



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

**YGOR ARMANDO BALBINO FERNANDES**

**ESTUDO E MODELAGEM NUMÉRICA DE UM TRANSDUTOR TONPILZ**

**ARAPIRACA**

**2023**

Ygor Armando Balbino Fernandes

Estudo e modelagem numérica de um transdutor Tonpilz

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

2023



Universidade Federal de Alagoas – UFAL  
*Campus Arapiraca*  
Biblioteca Setorial *Campus Arapiraca* - BSCA

F363e Fernandes, Ygor Armando Balbino  
Estudo e modelagem numérica de um transdutor Tonpilz [recurso eletrônico] / Ygor  
Armando Balbino Fernandes. – Arapiraca, 2023.  
40 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, 2023.  
Disponível em: Universidade Digital (UD) – UFAL (*Campus Arapiraca*).  
Referências: f. 38-40.

1. Transdutores Tonpilz. 2. Física acústica. 3. Resultados – Comparação e  
validação. 4. Simulações. I. Andrade, José Henrique Araújo Lopes de. II. Título.

CDU 53



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL  
UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS  
CAMPUS ARAPIRACA  
CURSO DE FÍSICA LICENCIATURA

### ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Aos 05 dias do mês de abril de 2023, foi realizada a sessão pública de defesa do trabalho de conclusão do curso (TCC) intitulado: *Estudo e modelagem numérica de um transdutor Tonpilz*. O trabalho foi apresentado pelo discente Ygor Armando Balbino Fernandes, cuja matrícula é 17112790, sendo orientado do professor Dr. José Henrique de Araújo Lopes de Andrade. Os trabalhos foram iniciados as 09 horas no laboratório de ensino de Física, pelo professor orientador do TCC e presidente da banca examinadora, constituída pelos seguintes professores: Dr. Emerson de Lima, Dr. José Pereira Leão Neto e Dr. José Henrique de Araújo Lopes de Andrade. A banca examinadora, após apresentação do aluno, passou a arguição e comentários. Encerrados os trabalhos de arguição, os examinadores reuniram-se para avaliação e deram o parecer final sobre a apresentação, defesa oral e trabalho escrito do candidato, tendo sido atribuído o seguinte resultado:

- Aprovado sem restrições com nota 7,0  
 Aprovado com restrições com nota \_\_\_\_\_  
 Reprovado com nota \_\_\_\_\_

Obs.: \_\_\_\_\_

Proclamados os resultados o presidente da banca examinadora deu por encerrados os trabalhos e, para constar eu José Henrique de Araújo Lopes de Andrade, lavrei a presente ATA que assino com os demais membros da banca examinadora.

Arapiraca, 05 de abril de 2023.

  
\_\_\_\_\_  
Dr. Emerson de Lima

  
\_\_\_\_\_  
Dr. José Henrique de Araújo Lopes de Andrade

  
\_\_\_\_\_  
Dr. José Pereira Leão Neto

Dedico este trabalho aos meus pais, Silvania Balbino e José Rodrigues, a minha irmã Ynglidy Larryanny, e a minha avó materna, Rosália Francisca.

## AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar sou grato a Deus, por Ele estar sempre ao meu lado, principalmente nos momentos mais difíceis da minha vida, das vezes que pensei em desistir, e como um milagre, enviava um anjo em forma de pessoa para me motivar e nunca permitir que isso acontecesse. Sou grato a Ele por ter me presenteado com minha família a qual tenho muito orgulho de fazer parte.

Sou grato aos meus pais (José e Silvania), a eles que não tiveram oportunidades de estudar, mas, me incentivavam, me aconselhavam e lutaram juntos para que esse sonho, meu e deles, pudesse acontecer. Sou grato a eles por me ensinarem os valores e princípios que levarei comigo para sempre, pelo carinho e o amor incondicional que sempre tiveram por mim. Agradeço a compreensão e por sempre acreditarem em mim. Agradeço a minha irmã (Ynglidy), pelo carinho e por todo apoio. Agradeço, ainda, a minha querida avó (Rosália), por todo o amor, carinho e pelas inúmeras vezes que se preocupou comigo.

A todos os amigos de infância, Davi e Danilo, Ronielson, Ronaldo e Ronivaldo, Manoel (nego), Alisso (Alinho), Alisson Pinheiro, Emerson (Manchete), Aldarlan (Zé do caixão) e Eduardo (dudu), entre outros, a todos que, mesmo depois de tanto tempo a amizade continua como se o tempo não tivesse passado. Agradeço também, as amizades que construí durante o tempo em que estive na UFAL, ao Antonio (Neto) e Anderson, Hugo, Jardiel, Pedro, Mateus, Felipe e Rivaldo, e entre tantos outros que não dá para citar aqui, mas que contribuíram na minha formação seja na troca de conhecimentos ou por tornaram os dias mais leves e descontraídos.

A todo o corpo docente do curso de Física Licenciatura UAFAL - *Campus Arapiraca*, por todo o conhecimento compartilhado durante esses anos de formação, os quais me proporcionaram uma excelente formação acadêmica, entendo o motivo de as vezes serem rígidos, pois a finalidade disso era mostrar que podemos ser melhores.

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

A CNPq pelo apoio financeiro durante essa jornada.

“[...] Não desista de nunca desistir [...]”

(Guilherme de Sá, Acenda a luz, 2012).

## RESUMO

Os transdutores Tonpiliz possuem características das quais proporcionam um ótimo desempenho mesmo estando operando em frequências relativamente baixas, e proporcionando uma potência consideravelmente alta. Os transdutores Tonpiliz tem grande relevância por seu desempenho superior em aplicações de comunicação e detecção de alvos subaquáticos. Vários esquemas de design para ampliar sua eficiência tem sido realizado, todavia, esses estudos resultam em estruturas complexas ou arranjo de componentes adicionais, os quais não vale o custo, mesmo com os benefícios que eles trazem. Tendo isso em vista, o nosso trabalho se concentra em melhorar o desempenho do transdutor Tonpiliz, entretanto, com o intuito de permanecer o seu design e em contra partida testar outros materiais com um custo mais acessível. A ideia deste trabalho é realizar uma comparação do transdutor simulado, através do método de elementos finitos (MEF) por meio do software COMSOL Multiphysics, com um transdutor já construído, onde tiramos todas as medidas deste transdutor para que a simulação fosse realizada. Após isso, comparamos os resultados e a diferença foi menor que 6%, consideramos que esta diferença está dentro da margem de erro quando comparamos o simulado com o construído. Feita a validação realizamos as simulações com três materiais diferentes na massa superior, e assim analisamos qual massa obteve um melhor desempenho nas mesmas condições do transdutor de referência que possui uma massa superior em latão.

**Palavras-chave:** transdutores Tonpiliz; física acústica; comparação e validação dos resultados; Simulações em diferentes parâmetros.



## ABSTRACT

The tonpiliz transducers have characteristics which provide a great performance even when operating at relatively low frequencies, and providing a considerably high power. tonpiliz transducers are highly relevant for their superior performance in underwater target detection and communication applications. Several design schemes to increase their efficiency have been carried out, however, these studies result in complex structures or arrangement of additional components, which are not worth the cost, even with the benefits they bring. With that in mind, our work is focused on improving the performance of the tonpiliz transducer, however, with the intention of maintaining its design and, in contrast, testing other materials with a more affordable cost. The idea of this work is to carry out a comparison of the simulated transducer, through the finite element method (FEM) through the COMSOL Multiphysics software, with a transducer already built, where we took all the measurements of this transducer so that the simulation could be carried out. After that, we compared the results and the difference was less than 6%, we consider that this difference is within the margin of error when comparing the simulated with the constructed one. After validation, we carried out the simulations with three different materials in the upper mass, and thus we analyzed which mass had the best performance under the same conditions as the reference transducer, which has a greater mass in brass.

**Key words:** Tonpiliz transducers; acoustic physics; comparison and validation of results; simulations in different parameters.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Ilustração do espectro sonoro .....	13
Figura 2- Composição de um transdutor de Langevin e representação do circuito elétrico.....	16
Figura 3- Representação do transdutor tonpilz com duas cerâmicas PZTs.....	17
Figura 4- Área do COMSOL onde se escolhe a dimensão a ser utilizada.....	19
Figura 5- Tela de trabalhos do software COMSOL.....	20
Figura 6- Transdutor de referência.....	22
Figura 7- Geometria do transdutor Tonpilz.....	23
Figura 8- Representação da discretização do Método de Elementos Finitos (MEF).....	24
Figura 9- Conjunto analisador TRZ e transdutor Tonpilz.....	28
Figura 10- Faixa de frequência selecionada.....	28
Figura 11- Gráfico do relatório gerado pelo software TRZ.....	29
Figura 12- Gráfico representando as curvas de impedância coletados experimentalmente e numericamente.....	31
Figura 13- Gráfico da impedância elétrica com os mesmos parâmetros para a massa superior.....	32
Figura 14- Representação gráfica dos deslocamentos.....	33
Figura 15- Gráfico de impedância com todas as curvas juntas.....	35
Figura 16- Gráfico com todas as curvas de deslocamento.....	35

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 - Parâmetros utilizados na modelagem do transdutor Tonpilz.....	21
Tabela 2- Dados gerados pelo software TRZ.....	30
Tabela 3- Altura das massas simuladas.....	36

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>11</b>
<b>2</b>	<b>TRANSDUTORES DE POTÊNCIA.....</b>	<b>13</b>
2.1	Ultrassom.....	13
2.2	Principais características da piezoeletricidade.....	13
2.3	Impedância.....	14
2.4	Deslocamento mecânico.....	14
2.5	Origem.....	14
2.6	O que são.....	15
2.7	Funcionamento.....	15
<b>3</b>	<b>MODELAGEM NUMÉRICA DE UM TRANSDUTOR TONPILZ.....</b>	<b>18</b>
3.1	Simulações numéricas.....	18
3.2	Modelagem numérica.....	18
3.3	Geometria do transdutor.....	22
3.4	Métodos de elementos finitos.....	24
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCURSÕES.....</b>	<b>26</b>
4.1	Validação.....	26
4.2	Análise.....	34
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>37</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>38</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O Transdutor Langevin ou Transdutor Sanduíche ultrassônico é uma estrutura ressonante de meia onda que utiliza uma alta tensão de alta frequência para gerar vibrações mecânicas, com a ajuda de efeito piezoelétrico. O efeito piezoelétrico foi descoberto em 1880 pelos irmãos Curie e utilizado em uma aplicação prática pela primeira vez por Paul Langevin no desenvolvimento de sonares durante a primeira guerra mundial. Langevin utilizou cristais de quartzo acoplados a massas metálicas (inventando o transdutor tipo Langevin) para gerar ultrassom na faixa de algumas dezenas de kHz. Após a primeira guerra mundial, devido à dificuldade de se excitar transdutores construídos com cristais de quartzo e por estes demandarem geradores de alta tensão, iniciou-se o desenvolvimento de materiais piezoelétricos sintéticos. Estes esforços levaram à descoberta e aperfeiçoamento nas décadas de 40 e 50, das cerâmicas piezoelétricas de Titanato de Bário e das cerâmicas piezoelétricas de Titanato Zirconato de Chumbo (PZT's) (ITABORAY *et al.*, 2014).

