

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

LUCAS MENDES SANTOS

# DESIGN, CONSTRUÇÃO E APLICAÇÃO DE CÉLULAS ULTRASSÔNICAS EM LARVAS DE MEXILHÃO-DOURADO

ARAPIRACA 2024 Lucas Mendes Santos

Design, construção e aplicação de células ultrassônicas em larvas de mexilhão-dourado

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

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

Arapiraca 2024



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

S237d Santos, Lucas Mendes Design, construção e aplicação de células ultrassônicas em larvas de mexilhãodourado [recurso eletrônico] / Lucas Mendes Santos. – Arapiraca, 2024. 61 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, 2024. Disponível em: Universidade Digital (UD) / RD- BSCA– UFAL (*Campus* Arapiraca). Referências: f. 59-61.
1. Langevin, Transdutores de. 2. Ultrassom. 3. COMSOL Multiphysics (Software).
4. Mexilhão-dourado. I. Andrade, José Henrique Araújo Lopes de. II. Título.

> Bibliotecário responsável: Nestor Antonio Alves Junior CRB-4 / 1557



# UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS CAMPUS ARAPIRACA CURSO DE FÍSICA LICENCIATURA

# ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Aos 27 dias do mês de fevereiro de 2024 foi realizada sessão pública de apresentação de trabalho de conclusão de curso (TCC) na Universidade Federal de Alagoas, Campus Arapiraca pelo aluno LUCAS MENDES SANTOS sob a orientação do professor José Henrique Araújo Lopes de Andrade. Os trabalhos foram iniciados às 10:30 horas, pelo professor orientador do TCC, presidente da banca examinadora, constituída pelos seguintes professores: Lidiane Maria Omena da Silva Leão, José Pereira Leão Neto e José Henrique Araújo Lopes de Andrade. A banca examinadora, após apresentação do aluno, passou à 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 10, 0.

Aprovado com restrições com nota

Reprovado com nota \_\_\_\_\_.

Observações

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

Arapiraca, 27 de fevereiro de 2024

Tosé Henrique A. Lopon de Indiade.

Examinador 1(presidente)

bidiane per Omena da Silva locas

or Peneina les moto.

Examinador 2

Dedico este trabalho a minha família, que sempre me apoiou e acreditou em mim.

When we hit our lowest point, we are open to the greatest change.

#### **RESUMO**

A Bioincrustação é a formação indesejada de organismos em superfícies submersas em água, e representa um grande desafio em diversas áreas econômicas. Esta problemática assume particular destaque na indústria hidrelétrica, acarretando custos substanciais e a diminuição da eficiência operacional devido às atividades de manutenção necessárias. No contexto da bioincrustação industrial, destaca-se a espécie exótica de molusco Limnoperna fortunei, popularmente conhecida como mexilhão-dourado. Para a mitigação dessa ameaça, a busca por métodos simultaneamente eficazes e ecologicamente sustentáveis é de suma importância. Neste cenário, propomos a aplicação da tecnologia de ultrassom de potência, por meio da utilização de transdutores de Langevin. O presente estudo objetiva primordialmente a modelagem de uma célula ultrassônica empregando o Método de Elementos Finitos com o uso do software COMSOL Multiphysics®. O propósito subjacente é a caracterização de um dispositivo que, no futuro, será empregado para o estudo de mortalidade em larvas do Mexilhão-Dourado. Foram modeladas duas células ultrassônicas operando nas frequências de 25 kHz e 40 kHz, que posteriormente foram construídas e analisadas. Destaca-se como resultado a comprovação da capacidade de gerar cavitação acústica em ambas as células, um fenômeno intimamente relacionado à eliminação de bioincrustações. Nos testes iniciais das células, a potência de 4W durante 120s de exposição do ultrassom foram suficientes para eliminar 100% das larvas de mexilhão-dourado. Esse avanço tecnológico oferece uma perspectiva sólida e sustentável para o desenvolvimento de sistemas de combate ou prevenção do Limnoperna fortunei.

Palavras-chave: transdutores de Langevin; ultrassom; COMSOL Multiphysics®; mexilhãodourado.

### ABSTRACT

Biofouling is the unwanted formation of organisms on surfaces submerged in water, and represents a major challenge in several economic areas. This problem assumes particular prominence in the hydroelectric industry, resulting in substantial costs and a decrease in operational efficiency due to the necessary maintenance activities. In the context of industrial biofouling, the exotic species of mollusk Limnoperna fortunei, known as the golden mussel stands out. To mitigate this threat, the search for simultaneously effective and ecologically sustainable methods is of paramount importance. In this scenario, we propose the application of power ultrasound technology, through the use of Langevin transducers. The present study primarily aims at modeling an ultrasonic cell using the Finite Element Method using the COMSOL Multiphysics software. The underlying purpose is the characterization of a device that, in the future, will be used to study mortality in golden mussel larvae. Two ultrasonic cells operating at frequencies of 20 kHz and 40 kHz were modeled, which were later built and analyzed. As a result, the proof of the ability to generate acoustic cavitation in both cells stands out, a phenomenon closely related to the elimination of bioincrustations. In initial cell tests, 4W power during 120s of ultrasound exposure was sufficient to eliminate 100% of golden mussel larvae. This technological advance offers a solid and sustainable perspective for the development of systems to combat or prevent the Limnoperna fortunei.

Keywords: Langevin transducers; ultrasound; COMSOL Multiphysics®; golden mussel.

# LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – a) Corda esticada com uma das extremidades presa na parede. b) Ao mo	-
vimentar a mão verticalmente, é gerado um pulso na corda. c) O pulso se	;
propaga pela corda com forma e velocidade contantes	. 14
Figura 2 – Onda transversal se propagando numa corda	. 17
Figura 3 – Fonte sonora produzindo uma onda acústica em um tubo de ar	. 19
Figura 4 – Diferentes tipos de cerâmicas piezoelétricas	. 21
Figura 5 – Modelo 2D de um transdutor de Langevin	. 22
Figura 6 – Esquema dos processos de (a) cavitação inercial e (b) cavitação não inercia	1 24
Figura 7 – Área de trabalho do COMSOL	. 35
Figura 8 – Dimensões espaciais utilizáveis no software COMSOL Multiphysics®	. 36
Figura 9 – Físicas utilizadas na modelagem	. 36
Figura 10 – Simulação no COMSOL com as definições iniciais	. 37
Figura 11 – Geometrias dos transdutores de Langevin com frequência de ressonância (a)	)
de 25 kHz e (b) de 40 kHz	. 38
Figura 12 – Malhas dos transdutores de Langevin com frequência de ressonância (a) de	•
25 kHz e (b) de 40 kHz. Os tamanhos máximos e mínimos dos elementos	3
estão indicados nas figuras	. 42
Figura 13 - Geometrias das células ultrassônicas com frequência de ressonância (a) de	•
25 kHz e (b) de 40 kHz $\ldots$ $\ldots$ $\ldots$ $\ldots$ $\ldots$ $\ldots$ $\ldots$	. 43
Figura 14 – Malhas das células ultrassônicas com frequência de ressonância (a) de 25	;
kHz e (b) de 40 kHz	. 44
Figura 15 - Relação entre o Torque aplicado (eixo horizontal) frequência (eixo vertical	l
em vermelho) e módulo da impedância elétrica (eixo vertical em azul)	. 45
Figura 16 – Aparato utilizado para medir experimentalmente a frequência de ressonância	ι
e o módulo da impedância dos transdutores	. 47
Figura 17 – Comparativo entre as curvas de impedância obtidas na simulação numérica	l
(em vermelho) e na medição realizada com o transdutor construído (em azul)	).
Transdutor com frequência de ressonância de 25 kHz (a) e de 40 kHz (b) .	. 47
Figura 18 - Deslocamento 1D dos transdutores de Langevin com frequência de ressonân	-
cia (a) de 25 kHz e (b) de 40 kHz	. 49
Figura 19 - Deslocamento 2D dos transdutores de Langevin com frequência de ressonân	-
cia (a) de 25 kHz e (b) de 40 kHz	. 49
Figura 20 – Stress dos transdutores de Langevin com frequência de ressonância (a) de 25	;
kHz e (b) de 40 kHz	. 49
Figura 21 – Transdutores de Langevin com frequência de ressonância (a) de 25 kHz e (b)	)
de 40 kHz	. 50

Figura 22 –	Comparativo entre as curvas de impedância obtidas na simulação numérica	
	(em vermelho) e na medição realizada com o transdutor construído (em azul).	
	Transdutor com frequência de ressonância de 25 kHz (a) e de 40 kHz (b)	51
Figura 23 –	Deslocamento 1D das células ultrassônicas com frequência de ressonância	
	(a) de 25 kHz e (b) de 40 kHz	52
Figura 24 –	Deslocamento 2D das células ultrassônicas com frequência de ressonância	
	(a) de 25 kHz e (b) de 40 kHz	52
Figura 25 –	Stress das células ultrassônicas com frequência de ressonância (a) de 25 kHz	
	e (b) de 40 kHz	53
Figura 26 –	Células ultrassônicas construídas	54
Figura 27 –	Papel alumínio antes (a) e depois (b) da aplicação do ultrassom. Devido às	
	microbolhas formadas pela cavitação acústica, o papel alumínio sofreu erosão.	55
Figura 28 –	Aparato experimental contendo Analizador TRZ, célula ultrassônica e fonte	
	de alta potência.	55
Figura 29 –	Amostra de água do rio São Francisco contendo larvas de mexilhão-dourado	
	antes (à esquerda) e depois (à direita) da exposição ao ultrassom de potência.	
	Imagens da vista em um microscópio óptico	56

# LISTA DE TABELAS

Tabela 1	—	Propriedades Mecânicas dos Materiais	39
Tabela 2	_	Dados experimentais e teóricos dos transdutores com frequência de ressonân-	
		cia de 25 e de 40 kHz	48
Tabela 3	_	Dados experimentais e teóricos das células com frequência de ressonância de	
		25 e de 40 kHz	51
Tabela 4	_	Dados do experimento realizado com larvas de mexilhão-dourado. A potência	
		e a frequência foram mantidas fixas e o tempo foi variado	56

# SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	CONCEITOS BÁSICOS	14
2.1	ONDAS	14
2.1.1	Equação de uma Onda Progressiva	16
2.2	ONDAS SONORAS	18
2.3	TRANSDUTORES DE LANGEVIN	20
2.4	CAVITAÇÃO ACÚSTICA	24
3	LIMNOPERNA FORTUNEI E ULTRASSSOM	26
3.1	IMPACTOS CAUSADOS PELO LIMNOPERNA FORTUNEI	26
3.1.1	Impactos Ambientais	26
3.1.2	Impactos Econômicos	27
3.2	MÉTODOS UTILIZADOS NO COMBATE AO LIMNOPERNA FORTUNEI	28
3.2.1	Métodos Físicos	28
3.2.1.1	Privação de Oxigênio	28
3.2.1.2	Tratamento térmico	28
3.2.1.3	Dessecação	29
3.2.1.4	Corrente elétrica	29
3.2.1.5	Raspagem	30
3.2.1.6	Irradiação	30
3.2.2	Métodos Químicos	30
3.3	ULTRASSOM NA LIMPEZA DE BIOINCRUSTAÇÕES	31
4	MODELO NUMÉRICO	34
4.1	COMSOL MULTIPHYSICS®	34
4.2	DEFINIÇÕES DA SIMULAÇÃO	35
4.2.1	Modelagem dos Transdutores de Langevin	38
4.2.2	Modelagem das Células Ultrassônicas	43
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	45
6	CONCLUSÃO	58
REFERÊ	NCIAS	59

# 1 INTRODUÇÃO

O *Limnoperna fortunei*, mais conhecido como mexilhão-dourado, é uma espécie de molusco bivalve que foi introduzida no Brasil por meio de água de lastro durante a década de 1990. Devido às suas características biológicas, ecológicas e ao ambiente propício para sua proliferação no país, o mexilhão-dourado se tornou uma espécie exótica invasora. Essa invasão biológica tem desencadeado significativos impactos, tanto ambientais quanto econômicos, resultando em alterações estruturais e funcionais nos ecossistemas e prejudicando diversas atividades humanas em várias regiões . Nesse contexto crítico, é relevante observar que o Governo Federal, no âmbito de seu Plano Plurianual (PPA 2016-2019), estabeleceu como meta o controle de três espécies exóticas invasoras, sendo o mexilhão-dourado uma delas (Targino *et al.*, 2020). Esta medida reflete a preocupação com os danos provocados por essa espécie invasora e a necessidade de implementar estratégias efetivas para mitigar seus impactos.

Uma das consequências adversas atribuídas à presença deste molusco está relacionada às centrais hidrelétricas, que frequentemente incorrem em despesas substanciais para a remoção da bioincrustação ocasionada por esse organismo. Além disso, essas instalações enfrentam uma redução na produção, uma vez que a interrupção das operações pode se tornar necessária para realizar a limpeza, acarretando notáveis impactos econômicos. Nesse contexto, tem sido objeto de investigação a busca por abordagens de eliminação desses organismos que sejam ecologicamente sustentáveis e economicamente viáveis. No cenário atual, diversos métodos, incluindo intervenções físicas, químicas e biológicas, são empregados para a erradicação e/ou prevenção dos mexilhões-dourados. Contudo, é digno de nota que poucos desses métodos demonstram simultaneamente eficácia e amigabilidade ambiental (Zhoul *et al.*, 2021). Como forma de obter um sistema eficaz e livre de poluição ambiental, o uso do ultrassom de alta potência surge como uma forma alternativa destacando-se pela sua capacidade de não gerar subprodutos prejudiciais ao meio ambiente, bem como não necessitar de intervenção no funcionamento da área afetada.

Neste estudo, o foco reside no design e simulação de células ultrassônicas que são capazes de gerar campos acústicos de alta intensidade. Através de simulações numéricas, utilizando o software COMSOL Multiphysics®, foi realizado o design e modelagem de transdutores de Langevin que são responsáveis por gerar as ondas de ultrassom. Esses transdutores operam com base no princípio do efeito piezoelétrico, que descreve a capacidade de determinados materiais gerarem uma resposta elétrica quando submetidos a uma tensão mecânica.

