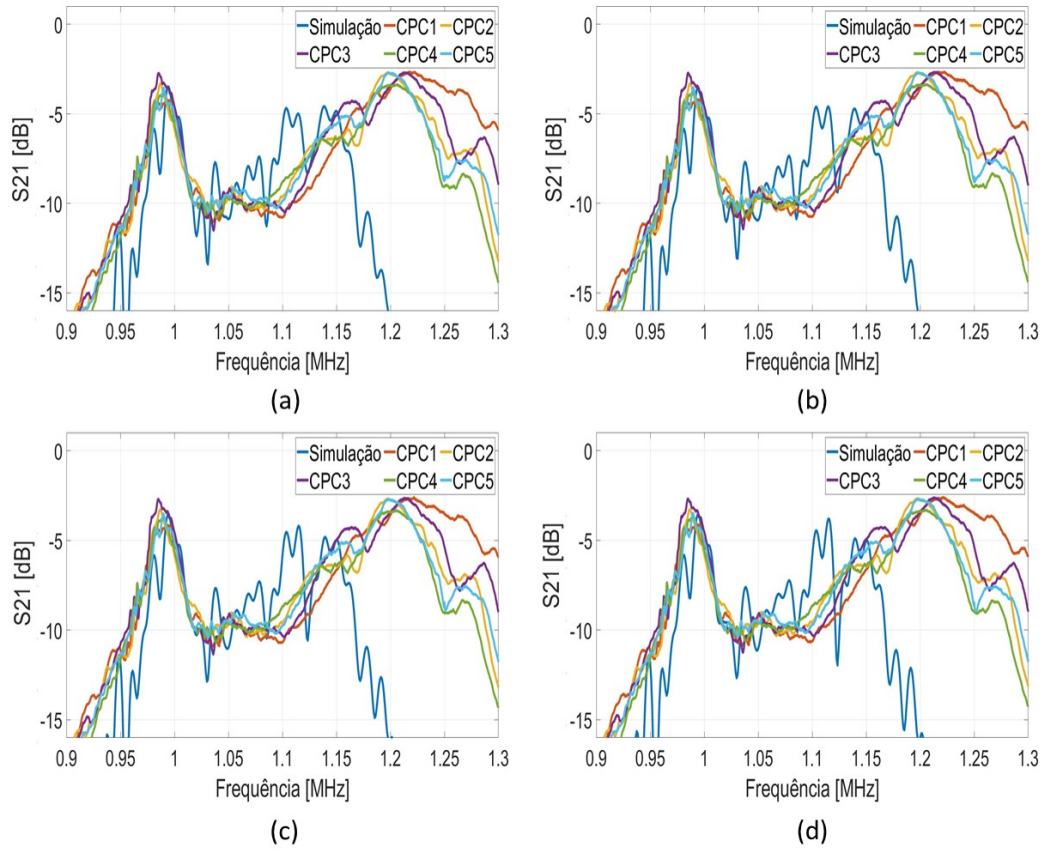


Figura 4.45: Simulações para a variação de carga. (a)  $0 \mu\text{m}/\text{m}$ ; (b)  $42 \mu\text{m}/\text{m}$ ; (c)  $83 \mu\text{m}/\text{m}$  e (d)  $125 \mu\text{m}/\text{m}$

Comparando as curvas dos resultados experimentais com as simulações observa-se um comportamento muito semelhante, principalmente no valor que máxima o parâmetro S21 na frequência de excitação. Ao aumentar a frequência, ou seja, se afastando da frequência excitação, observa-se uma diferença no comportamento do sinal. Isso ocorre porque essas frequências são mais instáveis e mais difíceis de se modelar.

Os resultados na Figura 4.45 indicam que as curvas de S21 simuladas não apresentam uma diferença significativa, por isso na Figura 4.46 plotou-se as 4 curvas para cada deformação simultaneamente. Nesta Figura também é possível visualizar as 4 simulações plotadas com zoom na frequência ideal.

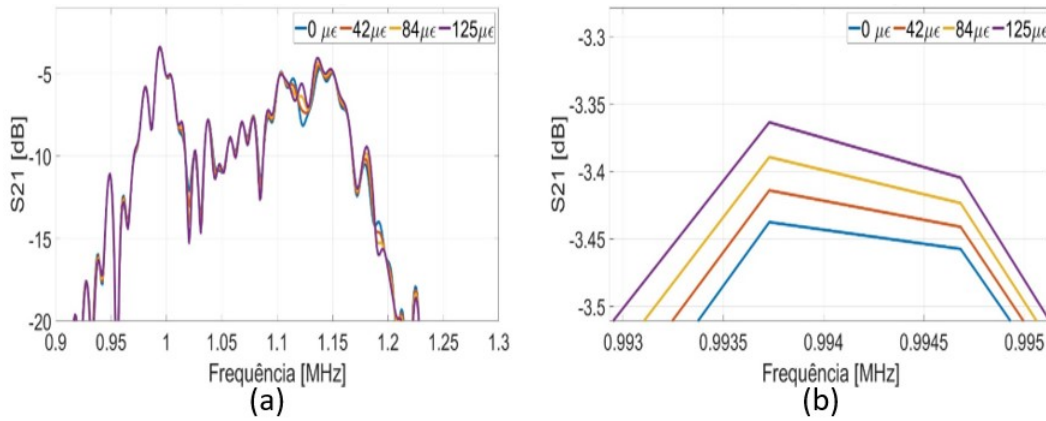


Figura 4.46: Simulações para a variação de carga. (a) Visualização geral da curva; (b) zoom na região de frequência ideal.

A Figura 4.46 é composta por 2 gráficos, sendo em (a) todos os valores de S21 para as 4 tensões aplicadas variando na frequência. A Figura 4.46 (b) é o zoom na curva da Figura (a) na frequência ideal. A variação em dB para a deformação máxima foi + 0,074dB, valor próximo do encontrado experimentalmente, segundo a Tabela 4.1 varia em torno de + 0,1 dB. E o modelo simulado não apresentou variação na frequência ideal, se mantendo em 0,993 dB. A comparação dos valores que maximizam o parâmetro S21 comparando a resposta numérica com o o resultado experimental está apresentado na Figura 4.47.

