

Kevin Eiji Pasqualini
Marx Thezolin de Paula

**Atuador piezoelétrico por produção de ondas propagantes em um
meio finito**



Orientador: Prof. Dr. Emílio Carlos Nelli Silva

São Paulo

2018

Kevin Eiji Pasqualini
Marx Thezolin de Paula

Atuador piezoelétrico por produção de ondas propagantes em um meio finito

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

Área de concentração: Engenharia Mecatrônica

Orientador: Prof. Dr. Emílio Carlos Nelli Silva

São Paulo

2018

Ficha Catalográfica

Pasqualini, Kevin Eiji. Thezolin de Paula, Marx.
Atuador piezoelétrico por produção de ondas propagantes em um meio finito.
São Paulo, 2018. 88 p.

Orientador: Prof. Dr. Emílio Carlos Nelli Silva

Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos.

1. Motores elétricos. 2. Simulação computacional. I. Universidade de São Paulo. II. Escola Politécnica. III. Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos

Agradecimentos

Ao professor Emílio Carlos Nelli Silva, por sua orientação e estímulo à realização deste projeto. Agradecemos profundamente seu parecer no desenvolvimento e organização dos estudos do projeto, vital para o bom desenrolar de todo este trabalho.

Ao professor Flávio Buiochi, por seus conselhos e suporte na interpretação dos resultados e auxílio na realização dos experimentos práticos. Sua ajuda foi essencial para a implementação deste projeto.

A nossas famílias e colegas da universidade, por todo o suporte em nossa jornada de graduação .

Resumo

O presente trabalho de conclusão de curso busca estudar o funcionamento e performance de um atuador piezoelétrico linear, operando pela geração de uma onda propagante sobre uma chapa metálica excitada por transdutores piezoelétricos.

Para a realização do estudo, as características do atuador foram simuladas no software de elementos finitos ANSYS, demonstrando quais fatores interferem no funcionamento deste tipo de transdutor. O protótipo construído posteriormente permitiu validar ou questionar algumas das conclusões obtidas no modelo numérico.

Palavras-chave: Atuadores piezoelétricos. Motores ultrassônicos. Método dos elementos finitos. Transdutores Langevin

Abstract

This graduation thesis presents a study of the operation and performances of a piezoelectric linear actuator that works by the principle of the travelling waves on a sheet of metal driven by piezoelectric transducers.

To develop this study, the characteristics of the actuator were simulated in the finite element software ANSYS, revealing which factors affected the performances of this kind of actuator. Later, the construction of the prototype validated or challenged some of the conclusions obtained with the numerical model.

Keywords: Piezoelectric actuators. Ultrasonic motors. Finite element method. Langevin transducers

Lista de Figuras

1	Modelo do protótipo	2
2	Modelo da viga	5
3	Esquema de transmissão do movimento com uma onda propagante	6
4	Esquema de atuação da viga por alteração da fase da onda	7
5	Resposta temporal de uma viga excitada nas extremidades por duas ondas sem defasagem no tempo ($\phi=0^\circ$). Observa-se que os nós não se deslocam, logo a onda é estacionária.	8
6	Resposta temporal de uma viga excitada nas extremidades por duas ondas com defasagem de $\phi=90^\circ$. Os nós se deslocam no tempo produzindo uma onda propagante (apesar de possuir velocidade não uniforme).	8
7	Esquema de atuação da viga por alteração da amplitude	9
8	Solução analítica da onda produzida ao longo da viga para uma excitação com alteração da amplitude	10
9	Exemplo de transdutor Langevin com sonotrodo cônico acoplado	11
10	Modelagem do Langevin	14
11	Estudo de convergência para os elementos do Langevin. Observa-se que para elementos inferiores a 5 mm a variação da frequência é desprezível.	15
12	Comparação entre dois modos de vibrar em uma viga. O 14° modo apresenta uma flexão composta em dois eixos diferentes.	16
13	Superposição do 17° e do 18° modos de vibrar da viga	17
14	Simulação da propagação da onda analógica com o modelo analítico	17
15	Estudo de convergência para os elementos da viga. Observa-se que para elementos inferiores a 3 mm a variação da frequência é desprezível.	18
16	Modelagem 1D do protótipo montado (à esquerda) com representação de seus elementos em 3D (à direita)	19
17	Representação das condições de contorno para a onda analógica impostas no modelo Ansys	21
18	Resultados da análise harmônica para diferentes valores de defasagem entre os sinais.	21
19	Trajetória elíptica de um ponto no centro da viga durante um período da onda propagante.	22
20	Representação das condições de contorno para a onda digital impostas no modelo Ansys	23
21	Comparação das ondas se deslocando com a variação das amplitudes, em cima o resultado por equacionamento analítico e abaixo o resultado da simulação computacional do sistema	23
22	Análise do impacto da espessura da seção de acionamento nos resultados	24
23	Amplitude de deformação em função da espessura da seção de acoplamento.	25
24	Análise do impacto do comprimento da aba nos resultados	25
25	Evolução da amplitude da onda em função do comprimento da aba.	26
26	Análise do impacto de uma assimetria no comprimento das abas nos resultados	26
27	Análise do impacto da frequência de acionamento nos resultados	27
28	Análise do impacto da razão $B2/B1$ entre as amplitudes de acionamento nos resultados	28
29	Comparação das formas de onda para diferentes propriedades do alumínio	29

30	Representação dos coeficientes do amortecimento de Rayleigh.	29
31	Análise do impacto do amortecimento nos resultados	30
32	Exemplo de impedância medida para o transdutor 1, na faixa de 20kHz. Observa-se que a frequência de ressonância se encontra em 20810 Hz. . . .	31
33	Material particulado depositado sobre a viga com o protótipo ligado. Observa-se que o material fica retido na região dos nós e que estes são espaçados de meio comprimento de onda (cerca de 18mm).	32
34	Esquematização inicial da montagem da bancada de testes.	33
35	Diferentes formas de ondas estacionárias observadas segundo configurações diferentes de parafusos	34
36	Respostas temporais para a viga em excitação analógica para altos valores de amortecimento.	35
37	Esquematização final da montagem da bancada de testes.	36
38	Deslocamento da moeda sobre a chapa pela propagação da onda analógica.	37
39	Presença de nós estacionários na propagação da onda indicados pelas linhas estacionárias	37
40	Deslocamento dos nós da onda ao longo da chapa para excitação com variação de amplitude	38
41	Comparação entre a onda propagante digital simulada e uma representação da forma de onda observada	39
42	Dimensões iniciais propostas do Langevin.	42
43	Diferentes geometrias dos modelos em simulação numérica de sonotrodo analisados no transdutor (cerâmicas piezoelétricas em verde).	43

Lista de Tabelas

1	Propriedades da cerâmica PZT-4	13
2	Propriedades da liga de alumínio	13
3	Estudo modal do Langevin livre	15
4	Comparação entre os modelos analítico e numérico da viga	18
5	Estudo modal do modelo montado. Modos que causam flexão na viga . . .	20
6	Influência das propriedades do material sobre a frequência natural da chapa	28
7	Comparação entre as frequências de ressonância encontradas para o sistema (Hz)	31
8	Estudo modal do Langevin livre	43

Conteúdo

1	Introdução	1
1.1	Contexto	1
1.2	Atuadores Piezoelétricos	1
1.3	Protótipo	1
2	Objetivos	2
3	Fundamentação Teórica	3
3.1	Efeito Piezoelétrico	3
3.2	MEF Piezoelétrico	4
3.2.1	Análise Modal	4
3.2.2	Análise Harmônica	4
3.3	Onda Propagante	5
3.3.1	Onda propagante por alteração da fase da onda	7
3.3.2	Onda propagante por alteração da fase da amplitude	9
3.4	Transdutores Langevin	10
4	Estudo Analítico e Numérico	12
4.1	Considerações sobre o modelo	12
4.2	Estudo do Langevin	12
4.3	Estudo da viga	15
4.3.1	Dimensionamento	15
4.3.2	Modelo analítico	16
4.3.3	Modelo numérico	18
4.4	Estudo do protótipo	18
4.4.1	Modelagem	19
4.4.2	Estudo Modal	20
4.4.3	Análise Harmônica: Onda Analógica	20
4.4.4	Análise Harmônica: Onda Digital	22
4.5	Estudo de sensibilidade	23
4.5.1	Acoplamento Langevin-Chapa	24
4.5.2	Estudo da aba	25
4.5.3	Acionamento dos transdutores	27
4.5.4	Material	28
4.5.5	Amortecimento	29
5	Ensaio Experimentais	30
5.1	Metodologia e Verificações Iniciais	30
5.1.1	Preparo dos Transdutores	30
5.1.2	Preparo do protótipo	31
5.1.3	Visualização das ondas	32
5.1.4	Montagem e Acionamento do Protótipo	33
5.2	Resultados Iniciais	34
5.3	Reiteraões do modelo	35
5.4	Resultados finais	36
5.5	Considerações finais	39

6	Conclusões	40
7	Anexos	42
7.1	Geometria dos Sonotrodos	42
7.2	Códigos ANSYS APDL	44
7.2.1	Pré Processamento	44
7.2.2	Análise Modal	56
7.2.3	Análise Harmônica: Onda Analógica	57
7.2.4	Exportar resposta temporal	58
7.2.5	Análise Harmônica: Onda Digital	60
7.2.6	Exportar Onda Digital	62
7.2.7	Estudo da aba	63
7.3	Códigos MATLAB	67
7.3.1	Modos de vibrar da Viga	67
7.3.2	Simulação da onda propagante analógica	68
7.3.3	Pós Processamento ANSYS	70
7.4	Desenhos de Fabricação	72

1 Introdução

Este trabalho de formatura envolve o estudo do princípio de funcionamento de um transportador/atuador piezoelétrico em um meio finito através da excitação por transdutores do tipo Langevin, sua caracterização, modelagem em elementos finitos e otimização, assim como a implementação prática de um protótipo deste transportador.

1.1 Contexto

No atual cenário industrial, um grande número de tecnologias depende de equipamentos com alta precisão de deslocamento. Podem-se citar como exemplos tecnologias ópticas, como controle de abertura em microcâmeras instaladas em celulares e computadores, instrumentos de metrologia, como máquinas de medida tridimensionais para pequenas peças, e dispositivos de controle de fluidos, como destiladores químicos, bombas e dosadores.

Todos estes equipamentos exigem meios de atuar sistemas mecânicos com alta precisão em posição, precisando ser muitas vezes compactos e rígidos. Desta maneira, atuadores tradicionais como motores elétricos e mecanismos pneumáticos podem ser inadequados para o propósito exigido quando são consideradas as imprecisões envolvidas no seu funcionamento e o risco de contaminação do ambiente ao seu redor tanto pelo uso de fluidos quanto pela presença de campos elétricos ou magnéticos fortes.

Um tipo de solução muito estudada e aprimorada ao longo dos anos é o uso de cerâmicas piezoelétricas para realizar tais deslocamentos, que apresentam diversas vantagens para operações delicadas e de pequenas dimensões. O intuito deste trabalho será de estudar e construir um motor linear, capaz de produzir movimento através da atuação de tais cerâmicas.

1.2 Atuadores Piezoelétricos

Atuadores piezoelétricos são dispositivos que fazem uso das propriedades de materiais piezoelétricos, capazes de converter energia elétrica em mecânica, para produzir deslocamentos proporcionais a um sinal elétrico de entrada, com alto nível de precisão e de repetibilidade.

Uma das vantagens da utilização de motores piezoelétricos ultrassônicos é a sua capacidade de gerar deslocamentos de alta velocidade graças à sua elevada frequência de atuação. Nesses motores, o fenômeno de ressonância de uma estrutura mecânica é aproveitado para amplificar as vibrações do elemento de material piezoelétrico e, desta maneira, produzir movimento. Outra vantagem é a flexibilidade existente quanto às aplicações possíveis deste tipo de tecnologia.

1.3 Protótipo

O princípio de funcionamento desse tipo de motor envolve a geração de uma onda propagante em uma chapa finita de alumínio através da excitação de suas extremidades por dois

transdutores do tipo Langevin, elementos que possuem pares de cerâmicas piezoelétricas excitadas por um sinal senoidal, produzindo então uma vibração em seu sentido axial.

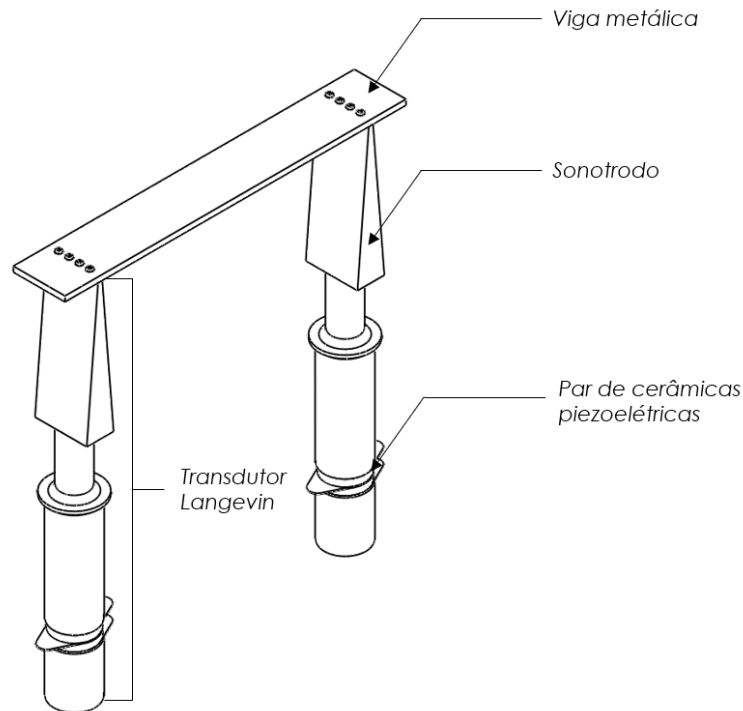


Figura 1: Modelo do protótipo

Estudando e regulando as características dos elementos do protótipo poderemos então converter o sinal elétrico em um movimento oscilatório do transdutor, que produzirá uma flexão na chapa. A interação das oscilações criadas por cada um dos Langevins, se bem regulada, produz enfim uma onda propagante na chapa. O deslocamento dessa onda propagante pode ser então aproveitado para produzir o movimento linear desejado do atuador.

2 Objetivos

O objetivo do trabalho é obter, através da realização de simulações numéricas, um entendimento aprofundado do funcionamento e características fundamentais que influenciam a performance do protótipo proposto, seguido do desenvolvimento e construção do protótipo físico para validação destes princípios. Desta maneira, será possível estabelecer de maneira mais compreensiva como realizar o desenvolvimento de outros modelos de transportador segundo este princípio, podendo-se assim analisar de maneira teórica e experimental como as dimensões e parâmetros destes transportadores afetam seu funcionamento. Espera-se com isso contribuir para a obtenção de modelos numéricos robustos para o dimensionamento de atuadores deste tipo.

O principal desafio a ser estudado é a produção da onda propagante no meio finito de uma chapa metálica. Uma vez conseguido isto, várias aplicações podem ser extrapoladas

como indicado por diversos exemplos citados na literatura, tais como uma bomba para transporte de precisão de fluidos [1] e um transportador de pequenos objetos [2].

Outros trabalhos já cobrem o estudo dos transdutores em si, permitindo que este projeto se concentre na viga, na geração de onda na mesma e sua interação com os transdutores. Serão analisados dois métodos para produção de uma onda propagante em um meio finito: um método denominado analógico e outro denominado digital. Ambos serão estudados e implementados tanto com um intuito comparativo quanto com o intuito de obter um modelo numérico robusto o suficiente para que seja capaz de analisar ambos os casos.

3 Fundamentação Teórica

3.1 Efeito Piezoelétrico

O efeito piezoelétrico é a propriedade apresentada por alguns materiais de acumular carga elétrica quando submetidos a tensões mecânicas ou o inverso, de apresentar deformações quando sujeitos à tensões elétricas. Este efeito tem origem na polarização da estrutura cristalina desses materiais provocada por esforços mecânicos. Materiais piezoelétricos são encontrados naturalmente e como exemplo podemos citar o quartzo, o topázio e o açúcar de cana, mas na indústria são utilizadas principalmente cerâmicas sintéticas como o titanato zirconato de chumbo (PZT).

Este fenômeno pode ser modelado matematicamente na forma deformação-carga elétrica através das seguintes equações:

$$\begin{aligned} S &= s_E \cdot T + d^t \cdot E \\ D &= d \cdot T + \epsilon_T \cdot E \end{aligned} \quad (1)$$

Onde T é o vetor de tensão mecânica, D é o vetor de densidade de deslocamento da carga elétrica, E é o vetor campo elétrico, S é o vetor de deformação mecânica, d é a matriz piezoelétrica de acoplamento eletromecânico, ϵ_S é a matriz de permissividade elétrica do material, s_E é a matriz de flexibilidade mecânica e o índice t denota a matriz transposta.

As matrizes constitutivas do efeito piezoelétrico para um material polarizado na direção do eixo Z são:

$$s_E = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} & s_{13} & 0 & 0 & 0 \\ s_{12} & s_{22} & s_{23} & 0 & 0 & 0 \\ s_{13} & s_{23} & s_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & s_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & s_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & s_{66} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$d = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{24} & 0 & 0 \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\frac{\epsilon_T}{\epsilon_0} = \begin{bmatrix} \epsilon_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_{33} \end{bmatrix} \quad (4)$$

Onde $\epsilon_0 = 8.854 \cdot 10^{-12} F/m$ é a permissividade elétrica do vácuo.

3.2 MEF Piezoelétrico

O comportamento do motor piezoelétrico pode ser estudado através de simulações numéricas, utilizando para isso o método dos elementos finitos (MEF). Neste trabalho, foi utilizada a interface Mechanical APDL do software ANSYS para a criação de scripts parametrizados do modelo do motor.