Após a modelagem numérica, foi realizada a construção e caracterização tanto dos transdutores, quanto das células ultrassônicas. Foram projetados e construídos dois transdutores operando nas frequências de 25 kHz e 40 kHz. Além disso, foram realizados testes experimentais de funcionamento da célula ultrassônica para comprovar a sua eficiência em gerar o fenômeno de cavitação acústica que é uma consequência de campos ultrassônicos de alta intensidade. Esses campos serão responsáveis por produzir efeitos de cavitação acústica para a prevenção e/ou erradicação das incrustações de mexilhões-dourados. É importante salientar que o desenvolvimento desse estudo é um grande passo para a construção e aplicação de sistemas ultrassônicos em uma problemática de grande repercussão em indústrias de geração de energia e de óleo e gás. Como perspectivas futuras, as células ultrassônicas desenvolvidas neste trabalho serão utilizadas para avaliar os efeitos do ultrassom na mortalidade das larvas dos mexilhões.

Após esta breve exposição sobre a problemática envolvida neste trabalho, no capítulo 2 serão abordados conceitos básicos necessários para o entendimento dos capítulos posteriores, como ondas sonoras, transdutor de Langevin e cavitação acústica. No capítulo 3 serão discutidos os impactos do mexilhão-dourado e quais métodos são utilizados atualmente para o seu combate, justificando o ultrassom como um dos métodos a ser pesquisado e falando brevemente sobre trabalhos que o utilizam no combate à bioincrustações. Em seguida, no capítulo 4 o modelo numérico do sistema ultrassônico feito utilizando o *software* COMSOL Multiphysics® será descrito em detalhes. No capítulo 5 serão apresentados os resultados do modelo numérico e sua comparação com os dados obtidos experimentalmente, validando assim o nosso modelo; também serão mostrados os resultados dos primeiros testes aplicando o ultrassom em larvas de mexilhão-dourado. Por fim serão dadas as conclusões e perspectivas futuras deste trabalho.

# 2 CONCEITOS BÁSICOS

#### 2.1 ONDAS

As ondas são um fenômeno que aparece em muitos contextos de diferentes áreas da física. Uma onda pode ser definida como uma perturbação que se propaga, transportando energia, informação e momento. Um dos exemplos mais utilizados ao falar-se sobre ondas é o da emissão de um pulso em uma corda. Supondo uma corda esticada horizontalmente e com uma de suas extremidades presa a uma parede, ao mover-se a outra extremidade verticalmente para cima e para baixo retornando-a à posição inicial é gerado um pulso que se propaga ao longo da corda com velocidade constante; esse processo está mostrado na Figura 1. Olhando para o ponto destacado na Figura 1.c podemos entender melhor a definição de onda apresentada. O pulso passa pelo ponto, fazendo-o oscilar verticalmente para cima e para baixo, e após a passagem do pulso o ponto se encontra na mesma posição que estava antes, ou seja, apenas a perturbação se propaga. Desse modo, está mostrado que o pulso se propaga e apenas perturba os elementos de corda, não havendo assim o transporte de matéria na propagação. Existem outros conceitos que podem ser discutidos a partir deste exemplo, mas antes vamos abordar as classificações das ondas.

Figura 1 – a) Corda esticada com uma das extremidades presa na parede. b) Ao movimentar a mão verticalmente, é gerado um pulso na corda. c) O pulso se propaga pela corda com forma e velocidade contantes



Fonte: Borges; Rodrigues (2017).

Como mencionado, onda é um conceito muito abrangente e esta entidade está presente nas mais variadas áreas da Física. A óptica, por exemplo, é um campo da física que destina-se a estudar um tipo específico de onda, as ondas eletromagnéticas; já a acústica se destina ao estudo das ondas sonoras. Nesse sentido, é conveniente classificar os tipos de ondas entendendo suas principais diferenças. Com relação a sua natureza, as ondas podem ser classificadas em três tipos:

- Ondas Eletromagnéticas: são formadas por campos elétricos e magnéticos oscilantes. Não necessitam de um meio material para se propagar. Se proapgam no vácuo com velocidade constante c = 299.792.458 m/s. São exemplos: luz visível, raios X, micro-ondas, ondas de rádio, etc.
- Ondas Mecânicas: Necessitam de um meio material para se propagar (que pode ser um sólido, um líquido ou um gás) e são governadas pelas Leis de Newton. São exemplos: som, ondas em uma corda, onda em uma mola, ondas na água, ondas sísmicas, etc.
- Ondas de Matéria: De acordo com a Física Quântica, a matéria tem uma natureza dual, devido a isso um corpo pode se comportar tanto como partícula quanto como onda. Esses efeitos, porém, só são observáveis na escala quântica (distâncias da ordem de  $10^{-9}m$  ou inferior.

As ondas podem ser classificadas também com relação a sua dimensão:

- Ondas Unidimensionais: se propagam apenas em uma dimensão. Um exemplo é a onda gerada ao se balançar uma corda.
- Ondas Bidimensionais: se propagam em duas dimensões. Ao jogar uma pedra em um lago é gerada uma onda bidimensional com frentes de ondas circulares.
- Ondas Tridimensionais: se propagam em três dimensões, ou seja, no espaço. O som e a luz são exemplos de ondas tridimensionais.

Por fim, as ondas se classificam ainda em relação a direção de propagação e de oscilação:

 Ondas Longitudinais: são aquelas em que a direção da perturbação é paralela à direção de propagação da onda. São exemplos o som se propagando em um fluido e a onda gerada ao movimentar a extremidade de uma mola para frente e para trás (neste exemplo frente e trás são direções perpendiculares à superfície a qual a mola está presa).

- Ondas Transversais: são aquelas em que a direção da perturbação é perpendicular à direção de propagação da onda. Um exemplo é a luz, que se propaga em direção perpendicular à de perturbação de seus campos elétrico e magnético.
- Ondas Mistas: não são exclusivamente transversais nem longitudinais. Um exemplo são as ondas que se propagam na superfície da água, nas quais as partículas descrevem trajetórias elípticas a medida que a onda se propaga (Borges; Rodrigues, 2017).

Para descrever completamente o fenômeno da propagação de uma determinada onda, é necessário conhecer alguns parâmetros que são características comuns a todas as ondas. O período T de uma onda é o tempo necessário para se realizar uma oscilação. Definimos como frequência a razão entre número de oscilações realizadas e o intervalo de tempo em que elas aconteceram. Matematicamente, temos:

$$f = \frac{N}{\Delta t}.$$
 (1)

Para uma oscilação, tem-se que N = 1 e  $\Delta t$ , logo, pode-se fazer a seguinte relação entre frequência e período:

$$f = \frac{1}{T}.$$
(2)

Outra grandeza importante na descrição de uma onda é a velocidade de propagação. Ela pode ser definida como a razão entre o comprimento de onda e o período, podendo ser descrita também em termos da frequência:

$$v = \frac{\lambda}{T} = \lambda f. \tag{3}$$

Apesar da equação 3 relacionar  $\lambda \in f$ , a velocidade da onda não depende desses parâmetros. Como será mostrado a seguir, a velocidade de propagação de uma onda depende das características do meio, de modo que em um mesmo meio, ao mudar o comprimento de onda a frequência muda de forma inversa, mantendo sempre a velocidade constante. A velocidade da luz no vácuo por exemplo é de 299.792.458 m/s independentemente do comprimento de onda ou da frequência da onda.

#### 2.1.1 Equação de uma Onda Progressiva

Imaginemos a situação da Figura 1, mas agora a pessoa que segura a corda continua a balançar a mão verticalmente com uma frequência f constante. Neste caso teremos uma

série de pulsos de mesma forma e igualmente espaçados entre si, que se propagam a mesma velocidade ao longo da corda, como mostrado na Figura 2. Essa série de pulsos constitui uma onda se propagando na corda. Os elementos de corda sobem até uma altura máxima (este ponto é chamado de crista) e descem até uma altura mínima (este ponto é chamado de vale). A distância entre duas cristas ou entre dois vales é o comprimento de onda,  $\lambda$ . A distância perpendicular ao eixo tomada entre o eixo central e uma crista ou um vale é denominada amplitude da onda (a máxima distância vertical atingida por um elemento da corda em relação à sua posição inicial).

Figura 2 – Onda transversal se propagando numa corda



Fonte: Borges; Rodrigues (2017).

O comprimendo de onda  $\lambda$  é a distância percorrida pela onda em um período T. Mantendose t constante, o comprimento de onda é a menor distância percorrida na qual o padrão de onda começa a se repetir. A frequência f da onda emitida é exatamente igual à frequência que a pessoa da imagem oscila a mão para cima e para baixo. Para este caso, podemos definir uma forma de onda como sendo dependente da posição x e do tempo t:

$$y = f(x, t), \tag{4}$$

onde y é a altura vertical de um elemento de corda, tomando como referencial o eixo cartesiano mostrado na Figura 2. Como visto uma onda é um fenômeno oscilatório, então para descrevermos matematicamente o deslocamento transversal de um elemento de corda podemos utilizar uma função periódica como seno ou cosseno. Assim, temos:

$$y = Asen(kx - \omega t),\tag{5}$$

onde A é a amplitude da onda, x é a posição e t é o tempo. O termo  $(kx - \omega t)$  é chamado fase da onda e varia tanto com o tempo quanto com a posição. Como a função seno varia entre

-1 e 1, temos que o deslocamento transversal y varia entre A e - A, o que está coerente com o conceito de amplitude discutido anteriormente. A grandeza k que multiplica x é chamada de número de onda e possui dimensão  $m^{-1}$  (como deveria ser, pois o argumento de uma função seno deve ser adimensional). O número de onda é dado pela seguinte expressão:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}.$$
 (6)

Já a frequência angular  $\omega$  mede a rapidez em que o ângulo de fase é percorrido, e é dada pela seguinte expressão:

$$\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}.\tag{7}$$

#### 2.2 ONDAS SONORAS

Ondas sonoras são ondas mecânicas que podem propagar-se através de um meio material. Este último deve possuir elasticidade e pode ser um líquido um sólido ou um gás. A propagação de uma onda sonora se dá graças ao fato de que meios elásticos quando submetidos a forças externas tendem a preservar sua forma, volume ou comprimento através de forças restauradoras. No caso da Figura 2, o que permite que a corda assuma a forma de uma onda é a elasticidade da mesma, e a velocidade de propagação da corda é uma função da tensão T aplicada na mesma e da densidade linear  $\mu$  da corda (Griffiths, 2005). Se o meio de propagação for um fluido, haverá somente a propagação longitudinal, pois um fluido (como por exemplo a atmosfera) não pode transmitir tensões tangenciais (Nussenzveig, 2018); desse modo, as ondas mecânicas transversais ocorrem apenas nos sólidos. As ondas sonoras que serão abordadas nesta seção serão as ondas mecânicas que se propagam longitudinalmente (em fluidos ou sólidos). Neste caso, o que se propaga são variações de pressão no meio. Por ser uma oscilação longitudinal, a onda sonora se propaga por meio de sucessivas rarefações e compressões.

Na Figura 3 temos uma fonte sonora  $\mathbf{F}$  que está localizada na extremidade de um tubo sonoro. Como pode-se ver, a fonte sonora causa uma série de compressões (regiões de alta pressão) e rarefações (regiões de baixa pressão) que se propaga no ar ao longo do tubo. Esta série compressões e rarefações que se propaga é a onda mecânica longitudinal definida no parágrafo anterior. O comprimento de onda  $\lambda$  é dado pela distância entre duas compressões ou rarefações sucessivas.



Figura 3 – Fonte sonora produzindo uma onda acústica em um tubo de ar

Fonte: Borges; Rodrigues (2017).

Outra característica relevante das ondas sonoras é que por precisarem de um meio material para se propagar, elas não podem se propagar no vácuo. Isso significa que uma explosão no espaço pode ser vizualizada (pois a luz se propaga no vácuo) mas não pode ser ouvida. Um parâmetro importante que é utilizado para a classificação das ondas sonoras é a frequência. O ser humano consegue ouvir ondas sonoras na faixa de frequência que está compreendida entre 20 Hz e 20.000 Hz. As ondas sonoras com frequência inferior a 20 Hz são chamadas de infrassons e as que tem frequência superior a 20.000 Hz são chamadas de ultrassom. Como a velocidade do som para um determinado meio é constante, para que a relação  $v = \lambda \times f$  seja mantida verdadeira, o comprimento de onda e a frequência devem ser inversamente proporcionais. Assim, os infrassons por possuirem uma frequência muito baixa acabam por ter grandes comprimentos de onda; os ultrassons, em contrapartida, possuem altas frequências e pequenos comprimentos de onda.

Apesar de não serem percebidos pelo ouvido humano, os infrassons e ultrassons têm a mesma natureza da onda sonora audível. Existem animais que comseguem ouvir infrassons como cachorros, hipopótamos, rinocerontes e girafas. Alguns conseguem até mesmo comunicar-se, como as baleias; devido ao grande comprimento de onda dos infrassons, essas ondas têm maior facilidade para contornar objetos e percorrer grandes distâncias. Graças a essa propriedade, as baleias conseguem comunicar-se a milhares de distância umas das outras. Elefantes e outros animais também conseguem se comunicar emitindo e escutando infrassons (Borges; Rodrigues, 2017).

Muitos animais também escutam ultrassons, como é o caso dos cachorros, gatos, golfinhos e morcegos. Este último por exemplo é quase cego porém consegue localizar-se emitindo ondas com frequências de até 120.000 Hz que colidem com os objetos e refletem, sendo ouvidas pelo morcego, que passa a ter uma noção da distância e do tamanho dos objetos ao seu redor; esse fenômeno é conhecido como ecolocalização. Nos ultrassons, ao contrário dos infrassons, o comprimento de onda é muito pequeno, o que torna as ondas mais difíceis de serem difratadas e contornarem os objetos. Desse modo, o morcego consegue perceber objetos da ordem do

comprimento de onda emitido (objetos muito menores que  $\lambda$  podem ser contornados), ou seja, da ordem de milímetros, como insetos (Nussenzveig, 2018).