As primeiras aplicações enfatizando o uso de transdutores ultrassônicos de potência, surgiram com os trabalhos de R.W Wood e A.L. Loomis em 1927, apresentando um dispersor de gotas ultrassônico (TAYRA, 2014). 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 (MODRRES-GHEISARI *et al.*, 2019), sonares (FITZPATRIK; SINGHVI; ARBABIAN, 2020), acelerar reações químicas (OLIVEIRA *et al.*, 2018), limpeza de bio-incrustações (LEGG *et al.*, 2015), encapsular fármacos (KUMAR; SINHGH; GARG, 2019), (PEREIRA *et al.*, 2016) e terapia de ultrassom (KIM *et al.*, 2008)

Um transdutor Tonpilz é uma das escolhas mais populares para transmitir ondas sonoras como um projetor ou para receber as ondas como um hidrofone em aplicações subaquáticas. Um transdutor Tonpilz típico é composto por uma cabeça leve para irradiar ondas acústicas, uma pilha de material piezoelétrico como uma seção de acionamento, uma massa trazeira pesada para amplificar o deslocamento da massa da cabeça, e um parafuso para prender todos os componentes juntos (KIM; ROH, 2016). O transdutor tonpilz é ideal para gerar ondas de alta potência devido a sua estrutura compacta, contudo, ele só apresenta um modo de vibração, longitudinal. Estudo na melhoria do transdutor tonpilz são realizados como, no processo de

melhoria de equipamentos para detecção de submarinos (SANTOS, 2015) e como já foi mencionado anteriormente em limpeza de bio-incrustações (LEGG *et al.*, 2015).

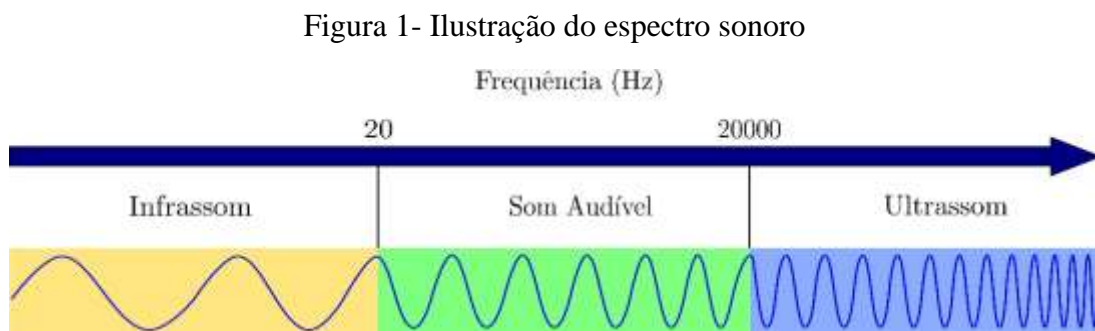
Neste trabalho, transdutores de Langevin do tipo Tonpiliz, foram simulados com o objetivo de analisar a dependência das amplitudes de deslocamento com as propriedades mecânicas dos materiais que constituem a massa traseira. Realizamos a validação do nosso código através da modelagem de um transdutor já existente no laboratório e comparamos as curvas de impedância elétrica teórica e experimental após a validação

## 2 TRANSDUTORES DE POTÊNCIA

### 2.1 Ultrassom

O ultrassom é definido como o ramo da acústica referente à geração de ondas sonoras em frequências superiores a 16 kHz, acima do limite audível para o ser humano. As ondas sonoras com frequências localizadas contribuem no processo de geração de imagens, como, por exemplo, na ultrassonografia, as frequências dessas ondas podem variar entre 1 e 10 MHz são usadas.

Após o fim da segunda guerra mundial o ultrassom tem sido uma técnica indispensável em diversas aplicações otimizando processos industriais, ressaltando o seu papel com inovações tecnológicas por todo o mundo. A invenção de um dispositivo que emitia ondas de ultrassom foi considerada um feito histórico devido a sua utilidade, principalmente, no requisito militar. Abaixo a Figura 1 apresenta um espectro sonoro, nele são representadas as frequências na faixa dos infrassons, sons audíveis e ultrassons.



Fonte: Costa (2022).

### 2.2 Principais características da piezoelectricidade

*Piezoelectricidade:* É a propriedade que alguns materiais ferroelétricos apresentam, quando este material recebe uma pressão mecânica em sua superfície, gerando cargas livres. Isso acontece pelo fato de que materiais piezoelétricos conseguem guardar cargas em seus cristais, quando uma tensão mecânica é aplicada causando uma deformação em sua estrutura cristalina, ocorrendo assim o “efeito piezoelétrico direto”.

Por semelhança, existe o “efeito piezoelétrico reverso” que ocorre quando aplicamos um sinal elétrico na superfície de material piezoelétrico e então ele responde com uma vibração

mecânica. Esse sinal quando é aplicado causa uma deformação no material que pode se expandir acompanhando as linhas do campo elétrico.

### **2.3 Impedância**

Os resultados mais relevantes para este trabalho, são aqueles que comprovam que o transdutor está funcionando corretamente para o qual foi projetado. Então, primeiro analisamos a impedância elétrica do mesmo. A impedância é a medida da oposição à passagem de corrente elétrica em uma determinada frequência. É uma grandeza vetorial que varia em função da frequência em componentes reativos, por exemplo, em capacitores e indutores. No caso particular dos resistores, que não são reativos, a impedância elétrica é constante e igual à sua resistência. No caso dos transdutores e conjuntos acústicos, a dependência da impedância com a frequência é complexa e está relacionada com as frequências de funcionamento.

### **2.4 Deslocamento mecânico**

Foi analisada a amplitude do deslocamento causado na ponta do transdutor Tonpiliz para os diferentes materiais que compuseram a massa traseira. O deslocamento é maior quando o dispositivo está em módulo de vibração, ou seja, operando em uma frequência de ressonância, podendo gerar amplitudes máximas no deslocamento da ponta do transdutor. Isso ocorre, porque, cada material elástico tem uma frequência natural de vibração, e essa frequência depende de fatores como a elasticidade do material e o formato do objeto. Quando o dispositivo atinge essa frequência natural todo o conjunto opera em uma certa harmonia, minimizando os gastos energéticos e aumentando o seu desempenho.

### **2.5 Origem**

Os transdutores de ultrassom são construídos a partir do elemento piezoelétrico e podem ter um único elemento ou ser multielementos. Dependendo da aplicação, o elemento piezoelétrico é quem determina a frequência de operação do transdutor (BISCEGLI, 2004). O efeito piezoelétrico foi descoberto em 1880 por Pierre e Jacques Curie e não foi usado em transdutores práticos até o fim da Primeira Guerra Mundial, quando Paul Langevin tentou aplicar quartzo de cristal como meio de localizar submarinos alemães (GALLOGO-JUAREZ, 1989). Contudo, ainda sim o dispositivo foi construído e utilizado para realizar sondagens de profundidade no mar em busca de submarinos Alemães. Langevin foi o pioneiro na construção de transdutores de ultrassom ou transdutores de potência, como é comumente utilizado.



Atualmente existem muitas configurações de transdutores, mas quase todas essas configurações partem da base de um transdutor de Langevin.

## **2.6 O que são?**

Os transdutores de potência são dispositivos aos quais operam produzindo ondas de ultrassom. Eles têm a capacidade de converter um determinado tipo de energia em outra (GALLOGO-JUAREZ, 1989). Os transdutores podem operar em diferentes frequências de vibração, ultrapassando os 20 kHz, como é o caso deste dispositivo em estudo. Um transdutor Tonpilz típico é composto por uma massa inferior leve para irradiar ondas acústicas, uma pilha de material piezoelétrico como uma seção de acionamento, uma massa superior pesada para amplificar o deslocamento da massa inferior, e um parafuso para prender todos os componentes juntos e causar uma pré-tensão. O transdutor Tonpilz é muito adequado para gerar ondas acústicas de alta potência devido a esta estrutura apertada. Muitos estudos tem sido realizado para ampliar a largura de banda de frequência do transdutor por métodos como a combinação do modo longitudinal com outros modos de vibração do transdutor. Neste trabalho, basicamente, simulamos diferentes materiais em sua massa superior, e validamos os resultados através do transdutor simulado e as medidas feitas com o transdutor usinado.