As equações do MEF piezoelétrico são descritas em função do vetor de deslocamento nodal U e do potencial elétrico nodal Φ para cada nó da malha que representa a geometria do sistema. Se os carregamentos mecânicos são representados pelo vetor F e os carregamentos elétricos pelo vetor Q , as equações assumem a forma matricial:

$$\begin{bmatrix} M_{uu} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{U} \\ \ddot{\Phi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{uu} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U} \\ \dot{\Phi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{uu} & K_{u\Phi} \\ K_{\Phi u} & K_{\Phi\Phi} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U \\ \Phi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F \\ Q \end{bmatrix} \quad (5)$$

Onde M_{uu} é a matriz de massa do sistema, C_{uu} é a matriz de amortecimento e os termos K_{ii} formam a matriz de rigidez da estrutura mecânica.

3.2.1 Análise Modal

Este tipo de análise tem o intuito de obter as frequências de ressonância e os modos de vibrar do modelo estudado. Essa informação é necessária para se determinar a banda de frequências de operação do motor piezoelétrico.

Para a análise harmônica, supõe-se que o sistema não é excitado mecanicamente ($F = 0$), mas ainda possui carregamentos elétricos. Em específico, define-se que ambos os eletrodos da cerâmica piezoelétrica estão submetidos à mesma tensão para obter-se as frequências de ressonância.

No MEF, esse problema envolve encontrar os autovalores e autovetores das matrizes apresentadas na seção anterior quando o sistema não possui amortecimento ($C_{uu} = 0$).

3.2.2 Análise Harmônica

A análise harmônica é utilizada para obter-se a resposta em regime permanente do sistema quando excitado harmonicamente, ou seja, com carregamentos que variam de forma senoidal com o tempo. Assim, é possível estimar como o sistema se comportará em diferentes frequências de excitação, de maneira a identificar os resultados que são mais interessantes para a aplicação estudada.

$$\begin{aligned} F(t) &= F \cdot e^{j\omega t} \\ Q(t) &= Q \cdot e^{j\omega t} \end{aligned} \quad (6)$$

3.3 Onda Propagante

O princípio de operação de atuação do protótipo é a produção de uma onda propagante em um meio finito. Uma vez produzida a onda propagante, pode-se mostrar [3] [1] que o efeito de propagação da onda pode ser acoplado a partículas, fluídos ou outros dispositivos mecânicos para gerar o deslocamento desejado. Logo basta-se produzir uma onda propagante no meio finito da viga para garantir o funcionamento do princípio de atuação.

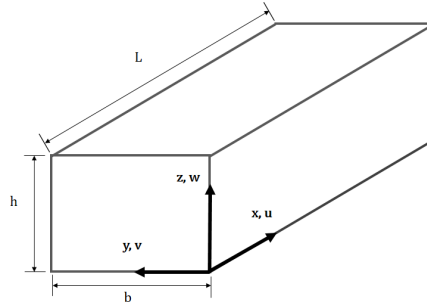


Figura 2: Modelo da viga

Os Langevins atuando axialmente (ou seja em tração) provocam a flexão da viga, o que pode ser utilizado para induzir fenômenos oscilatórios em sua extensão. O objetivo é então controlar a produção destas oscilações de maneira que a onda resultante na extensão da chapa (ou ao menos em um segmento útil) seja propagante.

Considerando-se o estator do motor piezoelétrico estudado neste trabalho como uma viga homogênea, sólida, contínua e isotrópica, o movimento flexional deste elemento pode ser descrito pela equação:

$$\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + \frac{\rho A}{EI} \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = 0 \quad (7)$$

Sendo $w(x,t)$ o deslocamento transversal da viga, ρ a massa específica e E o módulo de elasticidade do material da viga, I o momento de inércia da seção transversal da viga e A a área desta seção.

A solução desta equação tem a forma de uma onda propagante genérica dada por:

$$w(x,t) = B \cos(\omega t - kx) \quad (8)$$

Onde B é a amplitude do deslocamento e ω é a frequência de acionamento do atuador. A constante k representa o número de onda e pode ser escrito em função do comprimento de onda λ como:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = \sqrt[4]{\frac{\rho A \omega^2}{EI}} \quad (9)$$

Para o movimento longitudinal, pode-se demonstrar que:

$$u(x, z, t) = -z \frac{dw}{dx} = Azk \sin(\omega t - kx) \quad (10)$$

A combinação dos movimentos na duas direções resulta em um deslocamento elíptico de cada ponto sobre a superfície da viga. É este deslocamento intermitente que transmite movimento por atrito à peça móvel do motor.

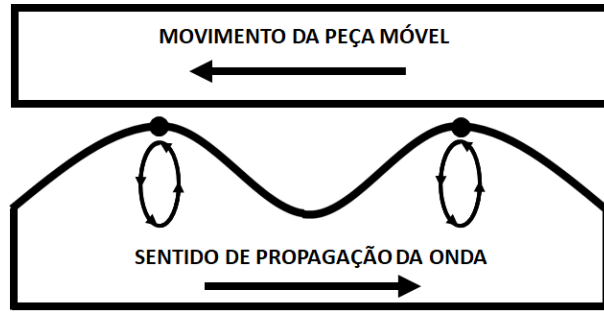


Figura 3: Esquema de transmissão do movimento com uma onda propagante

A produção de uma onda propagante é ainda influenciada pelo efeito de amortecimento dos materiais e da montagem. Porém, os efeitos de propagação devido ao amortecimento natural do sistema são insuficientes para que se obtenha uma amplitude de onda capaz de provocar o deslocamento de um objeto na superfície da viga.

Uma das soluções propostas na literatura [4] para o aproveitamento de tal efeito é intensificar os efeitos de amortecimento com outro transdutor, tendo um Langevin em uma extremidade da viga e uma carga RL na outra, de forma que se a impedância elétrica do circuito estiver sintonizada com a impedância mecânica da estrutura pode-se amortecer a onda produzida pelo atuador, evitando com isso que a onda seja refletida na extremidade da viga e assim produzindo o efeito de transporte.

Esta solução porém não é eficiente para o sistema pois uma parte considerável da energia produzida pelo transdutor ativo é dissipada pelo amortecimento.

Outras duas soluções possíveis envolvem regular a fase ou a amplitude de operação dos dois Langevins para que a combinação das ondas produzidas resulte em uma onda propagante. Neste caso, deve-se excitar dois modos de vibrar da chapa, ou seja, a frequência de operação do sistema deve ser a média de duas frequências naturais da viga. Na análise da geometria do protótipo, algumas considerações em relação a este requisito são estudadas.

Neste trabalho, as simulações serão feitas considerando-se estes dois métodos para o estudo da produção da onda. Apenas os efeitos naturais de amortecimento da estrutura serão posteriormente adicionados ao estudo.

3.3.1 Onda propagante por alteração da fase da onda

Este método é denominado como método analógico para produção de uma onda pois a onda se propaga continuamente ao longo do tempo.

O método para geração desse tipo de onda origina da equação (8). Expandindo-a temos:

$$w(x, t) = B \cos(\omega t - kx) = B \cos(\omega t) \cos(kx) + B \cos\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) \cos\left(kx - \frac{\pi}{2}\right) \quad (11)$$

Sabendo-se que:

$$w_e = B \cos(\omega t) \cos(kx) \quad (12)$$

É a equação genérica de uma onda estacionária, conclui-se que uma onda propagante pode ser produzida pela soma de duas ondas estacionárias defasadas de um quarto de onda tanto no tempo quanto no espaço.

Desta maneira, a excitação na viga deve ser feita de tal maneira que os transdutores estejam em uma certa posição na chapa (será visto mais tarde a posição ótima para o efeito de propagação) e que suas oscilações estejam defasadas no tempo de um ângulo ϕ :

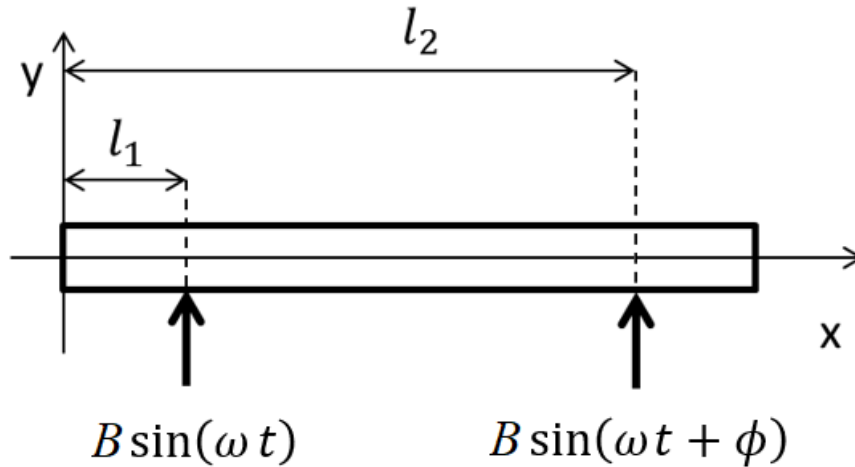


Figura 4: Esquema de atuação da viga por alteração da fase da onda

Normalmente, para maximizar a amplitude dessa onda, os transdutores devem estar sintonizados em uma das frequências de ressonância da viga. Contudo, para que se produza o efeito de propagação de ondas, os Langevins devem estar sintonizados na frequência média entre dois modos de vibração, excitando ao mesmo tempo os dois modos de vibrar da estrutura.

A onda resultante dependerá do ângulo ϕ . Observa-se que ângulos múltiplos ímpares de 90° possuem o resultado com maior propagação de onda, enquanto para ângulos múltiplos pares de 90° , a onda resultante é completamente estacionária.

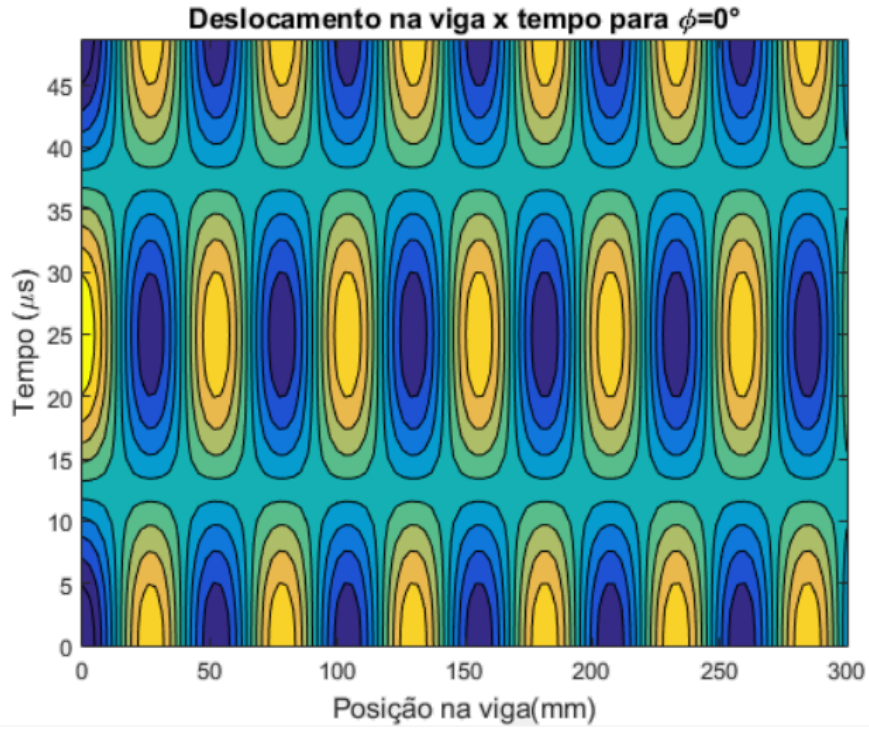


Figura 5: Resposta temporal de uma viga excitada nas extremidades por duas ondas sem defasagem no tempo ($\phi=0^\circ$). Observa-se que os nós não se deslocam, logo a onda é estacionária.

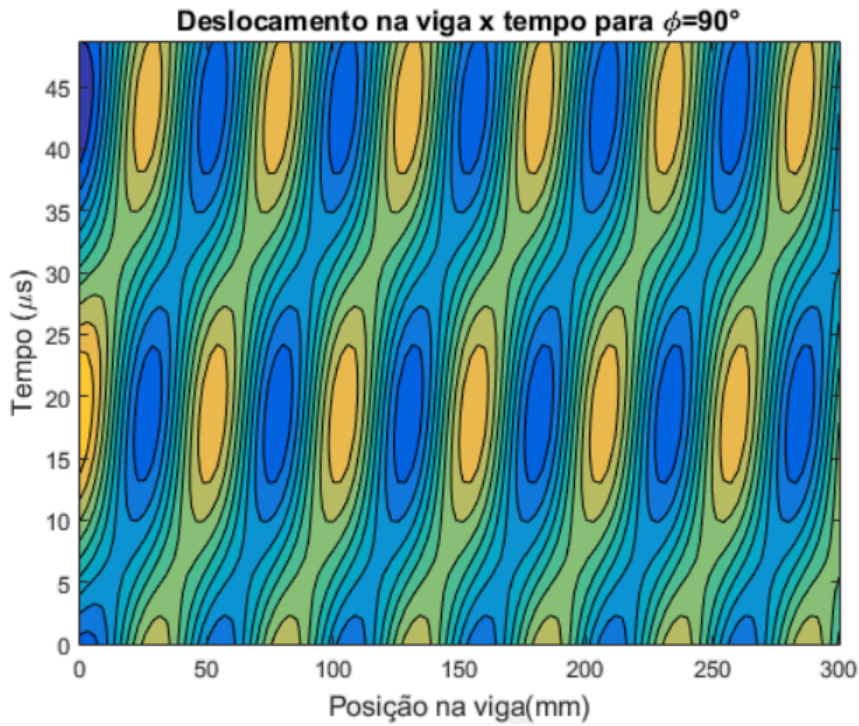


Figura 6: Resposta temporal de uma viga excitada nas extremidades por duas ondas com defasagem de $\phi=90^\circ$. Os nós se deslocam no tempo produzindo uma onda propagante (apesar de possuir velocidade não uniforme).

3.3.2 Onda propagante por alteração da fase da amplitude

Nesta configuração, ambos os sinais elétricos dos transdutores estão em fase, logo eles produzirão em teoria deformações idênticas nas extremidades da viga. O resultado dessa forma de excitação é uma onda estacionária ao longo da chapa.

O fenômeno de propagação é obtido deslocando-se a onda estacionária através da alteração das amplitudes de deslocamento nas extremidades da viga. Assumindo que as amplitudes variam de forma senoidal e que elas têm a forma:

$$\begin{aligned} B_1 &= B \sin(\theta) \\ B_2 &= B \cos(\theta) \end{aligned} \quad (13)$$

Ignorando os efeitos de borda, a onda resultante será da forma:

$$w(x, t) = B \cos(\theta) \cos(kx) \cos(\omega t) \pm B \sin(\theta) \sin(kx) \cos(\omega t) = B \cos(kx \mp \theta) \cos(\omega t) \quad (14)$$

Observa-se que (14) é a equação de uma onda propagante. Logo, pode-se propagar uma onda variando-se a amplitude de duas ondas de maneira senoidal e cossenoidal. A excitação das extremidades na viga fica então da seguinte forma:

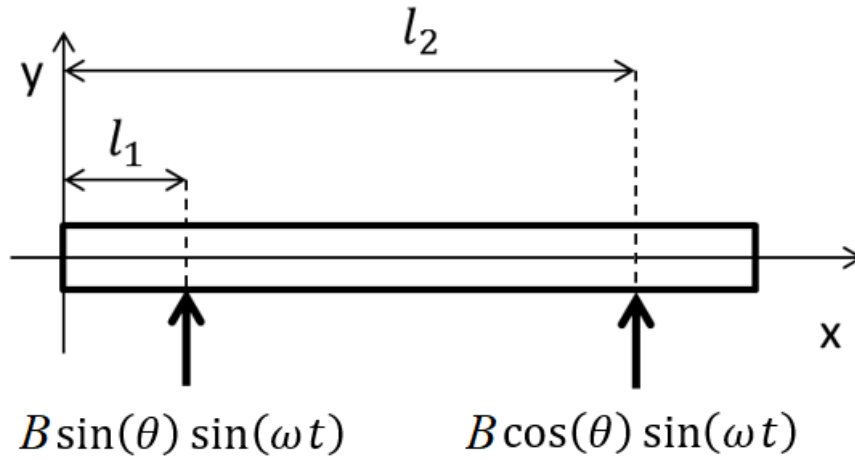


Figura 7: Esquema de atuação da viga por alteração da amplitude

Como se observa na figura a seguir, o resultado é uma onda que se desloca segundo a variação de theta. Este deslocamento de uma onda estacionária para produzir um efeito de propagação pode ser utilizado então para a aplicação do protótipo.