O ultrassom tem diversas aplicações em diversas áreas. Na medicina, é muito utilizada a ultrassonografia. Neste exame, é emitida uma onda ultrassônica que em alguma estrutura e por meio da recepção do eco do sinal emitido pode ser formada de uma imagem do local irradiado, permitindo por exemplo a vizualização de bebês durante o período de gestação. Na indústria as aplicações são diversas, como esterelização, e metais, catalização de reações químicas, emulsificação, transporte de fármacos, soldagem de termoplásticos, limpeza de incrustações dentre outros (Lais *et al.*, 2018). Um dos dispositivos amplamente utilizados na geração de ondas ultrassônicas são os transdutores piezoelétricos, que serão abordados na próxima seção.

#### 2.3 TRANSDUTORES DE LANGEVIN

Um transdutor ultrassônico pode ser definido como um dispositivo capaz de gerar e/ou detectar ondas ultrassônicas (Villamiel *et al.*, 2017). Transdutor é todo dispositivo que converte um tipo de energia em outro. No caso dos transdutores ultrassônicos, geralmente a conversão feita é de energia elétrica em energia mecânica no caso de transmissores e de energia mecânica em energia elétrica no caso de receptores. Existem vários tipos de transdutores que operam a partir de princípios diferentes, porém nesta seção daremos enfoque aos transdutores piezoelétricos; esse tipo de transdutor foi utilizado na construção das células ultrassônicas que são o foco do presente trabalho.

Os transdutores piezoelétricos ou transdutores de Langevin possuem diversas aplicações e são os mais utilizados na área do ultrassom (Villamiel *et al.*, 2017). Eles funcionam com base no efeito piezoelétrico, que é um fenômeno característico de alguns tipos de materiais, como cristais de Quartzo. O efeito piezoelétrico pode ser definido como a formação de dipolos elétricos graças a aplicação de pressão em um material (Yasui, 2018). Ao serem submetidos a uma tensão mecânica, esses materiais geram uma carga elétrica proporcional à tensão aplicada, esse é o efeito piezoelétrico direto. Existe também o efeito piezoelétrico inverso, no qual o material piezoelétrico é submetido à aplicação de um sinal elétrico e em resposta sofre uma tensão mecânica, se deformando. A deformação é proporcional à tensão mecânica aplicada, de modo que ele pode se contrair ou se expandir a depender da polaridade. Alguns exemplos de materiais piezoelétricos são o quartzo (SiO<sub>2</sub>), o Titanato de bário (BaTiO<sub>3</sub>) e o Titanato zirconato de chumbo ou PZT (Pb(Zr<sub>x</sub>, Ti<sub>1-x</sub>)O<sub>3</sub>).

Um material piezoelétrico vibra mais intensamente quando é excitado em sua frequên-

cia de ressonância. A frequência de ressonância está relacionada com a massa e a rigidez do material. Se mantermos a densidade do material constante, a frequência de ressonância é então determinada pela forma e volume da peça de material piezoelétrico. Em geral, a frequência de ressonância diminui à medida que o volume de um material aumenta. Cada material possui vários modos de vibração, o primeiro (de menor frequência) é chamado modo fundamental, e de modo simplificado, múltiplos inteiros da frequência fundamental de ressonância também são frequências de ressonância (Yasui, 2018). Na Figura 4 estão mostrados exemplos de cerâmicas piezoelétricas. As propriedades das cerâmicas dependem de constantes dielétricas, piezoelétricas e elásticas de cada material. Existem diversas composições e formatos de cerâmicas piezoelétricas, cada uma tendo uma aplicabilidade diferente.



Figura 4 – Diferentes tipos de cerâmicas piezoelétricas

Fonte: Villamiel et al. (2017)

Os transdutores de Langevin funcionam com base no efeito piezoelétrico inverso. Neste último, os materiais piezoelétricos vibram com a mesma frequência da corrente alternada a que estão submetidos. Se esta frequência for alta o suficiente, pode ser gerada uma onda ultrassônica. O transdutor de Langevin é formado basicamente por cerâmicas piezoelétricas que são pressionadas por massas metálicas e todo o sistema é aprisionado por um parafuso de alta resistência mecânica. Na Figura 5 podemos ver uma imagem em modelo 2D de um transdutor piezoelétrico.



Figura 5 – Modelo 2D de um transdutor de Langevin

As cerâmicas piezoelétricas presentes no transdutor são submetidas a uma corrente alternada de alta frequência. Elas são dispostas com polaridade invertida, e devido ao efeito piezoelétrico reverso se contraem e expandem com a mesma frequência da corrente alternada. Essa vibração das cerâmicas se propaga pelas massas metálicas, que passam a realizar um movimento oscilatório. Desse modo, a vibração do transdutor produz variações de pressão no meio que está em contato com as massas metálicas, gerando assim uma onda sonora. Se a frequência de oscilação for suficientemente grande, a onda sonora gerada é uma onda ultrassônica.

O diâmetro do transdutor deve ser menor do que  $\lambda/4$  para que os modos radiais de vibração não sejam atingidos, pois o transdutor deve vibrar longitudinalmente (Moretti, 2014). O comprimento de um transdutor de Langevin deve ser de  $\lambda/2$ , por isso eles também são chamados de ressonadores de meio comprimento de onda. Este comprimento por sua vez está diretamente ligado com a frequência de ressonância do transdutor. Como visto, para um mesmo material de densidade constante, quanto maior o volume menor é a frequência de ressonância; desse modo, o transdutor deve ter um comprimento específico para vibrar na frequência fundamental de ressonância, gerando assim o deslocamento com maior amplitude e que por sua vez gera ondas ultrassônicas de alta amplitude. Mudando o material porém mudamos a densidade, e de modo geral quanto mais denso o material for menores serão as dimensões da peça manter-se a mesma frequência de ressonância. A escolha dos materiais a serem utilizadas nos transdutores está diretamente ligada com a massa e a rigidez do material, mas também são levadas em conta propriedades térmicas pois o transdutor aquece durante seu funcionamento, devido à dissipação de energia mecânica em energia térmica na forma de calor.

Fonte: Lais et al. (2018)

As cerâmicas desse tipo de transdutor são em formato de anel e um dos materiais mais utilizados para esta aplicação é o Titanato Zirconato de Chumbo (PZT). Elas são ligadas em paralelo e polarizadas com sinais opostos. A quantidade de cerâmicas está relacionada com a potência do transdutor, e de modo geral ambos são diretamente proporcionais. Há, porém, um limite, pois quanto mais cerâmicas o transdutor possuir, maior será a dissipação de energia mecânica. Como as cerâmicas são frágeis, para o bom funcionamento do transdutor é necessário que o parafuso seja pré-tensionado com um alto torque para que as cerâmicas se mantenham comprimidas durante a operação do dispositivo. É importante ressaltar que o valor do torque no parafuso também tem um limite superior: aplicar torques muito altos durante o pré-tensionamento causa a danificação das cerâmicas. A pressão aplicada pelo parafuso geralmente é da ordem de  $3 \cdot 10^7$  Pascal (Moretti, 2014).

Uma das principais grandezas para a caracterização de um transdutor é o valor de sua impedância elétrica; por meio desta podemos encontrar a frequência de ressonância do dispositivo. Basicamente, o transdutor de Langevin se comporta de módo análogo a um circuito RLC. Existem dois tipos de ressonância em um transdutor piezoelétrico, elas acontecem nas frequências de ressonância e de antirressonância. A primeira ocorre quando a impedância elétrica apresenta um mínimo local e o transdutor passa a se comportar de modo análogo ao de um capacitor: há uma facilidade de passagem da corrente elétrica. Portanto, nesta frequência o transdutor possui a maior amplitude de oscilação. Na frequência de antirressonância, em contrapartida, o transdutor se comporta de modo análogo ao de um resistor, ou seja, há a dificuldade da passagem da corrente elétrica. Logo, nesta frequência, a amplitude de oscilação do transdutor é mínima (Moretti, 2014).

Como pode-se perceber, o funcionamento dos transdutores é bem diferente a depender do tipo de ressonância que estiver acontecendo no dispositivo. Assim, existem aplicações que os transdutores operam na frequência de antirressonância e em outras eles trabalham na frequência de ressonância. Este último é o caso que acontece nas aplicações de limpeza ultrassônica, onde o transdutor precisa oscilar com aplitude máxima para gerar uma grande diferença de pressão no meio que estiver em contato. A maioria dos processos de limpeza ultrassônica utilizando transdutores de Langevin envolve o fenômeno da cavitação acústica, no qual a implosão de microbolhas libera grandes quantidades de energia localmente e gera outros fenômenos como microjatos e ondas de choque. A cavitação acústica será explicada em mais detalhes na seção a seguir e é esse o principal fenômeno responsável por eliminar as larvas de mexilhão-dourado sob a ação do ultrassom de potência.

# 2.4 CAVITAÇÃO ACÚSTICA

A limpeza ultrassônica proposta neste trabalho é baseada no processo de cavitação acústica. Esse fenômeno pode ser definido como a formação de bolhas de vapor em um líquido graças à uma súbita queda de pressão causada por uma onda longitudinal (Lais *et al.*, 2018). Como vimos, uma onda sonora em um fluido pode ser entendida como uma série de compressões e rarefações que se propaga. Ao aplicar uma onda ultrassônica em um líquido, na fase de rarefação (baixa pressão) é gerada uma pressão negativa no mesmo e formado um vácuo; nesta situação pode ocorrer a formação de bolhas. Essas bolhas passam a oscilar o tamanho de seu raio, que aumenta na fase de rarefação (pressão negativa na bolha) e diminui na fase de compressão (pressão positiva na bolha), esse processo está mostrado na Figura 6. É importante ressaltar ainda que não é qualquer onda ultrassônica que gera o processo de cavitação quando aplicada em um fluido, pois existe um valor mínimo de pressão que deve ser atingido para esse processo ocorrer. A esse valor dá-se o nome de limiar de cavitação acústica.

Figura 6 – Esquema dos processos de (a) cavitação inercial e (b) cavitação não inercial



Fonte: Vyas et al. (2019)

Após um determinado número de oscilações, a bolha sofre uma compressão que causa sua implosão, um processo adiabático que produz pressões de até 500 Bar e temperaturas de até 5000 K. Existem dois principais tipos de cavitação acústica. Na cavitação transiente ou inercial (Figura 6.a), a bolha pode nem mesmo completar um ciclo e causar uma implosão muito violenta, podendo gerar ondas de choque de alta amplitude e microjatos de alta velocidade (Vyas *et al.*, 2019). Já a cavitação estável ou não inercial (Figura 6.b), é aquela na qual a bolha oscila por um longo período de tempo até implodir, sendo comum quando as bolhas estão sob a ação de um campo sonoro de baixa amplitude. Como pode-se ver, a principal diferença entre os dois tipos está na quantidade de energia envolvida na implosão da bolha. Na cavitação transiente o colapso é tão forte que pode desencadear luz (processo chamado sonoluminescência) e reações químicas (Lais *et al.*, 2018) o que não ocorre na cavitação estável.

Apesar da classificação feita, existe ainda um terceiro tipo de cavitação que consiste em uma combinação dos dois tipos mencionados. Na cavitação de alta energia estável ou cavitação repetitiva transiente, as bolhas oscilam por um longo período de tempo mas também conseguem gerar o fenômeno da sonoluminescência e reações químicas, ainda que em menor escala. Os fenômenos gerados na cavitação transiente são de grande aplicabilidade no âmbito da limpeza de bioincrustações, pois a implosão das bolhas pode causar danos e prevenir e/ou eliminar o organismo responsável pela incrustação. Na seção a seguir será abordada a problemática envolvendo a bioincrustação do mexilhão-dourado que será submetido a testes para avaliar a eficácia do ultrassom na mortalidade deste animal, que pode ser causada por meio do fenômeno da cavitação acústica.

#### **3** LIMNOPERNA FORTUNEI E ULTRASSSOM

Este trabalho visa construir um sistema ultrassônico e avaliar a eficácia do ultrassom na mortalidade de larvas de mexilhão-dourado *Limnoperna fortunei*. Nesse sentido, é de suma importância discutir a problemática envolvendo esse animal, que causa grandes impactos negativos tanto ao meio ambiente quanto à estruturas humanas. O mexilhão-dourado adentrou o Brasil via água de lastro na década de 1990 e desde então vem se proliferando descontroladamente e causando grandes danos ao meio ambiente e à estruturas humanas; essa bioincrustação já afeta diversos estados no Brasil, incluindo Alagoas. Neste capítulo serão abordados os impactos do mexilhão-dourado bem como quais métodos são utilizados atualmente para seu controle, justificando assim a proposta de eliminar suas larvas utilizando o método da limpeza ultrassônica.

#### 3.1 IMPACTOS CAUSADOS PELO LIMNOPERNA FORTUNEI

Uma espécie exótica pode ser definida como aquela que está fora da sua área de distribuição natural, ou seja, não é natural daquele local, e foi introduzida (voluntária ou involuntariamente) neste novo ambiente por meio da ação humana (Leão *et al.*, 2011). Se a espécie consegue se estabelecer, gerar descendentes férteis e viver em harmonia no novo habitat, ela é considerada estabelecida. Caso a espécie estabelecida se prolifere sem controle e passe a ameaçar a biodiversidade nativa, ela é considerada uma espécie exótica invasora.

#### 3.1.1 Impactos Ambientais

Atrás apenas da destruição ambiental, a introdução de espécies exóticas em ecossistemas é a segunda maior causa da perda de biodiversidade do mundo do (Darrigan; Damborenea, 2011). Analisando as extinções recentes em cinco principais táxons, (Bellard *et al.*, 2016) avaliaram que as espécies exóticas são a segunda ameaça mais comum associada a espécies que foram completamente extintas desde 1500 d.C.