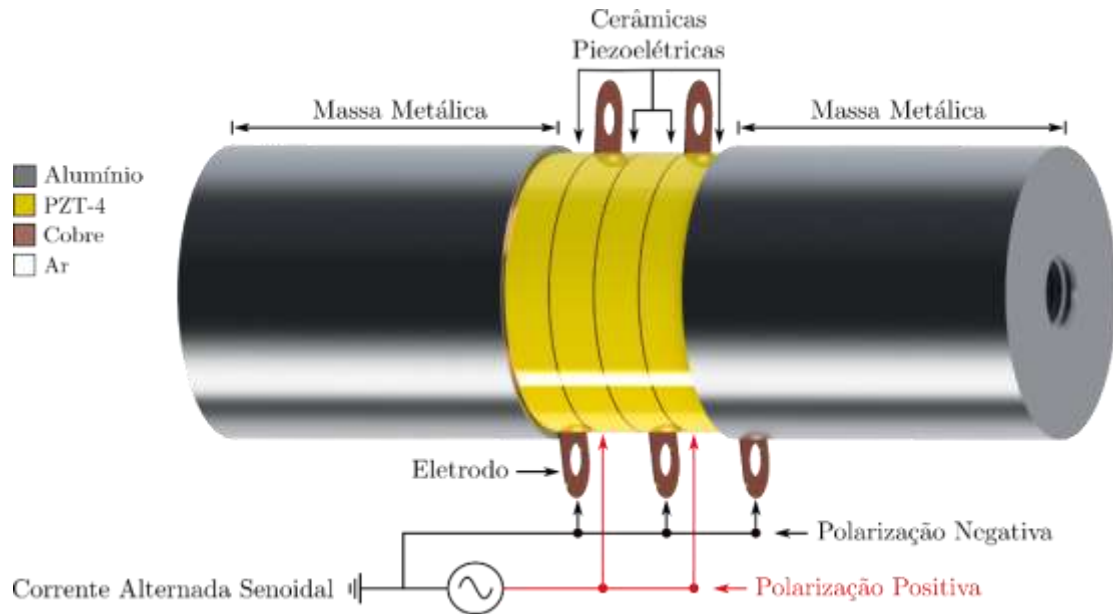
Além disso, o transdutor Tonpilz consegue operar em frequências relativamente baixas, mas entregando uma alta potência em seu desempenho. Estudaremos neste modelo a resposta em frequência do transdutor. A Interação Acústica-Piezoelétrica, Interface de Domínio de Frequência do Módulo de Acústica que é usada para o estudo. Esta interface possui todos os acoplamentos multifísicos pré-definidos necessários para modelar este sistema (estrutura acústica e estrutura elétrica).

## **2.7 Funcionamento**

Neste tipo de dispositivo o princípio básico de funcionamento consiste na geração de vibrações mecânicas, basicamente, o transdutor ultrassônico consiste de cerâmicas piezoelétricas empilhadas entre duas massas metálicas e presas, sofrendo uma tensão por um parafuso de alta resistência mecânica. 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. Além disso, eletrodos são colocados entre as cerâmicas piezoelétricas, e entre as cerâmicas e as massas metálicas. 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 (TAYRA, 2014). Como mostra a Figura 2.

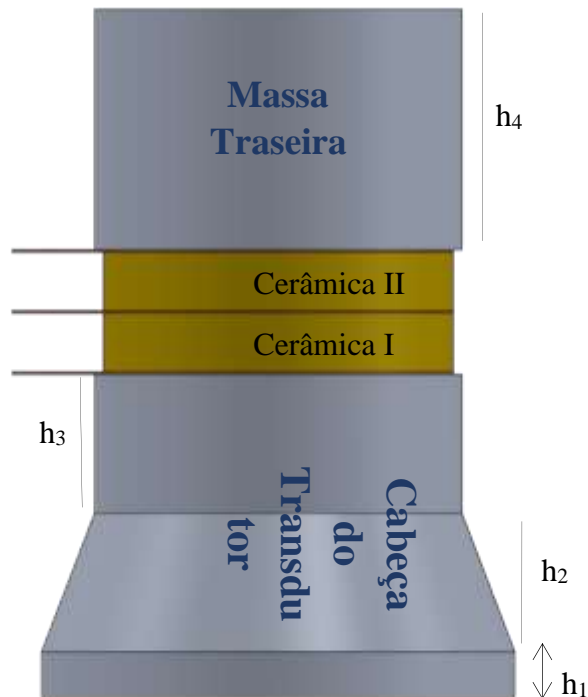
Figura 2- Composição de um transdutor de Langevin e representação do circuito elétrico.



Fonte: Costa (2022).

O mesmo esquema é usado na construção do transdutor Tonpilz, assim como o transdutor de potência, ele contém duas massas, uma inferior e outra superior. Na figura acima o transdutor foi construído com quatro cerâmicas de material PZT, mas, não existe um padrão de quantas cerâmicas utilizar, normalmente quanto maior a quantidade de cerâmicas maior é a potência que o dispositivo entrega. Outro ponto importante é que o comprimento do transdutor é equivalente ao seu modo de vibração, com isso, para que um transdutor opere em ressonância é essencial que seu comprimento seja  $(L = \lambda/2)$ , onde  $L$  é o comprimento do transdutor e  $\lambda$  é o comprimento de onda emitida pelo transdutor dividido por dois. Nestas condições, todo o sistema estará operando em ressonância.

Figura 3- Representação do transdutor tonpizl com duas cerâmicas PZTs.



Fonte: O autor (2023).

Na figura a cima demonstra toda a geometria do transdutor dividida por partes. Os nomes como massa traseira, cabeça do transdutor ou massa inferior, são referentes a geometria do transdutor, facilitando o processo de modelagem. Para a modelagem do transdutor (*Tonpizl*) dividimos ele em quatro partes;  $h_1$ ,  $h_2$ ,  $h_3$ , onde somados são a altura da cabeça do transdutor, e  $h_4$ , que representa a altura total da massa traseira. O transdutor do tipo Tonpiz opera na faixa de frequência de 25 kHz, mas, isso só é possível graças a pilha de cerâmicas que estão acopladas entre as duas massas metálicas. Quando conectada a uma tensão elétrica as cerâmicas piezoelétricas apresentam um fenômeno chamado de efeito reverso, esse efeito é responsável por fazer as cerâmicas se expandirem quando a tensão elétrica é aplicada. Esse processo pode ocorrer várias vezes por segundo, gerando vibrações mecânicas.

### **3 MODELAGEM NUMÉRICA DE UM TRANSDUTOR TONPILZ**

#### **3.1 Simulações numéricas**

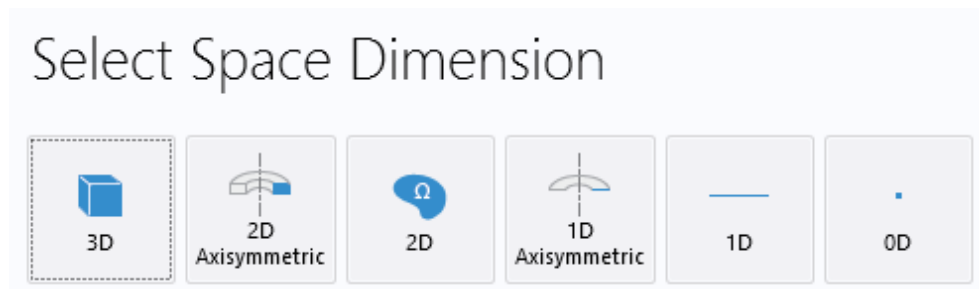
Simulações numéricas vem sendo bastante utilizadas, devido a sua capacidade de executar cálculos baseado em um modelo matemático específico para estimular os processos físicos reais. Com as simulações conseguimos criar estruturas geometrias e sistemas físicos que ajudam na análise das simulações. É a mais poderosa ferramenta de análise para problemas físicos complexos e problemas de engenharia. Tecnologia de simulação numérica avançada integra diversos conceitos, tais como, mecânica, física dos materiais, poder computacional e física. Sem dúvidas é uma ferramenta que possibilita uma análise do comportamento do material sobe determinadas condições.

#### **3.2 Modelagem numérica**

Para a modelagem do transdutor Tonpiliz utilizamos o software COMSOL Multiphysics, com ele pudemos realizar as modelagens e simulações numéricas a fim de analisar problemas abordados em diferentes áreas da ciência e da engenharia. Para a realização de seus cálculos computacionais ele baseia-se no modelo de elementos finitos (MEF), com esse método de cálculo o software realiza uma discretização e subdivide a geometria de estudo em várias partes infinitesimais, e então, realiza o cálculo para cada parte dividida. Isso exige um poder computacional considerável, entretanto, quanto maior o número de elementos mais próximo de um resultado real a simulação será.

Dentro do software COMSOL podemos escolher as dimensões em que iremos realizar a simulação numérica. A escolha da dimensão espacial depende do problema em que a simulação está relacionada, sendo assim, vale lembrar que, quanto maior for a expansão espacial, maior será o gasto computacional para realizar os cálculos das simulações. A Figura 4 representa a área de seleção das dimensões espaciais, onde permite o usuário escolher uma dimensão que se encaixe na solução do seu problema. Para a simulação do transdutor Tonpiliz a dimensão escolhida foi a 2D axisymmetric. A sua escolha está relacionada com o baixo custo computacional quando comparada com a dimensão 3D, ela ainda permite rotacionar o plano em torno de um eixo de simetria para que sejam obtidos resultados em três dimensões. Os transdutores de Langevin possuem simetria radial, por isso, podemos fazer o desenho da geometria do transdutor em um plano e ao realizar os cálculos software já aplica a simetria automaticamente.

Figura 4- Área do COMSOL onde se escolhe a dimensão a ser utilizada.



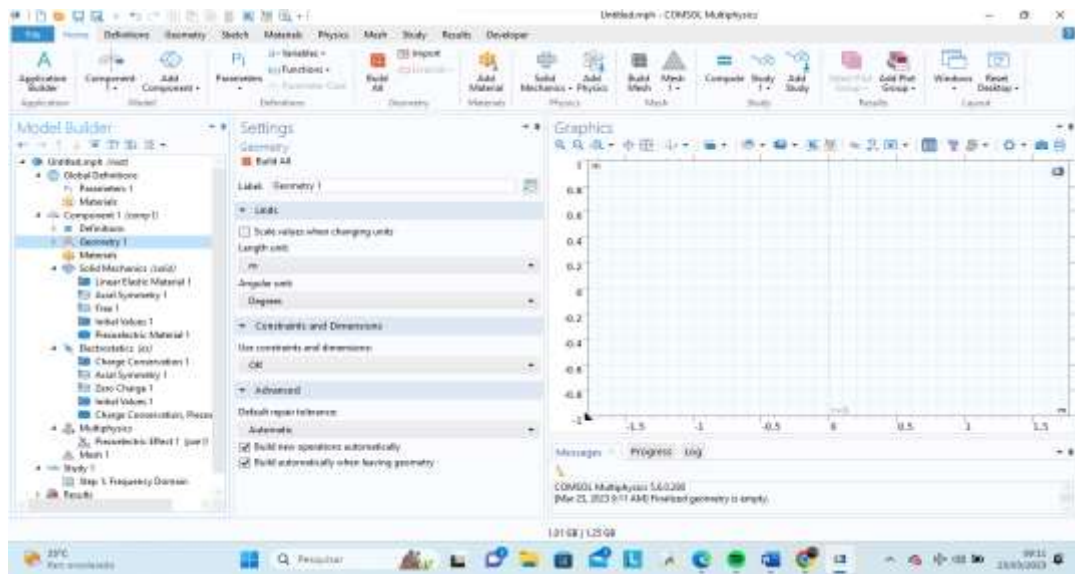
Fonte: O autor (2023).

