



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS - UFAL**  
**CAMPUS ARAPIRACA**  
**FÍSICA - LICENCIATURA**

**MATEUS SILVA COSTA**

**MODELAGEM NUMÉRICA DE TRANSDUTORES DE LANGEVIN PARA  
APLICAÇÕES INDUSTRIAIS**

**ARAPIRACA**  
**2022**

Mateus Silva Costa

Modelagem numérica de transdutores de Langevin para aplicações industriais

Trabalho de Conclusão de Curso, apresentado ao curso de Física Licenciatura da Universidade Federal de Alagoas, *Campus* Arapiraca, como requisito parcial para obtenção de grau de Licenciado em Física.

Orientador: Prof. Dr. José Henrique Araújo Lopes de Andrade

Arapiraca  
2022



Universidade Federal de Alagoas – UFAL  
Campus Arapiraca  
Biblioteca Campus Arapiraca – BCA

C837m Costa, Mateus Silva  
Modelagem numérica de transdutores de Langevin para aplicações industriais /  
Mateus Silva Costa. – Arapiraca, 2022.  
93 f.: il.

Orientador: Prof. Dr. José Henrique Araújo Lopes de Andrade.  
Trabalho de Conclusão de Curso (Licenciatura em Física) - Universidade Federal  
de Alagoas, *Campus Arapiraca*, Arapiraca, 2022.  
Disponível em: Universidade Digital (UD) – UFAL (*Campus Arapiraca*).  
Referências: f. 80-83.  
Apêndices: f. 84-93.

1. Transdutores de Langevin. 2. Cavitação acústica. 3. COMSOL Multiphysics.  
4. Modelagem numérica. I. Andrade, José Henrique Araújo Lopes de. II. Título.

CDU 53

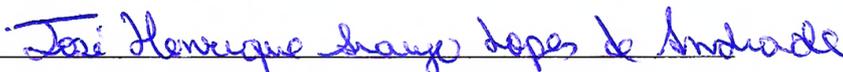
MATEUS SILVA COSTA

**MODELAGEM NUMÉRICA DE TRANSDUTORES DE LANGEVIN PARA  
APLICAÇÕES INDUSTRIAIS**

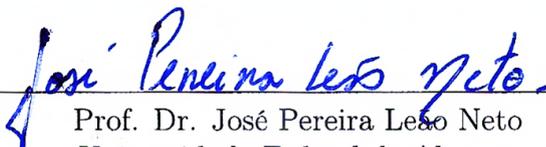
Trabalho de Conclusão de Curso, apresentado ao curso de Física Licenciatura da Universidade Federal de Alagoas, *Campus Arapiraca*, como requisito parcial para obtenção de grau de Licenciado em Física.

Data de Aprovação: 20/06/2022.

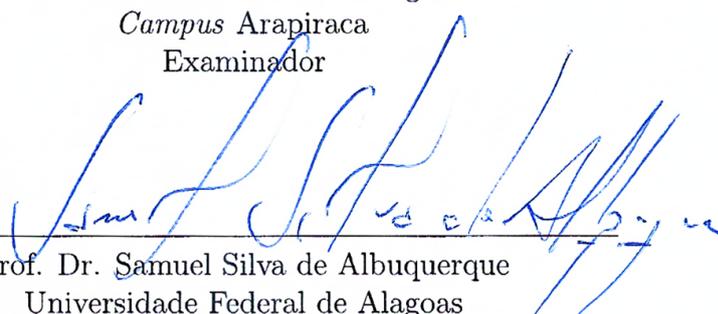
**Banca Examinadora**



Prof. Dr. José Henrique Araújo Lopes de Andrade  
Universidade Federal de Alagoas  
*Campus Arapiraca*  
Orientador



Prof. Dr. José Pereira Leão Neto  
Universidade Federal de Alagoas  
*Campus Arapiraca*  
Examinador



Prof. Dr. Samuel Silva de Albuquerque  
Universidade Federal de Alagoas  
*Campus Arapiraca*  
Examinador

*Dedico este trabalho aos meus pais, Maria Cláudia e José Correia (em memória), e a minha irmã Ana Cláudia.*

## AGRADECIMENTOS

A Deus por estar presente em todos os momentos, capacitando-me e abençoando minha vida. Agradeço aos meus pais, Maria Claudenira e José Correia (em memória) por me criarem ensinando os melhores valores e princípios que sempre levarei comigo, pelo amor, incentivo e compreensão que sempre foram transmitidos de forma sincera e especial, por acreditarem em mim sem medir esforços para que eu vivenciasse minha vida da melhor forma possível. Agradeço a minha irmã, Ana Claudia pelo carinho e apoio incondicional.

Aos amigos e amigas que fiz durante minha vida: Gracinha, que sempre me apoiou em todos os momentos, pelos memes compartilhados e dentre tantas outras coisas, por me apresentar o TLC e me incentivar para que eu fizesse o curso desse movimento que mudou minha vida; Felipe e Rivaldo, pelos momentos de companheirismo, experiências trocadas, resenhas e perrengues que passamos durante a graduação; Luclécia, Ygor, Klara, Jaelson, e tantos outros que não foram aqui citados, mas que de alguma forma tornaram os dias mais agradáveis tanto na UFAL, como também em outros lugares.

A todo o corpo docente do curso de Física Licenciatura, por todos os ensinamentos e conhecimentos compartilhados durante os anos que vivenciei como aluno, que sem dúvidas me proporcionaram uma excelente formação acadêmica. Agradeço a UFAL *Campus* Arapiraca por me acolher e possibilitar minha graduação.

Ao meu orientador, Prof. Dr. José Henrique Araújo Lopes de Andrade pelos anos de pesquisa, por me aceitar no Grupo de Acústica e Aplicações (GAAP) como orientando de iniciação científica acreditando no meu potencial, pelos conselhos, ensinamentos, experiências compartilhadas, e claro, pela excelente orientação neste trabalho.

A CAPES e a CNPq pelo apoio financeiro durante essa jornada.

*“Seja forte e corajoso!”*  
(Josué 1:9)

## RESUMO

Transdutores de Langevin são dispositivos com capacidade de transformar energia elétrica em energia mecânica, mais especificamente, pulsos elétricos em ondas sonoras, transmitindo ondas de ultrassom para o meio em contato. Devido a sua eficácia, baixo consumo de energia e funcionamento sem poluição do meio ambiente, diversas aplicações têm empregado o uso de transdutores de Langevin em indústrias nos últimos anos. Dentre as aplicações envolvendo essa técnica, podemos citar o uso dos transdutores em estampagem e soldagem de tecidos, equipamentos hospitalares, processos de cortes e perfuração, separação de emulsões água em óleo no processamento primário de petróleo e na limpeza ultrassônica de materiais sólidos. Desse modo, foi realizado um estudo teórico e a modelagem computacional de transdutores de Langevin sendo apropriados para gerar cavitação acústica. O processo de cavitação acústica corresponde na formação, crescimento e futuramente implosão de microbolhas de vapor em um meio líquido submetido a uma onda sonora de ultrassom de alta intensidade. Quando ocorre a formação de cavidades (microbolhas), alguns efeitos (físicos, químicos e biológicos) podem ser gerados, tais como ondas de choque e microjatos. Assim, esse processo se torna eficaz em várias aplicações, como sonoquímica, limpeza de materiais, sonoluminescência, entre outros. O design dos transdutores foi realizado por meio de simulações numéricas utilizando o Método de Elementos Finitos (MEF) através do software comercial COMSOL Multiphysics®. Em particular, foram realizadas simulações para o desenvolvimento de um transdutor de Langevin operando com frequência de ressonância em 20 kHz, acoplado a 5 amplificadores mecânicos com diferentes geometrias, e imerso em um tanque composto por água. Os efeitos de amortecimento mecânico causados a partir dos fatores de perda dos materiais utilizados no transdutor foram inclusos nas simulações. A caracterização dos transdutores modelados foi realizada através da curva de impedância elétrica, do deslocamento mecânico e a distribuição de pressão acústica gerada pelo dispositivo. A realização do estudo proposto é de grande importância para a linha de produção dos transdutores e suas futuras aplicações em diversas áreas, como na indústria de petróleo e gás e no desenvolvimento de equipamentos hospitalares.

**Palavras-chave:** transdutores de Langevin; cavitação acústica; COMSOL Multiphysics®; modelagem numérica.

## ABSTRACT

Langevin transducers are devices capable of transforming electrical energy into mechanical energy, more specifically, electrical pulses into sound waves, transmitting ultrasound waves to the medium in contact. Due to its efficiency, low energy consumption and operation without pollution of the environment, several applications have employed the use of Langevin transducers in industries in recent years. Among the applications involving this technique, we can mention the use of transducers in stamping and welding of fabrics, hospital equipment, cutting and drilling processes, separation of water-in-oil emulsions in the primary processing of petroleum and in the ultrasonic cleaning of solid materials. Thus, a theoretical study and computational modeling of Langevin transducers were carried out, being appropriate to generate acoustic cavitation. The acoustic cavitation process corresponds to the formation, growth and future implosion of vapor microbubbles in a liquid medium subjected to a high-intensity ultrasound sound wave. When cavities (microbubbles) form, some effects (physical, chemical and biological) can be generated, such as shock waves and microjets. Thus, this process becomes effective in several applications, such as sonochemistry, cleaning of materials, sonoluminescence, among others. The design of the transducers was carried out through numerical simulations using the Finite Element Method (FEM) through the commercial software COMSOL Multiphysics®. In particular, simulations were carried out for the development of a Langevin transducer operating with a resonance frequency of 20 kHz, coupled to 5 mechanical amplifiers with different geometries, and immersed in a tank composed of water. The mechanical damping effects caused by the loss factors of the materials used in the transducer were included in the simulations. The characterization of the modeled transducers was performed through the electrical impedance curve, the mechanical displacement and the acoustic pressure distribution generated by the device. The realization of the proposed study is of great importance for the production line of transducers and their future applications in several areas, such as in the oil and gas industry and in the development of hospital equipment.

**Keywords:** langevin transducers; acoustic cavitation; COMSOL Multiphysics®; numerical modeling.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Aplicações em diferentes áreas envolvendo o ultrassom. . . . .	17
Figura 2 – Pulso em uma corda esticada. . . . .	18
Figura 3 – Onda em propagação. . . . .	20
Figura 4 – Propagação de uma onda sonora em um tubo de ar. . . . .	22
Figura 5 – Espectro sonoro. . . . .	22
Figura 6 – Transdutores de (a) altas e (b) baixas frequências. . . . .	24
Figura 7 – Composição básica de um transdutor de Langevin convencional. . . . .	25
Figura 8 – Representação de um circuito elétrico em um transdutor de Langevin. . . . .	26
Figura 9 – Materiais piezoelétricos. . . . .	27
Figura 10 – Efeito piezoelétrico. . . . .	28
Figura 11 – Diagrama fasorial das grandezas da impedância elétrica. . . . .	30
Figura 12 – Circuito elétrico equivalente. . . . .	31
Figura 13 – Transdutor de Langevin acoplado à um amplificador mecânico. . . . .	33
Figura 14 – Amplificador mecânico. . . . .	34
Figura 15 – Representação esquemática do processo de cavitação acústica. . . . .	35
Figura 16 – Efeitos físicos da cavitação acústica. . . . .	37
Figura 17 – Efeitos químicos e biológicos da cavitação acústica. . . . .	37
Figura 18 – Emulsificantes formando o filme interfacial em uma gota de água. . . . .	39
Figura 19 – Etapas para realizar a quebra de emulsões. . . . .	40
Figura 20 – Limpeza de objetos utilizando ultrassom. . . . .	44
Figura 21 – Representação do processo de limpeza ultrassônica. . . . .	45
Figura 22 – Limpeza ultrassônica de um permutador de calor. . . . .	47
Figura 23 – Tela de trabalho inicial do COMSOL e suas seções. . . . .	49
Figura 24 – Dimensões espaciais disponibilizadas pelo COMSOL. . . . .	49
Figura 25 – Definições iniciais da simulação na tela de trabalho do software. . . . .	50
Figura 26 – Visão geral do trabalho. . . . .	52
Figura 27 – Geometria do transdutor de Langevin. . . . .	53
Figura 28 – Geometria do amplificador mecânico. . . . .	54
Figura 29 – Transdutor de Langevin acoplado ao amplificador mecânico. . . . .	55
Figura 30 – Domínio da <i>Solid Mechanics</i> na geometria. . . . .	57
Figura 31 – Circuito elétrico do transdutor criado na Física de <i>Electrostatics</i> . . . . .	58
Figura 32 – Domínio da <i>Pressure Acoustics</i> na geometria. . . . .	59
Figura 33 – Domínio da PML na geometria. . . . .	60
Figura 34 – Malha utilizada nas simulações. . . . .	61
Figura 35 – Gráfico da impedância elétrica do transdutor acoplado aos amplificadores com ponta de 10 mm (a) e 15 mm (b). . . . .	65
Figura 36 – Gráfico da impedância elétrica do transdutor acoplado aos amplificadores com ponta de 20 mm (a), ponta reta (b) e escalonado (c). . . . .	66
Figura 37 – Gráfico dos deslocamentos mecânicos do transdutor acoplado aos amplificadores com ponta de 10 mm (a) e 15 mm (b). . . . .	67
Figura 38 – Gráfico dos deslocamentos mecânicos do transdutor acoplado aos amplificadores com ponta de 20 mm (a), ponta reta (b) e escalonado (c). . . . .	68

Figura 39 – Atenuação dos deslocamentos mecânicos. . . . .	69
Figura 40 – Tensão e deslocamento do transdutor acoplado aos amplificadores com ponta de 10 mm (a) e 15 mm (b). . . . .	70
Figura 41 – Tensão e deslocamento do transdutor acoplado aos amplificadores com ponta de 20 mm (a) e ponta reta (b). . . . .	71
Figura 42 – Tensão e deslocamento do transdutor acoplado ao amplificador escalonado. . . . .	72
Figura 43 – Pressão acústica do transdutor acoplado ao amplificador com ponta de 10 mm. . . . .	73
Figura 44 – Pressão acústica do transdutor acoplado ao amplificador com ponta de 15 mm (a) e 20 mm (b). . . . .	74
Figura 45 – Pressão acústica do transdutor acoplado ao amplificador com ponta reta (a) e escalonado (b). . . . .	75
Figura 46 – Gráfico de convergência da simulação. . . . .	77
Figura 47 – Desenho técnico do transdutor com o amplificador ponta de 10 mm. . . . .	78
Figura 48 – Transdutor acoplado ao amplificador ponta de 10 mm. . . . .	85
Figura 49 – Transdutor acoplado ao amplificador ponta de 15 mm. . . . .	87
Figura 50 – Transdutor acoplado ao amplificador ponta de 20 mm. . . . .	89
Figura 51 – Transdutor acoplado ao amplificador ponta reta. . . . .	91
Figura 52 – Transdutor acoplado ao amplificador escalonado. . . . .	93

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros utilizados na modelagem do transdutor de Langevin. . . . .	51
Tabela 2 – Fatores de perda dos materiais. . . . .	55
Tabela 3 – Pressão acústica obtida nas simulações. . . . .	76
Tabela 4 – Parâmetros do transdutor com o amplificador ponta de 10 mm. . . . .	84
Tabela 5 – Parâmetros do transdutor com o amplificador ponta de 15 mm. . . . .	86
Tabela 6 – Parâmetros do transdutor com o amplificador ponta de 20 mm. . . . .	88
Tabela 7 – Parâmetros do transdutor com o amplificador ponta reta. . . . .	90
Tabela 8 – Parâmetros do transdutor com o amplificador escalonado. . . . .	92

## LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Nome	Unidade (SI)
$\lambda$	Comprimento de onda	$m$
$f$	Frequência	$Hz$
$T$	Período	$s$
$v$	Velocidade	$m/s$
$t$	Tempo	$s$
$Y_m$	Amplitude da onda	$m$
$k$	Número de onda	$m^{-1}$
$\omega$	Frequência angular	$rad/s$
$P$	Pressão acústica	$Pa$
$P_0$	Amplitude de pressão acústica	$Pa$
$\nabla^2$	Operador laplaciano	
$c_0$	Velocidade do som no fluido ideal	$m/s$
$\partial^2/\partial$	Derivada parcial de segunda ordem	
$K$	Módulo de elasticidade volumétrico	$Pa$
$\rho_0$	Densidade do fluido ideal	$kg/m^3$
$i = \sqrt{-1}$	Unidade imaginária	
$j = \sqrt{-1}$	Unidade imaginária	
$Z$	Impedância elétrica	$\Omega$
$R$	Resistência elétrica	$\Omega$
$V$	Diferença de potencial	$V$
$I$	Corrente elétrica	$A$
$X$	Reatância elétrica	$\Omega$
$X_C$	Reatância Capacitiva	$\Omega$
$X_L$	Reatância Indutiva	$\Omega$
$C$	Capacitância	$F$
$L$	Indutância	$H$
$\Delta$	Deslocamento	$m$
$D$	Diâmetro	$m$
$A$	Área	$m^2$
$l$	Comprimento	$m$
$c$	Velocidade de propagação no material	$m/s$
$\gamma$	Módulo de Young	$Pa$
$\rho$	Densidade	$kg/m^3$
$\eta$	Fator de perda	
$\beta$	Parâmetro da malha	

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>14</b>
1.1	REVISÃO LITERÁRIA	14
1.1.1	Quebra de Emulsões Água em Óleo	15
1.1.2	Limpeza Ultrassônica de Permutadores de Calor	15
<b>2</b>	<b>O ULTRASSOM</b>	<b>17</b>
2.1	ONDAS	18
2.1.1	Natureza das Ondas	18
2.1.2	Dimensão de Propagação	19
2.1.3	Direção de Propagação e Vibração	19
2.1.4	Comprimento de Onda, Frequência e Velocidade	19
2.1.5	Equação de Uma Onda Progressiva	20
2.2	ONDAS SONORAS	21
<b>3</b>	<b>TRANSDUTORES DE LANGEVIN</b>	<b>24</b>
3.1	PIEZOELETRICIDADE	26
3.1.1	O Efeito Piezoelétrico	27
3.2	PRÉ-TENSIONAMENTO MECÂNICO	28
3.3	PERDAS	29
3.4	IMPEDÂNCIA ELÉTRICA	29
3.5	AMPLIFICADORES MECÂNICOS	32
<b>4</b>	<b>CAVITAÇÃO ACÚSTICA</b>	<b>35</b>
4.1	EFEITOS CAUSADOS PELA CAVITAÇÃO ACÚSTICA	36
4.1.1	Efeitos Físicos	36
4.1.2	Efeitos Químicos e Biológicos	37
<b>5</b>	<b>TRANSDUTORES DE LANGEVIN NA INDÚSTRIA DE PETRÓLEO</b>	<b>38</b>
5.1	EMULSÕES	38
5.2	ESTABILIDADE DAS EMULSÕES	39
5.2.1	Aglomerção	40
5.2.2	Coalescência	41
5.2.3	Sedimentação	41
5.3	DESEMULSIFICAÇÃO DAS EMULSÕES	41
5.3.1	Adição de Desemulsificante	41
5.3.2	Aquecimento	42
5.3.3	Aumento do Teor de Água	42
5.3.4	Uso do Campo Elétrico	42
5.3.5	Quebra de Emulsões Utilizando Transdutores de Langevin	43

5.4	LIMPEZA ULTRASSÔNICA . . . . .	43
5.4.1	Permutadores de Calor . . . . .	45
<b>6</b>	<b>SIMULAÇÕES NUMÉRICAS . . . . .</b>	<b>48</b>
6.1	COMSOL Multiphysics® . . . . .	48
6.2	MODELAGEM NUMÉRICA . . . . .	49
6.2.1	Geometria . . . . .	52
6.2.2	Materiais . . . . .	55
6.2.3	Físicas . . . . .	56
6.2.3.1	<i>Solid Mechanics</i> . . . . .	56
6.2.3.2	<i>Electrostatics</i> . . . . .	57
6.2.3.3	<i>Pressure Acoustics</i> . . . . .	58
6.2.3.4	<i>Perfectly Matched Layer</i> . . . . .	59
6.2.3.5	<i>Damping</i> . . . . .	60
6.2.4	Malha . . . . .	61
6.2.5	Estudo . . . . .	62
<b>7</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES . . . . .</b>	<b>64</b>
7.1	IMPEDÂNCIA ELÉTRICA . . . . .	64
7.2	DESLOCAMENTO MECÂNICO . . . . .	67
7.2.1	Tensão Mecânica . . . . .	69
7.3	PRESSÃO ACÚSTICA . . . . .	73
7.4	CONVERGÊNCIA DA SIMULAÇÃO . . . . .	76
7.5	PERSPECTIVAS . . . . .	78
<b>8</b>	<b>CONCLUSÃO . . . . .</b>	<b>79</b>
	<b>REFERÊNCIAS . . . . .</b>	<b>80</b>
	<b>APÊNDICE A – PARÂMETROS UTILIZADOS NAS SIMULAÇÕES . . . . .</b>	<b>84</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Ondas acústicas são perturbações que transportam energia e momento. Devido a serem ondas mecânicas, necessitam de um meio material para se propagarem, podendo este ser sólido, líquido ou gasoso. A propagação é realizada de forma longitudinal em ciclos de compressão e rarefação sucessivos. No entanto, em alguns casos podem se propagar na forma de cisalhamento, assumindo uma propagação transversal. As ondas sonoras que possuem frequência de oscilação acima de 20 kHz são inaudíveis ao ouvido humano, e denominadas de ultrassom.

A geração e detecção das ondas acústicas é realizada por um dispositivo chamado de transdutor, em particular, os transdutores de Langevin, que são dispositivos com capacidade de converter energia elétrica em vibrações mecânicas, mais especificamente, pulsos elétricos em ondas sonoras, transmitindo ondas de ultrassom de alta intensidade para o meio em contato. Esses dispositivos também são conhecidos como transdutores de potência ou sanduíche, pois em sua confecção possuem cerâmicas piezoelétricas empilhadas e sanduichadas por duas massas metálicas, onde são pré-tensionadas por um parafuso de alta resistência mecânica. Além disso, os transdutores de Langevin são os responsáveis por gerar as ondas ultrassônicas utilizadas no processo de cavitação acústica.

O fenômeno conhecido como cavitação acústica nada mais é do que o surgimento, crescimento, e futuramente implosão (ou colapso) de microbolhas de vapor em um meio líquido através da aplicação de uma onda sonora de ultrassom com intensidade relativamente alta (YASUI, 2018). Basicamente, as microbolhas (cavidades) começam a se expandir e contrair de forma alternada nos ciclos de rarefação e compressão da onda, até o momento em que elas implodem, e ao implodirem geram uma variedade de fenômenos interessantes, como por exemplo, o surgimento de micro jatos e ondas de choque, que são utilizados para realizar limpeza ultrassônica de materiais sólidos.

### 1.1 REVISÃO LITERÁRIA

Nas últimas décadas, o ultrassom vêm sendo analisado e empregado em diferentes ramos industriais. Diversos trabalhos têm sido realizados envolvendo sistemas ultrassônicos, como por exemplo, o uso do ultrassom na medicina, aplicado em diagnósticos, tratamentos médicos e formação de imagens (VOLPICELLI *et al.*, 2021; ZHAO *et al.*, 2021; HÜBNER *et al.*, 2000), e na indústria de alimentos, para descontaminar frutas e vegetais (São José *et al.*, 2014). Focaremos nossa atenção para duas aplicações em especial: quebra de emulsões água em óleo (ATEHORTUA *et al.*, 2020) e limpeza ultrassônica de permutadores de calor (SCHULZ; KIESER, 2019).

### 1.1.1 Quebra de Emulsões Água em Óleo

No processo de extração do petróleo dos poços, o óleo retirado normalmente é encontrado emulsionado com água e sedimentos, e também, acompanhado de gás (ATEHORTUA *et al.*, 2020). Inicialmente, o petróleo deve passar pelo estágio intitulado processamento primário, para que atenda a máxima quantidade de água permitida no óleo comercial (inferior a 1 %). Esse procedimento de remoção da água é realizado no próprio campo de produção, onde são aplicados diferentes métodos de separação até que a quantidade de água seja reduzida a um limite aceitável. Após essa etapa, o petróleo é enviado a uma refinaria.

Nas plataformas de petróleo, a separação da água que não está emulsionada com o óleo é geralmente feita fazendo uso de um separador gravitacional. Esta é uma das técnicas mais empregadas pela indústria, onde a atuação da força da gravidade faz com que a água seja separada do óleo em virtude da diferença de densidade, no qual a viscosidade do óleo e o tamanho das gotas de água presentes no óleo influenciam diretamente na velocidade de separação dos fluidos, ou seja, as gotas maiores são separadas mais rapidamente. Além disso, é possível encontrar a água no óleo no formato de emulsões (ATEHORTUA, 2015).

Emulsão é uma mistura de dois líquidos imiscíveis (que não se misturam). Durante o escoamento do petróleo, o surgimento de emulsões ocorre em diferentes estágios, desde o poço até a unidade de produção, apesar da água e do óleo serem considerados quimicamente imiscíveis (PEREIRA *et al.*, 2016). A emulsão extraída dos poços de petróleo contém asfaltenos e/ou resinas, que geram uma camada impermeabilizante ao redor das gotas de água, produzindo grande estabilidade na mesma. Essas camadas impedem a coalescência espontânea das gotas, dando resultado a emulsões altamente estáveis. Normalmente, pequenas gotas de água dispersas no petróleo formam esse sistema, sendo chamado de emulsão do tipo água em óleo. Assim, é comum as emulsões de petróleo do tipo água em óleo apresentarem elevada viscosidade, muito superior a do petróleo desidratado.

Realizar a quebra de emulsões é uma tarefa indispensável para as indústrias petrolíferas, já que a água emulsionada com o petróleo contém sais inorgânicos em sua composição, trazendo problemas para a refinaria, como corrosão, incrustação, sobredimensionamento, e diminuição da vida útil dos equipamentos de processo e tubulações, resultando no aumento do consumo de produtos químicos e energia, e ainda eleva o custo do descarte da água dentro das restrições ambientais (PEREIRA *et al.*, 2016). Se a remoção da água não for feita ainda nas unidades de produção, poderá ocasionar a corrosão dos dutos e dos tanques de armazenamento, e será transportada como petróleo, onerando a logística do transporte.

### 1.1.2 Limpeza Ultrassônica de Permutadores de Calor

Permutadores de calor são equipamentos onde ocorre uma troca térmica entre fluidos que se encontram em temperaturas diferentes, sem haver uma mistura entre eles. No processo de refino

do petróleo, a quantidade de energia envolvida é muito grande. A utilização de permutadores de calor é uma técnica adotada para recuperar boa parte da energia do processo e amenizar o consumo da planta de petróleo (SILVA, 2013). Entretanto, é recorrente nas refinarias a presença de incrustações nas mais diversas atividades industriais, e os permutadores de calor são um dos equipamentos de processo sujeitos a este problema. A incrustação representa uma resistência à transferência de calor dos permutadores e com o passar do tempo causa a redução da performance térmica e do período de operação do permutador, diminuição do desempenho térmico, redução da qualidade ambiental, e paradas não planejadas para realizar a limpeza das incrustações (TONIN, 2003).

Atualmente a utilização do ultrassom para realizar limpeza de objetos se destaca entre as demais técnicas por ser um método moderno e eficaz. A limpeza ultrassônica conta com algumas vantagens específicas, como a remoção de incrustações pesadas, entranhadas em lacunas e ranhuras, sem trabalho manual adicional e sem danificar os itens a serem limpos (CARLI; HAHNEMANN, 2017). Devido a limpeza das superfícies trabalhadas ser realizada em tempo mínimo, em questão de segundos, os resultados obtidos são satisfatórios, sendo esta uma técnica altamente eficiente em relação a outros métodos, como por exemplo a limpeza manual.

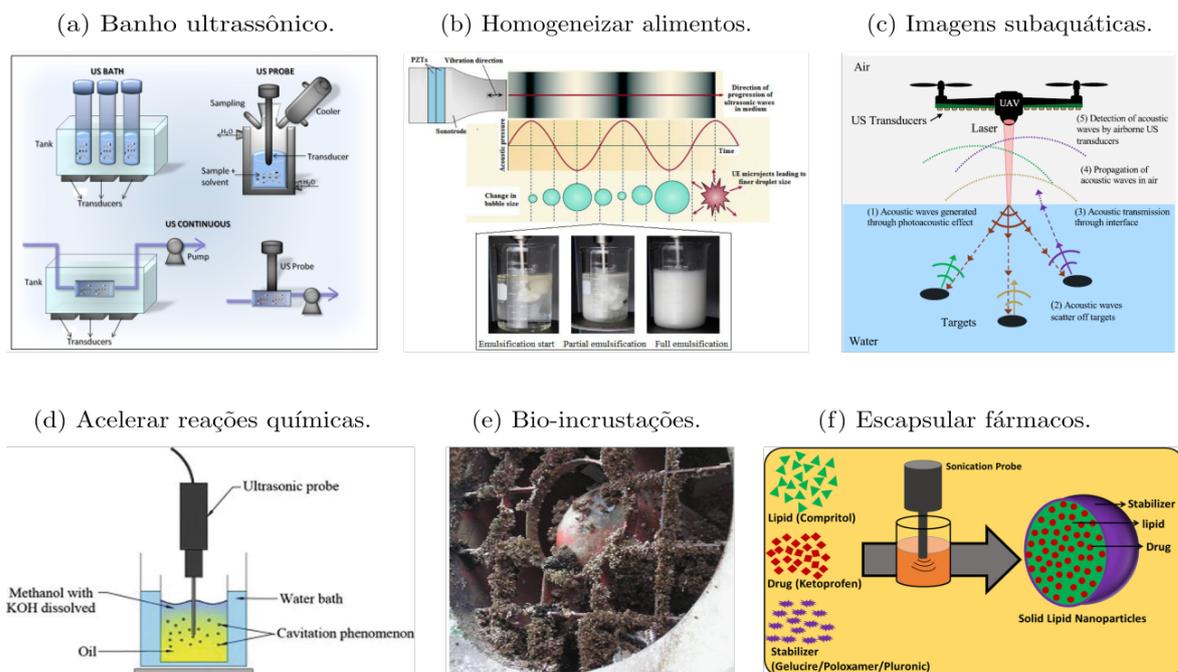
Sistemas utilizando ultrassom conhecidos como transdutores de Langevin vêm sendo bastante explorados nas últimas décadas para contornar algumas das dificuldades presentes nas indústrias, em nosso estudo, para realizar a quebra de emulsões água em óleo e a limpeza ultrassônica dos permutadores de calor. A agitação produzida pelo campo ultrassônico é a principal responsável pelo processo da quebra de emulsões. Já para o caso da limpeza ultrassônica, o fenômeno conhecido como cavitação acústica gera brevemente e localmente temperaturas acima de 5000 °C (condições como na superfície solar) e pressões superiores a 200 MPa, fazendo com que as incrustações dos permutadores de calor sejam removidas da superfície de extrato de forma eficaz.

Desse modo, este trabalho apresenta o resultado de simulações numéricas utilizando o software COMSOL Multiphysics®, que foram realizadas para a modelagem de um transdutor de Langevin operando com frequência de ressonância em 20 kHz, acoplado a 5 amplificadores mecânicos com diferentes geometrias, e imerso em um tanque composto por água. Os efeitos de amortecimento mecânico causados a partir dos fatores de perda dos materiais foram inclusos nas simulações. Logo, será analisada a curva de impedância elétrica, o deslocamento mecânico e a distribuição de pressão acústica produzida pelo transdutor para caracterizar o dispositivo. A realização do estudo proposto é de grande importância para linha de produção dos transdutores e suas futuras aplicações em diversas áreas, como na indústria de petróleo e gás e no desenvolvimento de equipamentos hospitalares.

## 2 O ULTRASSOM

Desde o final da Segunda Guerra Mundial, o uso do ultrassom em processos industriais se tornou uma ferramenta indispensável em diversas aplicações, devido a sua eficácia, viabilidade econômica, funcionamento sem poluição do meio ambiente, baixo consumo de energia e a qualidade final do processo (GALLEGO-JUAREZ, 1989; VILLAMIEL *et al.*, 2017). Dentre as aplicações envolvendo essa técnica, podemos citar o uso do ultrassom no processo de estampagem e soldagem de tecidos (SILVA, 2006), equipamentos hospitalares (SUN *et al.*, 1997), processos de cortes e perfuração (TAYRA, 2014), soldagem de plásticos e metais (PARRINI, 2001), banho ultrassônico (PINGRET; FABIANO-TIXIER; CHEMAT, 2012), homogeneizar alimentos (MODARRES-GHEISARI *et al.*, 2019), sonares (FITZPATRICK; SINGHVI; ARBABIAN, 2020), acelerar reações químicas (OLIVEIRA *et al.*, 2018), limpeza de bio-incrustações (LEGG *et al.*, 2015), encapsular fármacos (KUMAR; SINGH; GARG, 2019), separação de água em óleo em emulsões de petróleo (ATEHORTUA *et al.*, 2020; ATEHORTUA, 2015; PEREIRA *et al.*, 2016), e limpeza ultrassônica de materiais sólidos (SCHULZ; KIESER, 2019; KIESER *et al.*, 2011; SILVA *et al.*, 2007), sendo os dois últimos as aplicações abordadas nesse trabalho. A Figura 1 apresenta algumas dessas aplicações citadas. Assim, antes de nos aprofundarmos nessas técnicas de quebra de emulsões e limpeza ultrassônica, vamos compreender um pouco mais sobre os conceitos básicos da física acústica do fenômeno responsável por executá-las, denominado ultrassom.

Figura 1 – Aplicações em diferentes áreas envolvendo o ultrassom.



Fonte: (a) Pingret *et al.* (2012); (b) Modarres-Gheisari *et al.* (2019); (c) Fitzpatrick *et al.* (2020); (d) Oliveira *et al.* (2018); (e) Legg *et al.* (2015) e (f) Kumar *et al.* (2019).