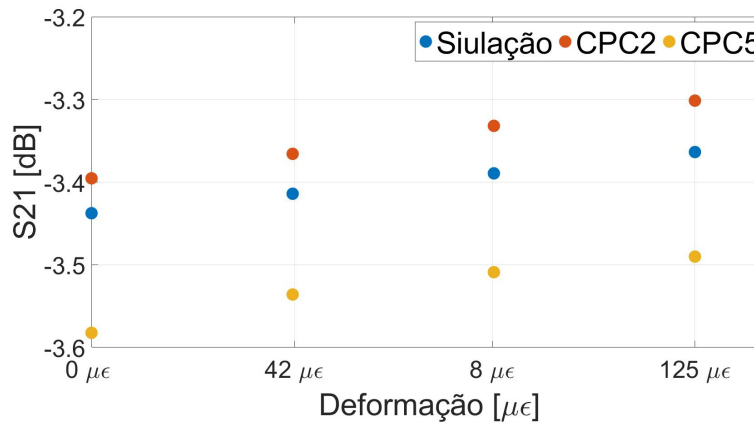


Figura 4.47: Comparação entre o modelo numérico e o resultado experimental do CPC2 e CPC5, para o parâmetro S21.

Os valores que maximizam o parâmetro S21 para o resultado numérico está em azul na Figura 4.47. Em amarelo e laranja é o resultado obtido experimentalmente. Com essa comparação é possível ver uma semelhança no deslocamento para S21 para a deformação mecânica.

## 4.4.2

## Variação de Temperatura

Para a variação de temperatura, foram simuladas 6 temperaturas, 31 °C, 60 °C, 80 °C, 100 °C, 120 °C e 140 °C, todas com a carga mínima de 1 N. Assim com o modelo apenas com a tensão mecânica, o modelo com temperatura também foi plotado com as 5 curvas encontradas experimentalmente, como apresentado na Figura 4.48.

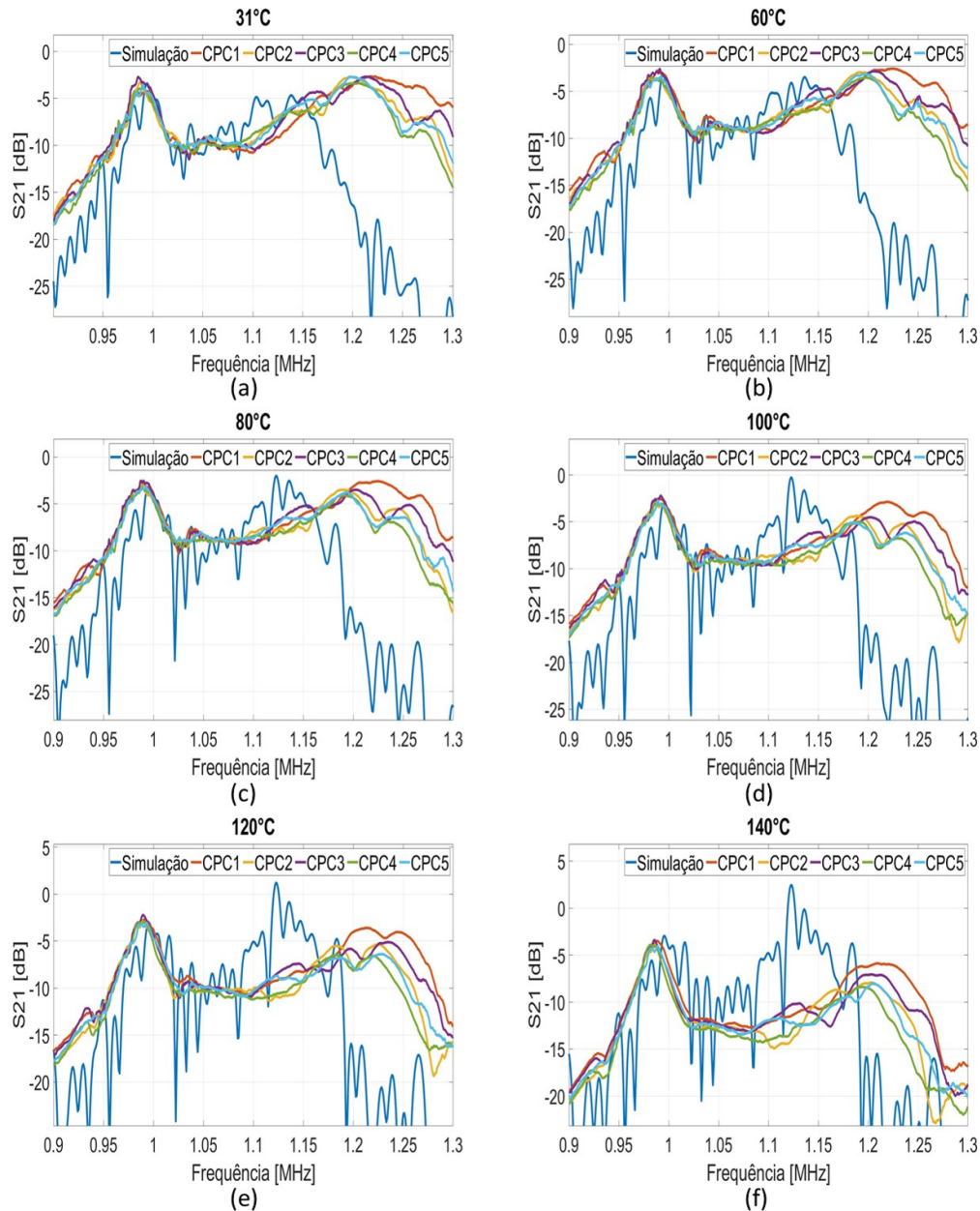


Figura 4.48: Simulações para a variação de temperatura. (a) 31 °C; (b) 60 °C; (c) 80 °C e (d) 100 °C; (e) 120 °C e (f) 140 °C.

A Figura 4.48 mostra todos os resultados experimentais separados para cada temperatura. É possível observar que a curva se altera conforme vai se

aumentando a temperatura atuante. Conforme se aumenta a temperatura, o sinal simulado diferencia-se do experimental com o simulado, principalmente com as frequências maiores da frequência que otimiza o sinal. Isso ocorre pelas alterações nas propriedades do adesivo, que ocorrem no experimental e com a simulação acabam sendo otimizadas. Para uma melhor interpretação, compara-se todas as temperaturas no mesmo gráfico, sem carga aplicada e com zoom na frequência ideal como apresentado na Figura 4.49.