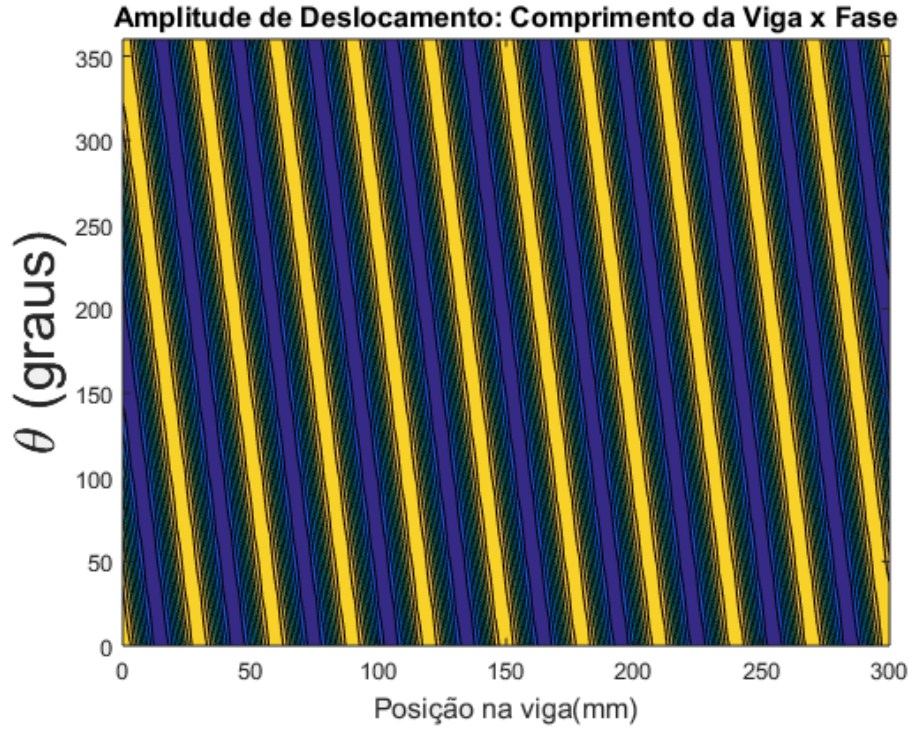


Figura 8: Solução analítica da onda produzida ao longo da viga para uma excitação com alteração da amplitude

Este método fornece uma forma de atuação robusta, pois a posição da onda pode ser controlada de forma diretamente proporcional à fase θ ao invés de alterar-se continuamente no tempo. Deve-se notar, porém, que a solução analítica desconsidera efeitos de reflexão das ondas nas bordas, logo as simulações numéricas podem produzir resultados diferentes.

3.4 Transdutores Langevin

Como visto, para ambos os modos de propagação de onda, deve-se produzir uma excitação nas extremidades com um certo grau de controle da resposta, tanto em amplitude, quanto em fase e frequência. O estudo desse projeto visa utilizar o efeito piezoelétrico para obter tais excitações mecânicas de maneira proporcional a uma entrada elétrica.

Porém, uma vez que os deslocamentos resultantes do efeito piezoelétrico são de baixa amplitude, é necessário amplificar estes sinais para que eles possam ser utilizados. Transdutores Langevin são dispositivos de conversão de energia eletromecânica que permitem amplificar os deslocamentos de uma cerâmica piezoelétrica através da deformação de uma estrutura mecânica construída para ressoar na frequência de excitação dos elementos piezoelétricos.

O transdutor em si é um conjunto contando com um ou mais pares de cerâmicas piezoelétricas, contatos elétricos para permitir a excitação das cerâmicas e um corpo metálico (normalmente em alumínio), denominado “amplificador”. Esta peça é sintonizada em uma certa frequência, normalmente escolhida para coincidir com a frequência de excitação elétrica das cerâmicas, permitindo que a vibração destas seja intensificado e que se obtenha amplitudes de deslocamento maiores.

O amplificador conta normalmente com uma interface que permite a conexão de um sonotrodo, ou “horn”. Este elemento serve como uma interface do transdutor com o meio a ser excitado, que no caso do protótipo em questão é a chapa metálica. Ele também atua como elemento de sintonização da frequência de operação, pois altera o comprimento efetivo do amplificador, o que permite a regulagem da frequência natural do conjunto.

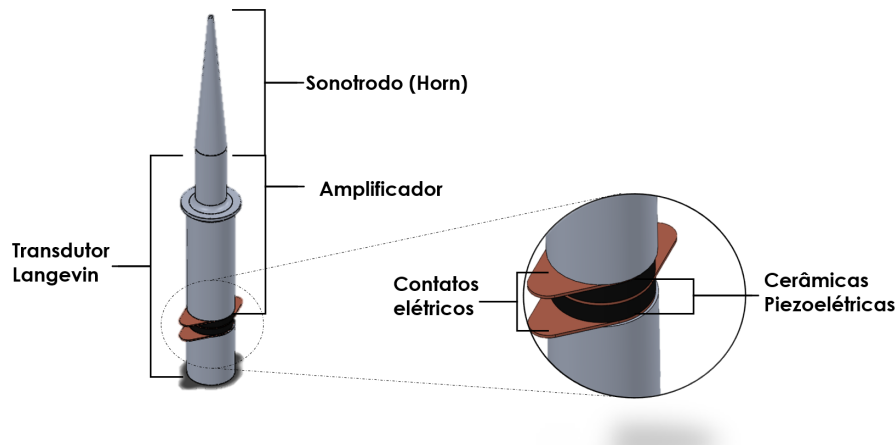


Figura 9: Exemplo de transdutor Langevin com sonotrodo cônico acoplado

Desta forma, aplicando uma excitação periódica nas cerâmicas do transdutor, sua estrutura começa a vibrar e, estando bem reguladas as frequências naturais do corpo metálico, os deslocamentos são amplificados, resultando em um movimento mais aproveitável para aplicações como a proposta neste trabalho.

O projeto do transdutor pode ser otimizado, escolhendo-se suas dimensões de tal maneira que a frequência de ressonância do conjunto do transdutor seja igual à frequência de operação desejada.

Considerando que desejamos realizar a operação em tração do sonotrodo, o que resulta na flexão desejada na chapa, podemos calcular aproximadamente o comprimento total do conjunto sonotrodo e amplificador para ter a ressonância em uma frequência específica.

Para obter o máximo de oscilação na extremidade do transdutor, devemos produzir uma onda com comprimento igual a um múltiplo de $\lambda/2$. O comprimento de onda pode ser obtido pela relação fundamental da ondulatória:

$$\lambda = \frac{V}{f} \quad (15)$$

Com f a frequência de operação desejada e V a velocidade do som no material. Esta pode ser calculada de acordo com as propriedades do material:

$$V = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (16)$$

Com E , o módulo de elasticidade e ρ a massa específica do material.

Logo, para uma dada frequência f desejada, pode-se estimar o comprimento do sonotrodo a projetar de tal maneira que seu comprimento somado ao do amplificador seja igual a:

$$L = \frac{\lambda}{2} = \frac{1}{2f} \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (17)$$

4 Estudo Analítico e Numérico

Para garantir o funcionamento do sistema, buscou-se realizar um estudo aprofundado de um modelo numérico do protótipo e de seus componentes. Desta maneira pode-se validar o funcionamento do atuador e estudar a influência de diferentes parâmetros nos resultados. Tentou-se também prever as eventuais fontes de erros que poderiam afetar sua performance para analisar seu impacto e grau de sensibilidade do sistema a tais erros.

4.1 Considerações sobre o modelo

Para a realização dos estudos de modelo numérico, optou-se pelo software ANSYS (versão 16.0). Dentro desta versão optou-se pelo ambiente do APDL (Ansys Parametric Design Language), que permite criar modelos e estudos numa base de código de programa.

A possibilidade de produzir estudos na forma de código permite formalizar mais facilmente os parâmetros do modelo utilizado, assim como realizar loops de simulação e estudos com operadores lógicos. Como será visto mais à frente, diversas das simulações feitas exigiram essas funcionalidades, pois visava-se produzir resultados de numerosos modelos com variações em alguns de seus parâmetros e dimensões.

Devido a este elevado número de estudos, optou-se por produzir um modelo com custo computacional reduzido, preferindo-se elementos de vigas 1D onde possível, e simplificando alguns aspectos geométricos, como pequenos filetes e chanfros.

Apesar dessa simplificação, procurou-se obter um modelo robusto, para garantir uma boa representatividade da estrutura real. Sabia-se por exemplo que mesmo com o sistema operando na ordem de 20 kHz, erros da ordem de 500 Hz já representariam uma diferença considerável na amplitude dos componentes na região de ressonância e por isso buscou-se sempre produzir erros inferiores a 200 Hz, o que equivale a um erro percentual de 1%.

Para o pós tratamento de dados, sobretudo nos resultados provenientes dos ciclos de simulação, optou-se pelo software MATLAB, que permite uma visualização mais simples desses resultados.

4.2 Estudo do Langevin

Para reduzir a quantidade de elementos a averiguar durante o estudo, optou-se por um modelo de transdutor já disponível em laboratório, cuja frequência de ressonância era próxima de 20 kHz. As dimensões do transdutor e de seus componentes estão disponíveis em anexo.

Neste modelo, todos os componentes do Langevin foram definidos como sendo feitos de alumínio, com exceção dos elementos piezoelétricos compostos da cerâmica PZT-4. As propriedades relevantes para estes materiais são apresentadas nas tabelas a seguir.

Tabela 1: Propriedades da cerâmica PZT-4

Propriedade	Símbolo	Valor	Unidades
Constantes Elásticas	s_{11}	$12.3 \cdot 10^{-12}$	m^2/N
	s_{12}	$-4.05 \cdot 10^{-12}$	
	s_{13}	$-5.31 \cdot 10^{-12}$	
	s_{22}	$12.3 \cdot 10^{-12}$	
	s_{23}	$-5.31 \cdot 10^{-12}$	
	s_{33}	$15.5 \cdot 10^{-12}$	
	s_{44}	$39 \cdot 10^{-12}$	
	s_{55}	$39 \cdot 10^{-12}$	
	s_{66}	$32.7 \cdot 10^{-12}$	
Coeficientes de acoplamento piezoelétrico	d_{15}	$496 \cdot 10^{-12}$	C/N
	d_{24}	$496 \cdot 10^{-12}$	
	d_{31}	$-123 \cdot 10^{-12}$	
	d_{32}	$-123 \cdot 10^{-12}$	
	d_{33}	$-289 \cdot 10^{-12}$	
Permissividade elétrica	ϵ_{11}	1475	
	ϵ_{22}	1475	
	ϵ_{33}	1300	
Densidade	ρ	7500	kg/m^3

Tabela 2: Propriedades da liga de alumínio

Propriedade	Símbolo	Valor	Unidades
Módulo de Young	E	70.0	GPa
Coeficiente de Poisson	ν	0.33	
Densidade	ρ	2700	kg/m^3

Considerando as simplificações do modelo, alguns componentes da montagem como os parafusos não foram modelizados, sendo representados quando necessário através da adição de massas pontuais na estrutura.

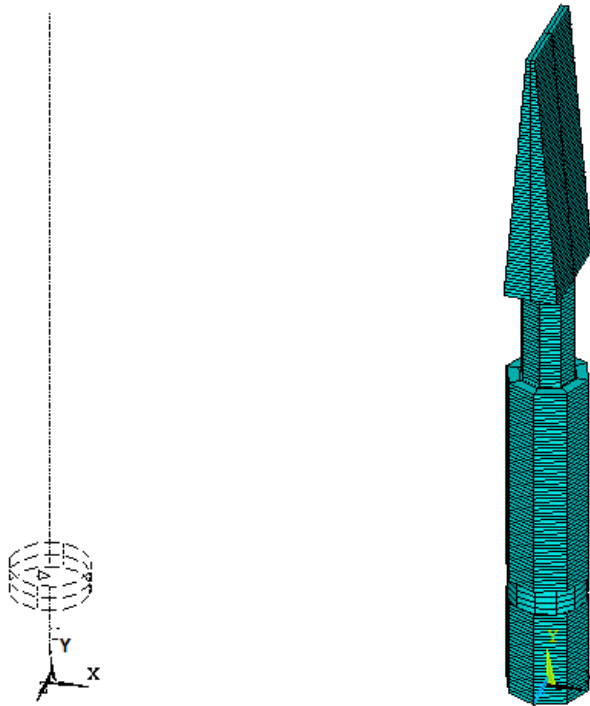
Apesar de poder-se medir empiricamente suas frequências de ressonância e mesmo os transdutores não sendo o foco do estudo, sendo possível inclusive encontrar uma teoria já bem desenvolvida em trabalhos precedentes sobre seu funcionamento e dimensionamento [5], um modelo numérico representativo dos transdutores precisa ser desenvolvido para que o modelo do protótipo como um todo (transdutores e viga) seja válido e representativo.

Para o início do estudo, foi preciso realizar uma análise modal do Langevin isolado para extrair as frequências dos modos de vibração. Pela maneira como o protótipo é montado, deseja-se que o transdutor opere em tração, para que o movimento nesta direção provoque uma flexão na viga.

Para este modelo de transdutor, os componentes estruturais foram simulados utilizando-se vigas 1D. Como é o intuito do estudo, todas as dimensões foram parametrizadas no código do programa para facilitar eventuais modificações ou realizar estudos em loops com variações desses parâmetros.

Para os elementos das cerâmicas piezelétricas, procurou-se inicialmente utilizar também elementos de viga 1D, mas devido a limitações do software isso não foi possível pois não havia nenhum tipo de elemento piezoelétrico unidimensional disponível. Similarmente os elementos planares em 2D não foram compatíveis com a estrutura 1D e por esta razão foi necessário utilizar sólidos tridimensionais exclusivamente para as cerâmicas.

Para garantir a coerência entre elementos uni e tridimensionais, os nós nas superfícies inferiores e superiores dos volumes 3D das cerâmicas foram acoplados aos nós dos elementos de viga 1D em contato com estas regiões, garantindo a transmissão do mesmo deslocamento entre eles.



(a) Modelo 1D com cerâmicas 3D (b) Representação dos elementos 3D

Figura 10: Modelagem do Langevin

Para garantir a coerência do modelo, realizou-se um estudo de convergência, fazendo-se um ciclo de simulações modais e variando-se o tamanho dos elementos para verificar sua influência nos resultados das frequências de vibração. Com tais resultados pode-se optar por um tamanho de elemento para os componentes do Langevin de 3 mm.

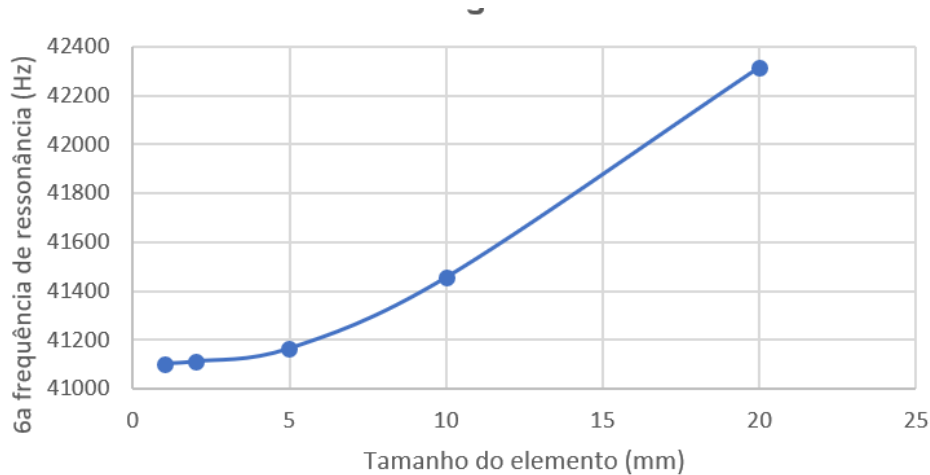


Figura 11: Estudo de convergência para os elementos do Langevin. Observa-se que para elementos inferiores a 5 mm a variação da frequência é desprezível.

Desta maneira pode-se obter as frequências de ressonância dos transdutores em tração. A partir destes resultados, observou-se que a frequência mais adequada e mais próxima da indicada pelo fabricante do transdutor é a de 20777 Hz.

Tabela 3: Estudo modal do Langevin livre

Modo de vibração	Frequência (Hz)
1	5393
2	13651
3	20777
4	29355

4.3 Estudo da viga

Para o estudo da viga, buscou-se projetar uma peça para obter modos de ressonância em frequências próximas da de ressonância do Langevin. Baseado no conhecimento do sistema, buscou-se uma viga cuja média da frequência entre dois modos de vibração coincide com a frequência de operação do transdutor (20,7 kHz).

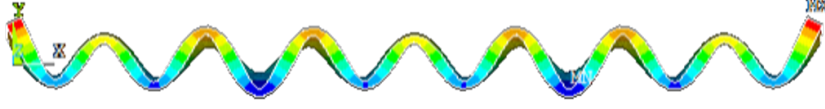
4.3.1 Dimensionamento

Para que isso fosse possível, partiu-se de um modelo analítico de ressonância de uma viga (item 3.3). Estabeleceu-se a princípio uma espessura de 3mm e buscou-se uma viga com dois modos de vibrar cuja média das frequências de ressonância fosse equivalente à frequência desejada de operação do Langevin.

Análises com a viga tridimensional revelaram que, para a largura da chapa escolhida, alguns modos de vibrar produziam uma flexão em mais de um eixo, o que poderia prejudicar a performance do protótipo, que deve operar com flexão puramente na direção transversal da viga.



(a) 14° Modo de vibrar



(b) 15° Modo de vibrar

Figura 12: Comparação entre dois modos de vibrar em uma viga. O 14° modo apresenta uma flexão composta em dois eixos diferentes.

Para uma viga de Euler-Bernoulli livre no espaço, as frequências de ressonância podem ser calculadas a partir da expressão [6]:

$$f = \frac{\beta_n^2}{2\pi} \sqrt{\frac{EI}{\rho A}} \quad (18)$$

Onde β_n é a solução da equação:

$$1 - \cos(\beta_n L) \cosh(\beta_n L) = 0 \quad (19)$$

Nestas condições, os modos de vibrar da viga são descritos pela expressão:

$$w_n(x) = \cosh(\beta_n x) + \cos(\beta_n x) - \frac{\cosh(\beta_n L) - \cos(\beta_n L)}{\sinh(\beta_n L) - \sin(\beta_n L)} (\sinh(\beta_n x) + \sin(\beta_n x)) \quad (20)$$

4.3.2 Modelo analítico

Conhecendo-se os modos de vibrar da viga, é possível a partir dos resultados de [7] prever o comportamento da viga quando atuada por duas forças de amplitude P e defasadas de $\pi/2$ rad no tempo, de maneira semelhante ao que é mostrado na figura 4. Esta forma de atuação corresponde à geração de uma onda propagante analógica.