## 2.1 ONDAS

Uma onda pode ser definida como sendo uma perturbação oscilante que se propaga em um meio material ou até mesmo no vácuo, transportando energia, momento e também, informação. A onda tem origem a partir de uma fonte. Como exemplo, temos uma onda se propagando numa corda, onde uma das suas extremidades é presa a uma parede, e a outra é esticada horizontalmente, de acordo com a Figura 2(a). Desse modo, se for realizado um movimento para cima e para baixo na corda, e logo após retornar a posição original, surge uma perturbação (ou pulso) propagando-se ao longo da corda, como podemos observar nas Figuras 2(b) e 2(c). Assim, observamos que essa perturbação dada na ponta se propaga por todo o corpo da corda com uma certa velocidade, sendo essa a velocidade de propagação da onda.

Figura 2 – Pulso em uma corda esticada.



Fonte: O autor (2022).

### 2.1.1 Natureza das Ondas

- **Ondas Mecânicas:** Frequentemente observadas nos mais diversos lugares, essas ondas possuem dois aspectos específicos importantes: são governadas pelas Leis de Newton e precisam de um meio material para se propagarem (e assim não se propagam no vácuo). Esse meio material pode ser o ar, a água, uma corda esticada, entre outros. Temos como exemplos de ondas mecânicas as ondas do mar, ondas numa mola ou corda, ondas sonoras, etc (BORGES; RODRIGUES, 2017).
- **Ondas Eletromagnéticas:** São ondas que se propagam sem a necessidade de um meio material, podendo viajar livremente pelo espaço vazio (vácuo). A luz visível, os raios X, as microondas, as ondas de rádio, de televisão e as ondas de radar são exemplos de ondas eletromagnéticas. Além disso, todas essas ondas propagam-se no vácuo com a mesma velocidade  $c = 299\,792\,458$  m/s (velocidade da luz) (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2016).
- **Ondas de Matéria:** São ondas pouco conhecidas, mas em certas condições, as partículas subatômicas se comportam semelhantes a uma onda. Além disso, essas ondas são governadas pelas leis da Física Quântica.

### 2.1.2 Dimensão de Propagação

- **Ondas Unidimensionais:** As ondas se propagam em uma única direção ou na direção de um único eixo ordenado. Ondas em uma corda ou mola são exemplos.
- **Ondas Bidimensionais:** Propagam-se em duas dimensões ou em um plano formado por dois eixos. Observamos esse fenômeno quando soltamos uma pedra em um recipiente com água, e assim formam-se ondas circulares em sua superfície.
- **Ondas Tridimensionais:** São ondas que se propagam em todas as direções, ou seja, no espaço de um modo geral. Temos como exemplo as ondas sonoras.

### 2.1.3 Direção de Propagação e Vibração

- **Ondas Transversais:** São ondas onde as partículas do meio em que a onda está se propagando oscilam perpendicularmente à direção de propagação da onda. Podemos observar o movimento ondulatório de uma onda transversal na Figura 2. Notamos que as partículas da corda no momento que a perturbação passa oscilam na vertical, enquanto a onda se propaga horizontalmente ao longo da corda.
- **Ondas Longitudinais:** Em uma onda longitudinal, as partículas do meio no qual a onda se propaga vibram paralelamente à direção de propagação da onda. Um exemplo de onda longitudinal seria movimentar para frente e para trás a extremidade de uma mola. Notamos que surge uma perturbação, formada por uma série de compressões propagando-se ao longo da mola com uma certa velocidade.

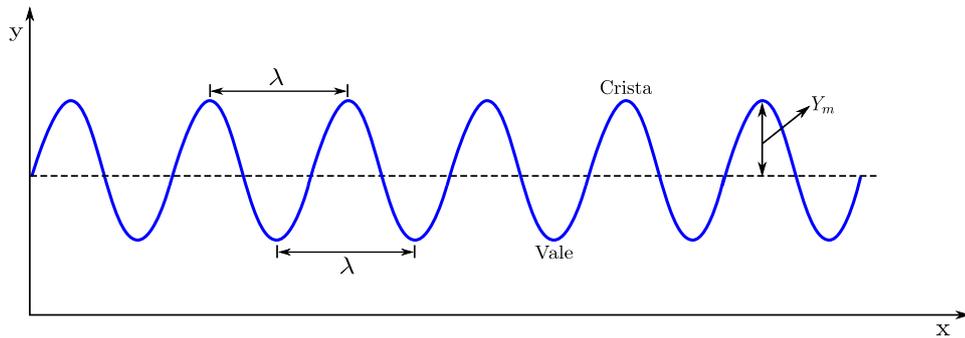
### 2.1.4 Comprimento de Onda, Frequência e Velocidade

O estudo das ondas abrange diversas grandezas físicas importantes para compreendermos a forma em que estão se propagando. Dentre essas grandezas, o comprimento de onda ( $\lambda$ ) e a frequência ( $f$ ) se destacam como propriedades fundamentais. A distância que a onda percorre durante um certo período ( $T$ ) é definida como comprimento de onda. Em outras palavras, é a menor distância em que o padrão da onda se repete por completo com o tempo mantido constante. Graficamente, o comprimento de onda é dado pela distância entre duas cristas ou dois vales de uma onda (Figura 3).

A frequência da onda é conhecida como a quantidade de oscilações realizadas por unidade de tempo que qualquer elemento do sistema analisado sofre devido à passagem da onda. O período ( $T$ ) é descrito como o tempo gasto para completar uma oscilação. Assim, podemos relacionar a frequência e o período por meio da equação:

$$f = \frac{1}{T} \quad (1)$$

Figura 3 – Onda em propagação.



Fonte: O autor (2022).

Além do comprimento de onda e da frequência, a velocidade da onda ( $v$ ) é uma grandeza essencial. Por meio dela podemos definir a velocidade em que a onda está se propagando, sendo relacionada com o comprimento de onda, o período, e a frequência através das equações:

$$v = \frac{\lambda}{T} \quad \text{ou} \quad v = \lambda f \quad (2)$$

Com isso, podemos destacar alguns exemplos da velocidade das ondas em meios materiais distintos. Tomando como exemplo as ondas sonoras, a velocidade de propagação no ar seco é cerca de 340 m/s. Já na água pode atingir a marca de 1500 m/s. Além disso, a velocidade pode ser alterada caso ocorra variação na temperatura do meio de propagação.

### 2.1.5 Equação de Uma Onda Progressiva

Quando uma onda está se propagando, seu deslocamento pode assumir várias formas dependendo de como a fonte irá gerar as oscilações. A equação de onda comum a todos os tipos de onda com propagação tridimensional é descrita matematicamente por:

$$\nabla^2 p = \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2}, \quad (3)$$

onde  $c_0$  é a velocidade de propagação da onda dada por  $c_0 = \sqrt{K/\rho_0}$ , sendo  $K$  o módulo de elasticidade volumétrico do meio e  $\rho_0$  a densidade do mesmo.  $\partial^2/\partial t^2$  é a derivada parcial de segunda ordem em relação ao tempo ( $t$ ); e o operador laplaciano  $\nabla^2$  é:

$$\nabla^2 = \left( \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) \quad (4)$$

Considerando uma onda sonora unidimensional que se propaga ao longo de um eixo  $x$  positivo, como a da Figura 3, o operador laplaciano na equação (3) pode ser substituído somente por  $\partial^2/\partial x^2$ . Assim, a propagação desta onda é descrita pela equação:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} = \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad (5)$$

A solução desta equação diferencial parcial linear de segunda ordem é dada por:

$$y(x, t) = Y_m e^{i(kx - \omega t)} \quad (6)$$

Numa corda, por exemplo, os movimentos oscilatórios realizados pela onda variam em função da posição e do tempo, e podem ser representados através da relação  $y = h(x, t)$ , no qual  $y$  é o deslocamento e  $h$  uma função. Notamos que as funções seno e cosseno apresentam esse comportamento oscilatório. Tomando como exemplo a onda da Figura 2, podemos descrever matematicamente o movimento de cada elemento da corda no momento em que a onda está em propagação através da função que é solução da equação (3) após algumas manipulações algébricas na equação 6, sendo descrita da seguinte forma:

$$y(x, t) = Y_m \text{sen}(kx - \omega t), \quad (7)$$

onde o deslocamento é dado por  $y(x, t)$ , sendo  $x$  a posição e  $t$  o tempo. A amplitude é o deslocamento máximo feito por um elemento da onda a partir da sua posição de equilíbrio, e representada por  $Y_m$ . O termo oscilatório é  $\text{sen}(kx - \omega t)$ , no qual a medida que a onda se desloca no espaço, esse termo varia linearmente com o tempo entre 1 e -1, de modo que o valor 1 corresponde ao extremo positivo  $Y_m$  (crista da onda), e -1 ao extremo negativo  $-Y_m$  (vale da onda) (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2016). O argumento  $(kx - \omega t)$  é conhecido como fase da onda. As constantes  $k$  e  $\omega$  são o número de onda e a frequência angular, respectivamente. O número de onda representa uma contagem em unidade de comprimento de onda. Esse parâmetro pode ser relacionado ao comprimento de onda ( $\lambda$ ) através da equação:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (8)$$

A frequência angular ( $\omega$ ) mede a rapidez em que o ângulo de fase é percorrido. O ângulo de fase corresponde a posição do corpo em oscilação. A frequência angular pode ser relacionada com o período ( $T$ ), que é o tempo gasto para a onda completar uma oscilação, por meio da equação:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \quad (9)$$

## 2.2 ONDAS SONORAS

Ondas sonoras são ondas mecânicas que se propagam de forma longitudinal em meios que possuem elasticidade, podendo este ser sólido, líquido ou gasoso. O fato de ser uma onda longitudinal faz com que a propagação seja em ciclos de oscilação de pressão acústica através, alternadamente, de compressões (regiões de maior pressão) e rarefações (regiões de menor



Uma grandeza física importante no estudo das ondas sonoras é a frequência. A audição humana consegue detectar ondas sonoras que estão no intervalo de 20 Hz à 20000 Hz (ou 20 kHz), intervalo esse conhecido como som audível. Ondas sonoras com frequência abaixo de 20 Hz são denominadas infrassom, enquanto as que possuem frequência acima de 20000 Hz são chamadas de ultrassom. A Figura 5 ilustra o espectro sonoro em função da frequência da onda sonora.

No entanto, apesar das ondas de infrassom e ultrassom não provocarem nenhuma sensação auditiva caso atinjam o ouvido humano, alguns animais são capazes de detectar e se comunicar por meio dessas ondas. Os elefantes são capazes de se comunicar e perceber infrassons em certas ocasiões. Os cachorros conseguem detectar ondas ultrassônicas com frequências atingindo a marca de até 50000 Hz, sendo este o motivo do som emitido de um apito de adestramento não ser audível ao ouvido humano. Já os morcegos, apesar de serem quase cegos, voam sem colidir com obstáculos devido a seu sistema de orientação ser semelhante ao de um sonar, emitindo e ouvindo ultrassons de até 120000 Hz, que são refletidos nos obstáculos e detectados por sua audição (BORGES; RODRIGUES, 2017).

Com isso, o ultrassom se destaca por ter diversas aplicações nas mais diferentes áreas. Dentre as aplicações envolvendo essa técnica, podemos citar o uso do ultrassom na medicina, sendo utilizado com muita frequência na formação de imagens, permitindo, por exemplo, à uma mulher gestante observar a imagem do seu filho; e em sonares, para detectar objetos e medir a distância até eles, onde as ondas de ultrassom são refletidas ao atingirem o objeto e retornam para o aparelho emissor (BORGES; RODRIGUES, 2017). Além disso, as ondas sonoras de ultrassom podem ser geradas a partir da vibração de um dispositivo conhecido como transdutor.

### 3 TRANSDUTORES DE LANGEVIN

Transdutores são dispositivos que convertem energia elétrica em vibrações mecânicas, mais especificamente, pulsos elétricos em ondas sonoras, transmitindo ondas de ultrassom de alta intensidade para o meio em contato. Basicamente existem dois tipos de transdutores: os que funcionam em alta frequência, na ordem dos MHz, e os que operam em baixas frequências, na ordem dos kHz. Os de alta frequência temos como exemplo os que são amplamente utilizados na medicina nos exames de ultrassonografia (GE, 2022) para fazer a imagem de alguma região de interesse (Figura 6a), já os de baixa frequência destacamos os transdutores de Langevin (Figura 6b), que são os dispositivos de estudo deste trabalho, e que estão nas últimas décadas chamando a atenção de indústrias e pesquisadores da área devido a sua versatilidade de serem utilizados em aplicações específicas conforme a demanda em questão.

Figura 6 – Transdutores de (a) altas e (b) baixas frequências.



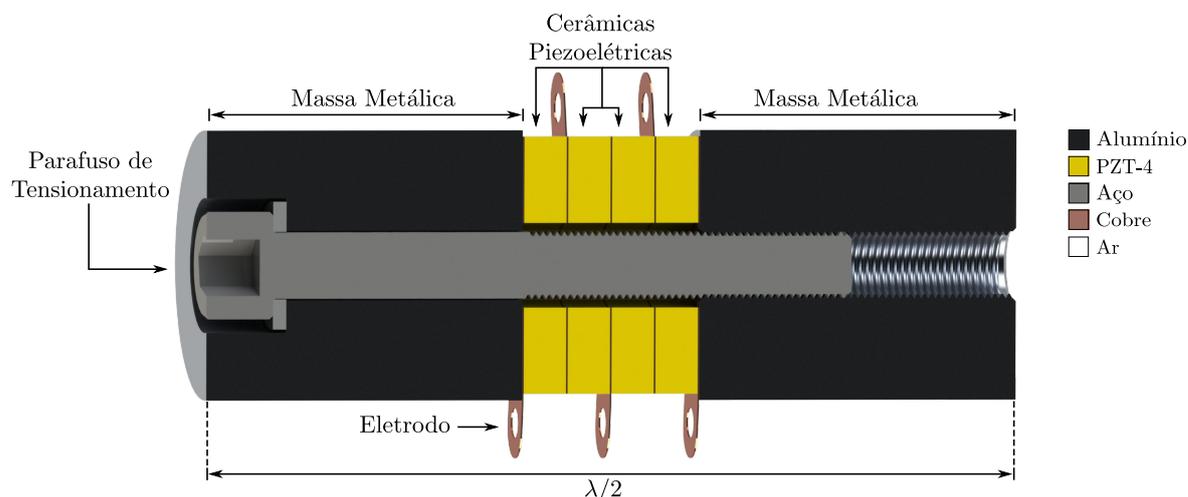
Fonte: (a) GE Healthcare (2022) e (b) O autor (2022).

Os transdutores de Langevin também são conhecidos como transdutores de potência ou sanduíche, pois em sua confecção possuem cerâmicas piezoelétricas empilhadas e sanduichadas por duas massas metálicas, onde são pré-tensionadas por um parafuso de alta resistência mecânica (Figura 7), garantindo maior eficiência no desempenho do transdutor. O primeiro transdutor foi construído pelo físico francês Paul Langevin fazendo uso de materiais piezoelétricos, sendo desenvolvido para aplicações em sonares, com o objetivo de detectar submarinos alemães em alto mar durante a Primeira Guerra Mundial (GALLEGO-JUAREZ, 1989). Assim, esse dispositivo acabou recebendo o nome do seu criador, passando a ser chamado de transdutor de Langevin. Porém, devido ao seu baixo custo para ser construído, operação sem poluição ambiental e sua alta eficiência, atualmente os transdutores de Langevin possuem uma vasta utilidade em diversas aplicações.

O comprimento total do transdutor deve ser exatamente  $\lambda/2$  para que opere em ressonância, ou seja, para que todos os componentes do transdutor vibrem na mesma frequência, e devido a isso, os transdutores também são conhecidos como ressonadores de meio comprimento de onda. Além disso, o comprimento do transdutor é quem determina a sua frequência de trabalho. Quanto mais massa o transdutor possuir, menor será a sua frequência. Eles vibram gerando altos

deslocamentos nas pontas, já no centro o deslocamento é praticamente nulo. As cerâmicas piezoelétricas utilizadas nesse dispositivo são planas, circulares e em formato de anel. São polarizadas na direção longitudinal e montadas alternando o sentido de polarização para possibilitar a ligação em paralelo.

Figura 7 – Composição básica de um transdutor de Langevin convencional.



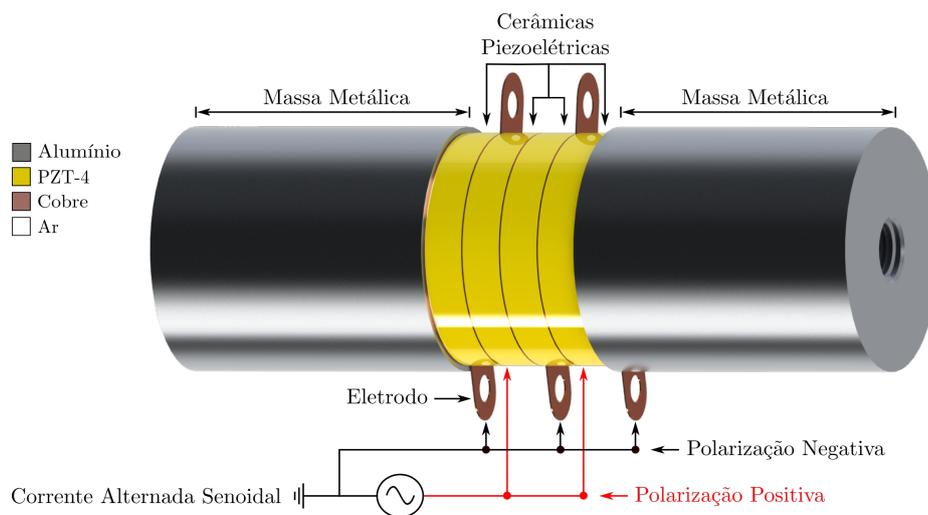
Fonte: O autor (2022).

O volume de cerâmicas determina a potência do transdutor, ou seja, quanto mais cerâmicas forem empilhadas, maior será a sua potência. Porém, um transdutor montado, por exemplo, com 4 cerâmicas teria menos perdas do que um montado com 6 ou 8 cerâmicas (SILVA, 2006). O princípio básico de funcionamento do transdutor é a geração de vibração mecânica do dispositivo como um todo através da aplicação de um sinal elétrico (AC) nos eletrodos colocados entre as cerâmicas piezoelétricas, e entre elas e as massas metálicas (TAYRA, 2014). Em outras palavras, quando o sinal elétrico atinge os eletrodos, eles transmitem a energia elétrica para as cerâmicas fazendo com que elas comecem a vibrar, e assim o transdutor entra em funcionamento. A Figura 8 apresenta uma representação esquemática do circuito elétrico utilizado no transdutor.

O parafuso de pré-tensionamento faz com que as cerâmicas se mantenham sobre compressão quando o transdutor estiver operando. As cerâmicas são frágeis, e isso ajuda a aprimorar sua resistência evitando possíveis fraturas, melhorando também o desempenho do dispositivo. Não é utilizado nenhum tipo de adesivo ou solda para conectar os componentes do transdutor, pois poderiam causar algum tipo de interferência em seu funcionamento. Assim, a única forma de realizar a conexão dos componentes é utilizando pressão.

As vibrações produzidas pelos transdutores de Langevin dão frutos a ondas sonoras, e dependendo da forma que forem modelados, as ondas sonoras geradas são de ultrassom. Para se obter a frequência de trabalho almejada deve-se levar em conta o formato geométrico do transdutor, os materiais de cada componente, bem como suas respectivas dimensões. Os transdutores não são construídos na tentativa e erro, e antes de serem enviados para o processo

Figura 8 – Representação de um circuito elétrico em um transdutor de Langevin.



Fonte: O autor (2022).

de usinagem, inicialmente deve ser realizada uma modelagem numérica para suprir os fatores mencionados, obtendo um dispositivo eficaz para a aplicação desejada.

### 3.1 PIEZOELETRICIDADE

Piezoelasticidade é a capacidade que alguns materiais possuem de gerar cargas elétricas quando são submetidos a aplicação de uma pressão mecânica. Esse fenômeno foi descoberto em 1880 na França pelos irmãos Pierre e Jacques Curie através de análises experimentais em cristais de quartzo. Além do quartzo, destacamos o topázio, a turmalina e o sal rochelle como cristais que possuem essas características (ONSCALE, 2022), sendo denominados materiais piezoelétricos. Posteriormente, Lippman mostrou que ao aplicar um sinal elétrico em um material piezoelétrico ele responde com uma vibração mecânica (ondas sonoras), sendo constatado, assim, o inverso do que foi apresentado pelos irmãos Curie.

Por um longo período, o quartzo foi o material mais utilizado para gerar ondas sonoras, e devido a isso foi se tornando cada vez mais escasso, fazendo com que os cientistas buscassem por um novo tipo de material. Após a Segunda Guerra Mundial, foram descobertos os materiais ferroelétricos, que são um tipo de aperfeiçoamento dos materiais piezoelétricos, também conhecidos como materiais piezoelétricos sintéticos. A ferroelectricidade é a presença de dipolos elétricos espontâneos, que podem ser polarizados e orientados em uma direção escolhida com a aplicação de um campo elétrico externo, tornando os materiais ferroelétricos em piezoelétricos (SILVA, 2006).

Ao contrário dos cristais piezoelétricos que já são polarizados naturalmente, os materiais piezoelétricos sintéticos precisam de um campo elétrico para serem polarizados. Porém, após acontecer a polarização, esses materiais apresentam propriedades piezoelétricas superiores

Figura 9 – Materiais piezoelétricos.



Fonte: (a) Onscale (2022) e (b) Shenzhen Longzhichuang Co., Ltd. (2020).

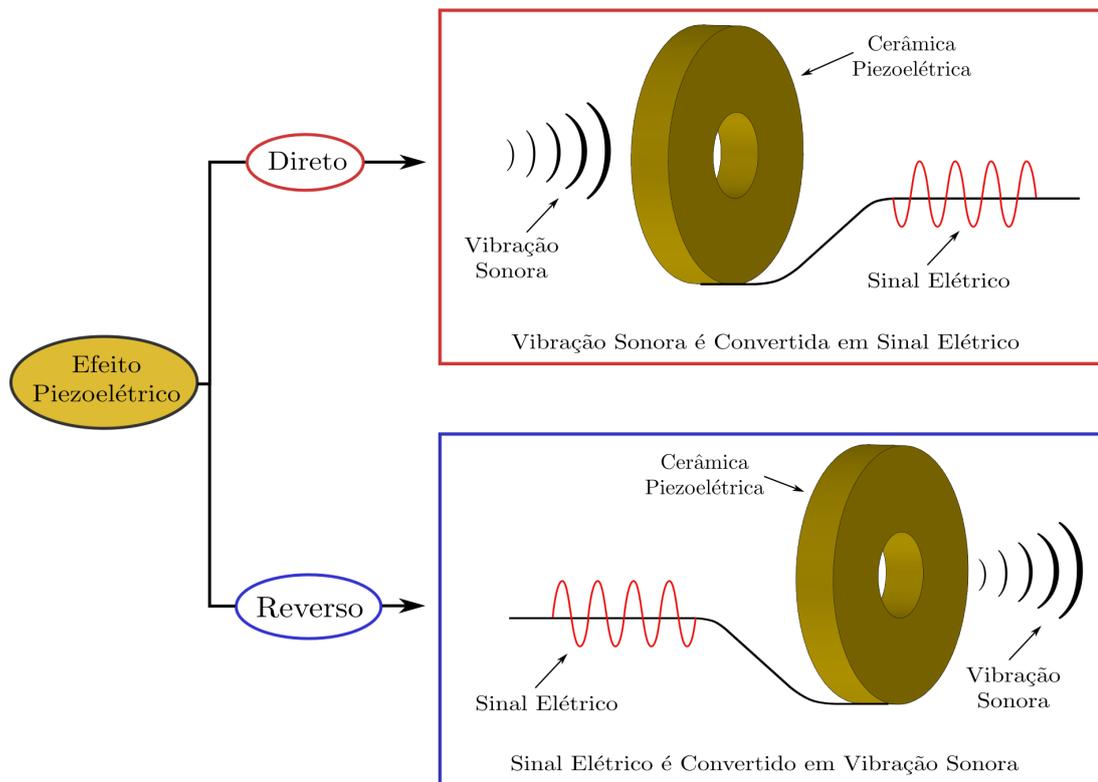
as dos cristais, além de possuírem dimensões e geometrias maleáveis, diferente dos cristais que são frágeis e de difícil moldagem (PEREIRA, 2010). Com isso, foram desenvolvidas as cerâmicas piezoelétricas feitas de titanato zirconato de chumbo (PZTs) (SHENZHEN, 2020), que atualmente são amplamente utilizadas em transdutores de Langevin e outras aplicações, em virtude de apresentarem uma grande eficiência em suas características piezoelétricas. As Figuras 11(a) e 11(b) apresentam alguns materiais piezoelétricos naturais e sintéticos, respectivamente.

### 3.1.1 O Efeito Piezoelétrico

O efeito piezoelétrico é um processo que os materiais piezoelétricos conseguem realizar, ocorrendo de forma direta e reversa (Figura 10) a partir de uma perturbação que é aplicada no material em questão. Quando aplicamos uma pressão mecânica em um material piezoelétrico, ele nos responde com um sinal elétrico, sendo esse processo conhecido como efeito piezoelétrico direto, processo esse inicialmente descoberto pelos irmãos Curie. Os estudos de Lipmann confirmaram que o reverso também é válido, ou seja, se aplicarmos um sinal elétrico em um material piezoelétrico, ele irá responder com uma vibração mecânica, mais especificamente, com ondas sonoras.

Desse modo, quando falamos de materiais piezoelétricos ambos os efeitos funcionam: uma tensão mecânica aplicada gera um sinal elétrico, e um sinal elétrico aplicado gera uma vibração mecânica. Nos transdutores de Langevin é utilizado o efeito piezoelétrico reverso, onde um sinal elétrico é aplicado nas cerâmicas piezoelétricas fazendo elas vibrarem de forma longitudinal, o que coloca o transdutor em funcionamento oscilando também de maneira longitudinal. Assim, suas vibrações geram ondas sonoras, que são irradiadas no meio material em que o dispositivo estiver operando.

Figura 10 – Efeito piezoelétrico.



Fonte: O autor (2022).

### 3.2 PRÉ-TENSIONAMENTO MECÂNICO

O pré-tensionamento mecânico é uma etapa essencial no processo de construção do transdutor. As cerâmicas piezoelétricas apresentam uma elevada resistência mecânica quando estão sujeitas a compressão, e a pré-tensão contribui evitando possíveis rupturas durante o funcionamento do dispositivo, além disso, o pré-tensionamento também diminui os riscos de fadiga mecânica. Para que o transdutor opere com eficiência, todos os seus componentes devem estar sobre um bom contato, porém, as superfícies das peças não são perfeitamente planas.

No entanto, o pré-tensionamento faz com que as superfícies se mantenham sobre um acoplamento efetivo, preservando o bom desempenho do transdutor. O nível de tensão aplicada deve ser avaliada, pois os componentes do dispositivo podem ser danificados caso ocorra uma aplicação em excesso. Um exemplo seria as cerâmicas, que são frágeis e sujeitas a fraturas se uma tensão mecânica muito alta for aplicada. Isso também pode fazer com que a direção de polarização seja reorientada, conduzindo à despolarização das cerâmicas. Estudos relatam que o valor apropriado para a pré-tensão se encontra entre 30 MPa e 50 MPa (SILVA, 2006; MORETTI, 2014). Assim, realizar o pré-tensionamento é essencial para os transdutores, mas deve ser feito com cuidado para que se obtenha um bom casamento efetivo em toda a interface entre as peças e nenhum componente seja danificado.

### 3.3 PERDAS

Durante o seu funcionamento, os transdutores de Langevin estão sujeitos a perdas, onde parte da energia elétrica é transformada em calor. Os componentes aquecem em níveis elevados quando está operando, e isso reduz a sua eficiência de trabalho. A principal fonte de calor do transdutor são as cerâmicas piezoelétricas. Elas aquecem quando o efeito piezoelétrico está sendo realizado. Altas temperaturas podem ocasionar transtornos, em certas situações causam a despolarização das cerâmicas, fazendo com que o transdutor perca eficiência com o passar do tempo, ou até mesmo seja destruído (SILVA, 2006).

Devido a possuírem boa condutividade térmica e estarem em constante contato com o ambiente externo, as massas metálicas do transdutor ajudam na dissipação de calor. Os eletrodos usados entre as cerâmicas e entre as cerâmicas e as massas metálicas para aplicar o sinal elétrico também ajudam na dissipação do calor. Sua espessura permite obter uma boa eficiência nesse processo, fazendo com que o acoplamento eletromecânico do transdutor seja melhorado, e as perdas acabem sendo minimizadas (MORETTI, 2014).

### 3.4 IMPEDÂNCIA ELÉTRICA

Uma grandeza física essencial para caracterizar os transdutores é a impedância elétrica ( $Z$ ), sendo por meio dela que detectamos a frequência de trabalho desses dispositivos. Impedância elétrica é a carga resistiva total de um circuito elétrico em corrente alternada (AC), representando um efeito de oposição geral à passagem de corrente que os elementos de um circuito oferecem. Nesse tipo de circuito estão presentes a resistência e a reatância, que são a parte real e imaginária, respectivamente. A resistência ( $R$ ) acontece quando algum componente do circuito causa oposição a passagem da corrente elétrica, transformando a energia gasta em calor, sendo dada pela Lei de Ohm da seguinte forma:

$$R = \frac{V}{I}, \quad (10)$$

onde  $R$  é a resistência elétrica,  $V$  a diferença de potencial aplicada no circuito e  $I$  a corrente elétrica. A reatância ( $X$ ) também atua como uma oposição a passagem da corrente elétrica, porém a energia é gasta formando um campo elétrico em capacitores (quando o capacitor resiste a variação de tensão elétrica), ou magnético em indutores (quando o indutor resiste a variação de corrente elétrica), onde a mesma depende da corrente alternada aplicada no circuito, sendo dadas pelas equações a seguir.  $X_C$  é a reatância capacitiva e  $X_L$  a reatância indutiva.

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} \quad \text{e} \quad X_L = 2\pi fL, \quad (11)$$

sendo  $f$  a frequência que a corrente elétrica alterna seu sentido no decorrer do tempo,  $C$  a capacitância e  $L$  a indutância do circuito. Observando essas equações da reatância, notamos que a medida que uma cresce (indutiva) a outra diminui (capacitiva). Logo, a impedância seria o acúmulo dos efeitos causados por essas duas grandezas (resistência e reatância), medida em Ohms ( $\Omega$ ) e representada no formalismo cartesiano pela equação:

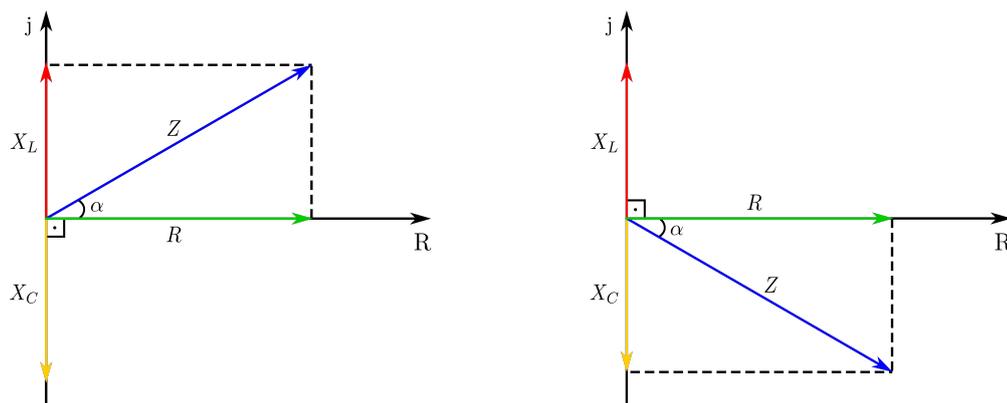
$$Z = R + jX \quad (12)$$

onde  $j$  é a unidade imaginária e  $X$  a reatância total, que pode ser dada pelos efeitos indutivos, capacitivos, ou ambos em um circuito de corrente alternada da seguinte forma:

$$X = X_L - X_C \quad (13)$$

Ao contrário de um resistor que não provoca defasagem entre tensão e corrente por não depender da frequência do circuito (e devido a isso o ângulo de defasagem é nulo), a reatância é uma grandeza que está em defasagem. A tensão e a corrente variam no tempo, mas estão fora de fase por um ângulo de  $90^\circ$ . Em um circuito puramente capacitivo a corrente é adiantada em relação à tensão (ou seja, o pico de corrente ocorre antes do pico de tensão). Esse comportamento é de fato esperado, pois assim que o capacitor descarregado seja ligado no circuito a corrente é máxima e a tensão é mínima (pois o capacitor está descarregado) e à medida que o tempo passa a corrente diminui e a tensão aumenta (a carga vai se acumulando nas placas do capacitor) e depois de um certo tempo a corrente é zero e a tensão é máxima (capacitor carregado).

Figura 11 – Diagrama fasorial das grandezas da impedância elétrica.



Fonte: O autor (2022).

Já em um circuito puramente indutivo a corrente é atrasada em relação à tensão. Quando o indutor é ligado ao circuito ele se comporta como um curto-circuito e a corrente tende a aumentar rapidamente (máxima taxa de variação) e em seguida aparece uma tensão nos terminais do indutor de modo a impedir que a corrente se estabeleça. Conforme o tempo passa a corrente vai lentamente se estabelecendo e a tensão no indutor vai diminuindo até que a corrente atinja

um valor de equilíbrio em que a tensão nos terminais do indutor seja nula. O pico de máxima tensão no indutor ocorre antes da máxima corrente e devido a isso a corrente está atrasada em relação a tensão.