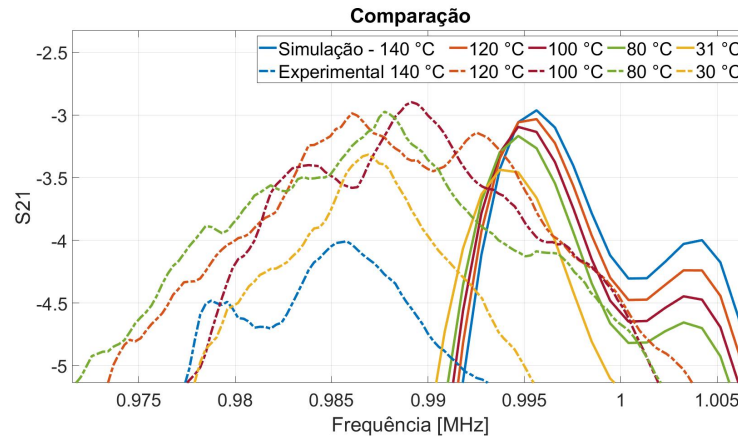


Figura 4.49: Simulações para a variação de temperatura, simulada e experimental.

Apesar das diferenças entre os sinais S21 simulados e experimentais, é possível ver que em ambos os modelos têm-se uma tendência da frequência ideal do parâmetro S21 de se deslocar para a direita. Porém, alternância das propriedades devido a influência da temperatura, influenciam na característica do sinal e fazem com que a curva se deforme mais no experimental. E também comparando que no resultado numérico, a temperatura de 140 °C não sofre a abrupta variação piorando a amplitude como no resultado experimental, isso por conta da variação na propriedade do adesivo e na despolarização piezoeletrica. Estas variações não são reconhecidas na simulação e por este motivo acabam gerando erros no modelo.

Os valores que maximizam o parâmetro S21 para o modelo numérico e para o resultado experimental para cada temperatura, estão apresentados na Figura 4.50.

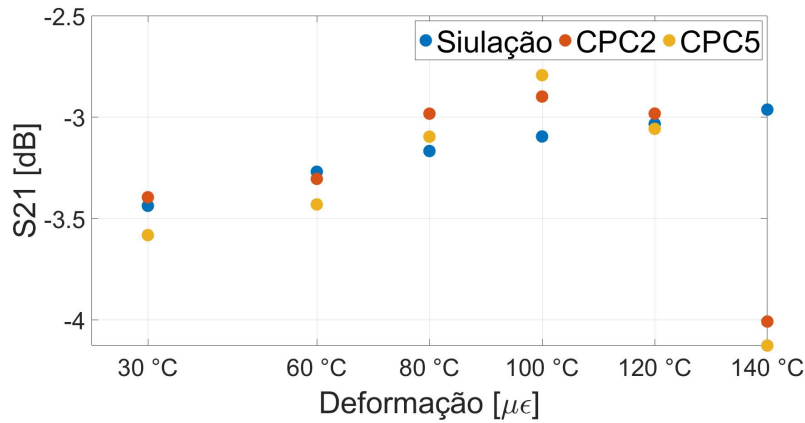


Figura 4.50: Valores de máximos do S21 para as temperaturas simuladas.

O resultado simulado teve uma variação de 0,34 dB, quando no resultado experimental, esta variação foi em torno de 0,8 dB. Além disso, o resultado numérico não teve o seu valor máximo em 100 °C como no resultado experimental.

#### 4.4.3

##### Tensão Mecânica e Variação de Temperatura

A ultima análise realizada é a variação do sinal de S21 com a deformação mecânica e a temperatura. Para isso foram realizadas simulações do modelo com as tensões de 0 MPa, 42 MPa, 83 MPa e 25,00 MPa para as temperaturas trabalhadas: 31 °C, 60 °C, 80 °C, 100 °C, 120 °C e 140 °C. Todas as simulações no tempo estão apresentadas nas Figuras 4.51 e 4.52.

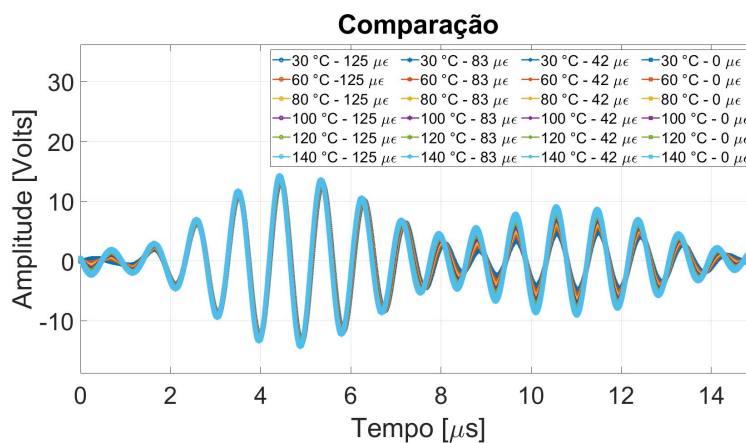


Figura 4.51: Simulações no tempo para todas as cargas e temperaturas.

O gráfico 4.51 apresenta todas as curvas no tempo, onde pode se reparar um decaimento de forma harmônica na amplitude do sinal ao longo do tempo. Para uma melhor análise o gráfico da Figura 4.52 está com zoom e dividido



por cores e forma de traçado. Sendo cada cor representa uma temperatura e cada marcação uma deformação mecânica.

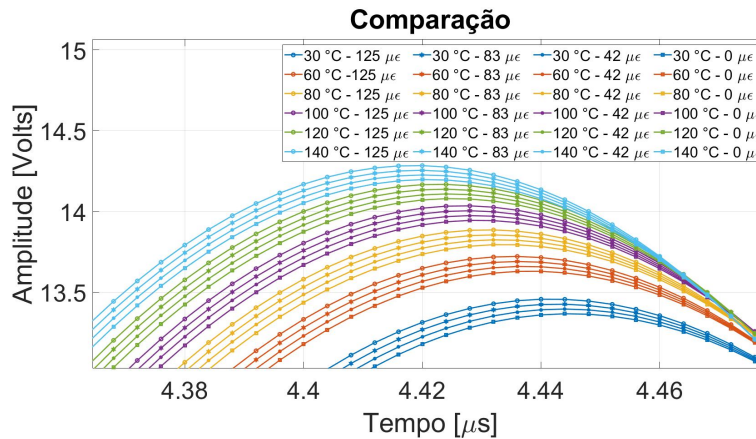


Figura 4.52: Simulações no tempo para todas as cargas e temperaturas. Com zoom na amplitude.