Usando expansão modal, a vibração por flexão da viga pode ser descrita como sendo:

$$w(x, t) = C_1 \sin(k_n x - \pi/4) \sin(\omega t) - C_2 \sin(k_{n+1} x - \pi/4) \cos(\omega t) + C_3 \sin(k_n x - \pi/4) \sin(\omega t) - C_4 \sin(k_{n+1} x - \pi/4) \cos(\omega t) \quad (21)$$

Onde as constantes C_i valem:

$$\begin{aligned}
C_1 &= \frac{2P\phi_n(l_1)}{(\omega_n^2 - \omega^2)\sqrt{\rho A}}, & C_2 &= \frac{2P\phi_{n+1}(l_2)}{(\omega_{n+1}^2 - \omega^2)\sqrt{\rho A}}, \\
C_3 &= \frac{2P\phi_{n+1}(l_1)}{(\omega_{n+1}^2 - \omega^2)\sqrt{\rho A}}, & C_4 &= \frac{2P\phi_n(l_2)}{(\omega_n^2 - \omega^2)\sqrt{\rho A}}
\end{aligned} \tag{22}$$

Resolvendo-se as equações acima de maneira iterativa com diversos comprimentos de viga, observou-se que para uma chapa de 330mm de comprimento, o 17° e 18° modos equivalem a 19479 Hz e 21769 Hz respectivamente, com uma média de 20624 Hz, próximo o suficiente da frequência desejada (20,7 kHz). Tais modos produzem ondas puramente longitudinais, evitando o problema descrito anteriormente sobre os modos mistos de vibração lateral e longitudinal.

Tal modelo analítico e seus resultados podem ser simulados em MATLAB de maneira a avaliar a propagação das ondas sobre a viga. O código para calcular os modos de vibrar realizar esta análise está disponível nos anexos.

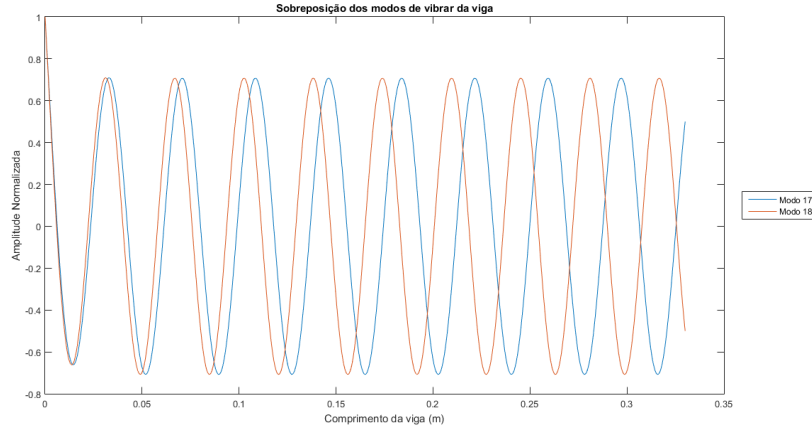


Figura 13: Superposição do 17° e do 18° modos de vibrar da viga

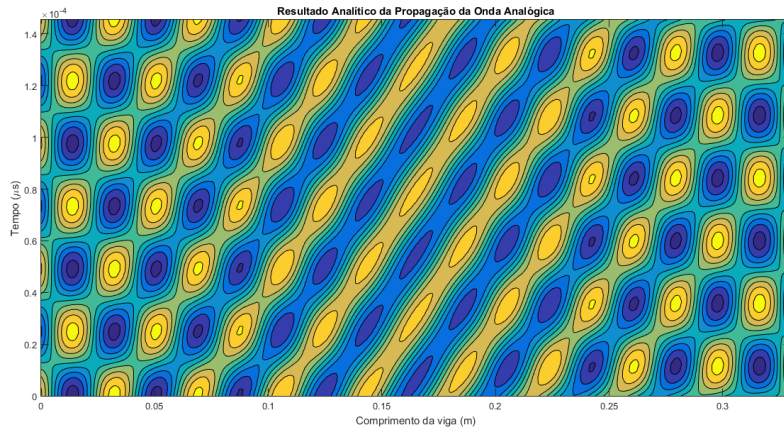


Figura 14: Simulação da propagação da onda analógica com o modelo analítico

4.3.3 Modelo numérico

Da mesma maneira que na simulação do Langevin, foi feito um estudo no tamanho dos elementos para garantir a convergência do modelo numérico. Segundo o resultado, foi feita a escolha para um elemento de 2,5mm de comprimento.

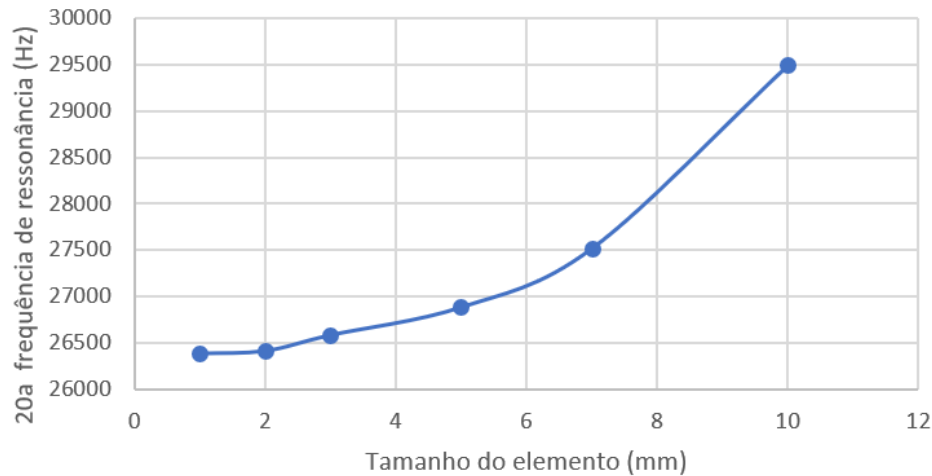


Figura 15: Estudo de convergência para os elementos da viga. Observa-se que para elementos inferiores a 3 mm a variação da frequência é desprezível.

Logo com este tamanho, pode-se realizar uma análise modal para uma viga de 3 x 50 x 330 mm. Os resultados numéricos produziram um erro desprezível em relação ao cálculo analítico, validando o modelo e tamanho de vigas escolhido.

Tabela 4: Comparação entre os modelos analítico e numérico da viga

Modo de vibração	Frequência (Hz)	
	Modelo Analítico	Modelo Numérico
1	144	144
5	1924	1951
10	7012	7132
15	15281	15420
17	19479	19497
18	21769	21697

4.4 Estudo do protótipo

Tendo as frequências de operação e as dimensões de cada peça, os estudos do conjunto montado foram iniciados. Sabia-se do começo que uma vez montado, o sistema não se comportaria de maneira perfeitamente desacoplada, ou seja, haveria possíveis diferenças entre os modos de vibrar da chapa e Langevins isolados em relação ao protótipo montado.

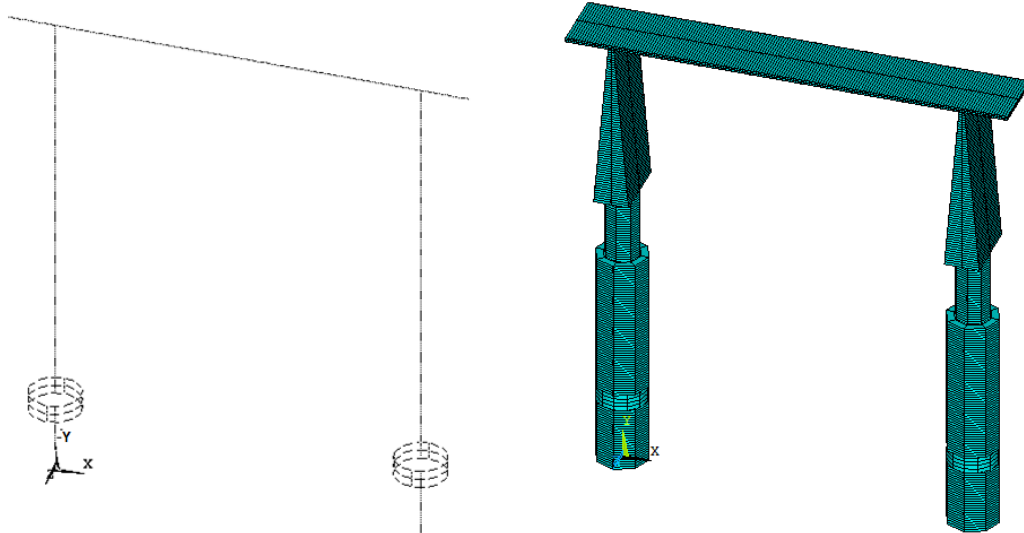
4.4.1 Modelagem

O estudo do sistema Langevins e chapa foi um processo iterativo, pois diversos parâmetros influenciavam o resultado das simulações. Alguns estudos suplementares foram feitos numa fase posterior do projeto, mostrando a influência de alguns parâmetros como o posicionamento dos componentes e a interface entre os Langevins e a chapa. Nesta seção, serão utilizadas as dimensões e características finais escolhidas para o protótipo, sendo que o estudo para realizar a escolha e otimização desses parâmetros será mostrado posteriormente.

As dimensões e parâmetros mais relevantes para o estudo foram:

- Comprimento da viga: 330 mm
- Espessura da viga: 3 mm
- Posição dos transdutores em relação à borda da viga: 34 mm
- Tamanho dos elementos do Langevin: 3 mm
- Tamanho dos elementos da viga: 2 mm
- Frequência de operação: 20600 Hz

A modelagem do sistema montado consiste em uma composição do modelo da viga e dois Langevins. Desta maneira, todos os elementos são representados por vigas unidimensionais exceto as cerâmicas piezoelétricas do Langevin que mantiveram-se representadas por sólidos 3D.



(a) Modelo 1D com cerâmicas 3D

(b) Representação dos elementos em 3D

Figura 16: Modelagem 1D do protótipo montado (à esquerda) com representação de seus elementos em 3D (à direita)

4.4.2 Estudo Modal

Apesar de todos os elementos já terem tido análises modais isoladas, era necessário ainda um novo estudo modal do conjunto montado, de maneira a antecipar as reais frequências do protótipo real. Isso é importante pois uma vez que montado, as dinâmicas de cada parte interferem umas nas outras alterando a frequência do sistema. Como será visto mais à frente, o tamanho da superfície de contato tem um papel importante na variação observada nas frequências.

A simulação modal foi feita extraindo-se apenas os valores onde ocorria uma flexão significativa da viga (foram ignorados modos onde a amplitude da onda na viga era muito baixa). Foram analisados apenas as frequências próximas à frequência de operação (próxima de 20 kHz) .

Tabela 5: Estudo modal do modelo montado. Modos que causam flexão na viga

Modo de vibração	Frequência (Hz)
A	19979
B	20638
C	21522

Note que os modos foram denominados A, B e C pois sendo um conjunto com uma dinâmica mista do Langevin e da chapa, as ondas produzidas têm um aspecto composto, e logo impossibilitam de caracterizar um número específico de modo de vibração.

Como pode-se observar, as frequências dos modos A e C são próximas àquelas dos modos 17 e 18 da viga em flexão (19497 e 21697 Hz respectivamente) e a frequência B é próxima do 3o modo em tração do Langevin (20777 Hz).

4.4.3 Análise Harmônica: Onda Analógica

Neste modelo, as excitações nas extremidades da viga são de forma senoidal com uma decalagem no tempo de um ângulo ϕ . Nas simulações isto é feito realizando-se uma análise harmônica com condições de contorno de uma tensão com componentes imaginárias em um dos transdutores com uma frequência de operação encontrada no estudo modal (20600 Hz).

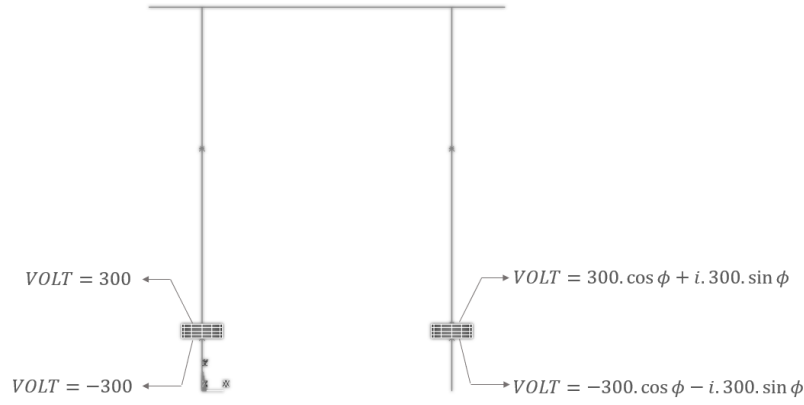


Figura 17: Representação das condições de contorno para a onda analógica impostas no modelo Ansys

Alguns resultados da simulação para o sistema ao longo do tempo nessas condições podem ser vistos nas figuras abaixo.

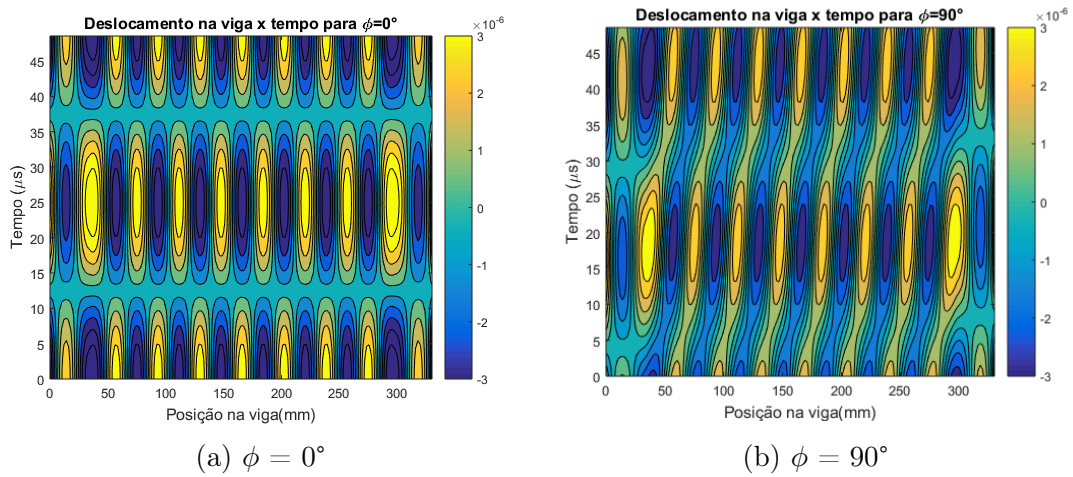


Figura 18: Resultados da análise harmônica para diferentes valores de defasagem entre os sinais.

Outra maneira de observar tal fenômeno foi verificar a trajetória de um dos nós ao longo tempo:

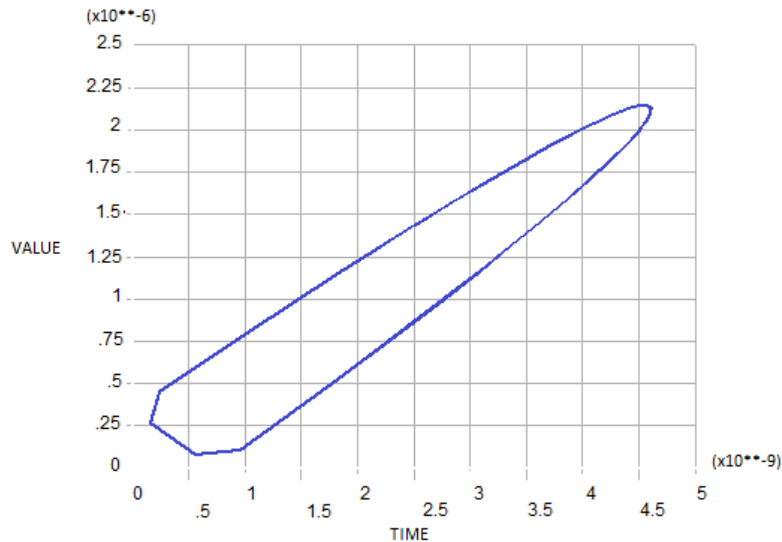


Figura 19: Trajetória elíptica de um ponto no centro da viga durante um período da onda propagante.

Através desses resultados, confirma-se o fenômeno do aparecimento de ondas propagantes para ângulos ϕ múltiplos ímpares de 90° . Pode-se observar que, como previsto, um ponto sobre a superfície da viga efetua um deslocamento em elipse, o que indica que este sistema pode transmitir movimento a uma parte móvel posicionada sobre ele.

4.4.4 Análise Harmônica: Onda Digital

Para a análise com a onda digital, o deslocamento da onda não é mais uma função do tempo e sim do ângulo θ . Como observado, neste modo são produzidas sempre ondas estacionárias e a translação da onda ao longo da viga é feita variando-se as amplitudes das excitações.

Nenhum módulo do Ansys fornece uma resposta de todo o sistema segundo uma variável definida pelo usuário. Para tal, deve-se realizar um ciclo de simulações, sendo que a cada passo de simulação é feita uma análise harmônica. A amplitude das tensões nas cerâmicas é alterada variando-se o parâmetro θ em cada um dos passos.