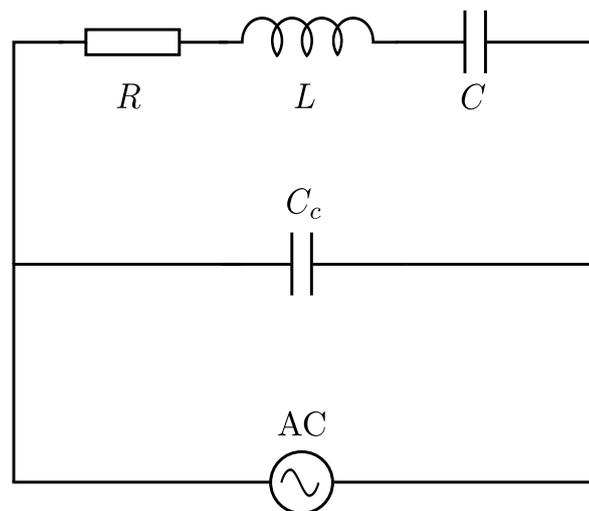
Desse modo, na reatância indutiva a corrente é atrasada  $90^\circ$  em relação à tensão, e a impedância se encontra no eixo imaginário positivo. No caso da reatância capacitiva a corrente é adiantada  $90^\circ$  em relação à tensão, fazendo com que a impedância esteja situada no eixo imaginário negativo. Isso justifica o fato de uma ser positiva (reatância indutiva) e a outra negativa (reatância capacitiva) na equação 13. Na Figura 11 podemos observar um diagrama fasorial do eixo das grandezas imaginárias em relação ao eixo das reais, mostrando como essas grandezas se comportam no circuito.

O módulo da impedância elétrica pode ser encontrado aplicando o teorema de Pitágoras no diagrama da Figura 11, onde obtemos a seguinte relação:

$$|Z| = \sqrt{R^2 + X^2} \quad \text{ou} \quad |Z| = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} \quad (14)$$

O circuito RLC é equivalente ao do transdutor por envolver as respectivas grandezas utilizadas na análise da impedância elétrica, sendo necessário considerar a capacitância das cerâmicas  $C_c$ , que é ligada em paralelo aos resistores desempenhando o papel das perdas dielétricas e da condutividade das cerâmicas (MORETTI, 2014). A Figura 12 ilustra esse circuito.

Figura 12 – Circuito elétrico equivalente.



Fonte: O autor (2022).

Relacionando o circuito da Figura 12 com o transdutor de Langevin, o resistor  $R$ , indutor  $L$  e o capacitor  $C$  representam as perdas internas de energia, a massa e a rigidez do transdutor, respectivamente. Além disso, o capacitor  $C_c$  presente no circuito tem a função de representar a capacitância das cerâmicas, como mencionado.

Quando a impedância é mínima os transdutores se comportam como um capacitor, facilitando a passagem da corrente elétrica, resultando em alta conversão eletromecânica, e obtendo uma maior amplitude de oscilação. Já quando a impedância é máxima temos uma baixa conversão, onde o transdutor se comporta como um resistor, causando oposição a passagem da corrente elétrica, e possuindo uma menor amplitude de oscilação. Além disso, os transdutores possuem dois grupos de ressonância elétrica, conhecidos como frequências de ressonância e anti-ressonância.

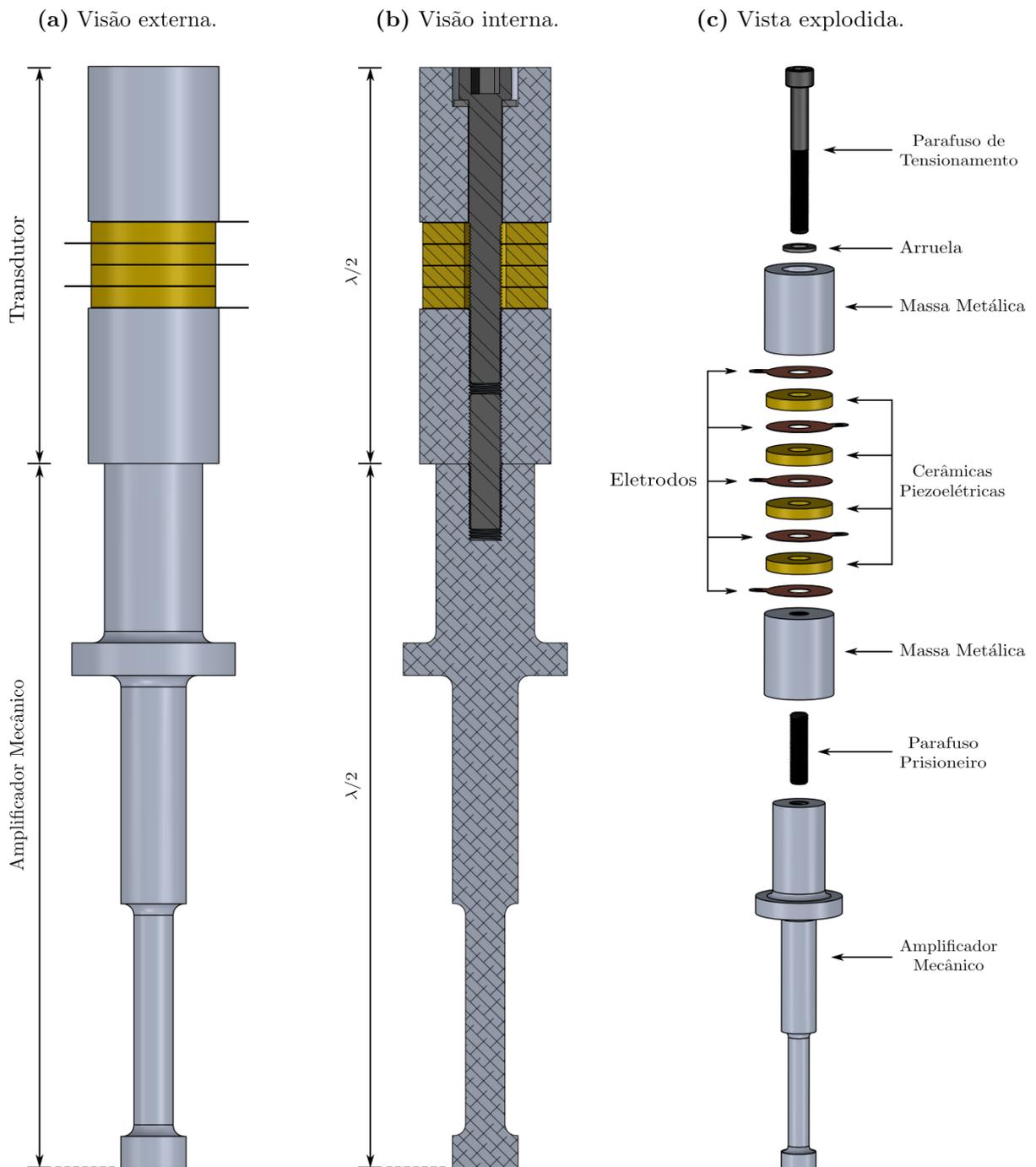
As frequências de ressonância e anti-ressonância estão localizadas nos pontos onde o módulo da impedância elétrica possui um valor mínimo local e máximo local, respectivamente (SILVA, 2006). Geralmente, as de anti-ressonância estão localizadas logo após as de ressonância. É por meio da impedância elétrica que essas frequências são detectadas, devido a relação que a parte imaginária da impedância (reatância) tem com a frequência do circuito elétrico. É válido lembrar que ao adicionar massa no transdutor suas frequências diminuem. Isso se dá por estar sendo adicionada carga ao sistema, fazendo com que a impedância diminua seu valor. Assim, é por meio dessa grandeza física que é feita a análise da frequência de trabalho do transdutor.

### 3.5 AMPLIFICADORES MECÂNICOS

Para determinadas aplicações, os transdutores de Langevin apresentam pequenos deslocamentos, sendo necessário adicionar a sua geometria um amplificador mecânico, que é projetado para transmitir a energia gerada pelo transdutor, como também amplificar a velocidade de vibração e a amplitude dos deslocamentos produzidos pelo dispositivo. Essa ferramenta é uma peça metálica que é acoplada ao transdutor, e possui área de secção menor que o diâmetro do dispositivo com ressonância em meio comprimento de onda ( $\lambda/2$ ) ou até mesmo em múltiplos de meio comprimento de onda ( $n \times \lambda/2$ ). O comprimento e o formato geométrico do amplificador vai depender da aplicação que esteja sendo analisada, levando em conta o melhor formato para se adequar a demanda em questão. Geralmente, a ponta de maior diâmetro é acoplada ao transdutor.

A energia gerada pelo dispositivo é direcionada se concentrando na ponta que possui a área menor através da geometria do amplificador, sendo essa área a superfície de irradiação da onda ultrassônica. Fazendo um bom desenho geométrico, podemos obter valores altos da amplificação de vibração na ponta do dispositivo. Além disso, as diferentes formas geométricas que os amplificadores podem assumir proporcionam um papel fundamental para cada tipo de aplicação, como quebra de emulsões e limpeza ultrassônica. A Figura 13 apresenta um amplificador mecânico acoplado ao transdutor de Langevin. Na Figura 13(a) temos a visão externa, na 13(b) a visão interna, e na 13(c) a vista explodida de todos os componentes que compõem o sistema transdutor + amplificador.

Figura 13 – Transdutor de Langevin acoplado à um amplificador mecânico.



Fonte: O autor (2022).

O design dos amplificadores é realizado através da relação entre os diâmetros e o comprimento de suas extremidades. Analisando o amplificador da Figura 14 e relacionando o diâmetro traseiro ( $D_1$ ) com o diâmetro da ponta ( $D_2$ ), é possível obter o maior valor de amplificação, representado por  $(D_1/D_2)^2$ , através da equação 15. Nesta equação, as velocidades ( $v_1$  e  $v_2$ ), os deslocamentos ( $\Delta_1$  e  $\Delta_2$ ), as áreas ( $A_1$  e  $A_2$ ) e os diâmetros ( $D_1$  e  $D_2$ ) das pontas são levados em conta.

$$\frac{v_2}{v_1} = \frac{\Delta_2}{\Delta_1} = \frac{A_1}{A_2} = \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^2 \quad (15)$$

A relação se dá pela velocidade da ponta de menor diâmetro ( $v_2$ ) sobre a ponta de maior diâmetro ( $v_1$ ); o deslocamento da ponta de menor diâmetro ( $\Delta_2$ ) sobre o da ponta de maior diâmetro ( $\Delta_1$ ); a área de secção de maior diâmetro ( $A_1$ ) sobre a área de secção de menor diâmetro ( $A_2$ ); e o maior diâmetro ( $D_1$ ) sobre o menor diâmetro ( $D_2$ ) ao quadrado (MORETTI, 2014). Quando o amplificador mecânico está ressonando, a conservação do momento indicaria que a velocidade na ponta de menor diâmetro deve ser maior do que a velocidade na ponta de maior diâmetro, para que o equilíbrio seja mantido. Já que o deslocamento é proporcional a velocidade, a amplitude de deslocamento ( $A_1$ ) é menor do que a amplitude de deslocamento ( $A_2$ ) (SILVA, 2006).

O comprimento  $l$  do amplificador é dado por:

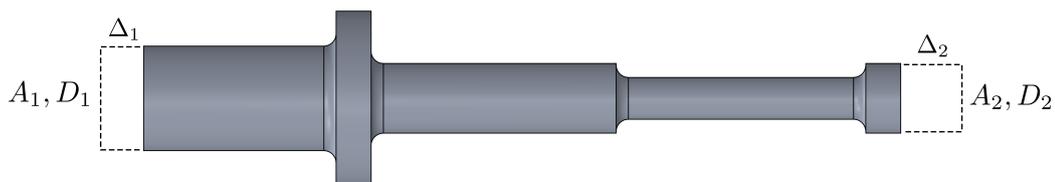
$$l = \frac{\lambda}{2} = \frac{c}{2f}, \quad (16)$$

onde  $f$  é a frequência de trabalho e  $c$  a velocidade de propagação no material, dada por:

$$c = \sqrt{\frac{\gamma}{\rho}}, \quad (17)$$

sendo  $\gamma$  o módulo de Young e  $\rho$  a densidade do material.

Figura 14 – Amplificador mecânico.



Fonte: O autor (2022).

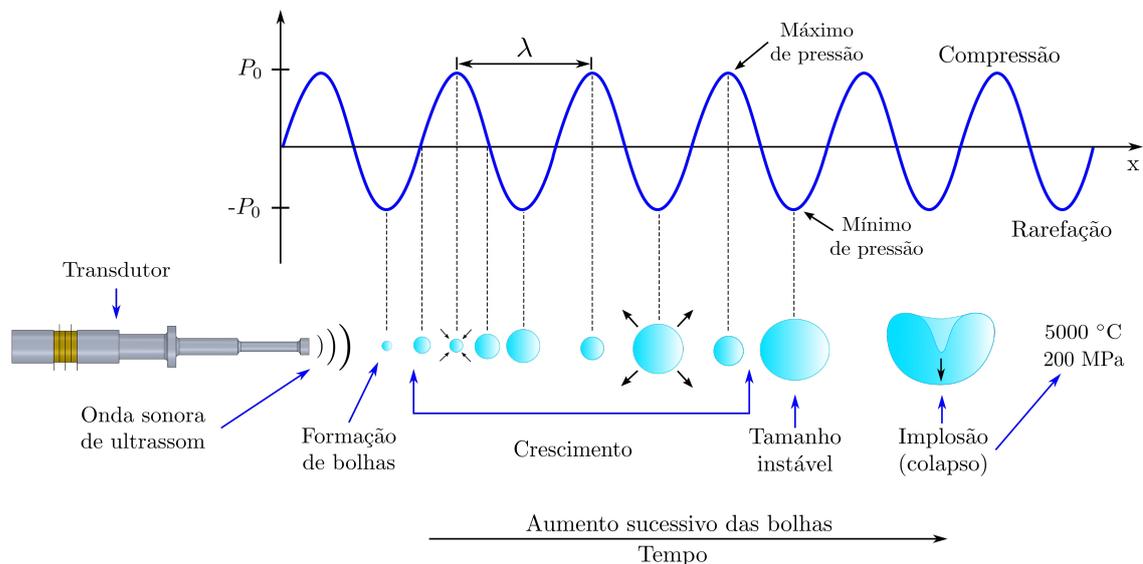
Os amplificadores mecânicos são geralmente usinados utilizando materiais que possuem baixas perdas mecânicas, alta resistência à fadiga e à corrosão. Assim, os tarugos de aço, alumínio e titânio apresentam boas propriedades mecânicas para a confecção dessa ferramenta (MORETTI, 2014). Além disso, os transdutores de Langevin quando acoplados a um amplificador mecânico específico conseguem gerar as ondas ultrassônicas utilizadas no processo de cavitação acústica.

## 4 CAVITAÇÃO ACÚSTICA

O ultrassom é uma onda sonora mecânica que se propaga em um meio material em ciclos de compressão e rarefação sucessivos. Tomando como exemplo uma onda ultrassônica gerada devido as vibrações de um transdutor de Langevin e se propagando em um meio líquido, na etapa de compressão a onda exerce uma pressão acústica positiva ( $P_0$ ) no fluido, comprimindo suas moléculas. Já na etapa de rarefação ocorre o contrário, ou seja, a onda exerce uma pressão acústica negativa ( $-P_0$ ) fazendo com que as moléculas do meio se expandam, causando uma dispersão entre elas. Devido a essa mudança abrupta de pressão, ocorre na etapa de expansão o surgimento de microbolhas de vapor (ou cavidades), acontecendo, assim, o processo de cavitação acústica, que está ilustrado na Figura 15.

O fenômeno conhecido como cavitação acústica nada mais é do que o surgimento, crescimento, e futuramente implosão (ou colapso) de microbolhas de vapor em um meio líquido através da aplicação de uma onda sonora de ultrassom com intensidade relativamente alta (YASUI, 2018). Basicamente, as microbolhas (cavidades) começam a se expandir e contrair de forma alternada nos ciclos de rarefação (região de pressão acústica negativa) e compressão (região de pressão acústica positiva) da onda, até o momento em que elas implodem, e ao implodirem geram uma variedade de fenômenos interessantes, como por exemplo, o surgimento de micro jatos e ondas de choque, que são utilizados para realizar limpeza ultrassônica de materiais sólidos.

Figura 15 – Representação esquemática do processo de cavitação acústica.



Fonte: O autor (2022).

A intensidade do som influencia diretamente no crescimento das cavidades. As bolhas absorvem a energia da onda de ultrassom que está sendo irradiada, e isso faz com que elas cresçam. Há dois tipos de cavitação: transiente e estável. Na transiente, uma onda sonora de ultrassom de alta intensidade pode aumentar o tamanho das bolhas de forma repentina durante o

ciclo de rarefação da onda, onde temos uma pressão acústica negativa, de modo que as cavidades irão implodir antes mesmo de chegarem na etapa de compressão, com a pressão acústica positiva (RONCHI, 2014). Já na cavitação estável, a onda ultrassônica de baixa intensidade proporciona as bolhas permanecerem em mais de um ciclo de compressão e expansão antes de implodirem, fazendo com que o tamanho das cavidades oscilem e cresçam com o passar do tempo, até o momento do colapso.

O limiar da cavitação é 100 kPa, sendo essa a mínima pressão acústica necessária para gerar a cavitação acústica. As implosões das bolhas geram brevemente e localmente temperaturas acima de 5000 °C (condições como na superfície solar) e pressões superiores a 200 MPa, em um período de milissegundos. Devido ao tamanho das bolhas ser muito inferior em relação ao volume do líquido em que estão sendo geradas, não há mudanças visíveis significativas nas condições do meio, pois o aquecimento produzido é rapidamente dissipado (RONCHI, 2014). Apesar de se obter um maior número de bolhas implodindo com o tempo em altas frequências, elas são menores e apresentam um colapso menos eficiente. Assim, realizar o processo de cavitação em baixas frequências pode ser mais vantajoso para algumas aplicações, por exemplo, para fazer limpeza de materiais, pois será obtido cavidades maiores colapsando com uma maior intensidade.

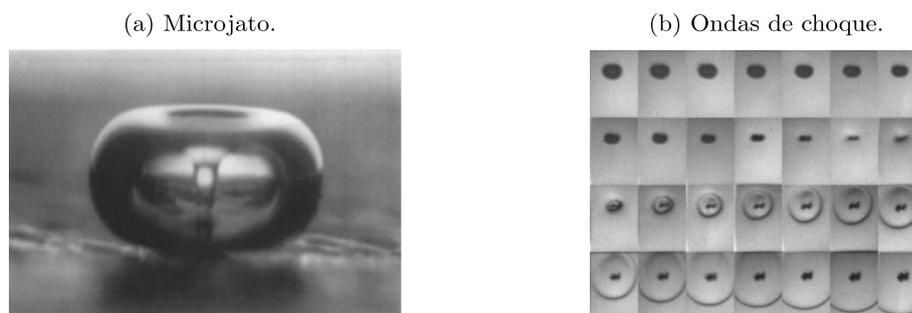
#### 4.1 EFEITOS CAUSADOS PELA CAVITAÇÃO ACÚSTICA

A cavitação acústica é caracterizada por efeitos físicos, químicos e biológicos. Tais efeitos geram alguns fenômenos interessantes que atualmente estão sendo bastante explorados por pesquisadores da área para serem utilizados em diversas aplicações, tais como limpeza ultrassônica de materiais sólidos, destruição de patógenos, degradação de poluentes orgânicos e acelerar reações químicas (YUSOF *et al.*, 2016).

##### 4.1.1 Efeitos Físicos

Dentre os efeitos físicos gerados pela cavitação acústica, podemos citar o surgimento de microjatos e ondas de choque de alta intensidade no momento em que as bolhas implodem. Ambos são gerados devido a grande velocidade do colapso das bolhas de cavitação. Esses efeitos possuem uma vasta utilidade, e a mais habitual é para realizar limpeza de superfícies sólidas, como por exemplo, microchips, joias e motores. Além disso, os efeitos físicos da cavitação acústica também podem ser utilizados para esterilizar objetos em geral e destruir patógenos. As Figuras 16(a) e 16(b) apresentam a formação de microjatos e ondas de choque, respectivamente, durante a implosão das bolhas.

Figura 16 – Efeitos físicos da cavitação acústica.

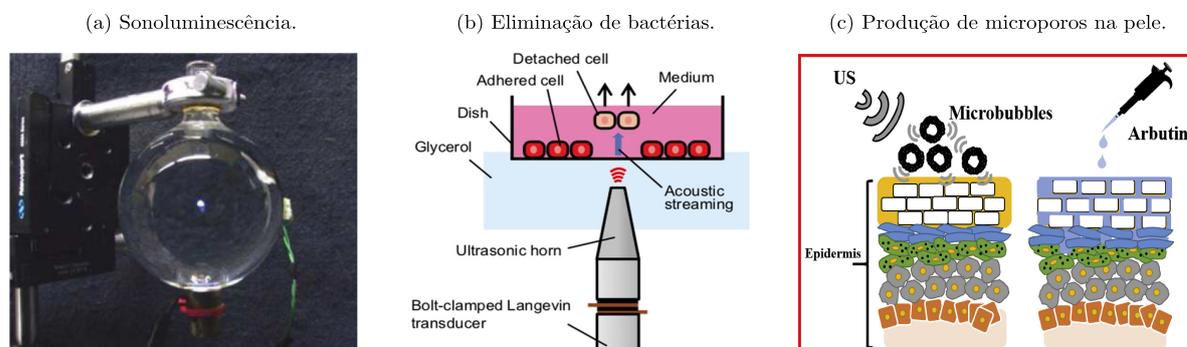


Fonte: Yusof *et al.* (2016).

#### 4.1.2 Efeitos Químicos e Biológicos

Os efeitos químicos do ultrassom são atribuídos à cavitação acústica. A sonoquímica é uma área de estudo atualmente bem consolidada, e conta com diversas aplicações. A geração de radicais livres é mais um dos efeitos causados pela cavitação, podendo ser utilizados para acelerar reações químicas. A produção de biodiesel é uma das reações químicas que pode ser melhorada devido a interação dos radicais livres no sistema. Um outro fenômeno muito interessante causado pela cavitação é a geração de luz através do som. Esse processo é conhecido como sonoluminescência, e dependendo da potência do ultrassom que esteja sendo empregada no sistema, ocorre a emissão de luz no momento que as bolhas implodem (ROOZE *et al.*, 2013). Essa situação pode ser observada na Figura 17(a). Dentre os efeitos biológicos da cavitação, podemos destacar o uso do ultrassom para eliminar bactérias (LIAO, 2016), onde o transdutor consegue localmente extinguir essas espécimes com precisão; e para produzir microporos na região da derme e epiderme da pele (INUI *et al.*, 2019), facilitando a penetração de fármacos para atingir uma determinada área de interesse, como tumores. Essas aplicações estão ilustradas nas Figuras 17(b) e 17(c), respectivamente.

Figura 17 – Efeitos químicos e biológicos da cavitação acústica.



Fonte: (a) Roze *et al.* (2013); (b) Liao (2016) e (c) Inui *et al.* (2019).

Notamos que a cavitação acústica é uma área ampla que vem sendo explorada, devido a seus fenômenos possuírem aplicações nas mais diversas áreas. Neste trabalho serão utilizados os efeitos físicos da cavitação acústica em nossas aplicações.

## 5 TRANSDUTORES DE LANGEVIN NA INDÚSTRIA DE PETRÓLEO

Nas últimas décadas, o uso do ultrassom na indústria de petróleo vem ganhando cada vez mais espaço. Devido ao seu baixo custo para ser construído, funcionamento sem poluição ambiental e sua alta eficiência, os transdutores de Langevin estão sendo utilizados em algumas aplicações, como por exemplo, para realizar quebra de emulsões de petróleo do tipo água em óleo no processamento primário, e para realizar limpeza ultrassônica de permutadores de calor por meio do fenômeno da cavitação acústica. Assim, vejamos com mais detalhes essas duas aplicações.

### 5.1 EMULSÕES

Uma mistura de dois líquidos imiscíveis (que não se misturam) é conhecida como emulsão. Um dos líquidos encontra-se na forma de pequenas gotas dispersas dentro do outro líquido. No caso de emulsões de petróleo, um dos líquidos é a água e o outro é o petróleo, chamado neste caso de óleo (ANTES, 2011). Sendo a água o líquido disperso no petróleo, esse sistema é denominado emulsão do tipo água em óleo. Embora a água e o óleo possam ser considerados quimicamente imiscíveis, durante o processo de extração do petróleo, desde o poço até a unidade de produção, ocorre uma intensa agitação nas tubulações, fazendo com que surjam as emulsões. Logo, as emulsões podem ser encontradas em vários estágios da cadeia do petróleo, entre a perfuração, a produção, o transporte e o processamento.

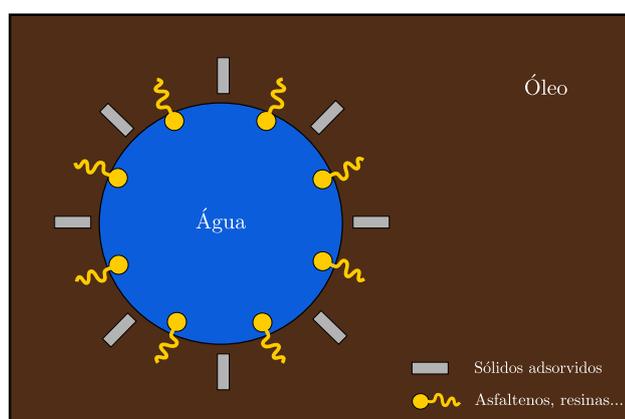
A emulsão extraída dos poços de petróleo contém a presença de asfaltenos e/ou resinas, que geram uma camada impermeabilizante ao redor das gotas de água, produzindo grande estabilidade na mesma. Estas camadas impedem a coalescência espontânea dessas gotas dando resultado a emulsões altamente estáveis. O processo de formação da emulsão é chamado de emulsificação, podendo ocorrer no próprio reservatório que contém o petróleo. A água emulsionada no óleo causa vários problemas indesejáveis no processo de produção, entre eles podemos citar a diminuição da vida útil e sobredimensionamento dos equipamentos e tubulações, consumo elevado dos produtos químicos e energia, como também a corrosão e as incrustações que se formam nas instalações durante o processamento do petróleo (THOMAS, 2004).

Separar a água do óleo é uma tarefa indispensável para as indústrias petrolíferas e essa etapa é conhecida como quebra de emulsões. Para realizar esse processo é necessário aplicar um ou mais métodos de separação, tais como o eletrostático, adição de desemulsificante químico e o aumento da temperatura, que são normalmente utilizados para realizar a quebra de emulsões com o intuito de recuperar o óleo emulsionado no estágio primário para se adequar às especificações técnicas referente à máxima quantidade de água permitida no óleo comercial. Por diversas vezes, os três são utilizados simultaneamente. Além disso, a quebra de emulsões é realizada em etapas.

## 5.2 ESTABILIDADE DAS EMULSÕES

As emulsões são estáveis quando são capazes de preservar suas propriedades. O principal fator responsável pela estabilidade das emulsões é a presença de emulsificantes naturais que estão contidos no petróleo, tais como os asfaltenos, as resinas, os ácidos naftênicos, os fenóis e as bases nitrogenadas (RONCHI, 2014). Essas substâncias migram e se alojam na superfície das gotas de água criando um filme interfacial, impedindo o contato entre as gotas, e assim, reduzindo a probabilidade de realizarem a coalescência. A Figura 18 apresenta a representação de uma emulsão do tipo água em óleo.

Figura 18 – Emulsificantes formando o filme interfacial em uma gota de água.



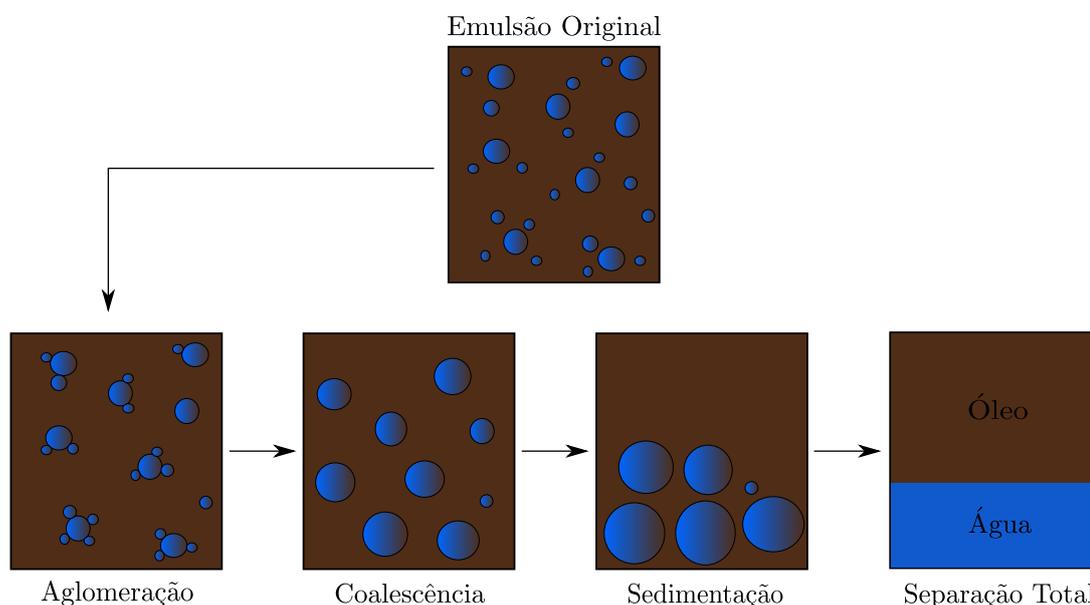
Fonte: O autor (2022).

O petróleo pode contar com outros agentes emulsificantes além dos naturais que são inseridos nas diferentes etapas do processamento, tais como alguns produtos químicos que são injetados nos poços atuando como fluidos de perfuração, inibidores de corrosão, parafinas e incrustações (ATEHORTUA, 2015). Além disso, também estão presentes sólidos finamente divididos que são adsorvidos na superfície das gotas de água, como por exemplo as argilas, lamas de perfuração, e as incrustações minerais. Esses sólidos apresentam um tamanho muito inferior se comparados ao tamanho das gotas, e acabam aumentando a estabilização das emulsões, tornando o filme interfacial mais rígido, e dificultando o seu rompimento.

A quantidade de emulsificantes existentes no petróleo influencia diretamente na estabilidade das emulsões. Logo, quanto maior for a quantidade de emulsificantes presentes no petróleo, mais estável será a emulsão, devido a ocorrer uma maior concentração desses agentes na superfície das gotas de água, o que torna mais difícil a sua remoção. O tamanho das gotas de água é mais um termo que está relacionado com a estabilidade das emulsões. Quanto menores forem as gotas, menor será a velocidade de sedimentação (SILVA *et al.*, 2007). A salinidade da água também influencia na estabilidade da emulsão. Com o seu aumento, a densidade da água é elevada, e isso faz com que a diferença de densidade entre a água e o óleo aumente, contribuindo para o processo de quebra de emulsão.

O envelhecimento é outro fator que acaba agravando a estabilidade da emulsão. Se as emulsões não forem desestabilizadas logo quando são geradas, mais emulsificantes irão migrar para a interface das gotas de água, elevando a estabilidade da emulsão, e deixando o filme interfacial mais consistente. Isso justifica a injeção de desemulsificantes no fundo do poço, pois o procedimento para desestabilizar as emulsões deve ser feito o mais breve possível. Entretanto, em algumas situações o tamanho das gotas são ampliados devido ao envelhecimento das emulsões. Isso acontece em razão das gotas se unirem formando uma gota maior, podendo, assim, sedimentarem.

Figura 19 – Etapas para realizar a quebra de emulsões.



Fonte: O autor (2022).

Realizar a quebra de emulsões é uma etapa fundamental para o processo de produção do petróleo, apesar da elevada estabilidade que as emulsões possam apresentar quando são formadas. A separação das fases líquidas é realizada em várias etapas responsáveis pela degradação da emulsão, que conduzem a quebra de emulsão. Desse modo, a Figura 19 apresenta esquematicamente o processo de separação da água presente no óleo de forma cronológica, desde a emulsão original até a separação total.

### 5.2.1 Aglomeração

A aglomeração ou floculação acontece quando as gotas menores se unem à gotas maiores, formando flocos, que são grupos de gotas de água que permanecem unidas mantendo o seu formato inicial. No entanto, esse processo é reversível, e as gotas podem ser dispersas novamente no petróleo. Além disso, essa é uma etapa importante para realizar a quebra de emulsões, sendo esse o momento que a emulsão começa a ser desestabilizada, conduzindo a coalescência.

### 5.2.2 Coalescência

A coalescência é a etapa em que ocorre o rompimento do filme interfacial, fazendo com que as gotas menores se unam à gotas maiores formando uma única gota de maior tamanho e peso. O fato de ter gotas maiores influencia na etapa posterior, fazendo com que a sedimentação seja realizada. O processo de coalescência e sedimentação podem acontecer por etapas, onde as gotas inicialmente crescem coalescendo, e depois sedimentam por gravidade, ou até mesmo de forma simultânea, em que é possível ter gotas coalescendo durante a etapa de sedimentação. Porém, para que a coalescência seja realizada é necessário que os agentes emulsificantes da emulsão sejam vencidos.

### 5.2.3 Sedimentação

A última etapa do processo de quebra de emulsões é a sedimentação, onde as gotas de água se deslocam na mesma direção que a gravidade atua, ou seja, se movem para o fundo do recipiente, ocorrendo, assim, a separação total. Isso acontece devido a diferença de densidade entre a água e o óleo, onde as moléculas de água são mais densas, e a velocidade de sedimentação depende da viscosidade do óleo, e do tamanho das gotas de água presentes no óleo. Logo, quanto maiores forem as gotas, mais rápido será o processo de separação.