Uma espécie exótica invasora que tem chamado atenção e causado grande impacto recentemente é o *Limnoperna fortunei*, popularmente conhecido como mexilhão-dourado. Esse animal adentrou o Brasil via água de lastro na década de 1990 e desde então vem causando danos substanciais tanto ao meio ambiente quan to à estruturas humanas.

Atualmente, o mexilhão-dourado habita a região pantanense no Brasil e outras regiões, além de habitar desde os afluentes ao norte do Rio Paraná até o Rio da Prata, abrangendo 5 países (Brasil, Argentina, Uruguai, Bolívia e Paraguai). Grandes bancos de mexilhões com densidades de até mais de 200.000 indivíduos por metros quadrados são uma característica dominante da fauna bentônica em toda a bacia hidrográfica do Rio da Prata. Os impactos ambientais são um tópico complexo, pois a introdução de uma nova espécie causa consequências diferentes a depender do ecossistema em que for inserida; nesse sentido e tendo em vista também o foco do trabalho, os impactos serão apenas sumarizados brevemente. De acordo com a revisão de (Karatayev *et al.*, 2015), o mexilhão-dourado L. fortunei afeta indiretamente a comunidade de macrófitas e de perifíton, acarretando incremento de biomassa. Esses efeitos se devem às alterações na qualidade da água, especialmente quanto à disponibilização de nutrientes, por meio da liberação de fezes e pseudofezes (Boltovskoy *et al.*, 2015). Outros impactos causados por esse organismo são a maior proliferação de cianobactérias, aumento de macrófitas, competição com o zooplâncton por comida, maior abundância de invertebrados bentônicos, ocupação do espaço e disputa por alimento com os moluscos nativos, dentre outros (Boltovskoy *et al.*, 2015). Além disso, incrustações sobre conchas de moluscos e bivalves têm afetado a estrutura e a composição da taxocenose de bivalves de água doce, sendo uma das ameaças à conservação de algumas espécies.

## 3.1.2 Impactos Econômicos

Os impactos econômicos ocorrem em diversas áreas, mas as indústrias mais afetadas são as usinas hidrelétricas e as companhias de captação, tratamento e distribuição de água. Nas usinas e reservatórios, a incrustação do *Limnoperna fortunei* pode causar danos a equipamentos de resfriamento, tubulações, tanques, bombas, e muitas outras estruturas. O prejuízo que a hidrelétrica de Itaipu passou a ter após a incrustação do mexilhão-dourado passou a ser de US\$ 1 milhão de dólares por dia devido à redução no tempo de manutenção das turbinas (Targino *et al.*, 2020). Durante esse processo de limpeza geralmente a usina tem que paralisar suas atividades; logo, além dos gastos para realizar a limpeza, ela sofre uma perda de produtividade.

Nas companhias de captação, tratamento e distribuição de água os prejuízos ocorrem porque o mexilhão entope válvulas, grades, bombas e tubulações, reduzindo o fluxo de água recebido e distribuído. Além disso, caso o animal incruste a estação de tratamento, ao morrer gera resíduo orgânico, levando assim à necessidade de limpeza e prejuízos com a paralisação de atividades no setor afetado.

O mexilhão causa ainda prejuízos na área da aquicultura por crescer nas redes e nos tanques, causando a degradação do material e uma perda da qualidade da água. No setor de navegação, esse animal incrusta eclusas e casco de navios, causando danos estruturais e prejuízos

com limpeza. Devido aos vários impactos ambientais causados pela inserção dessa espécie exótica nos ecossistemas, a pesca acaba por ser também prejudicada, pois ocorrem desequilíbrios na cadeia alimentar. Até mesmo o turismo sofre consequências da proliferação do mexilhãodourado, pois o acúmulo de conchas em praias de água doce dificulta a circulação de banhistas que podem sofrer acidentes como corte nos pés com a concha do animal (Targino *et al.*, 2020).

### 3.2 MÉTODOS UTILIZADOS NO COMBATE AO LIMNOPERNA FORTUNEI

Como pôde-se ver na subseção anterior, o mexilhão-dourado está relacionado com uma ampla problemática por causar diversos impactos negativos, tanto ambientais quanto econômicos. Nesse sentido, é de grande interesse e relevância a pesquisa de novos métodos para a eliminação dessa bioincrustação, que sejam simultaneamente ambientalmente amigáveis e economicamente viáveis. A seguir será feita uma breve descrição dos principais métodos utilizados no combate ao mexilhão-dourado, citando quando pertinente as vantagens e desvantagens de cada um.

#### 3.2.1 Métodos Físicos

#### 3.2.1.1 Privação de Oxigênio

Esse método foi testado por (Perepelizin; Boltovskoy, 2015) que fizeram experimentos em mexilhões-dourados (*Limnoperna fortunei*) jovens e adultos, de 7 e 20 mm respectivamente, que foram expostos a condições anóxicas, com níveis de oxigênio dissolvido na água abaixo de 0,16 mg/L. Os resultados indicaram que a mortalidade total é alcançada após 10–12 dias (a 27 °C) e 21–29 dias (a 20 °C), com destaque para o fato de que os mexilhões de 7mm (jovens) resistiram consideravelmente menos que os de 20 mm. A principal desvantagem deste método foi o grande intervalo de tempo necessário para se atingir a mortalidade, não sendo indicado em casos de limpeza com urgência, o que acontece nas indústrias por exemplo.

#### 3.2.1.2 Tratamento térmico

Esse método consiste em eliminar os mexilhões variando a temperatura da água em que eles estão inseridos. (Perepelizin; Boltovskoy, 2011) fizeram experimentos em laboratório com mexilhões jovens ( $7 \pm 2$  mm) e adultos ( $21 \pm 2$  mm) que foram aclimatados em ambientes de 12 e 28 °C. Os resultados mostraram que a temperaturas de 34 a 36 °C, a mortalidade total leva 25,0 a 644,3 h, independentemente do tamanho dos animais, mas os mexilhões aclimatados a 12 °C morreram significativamente mais rápido do que aqueles aclimatados a 28 °C; e de 38 a

43 °C, a mortalidade total ocorre após 0,7 a 17,5 h. Os pontos positivos desse método foram a economia e o pouco impacto negativo no meio ambiente. Os pontos negativos desse método são possíveis dificuldades operacionais, além de que tratamentos térmicos em sistemas aquáticos grandes podem ser inviáveis e ocasionar o desgaste ou mau funcionamento dos equipamentos utilizados. Ademais, pode haver limitações com regulamentos que não permitam o aumento da temperatura da água.

#### 3.2.1.3 Dessecação

(Montalto; Drago, 2003) fizeram experimentos em laboratório e ao ar livre para avaliar a resistência de mexilhões pequenos (até 6 mm), de tamanho médio (6–15 mm) e de tamanho máximo (15–27 mm) à dessecação. Os resultados dos experimentos em laboratório mostraram que os mexilhões são consideravelmente resistentes a esse processo, sendo necessárias cerca de 72 h para matar os mexilhões pequenos, 192h para matar os médios e até 276h para eliminar os mexilhões de tamanho máximo. Nos experimentos ao ar livre, mexilhões pequenos morreram completamente também em até 72h tempo, e os mexilhões médios e de tamanho máximo morreram em menos tempo, 96 e 108 h, respectivamente. Como os L. fortunei formam colônias densas, os mexilhões localizados em posições mais internas tem uma maior tolerância à dessecação. Os experimentos mostraram que a resistência a esse processo aumenta com o tamanho do mexilhão e que esses organismos e essa medida tem como ponto negativo o alto tempo necessário para atingir 100% de mortalidade, tornando-se inviável economicamente em tubulações ou estruturas similares.

## 3.2.1.4 Corrente elétrica

(Katsuyama *et al.*, 2005) fizeram experimentos testando o efeito do estímulo elétrico de uma corrente contínua no comportamento do mexilhão dourado em tubos contendo água. Foram testados dois tipos de configuração de eletrodos no tubo com os mexilhões: um com eletrodos positivos e negativos alternados ao longo do tubo, e outro com dois eletrodos negativos (um em cada extremidade) e vários eletrodos positivos entre eles. Os autores verificaram que utilizando a segunda configuração, uma tensão elétrica de 7kV imobilizou 80% das larvas de mexilhão. Para eliminar os mexilhões com eficácia é necessário uma intensidade elétrica muito alta durante uma exposição curta ou um tempo de exposição mais longo em menor intensidade para alcançar o efeito desejado . Levando em conta as voltagens necessárias, a duração necessária da exposição,

e a quantidade de energia necessária, essa técnica de controle não é viável economicamente para a maioria das aplicações industriais (Claudi; Oliveira, 2015).

#### 3.2.1.5 Raspagem

Esse método consiste na remoção mecânica dos mexilhões, feita por meio de robôs ou mergulhadores. Apesar de rudimentar, este método é muito utilizado em empresas públicas no Rio Grande do Sul e no Paraná (Targino *et al.*, 2020). Os pontos negativos deste método são a paralisação das atividades para a realização da limpeza e o sofrimento de danos nas superfícies afetadas devido ao processo de raspagem.

#### 3.2.1.6 Irradiação

De acordo com (Claudi; Oliveira, 2015), os estudos realizados utilizando esse método sugerem que a irradiação UV tem potencial para ser uma boa estratégia de controle do mexilhãodourado. Porém este método conta com uma limitação importante: a transmissibilidade da água deve permitir uma dose adequada de radiação. Isso torna inviável a aplicação deste método em vários rios na América do Sul, que possuem uma grande suspensão de sólidos, impedindo assim que os mexilhões sofram a radiação necessária para eliminá-los. Nesse caso seriam necessária uma filtração da água para a execução deste método, tornando-o economicamente inviável.

#### 3.2.2 Métodos Químicos

Existem diversos reagentes químicos que são utilizados atualmente no combate ao mexilhão-dourado, como Cloro (Cl), hipoclorito de cálcio  $Ca(ClO)_2$ , dicloroisocianurato de sódio ( $C_3Cl_2N_3NaO_3$ ), permanganato de potássio KMnO\_4, peróxido de hidrogênio ( $H_2O_2$ ) e cloramina T ( $CH_3C_6H_4SO_2NCINa$ ) (Zhou *et al.*, 2021). Nos estudos realizados por (CATALDO et al., 2003), o hipoclorito de sódio causou 100% da mortalidade do mexilhão-dourado em duas semanas de exposição. Neste mesmo trabalho, verificou-se que a cloramina-T causou 57,2% de mortalidade em uma semana e o peróxido de hidrogênio causou 77% de mortalidade nesse mesmo período. Apesar desses oxidantes serem efetivos, eles geram subprodutos prejudiciais ao meio ambiente e uma exposição por um longo tempo pode gerar a poluição da água, limitando a aplicação desse tipo de método.

De acordo com (Zhou *et al.*, 2021), ainda há poucos métodos de controle do mexilhãodourado que sejam simultaneamente eficazes e ambientalmente amigáveis. Diante desse contexto, é de suma importância pesquisar novos métodos. O ultrassom vem recentemente sendo utilizado para a limpeza de incrustações e bioincrustações. Por não gerar nenhum subproduto negativo ao meio ambiente e poder ser utilizado em paralelo ao funcionamento do setor afetado (acabando assim com os prejuízos graças às paralisações) o ultrassom é justificado como um método com potencial de contribuir para a resolução da problemática do mexilhão-dourado. Na próxima seção, será feita uma breve revisão a respeito de trabalhos que utilizam ultrassom de potência no combate à bioincrustações.

## 3.3 ULTRASSOM NA LIMPEZA DE BIOINCRUSTAÇÕES

O ultrassom vem se destacando nos últimos anos no âmbito da limpeza de bioincrustações, por ser um método que não polui o meio ambiente e é viável economicamente. Muitos estudos foram feitos utilizando o ultrassom para a remoção de cracas, como (Kitamura *et al.*, 1995), (Guo *et al.*, 2011) e (Seth *et al*, 2010). No primeiro estudo, foi avaliada a mortalidade de cracas utilizando um transdutor que emitia uma onda ultrassônica em um tanque contendo as amostras. A frequência mais efetiva foi 19,5 kHz e foi possível tanto eliminar os animais quanto inibir seu assentamento. Uma irradiação total de 4300 Pa·s foi suficiente para eliminar 50% das larvas. (Guo *et al.*, 2011) também avaliou a inibição do assentamento de larvas de cracas usando ultrassom de baixa frequência. Seus resultados mostraram que a frequência de 23 kHz foi a mais efetiva e que após uma exposição de 300s foi possível reduzir pela metade o assentamento das cracas. (Seth *et al*, 2010) quantificou a energia mínima necesária para eliminar cracas e chegou ao resultado de que uma frequência de 20kHz e uma densidade de potência de 0,0975  $W/cm^3$  durante o tempo de tratamento de 45s, podem efetivamente pulverizar a larva da craca, aplicando uma energia de 0,1 mJ/larva.

Além dos trabalhos sobre cracas, existem trabalhos sobre o uso do ultrassom contra mexilhões, incluindo o *Limnoperna fortunei*. (Haque; Kwon, 2018) avaliou o uso do ultrassom juntamente com a aplicação de hipoclorito de sódio (cloração) sobre o bivalve marinho Mytilus edulis (mexilhão azul). Os resultados obtidos no trabalho realizado mostraram que o ultrassom de 42 kHz é melhor que 28 kHz de para matar as larvas dessa espécie. Os resultados foram positivos com as larvas, chegando a mais de 90% de mortalidade, mas nos mexilhões adultos a mortalidade máxima foi de 50%, o que segundo os autores se deve a um sistema de órgãos mais complexo e uma maior resistência do animal devido à sua concha. Os dados também indicam que a mortalidade do mexilhão adulto teve uma maior porcentagem para o mexilhão de 14 mm do que para o mexilhão de 25 mm.