Repara-se pela resposta das simulações para o sinal no tempo um padrão na deformação da curva, onde a amplitude do sinal se desloca para a direita com relação a variação de temperatura, para a tensão mecânica, não apresenta um deslocamento na abscissa. Com esta primeira análise do resultado simulado, tende-se a sensação, que o sinal variado para a aplicação da tensão mecânica tende a manter um padrão linear. E também que a variação de temperatura, conforme se aumenta, têm-se uma menor variação da amplitude.

Com o sinal do tempo do simulado e com a equação 2-39, chegou-se na resposta do sinal S21. A Figura 4.53 são as curvas de S21 para as simulações do modelo com variações na tensão mecânica e na temperatura.

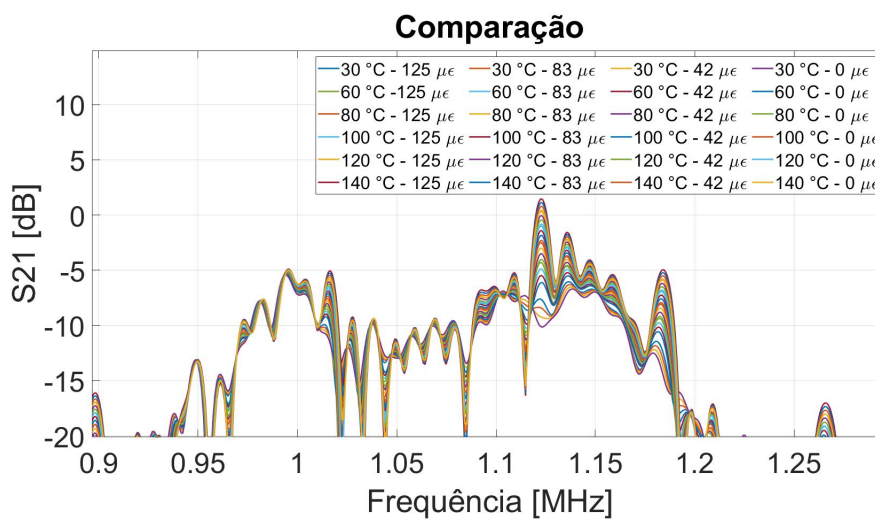


Figura 4.53: Sinal S21 simulado, para todas as temperaturas e tensão mecânicas aplicadas.



A curva de S21 para o modelo simulado está explícita na Figura 4.53. A curva apresenta um padrão na frequência de interesse, porém, conforme vai se distanciando da frequência que otimiza a impedância do sistema, o sinal vai ficando desuniforme e maior que zero. Isto ocorre devido a instabilidade no sistema que ocorre nesta região, tornando difícil de modelar. Para ter uma ideia do que acontece com o sinal S21 simulado, que é possível observar na Figura 4.54, que é o sinal S21 com zoom na frequência de ressonância e separado por cores para cada temperatura e traçados para cada tensão mecânica aplicada.

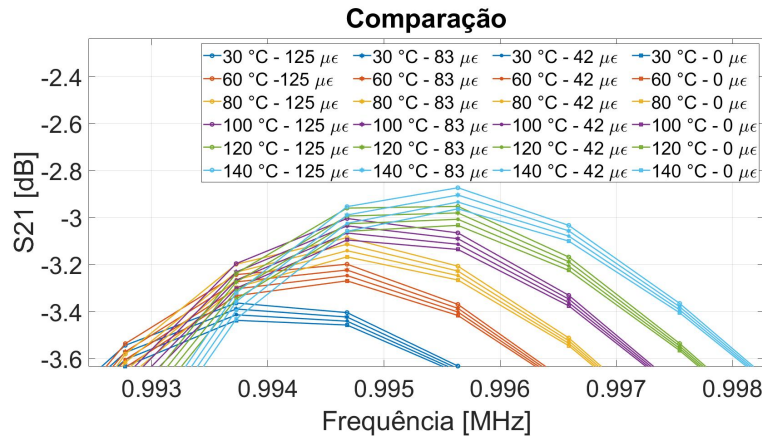


Figura 4.54: Sinal S21 simulado, para todas as temperaturas e tensão mecânicas aplicadas, com zoom na frequência ideal.

A comunicação entre os transdutores, ou seja, o sinal S21, para a influência da temperatura apresenta uma variação na frequência para a direita, não tendo variação na frequência para a alteração da carga. Como todos os resultados obtidos experimentalmente começam a ter uma queda na amplitude do parâmetro S21 devida a temperatura, o que não acontece no caso simulado, pois esta variação está mais ligada à variação na propriedade do adesivo, pois na análise da temperatura sem tensão, o programa COMSOL® reconhece a influência da temperatura na variações da excitação do ultrassom, mas como a camada de adesivo é apenas uma camada de referência e as propriedades de entrada deste não se alteram, ele não reconhece as influências da temperatura e da deformação mecânica no adesivo, a tensão altera significativamente a característica do adesivo, pois este tende a ser muito rígido.

A análise da variação do sinal S21, pura e simplesmente pela variação da inclinação, pode trazer erro, por isso é necessário comparar a resposta da variação da curva de uma forma geral. Por este motivo, a Figura 4.55 apresenta o gráfico da variação do S21 para o experimental.

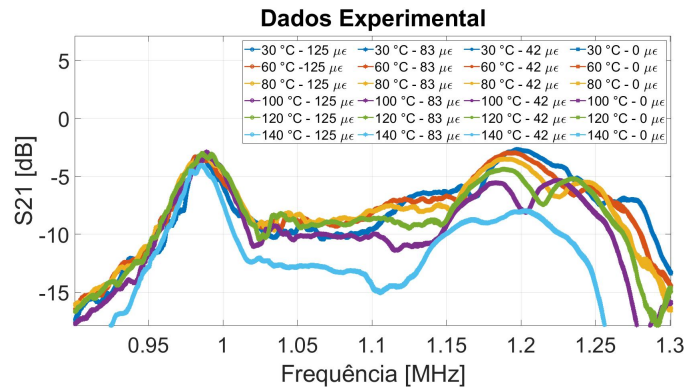


Figura 4.55: Valores máximos do sinal S21 experimental, para todas as temperaturas e tensão mecânicas aplicadas.