Escolhida a dimensão espacial, precisamos agora escolher os domínios físicos em que vamos acoplar na geometria e analisar o comportamento do dispositivo. Por isso, devido as características do transdutor adicionamos dois domínios físicos, a mecânica dos sólidos, que nos permite analisar a estrutura mecânica e elástica do transdutor. Também inserimos a física eletrostática que nos ajuda a analisar os componentes elétricos do dispositivo.

Por fim, para que possamos entender, quantificar e qualificar os resultados, a ferramenta “*study*” nos permite adicionar alguns estudos que permite analisar os módulos da frequência de domínio. O COMSOL disponibiliza em sua biblioteca muitos estudos onde cada um tem sua função dentro da simulação. Entretanto, apenas dois já satisfazem nossa análise, que são eles, *Frequency Domain* e o *Eigenfrequency*. A *Frequency Domain* consiste em calcular a resposta de um modelo linear ou linearizado submetido à excitação harmônica para uma ou várias frequências. Já o *Eigenfrequency* são certas frequências discretas nas quais um sistema tende a vibrar. Logo, este estudo busca analisar as frequências naturais que aparecem em muitos tipos de sistemas, por exemplo, como ondas estacionárias em um circuito elétrico RLC.

A imagem abaixo representa a tela principal do software COMSOL, nela podemos localizar vários tipos de ferramentas e funções em sua barra de tarefas, nela podemos adicionar os materiais ou até mesmo inserir um novo estudo. No canto esquerdo do monitor está a parte de “*model builder*” que traduzindo de forma literal significa construtor de modelos, nele alguns campos podem ser encontrados, como a geometria e materiais, é nela onde construímos os desenhos geométricos e para onde os materiais que são adicionados ficam. Na parte central da tela está o campo “*settings*” nele podemos realizar configurações das geometrias e algumas propriedades referentes a construção do dispositivo, como o material. Por fim, a parte na direita da tela “*Graphics*” é o local onde são ilustrados os desenhos dos modelos, os gráficos e curvas como a impedância elétrica e o deslocamento.

Figura 5- Tela de trabalhos do software COMSOL.



Fonte: O autor (2023).

Para que possamos realizar a simulação de um transdutor, vimos que se precisa seguir todo um passo a passo para que não ocorra erros. Sendo assim, para que possamos modelar ou realizar um desenho geométrico de um transdutor precisamos ter medidas e parâmetros os quais irão nos ajudar como um guia. Bem intuitivamente o próprio software tem um campo onde preenchemos para os valores das medidas, ou seja, cada relação com altura, largura, espessura e diâmetro que uma figura terá, as informações serão tiradas dessa parte de parâmetros, e assim, utilizar na modelagem. Na Tabela 1 são apresentados os parâmetros que utilizamos para modelar o transdutor Tonpiliz, e detalhe, esses valores foram colhidos do transdutor Tonpiliz real. Os valores foram coletados com a ajuda de paquímetro.

Tabela 1- Parâmetros utilizados na modelagem do transdutor Tonpiliz.

<b>Parâmetros</b>	<b>Expressão</b>	<b>Descrição</b>
h1	5 mm	Altura da parte I massa metálica
h2	15 mm	Altura da parte II massa metálica
h3	15 mm	Altura da parte III massa metálica
h4	26 mm	Altura externa da massa metálica traseira
h5	14 mm	Altura interna da massa metálica traseira
hcp	10 mm	Altura da cabeça do parafuso
ec	6,35 mm	Espessura da cerâmica
rec	19,05 mm	Raio externo da cerâmica
ric	6,35 mm	Raio interno da cerâmica
rc	12,7 mm	Raio da cerâmica
rcp	8 mm	Raio da cabeça do parafuso
rp	5 mm	Raio do parafuso
ea	2 mm	Espessura da arruela
rea	10 mm	Raio externo da arruela
ria	5,1 mm	Raio interno da arruela
ra	4,9 mm	Raio da arruela
r1	25 mm	Raio 1 da massa metálica inferior
r2	20 mm	Raio 2 da massa metálica inferior
r3	10 mm	Raio 3 interno da massa metálica superior
hp	63,7 mm	Altura do corpo do parafuso
r4	5,1 mm	Raio interno da massa metálica superior
r5	70 mm	Raio da barra metálica
h6	20 mm	Altura da barra
f	30 kHz	Frequência do transdutor
$\lambda$	$V_0/f$	Comprimento da onda

Fonte: O autor (2023).

### 3.3 Geometria do transdutor

O transdutor Tonpizl consiste de uma massa inferior, a qual geralmente é um material leve para que possa ter uma força de radiação melhor, duas cerâmicas piezelétricas, uma massa superior, e essa massa é geralmente um material com maior densidade, mais pesado, para que ele contribua com a massa inferior no processo de radiação, além disso, temos um parafuso e uma arruela, nesse caso o material de ambos deve ser um material muito resistente, isso se faz necessário devido ao processo de expansão e compressão, propriedade presente nas cerâmicas piezelétrica. Quando aplicamos uma tensão elétrica na superfície das cerâmicas, seu comportamento é inverso e por consequência se expande e quando sessa a tensão ela volta para seu tamanho original. Com isso, esse procedimento repedido várias vezes e de forma muito rápida faz com que o transdutor opere em altas vibrações. Abaixo a Figura 6 mostra uma foto do transdutor analisado neste trabalho.

Figura 6- Transdutor de referência.



Fonte: Autor (2023).

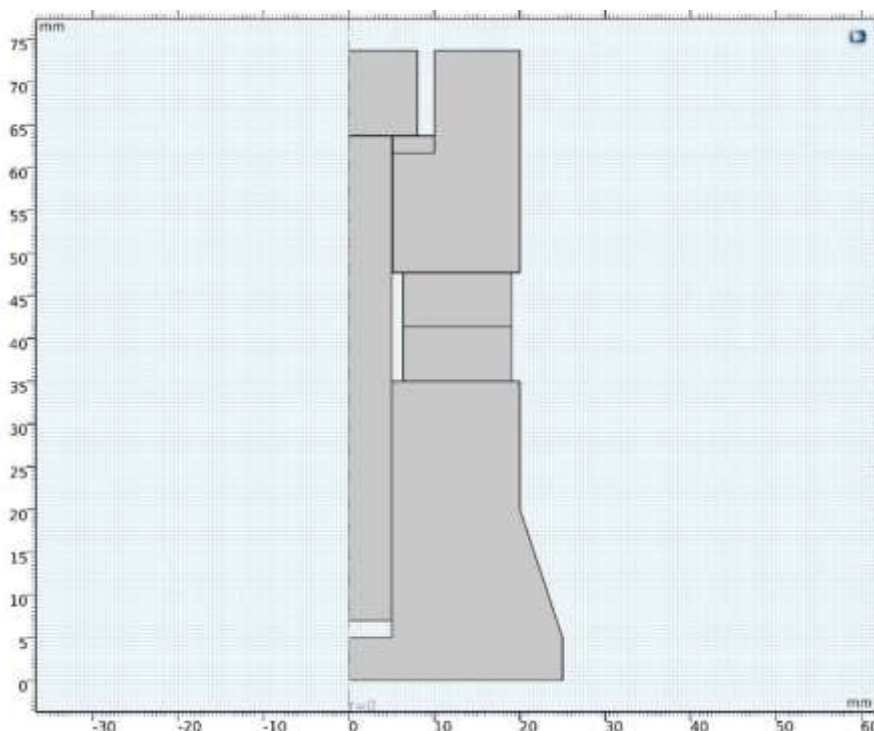
Após coletar as medidas do transdutor de referência, parâmetros apresentados na tabela 1, preenchemos os valores no software onde a partir desses valores construiremos cada parte da geometria do transdutor. Depois de realizar o desenho geométrico, foram escolhidos os materiais para cada componente do transdutor, neste caso seguimos as informações do



transdutor de referência. Na massa inferior (cabeça do transdutor) foi adicionado o material alumínio, sob esta massa acrescentamos as cerâmicas, o software também disponibiliza materiais com propriedades elétricas, com isso, utilizamos o material piezelétrico titanato zirconato de chumbo (PZT-4). Chegando na massa superior (massa traseira do transdutor) o material utilizado foi o latão (UNS C26000), no parafuso e a arruela adicionamos o aço (Steel AISI 4340) devido a sua alta resistência.

Foram adicionadas a cada material as físicas correspondentes. *Solid Mechanics*, com ele podemos analisar o comportamento dos materiais sólidos e sua elasticidade. A outra física escolhida para análise foi a *Electrostatics*, com ela foram analisadas as propriedades elétricas do material, ela é responsável por aplicar a tensão desejada nos terminais da cerâmica (eletrodos). A ideia destas análises é tornar a simulação mais próxima possível do real para que possamos fazer a comparação e validar o sistema de estudo.

Figura 7- Geometria do transdutor Tonpiliz.



Fonte: O autor (2023).