(Zhou et al., 2021) analisaram o ultrassom como método de controle para o mexilhão

dourado, fazendo testes tanto em mexilhões jovens quanto adultos, com potências variando entre 300 a 600W, a uma distância fixa de 8,5 cm. Segundo os autores, o ultrassom representa uma solução prática e ambientalmente correta para controlar a incidência dessa espécie de mexilhão em, por exemplo, programas hidráulicos, irrigação, água de lastro e aquicultura. Diferenças na taxa letal e na gravidade das lesões teciduais entre juvenis e adultos sugerem que as cascas dos juvenis têm resistência reduzida ao ultrassom e são portanto mais fáceis de eliminar. Isso reforça a hipótese de que a larva dos mexilhões (que não possui concha) pode ser um alvo estratégico para o combate à bioincrustação. Eles relataram que o ultrassom de potência entre 450 W (para juvenis) e 600 W (para adultos) a uma distância fixa de 8,5 cm por 30 min é uma estratégia eficaz para matar o L. fortunei. Um ponto negativo deste trabalho é que os autores não descrevem qual aparato ultrassônico utilizado (tipo de transdutor, frequência, etc.). Os resultados corroboram com a ideia de que o ultrassom pode ser um método eficaz para eliminar larvas de mexilhão-dourado.

O Aedes aegypti, popularmente conhecido como mosquito da dengue, não causa bioincrustação, mas por ser um vetor de doenças também é alvo da busca por métodos para sua eliminação. (Kalimuthu *et al.*, 2020) usou um dispositivo comercial chamado Larvasonic para avaliar a eficácia do ultrassom na mortalidade de Aedes aegypti. Ele manteve fixa uma potência de 100W e variou o tempo de exposição e a distância da amostra até a fonte do ultrassom. Os resultados mostraram que a frequência de 18 a 30 kHz causou 100% de mortalidade no Ae. aegypti e pupas a 20 cm de distância do transdutor após uma exposição de 30 s.Leva 180s para matar todas as pupas a uma distância de 60 cm.

Alguns trabalhos não avaliaram a mortalidade de uma espécie em específico, mas sim a capacidade do ultrassom de limpar uma superfície metálica coberta por diversos organismos. Esse foi o caso de (Han; Qu, 2021), que avaliaram um método para remover a bioincrustação do casco de navios com base no efeito de cavitação e em ondas guiadas por ultrassom, *Ultrasonic Guided Waves* (UGWs). Foram colocados dois transdutores em um lado de uma placa de aço, enquanto no outro organismos marinhos comumente encontrados em navios foram anexados graças ao efeito do muco biológico. Os resultado experimentais mostraram que a maioria dos organismos foi removida, validando assim a simulação numérica feita e verificando que existe um desempenho satisfatório de remoção de incrustações com UGWs. Uma ressalva desse trabalho é que a descrição dos resultados foi apenas qualitativa por meio de imagens, não havendo um cálculo preciso de quanta bioincrustação foi removida.

Os trabalhos discutidos nesta seção são apenas um pequeno recorte de vários outros

que utilizam diferentes tipos de ultrassom nas mais variadas espécies. Como pode-se ver nesta breve revisão, o ultrassom pode ser utilizado para eliminar bioincrustações de diferentes tipos, incluindo mexilhões, que são o foco deste trabalho. Tendo em vista que esse é um método livre de subprodutos tóxicos e eficaz, valida-se assim completamente a hipótese proposta de constuir um sistema ultrassônico para avaliar a mortalidade em larvas de mexilhão-dourado. No capítulo seguinte será discutido em detalhes o modelo numérico das células ultrassônicas construídas neste trabalho.

## **4 MODELO NUMÉRICO**

Neste trabalho conduziu-se uma investigação computacional por meio do método de elementos finitos, empregando o software COMSOL Multiphysics. Foram elaboradas modelagens numéricas que resultaram no projeto de dois transdutores de Langevin, operando em frequências de ressonância de 25 kHz e 40 kHz. Através dessas simulações, definimos as geometrias e os materiais utilizados na construção dos transdutores. As simulações foram realizadas em uma geometria bidimensional axissimétrica e abrangeram os módulos de Mecânica dos Sólidos, Eletrostática e Pressão Acústica (no domínio de frequência). Adicionalmente, os efeitos de amortecimento mecânico foram incorporados em todas as partes que compõem os transdutores. Desta forma, foram construídos modelos nos quais os resultados de frequência de operação e impedância elétrica convergem para os resultados reais. Após a conclusão das simulações dos transdutores, foram conduzidas simulações das células ultrassônicas, que foram formadas pela união dos transdutores com uma câmara cilíndrica. Ao longo deste capítulo, a simulação numérica dos transdutores de Langevin e das células ultrassônicas será descrita detalhadamente.

#### 4.1 COMSOL MULTIPHYSICS®

O COMSOL Multiphysics® é um software comercial destinado a cientistas e engenheiros. Pode ser utilizado para simular dispositivos, processos, manufatura e pesquisa científica. Sua principal vantagem é o acoplamento de diversas físicas, não havendo assim a necessidade de utilizar vários *softwares* para analisar um mesmo problema. O COMSOL utiliza o Método de Elementos Finitos nas simulações; este é um procedimento matemático que subdivide o domínio do problema em várias partes chamadas de elementos, resolve equações diferenciais parciais para cada um desses elementos e soma todos os resultados culminando na obtenção de uma convergência para a solução do problema.

O *software* COMSOL conta com um amplo leque de funcionalidades, podendo ser utilizado para simular diversos tipos de problemas científicos e de engenharia. Usando as físicas incluídas e a vasta biblioteca de materiais é possível construir modelos definindo constantes físicas, propriedades de materiais, restrições, dentre outras. É possível aplicar esses parâmetros diretamente a domínios sólidos e fluidos, limites, arestas e pontos, não havendo necessidade de definir equações subjacentes.

No COMSOL existem diversas áreas de trabalho denominados Módulos, nos quais estão contidas as Físicas. Exemplos de Módulos são Acústica, Eletróstática e Mecânica dos Sólidos. O

Módulo de Acústica por exemplo contém diversas Físicas como Pressão Acústica, Ultrassom, *Streaming* Acústico, etc. A tela de trabalho do *software* (Figura 7) utiliza interface gráfica e contém 3 janelas principais: *Model Builder, Settings e Graphics*. Na primeira, estão presentes e estruturadas na forma de árvore todas as abas configuráveis do programa, sendo as principais: Definições, Geometria, Físicas, Materiais, Estudos, Malha e Resultados. Ao acessar algum desses blocos nos quais o *software* está organizado, é possível configurá-los na janela *Settings*. A aba *Graphics* por sua vez permite a vizualização gráfica do que está sendo feito, nela é possível ver gráficos, formato da geometria, malhas, plots, etc.

🔍   🗅 📂 🖳 🕨 🕤 ८ 🗐 🛍 🛱 🗑 🗮 🕅 🗮 🗎	Untitled.mpl	h - COMSOL Multiphysics	- 0 ×
File Home Definitions Geometry Materials Physics Mesh	Study Results Developer		?
Application Model Builder Manager Select Add Workspace Model Definition	bibles - ctions - meter Case Geometry Materials Physics	Build Mesh = Compute Select Mesh + Mesh Study = Mesh Study =	Windows •  Reset Desktop •  Layout
Model Builder + → ↑ ↓ I I I I I I I I I I I I I I I I I I	Settings  Undised.mph  Protection Editing not protected Set Password Undised.mph  Undised.mph  Used Products COMSOL Multiphysics  Used Products Computation Tatle Description Last:	Staphics 2	• • • • • • • • • • • • • • • • • • •
	769 MB   722 MB	ricesse conngardyoes pa	

Figura 7 – Área de trabalho do COMSOL

Fonte: O autor (2024)

# 4.2 DEFINIÇÕES DA SIMULAÇÃO

No âmbito do desenvolvimento das células ultrassônicas para experimentos futuros relacionados à aplicação do ultrassom em larvas de mexilhão, foram conduzidas simulações numéricas com o propósito de determinar a geometria e dimensões dos transdutores e das bases das células. O primeiro passo da modelagem é definir a dimensão do problema a ser estudado. O COMSOL conta com as seguintes opções: 0D, 1D, 1D-Axysimmetric, 2D, 2D-Axysimmetric e 3D (Figura 8). O principal critério para a escolha neste quesito é a simetria do problema. Neste trabalho, utilizamos o software COMSOL com um modelo 2D axissimétrico. Nessa dimensão, a modelagem é feita em 2D e a geometria do problema é rotacionada em torno de um eixo de simetria gerando assim um sólido de revolução; por padrão o COMSOL utiliza um plano com as coordenadas r (abcissa) e z (ordenada). Essa abordagem foi adotada devido à alta simetria

longitudinal apresentada pelo transdutor de Langevin. Além disso, é importante mencionar que os modelos em 2D demandam uma menor alocação de recursos computacionais em comparação com os modelos tridimensionais (pois, para este caso, a quantidade de elementos mínima para uma boa convergência é bem menor no modelo bidimensional do que no tridimensional), tornando o processo de modelagem operacionalmente mais eficiente.

Figura 8 - Dimensões espaciais utilizáveis no software COMSOL Multiphysics®



Fonte: O autor (2024)

Após definir a dimensão espacial, é necessário selecionar as Físicas que serão utilizadas no problema (Figura 9). Os Transdutores de Langevin são dispositivos que através do efeito piezoelétrico podem converter energia elétrica em energia mecânica. Desse modo, foram utilizadas as Físicas *Solid Mechanics*, que rege as propriedades dos sólidos e permite estudar a estrutura do transdutor durante sua vibração e *Eletrostatics*, que contém as equações do Eletromagnetismo e está ligada com a parte elétrica do sistema. Além disso, foi utilizada a Multifísica <sup>1</sup> *Piezoelectric Effect*, uma interface entre as duas Físicas anteriormente citadas, que permite incorporar na simulação o efeito da piezoeletricidade que acontece nas cerâmicas.

	Search
Recently Used	
AC/DC	
Acoustics	
Chemical Species Transport	
Electrochemistry	
Fluid Flow	
🕨 👭 Heat Transfer	
Optics	
🛛 🛞 Plasma	
Radio Frequency	
Semiconductor	
Structural Mechanics	
Au Mathematics	
	Add
dded physics interfaces:	Add
dded physics interfaces:	Add
dded physics interfaces: Solid Mechanics (solid) Electrotatics (e)	Add
dded physics interfaces:	Add
dded physics interfaces: ⊕ Solid Mechanics (solid) ¥ Electrostatics (e) ▲ Multiphysics ▶ Piecelectric Effect (roze1)	Add
dded physics interfaces: → Solid Mechanics (solid) → Electrostatics (e) Multiphysics → Piezoelectric Effect (pze1)	Add
dded physics interfaces: ➡ Solid Mechanics (solid) ➡ Electrostatics (ep) ▲ Multiphysics ▲ Piezoelectric Effect (pzel)	Add
dded physics interfaces: Solid Mechanics (solid) Electrostatics (es) Multiphysics Piezoelectric Effect (pze1)	Add

#### Figura 9 – Físicas utilizadas na modelagem

Fonte: O autor (2024)

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> No COMSOL, existem interfaces de duas ou mais Físicas, esses acoplamentos são denominados Multifísicas.

Feito isso, o próximo passo foi determinar qual estudo seria realizado na simulação. O COMSOL permite fazer diferentes tipos de análises: domínio do tempo, domínio da frequência, estacionário, etc. Na nossa modelagem, foram utilizados os estudos *Frequency Domain* e *Eigenfrequency*. O estudo *Frequency Domain* é utilizado para calcular a resposta de um sistema submetido a uma excitação harmônica (no caso do transdutor, os pulsos elétricos emitidos nas cerâmicas) para uma ou mais frequências. A partir disso, estudamos o comportamento do transdutor variando a frequência, de modo que pode-se analisar a impedância em função da frequência e assim encontrar a frequência de ressonância do sistema. Este é o principal parâmetro, mas também foram analisadas outras grandezas em função da frequência como o *Stress* de Von Mises e o deslocamento longitudinal. Já o estudo *Eigenfrequency*, é utilizado para encontrar modos de vibração e frequências de ressonância das células ultrassônicas, o que permitiu encontrar suas frequências de ressonância. A simulação descrita até este ponto está mostrada na Figura 10. A reta r = 0 define o eixo e simetria utilizado na modelagem.





Fonte: O autor (2024)

Para realizar a modelagem de modo mais fácil, é importante sempre parametrizar a simulação. Desse modo, pode-se mudar o valor de um parâmetro nas definições que toda a simulação irá se adequar ao novo valor. Caso a simulação não esteja parametrizada, é necessário substituir manualmente o novo parâmetro em cada campo onde ele foi utilizado, gerando assim um maior volume de trabalho sem um ganho efetivo, portanto reduzindo a eficiência no ato de simular. Os parâmetros utilizados para a modelagem dos transdutores foram adicionados

no nó *Global Definitions*. Feitas todas as definições iniciais, partimos para a modelagem dos transdutores propriamente, que será descrita a seguir.

#### 4.2.1 Modelagem dos Transdutores de Langevin

No âmbito do desenvolvimento das células ultrassônicas para experimentos futuros relacionados à aplicação do ultrassom em larvas de mexilhão, foram conduzidas simulações numéricas com o propósito de determinar a geometria e dimensões dos transdutores e das bases das células. Nesse contexto, utilizamos o software COMSOL com um modelo 2D axissimétrico, no qual a geometria 2D do problema é rotacionada em torno de um eixo gerando um sólido de revolução. O *software* COMSOL contém o nó *Geometry* onde é possível modelar a geometria do problema utilizando pontos, retas, curvas, polígonos e outras figuras. Também é possível fazer o desenho da geometria utilizando outros programas e importá-lo para o COMSOL, que aceita arquivos CAD, por exemplo. Porém, devido à simetria do problema foi possível realizar a modelagem da geometria utilizando apenas as ferramentas que o COMSOL disponibiliza. Foram modelados dois transdutores, com frequências de ressonância de 25 kHz e 40 kHz. A Figura 11 (a) e (b) apresenta a geometria dos transdutores de 25 e 40kHz, respectivamente.