## 5.3 DESEMULSIFICAÇÃO DAS EMULSÕES

Para que as emulsões sejam desestabilizadas são aplicados diferentes métodos com o intuito de realizar a quebra de emulsão, e assim ocorrer a desemulsificação, fazendo com que as especificações do petróleo sejam atendidas. Dentre as técnicas existentes para realizar a quebra de emulsões, podemos citar o método químico, onde é inserido o desemulsificante adequado a emulsão, e outros métodos tradicionais, como o aquecimento, o aumento do teor de água e o uso do campo elétrico. Entretanto, o uso do ultrassom como técnica complementar para realizar a quebra de emulsões no processamento primário vem sendo analisado pelas indústrias e pesquisadores da área, sendo esse o foco deste trabalho.

### 5.3.1 Adição de Desemulsificante

Os emulsificantes naturais que formam o filme interfacial ao redor das gotas de água podem ser desestabilizados a partir da adição de um produto químico quebrador de emulsão, chamado de desemulsificante. Após ser adicionado, o desemulsificante migra para a interface das emulsões, onde sua função é romper o filme interfacial, deslocando os emulsificantes da superfície das gotas, o que permite ocorrer a coalescência. Assim, os desemulsificantes formam uma película fina entre a água e o óleo, atuando como uma espécie de barreira, não permitindo que as emulsões voltem a ser formadas.

A eficácia dos desemulsificantes realizarem a quebra de emulsões é basicamente definida por dois aspectos: se misturar bem na água sem diluir-se, e a capacidade de remover os emulsificantes naturais presentes na interface das gotas de água, que as impedem de coalescer (ATEHORTUA, 2015). Assim, os desemulsificantes são aplicados de forma específica, de acordo com o grau de estabilidade que as emulsões apresentam. Além disso, para selecionar um bom desemulsificante é levado em conta como característica essencial a velocidade que realiza o processo de quebra de emulsão, ou seja, a velocidade que o desemulsificante interage com a superfície das gotas rompendo o filme interfacial, e deslocando os emulsificantes para que ocorra a coalescência. Estudos indicam que injetar desemulsificante no interior dos poços contribui para a desestabilização das emulsões, impedindo que os emulsificantes naturais migrem para a interface das gotas durante o escoamento do petróleo (SILVA *et al.*, 2007).

### 5.3.2 Aquecimento

A temperatura é um aspecto que pode afetar a estabilidade da emulsão de forma considerável, onde as propriedades físicas da água, do óleo e do filme interfacial são modificadas de acordo com a variação da temperatura (RONCHI, 2014). Elevar a temperatura faz com que a viscosidade do óleo seja amenizada. Em outras palavras, quando a temperatura aumenta, a viscosidade diminui, onde as gotas de água se aglomeram com mais facilidade, e ainda facilita a chegada do desemulsificante na superfície das gotas, aumentando a possibilidade de sedimentarem. Outra consequência a partir do acréscimo da temperatura é fazer com que as colisões entre as gotas de água aumentem, pois elevar a temperatura aumenta o grau de agitação das moléculas. Além disso, a viscosidade interfacial das gotas também é reduzida, o que facilita a sua ruptura, e o processo de coalescência é melhorado.

### 5.3.3 Aumento do Teor de Água

Aumentar o teor de água nas emulsões eleva a dispersão das gotas no petróleo. Isso torna o sistema disperso cada vez mais instável, pois as gotas vão se agrupando mais próximas umas das outras, fazendo com que a taxa de colisões entre elas seja acrescida, onde o seu tamanho e peso são elevados, induzindo o processo de coalescência e sedimentação.

### 5.3.4 Uso do Campo Elétrico

Um outro método para desestabilizar as emulsões é submetê-las a um campo elétrico intenso. Isso faz com que as gotas sejam polarizadas, ocorrendo o surgimento de um dipolo induzido. Em um sistema com várias gotas de água dispersas, como é o caso das emulsões, elas tendem a se atrair devido aos dipolos formados, em que essa atração acontece a partir da interação de polos opostos, onde esse processo é conhecido como eletrocoalescência. Assim, a taxa de colisão e de coalescência das gotas é elevada, contribuindo para a quebra de emulsões.

### 5.3.5 Quebra de Emulsões Utilizando Transdutores de Langevin

O uso do ultrassom como técnica complementar no processamento primário de petróleo vem sendo explorado nas últimas décadas. Uma das aplicações envolvendo essa técnica faz uso dos transdutores de Langevin, em que os dispositivos são utilizados para realizar a quebra de emulsões durante o escoamento do petróleo. A agitação produzida pelo campo ultrassônico gerado pelo transdutor é a principal responsável pela separação das emulsões de água em óleo. Tal agitação é produzida a partir da vibração mecânica das cerâmicas piezoelétricas quando o transdutor está operando.

A energia gerada durante o funcionamento do transdutor é transmitida para o sistema contendo as emulsões. O acréscimo da energia possibilita a ruptura do filme interfacial que contorna as gotas de água, resultando na coalescência em gotas maiores (ATEHORTUA, 2015). Essa técnica envolvendo o ultrassom também pode ser utilizada combinada com a aplicação do desemulsificante químico, o que possibilita obter resultados satisfatórios em um menor período.

Vários métodos são utilizados para realizar a quebra de emulsões de petróleo. Alguns deles necessitam de um elevado custo para serem aplicados, como por exemplo, os separadores gravitacionais que ocupam um grande espaço físico nas plataformas de petróleo, e a adição de desemulsificante químico em grande escala, onde os custos decorrentes do processamento primário são repassados ao valor final do produto. Devido ao seu baixo custo para ser construído, funcionamento sem poluição ambiental e sua alta eficiência, os transdutores de Langevin se tornam uma ótima alternativa para contornar algumas das dificuldades presentes no processamento primário de petróleo, em específico, para realizar a separação de emulsões de água em óleo.

## 5.4 LIMPEZA ULTRASSÔNICA

Podemos descrever a limpeza como uma ação realizada a partir da aplicação de energia mecânica na forma de fricção para efetuar a remoção de sujidade. Esse processo geralmente é feito combinado com um produto químico, como por exemplo soluções detergentes, que acabam facilitando a extração das impurezas do objeto a ser limpo, além de reduzir a concentração microbiana. O método manual e o automatizado são exemplos de técnicas existentes para realizar a limpeza.

A limpeza manual acontece devido ao esforço humano, onde é preciso estar em contato com os objetos a serem limpos. Geralmente são utilizadas escovas e soluções químicas de limpeza para remover as impurezas utilizando a fricção. Esse método, além de levar mais tempo para ser realizado, não é tão preciso e eficaz se comparado ao automatizado, e o fato de estar em contato com os objetos e produtos químicos ocasiona a recomendação de utilizar equipamentos de proteção individual durante o processo, para evitar eventuais acidentes. O método automatizado faz uso de máquinas dos mais diversos modelos, entre elas temos as esterilizadoras e as lavadoras ultrassônicas.

A utilização do ultrassom para realizar limpeza de objetos se destaca entre as demais técnicas por ser um método moderno e eficaz. Além de ser mais produtivo, oferece menor risco ao usuário e ainda possibilita realizar a limpeza por diversas vezes consecutivas. A limpeza ultrassônica conta com algumas vantagens específicas, como a remoção de incrustações pesadas, entranhadas em lacunas e ranhuras, sem trabalho manual adicional e sem danificar os itens a serem limpos (CARLI; HAHNEMANN, 2017). Devido a limpeza das superfícies trabalhadas ser realizada em tempo mínimo, em questão de segundos, os resultados obtidos são satisfatórios, sendo esta uma técnica altamente eficiente em relação a outros métodos, como por exemplo a limpeza manual. Observamos na Figura 20 objetos metálicos que foram limpos pelo método da limpeza ultrassônica.

Figura 20 – Limpeza de objetos utilizando ultrassom.

(a) Incrustação nos objetos.



(b) Objetos após a limpeza ultrassônica.

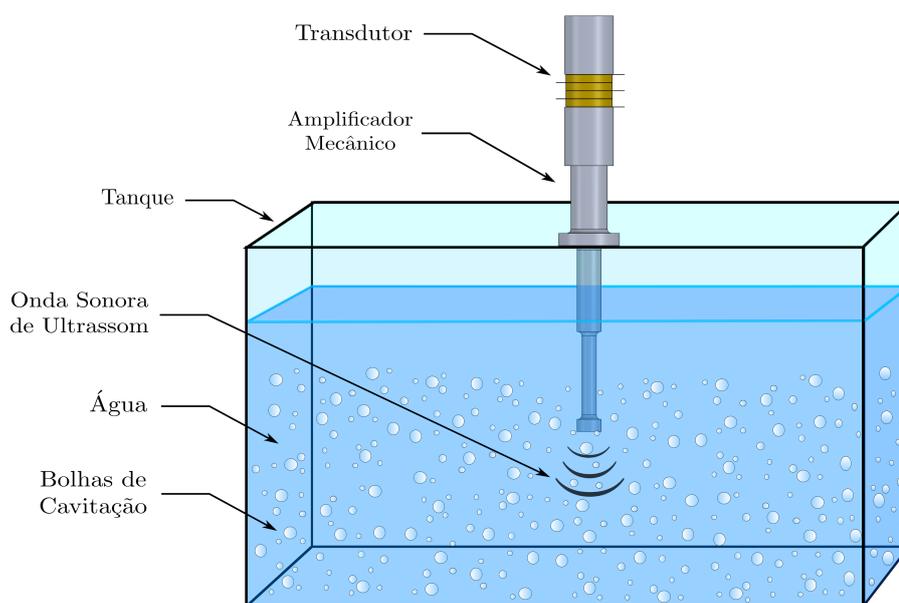


Fonte: Schulz *et al.* (2019).

O fenômeno da cavitação acústica, que foi discutido no Capítulo 4, é o responsável por realizar a limpeza ultrassônica. Colocando o objeto a ser limpo imerso em um tanque com líquido em seu interior (água por exemplo), acoplamos ao tanque o transdutor de Langevin para que seja irradiada a onda ultrassônica, e assim, gerar os efeitos da cavitação. Esse sistema é conhecido como banho ultrassônico, e na Figura 21 está representada essa situação. Dependendo das dimensões e/ou condições de sujidade que o objeto apresente, podem ser acoplados mais de um transdutor, para que o processo de limpeza seja melhorado.

As bolhas de cavitação geram elevadas temperaturas e pressões durante as implosões, podendo deteriorar estruturas que apresentem fragilidade, eliminar agrupamentos microbianos, além de desprender e remover impurezas do local de extrato. Os permutadores de calor, utilizados na indústria de petróleo, são equipamentos que passam por frequentes manutenções para que sejam limpos. A limpeza ultrassônica é uma proposta para remover a sujidade desses objetos, e assim, possibilitar que operem com eficiência.

Figura 21 – Representação do processo de limpeza ultrassônica.



Fonte: O autor (2022).

#### 5.4.1 Permutadores de Calor

Permutadores de calor são equipamentos onde ocorre uma troca térmica entre fluidos que se encontram em temperaturas diferentes, sem haver uma mistura entre eles. Em outras palavras, são dispositivos que possibilitam resfriar um fluido às custas do aquecimento de outro, estando eles separados por uma parede sólida de um material resistente a corrosão (SANT'ANNA, 2021). Os fluidos utilizados são geralmente líquidos, mas eles também podem estar no estado gasoso, como o ar e o vapor. Esses equipamentos possuem diversas aplicações, e uma delas é na rede de pré-aquecimento das indústrias de petróleo.

Os permutadores são comumente conhecidos como trocadores de calor ou trocadores de energia térmica, e são classificados de acordo com o arranjo do escoamento e o tipo de construção. Pode-se ter permutadores simplórios, com apenas tubos duplos concêntricos, casco e tubos, compactos, circuito impresso (PCHE), ou de placas paralelas. A execução do escoamento pode ser feita de forma paralela, onde os fluidos quente e frio entram por uma mesma extremidade, escoam na mesma direção e saem na extremidade oposta; e contracorrente, com os fluidos entrando, escoando e saindo em extremidades opostas (SANT'ANNA, 2021).

Os derivados do petróleo, como o querosene, o óleo diesel, o gás e a gasolina, são obtidos a partir do processo de destilação, que é realizado em torres nas refinarias. O fracionamento ocorre por meio da diferença dos pontos de ebulição de cada produto, onde os derivados evaporam e condensam, podendo, assim, serem separados (TONIN, 2003). A destilação é iniciada com o bombeamento do petróleo cru de forma contínua, passando primeiramente pela rede de permutadores de calor. Desse modo, o petróleo é aquecido enquanto passa pela rede, ao mesmo tempo em que resfria os derivados que estão deixando a torre de destilação, o que possibilita

chegar na fornalha com a temperatura elevada, e amenizar o consumo de energia para ser fracionado. Logo, a utilização de permutadores de calor é uma técnica adotada para recuperar boa parte da energia do processo de destilação e amenizar o consumo da planta (SILVA, 2013), onde a ausência destes equipamentos tornaria necessário utilizar fornos maiores e consumir mais combustível para realizar o aquecimento total da carga.

É recorrente nas refinarias a presença de incrustações nas mais diversas atividades industriais, e os permutadores de calor são um dos equipamentos de processo sujeitos a este problema. A incrustação começa a surgir desde o momento em que o permutador inicia suas atividades, representando uma resistência à transferência de calor, e com o passar do tempo, reduz a performance térmica destes equipamentos. Além de obstruir a passagem impedindo que o petróleo chegue na torre de destilação com a vazão esperada (sendo necessária uma maior potência de bombeamento), as incrustações ocasionam uma maior queima de combustível nos fornos, devido ao petróleo chegar com a temperatura abaixo da que poderia atingir com os permutadores limpos (MADI; NEGRÃO; MASSOQUETI, 2004), impactando negativamente nos custos de operação.

As incrustações nos permutadores causam grandes transtornos para as indústrias, ocasionando a obstrução parcial ou total dos tubos, diminuindo ou bloqueando a passagem do petróleo; redução do período de operação do permutador, sendo necessário parar as atividades para remover as incrustações; diminuição do desempenho térmico, fazendo com que o petróleo chegue aos fornos com a temperatura abaixo da ideal; redução da qualidade ambiental, em que o aumento de combustível consumido pelos fornos implica em uma maior quantidade de gases poluentes lançados na atmosfera; e paradas não planejadas, onde em certas ocasiões a planta precisará parar para realizar a limpeza dos permutadores, induzindo a uma perda de produção e diminuição nos lucros da indústria (TONIN, 2003).

Em virtude dos problemas decorrentes devido as incrustações, a limpeza dos permutadores de calor se faz necessária para manter o bom funcionamento do sistema como um todo que realiza o refino do petróleo. Uma vez incrustados, os permutadores são transferidos do local de operação para uma unidade de lavagem. Vários métodos vem sendo utilizados para efetuar a remoção da incrustação presente nesses equipamentos, entre eles podemos citar o jateamento de água em alta pressão, a utilização de produtos químicos, e o uso de artefatos de limpeza que são postos em contato direto com a superfície de extrato para remover as incrustações (RIOS, 2020). Por muitas vezes é feita a combinação dos dois últimos para realizar a limpeza, onde o resultado obtido é melhorado. Porém, esses métodos geralmente demandam muito tempo para serem realizados, exigem um alto custo de operação, e podem danificar o equipamento a ser limpo.

A utilização do ultrassom é uma excelente alternativa para realizar a limpeza dos permutadores, onde as incrustações são removidas devido ao fenômeno da cavitação acústica. Estando

Figura 22 – Limpeza ultrassônica de um permutador de calor.

(a) Incrustações no permutador. (b) Permutador sendo imerso no tanque de limpeza. (c) Resultado após o processo de limpeza.



Fonte: Modificado de Kieser *et al.* (2011).

imerso em um tanque com água, a pressão acústica das ondas ultrassônicas geradas pelo transdutor leva à formação das bolhas de cavitação. Essas bolhas crescem e colapsam rapidamente, formando microjatos e ondas de choque. Uma vez que esses efeitos atingem a superfície, são capazes de desestabilizar os resíduos e removê-los do local. Ter implosões em toda a superfície da peça garante a limpeza em todas as regiões, incluindo as de difícil acesso (SCHULZ; KIESER, 2019). Em equipamentos com geometria complexa, isso pode levar a grandes ganhos na qualidade da limpeza e, conseqüentemente, no desempenho operacional. Observamos na Figura 22 o processo de limpeza de um permutador de calor do tipo casco e tubo. Notamos na Figura 22(a) uma grande quantidade de incrustações, na 22(b) o permutador sendo transferido para o tanque de limpeza, e na 22(c) o resultado da limpeza usando o método ultrassônico, em que foram removidos mais de 1000 kg de incrustações (KIESER *et al.*, 2011).

## 6 SIMULAÇÕES NUMÉRICAS

Nos últimos anos, simulações numéricas vem se tornando uma ferramenta de trabalho indispensável para os pesquisadores das mais diversas áreas. As simulações possibilitam desenvolver um protótipo virtual do produto de interesse, onde os modelos podem ser construídos utilizando softwares comerciais. Dependendo do software utilizado, tais simulações podem ser feitas com alta fidelidade se comparadas ao modelo real. Dentre os softwares disponibilizados com esse propósito, foi escolhido o COMSOL Multiphysics<sup>®</sup> para realizar as simulações numéricas dos estudos descritos neste trabalho, devido a oferecer uma interface interativa e possibilitar acoplar várias físicas em um único modelo.

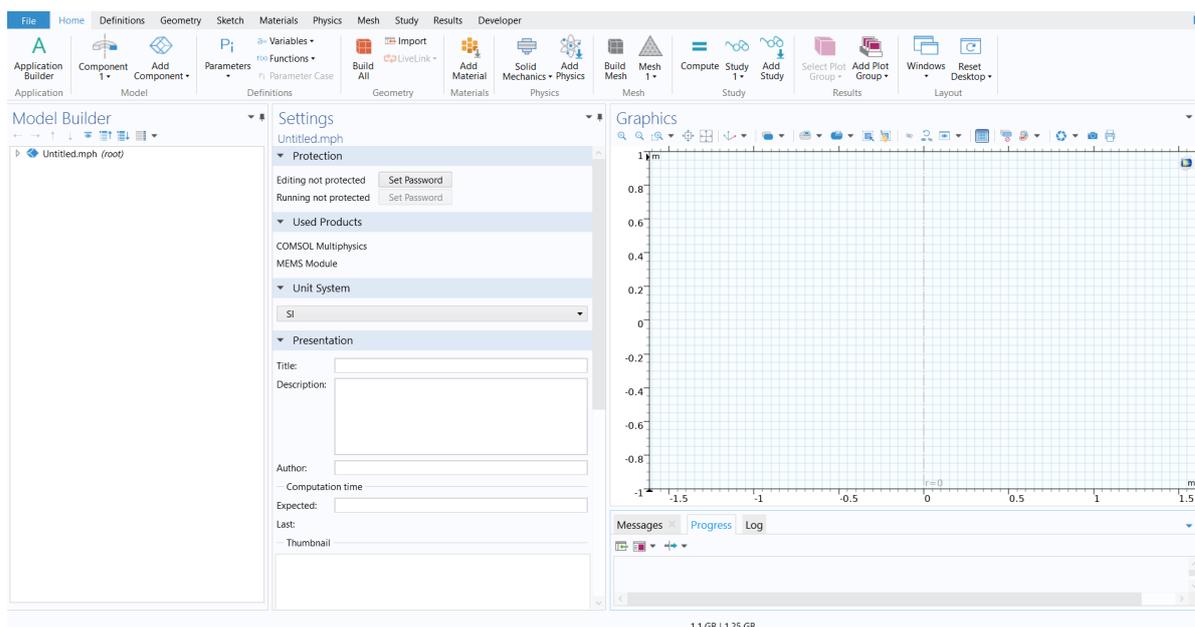
### 6.1 COMSOL Multiphysics<sup>®</sup>

O software comercial COMSOL Multiphysics<sup>®</sup> é desenvolvido para efetuar modelagens e simulações numéricas, além de analisar problemas abordados pelas diferentes áreas das ciências e engenharias. Tal software é baseado no Método de Elementos Finitos (MEF) para a realização de seus cálculos computacionais, que consiste em discretizar e subdividir o domínio do problema, seja ele simples ou complexo, em elementos infinitesimais, onde o programa compila e soluciona Equações Diferenciais Parciais (EDP) para cada elemento criado, em que todos os cálculos da simulação são somados com o intuito de obter uma convergência para o problema.

As áreas de trabalho disponibilizadas pelo COMSOL são amplas e diversificadas, o que proporciona uma abrangência simulacional considerável. Para executar a simulação, o usuário deve selecionar a Física que está envolvida no problema. As Físicas são distribuídas em módulos, e o software possibilita acoplar várias Físicas em um único problema, sendo ideal para realizar simulações que envolvem diferentes Físicas. De um modo geral, a tela de trabalho da simulação (Figura 23) é englobada na *Graphical User Interface* (GUI), sendo distribuída em três seções: a *Model Builder*, que é onde ficam organizados os blocos da simulação (geometria, materiais, condições de contorno, estudos, resultados, entre outros), que também são conhecidos como árvores ou nós, onde o usuário tem liberdade de adicionar ou remover cada item de acordo com sua demanda; a de configurações dos blocos, onde é possível configurá-los e editá-los; e a *Graphics*, que se dedica em apresentar o trabalho executado durante a simulação.

O principal objetivo deste trabalho é realizar simulações numéricas de um transdutor de Langevin operando com frequência de ressonância em 20 kHz, acoplado a amplificadores mecânicos com diferentes geometrias, e imerso em um tanque com água, analisando a curva de impedância elétrica, do deslocamento mecânico, e a distribuição de pressão acústica. Além disso, também serão incluídos e analisados os efeitos de amortecimento mecânico do transdutor. Várias ferramentas do software foram utilizadas para executar as simulações desse dispositivo, e todas as etapas para realizar a modelagem, como a definição da dimensão espacial, desenho da

Figura 23 – Tela de trabalho inicial do COMSOL e suas seções.



Fonte: O autor (2022).

geometria, seleção dos materiais, físicas e estudos, serão discutidas no decorrer do capítulo de forma detalhada.

## 6.2 MODELAGEM NUMÉRICA

A modelagem é iniciada com a escolha da geometria utilizada para descrever o problema. No entanto, essa escolha está relacionada com as simetrias que o problema possui, permitindo ao usuário selecionar entre as dimensões do espaço de modelagem 3D, 2D Axisymmetric, 2D, entre outros, de acordo com a Figura 24.

Figura 24 – Dimensões espaciais disponibilizadas pelo COMSOL.



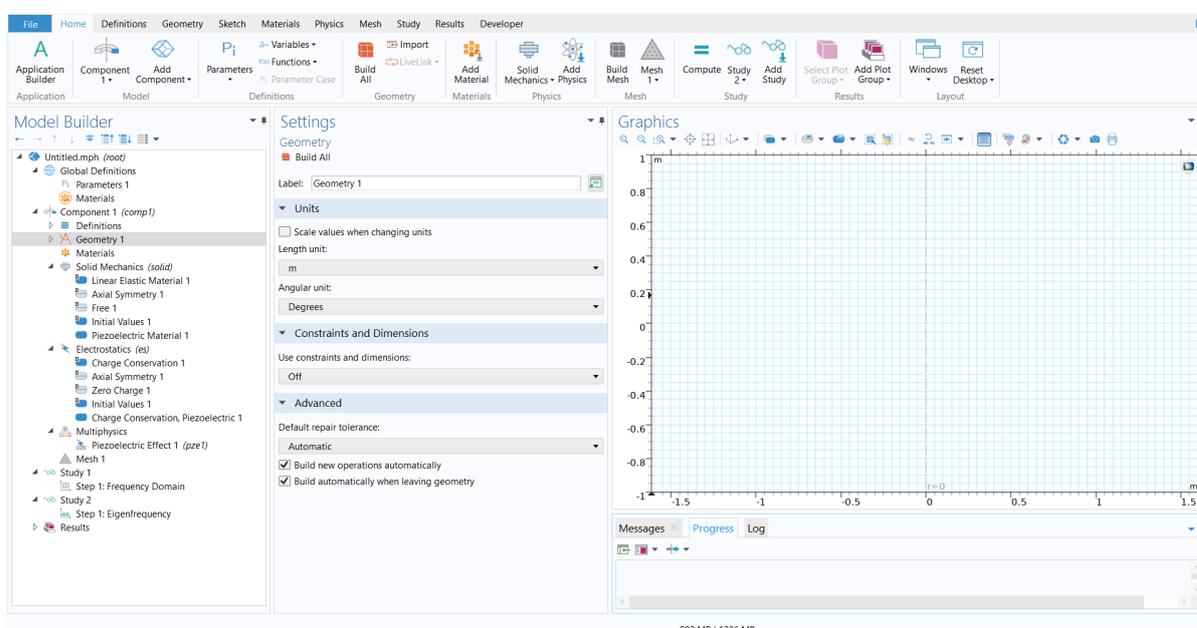
Fonte: O autor (2022).

O poder computacional exigido para realizar o processamento das simulações aumenta de acordo com a expansão das dimensões espaciais. Os transdutores de Langevin possuem simetria radial, então podemos fazer o desenho da geometria do transdutor em um determinado plano utilizando a dimensão 2D Axisymmetric, que permite rotacionar o plano em torno de um eixo de simetria para que sejam obtidos resultados em três dimensões. Essa dimensão necessita de um poder computacional bem inferior se comparada a 3D, permitindo que as simulações sejam

executadas em menos tempo, além de facilitar a realização do desenho da geometria, onde em três dimensões se torna mais complexo.

Definida a dimensão espacial, a próxima etapa é selecionar as físicas envolvidas no problema. Transdutores de Langevin são dispositivos com capacidade de transformar energia elétrica em energia mecânica, mais especificamente, pulsos elétricos em ondas sonoras. Assim, precisamos de físicas que supram essa interação elétrica e mecânica do transdutor. Dentre a gama de físicas disponibilizadas pelo COMSOL, foram escolhidas a *Solid Mechanics*, que possibilita estudar a estrutura mecânica do transdutor, e a *Electrostatics*, que permite analisar a parte elétrica do dispositivo, aplicando o circuito elétrico nas cerâmicas piezoelétricas, sendo que o acoplamento das duas atende aos requisitos para realizar a simulação.

Figura 25 – Definições iniciais da simulação na tela de trabalho do software.



Fonte: O autor (2022).

Em seguida, foi determinado o tipo de estudo que seria feito durante a simulação. O software disponibiliza vários tipos de estudos no módulo *Study*, e como nossos estudos envolvem analisar a frequência de ressonância do transdutor, o *Frequency Domain* e o *Eigenfrequency* foram os escolhidos. O primeiro se dedica em calcular a resposta de um sistema submetido a uma excitação harmônica. O circuito elétrico criado na física de *Electrostatics* faz com que sinais elétricos sejam enviados para as cerâmicas em um determinado intervalo de frequências definido pelo usuário. O *Frequency Domain* analisa cada um desses sinais, possibilitando visualizar a impedância elétrica do transdutor em função da frequência, sendo possível, assim, obter a frequência de ressonância. Já o segundo, no caso de *Eigenfrequency*, faz o estudo das frequências naturais de vibração das estruturas, nos permitindo determinar a frequência de ressonância do objeto analisado. O que foi discutido até o momento pode ser observado na Figura 25, onde a linha tracejada na janela *Graphics* representa o eixo de simetria do problema.

Para facilitar o processo de modelagem, toda a simulação foi parametrizada, onde os parâmetros contendo todas as informações necessárias para modelar o transdutor foram adicionados no nó *Global Definitions*, na seção *Parameters*. A Tabela 1 apresenta os parâmetros utilizados para realizar a modelagem do transdutor de Langevin deste trabalho, operando com frequência de ressonância em 20 kHz. Os demais parâmetros (dos amplificadores mecânicos, por exemplo), necessários para executar cada simulação deste trabalho estão disponíveis em tabelas no Apêndice A.

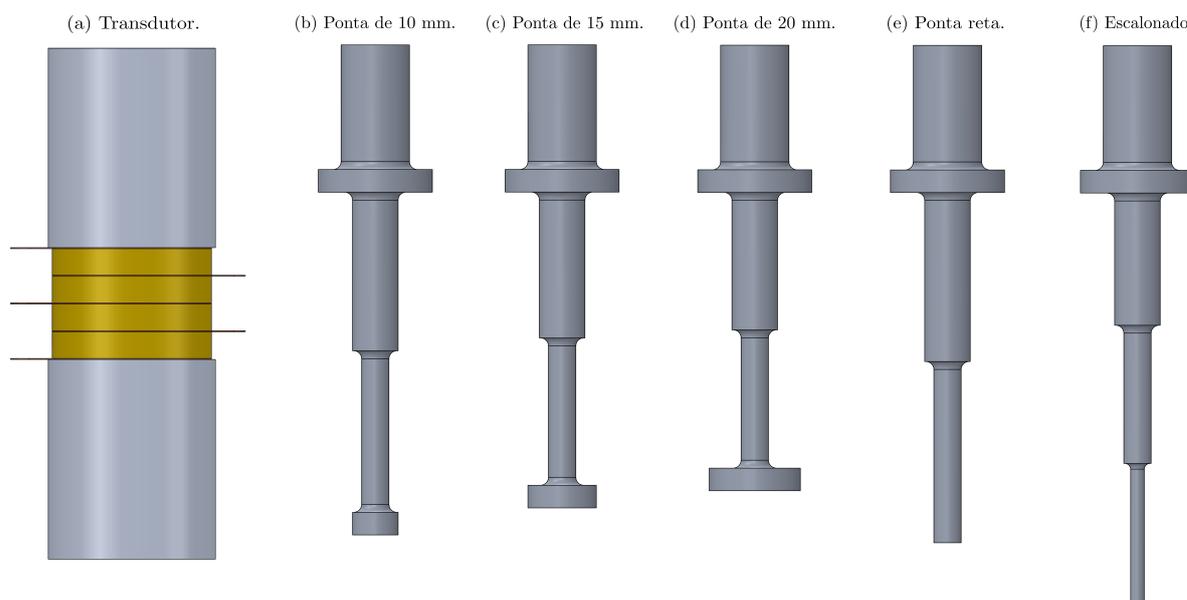
Tabela 1 – Parâmetros utilizados na modelagem do transdutor de Langevin.

Parâmetro	Expressão	Descrição
h1	47,6 mm	Altura da massa metálica inferior
h2	47,5 mm	Altura externa da massa metálica superior
h3	35,5 mm	Altura interna da massa metálica superior
hcp	10,0 mm	Altura da cabeça do parafuso
hp	$h1 + h3 + 4*ec + ea$	Altura do corpo do parafuso
ec	6,35 mm	Espessura da cerâmica
ea	2,00 mm	Espessura da arruela
r1	20,0 mm	Raio do transdutor
r2	10,0 mm	Raio externo da massa metálica superior
r3	5,10 mm	Raio interno da massa metálica superior
ric	6,35 mm	Raio interno da cerâmica
rec	19,05 mm	Raio externo da cerâmica
rc	$rec - ric$	Raio da cerâmica
rp	5,00 mm	Raio do corpo do parafuso
rcp	8,00 mm	Raio da cabeça do parafuso
ria	5,10 mm	Raio interno da arruela
rea	9,50 mm	Raio externo da arruela
ra	$rea - ria$	Raio da arruela

Fonte: O autor (2022).

O transdutor de Langevin modelado neste trabalho conta com 4 cerâmicas piezoelétricas, com o intuito de ser produzida uma potência maior quando estiver operando, e será acoplado a 5 amplificadores mecânicos com diferentes geometrias, para analisarmos a influência de cada um no processo de cavitação acústica. É possível observar na Figura 26 uma visão geral do trabalho, apresentando o transdutor e os amplificadores mecânicos que foram abordados e modelados em nossos estudos.

Figura 26 – Visão geral do trabalho.



Fonte: O autor (2022).

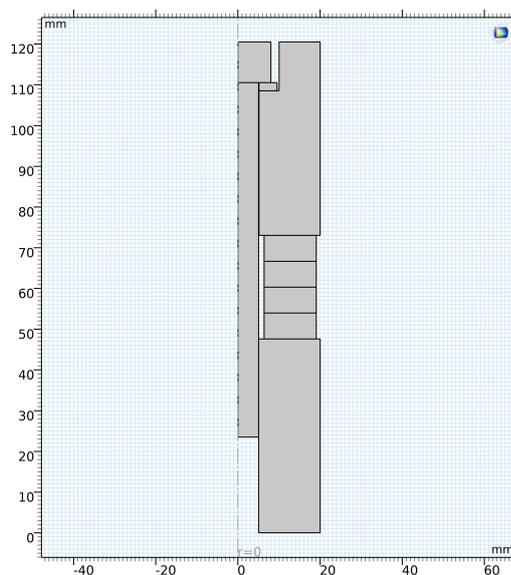
Analisando os amplificadores mecânicos na Figura 26, é notório que a ideia geral foi manter o corpo do amplificador e alterar a geometria da ponta. O amplificador da Figura 26(b) possui a ponta com raio de 10 mm, o 26(c) raio de 15 mm, o 26(d) raio de 20 mm, o 26(e) a ponta reta, e o 26(f) é escalonado. Devido ao processo de modelagem ser idêntico para todos, alterando apenas as respectivas medidas geométricas, vamos utilizar como exemplo o amplificador da Figura 26(b) para detalhar todo o processo de modelagem, iniciando com o desenho da geometria no software. Desse modo, os demais amplificadores voltarão a ser discutidos no próximo capítulo, que será focado em apresentar os resultados obtidos nas simulações.

### 6.2.1 Geometria

Para realizar o desenho das estruturas que serão estudadas, o COMSOL disponibiliza o nó *Geometry*, onde é possível desenhar diversas formas geométricas, desde as mais simples, como retângulos, círculos, esferas e cilindros, até figuras mais elaboradas, como polígonos e curvas. Muitas dessas formas geométricas já são disponibilizadas pelo software, porém é possível importar arquivos no formato CAD para geometria e realizar a modelagem. Devido a simplicidade para desenhar os objetos de estudo deste trabalho, no caso o transdutor de Langevin, os amplificadores mecânicos e o tanque, serão utilizadas as ferramentas que o próprio software oferta. Como foi dito anteriormente, nosso problema possui simetria radial, o que nos permite desenhar a geometria em 2D e rotacionar o desenho em torno do eixo de simetria, onde obtemos resultados em 3D. Esse método ameniza o tempo de processamento e o poder computacional necessário para realizar a simulação.