Ao realizar a simulação analisamos a curva de impedância, o seu valor tem que está em torno de 25 kHz já que esse é o valor obtido pelo transdutor referência. É desejável para a análise que toda a estrutura esteja operando em sua frequência natural, ou seja, se o dispositivo está em seu modo de vibração máximo e a impedância precisa ser mínima, assim, dizemos que

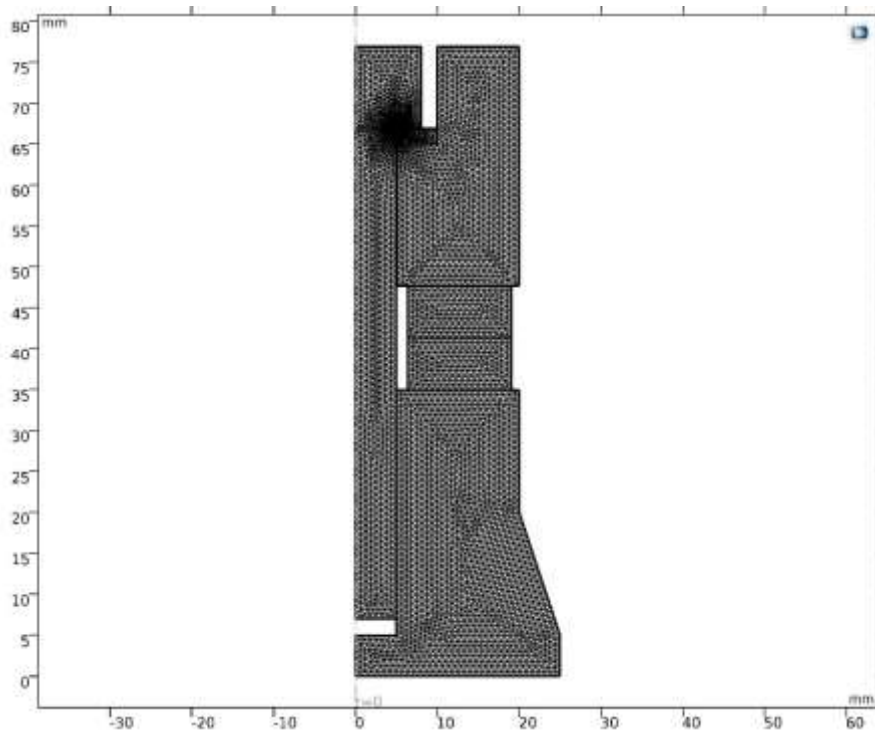
este dispositivo está em ressonância. Isso é importante na análise quando falamos de eficiência, pois quando operando em ressonância seu desempenho melhor e opera com baixo custo energético.

### 3.4 Métodos de elementos finitos

O Método dos Elementos Finitos (MEF) é um procedimento numérico desenvolvido para a análise de estruturas e meios contínuos. É uma técnica usada para obter soluções aproximadas de equações diferenciais infinitas em equações diferenciais finitas (CHIQUESI A. P. L., & PEGORETTI T. S. 2020).

Para tal, o Comsol utiliza o método de elementos finitos (MEF). Quando se quer aplicar o MEF em uma geometria de simulação, a estrutura em questão é dividida em formas simples, como triângulos ou quadrados, estruturas planas.

Figura 8- Representação da discretização do Método de Elementos Finitos (MEF).



Fonte: O autor (2023).

Isso gera uma espécie de malha como demonstrado na Figura 8. Para ser exato, essa divisão é chamada de rede de elementos finitos. Com a ferramenta *Size*, é possível definir os

parâmetros dos elementos, bem como, a variação do seu tamanho e a forma simples utilizar. Cada ponto de intersecção dessa rede é denominado de nó.

Basicamente este método consiste em solucionar problemas que contemplam regiões de domínios extensos e complexos, através da discretização destes domínios ( $\Omega_d$ ) em um número finito de sub-regiões de geometria simplista, denominadas de elementos ( $\Omega_e$ ), os quais obedecem a seguinte relação:

$$\Omega_d = \sum_{i=1}^{ne} \Omega_e$$

Sendo  $ne$  o número total de domínios elementares ( $\Omega_e$ ), que compreendem o domínio total ( $\Omega_d$ ).

Após subdividir o domínio em elementos menores e geometricamente mais simples, são traçadas funções de interpolação unitárias definidas em pontos específicos desses elementos, sendo amplificadas por variáveis. São essas funções de interpolação que nos permitem representar domínios contínuos através de elementos discretos (GONÇALVES *et al.*, 2016).

## 4 RESULTADOS E DISCURSÕES

Foi realizada as simulações com diferentes massas na parte superior do transdutor. O transdutor referência têm alumínio como componente da sua massa inferior e latão como componente da sua massa superior. Notamos que esse tipo de transdutor consegue entregar uma força de radiação considerável operando com baixo custo energético. Com isso, a simulação de massas comumente conhecidas e mais pesadas que o latão poderia, talvez, aumentar o deslocamento da ponta do transdutor bem como melhorar o desempenho do dispositivo. Além disso, realizamos de início quatro simulações com quatro diferentes materiais na massa superior, detalhe, permanecemos os parâmetros em todos os casos e analisamos a frequência de vibração, impedância e o deslocamento da ponta do transdutor, massa inferior de cada simulação. Por fim, realizamos novamente mais quatro simulações mudando o tipo de massa na parte superior do transdutor, dessa vez alterando os parâmetros da massa superior de cada transdutor para que pudéssemos analisar o transdutor em ressonância e operando com a frequência e a impedância em torno de 25 kHz, e assim, analisar o deslocamento da massa inferior.

### 4.1 Validação

Foram realizadas simulações numéricas de um transdutor de Langevin do tipo Tonpiliz, e tiveram como base um transdutor confeccionado em laboratório. Nessas simulações foi-se necessário que o transdutor tivesse os mesmos parâmetros do transdutor confeccionado. O processo de validação consistiu na comparação das curvas de impedância elétrica e com a faixa de frequência do dispositivo, esses resultados foi possível realizar a validação de um sistema simulações numéricas.

Os resultados obtidos computacionalmente foram comprovados de forma experimental com a realização das medidas. Para tal procedimento precisaríamos de um resultado computacional e outro medido de forma experimental, depois comparar os resultados e analisar a diferença entre eles. A modelagem computacional aconteceu através do software já mencionado anteriormente COMSOL Multiphysics que nos permitiu fazer não só a modelagem, mas todo o estudo do comportamento do transdutor através dos estudos incrementados em sua geometria e natureza do material de referência. Ainda na validação, foi realizado as medições da frequência de vibração, da impedância e do deslocamento da massa inferior do transdutor, tudo isso de forma computacional. Já na parte experimental, contamos

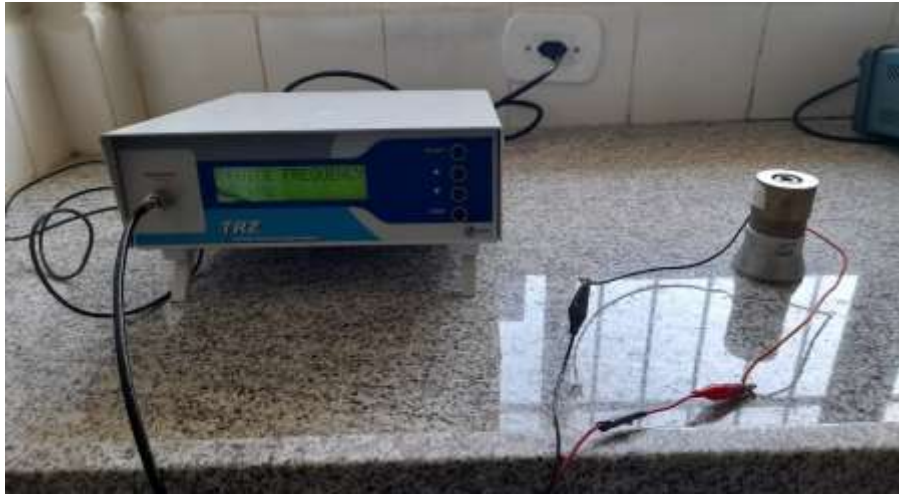
com a ajuda do Analisador e do software TRZ. Com eles também foi possível realizar as medições da frequência de vibração do dispositivo e do módulo da impedância.

O Analisador TRZ é um instrumento de teste dedicado para a manutenção, fabricação e controle de qualidade de transdutores, conversores, sonotrodos e conjuntos acústicos ultrassônicos de potência. O TRZ está para estes elementos como um osciloscópio está para os equipamentos eletrônicos; com o TRZ, os componentes ultrassônicos se tornam testáveis como qualquer outro dispositivo eletromecânico (Engenharia física, 2020). Com ele podemos analisar a frequência e a simetria dos dispositivos a cima mencionados, e também é capaz de testar cerâmicas piezoelétricas para a detecção de trincas internas. O analisador TRZ fornece informações como, a frequência de ressonância e ante ressonância, e ao longo de uma varredura na frequência consegue medir o módulo da curva de impedância, e mede o fator de qualidade mecânico (QM) do aparelho em análise.

O analisador TRZ dispõe de um software para aumentar seu poder de análise com comparações de medições que permitem ajustar critérios de aceite. Dentro do software podemos fazer comparações de curvas medidas e analisar os resultados através da leitura dos módulos de frequência, além de disponibilizar de uma planilha para salvar as informações de cada medição realizada, garantindo um acompanhamento do passo a passo dos procedimentos. Para facilitar o software TRZ emite relatório dos resultados evidenciando o controle de qualidade.

As garras jacaré foram conectadas nos eletrodos do transdutor ou nos fios ligados a estes. A garra vermelha deve ser conectada ao eletrodo central (vivo) e a garra preta ao eletrodo em contato elétrico com as massas metálicas (terra). Como mostra a figura a seguir. A medição deve ser realizada com o transdutor na horizontal (deitado na bancada). A foto abaixo foi tirada com o transdutor em pé para um melhor ângulo.

Figura 9- Conjunto analisador TRZ e transdutor Tonpilz.



Fonte: O autor (2023).