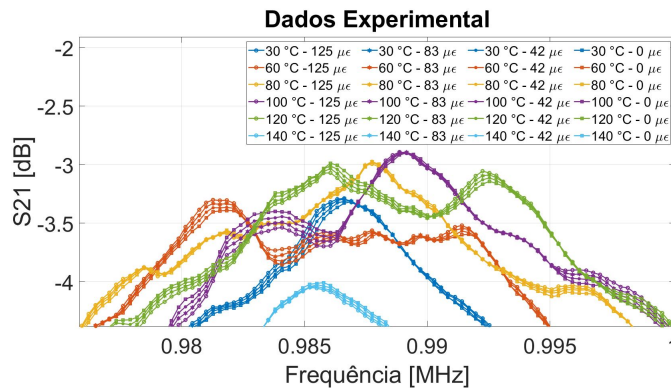


Figura 4.56: Valores máximos do sinal S21 experimental, para todas as temperaturas e tensão mecânicas aplicadas, com zoom na frequência que maximiza a impedância.

O modelo experimental, parte de 30 °C repara-se pelo gráfico da Figura 4.56, que assim como o modelo simulado, este também tende para deslocar na frequência para a direita. Porém depois de 100 °C, temperatura que otimiza o sistema, a amplitude de S21, como já visto, volta a cair também hiperbolicamente e além disso, a sua frequência de ressonância volta a se deslocar para a direita, comprovando uma piora no sistema.

## 5

### Conclusões e Trabalhos Futuros

Este capítulo apresenta as conclusões desenvolvidas ao longo deste trabalho, assim como sugestões de trabalhos futuros.

Para o projeto foram utilizadas cerâmicas piezelétricas do tipo 4 no formato de pastilha, com dois tamanhos diferentes. Estes foram denominados  $PZT_1$  e  $PZT_2$ . Além disso, os PZTs escolhidos foram selecionados para ressonarem na frequência natural de 1 MHz, frequência de excitação que foi usada nos experimentos. Uma frequência natural longe deste valor não permitiria que o sinal se propagasse perfeitamente, impedindo a transmissão de energia e por consequência de dados. Para esta análise foram simulados dois modelos axis-simétricos, um para cada PZT, comprovando que ambos os PZTs ressonam com frequências perto de 1 MHz.

Além da comprovação que os PZTs ressonam próximo de 1 MHz, também foi confirmado o modo de vibração, se é radial ou cisalhante. Para o  $PZT_1$ , as frequências de ressonância foram o 19° sendo radial e um valor de 1,07 MHz e 20° cisalhante com 1,08 MHz. Comparando este valor com o  $PZT_1$  livre, percebe-se que este tem a amplitude próxima de 1,07 MHz, confirmando que o modelo e o estudo para frequência natural está correto. Para o  $PZT_2$  as frequências perto de 1 MHz foram os modos de vibração 36° com frequência de 1,02 MHz com modo radial e o 37° com frequência de 1,04 MHz e modo cisalhante. Pela simulação foi confirmado que o  $PZT_2$  ressona nesta frequência e que o modelo da simulação está correto.

O  $PZT_1$  foi utilizado com o seu tamanho que era possível manter um CP que tivesse a geometria que coubesse dentro da estufa da máquina Instron E10000 e respeitando a norma para ensaios de tração ASTM E8, configurando então o  $CP_1$ . Porém, com uma impedância em torno de 350  $\Omega$ , um sinal de S11 otimizado em torno de -1,2 dB e com a comunicação de S21 padronizada e com a amplitude em -17 dB a -19 dB, é possível afirmar que nas características impostas foi inviável caracterizar e quantificar o  $CP_1$ . Com isso, foi elaborado o corpo de prova CPC, adaptado para o  $PZT_2$ , porém, por limitações na geometria da estufa, este não pode seguir a norma ASTM E8.

Realizando os testes de tração com corpo de prova CPC, onde os

transdutores foram fixados, de forma concêntrica e alinhada e por meio de um adesivo epóxi, nas duas superfícies de uma placa de aço inoxidável AISI 316 L com 6 mm de espessura e uma largura de 40 mm, gerando uma área da seção transversal de  $240 \text{ mm}^2$ . Em função da deformação da placa metálica, a amplitude do sinal S21 também variou muito pouco, de -3,70 para -3,14 dB, desde a condição indeformada da placa até a máxima deformação aplicada, que foi de  $1250 \text{ } \mu\text{m}/\text{m}$ , o que corresponde a uma máxima tensão aplicada de 250 MPa, sendo 86% do limite de escoamento.

Para o teste sob influência da deformação mecânica e da variação de temperatura, foram testados ao todo 5 corpos de prova, com testes de tensão de 0 MPa até 25 MPa, tensão mecânica que corresponde a 8,6% da tensão de escoamento e gerando uma deformação de  $125 \text{ } \mu\text{m}/\text{m}$  que gerou uma variação de 0,1 dB para o parâmetro S21.

Os CPC3, CPC4 e CPC5 tiveram uma variação de S21 da temperatura inicial para 100 °C em torno de 0,8 dB, sendo respectivamente 0,76, 0,89 e 0,85, valores próximos dos 0,71 dB de variação para o teste de variação de temperatura. Acima da temperatura de 100 °C, o parâmetro S21 decai. E essa variação se justifica pela influência da temperatura nas propriedades do PZT e do adesivo, porém, principalmente do adesivo. Mesmo com esse decaimento na temperatura, todos os 5 CPCs tiveram um valor de máximo para S21 que variou entre -2 dB e -4 dB, valores satisfatórios para transmissão de dados.

Os 5 corpos de prova apresentaram alternância do sinal de S11 e Z1 de 120°C para 140 °C. Porém, o maior valor de S11 apresentado foi em torno de -8 dB para a temperatura de 30 °C e para o CPC1. Observa-se também que para 30 °C o sinal de S11 para este corpo de prova, também não estava uniforme, se reconhecendo mais de um valor que otimiza o sinal. Conforme foi se aumentando a temperatura, melhor foi ficando a forma de onda. Para o CPC1, a frequência de ressonância do sistema, ou seja, neste caso onde estava o pico de S11, não variou para a influência da temperatura, se mantendo sempre 0,99 MHz. Além disso, a temperatura que otimizou o valor de S11 foi 120 °C e sua impedância para 120 °C estava próxima da impedância de referência 50  $\Omega$ . O que representa uma boa transmissão de energia e de dados.