Inicialmente foi feito somente o desenho do transdutor, sem o amplificador mecânico. O ideal é que antes de acoplar o amplificador, o transdutor já esteja na frequência de ressonância desejada, no caso em 20 kHz. A frequência de ressonância do transdutor está relacionada com seu comprimento, que é  $\lambda/2$ . Logo, quanto mais massa o transdutor possuir, menor será sua frequência, e vice versa. As cerâmicas piezoelétricas escolhidas para o transdutor possuem dimensões específicas que não passam por alterações, com geometria em formato de anel, diâmetro interno de 12,70 mm, diâmetro externo de 38,10 mm e espessura 6,35 mm. Assim, modificamos apenas as massas metálicas do transdutor, aumentando ou diminuindo seu comprimento conforme a necessidade das simulações. O raio das massas metálicas foi mantido em 20 mm durante todo o processo, para que fique próximo do raio das cerâmicas (19,05 mm), o que facilita o processo de construção em uma eventual usinagem, e mantém a harmonia geométrica do dispositivo. A Figura 27 apresenta o desenho realizado no COMSOL da geometria do transdutor.

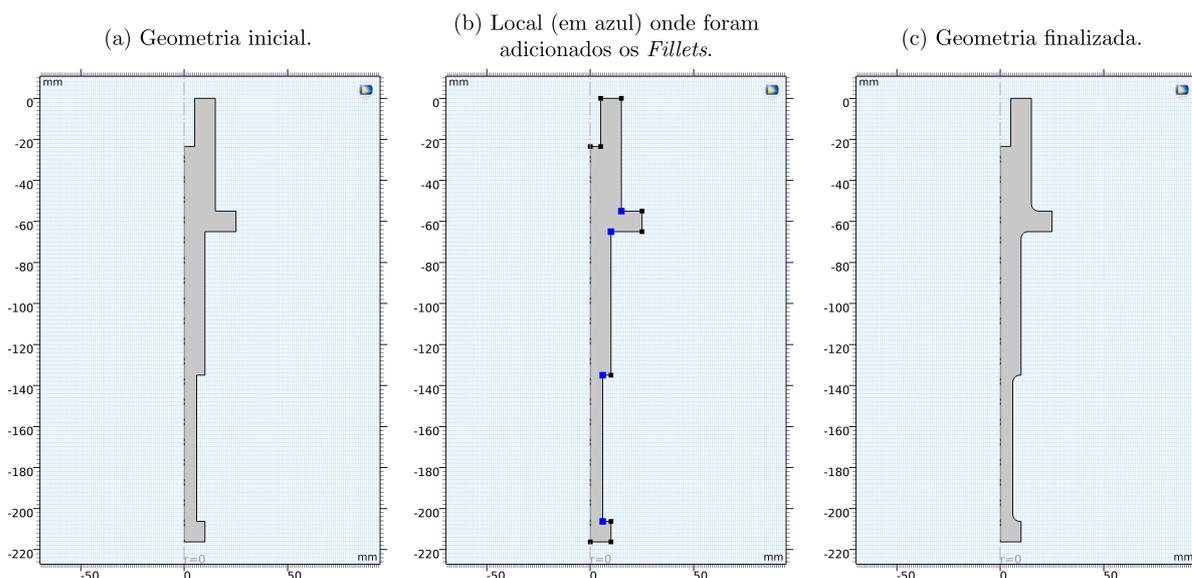
Figura 27 – Geometria do transdutor de Langevin.



Fonte: O autor (2022).

Após o transdutor atingir a frequência de 20 kHz, foi feito o desenho da geometria do amplificador, que também possui comprimento igual a  $\lambda/2$ . O amplificador é uma peça metálica com área de seção menor que o diâmetro do transdutor. Assim, fizemos reduções nos raios ao longo do seu corpo, com o intuito de obter melhores resultados de deslocamento mecânico. Para deixar o amplificador com frequência de 20 kHz, foram feitos os mesmos procedimentos de modelagem do transdutor, modificando seu comprimento em várias simulações até atingir a frequência desejada. Em determinados pontos do amplificador foram adicionados *Fillets*, que criam uma curva nesses locais de acordo com o raio definido pelo usuário, e melhora a propagação da energia pelo corpo do amplificador. A Figura 28(a) apresenta o desenho inicial do amplificador, a 28(b) os locais onde foram adicionados os *Fillets*, e a 28(c) o amplificador com sua geometria finalizada.

Figura 28 – Geometria do amplificador mecânico.

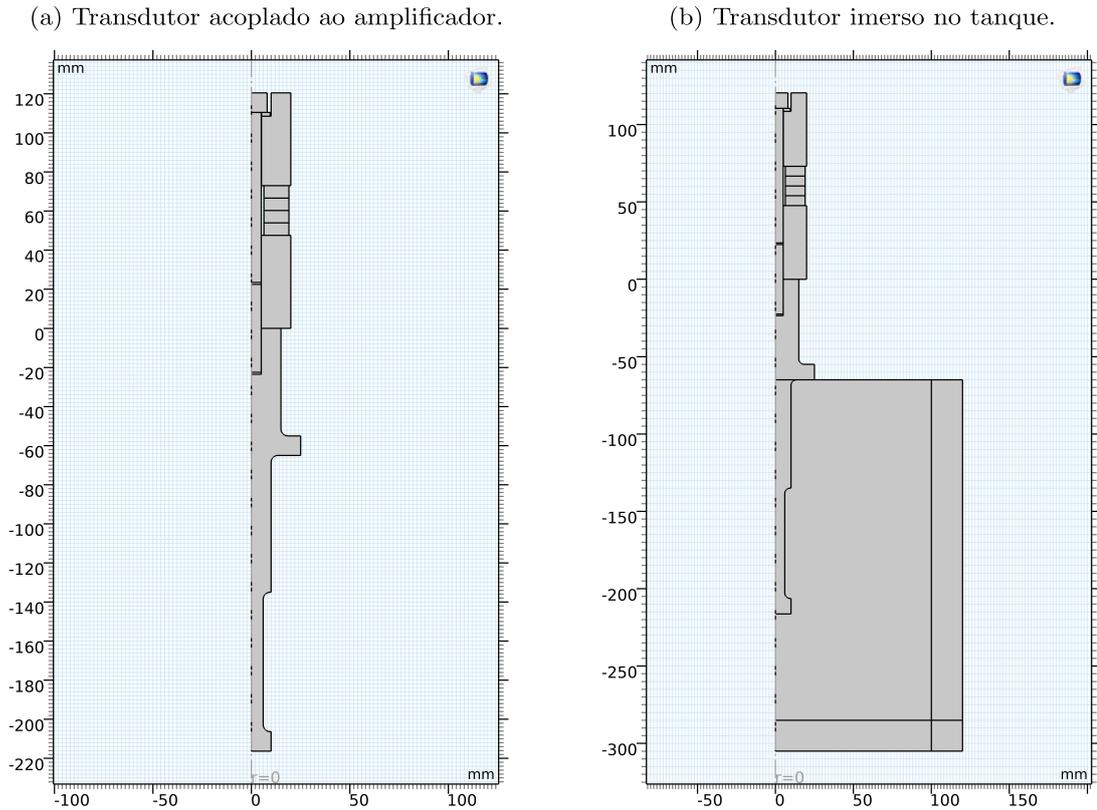


Fonte: O autor (2022).

A união do transdutor com o amplificador ocorreu por meio de uma parafuso prisioneiro, devido ao parafuso de tensionamento utilizado no transdutor possuir dimensões específicas, assim como as cerâmicas, o que não permite utilizá-lo para acoplar o amplificador. Feito o acoplamento geométrico, foram realizadas novas simulações para conferir se todo o conjunto estava operando com frequência de ressonância em 20 kHz. A Figura 29(a) apresenta o desenho da geometria do transdutor acoplado ao amplificador mecânico, estando unidos pelo parafuso prisioneiro. Notamos também na Figura 29(a) que o comprimento do amplificador é maior que o do transdutor, porém ambos possuem comprimento igual a  $\lambda/2$ . O motivo disso acontecer é que a frequência de ressonância, além de depender do comprimento do objeto, depende também de seu volume. Como a área de secção do corpo do amplificador é menor em relação a do transdutor, faz com que seu comprimento se torne maior, para que o volume seja compensado.

O dispositivo será imerso em um tanque para avaliarmos a distribuição de pressão acústica que está sendo produzida, e devido a isso, foi adicionada uma flange na geometria do amplificador, pois é nela que fazemos o acoplamento do transdutor com o tanque. Assim como vários outros componentes do transdutor, o tanque foi desenhado no formato de retângulo utilizando a ferramenta *Rectangle*, disponibilizada pelo software. Além disso, também foi feito o desenho de uma borda na base e na lateral direita do tanque com 20 mm de espessura, que atua como uma camada absorvedora na simulação, onde será dada uma melhor explicação sobre sua função ao longo deste capítulo. Na Figura 29(b) é possível observar a geometria completa do dispositivo a ser simulado, com o transdutor acoplado ao amplificador e imerso em um tanque com água, que conta com um volume de aproximadamente 11 L. Finalizado o desenho geométrico, vamos para a próxima etapa da simulação, que é onde definimos os materiais utilizados em cada objeto desenhado.

Figura 29 – Transdutor de Langevin acoplado ao amplificador mecânico.



Fonte: O autor (2022).

### 6.2.2 Materiais

Os materiais utilizados em cada componente da simulação podem ser escolhidos e importados no nó *Materials*, que é a biblioteca de materiais disponibilizada pelo próprio software. Caso o material necessário não esteja disponível no COMSOL, é possível adicioná-lo manualmente. Para realizar as simulações, foi definido que as 4 cerâmicas piezoelétricas do transdutor são de titanato zirconato de chumbo (PZT-4), que de fato é o material mais utilizado para a construção de transdutores (GALLEGO-JUAREZ, 1989); as massas metálicas e o amplificador mecânico são de alumínio; e os parafusos de tensionamento e prisioneiro foi utilizado o aço inoxidável. O tanque, como mencionado anteriormente, será composto por água.

Tabela 2 – Fatores de perda dos materiais.

Material	Fator de Perda ( $\eta$ )
Alumínio	$1,31 \times 10^{-3}$
Aço	$4,17 \times 10^{-4}$
PZT-4	$1,32 \times 10^{-3}$

Fonte: O autor (2022).

Todos os materiais utilizados na simulação foram escolhidos a partir de uma análise, avaliando o melhor desempenho eletromecânico durante o funcionamento do transdutor. As massas metálicas sendo de alumínio ajudam na dissipação de calor (é válido lembrar que o transdutor aquece quando está funcionando), as cerâmicas piezoelétricas de PZT-4 realizam o efeito piezoelétrico com uma ótima eficiência, já o parafuso que sofre uma grande tensão mecânica, é necessário utilizar um material resistente para evitar possíveis rupturas, e o aço é um bom material para cumprir esse propósito.

Um parâmetro importante a ser mencionado são os fatores de perda ( $\eta$ ) por amortecimento dos materiais. Cada material possui seu fator de perda específico, e o dos materiais utilizados no transdutor são os responsáveis por diminuir a amplitude de vibração quando o dispositivo estiver operando, ao atenuar as ondas que se propagam na estrutura. Esse tema de amortecimento voltará a ser discutido mais adiante, no decorrer do capítulo. A Tabela 2 apresenta os fatores de perda dos materiais utilizados na simulação, que foram obtidos a partir de uma busca literária (ONO, 2020), (KARAFI; KAMALI, 2021).

### 6.2.3 Físicas

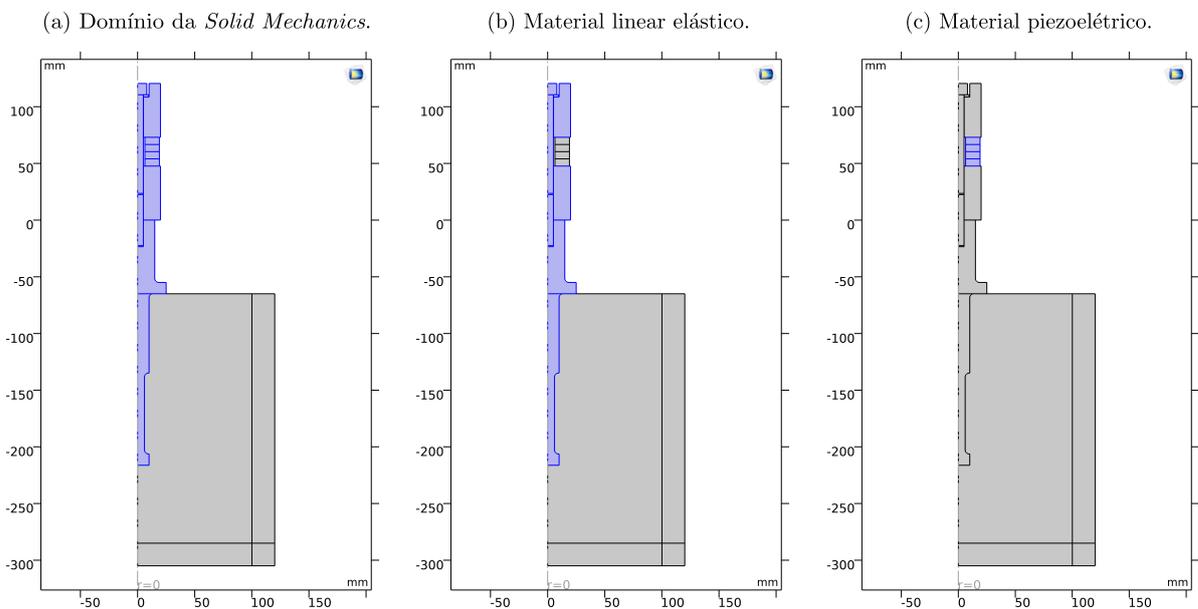
Escolhidos os materiais a serem utilizados na simulação, foram definidas as Físicas do problema. Para englobar todos os efeitos pertinentes ao funcionamento do transdutor, utilizamos os módulos *Solid Mechanics*, que nos permite analisar os efeitos causados nas partes sólido elásticas do dispositivo; *Electrostatics*, sendo responsável pela aplicação de uma corrente alternada (AC) nos terminais das cerâmicas; e o *Pressure Acoustics*, que é utilizado para descrever a propagação das ondas no tanque produzidas pelo transdutor. Além disso, para criar a absorção nas bordas do tanque, foi utilizada a ferramenta *Perfectly Matched Layer*. Vejamos com mais detalhes cada um desses módulos.

#### 6.2.3.1 *Solid Mechanics*

Essa é uma das físicas essenciais em nossa simulação, que se dedica em analisar o comportamento de uma estrutura sólida ao ser perturbada mecanicamente. A Física de *Solid Mechanics* é baseada na solução de equações de movimento e dinâmica de corpos rígidos para descrever a perturbação do objeto sólido. Por meio dessa Física é possível obter a descrição de tensões, deslocamentos e deformações causadas no objeto ao ser perturbado (COMSOL, 2021). Adicionada a Física na árvore de trabalho do COMSOL, é necessário indicar ao software quais objetos da geometria possuem estrutura sólida, que no caso são o transdutor e o amplificador mecânico. Na Figura 30 observamos os objetos selecionados na geometria (destacados em azul) a serem estudados pela Física de *Solid Mechanics*.

Estamos trabalhando com dois tipos de materiais sólidos: os piezoelétricos, no caso as cerâmicas PZT-4, e os lineares elásticos, que são todos os demais componentes da geometria do transdutor e amplificador. Esses materiais ao serem perturbados se comportam de forma diferente, ou seja, cada um tem o seu tipo específico de deformação, deslocamento e tensão. Devido a isso, é preciso indicar ao COMSOL quais são os materiais lineares elásticos e os piezoelétricos. A Física de *Solid Mechanics* conta com alguns nós já predefinidos, e dentre eles temos o *Linear Elastic Material*, que se dedica em analisar os materiais lineares elásticos. Já para descrever o comportamento dos materiais piezoelétricos, é preciso criar o nó *Piezoelectric Material*, e assim o software irá analisá-lo de forma adequada durante a simulação. Na Figura 30(a) temos a distribuição geral da *Solid Mechanics*, na 30(b) a seleção dos materiais lineares elásticos, e na 30(c) é destacado o material piezoelétrico.

Figura 30 – Domínio da *Solid Mechanics* na geometria.



Fonte: O autor (2022).

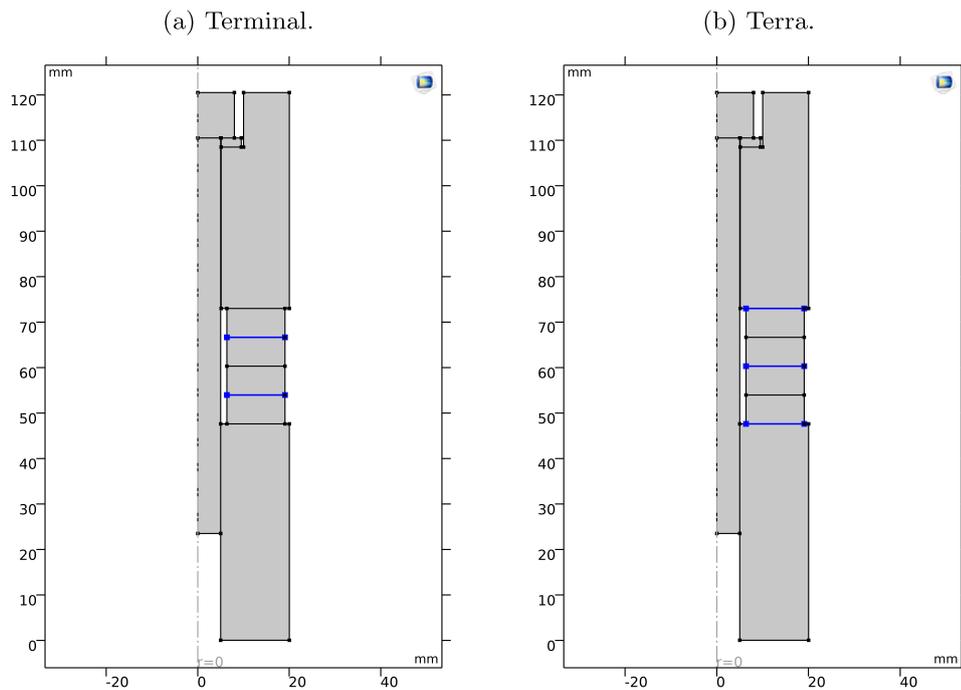
### 6.2.3.2 *Electrostatics*

O transdutor é colocado em funcionamento quando aplicamos um sinal elétrico nos terminais das cerâmicas piezoelétricas, fazendo com que elas sejam induzidas a realizarem o efeito piezoelétrico, transformando energia elétrica em energia mecânica (ondas sonoras). A Física de *Electrostatics* é usada para calcular campos elétricos, campos de deslocamento elétrico e as distribuições de potencial, resolvendo a Lei de Gauss para o campo elétrico em que o potencial elétrico é adotado como variável dependente (COMSOL, 2021). Para que as cerâmicas sejam submetidas ao campo elétrico, é necessário criar um circuito elétrico no transdutor.

Este circuito é criado utilizando dois nós disponibilizados pela *Electrostatics*, que são o *Terminal*, onde aplicamos a diferença de potencial (DDP) nos terminais das cerâmicas, e

o *Ground*, que utilizamos para fazer a ligação em Terra e evitar possíveis choques quando o transdutor estiver operando, assim como em um experimento real. Além disso, a voltagem aplicada foi de 1 V, pois já é suficiente para comprovarmos que o transdutor estar funcionando como esperado. A Figura 31(a) apresenta os terminais das cerâmicas, já a 31(b) os *Grounds*, ou seja, a ligação em Terra (ambos destacados em azul).

Figura 31 – Circuito elétrico do transdutor criado na Física de *Electrostatics*.

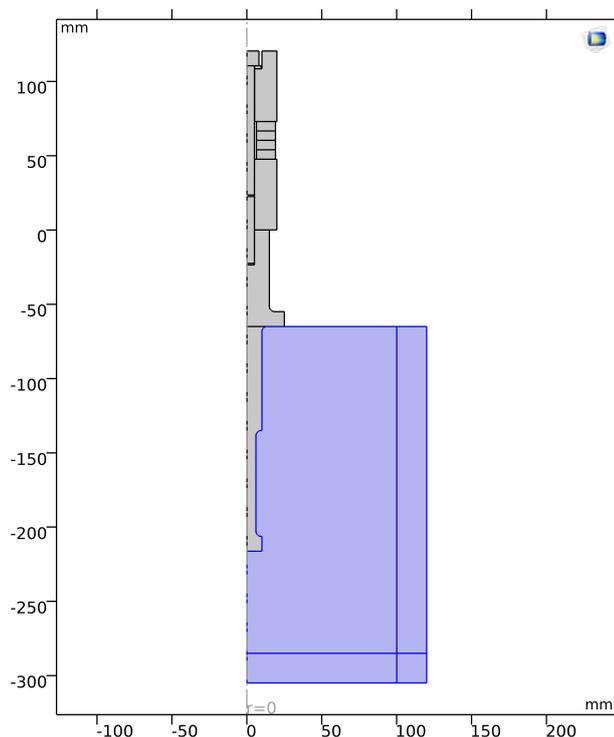


Fonte: O autor (2022).

### 6.2.3.3 *Pressure Acoustics*

A Física de *Pressure Acoustics* se dedica em calcular as variações de pressão durante a propagação de ondas acústicas em fluidos, e a utilizamos na simulação para analisar a distribuição de pressão acústica produzida pelo transdutor ao irradiar a onda ultrassônica no fluido contido no tanque (água). O software realiza esse estudo resolvendo a equação de Helmholtz em relação ao domínio da frequência (COMSOL, 2021). Esta Física é essencial para deduzirmos se os transdutores são aptos ou não para gerarem o fenômeno da cavitação acústica, e assim serem utilizados em nossas aplicações.

O limiar da cavitação é em 100 kPa, e quando os transdutores produzem uma pressão acústica em torno desse valor, temos ótimas chances de se obter microbolhas de vapor implodindo no meio líquido em questão. Devido a Física de *Pressure Acoustics* ser utilizada somente em fluidos, o seu domínio na geometria se restringe aos objetos que estão compostos por água, no caso o tanque acoplado ao transdutor. Na Figura 32 observamos o domínio da *Pressure Acoustics* na geometria da simulação.

Figura 32 – Domínio da *Pressure Acoustics* na geometria.

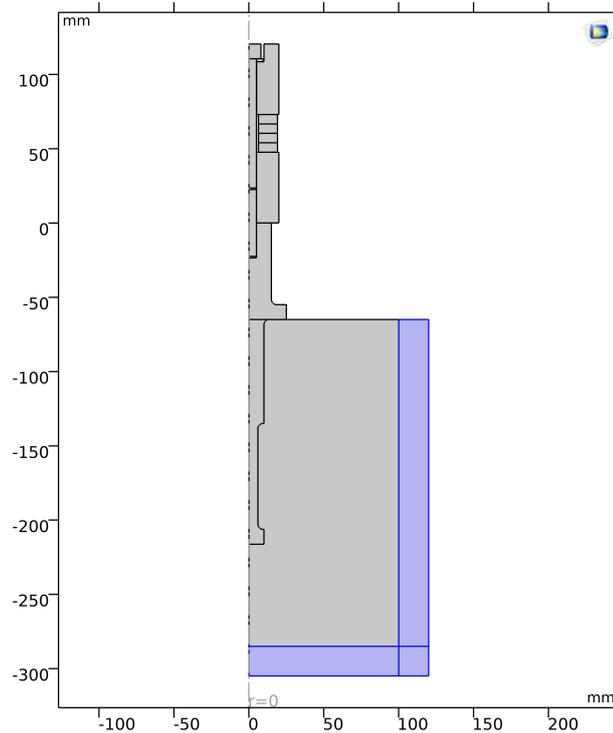
Fonte: O autor (2022).

#### 6.2.3.4 *Perfectly Matched Layer*

Como mencionado anteriormente, o transdutor será imerso em um tanque composto por água para observarmos a distribuição de pressão acústica que está sendo produzida. No entanto, é possível ocorrer a reflexão das ondas sonoras irradiadas pelo transdutor ao atingirem as barreiras que limitam as dimensões do tanque, podendo interferir ou até mesmo modificar os resultados das simulações. A *Perfectly Matched Layer* (PML) é um recurso disponibilizado pelo COMSOL que pode ser compreendido como uma camada idealizadora. Em nossa simulação, a PML tem a função de absorver toda a energia das ondas sonoras que a atingem, evitando, assim, que sejam refletidas (COMSOL, 2021). Na geometria do tanque foi definida uma borda, que é onde iremos aplicá-la.

Utilizar a PML faz com que o software calcule apenas o espalhamento das ondas emitidas pelo transdutor, e não a reflexão causada ao atingirem as bordas do tanque. A PML é uma camada absorvedora artificial, ou seja, não acrescenta massa alguma ao problema analisado, e foi criada dentro do nó *Definitions*, disponibilizado pelo COMSOL na árvore de trabalho. Foi definida que essa ferramenta seja do tipo cilíndrica, devido ao tanque se tornar um cilindro quando rotacionado em torno do eixo de simetria. Sem a PML, estaríamos considerando que as paredes do tanque são totalmente rígidas, ou seja, toda a energia é refletida, e na prática uma parte é refletida e outra é absorvida. A Figura 33 apresenta o domínio da PML na geometria do problema (destacados em azul).

Figura 33 – Domínio da PML na geometria.



Fonte: O autor (2022).

#### 6.2.3.5 Damping

O amortecimento de um sistema dinâmico refere-se a conversão de energia mecânica em energia térmica, ou seja, a energia mecânica é dissipada em calor. A perda de energia mecânica de um sistema vibrante causada devido ao amortecimento provoca a diminuição da amplitude dos deslocamentos vibracionais. No processo de modelagem da respectiva simulação, o amortecimento do transdutor é dado pelo sub-nó *Damping* que é adicionado dentro da Física de *Solid Mechanics*. O *Damping* está relacionado aos fatores de perda ( $\eta$ ), também conhecidos como fatores de amortecimento, que cada material possui, devido a serem esses fatores os responsáveis por diminuir a amplitude de vibração quando o dispositivo estiver operando, ao atenuar as ondas que se propagam na estrutura.

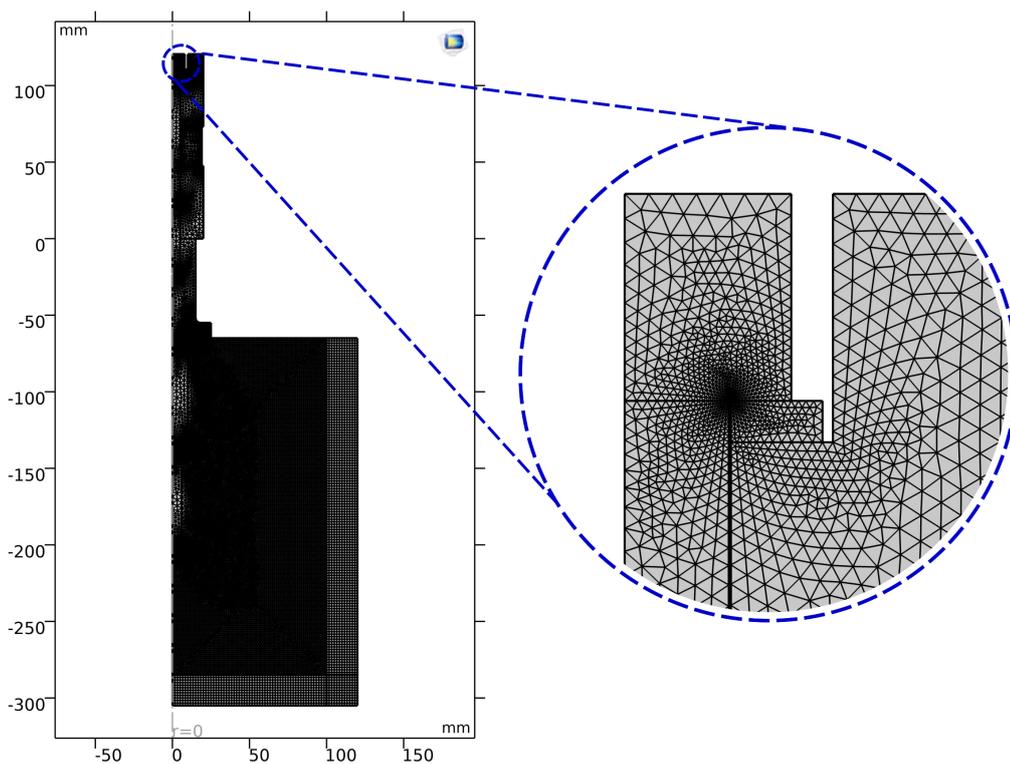
Estamos trabalhando com 3 materiais: alumínio, aço e PZT-4. Como discutido anteriormente, o alumínio e o aço são do tipo *Linear Elastic Material*, e o PZT-4 é um *Piezoelectric Material*. Assim, foi criado um sub-nó *Damping* para cada material utilizado na simulação nos respectivos nós que eles pertencem, e adicionamos os fatores de perda (citados na Tabela 2 da seção 6.2.2 que trata dos materiais), para que seja possível analisar o amortecimento vibracional que o transdutor está produzindo ao ser colocado em funcionamento. Logo, empregar na simulação os efeitos do amortecimento mecânico torna possível analisarmos a atenuação das vibrações do transdutor. Além disso, adicionar o amortecimento faz a simulação se aproximar ainda mais de um experimento real.

#### 6.2.4 Malha

A discretização da geometria construída na simulação é feita utilizando o nó *Mesh*, disponibilizado pelo COMSOL. Esse nó consiste em dividir a geometria do problema em elementos infinitesimais que assumem uma determinada forma geométrica, e o software utiliza-os para aplicar o Método de Elementos Finitos (MEF). Além de estipular se a capacidade computacional será suficiente e a velocidade para a realização da simulação, a discretização do objeto é essencial para a precisão do resultado, uma vez que o tamanho e a quantidade dos elementos são fatores decisivos quando se utiliza o MEF, ou seja, uma maior quantidade de elementos em uma discretização proporciona uma menor taxa de erro nos resultados, o que aumenta a precisão da simulação.

A malha é a junção de todos os elementos discretizados sobre a geometria. Várias ferramentas estão disponíveis dentro do nó *Mesh* para serem utilizadas na etapa de criação da malha. Tais ferramentas disponibilizam diversas formas, combinações e tamanhos de elementos para a simulação, que podem ser configurados. O usuário pode optar entre usar discretizações já predefinidas pelo software, ou criar sua própria discretização de acordo com sua demanda. As discretizações predefinidas vão de *Extremely Coarse* à *Extremely Fine*, e quando mais fina a malha for, mais elementos infinitesimais estarão presentes e melhor será a discretização. No entanto, o poder computacional exigido vai aumentando de acordo com o acréscimo desses elementos na malha.

Figura 34 – Malha utilizada nas simulações.



Fonte: O autor (2022).

Para a criação das malhas deste trabalho, foram utilizadas as ferramentas *Free Triangular* e *Mapped*. A *Free Triangular* faz a discretização da geometria em elementos triangulares, com tamanhos variados. Nas regiões complexas da geometria, como as áreas de limites, curvas e divisórias entre objetos, o software cria elementos menores para melhorar a discretização. Já para as regiões simples, com formato geométrico contínuo, são criados elementos maiores. A ferramenta *Mapped* cria uma malha com objetos quadrangulares. Esse método foi utilizado para criar somente a malha nas bordas do tanque, já que se tratam de uma superfície planar. Devido a essa ferramenta projetar uma malha regular, a análise de absorção da PML é melhorada. Assim, como a malha *Mapped* foi utilizada exclusivamente nas bordas do tanque, a *Free Triangular* foi aplicada no restante da geometria. Observamos na Figura 34 a malha aplicada na geometria da simulação. Foi demarcada uma região complexa da geometria para melhor visualizarmos como o software realiza a discretização nesses locais.

Cada ferramenta conta com o guia *Size*, que é onde definimos os parâmetros dos elementos que discretizam a geometria do problema e formam a malha. Na malha do transdutor e amplificador utilizamos a *Extremely Fine*, que já é predefinida pelo software e realiza uma ótima discretização dos objetos. No tanque estamos utilizando duas ferramentas para discretizar a geometria, e em ambas definimos que o tamanho máximo dos elementos da malha são  $\lambda/45$ , ou seja, a cada valor de comprimento de onda ( $\lambda$ ) na geometria existem no máximo 45 elementos de discretização. Quando estamos estudando a propagação de ondas em um meio líquido, sempre relacionamos a malha com o comprimento de onda da onda que está se propagando no meio. O COMSOL define que para obter uma boa convergência nos resultados, o número mínimo de elementos por comprimento de onda são 6. Assim, utilizando  $\lambda/45$  em nossas simulações obtivemos resultados satisfatórios.

### 6.2.5 Estudo

A definição do estudo que será realizado no problema em questão é a última etapa antes de iniciar as simulações, e é feita no nó *Study*. Como mencionado anteriormente na seção 6.2, foram utilizados neste trabalho os estudos *Frequency Domain* e *Eigenfrequency*. Estamos interessados em determinar a frequência de ressonância do transdutor, e por meio desses dois estudos cumprimos esse propósito. O *Frequency Domain* se dedica em calcular a resposta de um sistema submetido a uma excitação harmônica. O circuito elétrico criado na física de *Electrostatics* faz com que sinais elétricos sejam enviados para os terminais das cerâmicas piezoelétricas em um determinado intervalo de frequências, sendo esse intervalo configurado utilizando o comando *Range*. Como a frequência de ressonância almejada para o dispositivo é 20 kHz, definimos que o intervalo de frequências foi de 18 kHz à 22 kHz, em passos de 0,01 kHz. Com isso, esse comando foi utilizado no seguinte formato: `range(18,0.01,22)`.