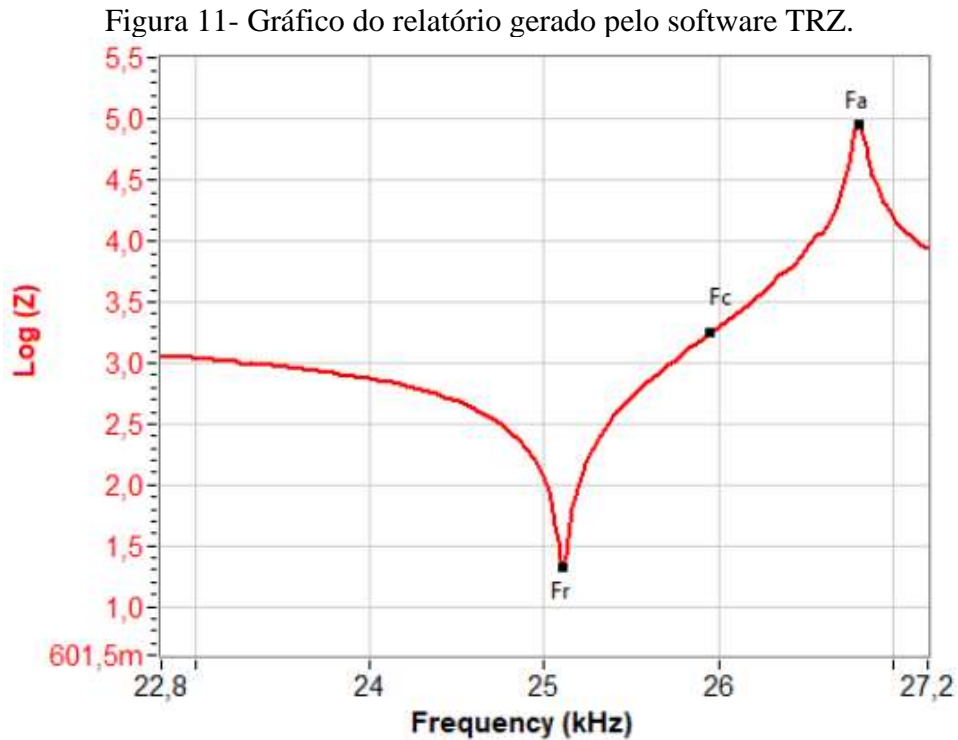
Ao conectar o analisador TRZ ao computador com o software TRZ aberto é necessário selecionar a faixa de frequência a qual será realizada a medição. É preciso conhecer a faixa nominal do aparelho antes da medição para que os resultados sejam coerentes. A medição demora em torno de 12 segundos e após a medida é realizada um refinamento da medição ao redor da frequência de ressonância e antirressonância. Na tela do analisador TRZ é possível visualizar algumas das medições, como, por exemplo, a frequência e a impedância. Contudo, no software os resultados são apresentados com mais detalhes, disponibilizando gráficos que ajudam na interpretação.

Figura 10- Faixa de frequência selecionada.



Fonte: O autor (2023).

Como mencionado na parte de *Materiais e Métodos* o software TRZ emite um relatório das medições realizadas. Ele vem com algumas especificações do aparelho a quantidade de medições e algumas especificações como, o modelo, a quantidade de pontos analisados, a data da medição, entre outros.



Fonte: O autor (2023).

Na tabela abaixo ele nos dá alguns dados da medição, onde, Fa é a frequência no ponto da antirressonância e Za é a impedância da antirressonância. Já o Fr é a frequência no ponto de ressonância e Zr é a impedância da ressonância. Fc é a frequência no ponto central como mostra a Figura 19, e o por fim Qm que é o fator de qualidade mecânica do dispositivo.

Tabela 2- Dados gerados pelo software TRZ.

	<b>Minimum</b>	<b>Maximum</b>	<b>Measured</b>	<b>Result</b>
<b>Fa (Hz):</b>	22800	27200	26804	Approved
<b>Za (kOhms):</b>	3,00	---	91,74	Approved
<b>Fr (Hz):</b>	22800	27200	25105	Approved
<b>Zr (Ohms):</b>	---	100	21,29	Approved
<b>Fc (Hz):</b>	22800	27200	25955	Approved
<b>Qm:</b>	250	---	515,9	Approved

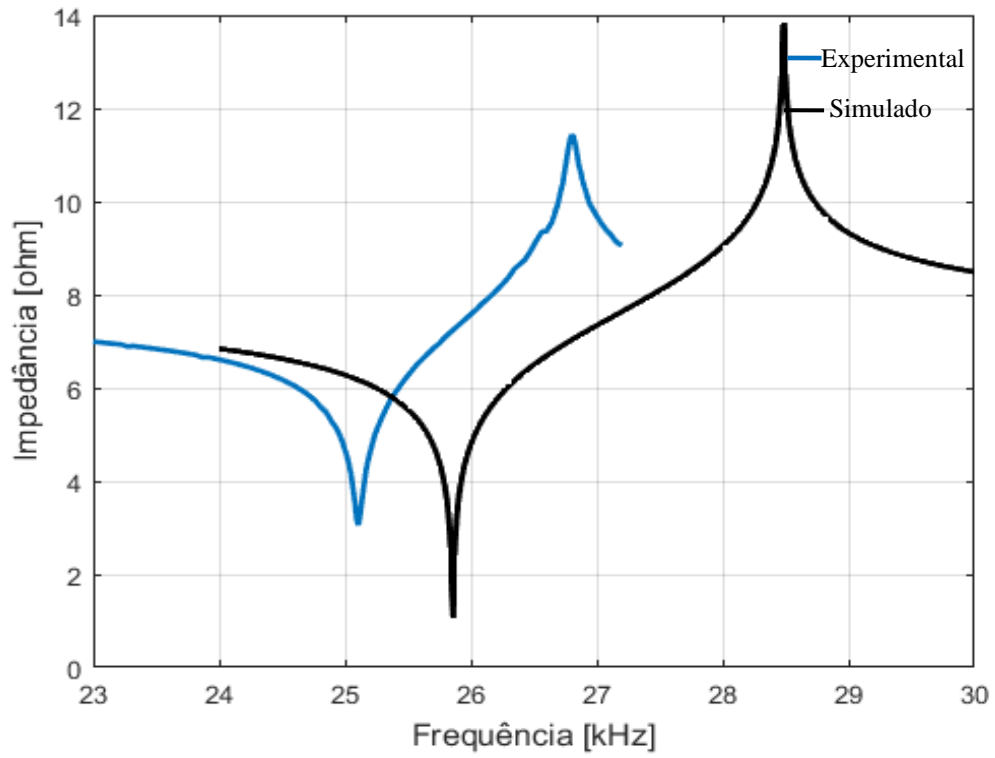
Fonte: O autor (2023).

Por fim, coletamos as informações cedidas pelo software analisador TRZ e informações do software COMSOL Multiphysics e montamos um gráfico com as duas curvas de impedância. A curva em azul representa a impedância coletada através da medição feita pelo analisador TRZ com a ajuda do software TRZ, os dados coletados vêm com informações da faixa de frequência com seus limites e com os módulos de impedância elétrica tanto em ressonância como, também, em antirressonância. As informações coletadas pelo COMSOL Multiphysics foram puramente de simulações numéricas e elas também vieram com as mesmas características. Dessa forma, ficou mais fácil qualificar cada curva comparando-as em um único gráfico Figura 12.

Os valores das frequências encontrados de forma experimental e numérico foram de 25,1 kHz e 25,8 kHz respectivamente. A obtenção de um resultado foi através de um cálculo simples de variação de percentual aonde pegamos os valores das frequências obtidas experimentalmente e numericamente e fizemos uma variação destes valores e chegamos em resultado em torno de 2,7%.



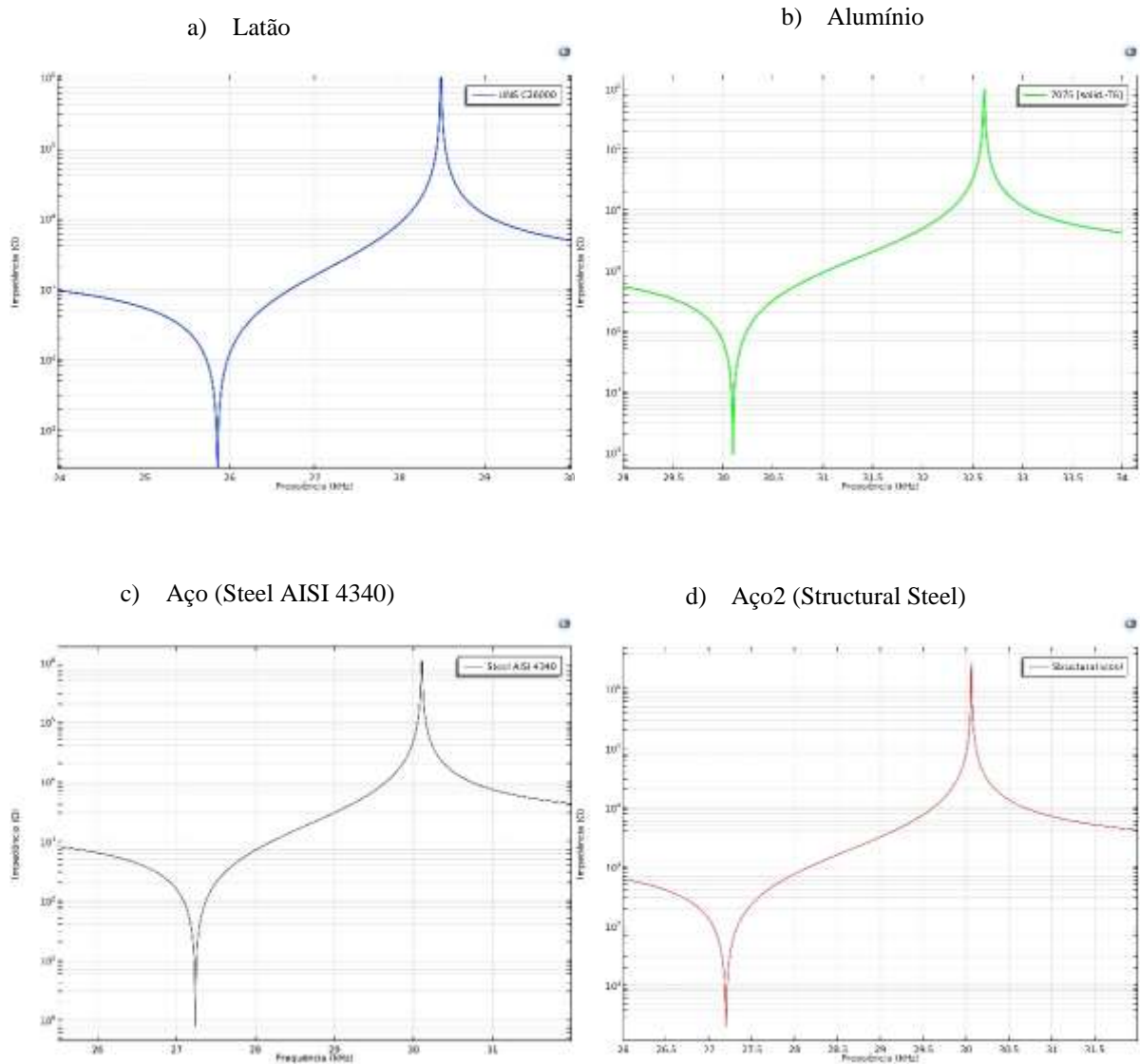
Figura 12- Gráfico representando as curvas de impedância coletados experimentalmente e numericamente.



Fonte: O autor (2023).