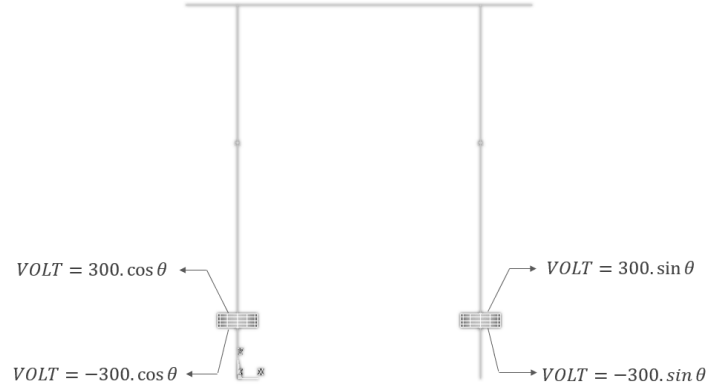


Figura 20: Representação das condições de contorno para a onda digital impostas no modelo Ansys

Realizando tal ciclo de simulação, variando-se apenas o ângulo, obteve-se diretamente a curva de deslocamento da onda na viga pelo ângulo theta, como antecipado pelo modelo analítico.

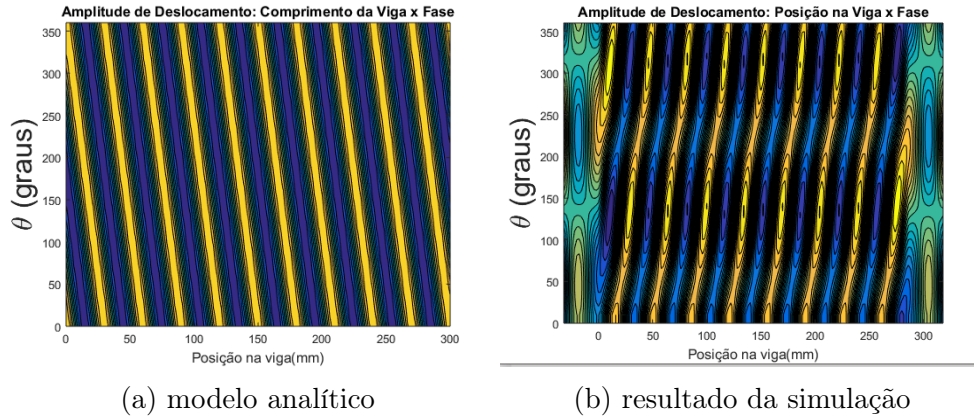


Figura 21: Comparação das ondas se deslocando com a variação das amplitudes, em cima o resultado por equacionamento analítico e abaixo o resultado da simulação computacional do sistema

As simulações validam então o princípio de propagação com os parâmetros e dimensões escolhidos. Observa-se porém uma divergência entre os resultados analítico e numérico quanto à forma dos deslocamentos produzidos, sendo o analítico muito mais linear.

Como será visto mais à frente, isto é devido aos efeitos nas bordas da viga, uma vez que o cálculo analítico prevê uma chapa infinita. Tal efeito pode ser minimizado ou amplificado dependendo do posicionamento do transdutor.

4.5 Estudo de sensibilidade

A fim de avaliar o impacto dos diferentes parâmetros do projeto no funcionamento do motor, um conjunto de simulações foi realizado de maneira a revelar eventuais fontes de

erros na construção e no acionamento do protótipo.

As principais análises feitas neste estudo foram a influência do acoplamento entre o Langevin e a chapa na frequência de operação do conjunto, a influência de desvios da frequência de acionamento sobre a geração das ondas propagantes, erros de fabricação nas dimensões na chapa e de montagem da estrutura, além de uma análise sobre o efeito do amortecimento do material nos resultados.

4.5.1 Acoplamento Langevin-Chapa

Durante o projeto do protótipo, identificou-se que o tamanho da seção de contato entre o Langevin e a chapa seria um outro fator capaz de influenciar o aparecimento das ondas propagantes. Esta área é responsável pela transmissão do movimento gerado pelo transdutor, mas uma seção muito grande poderia rigidificar o contato e atrapalhar a formação das ondas.

Idealmente, esta seção deveria agir como um contato pontual e transmitir apenas forças à chapa. Contudo, devido às limitações práticas de construção, deve existir uma largura de seção mínima para garantir a montagem do sistema mecânico. Neste conjunto de simulações, essa largura foi variada de 1 mm até 10 mm, sendo mostrados abaixo os resultados para alguns dos casos mais representativos.

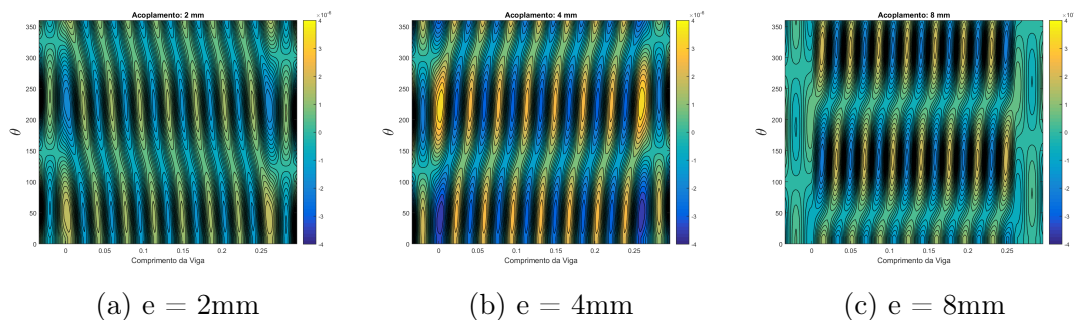


Figura 22: Análise do impacto da espessura da seção de acionamento nos resultados

É válido notar que, para pequenas seções (entre 1 mm e 3 mm), ocorre formação de uma onda propagante sobre a chapa metálica, porém com baixa amplitude, enquanto que um pico de amplitude aparece para uma largura de 4 mm. Para larguras maiores, observa-se que, embora exista um ganho em amplitude, o aumento da seção de contato degrada a forma da onda propagante gerada sobre a chapa.

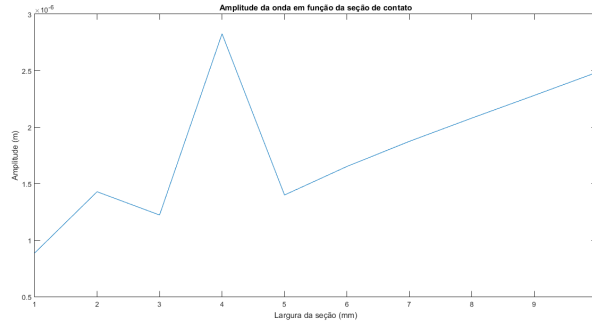


Figura 23: Amplitude de deformação em função da espessura da seção de acoplamento.

4.5.2 Estudo da aba

Um dos parâmetros que supôs-se poder influenciar a geração das ondas propagantes foi o tamanho das abas da chapa metálica, ou seja, a distância entra a borda da chapa e o ponto de fixação dos transdutores. Em particular, o objetivo desta análise era de avaliar para qual configuração seria possível obter a maior amplitude de deformação sobre a viga.

Um conjunto de simulações foi realizado variando-se o tamanho das abas de 1 mm até 54 mm, o que equivale a aproximadamente $3\lambda/2$ na frequência de acionamento escolhida para o protótipo (20600 Hz). Nestas simulações, as abas foram dispostas simetricamente em relação ao centro da chapa.

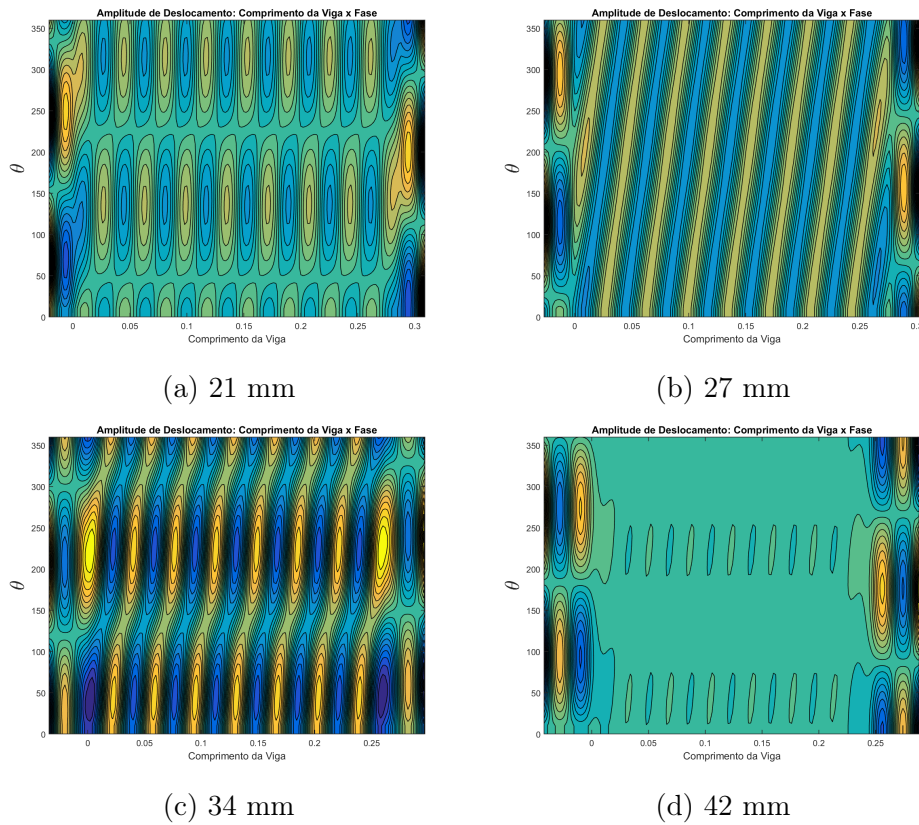


Figura 24: Análise do impacto do comprimento da aba nos resultados

A partir destes resultados, é possível concluir que o tamanho da aba é um fator bastante importante para a produção das ondas propagantes. Além da amplitude de deformação, a escolha do tamanho da aba influencia a própria geração das ondas, sendo que algumas configurações produzem ondas propagantes contínuas ou intermitentes, enquanto outras levam à formação de uma onda estacionária sobre a chapa. É até mesmo possível observar algumas configurações que geram um fenômeno de interação destrutiva entre as ondas, o que anula os efeitos oscilatórios sobre na superfície da chapa.

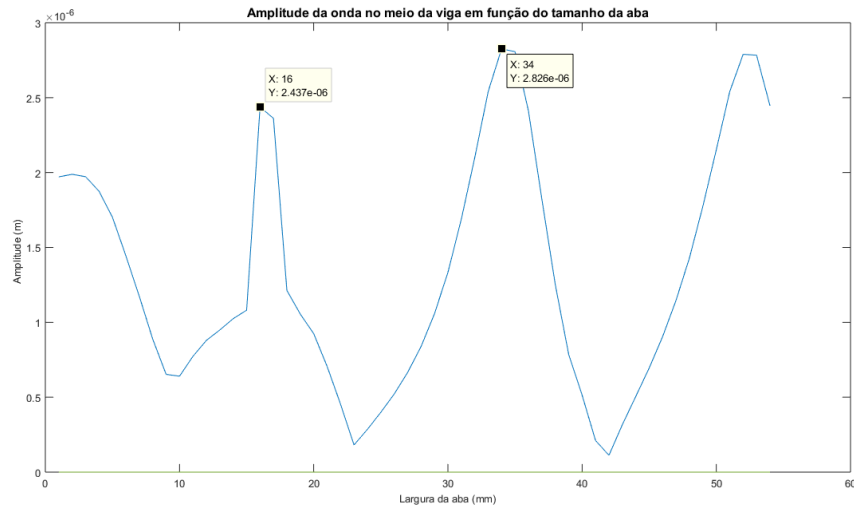


Figura 25: Evolução da amplitude da onda em função do comprimento da aba.

Ao comparar-se a máxima de deformação obtida no meio da chapa entre todos os resultados, observa-se que os picos de amplitude aparecem-se quando a largura da aba é um múltiplo de $\lambda/2$. Para a construção deste protótipo, foi escolhida a largura de 34 mm em razão da amplitude elevada de deformação, sendo que nesta configuração a simulação indicava a formação de uma onda propagante intermitente sobre a viga.

Também procurou-se avaliar o efeito de erros de fabricação sobre o desempenho do sistema. Neste caso, considerou-se como a utilização de uma viga com abas diferentes em cada transdutor afetaria os resultados. Para esta sequência de simulações, em um dos lados da chapa manteve-se a aba de 34 mm, quanto que a aba do lado oposto foi progressivamente reduzida.

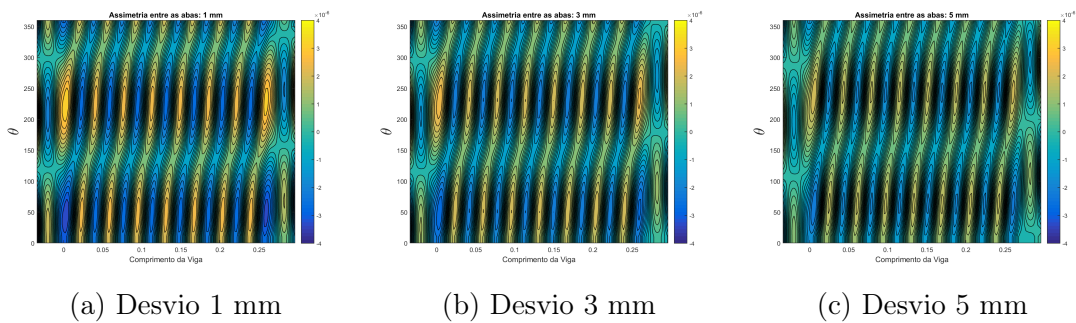


Figura 26: Análise do impacto de uma assimetria no comprimento das abas nos resultados

Os resultados deste conjunto de simulações mostram que, apesar de ocasionar uma redução

da amplitude de deformação, a existência de desvios de até 5 mm na largura da aba não afetam a propagação da onda.

4.5.3 Acionamento dos transdutores

Devido ao fato de que, naturalmente, existiria uma ligeira diferença nas frequências de ressonância entre os dois transdutores Langevins, foi identificada a necessidade de avaliar como o sistema responderia a uma frequência de acionamento diferente da ressonância de seus componentes. Para tanto, o modelo numérico foi modificado para testar se dois transdutores com frequências naturais distintas ainda seriam capazes de gerar uma onda propagante sobre a chapa metálica.

Nessas simulações, um dos Langevins teve o comprimento de seu sonotrodo alterado ligeiramente, degradando suas frequências naturais em relação ao outro, enquanto que o sistema continuava sendo excitado na frequência encontrada anteriormente, de 20600 Hz. Escolheu-se realizar este teste para o acionamento por variação da amplitude da onda (método digital).

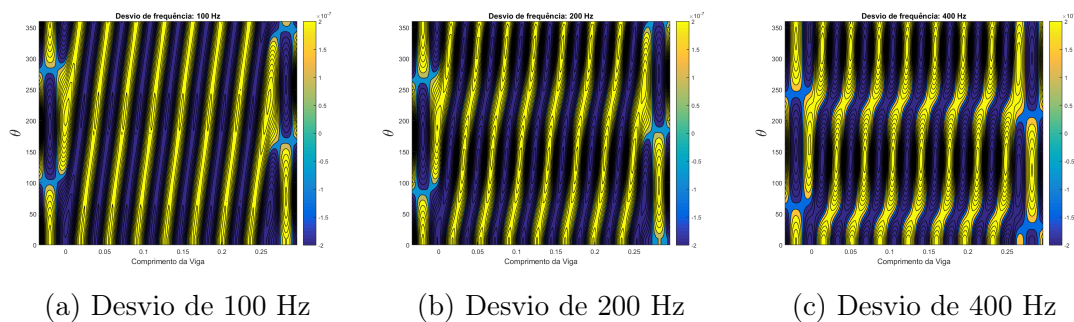


Figura 27: Análise do impacto da frequência de acionamento nos resultados

Pode-se perceber a partir destes resultados que para desvios de até 200 Hz entre a frequência de ressonância do Langevin e a frequência de acionamento, o sistema continua sendo capaz de gerar uma onda propagante. Para desvios maiores, outros modos de vibrar da estrutura começam a ser excitados, o que afeta negativamente o desempenho do sistema.

Outro risco identificado foi a possibilidade de, por problemas de construção ou de montagem, a amplitude dos deslocamentos impostos pelos transdutores serem diferentes entre si. Por isso, um outro conjunto de simulações foi realizado para avaliar o quanto essa diferença impactaria os resultados.

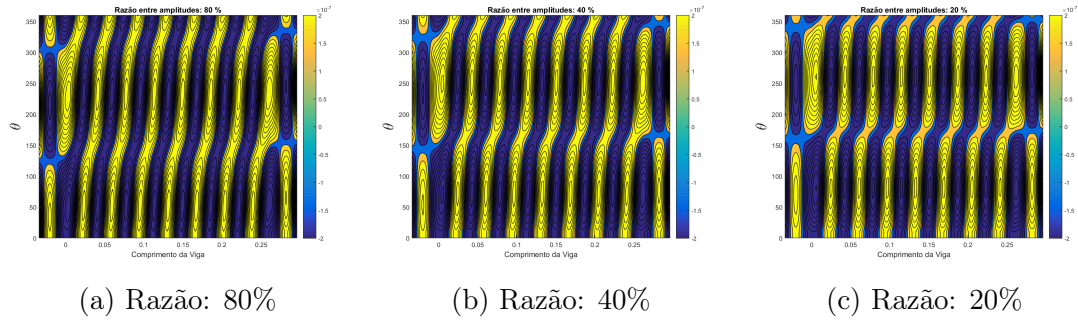


Figura 28: Análise do impacto da razão $B2/B1$ entre as amplitudes de acionamento nos resultados

Como pode ser visto nesta sequência de imagens, a redução a razão entre as amplitudes dificulta a geração das ondas propagantes. É válido notar que para uma razões próximas ou inferiores a 20%, a onda sobre a chapa metálica se torna praticamente estacionária, enquanto valores próximos a 40% apenas dificultam a propagação.