Analisando a expressão que esse comando assume, concluímos que o software através do circuito elétrico montado na simulação irá enviar um sinal elétrico para os terminais das cerâmicas do transdutor em saltos de 0,01 kHz, tendo início em 18 kHz e finalizando em 22 kHz. Logo, a cada 0,01 kHz temos um valor de frequência disponível para ser analisado. Devido as dimensões que estipulamos inicialmente para o dispositivo não terem convergido em 20 kHz, foi feito o que chamamos de “ajuste fino” nas dimensões geométricas do transdutor, ou seja, modificamos os parâmetros que usamos para construir a geometria até que toda a estrutura estivesse ressonando em 20 kHz. Vale lembrar que na Tabela 1 estão listados os parâmetros utilizados contendo as dimensões finais definidas após o ajuste fino na geometria dos componentes do transdutor.

Cada estrutura possui a sua frequência natural de vibração, e o *Eigenfrequency* realiza o estudo dessas frequências. Supondo que uma determinada estrutura possua a frequência natural de 25 kHz, se essa estrutura for perturbada, por exemplo, por uma onda sonora de ultrassom com frequência de 25 kHz, todas as moléculas que a constituem irão vibrar no valor de tal frequência, fazendo com que a estrutura seja deformada em seu próprio modo específico. O termo frequência natural de vibração também é conhecido como frequência de ressonância, e quando toda a estrutura está vibrando em sua respectiva frequência natural, dizemos que a mesma está em ressonância. O amplificador mecânico é a estrutura em questão a ser analisada pelo *Eigenfrequency*. Naturalmente, a frequência de ressonância que o amplificador deve assumir é de 20 kHz, para que esteja em harmonia com o transdutor. Novamente fizemos o ajuste fino para que o amplificador atingisse a frequência desejada, e quando isso foi obtido, o acoplamos ao transdutor.

Nossas simulações foram realizadas em duas situações: com o dispositivo operando no ar e imerso em um tanque com água. Em ambas as situações, analisamos o comportamento do dispositivo com e sem os efeitos de amortecimento mecânico, para compreendermos o quanto que o deslocamento vibracional é atenuado a partir da inserção dos fatores de perda dos materiais. Com os dispositivos (transdutor + amplificador) operando em 20 kHz, é necessário caracterizá-los, e assim iniciamos uma nova etapa de estudos. No próximo capítulo serão apresentados os resultados obtidos nas simulações realizadas, bem como as respectivas análises e discussões referentes a cada um deles.

## 7 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A modelagem numérica de um transdutor de Langevin acoplado a 5 amplificadores mecânicos com diferentes geometrias utilizando o método de elementos finitos (MEF) através do software comercial COMSOL Multiphysics® foi estudada neste trabalho. Devido ao problema possuir simetria radial, a geometria foi desenhada em um plano na dimensão espacial 2D Axisymmetric, sendo possível rotacioná-la em torno de um eixo de simetria e obter resultados em três dimensões. Além do poder computacional exigido ser inferior em relação a dimensão 3D, a simulação é executada em menos tempo e os resultados são satisfatórios. Assim, neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos nas simulações numéricas realizadas para o respectivo trabalho.

O transdutor foi modelado para operar com frequência de ressonância em 20 kHz. Uma vez finalizada a etapa de modelagem numérica, discutida na seção 6.2 do capítulo anterior, é necessário caracterizar os dispositivos que foram projetados. Essa caracterização é feita através da análise de algumas grandezas físicas, como a impedância elétrica, o deslocamento mecânico e a distribuição de pressão acústica, visando comprovar que o dispositivo está funcionando com a finalidade a qual foi modelado. Logo, essas são as grandezas físicas que foram plotadas e medidas para caracterizar e demonstrar que o transdutor está na frequência almejada e tendo o deslocamento acessível para gerar uma pressão adequada.

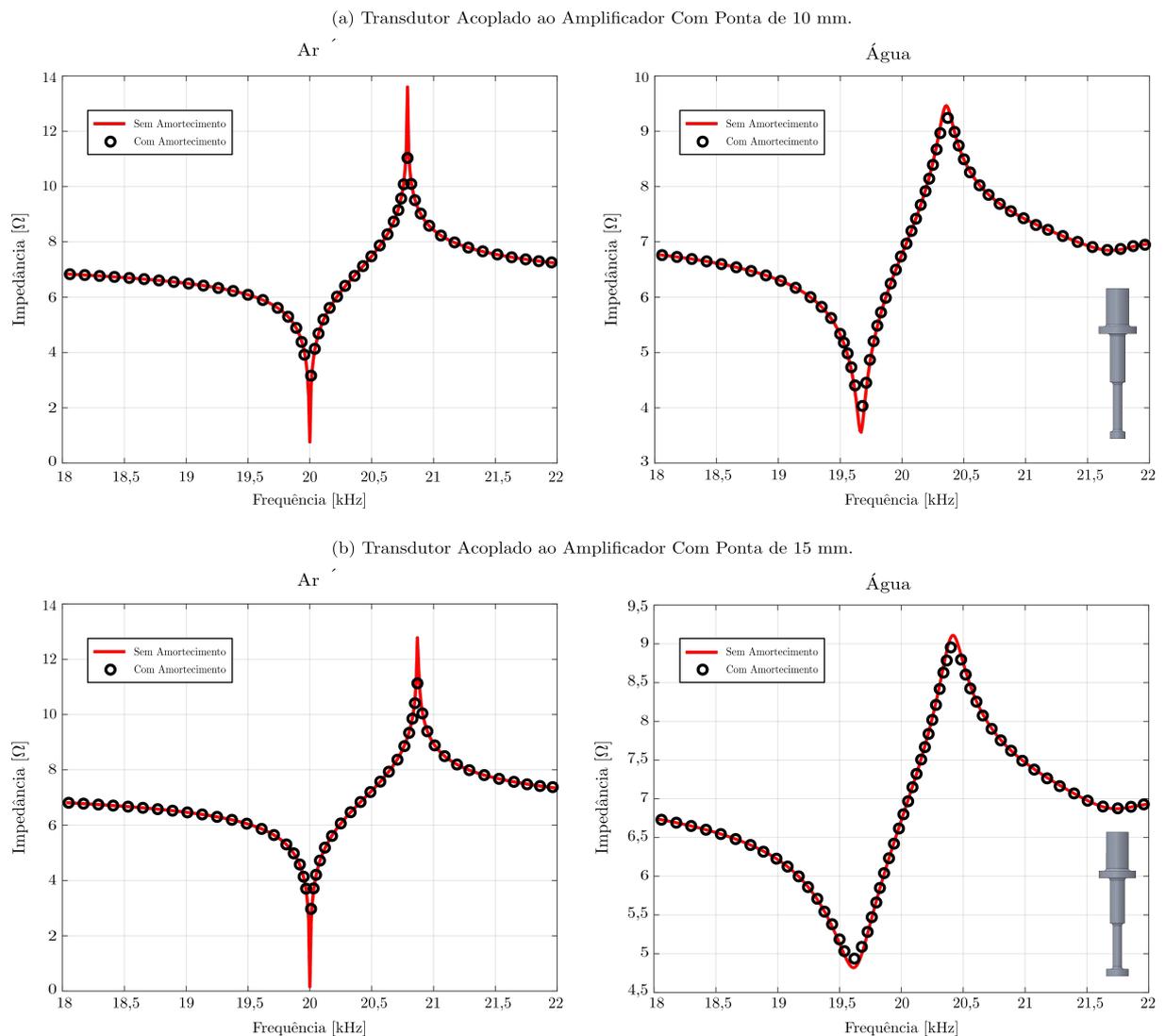
### 7.1 IMPEDÂNCIA ELÉTRICA

De acordo com o que foi discutido na seção 3.4, impedância elétrica ( $Z$ ) é a carga resistiva total de um circuito elétrico em corrente alternada (AC), sendo dada pelo acúmulo de duas grandezas físicas: resistência e reatância. A resistência acontece quando algum componente do circuito causa oposição a passagem da corrente elétrica, transformando a energia gasta em calor. A reatância também atua como uma oposição a passagem da corrente elétrica, porém a energia é gasta formando um campo elétrico (em capacitores) ou magnético (em indutores). É válido lembrar que os transdutores possuem dois grupos de ressonância elétrica, conhecidos como frequências de ressonância e anti-ressonância, e é por meio da impedância elétrica que essas frequências são detectadas, devido a relação que a parte imaginária da impedância (reatância) tem com a frequência da corrente elétrica do circuito em questão.

As curvas de impedância elétrica do transdutor acoplado aos 5 amplificadores mecânicos operando no ar e imerso em um tanque com água estão representadas nas Figuras 35 e 36, nos intervalos de 18 kHz à 22 kHz, onde no ar o transdutor entrou em ressonância à 20 kHz, de acordo com o que foi modelado. Na água a impedância teve seu valor diminuído, devido as moléculas deste meio serem mais densas que as do ar. Ao adicionar massa no transdutor é natural que suas frequências diminuam. Isso se dá por estar sendo acrescentada carga ao sistema, resultando na

diminuição do valor da impedância. Além disso, no COMSOL não é possível plotar a curva de impedância direta, então foi plotado o módulo do inverso da admitância elétrica, que fornece a impedância. São nas frequências de ressonância e anti-ressonância que o transdutor realiza um maior gasto energético quando está operando, sendo nesses pontos que o dispositivo funciona com o máximo de eficiência. O transdutor pode possuir mais de uma frequência de ressonância e anti-ressonância, mas nem todas elas fazem com que o dispositivo ressoe corretamente.

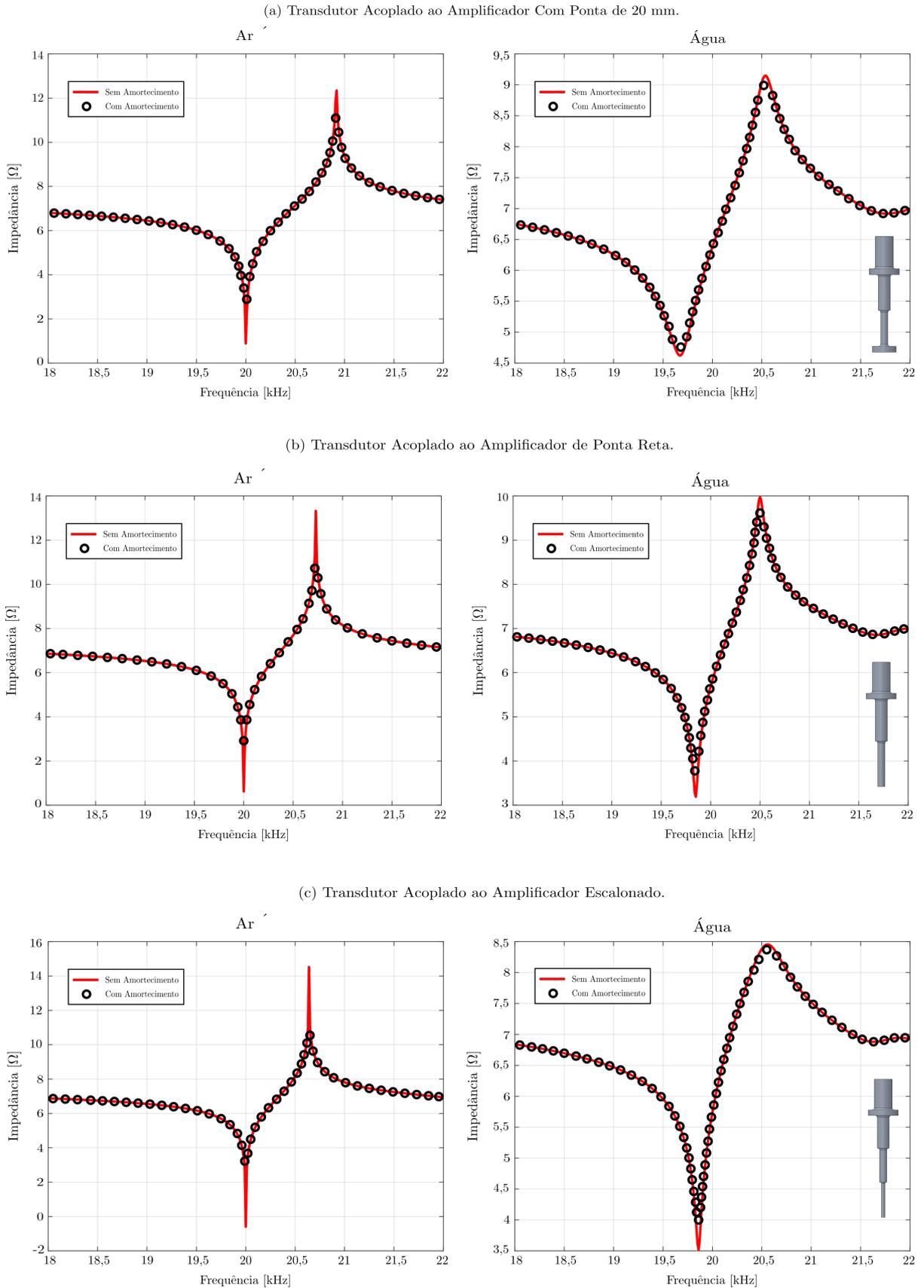
Figura 35 – Gráfico da impedância elétrica do transdutor acoplado aos amplificadores com ponta de 10 mm (a) e 15 mm (b).



Fonte: O autor (2022).

A forma de vibração que o transdutor irá assumir depende da aplicação desejada, ou seja, para gerar, por exemplo, um diferencial de pressão em um meio líquido o funcionamento é em potência máxima (ressonância), já em sistemas de soldagem utilizando ultrassom é indicado operar em velocidade máxima (anti-ressonância), devido a aumentar o aquecimento por atrito dos materiais em questão (MORETTI, 2014).

Figura 36 – Gráfico da impedância elétrica do transdutor acoplado aos amplificadores com ponta de 20 mm (a), ponta reta (b) e escalonado (c).

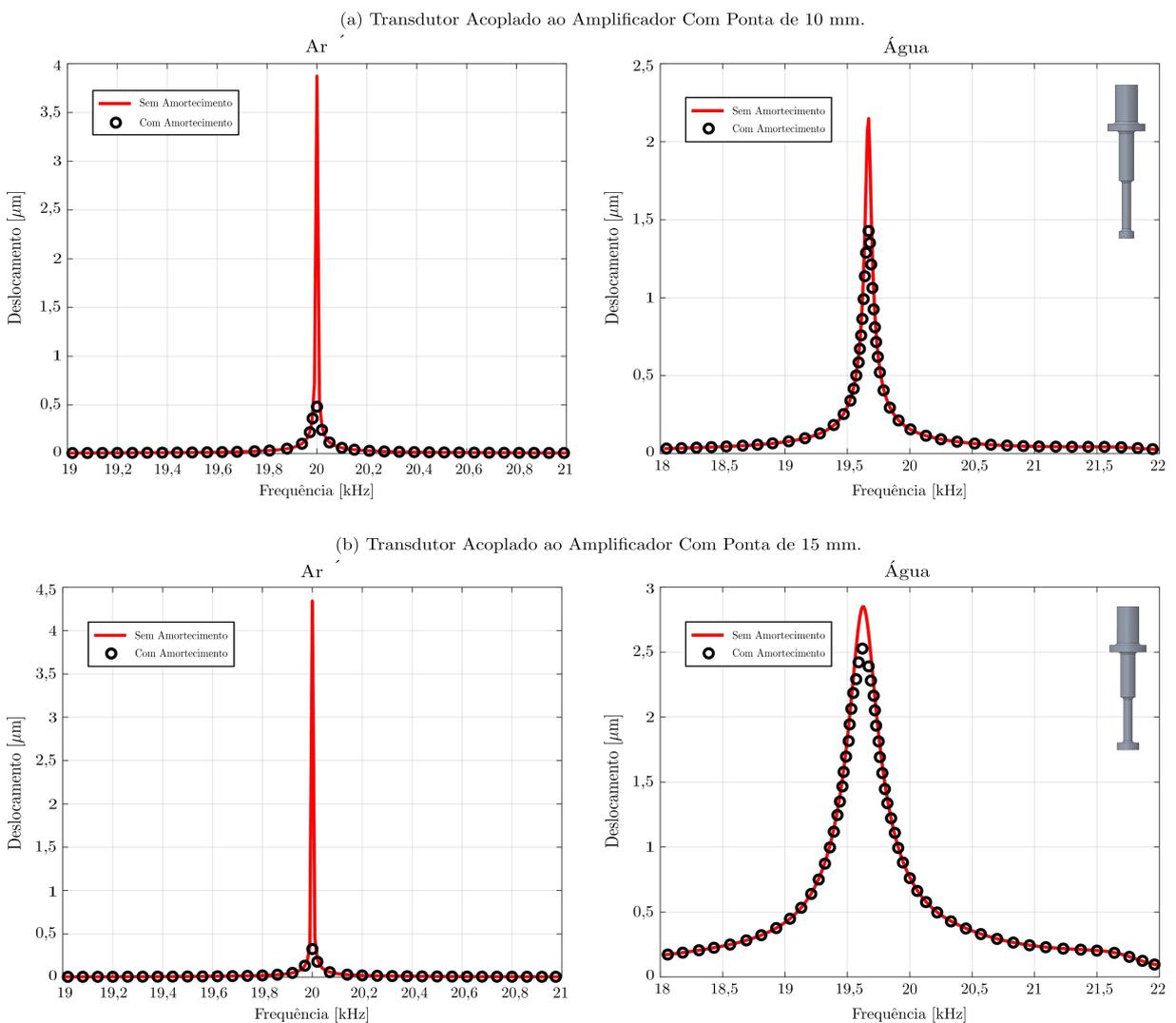


A primeira grandeza a ser avaliada para caracterizar o transdutor é a impedância elétrica, ela vai nos dizer se o dispositivo está ressonando na frequência a qual foi modelado. Agora será avaliado o deslocamento mecânico na ponta do amplificador, pois é essa região que vai estar em contato com o meio para gerar a pressão acústica.

## 7.2 DESLOCAMENTO MECÂNICO

Os transdutores de Langevin vibram gerando altos deslocamentos nas pontas quando estão operando. Devido a isso, os deslocamentos mecânicos se tornam um parâmetro importante a ser analisado visando comprovar que o dispositivo está funcionando corretamente. Desse modo, é esperado que os transdutores possuam maiores deslocamentos no valor da frequência de ressonância, que é onde se obtêm o máximo de eficiência operacional.

Figura 37 – Gráfico dos deslocamentos mecânicos do transdutor acoplado aos amplificadores com ponta de 10 mm (a) e 15 mm (b).



Fonte: O autor (2022).

Figura 38 – Gráfico dos deslocamentos mecânicos do transdutor acoplado aos amplificadores com ponta de 20 mm (a), ponta reta (b) e escalonado (c).

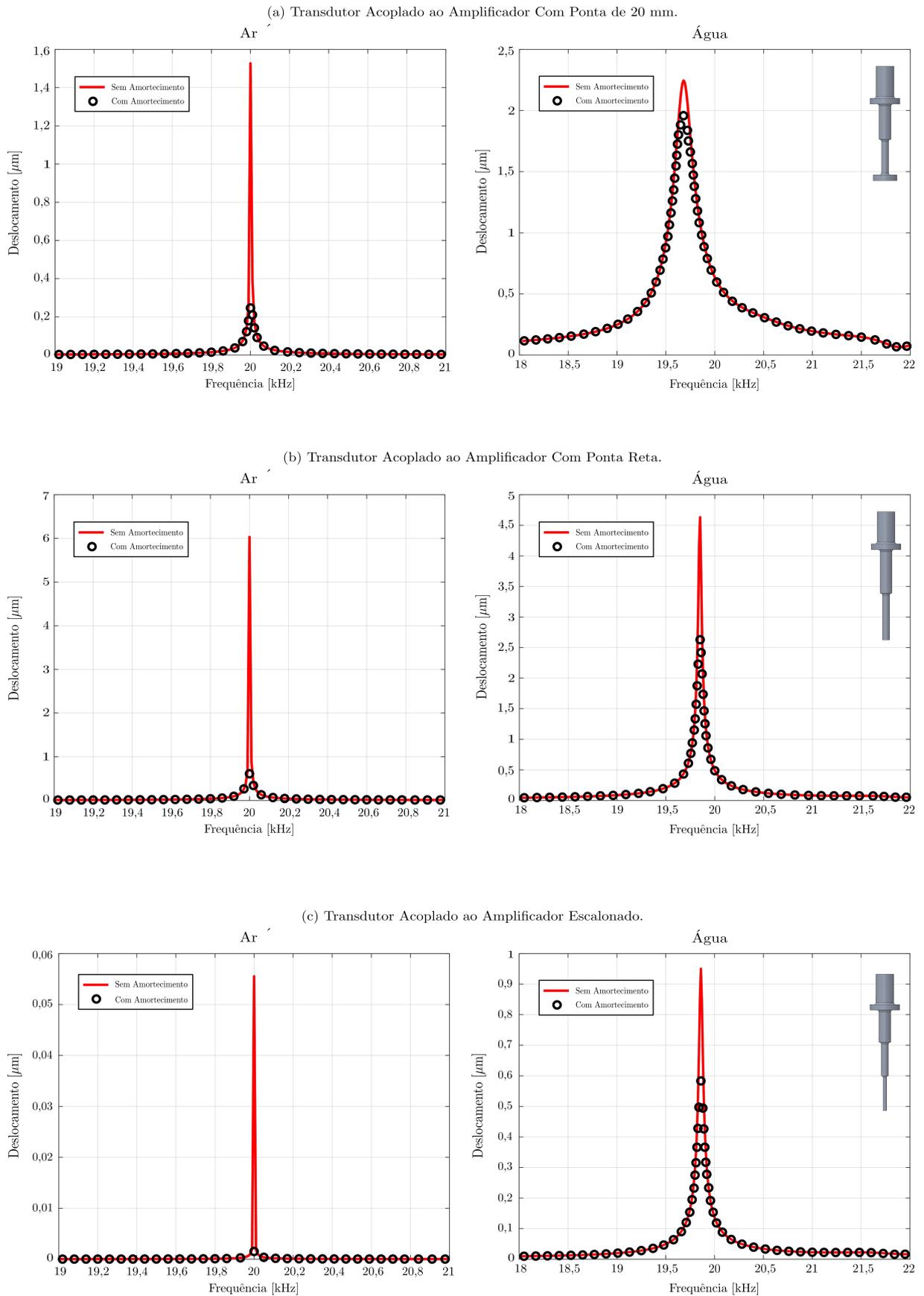


Figura 39 – Atenuação dos deslocamentos mecânicos.

Amplificadores	Deslocamento Mecânico (mm)					
	Sem Amortecimento		Com Amortecimento		Porcentagem Atenuada	
	Ar	Água	Ar	Água	Ar	Água
Ponta de 10 mm 	$3,9 \times 10^{-3}$	$2,0 \times 10^{-4}$	$5,0 \times 10^{-4}$	$1,0 \times 10^{-4}$	87,1%	50%
Ponta de 15 mm 	$2,5 \times 10^{-3}$	$2,8 \times 10^{-5}$	$3,0 \times 10^{-4}$	$2,5 \times 10^{-5}$	88%	11,1%
Ponta de 20 mm 	$1,5 \times 10^{-3}$	$2,2 \times 10^{-5}$	$2,0 \times 10^{-4}$	$1,9 \times 10^{-5}$	86,6%	12,7%
Ponta Reta 	$6,0 \times 10^{-3}$	$5,0 \times 10^{-4}$	$6,0 \times 10^{-4}$	$3,0 \times 10^{-4}$	90%	40%
Escalonado 	$5,5 \times 10^{-2}$	$1,0 \times 10^{-3}$	$1,5 \times 10^{-3}$	$6,0 \times 10^{-4}$	97,2%	40%

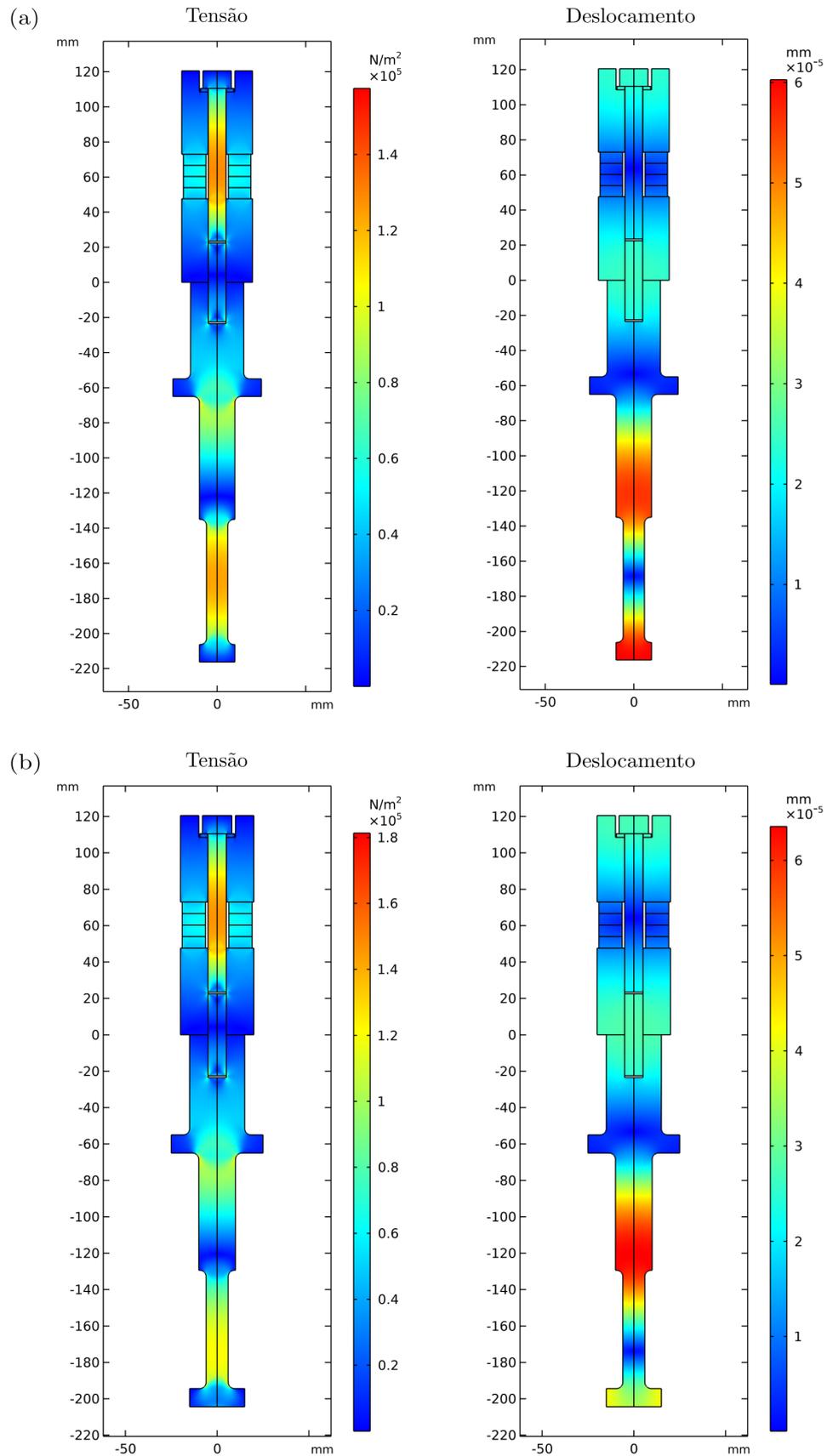
Fonte: O autor (2022).

As Figuras 37 e 38 apresentam graficamente os deslocamentos mecânicos produzidos pelo transdutor acoplado aos respectivos amplificadores mecânicos em função da frequência, operando no ar e imerso no tanque composto por água. Logo, é notório que o amortecimento mecânico devido aos fatores de perda dos materiais causam uma atenuação considerável nos deslocamentos, como podemos observar na Figura 39, sendo este um parâmetro essencial a ser analisado nas simulações. Além disso, esses deslocamentos são da ordem dos micrômetros, não sendo possível observá-los a olho nu.

### 7.2.1 Tensão Mecânica

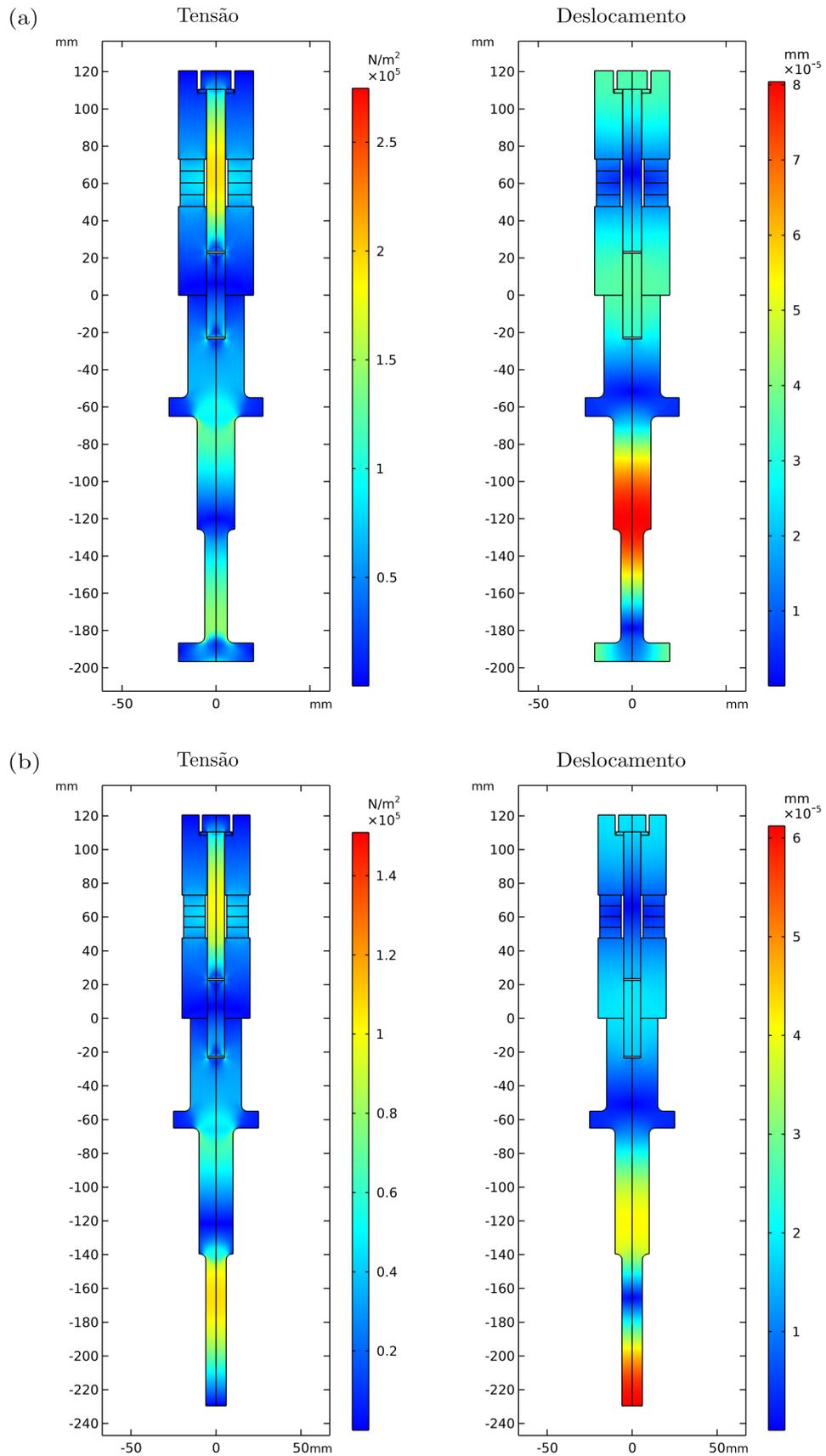
Uma etapa importante no processo de caracterização dos transdutores é a análise dos pontos nodais, que são os pontos onde temos deslocamento nulo na direção de vibração do transdutor. Devido ao deslocamento ser nulo, são nesses pontos que temos os maiores valores de tensão mecânica. Os deslocamentos causados durante o funcionamento do transdutor fazem com que a estrutura do dispositivo sofra tensões mecânicas e seja deformada. A distribuição de esforços produzida pela estrutura para resistir a deformação se opõe a força de tensionamento, e é conhecida como tensão mecânica. Como se trata de força de tensão aplicada em uma área, mais especificamente no corpo do transdutor, adotamos a tensão mecânica von Mises, medida em  $N/m^2$ , para analisar a tensão nas simulações.

Figura 40 – Tensão e deslocamento do transdutor acoplado aos amplificadores com ponta de 10 mm (a) e 15 mm (b).