Abaixo os gráficos ilustram os valores das curvas de impedâncias dos transdutores com diferentes tipos de massa na parte superior, neste caso, os parâmetros das massas superiores são o mesmo para todos os transdutores.

Figura 13- Gráfico da impedância elétrica com os mesmos parâmetros para a massa superior.

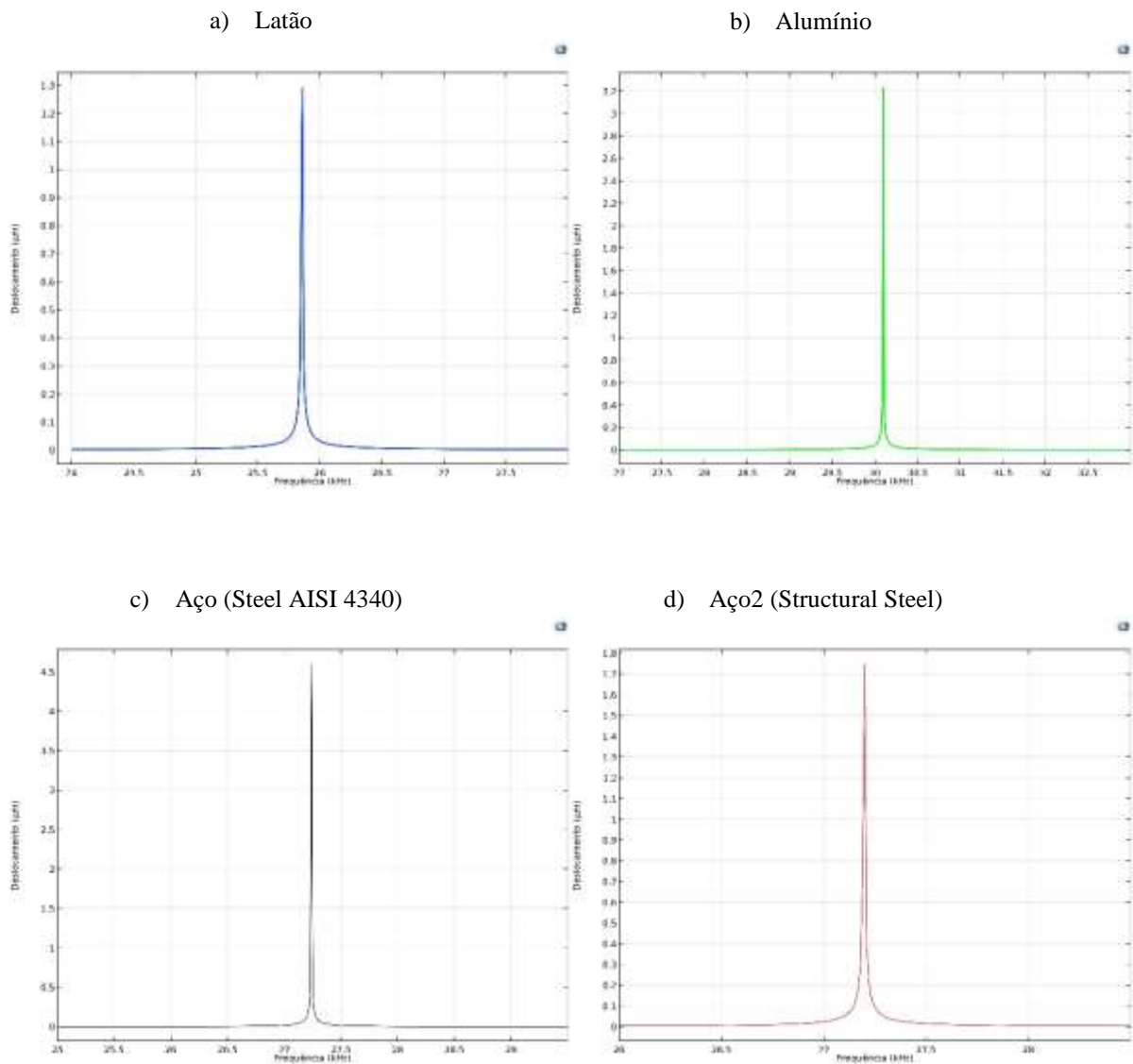


Fonte: O autor (2023).

Os gráficos acima representam a impedância elétrica para cada transdutor com os quatro tipos de massas. Note que, nesta simulação o latão é o mais que se aproxima dos 25 kHz, como já era de se esperar, já que os parâmetros foram tirados do transdutor de referência com a massa traseira sendo o latão.

No transdutor o deslocamento da sua massa inferior (cabeça do transdutor) pode ser gerado quando o mesmo está operando em altas vibração, podendo variar para mais ou para menos dependendo da situação. Neste trabalho a intenção é analisar as maiores amplitudes destes deslocamentos para a cabeça do transdutor, por isso foi realizado testes com massas mais pesadas na parte superior do transdutor, para que pudéssemos analisar qual dos materiais causariam maior deslocamento na ponta do transdutor.

Figura 14- Representação gráfica dos deslocamentos.



Fonte: O autor (2023).

As curvas de deslocamento apresentadas a cima tem resultados interessantes para o aço (steel AISI 4340) e o alumínio. Com os mesmos parâmetros do latão para a massa superior o aço e o alumínio tiveram um deslocamento maior na ponta da massa inferior. Todavia, a

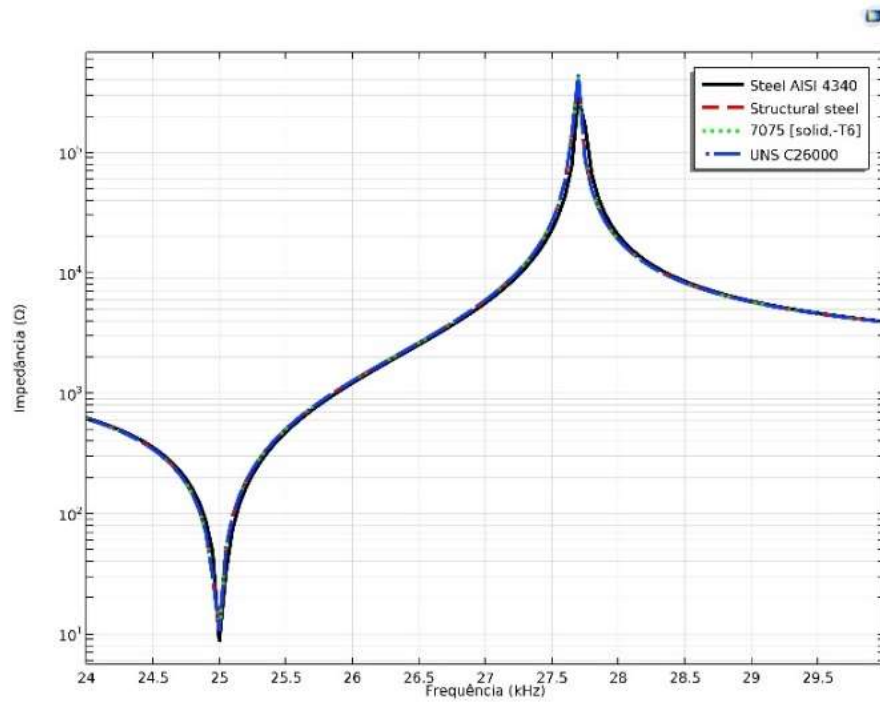
frequência e a impedância ficaram distante dos 25 kHz, principalmente o alumínio que passou da faixa dos 30 kHz. Tomando como base a densidade do material, o aço em média tem uma densidade de  $7,8 \text{ g/cm}^3$  enquanto o alumínio está entorno de  $2,7 \text{ g/cm}^3$ , entretanto neste caso o alumínio conseguiu ter um maior deslocamento, mas, isso pode estar relacionado com o fato de a massa inferior também ser alumínio, sendo assim, isso pode ter contribuído para este desempenho.

## 4.2 Análise

Analisadas as curvas de impedância e deslocamento, bem como a frequência de cada transdutor, uma nova análise foi realizada, nela realizamos as simulações com diferentes tipos de massa, entretanto, os parâmetros da massa superior de cada transdutor foram alterados individualmente e a nova análise fosse feita com todos os transdutores operando em 25 kHz.

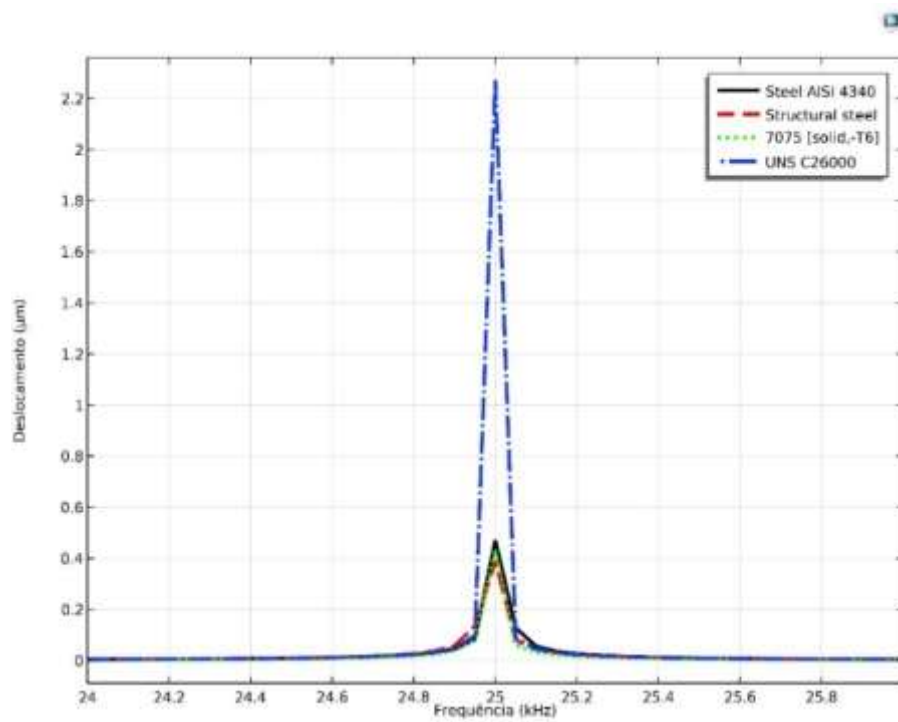
Quando se altera a massa de um objeto com um determinado modo de vibração esta alteração pode causar uma mudança na vibração do mesmo, a frequência do objeto pode aumentar à medida que se tira massa dele, e a frequência pode diminuir à medida que se coloca massa. No caso dos transdutores isso acontece de forma semelhante e foi assim que conseguimos deixar todas as simulações operando em 25 kHz. Abaixo estão representados os gráficos de impedância e o gráfico do deslocamento da ponta da massa inferior de cada transdutor. Ambas as figuras estão com as quatro curvas uma sobreposta a outra.