4.5.4 Material

O estudo realizado sobre o protótipo trata sobretudo de análises modais e harmônicas, sendo então em regime permanente. Para tais estudos, as principais propriedades que impactam o funcionamento do sistema são a massa específica, coeficiente de Poisson e módulo de elasticidade.

Porém, não conhecia-se a liga específica que havia sido utilizada na fabricação dos transdutores e da viga, logo não poderia-se confirmar com precisão tais propriedades.

Dentre as possíveis ligas identificadas, observou que a propriedade que mais mudava era o módulo de elasticidade. Nas simulações adotou-se 70 GPa, porém observou-se que para algumas ligas comuns esse valor podia chegar a valores como 68,9 GPa e 72 GPa.

Para uma análise de sensibilidade, realizaram-se algumas simulações variando-se o valor do módulo de elasticidade

Tabela 6: Influência das propriedades do material sobre a frequência natural da chapa

Modulo de elasticidade (GPa)	Frequência do 17° modo de vibrar(Hz)
68.9	20559
70	20638
72	20858

Observa-se que a variação é de aproximadamente 100 Hz para cada 1 GPa, estando dentro do erro aceitável para a frequência escolhida, logo o valor intermediário de 70 GPa manteve-se como o módulo de elasticidade usado para todas as simulações para reduzir divergências por erro das propriedades do material.

Observando-se também os resultados de simulações de propagação de onda digital, há uma pequena variação no formato da onda, porém o sistema continua funcional.

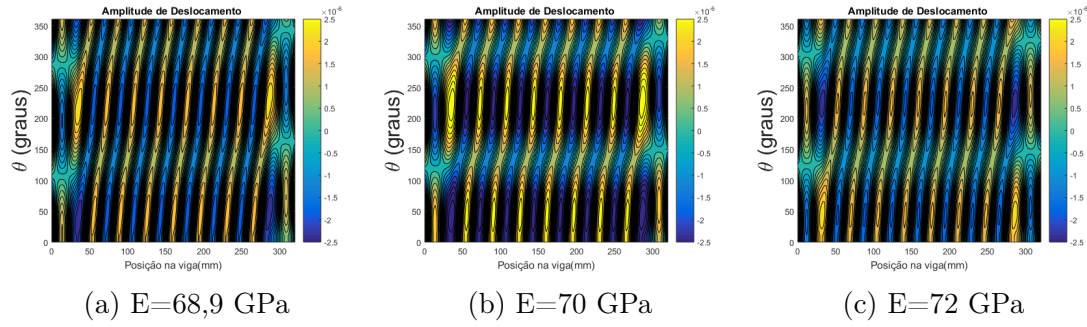


Figura 29: Comparação das formas de onda para diferentes propriedades do alumínio

4.5.5 Amortecimento

O modelo desenvolvido até este ponto não levava em conta os efeitos de amortecimento existentes na estrutura mecânica. Contudo, como indicado em [4], estes efeitos podem ter um impacto importante na geração das ondas propagantes. Dessa maneira, decidiu-se simular alguns casos onde o sistema é submetido ao amortecimento associado ao próprio material da estrutura.

No software ANSYS Mechanical APDL, é possível utilizar o modelo de amortecimento baseado no modelo de Rayleigh, que descreve o amortecimento interno a uma estrutura através de uma combinação linear entre a sua massa e sua rigidez. Também é possível definir através do razão de amortecimento modal, um valor que associa o coeficiente de amortecimento aplicado à estrutura com o coeficiente de amortecimento crítico do material.

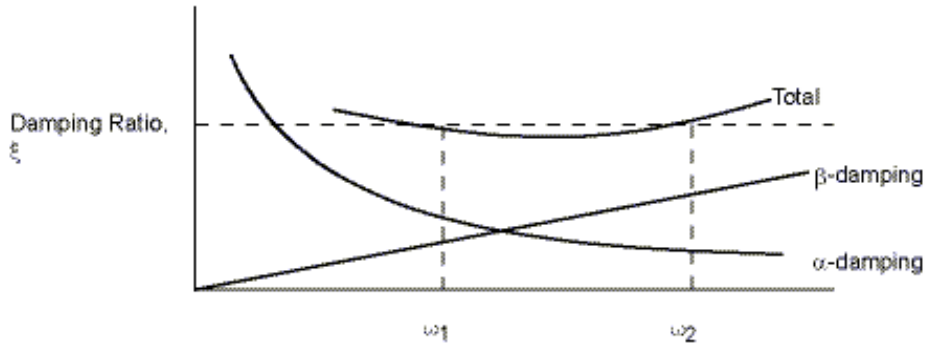


Figura 30: Representação dos coeficientes do amortecimento de Rayleigh.

Baseado nos trabalhos anteriores disponíveis, decidiu-se avaliar inicialmente a resposta do sistema a uma razão de amortecimento reduzida, entre 1% e 2%.

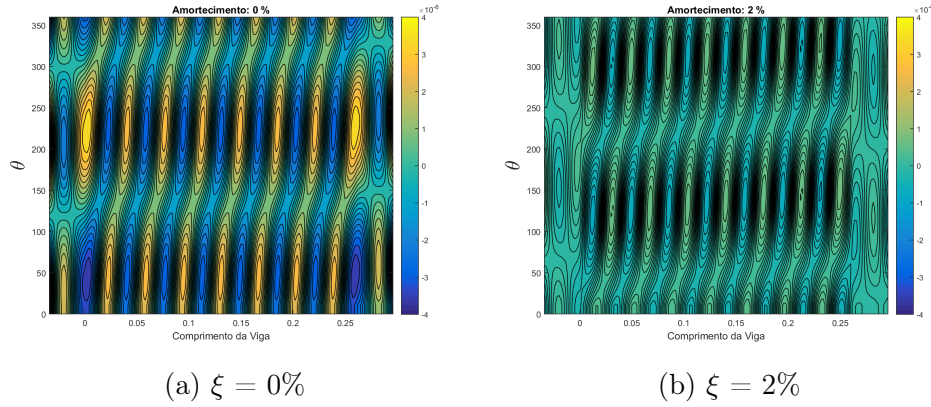


Figura 31: Análise do impacto do amortecimento nos resultados

O efeito observado da adição de um pequeno amortecimento à estrutura foi principalmente a redução da amplitude de deformação da onda, porém para os valores utilizados neste estudo o amortecimento não interferiu com a propagação das ondas.

Será visto mais tarde que isso seria reiterado, e que amortecimentos superiores aos vistos até então poderiam sim ter um efeito mais significativo no funcionamento do sistema.

5 Ensaios Experimentais

5.1 Metodologia e Verificações Iniciais

Os ensaios foram realizados no laboratório de ultrassom do departamento de engenharia mecatrônica. Tal laboratório dispunha da maior parte dos equipamentos necessários para a montagem e averiguação de características do protótipo tais como geradores de funções, amplificadores e um impedômetro.

5.1.1 Preparo dos Transdutores

O processo consistiu inicialmente pelo estudo dos Langevins isolados. Verificou-se que as dimensões de cada peça dos transdutores reais eram condizentes com aquelas modeladas no ANSYS, reduzindo a chance de divergências nos resultados devido a erros de dimensões.

A montagem de cada transdutor passou por um cuidado especial quanto à pressão exercida sob as cerâmicas. Trabalhos anteriores [1] mostraram que para a cerâmica utilizada, deveria-se aplicar uma pressão de 30 a 40 Pa, o que equivale a um torque de aperto de 60 a 79 N.m com os parafusos utilizados. Foi feito um reaperto dos parafusos com um torquímetro para assegurar que as cerâmicas operassem segundo as especificações.

Em seguida, as frequências de ressonância dos transdutores foram extraídas através da medição por um impedômetro (*Hewlett Packard 4194A*). Este aparelho excita os terminais do transdutor em uma banda de frequências definida pelo usuário. As frequências de ressonância podem ser identificadas pelos pontos onde impedância medida entre os terminais é mínima.

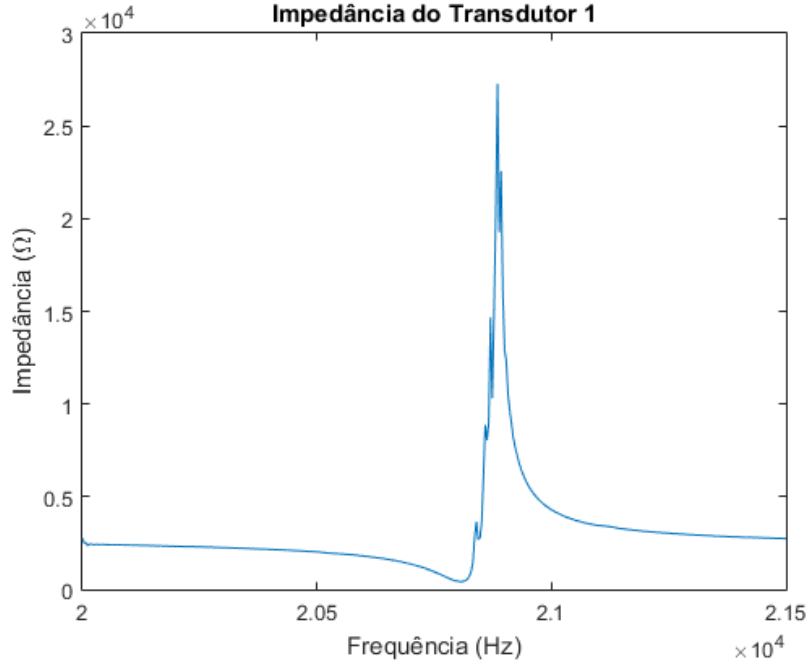


Figura 32: Exemplo de impedância medida para o transdutor 1, na faixa de 20kHz. Observa-se que a frequência de ressonância se encontra em 20810 Hz.

Observou-se apenas o 3° modo de vibração em tração dos Langevins, uma vez que ele é o mais próximo da frequência de operação do sistema. Observou-se as frequências de 20810 e 20850 Hz para os transdutores 1 e 2 respectivamente.

Comparado à frequência de 20777 Hz obtida no modelo computacional, o erro é desprezível (cerca de 0.2 %), e a divergência das frequências entre os dois transdutores (40 Hz) é pequena o suficiente que não deve afetar o funcionamento do protótipo, como discutido no item 4.5.3.

As impedâncias medidas nas frequências de ressonância foram de 491 Ω e 380 Ω para os transdutores 1 e 2 respectivamente.

5.1.2 Preparo do protótipo

Em seguida foi feito um estudo similar com o protótipo montado para observar se as frequências de ressonância de todo o sistema correspondem às do modelo numérico. Para identificar eventuais divergências na montagem dos Langevins no protótipo e evitar a influência de um transdutor sobre o outro nas medições no impedômetro, o protótipo foi excitado um lado por vez.

Tabela 7: Comparação entre as frequências de ressonância encontradas para o sistema (Hz)

Modelo numérico	Protótipo com Langevin 1	Protótipo com Langevin 2
19797	19900	19900
20638	20360	20250
21532	21300	21100

Observa-se desta vez que ambas as diferenças do modelo numérico com o protótipo real e a diferença entre os resultados de cada transdutor foram maiores (da ordem de 1.4%). Ainda assim, o erro poderia ser compensado na bancada de testes alterando a frequência de operação para um valor mais próximo do observado, optando-se então por excitar o sistema em 20300 Hz.

Observou-se também que as impedâncias medidas aumentaram, dado a maior inércia de todo o sistema montado. Elas foram da ordem de 400 Ω nos transdutores individuais para um valor próximo a 1500 Ω no protótipo.

5.1.3 Visualização das ondas

Como visto no modelo numérico, as amplitudes de onda produzidas na viga seriam da ordem de micrômetros. Desta maneira, seria impossível visualizar a olho nu a vibração. Por isso foi necessário encontrar algum indicador que facilitasse a observação dos fenômenos na chapa e permitisse verificar o movimento da onda.

Experiências anteriores com ondas ultrassônicas mostraram que uma das alternativas disponíveis seria depositar líquidos ou material particulado sobre a superfície da viga, pois estes ficariam presos nas regiões dos nós e isso permitiria a visualização da onda.

Um primeiro teste com água demonstrou que a frequência e a amplitude de operação eram suficientes para atomizá-la e rapidamente expulsá-la da superfície. Logo, optou-se por utilizar material particulado, como areia, para a visualização.

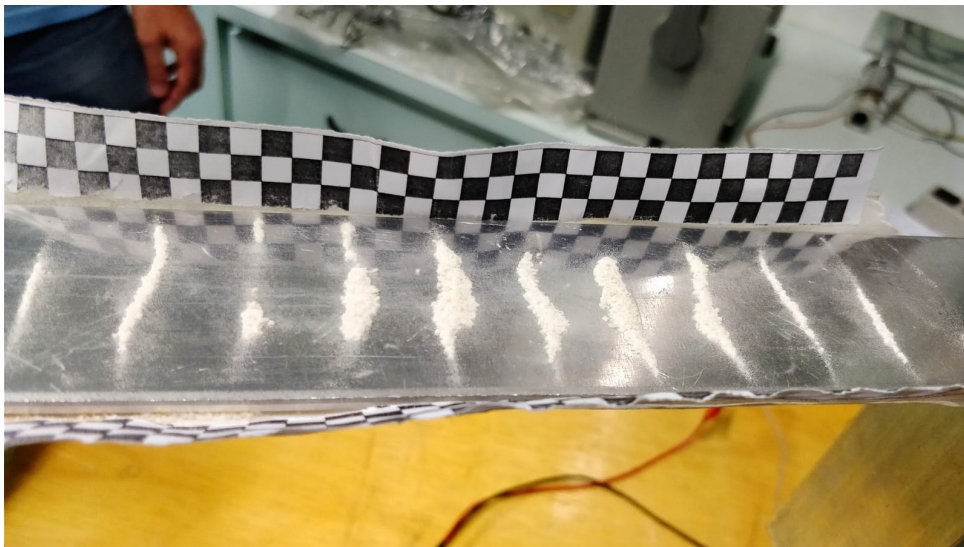


Figura 33: Material particulado depositado sobre a viga com o protótipo ligado. Observa-se que o material fica retido na região dos nós e que estes são espaçados de meio comprimento de onda (cerca de 18mm).

Outra opção foi colocar uma moeda, um pedaço de papel ou outro objeto de dimensões reduzidas sobre a chapa. Em razão da vibração produzida, esses objetos podem ser deslocados pela movimentação dos nós da onda sobre a superfície da chapa.

5.1.4 Montagem e Acionamento do Protótipo

Como observado, em ambos os modos de propagação deve-se produzir uma excitação senoidal com uma frequência fixa e variar ou a amplitude (modo digital) ou a fase (modo analógico) individualmente em cada um dos transdutores. Para tal, utilizou-se um gerador de funções de dois canais (*Agilent 33500B*), permitindo mudar manualmente as amplitudes e fases dos sinais gerados.

O gerador era limitado a operar com baixas potências, porém sabia-se das simulações que seriam necessárias tensões na ordem de 300 V com impedâncias na ordem de 1500 Ω . Por isso, os sinais do gerador de funções eram enviados para amplificadores de alta frequência (*Agilent 800A3*) que então geravam a tensão necessária para o acionamento das cerâmicas piezoelétricas.

Por último, as amplitudes das tensões deveriam variar simultaneamente de forma senoidal e cossenoidal, mas esse controle não poderia ser realizado diretamente pelo gerador pois este não possui uma funcionalidade para alterar as amplitudes simultaneamente. Por isso, o gerador foi conectado a um computador que podia controlá-lo através de um programa MATLAB, o que permite ter um bom controle sobre os sinais gerados. O código de tal programa está disponível em anexo.

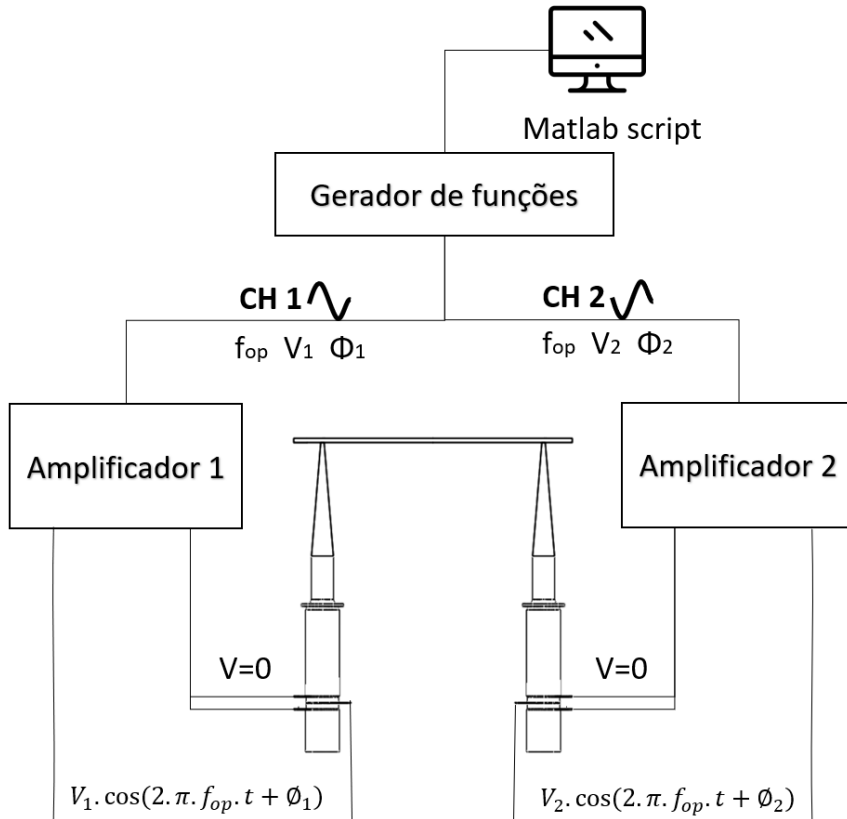


Figura 34: Esquematização inicial da montagem da bancada de testes.