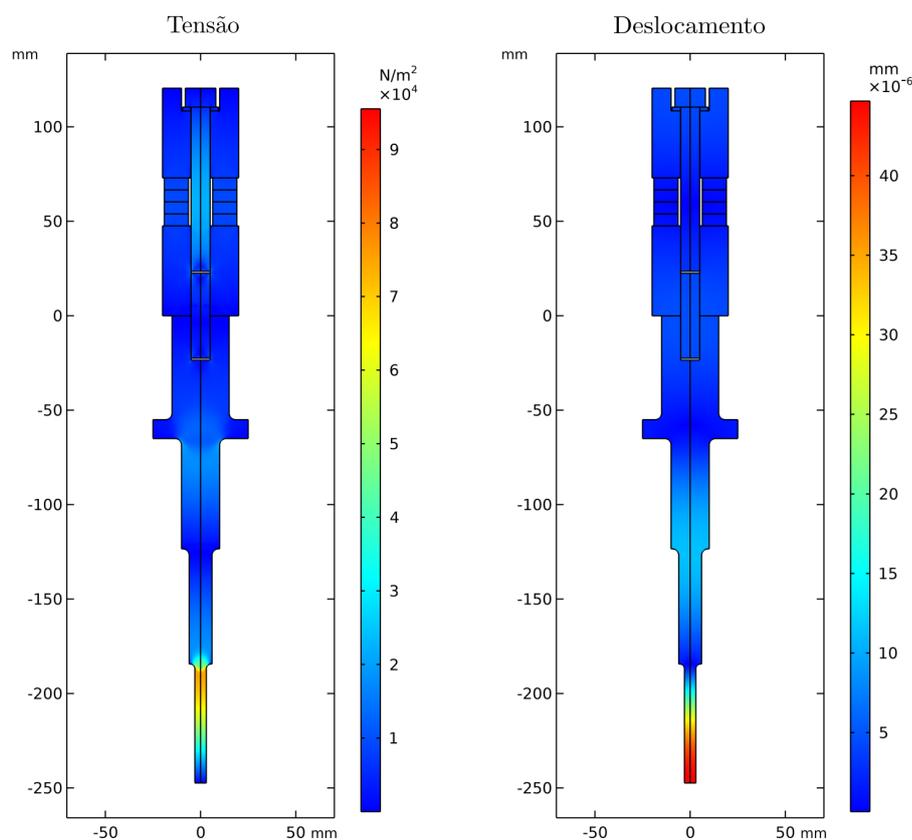
Fonte: O autor (2022).

Figura 41 – Tensão e deslocamento do transdutor acoplado aos amplificadores com ponta de 20 mm (a) e ponta reta (b).



Fonte: O autor (2022).

Figura 42 – Tensão e deslocamento do transdutor acoplado ao amplificador escalonado.



Fonte: O autor (2022).

Observamos nas Figuras 40, 41 e 42 a distribuição de tensão e deslocamento mecânico produzidos pelo transdutor acoplado aos amplificadores mecânicos durante o seu funcionamento operando no ar e com os efeitos de amortecimento inclusos. Notamos que os maiores valores de tensão mecânica estão localizados nas regiões que menos sofrem deformações. Assim, quando a tensão é máxima o deslocamento é mínimo, e vice versa. Devido a não conseguir se deslocar, é natural que a região possua um alto valor de tensão. O parafuso prisioneiro, que é o responsável por manter o acoplamento efetivo dos componentes do transdutor, está sujeito a uma elevada tensão mecânica durante o funcionamento do dispositivo. Em experimentos reais, esse componente pode até ser destruído por não resistir a fadiga mecânica devido as vibrações. Logo, é indicado utilizar um parafuso feito de um material que possua alta resistência mecânica (como o aço), para garantir o bom desempenho do dispositivo.

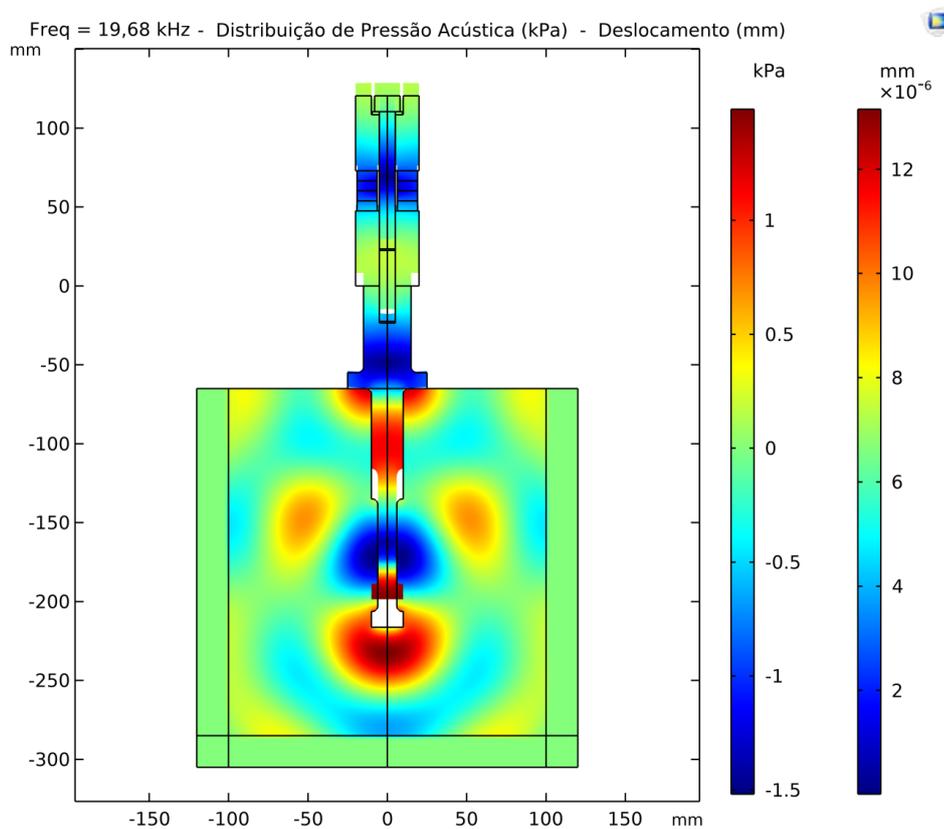
Para realizar a análise da distribuição de pressão acústica gerada pelo transdutor, foi necessário acoplar o dispositivo com um tanque composto por água. Esse acoplamento foi realizado através da flange do amplificador mecânico, que foi modelada para casar com um ponto nodal. Uma vez que a flange esteja fixada nessa região, a mesma não causa interferência no modo de ressonância longitudinal do dispositivo. As cerâmicas piezoelétricas também estão em um ponto nodal. Podemos observar essas situações nas figuras desta seção, sendo notório

que esses locais possuem mínimos deslocamentos e uma tensão mecânica elevada. Desse modo, analisar esses resultados é essencial para compreendermos o comportamento dos transdutores durante seu funcionamento.

### 7.3 PRESSÃO ACÚSTICA

O último resultado a ser analisado é a distribuição de pressão acústica produzida pelo transdutor. Para ser avaliada, introduzimos o dispositivo dentro de um tanque composto por água com volume de aproximadamente 11 L. As simulações com o transdutor imerso no tanque foram feitas incluindo os efeitos de amortecimento mecânico gerados a partir dos fatores de perda dos materiais utilizados no dispositivo. Essa etapa se faz necessária para comprovarmos se os transdutores estão haptos para gerar cavitação acústica, levando em conta a intensidade de pressão acústica que esteja sendo produzida no tanque. Logo, observamos nas Figuras 43, 44 e 45 a distribuição de pressão acústica produzida pelo transdutor acoplado aos 5 amplificadores modelados neste trabalho, e sendo medida em kPa. Além disso, na Tabela 3 estão listados os valores da pressão acústica obtidos com os amplificadores mecânicos estudados, como também o valor específico da frequência de ressonância que o transdutor passou a ter após ser imerso no tanque.

Figura 43 – Pressão acústica do transdutor acoplado ao amplificador com ponta de 10 mm.



Fonte: O autor (2022).

Figura 44 – Pressão acústica do transdutor acoplado ao amplificador com ponta de 15 mm (a) e 20 mm (b).

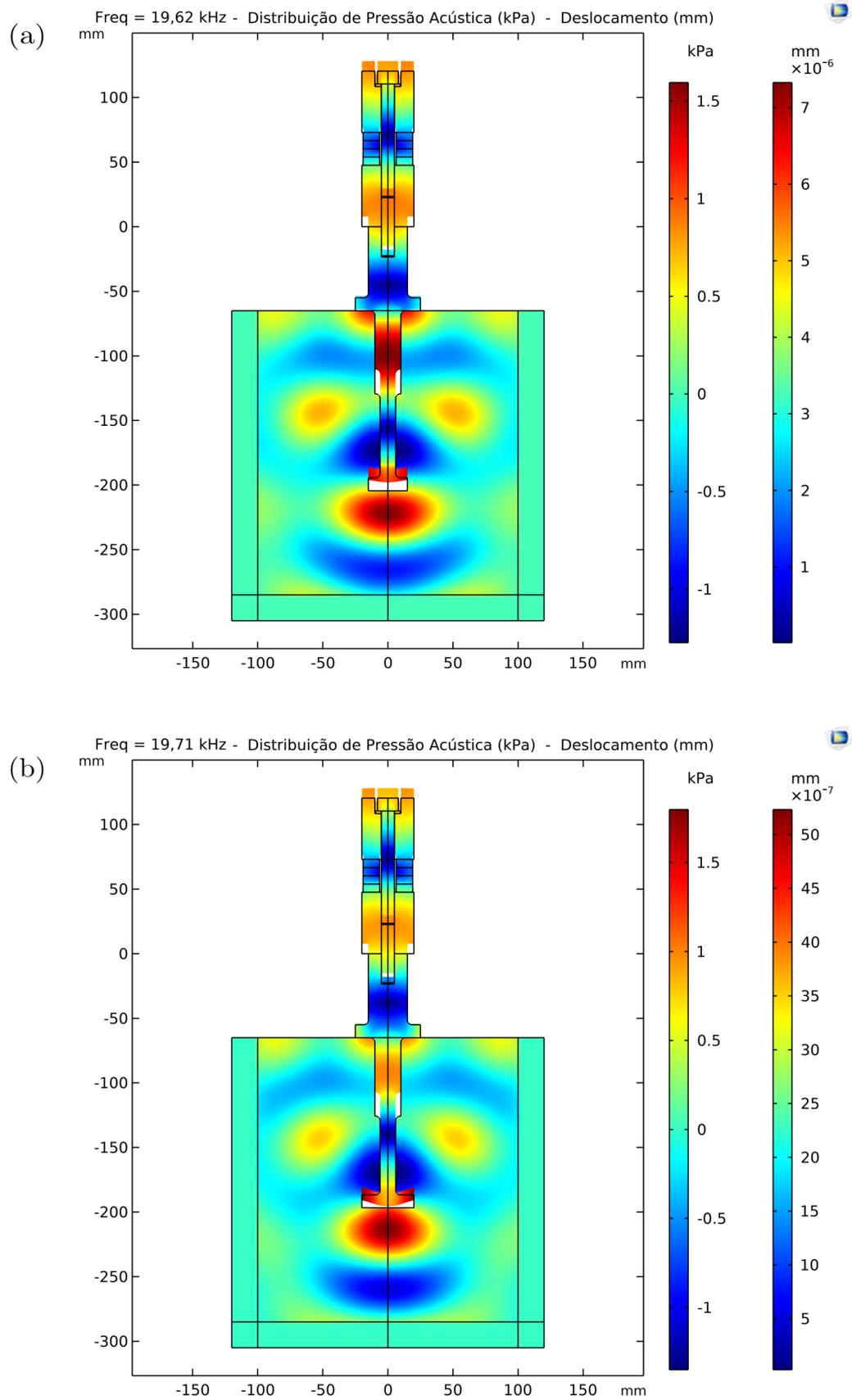


Figura 45 – Pressão acústica do transdutor acoplado ao amplificador com ponta reta (a) e escalonado (b).

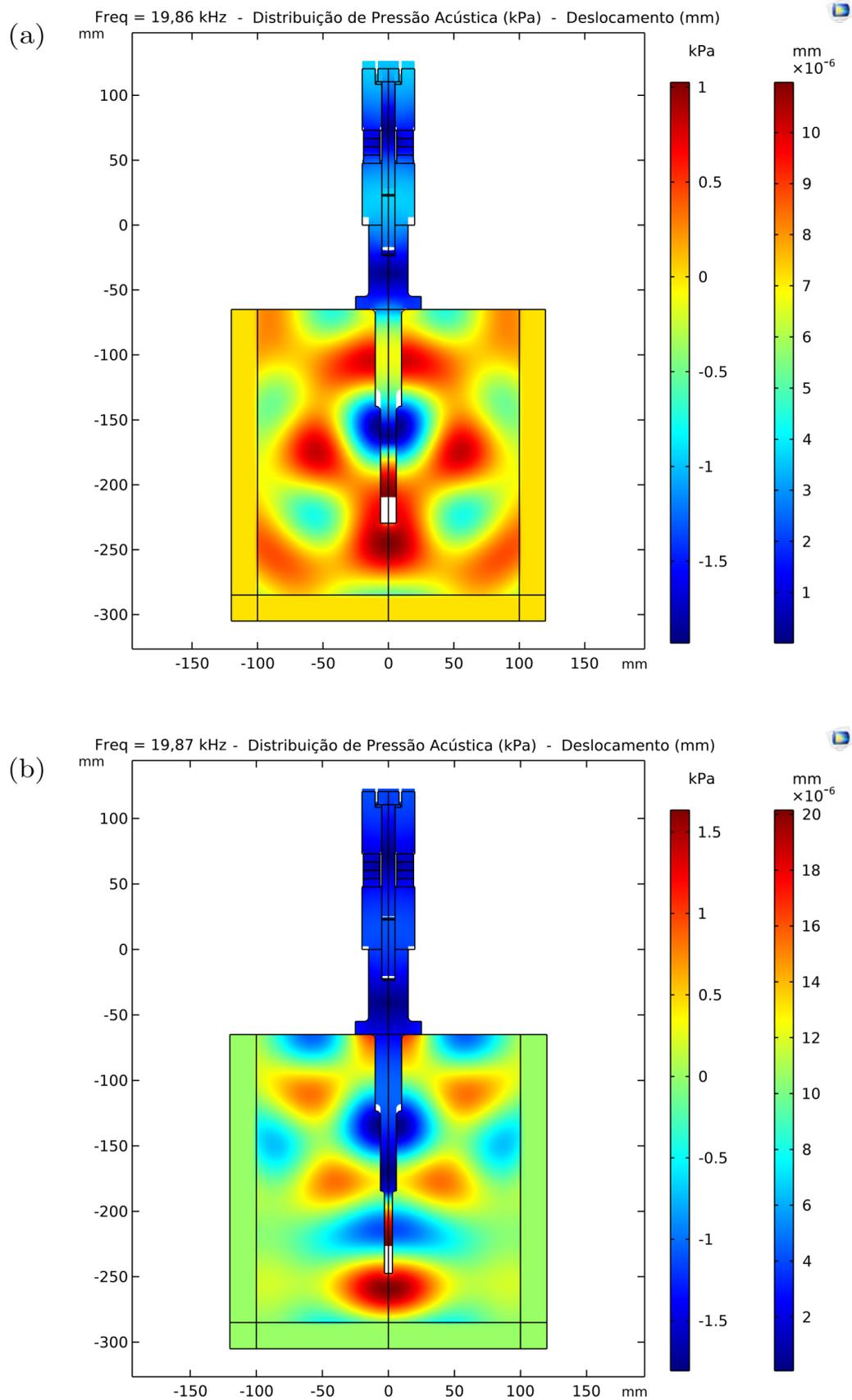


Tabela 3 – Pressão acústica obtida nas simulações.

<b>Amplificador</b>	<b>Frequência (kHz)</b>	<b>Pressão Acústica (kPa)</b>
Ponta de 10 mm	19,68	1,49
Ponta de 15 mm	19,62	1,59
Ponta de 20 mm	19,71	1,80
Ponta Reta	19,86	1,03
Escalonado	19,87	1,63

Fonte: O autor (2022).

A cavitação acústica é um fenômeno que buscamos utilizar para realizar a limpeza ultrassônica. Analisando a distribuição de pressão acústica produzida pelo transdutor nas simulações, notamos que foram obtidos valores que variam entre 1 kPa e 2 kPa com os amplificadores estudados. Vale lembrar que foi aplicada uma voltagem de 1 V nos terminais das cerâmicas para colocar o transdutor em funcionamento em todas as simulações. Neste trabalho não foi considerada a não linearidade em transdutores de Langevin, porém foram realizados testes reais com alguns dispositivos no laboratório de pesquisa que comprovaram a linearidade da cavitação até uma voltagem de 400 V.

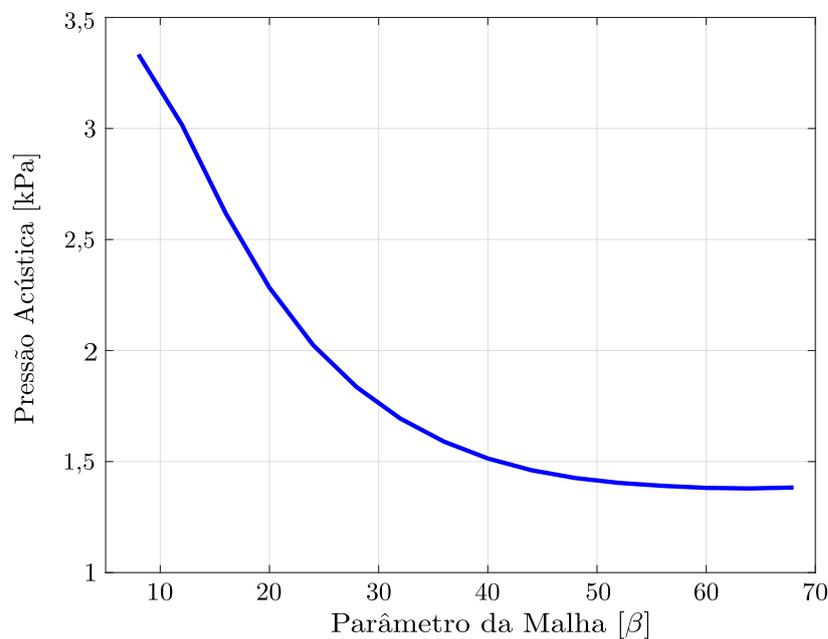
Desse modo, se aplicarmos, por exemplo, uma voltagem de 100 V no transdutor acoplado ao amplificador com ponta de 10 mm, iremos obter uma pressão acústica em torno de 149 kPa. Estudos relatam que o limiar da cavitação é em 100 kPa, onde a partir desse valor de pressão temos grandes possibilidades de gerar cavitação acústica no meio em questão. Assim, concluímos que os transdutores modelados neste trabalho estão haptos para gerar cavitação acústica e produzirem uma elevada agitação no sistema, possibilitando serem utilizados nas aplicações estudadas neste trabalho, como também em futuras aplicações.

#### 7.4 CONVERGÊNCIA DA SIMULAÇÃO

Como mencionado anteriormente, o método de elementos finitos foi utilizado neste trabalho, onde a precisão dos resultados obtidos se dá pela quantidade e dimensões dos elementos definidos nas simulações. No COMSOL, a configuração do MEF é realizada utilizando a ferramenta *Mesh*, que cria a malha do problema em elementos finitos. No transdutor foi utilizada a malha *Extremely Fine*, que é a melhor malha já predefinida pelo software e que forneceu resultados satisfatórios. Já no tanque, sempre que analisamos a propagação de ondas em um meio líquido, relacionamos a malha com o comprimento de onda da onda que está se propagando no meio em questão.

Essa relação dos elementos é escrita na forma de  $\lambda/\beta$ , onde  $\beta$  é o parâmetro da malha. A medida que  $\beta$  aumenta, o tamanho dos elementos diminuem, resultando em um maior número de elementos na superfície. Para o respectivo trabalho, foi definido que  $\beta = 45$ . Como o objetivo do trabalho foi realizar um estudo numérico, determinar as melhores dimensões dos elementos é uma etapa essencial, uma vez que isso pode otimizar o tempo e a carga computacional necessária para executar a simulação sem perder precisão nos resultados. A Figura 46 apresenta o gráfico de convergência da pressão acústica gerada pelo transdutor acoplado ao amplificador ponta de 10 mm e imerso no tanque composto por água com os fatores de perda dos materiais inclusos na simulação.

Figura 46 – Gráfico de convergência da simulação.



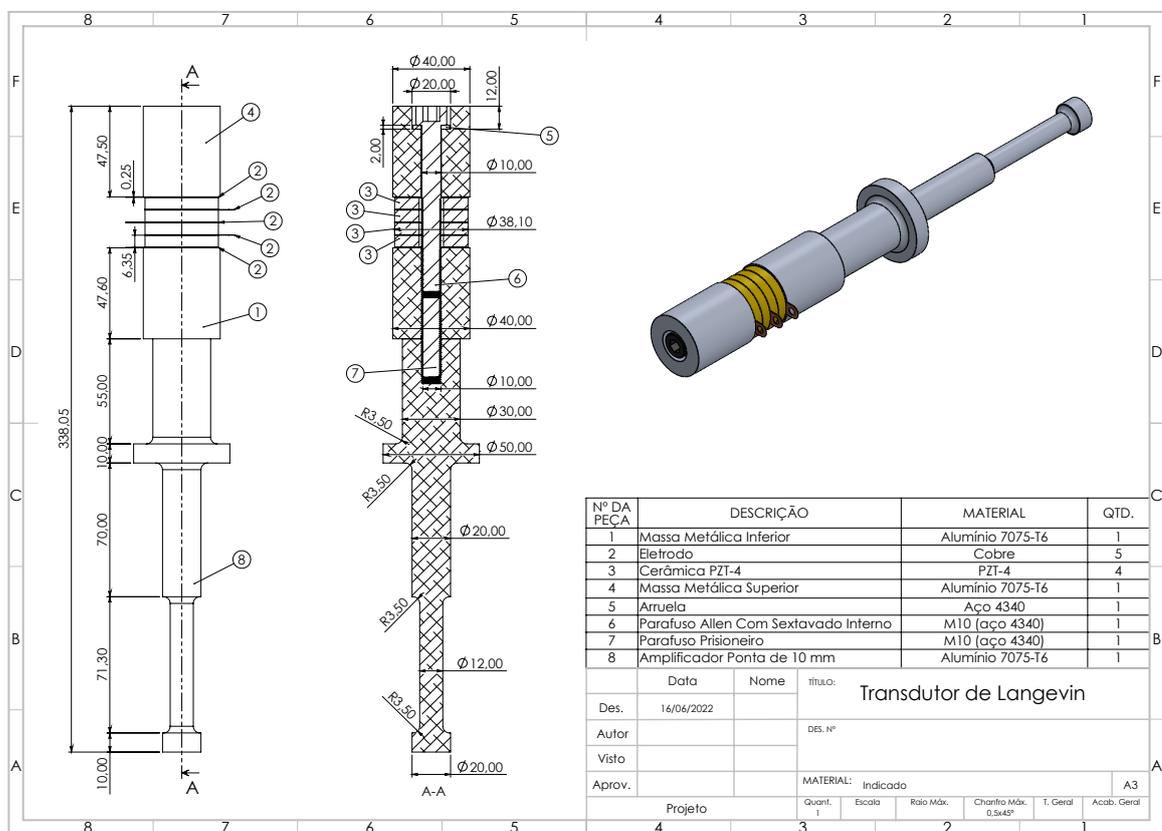
Fonte: O autor (2022).

Observamos no gráfico da Figura 46 que a medida que o valor de  $\beta$  aumenta, a pressão acústica converge para um valor próximo de 1,47 kPa. Comparando os valores de pressão acústica obtidos para  $\beta = 45$  (1,49 kPa) e  $\beta = 70$  (1,47 kPa), temos uma diferença de aproximadamente 1,3 %. Como o valor de  $\beta$  fornece a densidade da malha, o tempo e a carga computacional para realizar a simulação depende diretamente desse valor, ou seja, uma simulação com  $\beta = 70$  demora o dobro do tempo de simulação se comparada com  $\beta = 45$ , sendo que o erro no cálculo da pressão acústica é em torno de 1,3 % de uma densidade para outra. Assim, notamos que o valor de  $\beta$  definido para este trabalho fornece resultados precisos se tornando uma escolha mais eficiente, além de possibilitar uma otimização na execução das simulações. Além disso, as análises realizadas em relação a malha se estendem para os demais amplificadores mecânicos, devido as etapas serem idênticas em todas as simulações.

## 7.5 PERSPECTIVAS

A importância deste trabalho se dá devido aos transdutores serem o coração de toda e qualquer aplicação que foi mencionada anteriormente. Esses dispositivos não são construídos na tentativa e erro, e para que a construção seja efetuada, o primeiro passo passo é realizar a modelagem numérica, achar a geometria e dimensões específicas para cada frequência de ressonância necessária na aplicação em questão. Uma vez que o dispositivo esteja ressonando de acordo com o que foi projetado, o próximo passo é fazer o desenho técnico (Figura 47) do dispositivo com todas as respectivas medidas e encaminhar para o processo de usinagem.

Figura 47 – Desenho técnico do transdutor com o amplificador ponta de 10 mm.



Fonte: O autor (2022).

Temos como perspectivas futuras incluir nas simulações a análise da temperatura, o pré-tensionamento do parafuso, e a não linearidade dos transdutores de Langevin para que a simulação se aproxime ainda mais de um experimento real, e conseqüentemente, realizar uma análise ainda mais precisa e adequada.

## 8 CONCLUSÃO

Este trabalho teve como objetivo geral realizar a modelagem numérica de transdutores de Langevin para aplicações industriais utilizando o Método de Elementos Finitos (MEF) através do software comercial COMSOL Multiphysics<sup>®</sup>. Dentre as aplicações envolvendo os transdutores, foram abordadas a quebra de emulsões de petróleo do tipo água em óleo e a limpeza ultrassônica dos permutadores de calor. A agitação produzida pelo campo ultrassônico é a principal responsável pelo processo de quebra de emulsões. Já para o caso da limpeza ultrassônica, os efeitos físicos gerados pela cavitação acústica fazem com que as incrustações sejam removidas da superfície de extrato de forma eficaz.

Foi projetado um transdutor de Langevin que opere com frequência de ressonância em 20 kHz, sendo acoplado a 5 amplificadores mecânicos com diferentes geometrias de ponta para avaliarmos a influência de cada um no processo de cavitação acústica. Nosso transdutor conta com 4 cerâmicas piezoelétricas do tipo PZT-4, as massas metálicas que sanduicham as cerâmicas são de alumínio e o parafuso de tensionamento é de aço inoxidável. Além disso, o parafuso prisioneiro e os amplificadores também são de aço e alumínio, respectivamente. Uma vez modelados, é necessário caracterizar os dispositivos que foram projetados. Essa caracterização foi feita através da análise de algumas grandezas físicas, como a impedância elétrica, o deslocamento mecânico e a pressão acústica, visando comprovar que o dispositivo está funcionando com a finalidade a qual foi modelado.

As simulações numéricas foram realizadas em etapas, onde inicialmente modelamos o transdutor para a frequência de 20 kHz. A próxima etapa foi projetar os amplificadores mecânicos para a mesma frequência do transdutor, através de uma análise modal. Com os dispositivos acoplados, novas simulações foram realizadas com e sem os efeitos de amortecimento mecânico a partir dos fatores de perda dos materiais utilizados, para avaliarmos a atenuação da amplitude dos deslocamentos produzidos. A última etapa foi inserir o dispositivo em um tanque composto por água com volume de aproximadamente 11 L para analisarmos a distribuição de pressão acústica gerada.

A partir dos resultados obtidos nas simulações, concluímos que a metodologia utilizada neste trabalho foi satisfatória, sanando as expectativas e possibilitando aperfeiçoamentos futuros. Os transdutores de Langevin modelados estão operando na frequência de ressonância desejada e haptos para gerar cavitação acústica. A realização do estudo proposto é de grande importância para a linha de produção dos transdutores e suas futuras aplicações em diversas áreas, como na indústria de petróleo e gás e no desenvolvimento de equipamentos hospitalares. Por fim, esperamos que sejam usinados para avaliarmos seu desempenho em experimentos reais.

## REFERÊNCIAS

- ANTES, F. G. **Desemulsificação de petróleos assistida por ultrassom e posterior caracterização das fases água e óleo.** 2011. Tese (Doutorado em Química) — Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2011.
- ATEHORTUA, C. M. G. **Estudo da intensificação da coalescência de emulsões de água em óleo com a aplicação de onda estacionária de ultrassom.** 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) — Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.
- ATEHORTUA, C. M. G. *et al.* Estudo de quebra de emulsões de água em óleo com petróleo brasileiro usando câmaras ultrassônicas de baixa frequência. **Rio Oil and Gas Expo and Conference**, Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás, v. 20, n. 2020, p. 244–245, dez. 2020. Disponível em: <https://bit.ly/3LqCI1L>. Acesso em: 28 out. 2021.
- BORGES, A. N.; RODRIGUES, C. G. **Introdução à física acústica.** 1. ed. São Paulo: Livraria da Física, 2017.
- CARLI, J. C. de; HAHNEMANN, M. P. **Caracterização experimental de parâmetros operacionais em processos de limpeza usando o método ultrassônico.** 2017. Monografia (Bacharelado em Engenharia Mecânica) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2017.
- COMSOL. **COMSOL Multiphysics reference manual.** 6.0. ed. Stockholm, Sweden: COMSOL AB, 2021.
- FITZPATRICK, A.; SINGHVI, A.; ARBABIAN, A. An airborne sonar system for underwater remote sensing and imaging. **IEEE Access**, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 8, p. 189945–189959, 2020. Disponível em: <https://bit.ly/3zhzwRh>. Acesso em: 04 nov. 2021.
- GALLEGO-JUAREZ, J. A. Piezoelectric ceramics and ultrasonic transducers. **Journal of Physics E: Scientific Instruments**, IOP Publishing, v. 22, n. 10, p. 804–816, oct. 1989. Disponível em: <https://bit.ly/37OpcXd>. Acesso em: 30 out. 2021.
- GE. **Transdutores de ultrassom.** Chicago, EUA: GE Healthcare, 2022.
- HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. **Fundamentos de física: gravitação, ondas e termodinâmica.** 10. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016. v. 2.
- HÜBNER, U. *et al.* Ultrasound in the diagnosis of fractures in children. **The Bone & Joint Journal**, British Editorial Society of Bone & Joint Surgery, v. 82-B, n. 8, p. 1170–1173, nov. 2000. Disponível em: <https://bit.ly/3S7zbJw>. Acesso em: 28 out. 2021.
- INUI, T. *et al.* Method of localized removal of cells using a bolt-clamped Langevin transducer with an ultrasonic horn. **Engineering in Life Sciences**, Wiley, v. 19, n. 8, p. 575–583, jun. 2019. Acesso em: 12 maio 2022.
- KARAFI, M.; KAMALI, S. A continuum electro-mechanical model of ultrasonic Langevin transducers to study its frequency response. **Applied Mathematical Modelling**, Elsevier BV, v. 92, p. 44–62, apr. 2021.

KIESER, B. *et al.* The application of industrial scale ultrasonic cleaning to heat exchangers. *In: PROCEEDINGS OF INTERNATIONAL CONFERENCE ON HEAT EXCHANGER FOULING AND CLEANING*, 9., 2011, Island of Crete. **Proceedings [...]**. Greece: Heat Transfer Research, Inc., 2011. p. 5–10.

KUMAR, R.; SINGH, A.; GARG, N. Acoustic cavitation-assisted formulation of solid lipid nanoparticles using different stabilizers. **ACS Omega**, American Chemical Society (ACS), v. 4, n. 8, p. 13360–13370, aug. 2019. Disponível em: <https://bit.ly/3BpdOgQ>. Acesso em: 05 jan. 2022.

LEGG, M. *et al.* Acoustic methods for biofouling control: a review. **Ocean Engineering**, Elsevier BV, v. 103, p. 237–247, jul. 2015. Disponível em: <https://bit.ly/3zQTNpj>. Acesso em: 05 jan. 2022.

LIAO, A.-H. Ultrasound in biomedical engineering: ultrasound microbubble contrast agents promote transdermal permeation of drugs. **Journal of Medical Ultrasound**, v. 24, n. 3, p. 86–88, 2016. ISSN 0929-6441. Disponível em: <https://bit.ly/39hWCO8>. Acesso em: 12 maio 2022.

MADI, M.; NEGRÃO, C. O. R.; MASSOQUETI, R. Análise do crescimento da resistência térmica da incrustação em trocadores de calor. *In: CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA*, 3., 2004, Belém. **Anais [...]**. Pará: CONEM, 2004. p. 1–9.

MODARRES-GHEISARI, S. M. M. *et al.* Ultrasonic nano-emulsification – a review. **Ultrasonics Sonochemistry**, Elsevier BV, v. 52, p. 88–105, apr. 2019. Disponível em: <https://bit.ly/3SashTS>. Acesso em: 05 jan. 2022.

MORETTI, T. B. **Desenvolvimento e caracterização do transdutor piezelétrico de potência e da pinça laparoscópica para o projeto do bisturi ultrassônico nacional**. 2014. Dissertação (Mestrado em Ciências e Engenharia de Materiais) — Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 2014.

OLIVEIRA, P. A. *et al.* Ultrasound methods for biodiesel production and analysis. *In: BERNAT, K. (Ed.). Biofuels*. Rijeka: IntechOpen, 2018. cap. 7, p. 121–141. Disponível em: <https://bit.ly/3zGOK3y>. Acesso em: 05 jan. 2022.

ONO, K. Dynamic viscosity and transverse ultrasonic attenuation of engineering materials. **Applied Sciences**, MDPI AG, v. 10, n. 15, p. 5265, jul. 2020.

ONSCALE. **A history of the piezoelectric effect**. Califórnia, EUA: Onscale, 2022.

PARRINI, L. Design of advanced ultrasonic transducers for welding devices. **IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control**, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 48, n. 6, p. 1632–1639, nov. 2001. Disponível em: <https://bit.ly/3zGOqlm>. Acesso em: 01 nov. 2021.

PEREIRA, A. H. A. **Cerâmicas piezoelétricas: funcionamento e propriedades**. São Carlos: ATCP Engenharia Física, 2010.

PEREIRA, L. O. V. *et al.* Aplicação de ondas estacionárias de ultrassom na separação de água de petróleo. **Rio Oil and Gas Expo and Conference**, v. 18, n. 1277, 2016. Disponível em: <https://bit.ly/3bGVD8w>. Acesso em: 29 out. 2021.