Figura 15- Gráfico de impedância com todas as curvas juntas.



Fonte: O autor (2023).

Figura 16- Gráfico com todas as curvas de deslocamento.



Fonte: O autor (2023).

Em todos os casos foram necessários aumentar as massas para diminuir a frequência de operação do transdutor, a frequência desejada era de 25 kHz. Na Figura 23 podemos ver que para esta condição o latão foi o que mais apresentou deslocamento em sua ponta, conseqüentemente, isso prova que em baixas frequências o transdutor com latão na massa superior apresenta um melhor desempenho, mas, em frequências em torno de 30 kHz o aço se destaca com maior deslocamento.

Montamos uma tabela simples com o valor de  $h_4$  para cada massa, este  $h_4$  representa a altura da massa traseira. Nesta tabela podemos ver com clareza a diferença e a quantidade de massa que foi necessária acrescentar para que os transdutores com suas respectivas massas vibrassem com uma frequência em torno de 25 kHz.

Tabela 3- Altura das massas simuladas.

Materiais	$h_4$
Latão	29,22 mm
Alumínio	44 mm
Aço	37 mm
Aço2	36,8 mm

Fonte: O autor (2023).

Foi visto o comportamento do transdutor Tonpilz tanto de forma experimental como através de simulações computacionais que ajudaram a compreender e testar a veracidade de todo o sistema, provando principalmente que as simulações no software COMSOL Multiphysics não estão distantes da realidade. Este trabalho teve como um dos objetivos qualificar e quantificar os resultados obtidos com êxito.

Sendo assim, o transdutor Tonpilz se mostra ser muito eficiente em baixa frequência de vibração e sem muito custo energético. Trabalhos mais aprofundados podem gerar maiores resultados quando voltados para força de radiação gerada por ele, tendo em vista a amplitude do deslocamento da ponta da massa inferior. Como foi visto, com o material aço (steel AISI 4340) na faixa de frequência em torno de 30 kHz a amplitude do deslocamento foi máxima e a maior comparada com as outras simulações.

## 5 CONCLUSÃO

De acordo com suas características de desempenho na área industrial ou no ramo da medicina, no mercado marítimo e petrolífero existem problemas e necessidades onde o transdutor Tonpiliz pode ser uma possibilidade levando em consideração o seu desempenho. No ramo marítimo o transdutor Tonpiliz tem grande possibilidade para atuar nas limpezas de cascos e até mesmo lastros dos navios contra um tipo molusco chamado de mexilhão dourado que se instala em estruturas rígidas e se prolifera rapidamente. Devido a isso, este molusco pode causar devastação do ecossistema natural. O mexilhão dourado, também, pode se transportar em forma de larva e se fixar em tubulações, como por exemplo, de lavouras e usinas hidrelétricas até a fase adulta, onde irá se reproduzir e obstruir a passagem da água obrigando a realização de limpezas constantemente. Em navios o molusco pode ser transportado pelos cascos de navios ou pela troca da água do lastro do navio. Em empresas petrolíferas a extração de petróleo e gás natural é um processo difícil e caro, além disso na extração o petróleo e o gás natural saem pelas mesmas tubulações, através de um processo chamado destilação, nesse caso o petróleo é aquecido até se transformar em vapor, dentro de uma tubulação chamada torre de destilação. Conforme o líquido esfria vai ocorrendo a condensação. Durante esse processo o gás natural é separado através de pequenos orifícios situados neste recipiente. Com o tempo esses orifícios extremamente pequenos podem entupir devido a vários fatores, como as partículas de sal. O manuseio para a limpeza requer muito tempo e conseqüentemente há uma grande perda de produção. Devido ao seu potencial em emitir ondas de ultrassom em alta frequência com baixo custo energético, o transdutor de modelo Tonpiliz pode ser uma possibilidade e uma inovação.

O objetivo deste estudo foi atingido ao analisarmos os resultados obtidos pelo software COMSOL Multiphysics, tendo em vista o processo de validação feito com o transdutor construído e o simulado, além disso, as comparações feitas com os diferentes tipos de materiais em sua massa traseira apresentaram uma variação no deslocamento da cabeça do transdutor, esta variação era esperada para materiais com maior densidade. Sendo assim, quanto maior é a massa traseira maior é o deslocamento da cabeça do transdutor. A massa traseira mais pesada resulta na amplificação do deslocamento da massa da cabeça do transdutor, dessa forma, sendo de um material mais leve, o dispositivo terá uma força de irradiação mais eficiência na emissão de suas ondas acústicas.

## REFERÊNCIAS

- ATCP ENGENHARIA FÍSICA. **Manual de instalação e operação**: Analisador de Transdutores e Sonotrodos TRZ® G9 & Software TRZ® 6.1. Ribeirão Preto, SP:ATCP Engenharia Física, jan. 2020.Versão G9&6.1. Disponível em: [www.atcp.com.br](http://www.atcp.com.br). Acesso em: 27 mar. 2023.
- ATEHORTUA, C. M. G. *et al.* Estudo de quebra de emulsões de água em óleo com petróleo brasileiro usando câmaras ultrassônicas de baixa frequência. *In: RIO OIL AND GAS EXPO. Anais [...]*. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás, 1 dez. 2020. p. 244–245. Disponível em: <https://bit.ly/3LqCI1L>. Acesso em: 17 mar. 2023.
- BISCEGLI, C. I. **Conceitos da física do ultra-som**. São Carlos, SP: Embrapa Instrumentação Agropecuária, USP, 2004. (Embrapa Instrumentação Agropecuária. Série Documentos; 8).
- BORGES, A. N.; RODRIGUES, C. G. **Introdução à física acústica**. [S.l: s.n.], 2016. Disponível em: <http://professor.pucgoias.edu.br>. Acesso em: 17 mar. 2023.
- CHIQUESI, A. P. L. **Uso do método dos elementos finitos para o cálculo dos deslocamentos em treliças**. 2020. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em engenharia Civil) - Universidade de Araraquara, Belo Horizonte, 2020.
- COSTA, M. S. **Modelagem numérica de transdutores de Langevin para aplicações industriais**. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Licenciatura em Física) - Universidade Federal de Alagoas, Campus Arapiraca, Arapiraca, 2022.
- 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: 13 mar. 2023.
- GALLEGO-JUAREZ, J. A. Piezoelectric ceramics and ultrasonic transducers. **Journal of Physics A: Scientific Instruments**, IOP Publishing , v.22, n.10, p. 804-816, 30 sept. 1989.
- GARGANI, L.; VOLPICELLI, G. How I do it: Lung ultrasound. **Cardiovascular Ultrasound**, Institute of Clinical Physiology, National Research Council, v.12, n. 25, 4 July 2014. Disponível em: <http://www.cardiovascularultrasound.com/content>. Acesso em: 17 mar. 2023.
- GONÇALVES, M. *et al.* Simulação de um sistema de aterramento submetido a impulsos de corrente utilizando o comsol multiphysics. *In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SISTEMAS ELÉTRICOS*, 6., 2016, Natal, RN. **Anais [...]**. Natal, RN:UFRN, 2016. p.[1-5].
- HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. **Fundamentos de física**: gravitação, ondas e termodinâmica. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012. v. 2.
- ITABORAY, L. M. *et al.* Avaliação das propriedades físicas de cerâmicas piezoelétricas tipos PZT I e III utilizadas em transdutores eletroacústicos. **Cadernos UniFOA**, v., n.2, 2014. Número especial.
- KIM, H.; ROH, Y. Design and fabrication of a wideband Tonpizl transducer with a void head mass. **Sensors and Actuators A Physical**, Elsevier, v. 239, jan. 2016.



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: 16 mar. 2023.

LEGG, M. *et al.* Acoustic methods for biofouling control: a review. **Ocean Engineering**, Elsevier BV, v. 103, p. 237–247, July 2015. Disponível em: <https://bit.ly/3zQTNpj>. Acesso em: 16 Mar. 2023.

LIMA, E. B. **Projeto de um transdutor de Langevin para aplicação em levitação acústica**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Licenciatura em Física) - Universidade Federal de Alagoas, Campus Arapiraca, Arapiraca, 2017.

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: 08 mar. 2023.

OLIVEIRA, P. A. *et al.* Ultrasound methods for biodiesel production and analysis. *In*: Biernat, K. (ed.). **Biofuels**. Rijeka: Intech Open, 2018. cap. 7, p. 121–141. Disponível em: <https://bit.ly/3zGOK3y>. Acesso em: 05 jan. 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: 13 mar. 2023.

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 mar. 2023.

SANTOS V. P. A. **Caracterização e estudo comparativo de sistemas mimo em ambientes acústicos submarinos**. 2015. Dissertação (Mestrado em Telecomunicações). Niterói, RJ: Universidade Fluminense, 2015. Disponível em: <http://www.ppgeet.uff.br/>. Acesso em: 02 abr. 2023.

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, Poland. **Proceedings** [...]. Warsaw, Poland: Heat Transfer Research, Inc., 2019. p. 2–7.

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

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, June 1997. Disponível em: <https://bit.ly/3cM5vl0>. Acesso em: 10 mar. 2023.

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, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

TIPLER, P. A.; MOSCA, G. Oscilações e ondas. *In*: TIPLER, P. A.; MOSCA, G. **Física para cientistas e engenheiros, volume 1**: mecânica, oscilações e ondas, termodinâmica. 5. ed. São Paulo: LTC, 2016. p. 481-522.

WANG, C.; LAN, Y.; CAO, W. Tonpilz transducer head mass selection based on excitation signal type. **Applied Acoustics**, v. 176, may 2021.

YOKOO, J. M. *et al.* **Avaliação genética de características de carcaça utilizando a técnica do ultrassom em bovinos de corte**. Bagé: Embrapa Pecuária Sul, 2011. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br>. Acesso em: 17 mar. 2023.