O CPC2 e CPC3 tiveram o seu valor que maximiza a resposta do S11 em 120 °C. Os CPC1, CPC4 e CPC5 tiveram os valores que otimizam o sinal de S11 em 100 °C. Para os 5 CPCs testados tiveram uma piora no parâmetro S11 de 120 °C para 140°C e a impedância se afastou da impedância de referência (50  $\Omega$ ), isso justifica a piora no parâmetro S21 nesta comunicação.

Para a validação numérica do sistema, foi desenvolvido um modelo multi-físico no software de modelagem numérica COMSOL Multiphysics®. O modelo

foi realizado em 3 etapas: deformação mecânica; transferência de calor e excitação piezelétrica. Partindo do problema simples de uma barra tensionada, para uma barra aquecida, inserindo os PZT sem excitação e excitando e aquecendo, e por fim, se excitando o PZT. Para o modelo apenas com deformação mecânica, sem PZT, comparando com equações literais, encontrou-se um erro pequeno em torno de 0,83% entre a tensão mecânica simulada e a teórica. Inserindo o PZT na barra, a diferença entre a tensão mecânica com PZT para o modelo sem PZT foi aumentando. Isso acontece porque o PZT serve de "barreira" para o sistema, impedindo que este se deforme.

O modelo desenvolvido com a transferência de calor, comparando o deslocamento simulado com o teórico apresentou erros maiores, em torno de 30%. E com o modelo com PZT, este erro vai para 27%, diminuindo um pouco. Neste caso é coerente, porque o PZT bloqueia o deslocamento. Além de bloquear o deslocamento, o PZT também acaba gerando uma barreira para a dilatação térmica, gerando entre os PZTs uma área de grande compressão conforme a temperatura sobe.

Diversas adaptações foram necessárias para chegar na excitação do sinal piezelétrico ideal, além de algumas propriedades do modelo. Foram realizadas simulações variando a função de excitação, malha do modelo, propriedades do adesivo entre outros. Com estes estudos, chegou-se no modelo excitado com uma função Wavelet Morlet com amplitude de 200 Volts, com 125 períodos simulados. Antes da excitação foi inserido um tempo de 25 períodos afim de se estabilizar o sistema. A malha utilizada foi seguindo a equação 3-5, sendo  $n=15$ . A espessura da camada de adesivo utilizada foi de  $70 \mu m$  e o módulo de elasticidade do adesivo de 3,5 GPa. Outra propriedade estudada foi o amortecimento do sistema. Neste foi utilizado amortecimento do tipo Rayleigh, sendo no PZT e no adesivo o valor de  $\beta = 1 \times 10^{-11}$  e no aço o  $\beta/100$ .

O simulado apresentou uma variação de 0,07 dB para a influência da deformação mecânica e nenhuma variação na frequência ideal neste caso. Comparando com o resultado experimental, que foi em torno de 0,1 dB para a deformação até  $125 \mu m/m$  esta é uma boa análise.

O resultado numérico para a variação da temperatura, apresentou erros maiores quando comparado com o experimental. Porém, estas variações no S21 experimental são esperadas, pois como se trata de um modelo multi-físico de diversas variáveis, quantificar o problema torna-se algo com muitos detalhes. Sugere-se uma análise das propriedades mais detalhadas, talvez por com o modelo 1D para propagações de ondas ultrassônicas, consiga se obter as propriedades dos materiais mais fidedignas, conseguindo melhorar o modelo

numérico 2D.

Sugere-se também a análise numérica em um modelo 3D, pois espera-se que neste modelo, influências como as de convergência melhoram.

## Referências bibliográficas

- [1] HO, M.; EL-BORGI, S.; PATIL, D. ; SONG, G., **Inspection and monitoring systems subsea pipelines: A review paper**, Structural Health Monitoring, vol. 19, no. 2, pp. 606–645, 2020.
- [2] DUNN, D., **Us energy information administration monthly energy review**, 2016.
- [3] BP, *Statistical Review of World Energy*, 2020 (acessado em 04 de janeiro de 2021), <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2020-full-report.pdf>.
- [4] KRISTIANSEN, K., **Subsea data communication system and method**, June 2 2015, US Patent 9,049,014.
- [5] KARIMANZIRA, D.; RENKEWITZ, H., **Detection and localization of an underwater docking station in acoustic images using machine learning and generalized fuzzy hough transform**, In: MACHINE LEARNING FOR CYBER PHYSICAL SYSTEMS, pp. 23–31. Springer.
- [6] MAI, C.; PEDERSEN, S.; HANSEN, L.; JEPSEN, K. L. ; ZHENYU YANG, **Subsea infrastructure inspection: A review study**, In: 2016 IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON UNDERWATER SYSTEM TECHNOLOGY: THEORY AND APPLICATIONS (USYS), pp. 71–76, 2016.
- [7] KUBRUSLY, A. C., **Time reversal of acoustoelastic lamb waves**, 2016.
- [8] ERICSSON.COM, *Ericsson Mobility Reports*.
- [9] ROTHWELL, E. J.; CLOUD, M. J., *Electromagnetics*, CRC press, 2018.
- [10] TAKAHASHI, V. L., *Wireless ultrasonic energy and data transmission through fluid and metallic layers*, PhD thesis, PUC-Rio, 2017.
- [11] YANG, D.-X.; HU, Z.; ZHAO, H.; HU, H.-F.; SUN, Y.-Z. ; HOU, B.-J., **Through-metal-wall power delivery and data transmission for**