Fonte: O autor (2024)

Como pode-se ver nas Figuras 11.a e 11.b., a maioria dos elementos dos transdutores podem ser representados por retângulos (corpo do parafuso, cabeça do parafuso, cerâmicas piezoelétricas, arruela) e as massas metálicas superior e inferior são polígonos. Nesse sentido, foi possível modelar as geometrias utilizando apenas as ferramentas *Rectangle* e *Polygon*. Ambos os transdutores precisam ter comprimento  $\lambda/2$  e na modelagem foram mantidas fixas as dimensões

das cerâmicas piezoelétricas e variados os tamanhos das massas metálicas até se atingir a frequências de ressonância de 25 kHz e 40 kHz. Nesse processo também é levado em conta a viabilidade da usinagem das peças, que foi feita artesanalmente em um torno disponibilizado pela Universidade Federal de Alagoas. Nesse sentido, as variações dos tamanhos das massas foram feitas como sendo da ordem de pelo menos 0.1mm pois é uma precisão que se consegue atingir utilizando as ferramentas disponíveis.

No COMSOL, os materiais podem ser inseridos a partir do nó *Materials*; o *software* conta com uma vasta biblioteca de materiais e é possível também definir um material informando seus parâmetros. Os transdutores de Langevin são constituídos por duas massas metálicas (superior e inferior), entre as quais estão inseridas cerâmicas piezoelétricas; todo o sistema é fixado por um parafuso de alta resistência mecânica. No transdutor com frequência de ressonância de 25 kHz (Figura 11.a), a massa superior é composta de latão e a inferior de alumínio e o parafuso é de aço. O transdutor com frequência de ressonância de 40 kHz (Figura 11.b) possui tanto a massa superior quanto a inferior feitas de alumínio e um parafuso de aço. Em ambos os transdutores, as cerâmicas piezoelétricas são feitas de Titanato Zirconato de Chumbo (PZT-4). As propriedades mecânicas desses materiais estão detalhadas na Tabela 1.

Material	Densidade (kg/m <sup>3</sup> )	E (GPa)	Poisson's ratio	Fator de perda
Alumínio	2700	70	0,33	$2,5 \times 10^{-3}$
Latão	8800	103	0,34	$5,8 \times 10^{-3}$
Aço	7850	205	0,28	$4,173 \times 10^{-4}$
PZT-4	7500	58,9	0.31	$2,2 \times 10^{-3}$

Tabela 1 – Propriedades Mecânicas dos Materiais

Fonte: O autor (2024)

É importante ressaltar que a escolha dos materiais advém de uma análise física. Também foram levados em conta a viabilidade econômica do material e a possibilidade de usinagem das peças com o torno da universidade, que possui suas limitações. As cerâmicas piezoelétricas são de PZT-4 porque esse material realiza o efeito piezoelétrico com uma alta eficiência e é amplamente utilizado em transdutores de Langevin. As massas metálicas são de alumínio devido a suas propriedades mecânicas e térmicas, sendo importante lembrar que o transdutor aquece quando está funcionando, sendo relevante levar em consideração a capacidade térmica do material.

O latão foi utilizado na massa superior do transdutor de 25 kHz porque se trata de um transdutor do tipo Tonpilz. A ideia desse tipo de transdutor é utilizar um material muito mais denso (e portanto mais difícil de ser vibrado) na massa superior em comparação com o material da massa inferior. Desse modo, pode-se concentrar uma maior energia na massa inferior, o que é interessante do ponto de vista prático porque é ela que entrará em contato com o meio pra gerar a onda ultrassônica. Em suma, a ideia é otimizar o transdutor: ao invés de vibrar as duas massas com a mesma amplitude, concentrar uma maior energia apenas na massa que será utilizada na aplicação do transdutor. Nos parafusos, foi utilizado aço porque esta peça sofre uma grande tensão mecânica. Como pode-se ver na Tabela 1, o aço possui um alto módulo de Young, sendo portanto um bom material para se utilizar no parafuso pois confere ao mesmo uma alta rigidez. Outro detalhe a ser mencionado é que para o funcionamento do transdutor de Langevin ocorra é necessário que as cerâmicas tenham sua polaridade invertida. Uma maneira de fazer isso é adicionar dois materiais PZT-4 idênticos e inverter os sinais dos elementos da matriz de acoplamento de uma das cerâmicas.

Definidos os materiais, o próximo passo é selecionar as Físicas do problema. Para a modelagem dos transdutores foram utilizados os módulos *Solid Mechanics* e *Eletrostatics*, além da Multifísica *Piezoelectric Effect*. O primeiro módulo rege a mecânica dos sólidos e permite avaliar os efeitos da vibração na estrutura do transdutor. Como todo o dispositivo é um sólido, selecionamos todo o transdutor como sendo regido por este módulo. Por padrão, o *software* considera todos os elementos selecionados como materiais lineares elásticos (todos estão selecionados no nó *Linear Elastic Material*). Porém, as cerâmicas piezoelétricas se comportam de forma diferente quando submetidas a uma tensão, sendo assim necessário adicionar o nó *Piezoelectric Material* e selecionar as cerâmicas no mesmo.

O amortecimento é a capacidade de um sistema mecânico de reduzir a intensidade de um processo oscilatório, de modo que a amplitude de vibração é reduzida (Rivin, 1999). O efeito do amortecimento ocorre por meio da transformação de energia mecânica do movimento em outro tipo de energia, geralmente a energia térmica na forma de calor. O fator de amortecimento é um parâmetro que está ligado com as propriedades dos materiais, pois o efeito do amortecimento ocorre de modo diferente para diferentes materiais. Para incluir o fator de amortecimento nos materiais, é necessário adicionar o nó *Damping* nos materiais lineares elásticos e o nó *Mechanical Damping* nos materiais piezoelétricos. O COMSOL possibilita utilizar quatro tipos de amortecimento, e para este trabalho utilizamos o tipo *Isotropic Loss factor*. Selecionados os materiais, é necessário informar ao *software* o fator de perda ou fator de amortecimento ( $\eta$ ). Este

número é adimensional e quanto maior ele for, mais perdas ocorrerão durante o processo de oscilação.

Para que o transdutor funcione, é necessário aplicar um sinal de corrente alternada nas cerâmicas piezoelétricas, para que aconteça o efeito piezoelétrico nas mesmas e seja efetivada a conversão de energia elétrica em energia mecânica na forma de onda ultrassônica. Para isso, utilizamos o módulo *Eletrostatics*, que rege o campos elétricos, campos de deslocamento elétricos e distribuições de potenciais em dielétricos quando a distribuição de cargas está explicitamente definida. Para criar um circuito elétrico, selecionamos as cerâmicas piezoelétricas no módulo *Eletrostatics*. Feito isso, definimos os pontos onde haverá diferença de potencial e os pontos aterrados (os transdutores reais são aterrados para evitar choques elétricos durante sua utilização). Selecionamos no nó *Ground* (que será o responsável por fazer a ligação em Terra) as faces da cerâmica que fazem contato com o transdutor e também nas faces de contato entre cada par de cerâmicas. Aplicamos então o nó *Terminal* nas faces restantes das cerâmicas, e podemos escolher qual diferença de potencial será aplicada; para este trabalho, utilizamos 1V em ambos os transdutores.

Feitas todas as seleções das Físicas *Structural Mechanics* e *Eletrostatics* e suas definições, selecionamos as cerâmicas piezoelétricas no nó *Piezoelectric Effect* que está dentro do módulo *Multiphysics*. Assim, o *software* une as interfaces físicas e resolve as equações do efeito piezoelétrico para as cerâmicas.

O COMSOL utiliza o Método de Elementos Finitos (MEF) que subdivide o domínio do problema em partes denominadas elementos finitos e resolve equações diferenciais parciais para cada elemento, fazendo ao fim uma convergência do problema somando todas as soluções. No nó *Mesh* é possível configurar a malha da simulação. O usuário pode criar a própria malha de acordo com as especificidades do problema e o estudo feito com base no Método de Elementos Finitos, ou utilizar um dos tipos de malhas predefinidas do COMSOL. Estas últimas variam de *Extremely Coarse* até *Extremely Fine* em ordem crescente de número de elementos. Quanto mais fina a malha for, mais elementos também aumenta o custo computacional para executar a simulação, de modo que escolher o melhor tipo de malha requer um estudo a fim de obter uma boa relação entre a quantidade de elementos utilizados e a convergência da simulação. Para a modelagem numérica de ambos os transdutores, foi utilizada a malha predefinida *Extremely Fine*, pois foi verificado que ela apresenta uma boa convergência para esse problema e seu custo computacional não é elevado para este caso. A discretização e as dimensões do menor e do maior

elemento de cada transdutor estão apresentadas na Figura 12.





Fonte: O autor (2024)

Feitas todas as definições, o último passo antes de executar a simulação é selecionar e configurar o estudo utilizado, o que pode ser feito no nó *Study*. O tipo de estudo selecionado para encontrar a frequência de ressonância dos transdutores foi o *Frequency Domain*, que é utilizado para computar a resposta de um modelo linear submetido a uma excitação harmônica para uma ou mais frequências. Ao adicionar o nó *Frequency Domain*, o usuário pode configurar na janela *Settings* quais frequências serão analisadas na simulação. Para isso utiliza-se o comando *Range*, que tem por parâmetros a frequência inicial, o intervalo entre cada frequência analisada (também pode ser chamado de passo) e a frequência final. Para o transdutor de 25 kHz por exemplo, podemos configurar o comando da seguinte maneira: range(23, 0.01, 27). Desse modo, durante a execução do código o COMSOL irá varrer o intervalo entre 23 e 27 kHz a passos de 0.01 kHz.

Para executar a simulação, é necessário no nó do estudo que será feito selecionar a opção *Compute*. Após o tempo necessário para compilar, o programa irá fornecer no nó *Results* todos os resultados obtidos da simulação. É possível configurar quais gráficos o programa irá gerar, sendo que este conta com alguns como padrão a depender das físicas escolhidas. Por exemplo, ao utilizar *Structural Mechanics* que analisa o comportamento dos sólidos, é gerado por padrão um plot 2D do *Stress* de Von Mises. Na próxima seção será descrita brevemente a simulação das células ultrassônicas.

#### 4.2.2 Modelagem das Células Ultrassônicas

Feitas as modelagens dos transdutores de Langevin, eles foram usinados e validados experimentalmente. Os detalhes dos resultados experimentais estão descritos no próximo capítulo. Após isso foi iniciada a modelagem de duas células ultrassônicas operando a 25 e 40 kHz respectivamente, assim como os transdutores. A célula ultrassônica é composta pelo transdutor acoplado (colado) a um suporte no qual podem ser colocadas água e amostras para realização de experimentos, com o foco nos testes com larva de mexilhão-dourado. Inicialmente modelou-se apenas o suporte da célula por meio de análise modal, a fim de descobrir quais as dimensões de um suporte adequado à frequência de ressonância do transdutor, tendo por objetivo modelar células ultrassônicas com frequência de ressonância de 25 e 40 kHz respectivamente.

Feita essa análise modal do suporte, foram modeladas as células e gerados gráficos semelhantes aos dos transdutores. Ambos os suportes acoplados na massa inferior dos transdutores são feitos de alumínio. Os modelos geométricos das células ultrassônicas de 25 e 40 kHz estão mostradas na Figura 13. Os materiais de ambas as células são alumínio, pelos mesmos motivos que foram utilizados nos transdutores: propriedades mecânicas, térmicas, e viabilidade. O módulo utilizado na modelagem das células foi *Structural Mechanics*, que como descrito anteriormente rege os sólidos. Na modelagem das células ultrassônicas (células unidas aos transdutores) foram utilizadas as mesmas físicas que na modelagem dos transdutores. A malha das células ultrassônicas também foi a predefinida *Extremely Fine*. A discretização dos elementos bem como os tamanhos do maior e do menor elemento estão mostrados na Figura 14.





Fonte: O autor (2024)



Figura 14 – Malhas das células ultrassônicas com frequência de ressonância (a) de 25 kHz e (b) de 40 kHz.

Fonte: O autor (2024)

Como mencionado, o estudo feito com as células foi do tipo *Eigenfrequency*, que é utilizado para computar as frequências naturais de um modelo linear. Feito isso, pôde-se encontrar as frequências naturais das células e ajustá-las aos transdutores para que a frequência de ressonância de ambas as partes unidas fosse 25 e 40 kHz respectivamente. Feito isso, na simulação dos transdutores foi incorporada a geometria das células ultrassônicas utilizando a função *Import*, que permite importar geometrias de outros códigos do COMSOL ou de programas diversos como o AutoCAD. Na simulação, ao colocar a célula no fundo do transdutor o COMSOL considera que ambos os sólidos estão perfeitamente acoplados. Feita a união das partes, o estudo realizado na simulação foi do tipo *Frequency Domain*, a fim de encontrar a frequência de ressonância das células ultrassônicas. Terminada a modelagem as células foram usinadas e coladas aos transdutores. Os detalhes dos resultados experimentais obtidos e sua respectiva análise e comparação com o modelo númerico estão descritos no próximo capítulo.

## **5 RESULTADOS E DISCUSSÕES**

Foram modeladas duas células ultrassônicas operando com frequências de ressonância de 25 e 40 kHz utilizando o software COMSOL *Multiphysics* empregando o Método de Elementos Finitos. Utilizamos a dimensão espacial 2D Axysimmetric, a malha predefinida Extremely Fine e os estudos Frequency Domain e Eigenfrequency. Finalizadas as modelagens, os transdutores foram construídos e caracterizados. Os resultados experimentais estão descritos nesta seção.