5.2 Resultados Iniciais

Com o acionamento do protótipo montado, observou-se o aparecimento de uma onda estacionária, evidenciada pelo material depositado em algumas regiões como pode ser visto na figura 33. As variações na amplitude dos sinais enviados aos transdutores não provocaram o deslocamento da onda como previsto no modelo de propagação de uma onda digital.

Similarmente, o modelo de onda analógica provocou um efeito diferente do antecipado. Com os transdutores agora excitados com amplitudes iguais porém defasados no tempo em 180° , pôde-se observar que o material manteve-se concentrado nos nós próximos ao centro da viga. Uma moeda colocada em qualquer uma das extremidades da viga se deslocava em direção ao centro.

Isto indicava que, para a excitação de onda analógica, no centro a onda era majoritariamente estacionária enquanto que em cada uma das extremidades existia uma onda propagante em direção ao centro da viga. Esse fenômeno não tinha sido observado até então, o que levou a uma alteração do modelo das simulações para justificar esse comportamento.

Além disso, o fato desse fenômeno de transporte ser observado em 180° e não 90° como o esperado indicava um possível erro de fase dos sinais impostos aos terminais dos transdutores.

Outro comportamento diferente observado em alguns dos ensaios seguintes foi a forma da onda estacionária formada sobre a chapa. Observou-se que dependendo do número de parafusos, de suas posições e seus apertos a forma da onda variava consideravelmente.

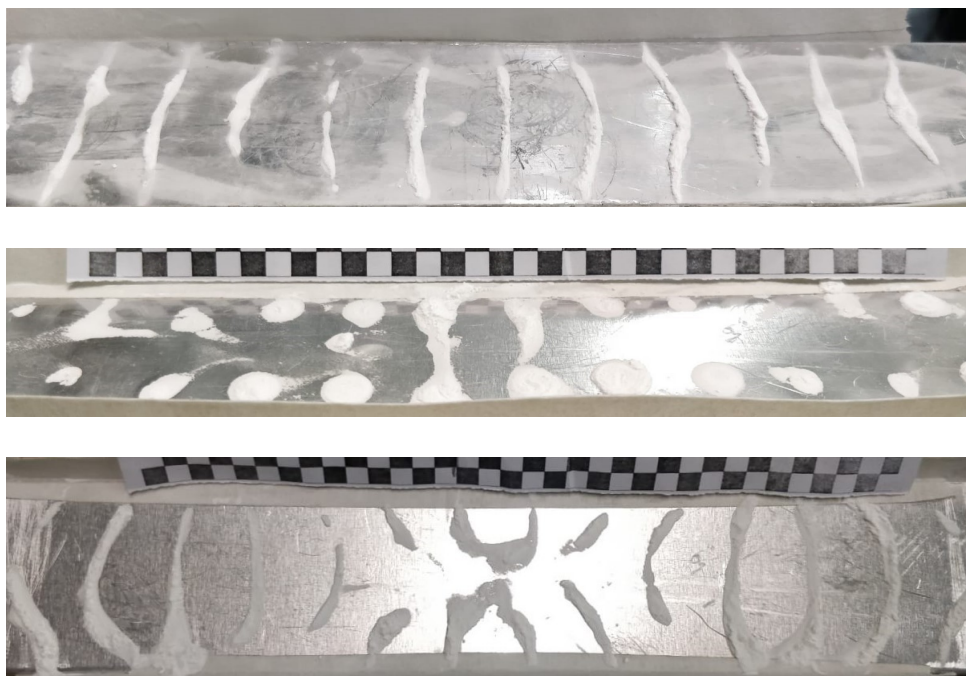


Figura 35: Diferentes formas de ondas estacionárias observadas segundo configurações diferentes de parafusos

5.3 Reiteraões do modelo

Eventualmente, reproduziu-se esse fenômeno aumentando o amortecimento do sistema bem além do esperado. Para amortecimentos do sistema superiores a 2%, a resposta temporal da onda analógica apresenta o efeito de propagação em direção ao centro da chapa.

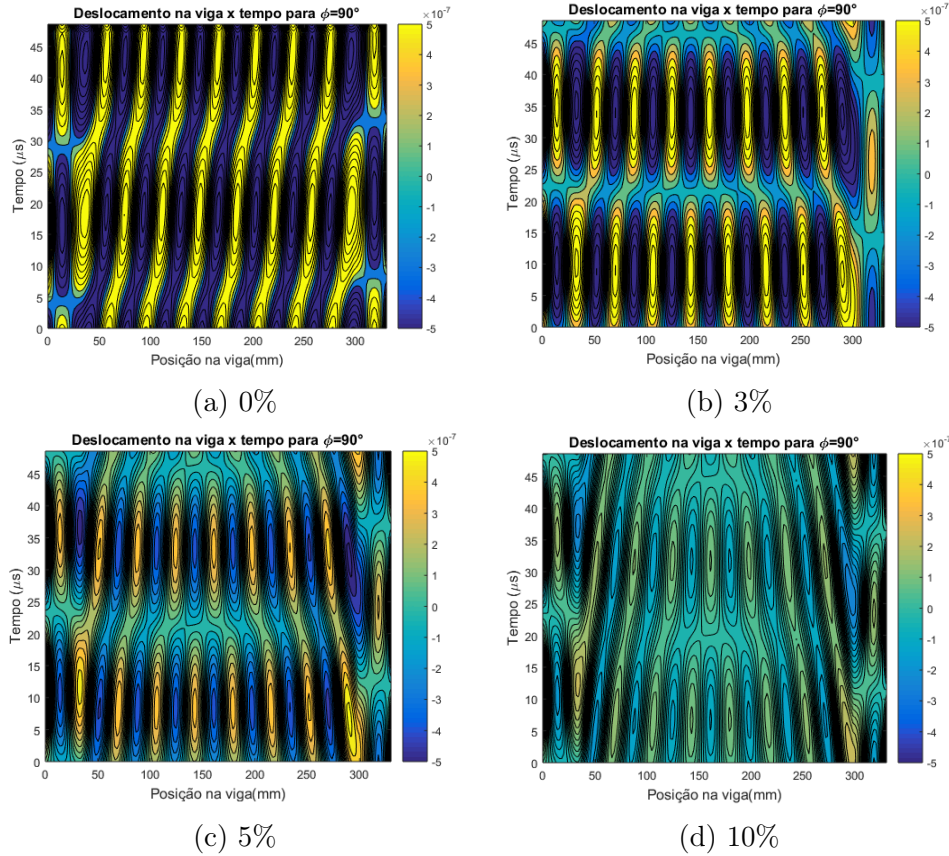


Figura 36: Respostas temporais para a viga em excitação analógica para altos valores de amortecimento.

Considerou-se então um amortecimento de 3% e novas simulações foram feitas para encontrar um novo tamanho de aba que mesmo com esse valor de amortecimento fosse capaz de propagar a onda.

Como a frequência de operação manteria-se a mesma, o comprimento total da viga foi mantido, porém observou-se que para uma aba de 29 mm ao lugar dos 34 mm a onda produzida seria menos suscetível aos erros provenientes do amortecimento. Optou-se também também testar redução da largura da viga de maneira a aumentar a rigidez lateral da estrutura e assim evitar o aparecimento de modos de vibrar que não fossem puramente de flexão. Duas chapas, com larguras de 50 e 25 mm foram fabricadas e testadas nos ensaios seguintes.

Além disso, a instrumentação da montagem foi alterada para permitir a avaliação de algumas características que eram suspeitas de influenciar o funcionamento do protótipo, sobretudo diferenças nos sinais produzidos e diferenças nas dinâmicas dos transdutores.

Inicialmente, adicionou-se um osciloscópio (*Agilent DSO6052A*) para avaliar o sinal produzido diretamente nos terminais dos transdutores. Com isso, observou-se que mesmo com sinais síncronos do gerador de funções (fase=0°), os amplificadores induziam uma fase de aproximadamente 88° entre si, o que deveria ser compensado no sinal do gerador para obter um controle das fases nos transdutores.

Suspeitava-se também que mesmo para sinais de entrada iguais, os transdutores não estavam gerando mesmas amplitudes de deslocamento. Para analisar tal fenômeno, montou-se um interferômetro a laser (*Polytec OFV-5000*) sobre uma base coordenada paralela à superfície da viga, permitindo deslocar o foco do laser ao longo da extensão da chapa. O sinal do interferômetro foi ligado a um segundo osciloscópio permitindo então medir as amplitudes efetivas das ondas produzidas na viga.

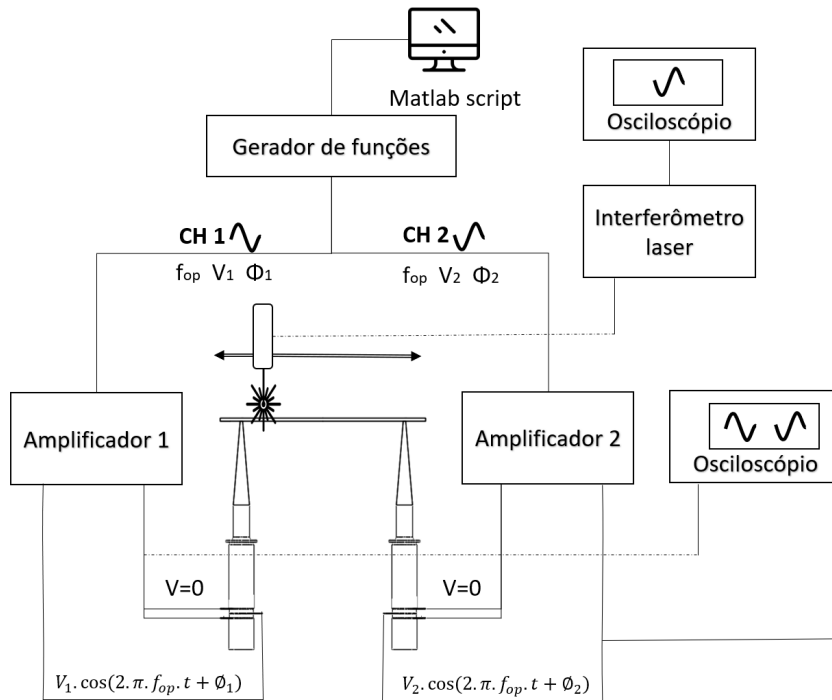


Figura 37: Esquemática final da montagem da bancada de testes.

Com esta configuração, pode-se observar que havia uma diferença considerável na amplitude de onda produzida entre os dois Langevins. Atuando apenas um transdutor por vez, observou uma diferença superior a 50% entre as amplitudes sob a chapa. Como visto no item 4.5.3 esta diferença poderia começar a comprometer a propagação da onda, logo optou-se por reduzir a amplitude do transdutor mais potente até que ambos os Langevins tivessem um comportamento mais uniforme na excitação da chapa.

5.4 Resultados finais

Com esses problemas experimentais identificados e corrigidos, foi possível efetuar novamente os testes de produção de onda. Os osciloscópios e impedômetro foram mantidos na montagem ao longo de todos os testes seguintes para permitir uma avaliação constante do sistema e corrigir eventuais divergências.

Para a onda analógica, novamente foram enviados sinais defasados de 90° aos transdutores (somada à correção de fase de 88° já estudada). Desta vez, o fenômeno da propagação foi melhor observado e posicionando uma moeda sob a superfície da chapa, esta se deslocava para um sentido com a defasagem em 90° e para outro em 270° , validando o funcionamento da onda por alteração de fase.

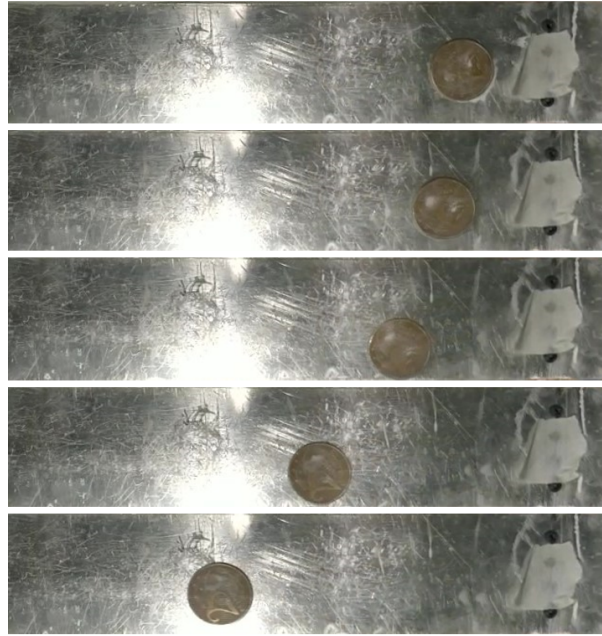


Figura 38: Deslocamento da moeda sobre a chapa pela propagação da onda analógica.

Deve-se ressaltar que foi observada a presença de uma componente estacionária da onda. Por mais que a moeda conseguisse ser arrastada pela onda propagante produzida, o pó depositado sobre a superfície não era transportado, ficando preso nos nós da onda estacionária.

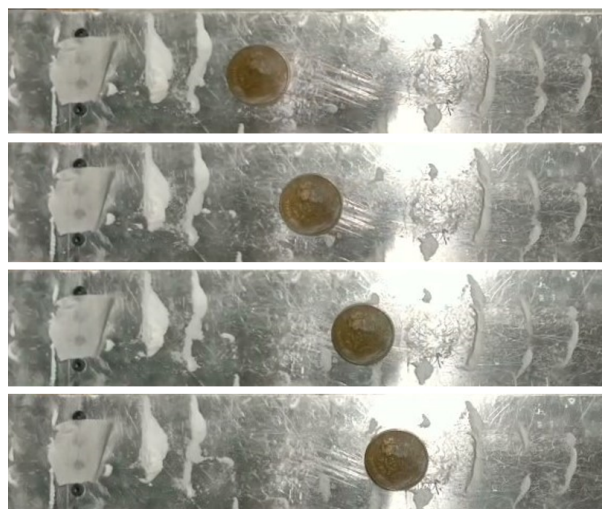


Figura 39: Presença de nós estacionários na propagação da onda indicados pelas linhas estacionárias

Com as modificações dos parâmetros de operação e das correções dos equipamentos vistas no item 5.3, o efeito de propagação pelo método digital também foi melhorado. Com esse método, conseguiu-se movimentar a onda produzida em diversas posições, permitindo o deslocamento do pó depositado sobre a chapa.

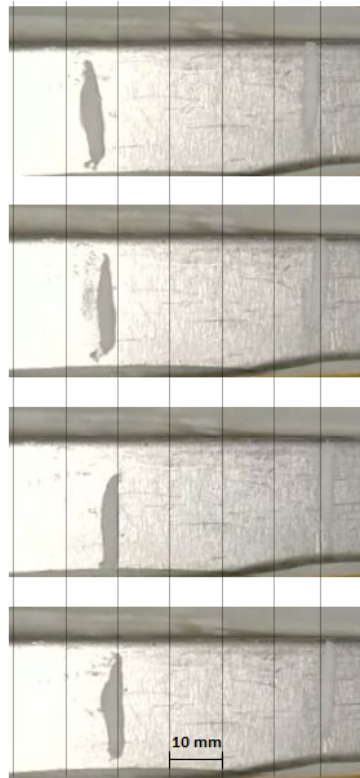


Figura 40: Deslocamento dos nós da onda ao longo da chapa para excitação com variação de amplitude

Porém, como pode-se observar na figura acima, o deslocamento obtido foi de baixa amplitude, cerca de 7 mm entre as posições limites alcançadas. Isso equivale a pouco menos de $1/4$ de comprimento de onda.

Uma avaliação do perfil de amplitudes da onda feita com o interferômetro a laser ao longo da extensão da chapa permitiu averiguar que apesar de se observar um fenômeno de propagação da onda ao longo da extensão da chapa, a amplitude máxima não era constante, com regiões próximas aos nós estacionários originais tendo amplitude bem inferior à dos vales.

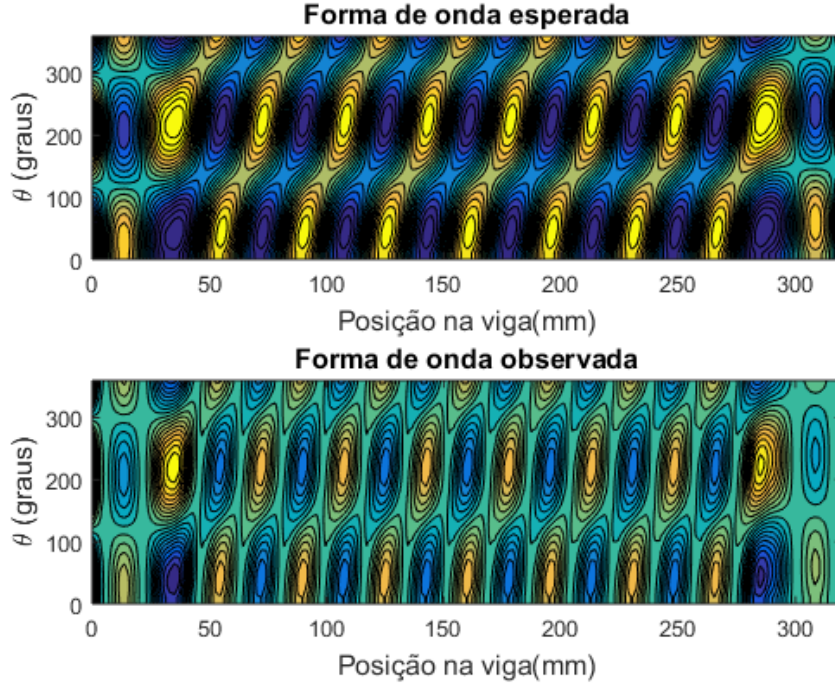


Figura 41: Comparação entre a onda propagante digital simulada e uma representação da forma de onda observada

Isto indicava novamente o fenômeno de uma componente estacionária de onda na chapa, que impedia que os nós da onda se movimentassem completamente pela viga.