- enclosed sensors: A review, *Sensors*, vol. 15, no. 12, pp. 31581–31605, 2015.
- [12] ASHDOWN, J. D.; WILT, K. R.; LAWRY, T. J.; SAULNIER, G. J.; SHOUDY, D. A.; SCARTON, H. A. ; GAVENS, A. J., **A full-duplex ultrasonic through-wall communication and power delivery system**, *IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control*, vol. 60, no. 3, pp. 587–595, 2013.
- [13] LAWRY, T. J.; WILT, K. R.; SCARTON, H. A. ; SAULNIER, G. J., **Analytical modeling of a sandwiched plate piezoelectric transformer-based acoustic-electric transmission channel**, *IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control*, vol. 59, no. 11, pp. 2476–2486, 2012.
- [14] LAWRY, T., *A high performance system for wireless transmission of power and data through solid metal enclosures*, Rensselaer Polytechnic Institute, 2011.
- [15] BAI, Q.; BAI, Y., *Subsea pipeline design, analysis, and installation*, Gulf Professional Publishing, 2014.
- [16] SHAMS, M.; DESTRADE, M. ; OGDEN, R. W., **Initial stresses in elastic solids: constitutive laws and acoustoelasticity**, *Wave Motion*, vol. 48, no. 7, pp. 552–567, 2011.
- [17] CASTELLANO, A.; FRADDOSIO, A.; MARZANO, S. ; PICCIONI, M. D., **Some advancements in the ultrasonic evaluation of initial stress states by the analysis of the acoustoelastic effect**, *Procedia engineering*, vol. 199, pp. 1519–1526, 2017.
- [18] LU, Y.; MICHAELS, J. E., **A methodology for structural health monitoring with diffuse ultrasonic waves in the presence of temperature variations**, *Ultrasonics*, vol. 43, no. 9, pp. 717–731, 2005.
- [19] LEI, Q.; XIXI, Y.; XIAODONG, L. ; SHENFANG, Y., **Multiphysics simulation method of lamb wave propagation with piezoelectric transducers under load condition**, *Chinese Journal of Aeronautics*, vol. 32, no. 5, pp. 1071–1086, 2019.
- [20] NEWMAN, P. G.; ROZYCKI, G. S., **The history of ultrasound**, *Surgical clinics of north America*, vol. 78, no. 2, pp. 179–195, 1998.



- [21] KRAUTKRÄMER, J.; KRAUTKRÄMER, H., *Ultrasonic testing of materials*, Springer Science & Business Media, 2013.
- [22] BIANCHI, F.; EIFLER, L. S., **Ultrassom de bolso: aplicações na prática médica**, RELATOS DE CASOS, vol. 63, no. 4, pp. 462–468, 2019.
- [23] CHEN, C.-H., *Ultrasonic and advanced methods for nondestructive testing and material characterization*, World Scientific, 2007.
- [24] FARRAR, C. R.; WORDEN, K., **An introduction to structural health monitoring**, Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, vol. 365, no. 1851, pp. 303–315, 2007.
- [25] GIURGIUTIU, V., *Structural health monitoring: with piezoelectric wafer active sensors*, Elsevier, 2014.
- [26] SRINIVASAN, C., *Structural health monitoring with application to offshore structures*, World Scientific, 2019.
- [27] CONNOR, D. J.; CUMMINGS, G. F. ; STAR, M. J., **Acoustic transformer with non-piezoelectric core**, Jan. 14 1997, US Patent 5,594,705.
- [28] HU, Y.; ZHANG, X.; YANG, J. ; JIANG, Q., **Transmitting electric energy through a metal wall by acoustic waves using piezoelectric transducers**, IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, vol. 50, no. 7, pp. 773–781, 2003.
- [29] SHERRIT, S.; BADESCU, M.; BAO, X.; BAR-COHEN, Y. ; CHANG, Z., **Efficient electromechanical network model for wireless acoustic-electric feed-throughs**, In: SMART STRUCTURES AND MATERIALS 2005: SMART SENSOR TECHNOLOGY AND MEASUREMENT SYSTEMS, vol. 5758, pp. 362–372. International Society for Optics and Photonics, 2005.
- [30] SHERRIT, S.; DOTY, B.; BADESCU, M.; BAO, X.; BAR-COHEN, Y.; ALDRICH, J. ; CHANG, Z., **Studies of acoustic-electric feed-throughs for power transmission through structures**, In: SMART STRUCTURES AND MATERIALS 2006: INDUSTRIAL AND COMMERCIAL APPLICATIONS OF SMART STRUCTURES TECHNOLOGIES, vol. 6171, p. 617102. International Society for Optics and Photonics, 2006.
- [31] VON DER WEID, J. P., *Monitoramento de tensao mecânica em risers flexíveis por eletromagnetismo*, PhD thesis, PUC–Rio, 2011.

- [32] XU, C.; SONG, W.; PAN, Q.; LI, H. ; LIU, S., **Nondestructive testing residual stress using ultrasonic critical refracted longitudinal wave**, Physics Procedia, vol. 70, pp. 594–598, 2015.
- [33] LI, Z.; HE, J.; LIU, D.; LIU, N.; LONG, Z. ; TENG, J., **Influence of uniaxial stress on the shear-wave spectrum propagating in steel members**, Sensors, vol. 19, no. 3, pp. 492, 2019.
- [34] ZHANG, H., **Ultrasonic stress measurement with lfm lcr wave: Theoretical verification and numerical simulation**, In: 2014 IEEE INTERNATIONAL ULTRASONICS SYMPOSIUM, pp. 1352–1355. IEEE, 2014.
- [35] LIU, H.; LI, Y.; LI, T.; ZHANG, X.; LIU, Y.; LIU, K. ; WANG, Y., **Influence factors analysis and accuracy improvement for stress measurement using ultrasonic longitudinal critically refracted (lcr) wave**, Applied Acoustics, vol. 141, pp. 178–187, 2018.
- [36] HUGHES, D. S.; KELLY, J., **Second-order elastic deformation of solids**, Physical review, vol. 92, no. 5, pp. 1145, 1953.
- [37] GERE, J. M., *MECÂNICA DOS MATERIAIS.*, Cengage Learning Edições Ltda., 2010.
- [38] PAO, Y.-H., **Acoustoelasticity and ultrasonic measurement of residual stress**, Physical acoustics, pp. 61–143, 1984.
- [39] FOX, R. W.; PRITCHARD, P. J. ; MCDONALD, A. T., *Introdução À Mecânica Dos Fluidos* , 8ª edição, Grupo Gen-LTC, 2014.
- [40] ELISHAKOFF, I., *Mechanical vibration: where do we stand?*, vol. 488, Springer Science & Business Media, 2007.
- [41] SCHMERR, L. W., *Fundamentals of ultrasonic nondestructive evaluation*, Springer, 2016.
- [42] ROSE, J. L., **Ultrasonic waves in solid media**, 2000.
- [43] WEAVER, R. L.; LOBKIS, O. I., **Temperature dependence of diffuse field phase**, Ultrasonics, vol. 38, no. 1-8, pp. 491–494, 2000.
- [44] PÉREZ, N.; BUIOCHI, F.; BRIZZOTTI ANDRADE, M. A. ; ADAMOWSKI, J. C., **Numerical characterization of piezoceramics using resonance curves**, Materials, vol. 9, no. 2, pp. 71, 2016.