Após a conclusão dos modelos numéricos, os desenhos técnicos de cada componente dos transdutores foram encaminhados para o processo de usinagem. Posteriormente, procedemos à montagem de cada transdutor. A montagem de um transdutor requer a disposição das cerâmicas piezoelétricas entre as massas metálicas, utilizando um parafuso de alta resistência mecânica para fixá-las. É colocado um tubo de plástico na região das cerâmicas, para isolar o parafuso de tocar nas mesmas. As cerâmicas são dispostas de forma que suas polaridades sejam invertidas, e entre elas é inserido um eletrodo de cobre, que será utilizado para conectar as cerâmicas em paralelo no circuito elétrico.

Após a montagem do circuito, aplicamos uma pré-tensão nas cerâmicas utilizando um torquímetro manual. A Figura 15, apresenta a relação entre o torque aplicado no parafuso e a convergência nos valores da impedância elétrica para o transdutor de 25 kHz, que é de extrema importância. Isso se deve ao fato de que, ao aplicar um torque excessivo, há o risco de danificar as cerâmicas. Por outro lado, se não aplicarmos o torque adequado, não garantimos a pré-tensão necessária para o correto funcionamento do transdutor.





Fonte: O autor (2024)

qual foram obtidas as curvas de impedância elétrica, a principal grandeza a ser analisada para encontrar a frequência de ressonância do transdutor. Como vimos na seção 2.3, a impedância elétrica é a carga resistiva total de um circuito de corrente alternada, estando relacionada com as grandezas resistência e reatância. A primeira acontece basicamente quando algum material se opõe à passagem de corrente, dissipando energia na forma de calor. Já a reatância é uma grandeza complexa e também está relacionada com a oposição ao fluxo da corrente elétrica mas não gera calor e sim um campo elétrico ou magnético. Como o transdutor opera de modo análogo ao de um circuito RLC, é possível encontrar suas frequências de ressonância e de anti-ressonância analisando o gráfico do módulo da impedância elétrica pela frequência.

Em ambos os gráficos da 17, temos duas ressonâncias que correspondem respectivamente aos mínimos e máximos locais. Nos mínimos locais de frequência, temos a chamada frequência de ressonância, na qual o transdutor se comporta de modo análogo ao capacitor no circuito RLC. No capacitor há uma facilidade da passagem de corrente elétrica, analogamente, no transdutor há uma alta conversão eletromecânica, de modo que a amplitude de seu deslocamento é máxima. Já nos picos de máxima impedância temos a frequência de antirressonância, na qual o transdutor se comporta de modo análogo a um resistor. Este último dificulta a passagem de corrente elétrica, e no caso do transdutor a frequência de antirressonância implica em uma baixa conversão eletromecânica e portanto uma baixa amplitude de vibração. Dispositivos podem funcionar em ambas as frequências, a depender da aplicação. Como no caso deste trabalho almejamos que o transdutor gere ondas sonoras de alta pressão, ele precisa ter uma grande amplitude de deslocamento, assim, precisamos que ele opere na frequência de ressonância.

Para medir a impedância elétrica dos transdutores, utilizamos um analisador de impedância (consulte a Figura 16). Na medição, basicamente são conectados cabos do tipo garra jacaré aos fios conectores do transdutor, onde um fio é responsável pela diferença de potencial aplicada (positivo) e o outro pelo aterramento do dispositivo para evitar choques (negativo). O aparelho emite um pulso no transdutor e salva dados de impedância numa determinada faixa de frequência escolhida previamente, fornecendo os dados na forma de tabela. A partir dessas tabelas foram gerados gráficos utilizando o software Wolphram Mathematica.

Com base nas curvas de impedância elétrica dos transdutores fabricados, procedemos à validação das nossas simulações numéricas por meio das curvas de comparação. A Figura 17 (a) e (b) ilustra os gráficos comparativos para os transdutores de 25 kHz e 40 kHz, respectivamente. Nessas figuras, as curvas tracejadas em azul representam os resultados experimentais, enquanto as curvas sólidas em vermelho correspondem aos resultados das simulações. Observa-se uma

notável concordância entre o modelo numérico e os resultados experimentais em termos de frequência e impedância. Para avaliar essa concordância de forma quantitativa, calculamos o erro percentual nos valores de frequência e no módulo da impedância. A equação para o cálculo do erro percentual relativo é definida como:

$$E = \left| \frac{V_t - V_e}{V_e} \right| \times 100\%,\tag{8}$$

onde  $V_t$  é o valor teórico obtido na simulação numérica e  $V_e$  é o valor medido experimentalmente. A Tabela 2 resume os valores comparativos, com os respectivos erros calculados.

Figura 16 – Aparato utilizado para medir experimentalmente a frequência de ressonância e o módulo da impedância dos transdutores



Fonte: O autor (2024)

Figura 17 – Comparativo entre as curvas de impedância obtidas na simulação numérica (em vermelho) e na medição realizada com o transdutor construído (em azul). Transdutor com frequência de ressonância de 25 kHz (a) e de 40 kHz (b)



Fonte: O autor (2024)

Transdutor de 25 kHz				
Experimental	COMSOL	Erro percentual		
33,4	33,16	0,72%		
24,79	25	0,85%		
Transdutor de 40 kHz				
Experimental COMSOL Erro percentua				
7,9	7,44	5,82%		
39,34	40	1,68%		
	Transdutor d Experimental 33,4 24,79 Transdutor d Experimental 7,9 39,34	Transdutor J S KHz         Experimental       COMSOL         33,4       33,16         24,79       25         Transdutor J S KHz       25         Experimental       COMSOL         Faperimental       COMSOL         17,9       7,44         39,34       40		

Tabela 2 – Dados experimentais e teóricos dos transdutores com frequência de ressonância de 25 e de 40 kHz

#### Fonte: O autor (2024)

Após a validação dos nossos modelos numéricos, procedemos à avaliação da distribuição de deslocamento e tensão mecânica em ambos os transdutores. A Figura 18 (a) e (b) apresenta o gráfico do deslocamento em função da frequência. Conforme o esperado, em ambos os gráficos, o pico no deslocamento ocorre na frequência de ressonância. Um mapa bidimensional do deslocamento em todo o transdutor é exibido na Figura 19. Observa-se que, em ambos os transdutores, o deslocamento é máximo na extremidade inferior, como previsto. No transdutor de 25 kHz é possível ver uma discrepância entre os valores de deslocamento da massa inferior e superior. Isso ocorre porque como explicado anteriormente, por ser um transdutor do tipo Tonpilz e o material da massa superior (latão) ser muito mais denso que o da inferior (alumínio) é esperado que o transdutor atinja valores de deslocamento maiores nesta última. É fundamental destacar que o deslocamento nulo; isso pode ser observado em ambos os transdutores. Assim, as distribuições de deslocamento vistas nas Figuras 18 e 19 está em conformidade com os princípios operacionais esperados dos transdutores.

Na Figura 20, apresentamos a distribuição da tensão mecânica no corpo dos transdutores. Esses resultados são cruciais para analisar a existência de pontos críticos de tensão que possam levar à quebra por fadiga em nosso sistema. Observamos que as maiores concentrações de tensão ocorrem nos pontos nodais. É interessante notar que os maiores valores de tensão acontecem justamente na região do parafuso, o qual possui alta resistência mecânica e é responsável pela união das massas e das cerâmicas.

Figura 18 – Deslocamento 1D dos transdutores de Langevin com frequência de ressonância (a) de 25 kHz e (b) de 40 kHz



Fonte: O autor (2024)

Figura 19 – Deslocamento 2D dos transdutores de Langevin com frequência de ressonância (a) de 25 kHz e (b) de 40 kHz



Fonte: O autor (2024)





Fonte: O autor (2024)

Na figura 21 estão mostrados os transdutores construídos. Na figura 21.a pode-se ver o transdutor de 25 kHz, com massa superior de latão, massa inferior de alumínio e duas cerâmicas piezoelétricas. Ao lado temos o transdutor de 40 kHz, com ambas as massas de alumínio e 4 cerâmicas piezoelétricas. Em ambos os transdutores pode-se ver dois fios que estão soldados aos eletrodos, sendo um o fio positivamente carregado e o outro negativamente carregado.

Figura 21 – Transdutores de Langevin com frequência de ressonância (a) de 25 kHz e (b) de 40 kHz



Fonte: O autor (2024)

Os mesmos gráficos relacionando módulo da impedância e frequência vistos anteriormente nos transdutores também foram gerados para as células ultrassônicas (transdutor + célula). As curvas contendo os dados obtidos na simulação numérica e experimentalmente estão mostrados na Figura 22. Na Tabela 3 está descrita a frequência de ressonância e o valor da impedância nessa frequência, para cada célula ultrassônica. Pode-se observar que as simulações estão bem próximas dos dispositivos reais ao ver os dados relativos à frequência de ressonância. Já no caso da impedância elétrica, diferentemente dos transdutores, nas células ultrassônicas os erros percentuais foram maiores. Supõe-se que o motivo dessa discrepância esteja relacionado com a montagem das células, o que pode ocasionar consideráveis variações nos valores de impedância. Além disso, no COMSOL o acoplamento entre o transdutor e a célula foi considerado perfeito enquanto que na prática ambos foram unidos utilizando cola adesivo Araldite. Essa cola não foi inclusa na simulação, o que também indica que a impedância real deve ser maior que a da simulação numérica.

Figura 22 – Comparativo entre as curvas de impedância obtidas na simulação numérica (em vermelho) e na medição realizada com o transdutor construído (em azul). Transdutor com frequência de ressonância de 25 kHz (a) e de 40 kHz (b)



Fonte: O autor (2024)

Tabela 3 – Dados experimentais e teóricos das células com frequência de ressonância de 25 e de 40 kHz

Célula de 25 kHz				
Experimental COMSOL Erro percentual				
Impedância $(\Omega)$	119,75	75,02	37,3%	
Frequência (kHz)	23,8	24,98	4,96%	
Célula de 40 kHz				
Experimental COMSOL Erro percentual				
Impedância $(\Omega)$	14,1	9,66	31,49%	
Frequência (kHz)	39,44	40,06	1,57%	

Fonte: O autor (2024)

O deslocamento das células ultrassônicas está descrito na Figura 23, onde pode-se ver que ele é máximo na frequência de ressonânia de cada célula, como previsto. Na Figura 23.b é interessante notar que há outro pico de deslocamento próximo de 36 kHz, o qual também pode ser identificado a partir do outro pico de impedância presente na Figura 22.b. Este representa um outro modo de vibração, que não é o desejado para as aplicações da célula.





Fonte: O autor (2024)

Na Figura 24 está mostrado um mapa bidimensional do deslocamento longitudinal das células ultrassônicas. Pode-se ver que na célula de 25 kHz ele é de cerca de 0,14  $\mu$ m no fundo da célula, valor um pouco maior que o observado no transdutor de 25 kHz (0,12  $\mu$ m). Na célula de 40kHz, de forma semelhante, o deslocamento máximo é da ordem de 0,25  $\mu$ m, valor um pouco abaixo dos 0,32  $\mu$ m observados no transdutor de 40 kHz. Outro detalhe importante é que na célula de 25 kHz podemos observar um deslocamento de magnitude considerável na aba direita da célula. Isso se deve ao fato de que a frequência utilizada atinge algum outro modo de vibração diferente do longitudinal naquela parte da peça. Na prática, a célula havia sido modelada e construída para 20 kHz mas por causa deste problema ela foi remodelada e reconstruída para operar a 25 kHz e o deslocamento da aba ser minimizado.

Figura 24 – Deslocamento 2D das células ultrassônicas com frequência de ressonância (a) de 25 kHz e (b) de 40 kHz





Na Figura 25 está mostrado o Stress de von Mises nas células ultrassônicas. De forma semelhante aos transdutores, o Stress é máximo na região do parafuso, que tem alta resistência

mecânica é próximo do mínimo na região das cerâmicas. Pode-se observar que a tensão no parafuso da célula de 40 kHz é cerca de quatro vezes maior que o observado na célula de 25 kHz. Isso se deve principalmente ao fato de que a célula de 40 kHz possui uma impedância muito menor que a de 25 kHz e apresenta um deslocamento que vale quase o dobro do observado naquela. Vale ressaltar que esses valores de tensão são altos quando comparamos uma célula com a outra, mas, tomando em vista a resistência mecânica do aço, os valores estão em um intervalo aceitável para o uso do transdutor e não foram observados problemas no parafuso ou no funcionamento do transdutor real durante os testes.

Aqui, novamente podemos ver que a célula de 25 kHz apresenta um comportamento de vibração diferente em relação à célula de 40 kHz. Esta última executa um movimento perfeitamente longitudinal de modo que só a parte da célula em contato com o transdutor se desloca; já na célula de 25 kHz algum modo de vibração da aba da célula é atingido e ela vibra de outros modos diferentes do longitudinal. Vale ressaltar aqui que a deformação vista nos plots está fora de escala e na prática essa vibração não comprometeu o funcionamento da célula ultrassônica construída.

Figura 25 – Stress das células ultrassônicas com frequência de ressonância (a) de 25 kHz e (b) de 40 kHz



Fonte: O autor (2024)

Após a modelagem, as células foram usinadas e coladas aos seus respectivos transdutores, formando as células ultrassônicas. Foi utilizada uma cola adesivo Araldite para uma boa fixação entre as partes. Um suporte para as mesmas foi feito utilizando uma impressora 3D presente no campus da UFAL Arapiraca (Figura 26). Este conta com um orifício para a passagem dos fios e algumas partes abertas para a circulação do ar, pois como mencionado anteriormente os trasndutores aquecem durante seu funcionamento.

Além da validação por meio da curva de impedância por frequência, as células foram caracterizadas experimentalmente a fim de verificar sua capacidade de gerar ondas ultrassônicas de alta pressão. Como visto no capítulo 2, a cavitação acústica é o processo de formação de bolhas de vapor graças a uma súbita queda de pressão em um líquido gerada por uma onda longitudinal (LAIS et al., 2018). Essas bolhas oscilam em ciclos de compressão e rarefação até colapsarem, quando geram fenômenos como ondas de choque e microjatos.