PINGRET, D.; FABIANO-TIXIER, A.; CHEMAT, F. 4.19 - accelerated methods for sample preparation in food. *In*: PAWLISZYN, J. (Ed.). **Comprehensive sampling and sample preparation**. Oxford: Elsevier, 2012. p. 441–455. ISBN 978-0-12-381374-9. Disponível em: <https://bit.ly/3qiUFWY>. Acesso em: 05 jan. 2022.

RIOS, J. L. R. **Avaliação metrológica de um dispositivo servo-hidráulico para mitigação de incrustação em trocadores de calor industriais**. 2020. Dissertação (Mestrado em Metrologia para Qualidade e Inovação) — Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro - PUC-RIO, Rio de Janeiro, 2020.

RONCHI, R. P. **Avaliação da eficiência do ultrassom no processo de separação de fases em água produzida e em emulsões sintéticas do tipo O/A**. 2014. Dissertação (Mestrado em Energia) — Universidade Federal do Espírito Santo, São Mateus, 2014.

ROOZE, J. *et al.* Dissolved gas and ultrasonic cavitation – a review. **Ultrasonics Sonochemistry**, v. 20, n. 1, p. 1–11, 2013. ISSN 1350-4177. Disponível em: <https://bit.ly/3MCGaGC>. Acesso em: 27 mar. 2022.

SANT'ANNA, A. A. **Modelagem e simulação da perda de carga de um sistema de trocadores de calor em refino de petróleo**. 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) — Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2021.

SCHULZ, C. H.; KIESER, B. Understanding the value of cleaning-gains from the use of ultrasonic cleaning of large industrial equipment. *In*: HEAT EXCHANGER FOULING AND CLEANING, 13., 2019, Warsaw. **Proceedings [...]**. Poland: Heat Transfer Research, Inc., 2019. p. 2–7.

SHENZHEN, L. **Piezoelectric materials**. Guangdong, China: Shenzhen Longzhichuang Co., Ltd., 2020.

SILVA, A. L. F. da *et al.* **Apostila processamento primário de petróleo**. Rio de Janeiro: Universidade PETROBRAS: Escola de Ciências e Tecnologia E&P, 2007.

SILVA, J. B. da. **Análise numérica de um transdutor piezelétrico de potência para processamento de termoplásticos têxteis**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecatrônica) — Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

SILVA, V. L. C. M. da. **Predição da incrustação em um trocador de calor baseada em redes neurais artificiais**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica e de Computação) — Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2013.

SUN, D. *et al.* Development and application of ultrasonic surgical instruments. **IEEE Transactions on Biomedical Engineering**, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 44, n. 6, p. 462–467, jun. 1997. Disponível em: <https://bit.ly/3cM5vl0>. Acesso em: 02 nov. 2021.

São José, J. F. B. de *et al.* Decontamination by ultrasound application in fresh fruits and vegetables. **Food Control**, Elsevier BV, v. 45, p. 36–50, nov. 2014. ISSN 0956-7135. Disponível em: <https://bit.ly/3xUhK7C>. Acesso em: 30 out. 2021.

TAYRA, V. T. **Desenvolvimento de um transdutor ultrassônico de potência aplicado em perfuração de rochas e usinagem de metais**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) — Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

THOMAS, J. E. **Fundamentos de engenharia de petróleo**. 2. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2004. ISBN 8571930996.

TONIN, P. C. **Metodologia para monitoramento do desempenho térmico de redes de trocadores de calor**. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica e de Materiais) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2003.

VILLAMIEL, M. *et al.* **Ultrasound in food processing: recent advances**. 1. ed. Nova Jersey: Wiley-Blackwell, 2017. ISBN 1118964187. Disponível em: <https://bit.ly/3k67jGt>. Acesso em: 30 out. 2021.

VOLPICELLI, G. *et al.* Lung ultrasound for the early diagnosis of COVID-19 pneumonia: an international multicenter study. **Intensive Care Med**, Springer Science and Business Media LLC, v. 47, n. 4, p. 444–454, mar. 2021. Disponível em: <https://bit.ly/3QIXDW3>. Acesso em: 28 out. 2021.

YASUI, K. **Acoustic cavitation and bubble dynamics**. Cham: Springer International Publishing, 2018. ISBN 9783319682365. Disponível em: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-319-68237-2>. Acesso em: 27 out. 2021.

YUSOF, N. S. M. *et al.* Physical and chemical effects of acoustic cavitation in selected ultrasonic cleaning applications. **Ultrasonics Sonochemistry**, v. 29, p. 568–576, 2016. ISSN 1350-4177. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1350417715001856>. Acesso em: 27 mar. 2022.

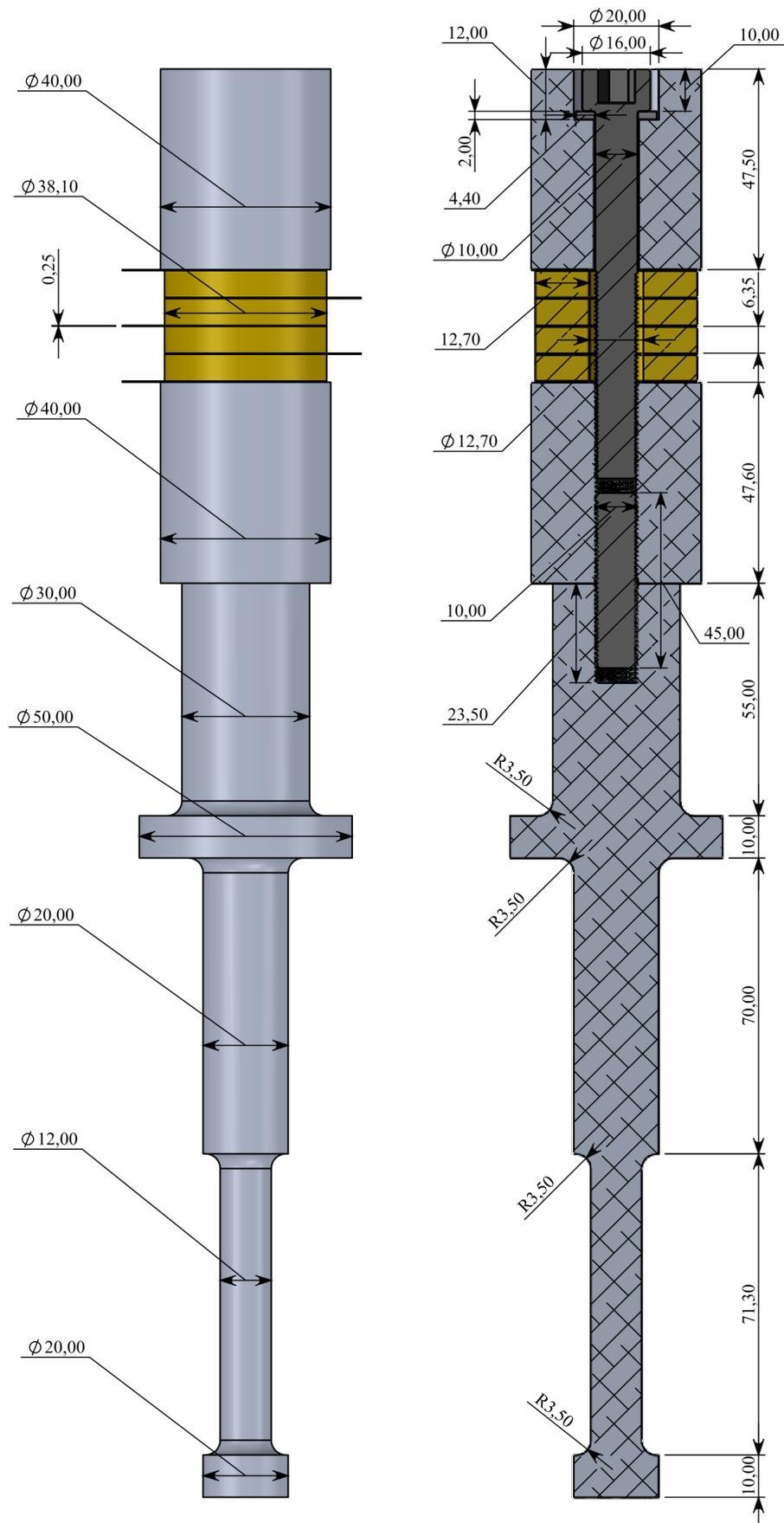
ZHAO, Y.-X. *et al.* High-intensity focused ultrasound treatment as an alternative regimen for myxofibrosarcoma. **Wiley Periodicals LLC**, Wiley, v. 34, n. 2, feb. 2021. Disponível em: <https://bit.ly/3bdTLaD>. Acesso em: 28 out. 2021.

## APÊNDICE A – PARÂMETROS UTILIZADOS NAS SIMULAÇÕES

Tabela 4 – Parâmetros do transdutor com o amplificador ponta de 10 mm.

Parâmetro	Expressão	Descrição
h1	47,6 mm	Altura da massa metálica inferior
h2	47,5 mm	Altura externa da massa metálica superior
h3	35,5 mm	Altura interna da massa metálica superior
hcp	10,0 mm	Altura da cabeça do parafuso
hp	$h1 + h3 + 4*ec + ea$	Altura do corpo do parafuso
ec	6,35 mm	Espessura da cerâmica
ea	2,00 mm	Espessura da arruela
r1	20,0 mm	Raio do transdutor
r2	10,0 mm	Raio externo da massa metálica superior
r3	5,10 mm	Raio interno da massa metálica superior
ric	6,35 mm	Raio interno da cerâmica
rec	19,05 mm	Raio externo da cerâmica
rc	$rec - ric$	Raio da cerâmica
rp	5,00 mm	Raio do corpo do parafuso
rcp	8,00 mm	Raio da cabeça do parafuso
ria	5.10 mm	Raio interno da arruela
rea	9,50 mm	Raio externo da arruela
ra	$rea - ria$	Raio da arruela
r4	15,0 mm	Raio antes da flange do amplificador
r5	25,0 mm	Raio da flange do amplificador
r6	10,0 mm	Raio após a flange do amplificador
r7	6,00 mm	Raio antes da ponta do amplificador
r8	10,0 mm	Raio da ponta do amplificador
rf	3,50 mm	Raio do fillet
h4	55,0 mm	Altura antes da flange do amplificador
h5	10,0 mm	Altura da flange do amplificador
h6	70,0 mm	Altura após a flange do amplificador
h7	71,3 mm	Altura antes da ponta do amplificador
h8	10,0 mm	Altura da ponta do amplificador
h9	45,0 mm	Altura do parafuso prisioneiro
rt	120,0 mm	Raio do tanque
ht	240,0 mm	Altura do tanque
pml	20,0 mm	Bordas do tanque

Figura 48 – Transdutor acoplado ao amplificador ponta de 10 mm.



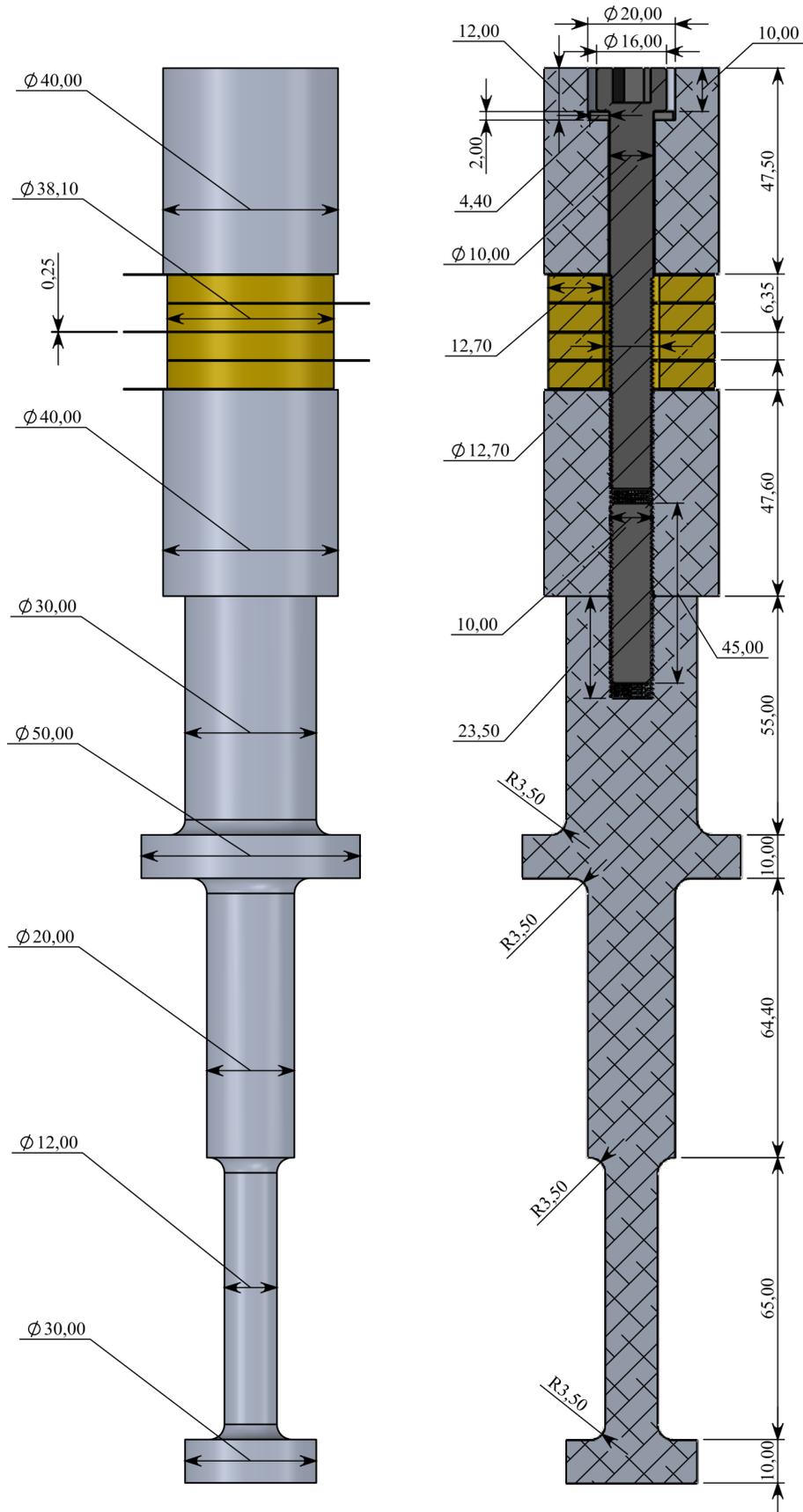
Fonte: O autor (2022).

Tabela 5 – Parâmetros do transdutor com o amplificador ponta de 15 mm.

Parâmetro	Expressão	Descrição
h1	47,6 mm	Altura da massa metálica inferior
h2	47,5 mm	Altura externa da massa metálica superior
h3	35,5 mm	Altura interna da massa metálica superior
hcp	10,0 mm	Altura da cabeça do parafuso
hp	$h1 + h3 + 4*ec + ea$	Altura do corpo do parafuso
ec	6,35 mm	Espessura da cerâmica
ea	2,00 mm	Espessura da arruela
r1	20,0 mm	Raio do transdutor
r2	10,0 mm	Raio externo da massa metálica superior
r3	5,10 mm	Raio interno da massa metálica superior
ric	6,35 mm	Raio interno da cerâmica
rec	19,05 mm	Raio externo da cerâmica
rc	$rec - ric$	Raio da cerâmica
rp	5,00 mm	Raio do corpo do parafuso
rcp	8,00 mm	Raio da cabeça do parafuso
ria	5.10 mm	Raio interno da arruela
rea	9,50 mm	Raio externo da arruela
ra	$rea - ria$	Raio da arruela
r4	15,0 mm	Raio antes da flange do amplificador
r5	25,0 mm	Raio da flange do amplificador
r6	10,0 mm	Raio após a flange do amplificador
r7	6,00 mm	Raio antes da ponta do amplificador
r8	15,0 mm	Raio da ponta do amplificador
rf	3,50 mm	Raio do fillet
h4	55,0 mm	Altura antes da flange do amplificador
h5	10,0 mm	Altura da flange do amplificador
h6	64,4 mm	Altura após a flange do amplificador
h7	65,0 mm	Altura antes da ponta do amplificador
h8	10,0 mm	Altura da ponta do amplificador
h9	45,0 mm	Altura do parafuso prisioneiro
rt	120,0 mm	Raio do tanque
ht	240,0 mm	Altura do tanque
pml	20,0 mm	Bordas do tanque

Fonte: O autor (2022).

Figura 49 – Transdutor acoplado ao amplificador ponta de 15 mm.



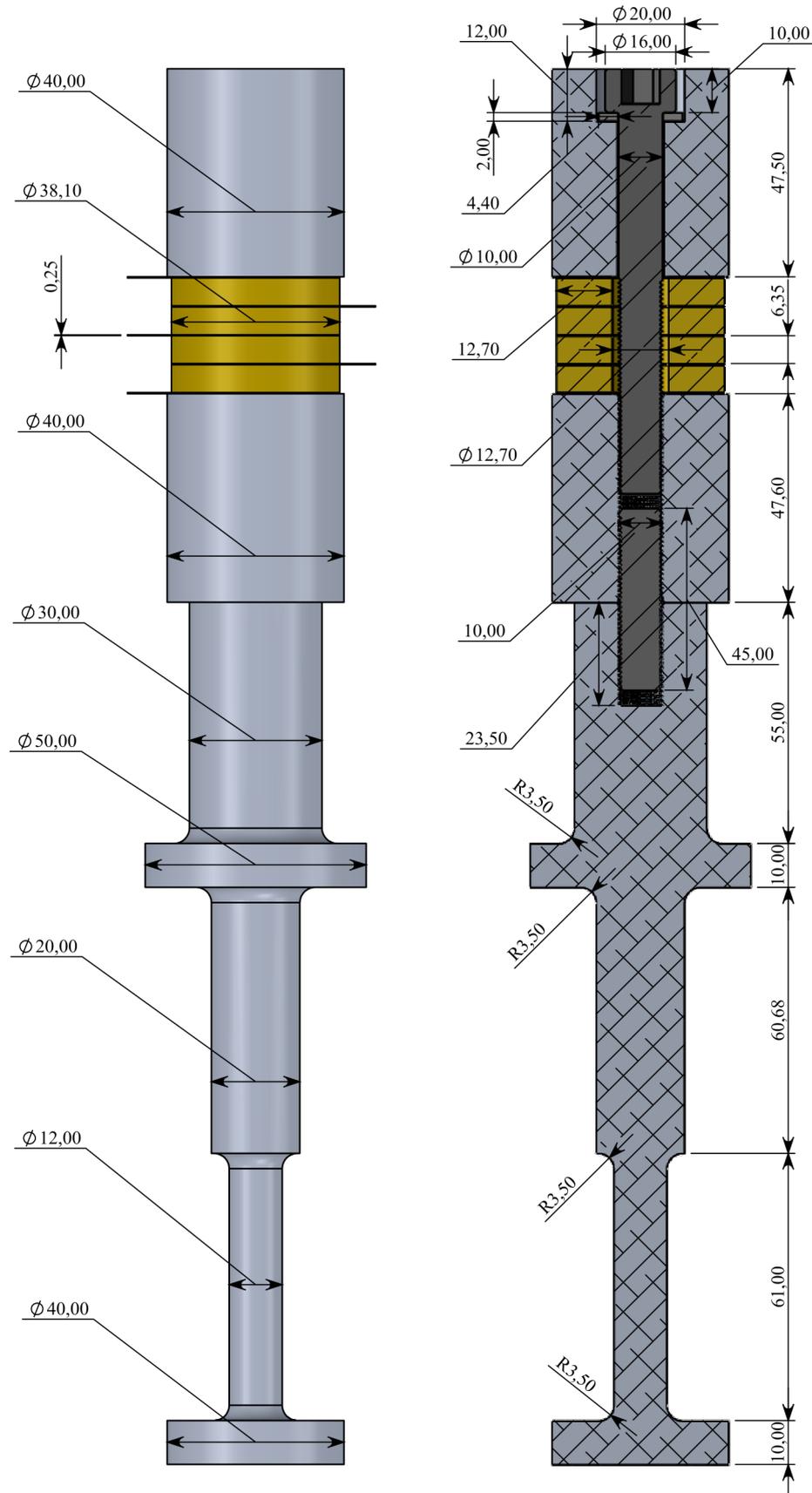
Fonte: O autor (2022).

Tabela 6 – Parâmetros do transdutor com o amplificador ponta de 20 mm.

Parâmetro	Expressão	Descrição
h1	47,6 mm	Altura da massa metálica inferior
h2	47,5 mm	Altura externa da massa metálica superior
h3	35,5 mm	Altura interna da massa metálica superior
hcp	10,0 mm	Altura da cabeça do parafuso
hp	$h1 + h3 + 4*ec + ea$	Altura do corpo do parafuso
ec	6,35 mm	Espessura da cerâmica
ea	2,00 mm	Espessura da arruela
r1	20,0 mm	Raio do transdutor
r2	10,0 mm	Raio externo da massa metálica superior
r3	5,10 mm	Raio interno da massa metálica superior
ric	6,35 mm	Raio interno da cerâmica
rec	19,05 mm	Raio externo da cerâmica
rc	$rec - ric$	Raio da cerâmica
rp	5,00 mm	Raio do corpo do parafuso
rcp	8,00 mm	Raio da cabeça do parafuso
ria	5.10 mm	Raio interno da arruela
rea	9,50 mm	Raio externo da arruela
ra	$rea - ria$	Raio da arruela
r4	15,0 mm	Raio antes da flange do amplificador
r5	25,0 mm	Raio da flange do amplificador
r6	10,0 mm	Raio após a flange do amplificador
r7	6,00 mm	Raio antes da ponta do amplificador
r8	20,0 mm	Raio da ponta do amplificador
rf	3,50 mm	Raio do fillet
h4	55,0 mm	Altura antes da flange do amplificador
h5	10,0 mm	Altura da flange do amplificador
h6	60,68 mm	Altura após a flange do amplificador
h7	61,0 mm	Altura antes da ponta do amplificador
h8	10,0 mm	Altura da ponta do amplificador
h9	45,0 mm	Altura do parafuso prisioneiro
rt	120,0 mm	Raio do tanque
ht	240,0 mm	Altura do tanque
pml	20,0 mm	Bordas do tanque

Fonte: O autor (2022).

Figura 50 – Transdutor acoplado ao amplificador ponta de 20 mm.



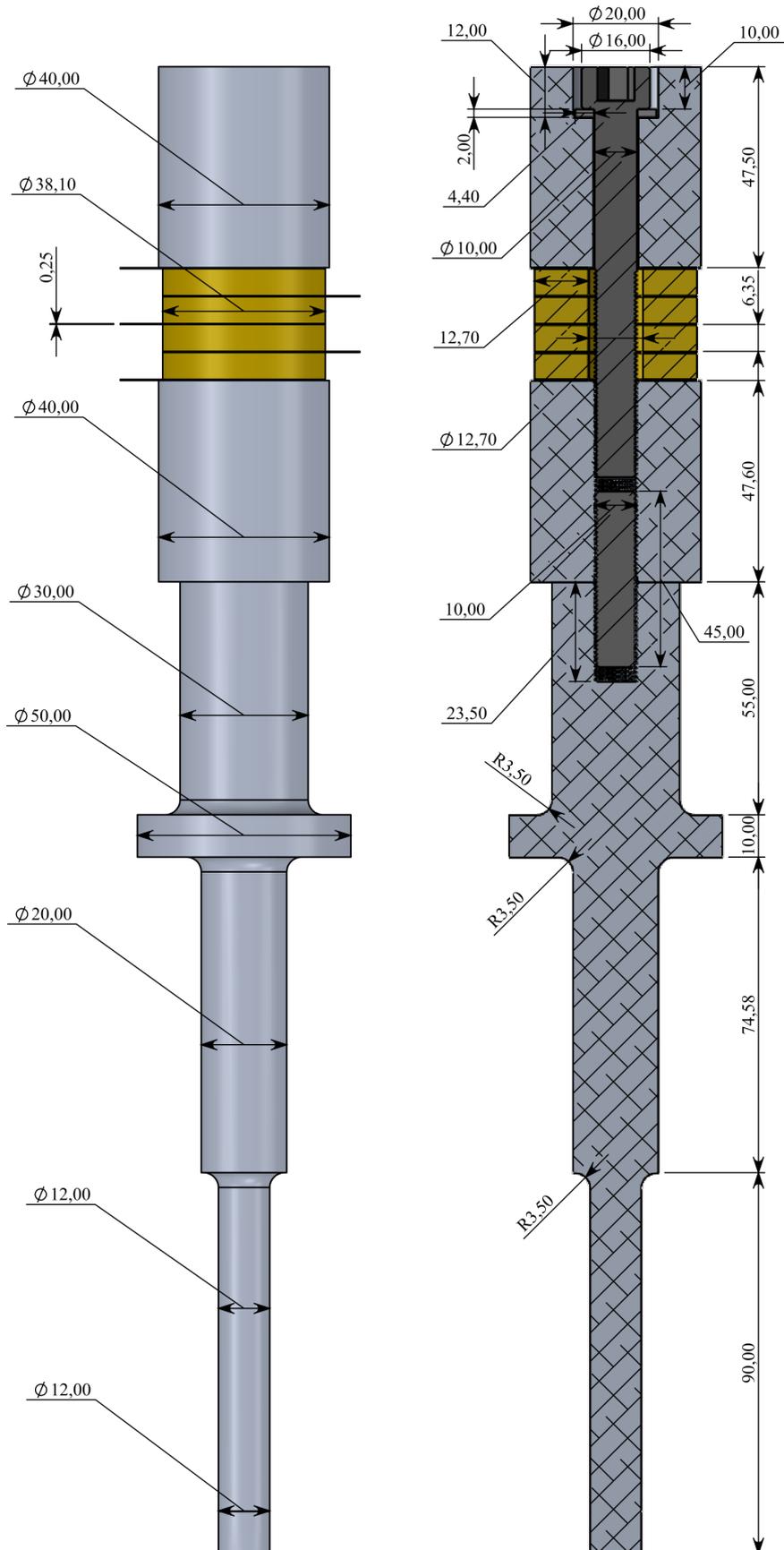
Fonte: O autor (2022).

Tabela 7 – Parâmetros do transdutor com o amplificador ponta reta.

<b>Parâmetro</b>	<b>Expressão</b>	<b>Descrição</b>
h1	47,6 mm	Altura da massa metálica inferior
h2	47,5 mm	Altura externa da massa metálica superior
h3	35,5 mm	Altura interna da massa metálica superior
hcp	10,0 mm	Altura da cabeça do parafuso
hp	$h1 + h3 + 4*ec + ea$	Altura do corpo do parafuso
ec	6,35 mm	Espessura da cerâmica
ea	2,00 mm	Espessura da arruela
r1	20,0 mm	Raio do transdutor
r2	10,0 mm	Raio externo da massa metálica superior
r3	5,10 mm	Raio interno da massa metálica superior
ric	6,35 mm	Raio interno da cerâmica
rec	19,05 mm	Raio externo da cerâmica
rc	$rec - ric$	Raio da cerâmica
rp	5,00 mm	Raio do corpo do parafuso
rcp	8,00 mm	Raio da cabeça do parafuso
ria	5.10 mm	Raio interno da arruela
rea	9,50 mm	Raio externo da arruela
ra	$rea - ria$	Raio da arruela
r4	15,0 mm	Raio antes da flange do amplificador
r5	25,0 mm	Raio da flange do amplificador
r6	10,0 mm	Raio após a flange do amplificador
r7	6,00 mm	Raio antes da ponta do amplificador
r8	6,00 mm	Raio da ponta do amplificador
rf	3,50 mm	Raio do fillet
h4	55,0 mm	Altura antes da flange do amplificador
h5	10,0 mm	Altura da flange do amplificador
h6	74,58 mm	Altura após a flange do amplificador
h7	90,0 mm	Altura da ponta do amplificador
h8	45,0 mm	Altura do parafuso prisioneiro
rt	120,0 mm	Raio do tanque
ht	240,0 mm	Altura do tanque
pml	20,0 mm	Bordas do tanque

Fonte: O autor (2022).

Figura 51 – Transdutor acoplado ao amplificador ponta reta.

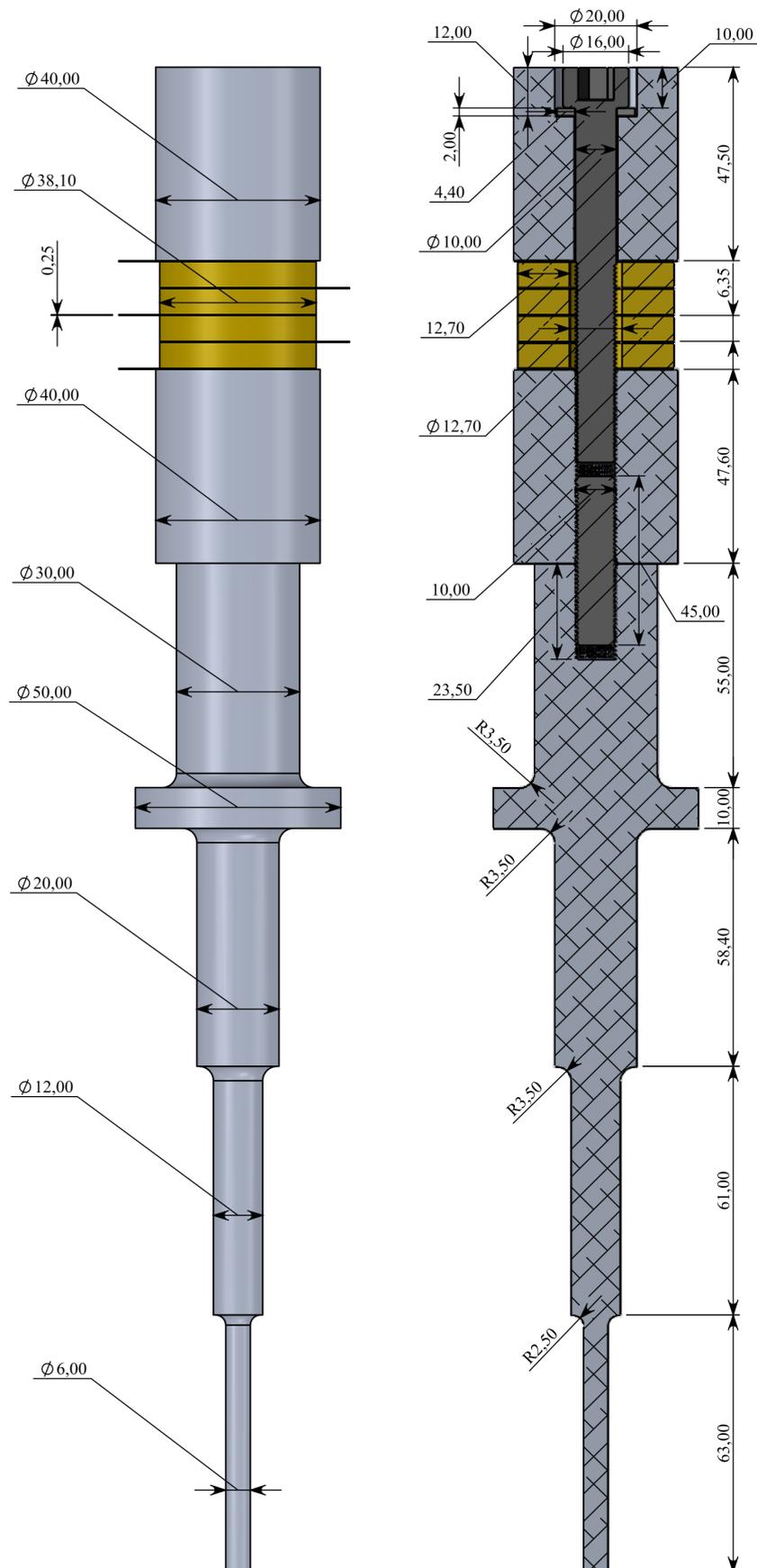


Fonte: O autor (2022).

Tabela 8 – Parâmetros do transdutor com o amplificador escalonado.

Parâmetro	Expressão	Descrição
h1	47,6 mm	Altura da massa metálica inferior
h2	47,5 mm	Altura externa da massa metálica superior
h3	35,5 mm	Altura interna da massa metálica superior
hcp	10,0 mm	Altura da cabeça do parafuso
hp	$h1 + h3 + 4*ec + ea$	Altura do corpo do parafuso
ec	6,35 mm	Espessura da cerâmica
ea	2,00 mm	Espessura da arruela
r1	20,0 mm	Raio do transdutor
r2	10,0 mm	Raio externo da massa metálica superior
r3	5,10 mm	Raio interno da massa metálica superior
ric	6,35 mm	Raio interno da cerâmica
rec	19,05 mm	Raio externo da cerâmica
rc	$rec - ric$	Raio da cerâmica
rp	5,00 mm	Raio do corpo do parafuso
rcp	8,00 mm	Raio da cabeça do parafuso
ria	5.10 mm	Raio interno da arruela
rea	9,50 mm	Raio externo da arruela
ra	$rea - ria$	Raio da arruela
r4	15,0 mm	Raio antes da flange do amplificador
r5	25,0 mm	Raio da flange do amplificador
r6	10,0 mm	Raio após a flange do amplificador
r7	6,00 mm	Raio antes da ponta do amplificador
r8	3,00 mm	Raio da ponta do amplificador
rf	3,50 mm	Raio do fillet
rf2	2,50 mm	Raio do fillet 2
h4	55,0 mm	Altura antes da flange do amplificador
h5	10,0 mm	Altura da flange do amplificador
h6	58,4 mm	Altura após a flange do amplificador
h7	61,0 mm	Altura antes da ponta do amplificador
h8	63,0 mm	Altura da ponta do amplificador
h9	45,0 mm	Altura do parafuso prisioneiro
rt	120,0 mm	Raio do tanque
ht	240,0 mm	Altura do tanque
pml	20,0 mm	Bordas do tanque

Figura 52 – Transdutor acoplado ao amplificador escalonado.



Fonte: O autor (2022).