- [45] KINO, G. S., *Acoustic waves: devices, imaging and analog signal processing*, Number 43 KIN. 1987.
- [46] DATTA, S., **Piezoelectric materials: Crystal orientation and poling direction**, COMSOL Blog, 2014.
- [47] AULD, B. A., *Acoustic fields and waves in solids*, , 1973.
- [48] 176-1987, A. S., **Ieee standard on piezoelectricity**, 1987.
- [49] BORGNAKKE, C.; SONNTAG, R. E., *Fundamentos da termodinâmica*, Editora Blucher, 2018.
- [50] INMAN, D. J., *Engineering vibration, 4ª edição*, Prentice Hall Englewood Cliffs, NJ, 2014.
- [51] DEN HARTOG, J. P., *Mechanical vibrations*, Courier Corporation, 1985.
- [52] WILT, K.; LAWRY, T.; SCARTON, H.; ROA-PRADA, S.; SAULNIER, G.; ASHDOWN, J.; DAS, P. ; PINEZICH, J., **Mechanical design implications on power transfer through thick metallic barriers using piezoelectric transducers**, In: ASME INTERNATIONAL MECHANICAL ENGINEERING CONGRESS AND EXPOSITION, vol. 44502, pp. 173–182, 2010.
- [53] GIURGIUTIU, V., **Structural health monitoring with piezoelectric wafer active sensors–predictive modeling and simulation**, Incas Bulletin, vol. 2, no. 3, pp. 31, 2010.
- [54] WILT, K.; SCARTON, H.; ROA-PRADA, S.; SAULNIER, G.; ASHDOWN, J.; LAWRY, T.; DAS, P. ; GAVENS, A., **Finite element modeling and simulation of a two-transducer through-wall ultrasonic communication system**, In: ASME INTERNATIONAL MECHANICAL ENGINEERING CONGRESS AND EXPOSITION, vol. 43888, pp. 579–589, 2009.
- [55] ULABY, F. T.; MICHIELSSEN, E. ; RAVAIOLI, U., *Fundamentals of applied electromagnetics*, Pearson Boston, 2015.
- [56] ADAMOWSKI, J.; GILDER, N., **Sensores: Tecnologias e aplicações**, 2004.
- [57] LAWRY, T.; WILT, K.; ROA-PRADA, S.; ASHDOWN, J.; SAULNIER, G.; SCARTON, H.; DAS, P. ; PINEZICH, J., **Electrical optimization of power delivery through thick steel barriers using piezoelectric transducers**, In: ENERGY HARVESTING AND STORAGE: MATERIALS,

- DEVICES, AND APPLICATIONS, vol. 7683, p. 768314. International Society for Optics and Photonics, 2010.
- [58] DA SILVA, L. F. M.; DE MAGALHAES, A. G. ; DE MOURA, M. F. S., *Juntas adesivas estruturais*, Publinústria Portugal, 2007.
- [59] RIBEIRO, F. M. F., *Estudo da resistência e mecanismos de dano em juntas adesivas entre materiais compósitos com defeitos de adesão*, PhD thesis, 2015.
- [60] ELLIS, B.; OTHERS, *Chemistry and technology of epoxy resins*, Springer, 1993.
- [61] KNOP, A.; PILATO, L. A., *Phenolic resins: chemistry, applications and performance*, Springer Science & Business Media, 2013.
- [62] FOUNDATION, N. S. . T. M., *Harry Coover - Nacional medal of Technology and Innovation*, 2009 (acessado em 16 de setembro de 2020), <https://nationalmedals.org/laureate/harry-coover/>.
- [63] HENKEL, *Como funcionam os adesivos anaeróbicos Loctite*, 2018 (acessado em 16 de setembro de 2020), <https://www.henkel-adhesives.com/br/pt/products/adesivos-industriais/adesivos-anaer>.
- [64] INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P. ; BERGMAN, T. L., *Fundamentos de Transferência de Calor E de Massa .*, Grupo Gen-LTC, 2000.
- [65] TAKAHASHI, V. L.; KUBRUSLY, A. C.; BRAGA, A.; QUINTERO, S. M.; FIGUEIREDO, S. W. ; DOMINGUES, A. B., **Ultrasonic power and data transfer through multiple curved layers applied to pipe instrumentation**, *Sensors*, vol. 19, no. 19, pp. 4074, 2019.
- [66] BERLIN COURT, D.; KRUEGER, H. ; NEAR, C., **Properties of morgan electro ceramic ceramics**, Technical Publication TP-226, Morgan Electro Ceramics, 2000.
- [67] VAN VLACK, L. H., *Princípios de ciência dos materiais*, Editora Blucher, 1970.
- [68] DESIGNATION, A., **E8/e8m-09, standard test methods for tension testing of metallic materials**, American association state highway and transportation officials standard AASHTO, , no. T68, pp. 1-3.
- [69] ABINOX, *ABC DO AÇO INOX*, (acessado em 25 de maio de 2021), <https://www.abinox.org.br/site/aco-inox-abc-do-aco-inox.php>.

- [70] ZHANG, T.-Y.; WANG, T. ; ZHAO, M., Failure behavior and failure criterion of conductive cracks (deep notches) in thermally de-poiled pzt-4 ceramics, *Acta materialia*, vol. 51, no. 16, pp. 4881–4895, 2003.
- [71] HOOKER, M. W., Properties of pzt-based piezoelectric ceramics between-150 and 250c, 1998.
- [72] SERWAY, R. A.; JEWETT, J., *Princípios de física: eletromagnetismo*, São Paulo: editora, 2011.
- [73] APC INTERNATIONAL, L., *PHYSICAL AND PIEZOELECTRIC PROPERTIES OF APC MATERIALS*, (acessado em 24 de março de 2021), <https://www.tek.com/datasheet/afg3000c-arbitrary-function-generator-datasheet>.