Para que esse processo ocorra é necessário atingir o limiar de cavitação acústica, que é definido como a pressão mínima necessária para gerar a cavitação acústica. Um dos testes mecânicos amplamente realizados na literatura para encontrar esse limiar consiste em inserir um papel alumínio no líquido que será submetido à ação da onda ultrassônica e verificar a sua erosão (NGUYEN et al., 2017). Este teste foi feito com as células ultrassônicas, no qual foi possível verificar a formação de microbolhas características do processo de cavitação acústica. Os testes feitos com papel alumínio estão presentes na Figura 27, onde pode-se ver que o papel alumínio sofreu erosão devido às microbolhas. Desse modo, pode-se constatar que as células ultrassônicas foram capazes de gerar o fenômeno da cavitação acústica, o qual está diretamente ligado com a proposta do trabalho que é a limpeza ultrassônica de bioincrustações.



Figura 26 - Células ultrassônicas construídas

Fonte: O autor (2024)

Figura 27 – Papel alumínio antes (a) e depois (b) da aplicação do ultrassom. Devido às microbolhas formadas pela cavitação acústica, o papel alumínio sofreu erosão.



Fonte: O autor (2024)

O aparato experimental utilizado nos testes e nos experimentos feitos está mostrado na Figura 28. À esquerda está o Analisador TRZ, dispositivo utilizado para medir a impedância e a frequência de ressonância das células ultrassônica. À direita está a célula com frequência de ressonância de 40 kHz conectada numa fonte de alta potência.

Figura 28 – Aparato experimental contendo Analizador TRZ, célula ultrassônica e fonte de alta potência.



Fonte: O autor (2024)

Feita a caracterização, dos dispositivos e validação do modelo numérico, iniciamos os experimentos com larvas de Limnoperna *fortunei*. Esses experimentos aconteceram em colaboração com outro professor da Universidade Federal de Alagoas, que ficou responsável pelo cultivo das larvas e pela análise da mortalidade das mesmas. A ideia dos experimentos a serem realizados neste trabalho consiste em submeter as larvas de mexilhão-dourado à ação do ultrassom variando três parâmetros: frequência (25 e 40 kHz), potência e tempo de exposição. Com isso, podemos definir quais as condições de mínimo tempo e potência para eliminar o animal. Essas informações são importantes, pois quando utilizando esse tipo de aparato sempre visamos

alcançar o mínimo gasto de energia e de recursos, tanto para a economia quanto para alongar a vida útil do dispositivo. Não foi possível porém realizar todos os experimentos propostos porque verificou-se que a densidade de larvas da coleta estava muito baixa. Porém os testes iniciais realizados mostraram que o a cavitação ultrassônica gerada pelas células tem potencial para eliminar as larvas de mexilhão-dourado.

No experimento realizado, utilizamos a célula com frequência de ressonância de 25 kHz, operando a uma potência fixa de 4 W e variando o tempo, de 60 a 120s. O volume da amostra de água foi de 30 mL. Os resultados desse teste inicial estão mostrados na tabela 4.

Frequência (kHz)	Tempo de exposição (s)	Taxa de mortalidade (%)
24,24	60	16,7
24,11	90	66,7
24,18	120	100

Tabela 4 – Dados do experimento realizado com larvas de mexilhão-dourado. A potência e a frequência foram mantidas fixas e o tempo foi variado.

Fonte: O autor (2024)

Após a exposição do ultrassom a amostra foi analisada em microscópio a fim de verificar a mortalidade das larvas. Na figura 29 podemos ver a amostra antes (à esquerda) e depois (à direita) da aplicação do ultrassom. Podemos perceber que na primeira há uma variedade de microorganismos e na segunda imagem todas as estruturas foram destruídas. Essas fotos foram tiradas com a amostra que passou 2 minutos sob a exposição do ultrassom, obtendo 100% da mortalidade.

Figura 29 – Amostra de água do rio São Francisco contendo larvas de mexilhão-dourado antes (à esquerda) e depois (à direita) da exposição ao ultrassom de potência. Imagens da vista em um microscópio óptico



Fonte: O autor (2024)

Assim, apesar dos problemas experimentais com a densidade de larvas terem impossibilitado a realização de todos os experimentos propostos, o resultados destes testes iniciais se mostram promissores e o sistema ultrassônico desenvolvido mostrou potencial para a eliminação das larvas de mexilhão-dourado. Futuramente serão realizados outros experimentos para a obtenção de melhores resultados e conclusão deste trabalho.

# 6 CONCLUSÃO

O desenvolvimento de duas células ultrassônicas utilizando transdutores de Langevin para futuras aplicações em larvas de mexilhão dourado foi realizado. Uma revisão da literatura sobre os métodos de combate a bioincrustações de mexilhões foi realizada com o objetivo de entender quais os principais fatores que influenciam no combate e/ou prevenção dessas incrustações. Com este estudo realizamos a escrita de um artigo de revisão que se encontra em fase de correção e ajustes. Após os estudos teóricos foram projetados os transdutores de Langevin por meio de um estudo teórico e computacional utilizando o método de elementos finitos por meio do software COMSOL Multiphysics. Em seguida, foram modeladas as células contendo os transdutores. As células foram projetadas para operarem nas frequências de ressonância de 25 kHz e 40 kHz. A validação experimental foi realizada através das medidas de impedância elétrica utilizando um analisador de impedância. Nossos resultados mostram uma excelente concordância entre modelo numérico e medida experimental. A caracterização das células foi realizada por meio de testes com papel alumínio, nos quais o fenômeno da cavitação acústica foi observado, evidenciando a funcionalidade das células conforme o propósito do projeto.

Apesar dos problemas experimentais, os testes inicias se mostraram positivos, e verificouse que o sistema ultrassônico desenvolvido tem potencial para eliminar larvas de mexilhãodourado. Esta pesquisa sinaliza um importante caminho a seguir, no qual futuros experimentos envolvendo a exposição das larvas do mexilhão dourado ao ultrassom podem ser conduzidos para avaliar a eficácia deste método na eliminação desses organismos. Estes estudos podem ainda fornecer informações cruciais sobre os parâmetros ideais, como tempo de exposição, potência, frequência e distância da amostra, visando a maximizar a eficácia na limpeza das bioincrustações provocadas pelo mexilhão dourado. Portanto, concluímos que a aplicação do ultrassom representa uma perspectiva promissora e cientificamente embasada para abordar a problemática do mexilhão dourado e seu controle ambientalmente consciente, incentivando pesquisas futuras nesta área crítica de estudo.

# REFERÊNCIAS

BELLARD, C.; CASSEY, P.; BLACKBURN, T. M. Alien species as a driver of recent extinctions. **Biology Letters**, The Royal Society, v. 12, n. 2, p. 1-4, dez. 2016. Disponível em: https://royalsocietypublishing.org/doi/epdf/10.1098/rsbl.2015.0623. Acesso em: 23 fev. 2024.

BORGES, A. N.; RODRIGUES, C. G. **Introdução à física acústica**. São Paulo: Livraria da Física, 2017.

CATALDO, D.; BOLTOVSKOY, D.; POSE, M. Toxicity of chlorine and three nonoxidizing molluscicides to the pest mussel limnoperna fortunei. **Journal-American Water Works Association**, Wiley Online Library, v. 95, n. 1, p. 66–78, jan. 2003. Disponível em: https://awwa.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/j.1551-8833.2003.tb10270.x. Acesso em: 23 fev. 2024.

CLAUDI, R.; OLIVEIRA, M. D. d. Alternative strategies for control of golden mussel (limnoperna fortunei) in industrial facilities. **Limnoperna Fortunei**, Springer, v. 10, p. 463–476, jan. 2015. Disponível em:

https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-13494-9\_27. Acesso em: 24 fev. 2024.

DARRIGRAN, G.; DAMBORENEA, C. Ecosystem engineering impact of limnoperna fortunei in south america. **Zoological Science**, BioOne, v. 28, n. 1, p. 1–7, jan. 2011. Disponível em:

https://bioone.org/journals/zoological-science/volume-28/issue-1/zsj.28.1/Ecosystem-Enginee ring-Impact-of-Limnoperna-fortunei-in-South-America/10.2108/zsj.28.1.full. Acesso em: 24 fev. 2024.

GRIFFITHS, D. J. Introduction to electrodynamics. 3. ed. São Paulo: Pearson, 2011.

GUO, S. F. *et al.* Effect of ultrasound on cyprids and juvenile barnacles. **Biofouling**, Taylor e Francis, v. 27, n. 2, p. 185 - 192, jan. 2011. Disponível em: https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/08927014.2010.551535?scroll=top&needAcces s=true. Acesso em: 23 fev. 2024.

HAN, C.; QU, Z. A methodology for removing biofouling of the hull based on ultrasonic guided waves. **IOP Publishing**, v. 2031, n. 1, p. 6-12, 2021. Disponível em: https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/2031/1/012006/meta. Acesso em 24 fev. 2024.

HAQUE, M. N.; KWON, S. Effect of ultra-sonication and its use with sodium hypochlorite as antifouling method against mytilus edulis larvae and mussel. **Environmental Geochemistry and Health**, Springer, v. 40, p. 209–215, 2018. Disponível em: https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/27817012/. Acesso em: 24 fev. 2024.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. **Fundamentos de física**: gravitação, ondas e termodinâmica. 10. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016. v. 2.

KALIMUTHU, K. *et al.* Ultrasonic technology applied against mosquito larvae. **Applied Sciences**, MDPI, v. 10, n. 10, p. 35-46, 2020. Disponível em: https://www.mdpi.com/2076-3417/10/10/3546. Acesso em: 24 fev. 2024.

KATSUYAMA, I.; SATUITO, C.; MAEDA, T. The effect of dc-pulse electric stimulus on the swimming behavior of larvae of the freshwater mussel limnoperna fortunei in flowing water within a pipe. **Sessile Organisms**, v. 2, p. 1–5, 2005. Disponível em: https://www.jstage.jst.go.jp/article/sosj1996/22/1/22\_1\_1/\_pdf. Acesso em: 24 fev. 2024.

KITAMURA, H.; TAKAHASHI, K.; KANAMARU, D. Inhibitory effect of ultrasonic waves on the larval settlement of the barnacle, balanus amphitrite in the laboratory. **Marine Fouling**, The Sessile Organisms Society of Japan, v. 12, n. 1, p. 9–13, 1995. Disponível em: https://www.jstage.jst.go.jp/article/sosj1979/12/1/12\_1\_9/\_article. Acesso em 24 fev. 2024.

LAIS, H. *et al.* Numerical modelling of acoustic pressure fields to optimize the ultrasonic cleaning technique for cylinders. **Ultrasonics sonochemistry**, Elsevier, v. 45, p. 7–16, 2018. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1350417718303171. Acesso em: 23 fev. 2024.

LEÃO, T. et al. Espécies exóticas invasoras. Recife: Cepan, 2011.

MONTALTO, L.; DRAGO, I. Ezcurra de. Tolerance to desiccation of an invasive mussel, limnoperna fortunei (dunker, 1857)(bivalvia, mytilidae), under experimental conditions. **Hydrobiologia**, Springer, v. 498, n. 62, p. 161–167, 2003. Disponível em: https://link.springer.com/article/10.1023/A:1026222414881. Acesso em 24 fev. 2024.

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.

NGUYEN, T. T. *et al.* Dependence of cavitation, chemical effect, and mechanical effect thresholds on ultrasonic frequency. **Ultrasonics Sonochemistry**, Elsevier, v. 39, p. 301–306, 2017. Disponível em:

https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1350417717302018. Acesso em: 24 fev. 2024.

NUSSENZVEIG, H. M. **Curso de física básica**: fluidos, oscilações e ondas, calor. 4. ed. São Paulo: Editora Blucher, 2018. v. 2.

PEREPELIZIN, P. V.; BOLTOVSKOY, D. Hot water treatment (chronic upper lethal temperature) mitigates biofouling by the invasive asian mussel limnoperna fortunei in industrial installations. **Environmental Science & Technology**, ACS Publications, v. 45, n. 18, p. 7868–7873, 2011. Disponível em: https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/21842855/. Acesso em: 24 fev. 2024.

PEREPELIZIN, P. V.; BOLTOVSKOY, D. Control of limnoperna fortunei fouling by oxygen deprivation. **Limnoperna Fortunei**, Springer, v. 3, p. 451–454, 2015. Disponível em: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-13494-9\_25. Acesso em: 24 fev. 2024.

RIVIN, E. Stiffness and damping in mechanical design. Detroit: CRC Press, 1999.

SETH, N. *et al.* Quantification of the energy required for the destruction of balanus amphitrite larva by ultrasonic treatment. **Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom**, v. 90, n. 7, p. 1475–1482, 2010. DOI: https://doi.org/10.1017/S0025315409991548.

TARGINO, C. H. **Plano nacional de prevenção, controle e monitoramento do mexilhão-dourado (Limnoperna fortunei) no Brasil**. 2. ed. Brasília: IBAMA, 2020. Disponível em:

https://www.ibama.gov.br/phocadownload/biodiversidade/mexilhao-dourado/2020/2020-11-1 0-Plano\_Mexilhao\_Dourado.pdf. Acesso em: 23 fev. 2023.

VILLAMIEL, M. *et al.* **Ultrasound in food processing**: recent advances. Nova Jersey: Wiley-Blackwell, 2017. ISBN 1118964187. Disponível em: https://bit.ly/3k67jGt. Acesso em: 23 fev. 2024.

VYAS, N. *et al.* Which parameters affect biofilm removal with acoustic cavitation? a review. **Ultrasound in Medicine Biology**, v. 45, n. 5, p. 1044–1055, 2019. ISSN 0301-5629. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ultrasmedbio.2019.01.002.

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: 24 fev. 2024.

ZHOU, N. *et al.* Effects of ultrasound on invasive golden mussel limnoperna fortunei mortality and tissue lesions. **Science of the Total Environment**, Elsevier, v. 761, p. 144134, 2021. DOI: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144134.