5.5 Considerações finais

Após diversas reiteraões da montagem, com algumas mudanças de posição dos transdutores, o movimento da onda em ambos os modos analítico e digital foi melhorado, com menos nós oferecendo resistência ao movimento. Ainda assim, algumas melhorias e análises ainda deveriam ser feitas para permitir um movimento contínuo do modo digital, sobretudo identificar a origem da componente estacionária no modelo, o que pode ser provavelmente atribuído a um comportamento inesperado de um dos equipamentos que compõem a montagem, similarmente como os amplificadores induziam um erro de fase a ser compensado.

Integrando-se o comportamento dos equipamentos no sistema ao modelo numérico, poderia-se realizar novamente os ciclos de simulações que permitiriam encontrar parâmetros mais otimizados para que o movimento da onda propagante fosse melhorado.

Finalmente, deve-se notar que tanto as divergências dos transdutores quanto ao erro produzido pelos amplificadores não foram constantes ao longo dos experimentos. A fase induzida pelos amplificadores variou entre 10° e 90° , tendo de ser constantemente monitorada e corrigida, enquanto que a amplitude de um dos Langevins chegou a ser cinco vezes maior que a do outro ao fim de alguns testes, exigindo então uma possível remontagem dos transdutores.

6 Conclusões

Neste trabalho foram realizadas a modelização e a construção de um atuador piezoelétrico linear baseado no princípio da produção de ondas propagantes em um meio finito, a fim de estudar a viabilidade do funcionamento deste tipo de aparelho.

A modelização do sistema foi feita de maneira a permitir a realização de testes sobre diferentes parâmetros do projeto que poderiam ter um papel no funcionamento do dispositivo. Dessa maneira, procurou-se avaliar duas formas de acionamento existentes na literatura para este tipo de atuador: ondas propagantes por variação da defasagem ou por variação da amplitude entre os transdutores. Também buscou-se identificar a relação entre cada uma dessas formas de acionamento e a geometria dos componentes da estrutura, com o objetivo de dimensionar estes componentes de maneira que o atuador construído pudesse ser operado com ambos os tipos de excitação e de maneira robusta.

Num quesito comparativo, a onda analógica mostrou-se consideravelmente mais fácil de produzir, exigindo parâmetros de entrada constantes para produzir o fenômeno da propagação. Porém, esta forma de acionamento gera uma onda com velocidade fixa, enquanto que a onda digital permite um controle mais preciso de posicionamento dos nós, exigindo contudo um melhor controle sobre as amplitudes impostas aos transdutores.

Apesar dos resultados deste estudo computacional demonstrarem a possibilidade de geração das ondas propagantes de alta performance com os parâmetros escolhidos para o sistema, os ensaios experimentais acabaram indicando a existência de outros efeitos sobre a performance do atuador. O sistema desenvolvido mostrou-se capaz de funcionar quando atuado pela variação da fase entre os transdutores, contudo a variação da amplitude não forneceu os resultados esperados, tendo sua propagação afetada por uma onda estacionária residual.

Como trabalho futuro, resta o estudo de um modelo que leve em conta outros efeitos que podem ter afetado a geração das ondas propagantes pela variação de amplitude, reproduzindo os fenômenos observados e permitindo o aprimoramento da solução. Entre estes efeitos, valem notar a presença de amortecimento mecânico no sistema, a influência da montagem por parafusos entre a chapa e o transdutor e a presença de modos de vibração complexos sobre a viga, além de eventuais influências dos próprios aparelhos utilizados durante os testes sobre a dinâmica do sistema, como o amplificador de tensão e o gerador de funções.

Ainda assim, a atuação de um sistema utilizando transdutores Langevins se mostra possível, possuindo vantagens quanto à baixa contaminação do ambiente por influência do atuador e possibilitando um deslocamento com alta precisão e resolução.

Referências

- [1] HERNANDEZ, C.; BERNARD, Y.; RAZEK, A. Design and manufacturing of a piezoelectric traveling-wave pumping device. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, v. 60, 2013.
- [2] KOYAMA, D.; NAKAMURA, K. Noncontact ultrasonic transportation of small objects over long distances in air using a bending vibrator and a reflector. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, v. 57, 2010.
- [3] SELICANI, G. V. Projeto e construção de um transportador de material particulado. Technical report, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2017.
- [4] ADAMOWSKI, J. C.; NELLI SILVA, E. C.; BUIOCHI, F. Estudo da viabilidade da utilização de ondas propagantes ultrassônicas num destilador molecular de petróleo, 2017.
- [5] GILLES, P. L. T.; ANDRADE, M. A. B.; ADAMOWSKI, J. C.; NELLI SILVA, E. C. *Development of an acoustic levitation linear transportation system based on a ring-type structure*. 2015. Dissertação (Mestrado em Física) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2015.
- [6] GORMAN, D. J. *Free vibration analysis of beams and shafts*. John Wiley & Sons Inc, 1975.
- [7] LOH, B.-G.; RO, P. I. An object transport system using flexural ultrasonic progressive waves generated by two-mode excitation. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, v. 47, 2000.
- [8] FERNANDEZ, J. M.; PERRIARD, Y. Characteristics, modeling and simulation of a traveling wave ultrasonic linear motor. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2004.
- [9] UCHINO, K. Piezoelectric ultrasonic motors: overview. *Smart Materials and Structures*, v. 7, 1998.
- [10] HARIRI, H.; BERNARD, Y.; RAZEK, A. A traveling wave piezoelectric beam robot. *Smart Materials and Structures*, v. 23, 2014.
- [11] SEEMAN, W. A linear ultrasonic traveling wave motor of the ring type. *Smart Materials and Structures*, v. 5, 1996.
- [12] KURIBAYASHI, M.; UEHA, S.; MORI, E. Excitation conditions of flexural traveling waves for a reversible ultrasonic linear motor. *Journal of the Acoustical Society of America*, v. 77, 1985.
- [13] TOMIKAWA, Y.; ADACHI, K.; HIRATA, H.; SUZUKI, T.; TAKANO, T. Excitation of a progressive wave in a flexurally vibrating transmission medium. *Japanese Journal of Applied Physics*, v. 29, 1990.
- [14] KIM, G. H.; PARK, J. W.; JEONG, S. H. Analysis of dynamic characteristics for vibration of flexural beam in ultrasonic transport system. *Journal of Mechanical Science and Technology*, v. 23, 2009.

7 Anexos

7.1 Geometria dos Sonotrodos

Um estudo preliminar foi feito para tentar otimizar a geometria dos transdutores. Em especial, pensava-se em otimizar o sonotrodo, estudando uma geometria cônica que reduziria a superfície de contato entre o transdutor e a viga reduzindo as divergências nas frequências de ressonância do protótipo montado.

A frequência de ressonância desejada originalmente era diferente também, buscava-se um valor mais alto (27800 Hz) do que aquele utilizado no protótipo final (de cerca de 20 kHz) para sair da banda audível, reduzindo qualquer incômodo na operação do protótipo.

Inicialmente, realizou-se um estudo analítico para o comprimento do transdutor. Como visto no item 3.4, o tamanho desejado para os sonotrodos deve ser igual à:

$$L = n \frac{\lambda}{2} = \frac{n}{2f} \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (23)$$

Considerando o alumínio como principal material do amplificador e sonotrodos, pode-se calcular para uma frequência de operação desejada de 27800 Hz um comprimento do conjunto múltiplo de 91,6mm.

Sendo o comprimento do amplificador disponível no laboratório de 163mm e visando obter um comprimento considerável do sonotrodo para variar a seção, desejou-se um comprimento total de $3 \times 91,6 = 274,8\text{mm}$, com comprimento efetivo do sonotrodo de 111,8mm.

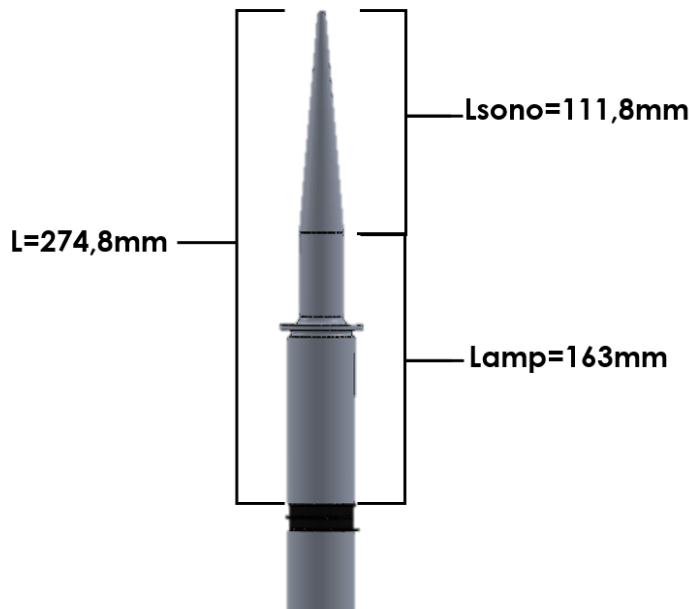


Figura 42: Dimensões iniciais propostas do Langevin.

Para a validação de tais dimensões, foi feito um estudo sobre a influência dos outros componentes (cerâmicas piezoelétricas e suporte inferior do transdutor) na frequência de

ressonância, bem como uma análise do quanto a geometria do sonotrodo influencia as frequências naturais.

Um cálculo simples sobre um transdutor Langevin em alumínio com perfil cilíndrico e com comprimento de amplificador+sonotrodo de 300mm revela modos de vibrar com intervalos de :

$$f = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{E}{\rho}} = 8486Hz \quad (24)$$

Este resultado foi comparado através de um estudo modal das frequências do sonotrodo montado no transdutor, variando-se a geometria do conjunto para observar a variação das frequências.

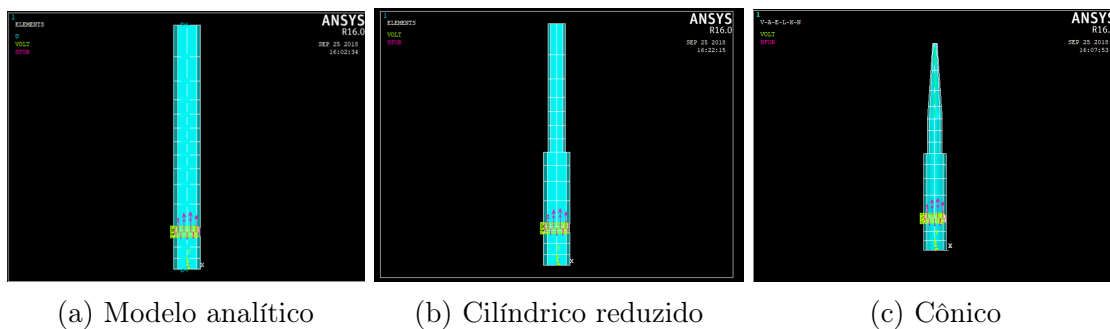


Figura 43: Diferentes geometrias dos modelos em simulação numérica de sonotrodo analisados no transdutor (cerâmicas piezoelétricas em verde).

Tabela 8: Estudo modal do Langevin livre

Modo de vibração	Frequência (hz)			
	Analítico	Cilíndrico	Cilíndrico reduzido	Cônico
1	8486	8532	7716	10154
2	16972	17282	18406	19600
3	25484	26429	25786	26425
4	33944	36155	35719	36585
5	42430	46291	47638	47956

mbora os resultados com geometria cilíndrica sejam próximos, observa-se variação das frequências naturais devido à variação da geometria do transdutor. Desta maneira, o cálculo analítico do comprimento do Langevin serve como base para dimensionar o sonotrodo, porém deve ser iterado em simulações para levar em consideração outros fatores geométricos difíceis de serem estudados analiticamente.

Apesar dos resultados coerentes que eventualmente permitiram obter um modelo com a frequência desejada e a baixa superfície de contato na extremidade do transdutor, optou-se por abandonar este modelo e utilizar o modelo de sonotrodo já existente no laboratório para eliminar a necessidade de se fabricar uma nova peça e pelo fato de que se averiguou que pequenas superfícies de contato implicam em uma perda de amplitude de onda considerável (Item 4.5.1).

7.2 Códigos ANSYS APDL

Os códigos a seguir podem ser executados no módulo APDL do ANSYS em **File > Read input from...** e selecionando um arquivo .txt com o código. Os parâmetros presentes nos códigos (dimensões, frequências de operação etc.) correspondem aos utilizados no estudo do protótipo (Item 4.4) mas podem ser alterados para obter as análises de sensibilidade realizadas (Item 4.5).

7.2.1 Pré Processamento

Código utilizado para definição dos materiais, seções e dimensões.

```
/BATCH
!* -----
!* INITIAL SETUP
!* Definition of what Ansys modules will be used
!* -----

/NOPR
KEYW,PR_SET,1
KEYW,PR_STRUC,1
KEYW,PR_THERM,0
KEYW,PR_FLUID,0
KEYW,PR_ELMAG,1
KEYW,MAGNOD,0
KEYW,MAGEDG,0
KEYW,MAGHFE,0
KEYW,MAGELC,1
KEYW,PR_MULTI,1
/GO
/PREP7

!* -----
!* ELEMENT TYPES
!* -----

!* ELEMENT 1: Solid for piezo-ceramics in 3D
ET,1,SOLID226
KEYOPT,1,1,1001
KEYOPT,1,2,0
KEYOPT,1,4,0
KEYOPT,1,6,0
KEYOPT,1,9,0
KEYOPT,1,10,0

!* ELEMENT 2: Beam for aluminum Langevin and beam
ET,2,BEAM188
```

```

!* ELEMENT 3: Lumped Mass for bolts
ET,14,MASS21
KEYOPT,14,2,0
KEYOPT,14,3,0

!* -----
!* MATERIAL DEFINITION
!* -----
!* Material 1: PZT-04
!Piezoelectric properties taken from table
TB,ANEL,1,1,21,0
TBTEMP,0
TBDATA,,12.3e-12,-5.31e-12,-4.05e-12,0,0,0
TBDATA,,15.5e-12,-5.31e-12,0,0,0,12.3e-12
TBDATA,,0,0,0,39e-12,0,0
TBDATA,,32.7e-12,0,39e-12,,,
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,DENS,1,,7500
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,PERX,1,,1475
MPDATA,PERY,1,,1300
MPDATA,PERZ,1,,1475
TB,PIEZ,1,,1
TBMODIF,1,1,0
TBMODIF,1,2,-123e-12
TBMODIF,1,3,0
TBMODIF,2,1,0
TBMODIF,2,2,289e-12
TBMODIF,2,3,0
TBMODIF,3,1,0
TBMODIF,3,2,-123e-12
TBMODIF,3,3,0
TBMODIF,4,1,496e-12
TBMODIF,4,2,0
TBMODIF,4,3,0
TBMODIF,5,1,0
TBMODIF,5,2,0
TBMODIF,5,3,496e-12
TBMODIF,6,1,0
TBMODIF,6,2,0
TBMODIF,6,3,0
TBDE,PIEZ,1
TB,PIEZ,1,,1
TBMODIF,1,1,0
TBMODIF,1,2,-1.23E-010
TBMODIF,1,3,0

```

```

TBMODIF,2,1,0
TBMODIF,2,2,2.89E-010
TBMODIF,2,3,0
TBMODIF,3,1,0
TBMODIF,3,2,-1.23E-010
TBMODIF,3,3,0
TBMODIF,4,1,4.96E-010
TBMODIF,4,2,0
TBMODIF,4,3,0
TBMODIF,5,1,0
TBMODIF,5,2,0
TBMODIF,5,3,4.96E-010
TBMODIF,6,1,0
TBMODIF,6,2,0
TBMODIF,6,3,0
TBDE,ANEL,1,,
TB,ANEL,1,1,21,1
TBTEMP,0
TBDATA,,1.23E-011,-5.31E-012,-4.05E-012,0,0,0
TBDATA,,1.55E-011,-5.31E-012,0,0,0,1.23E-011
TBDATA,,0,0,0,3.9E-011,0,0
TBDATA,,3.27E-011,0,3.9E-011,,,

```

!* Material 2: Aluminium

!rho=2700

!E=70E9

!Poisson=0.33

MPTEMP,,,,,,,,

MPTEMP,1,0

MPDATA,EX,2,,70e9

MPDATA,PRXY,2,,0.33

MPTEMP,,,,,,,,

MPTEMP,1,0

MPDATA,DENS,2,,2700

MPTEMP,,,,,,,,

MPTEMP,1,0

MPDATA,MU,1,,0

MPTEMP,,,,,,,,

MPTEMP,1,0

MPDATA,MU,2,,0

!* Material 3: Steel

!rho=7800

!E=210E9

!Poisson=0.29

MPTEMP,,,,,,,,

MPTEMP,1,0

MPDATA,EX,3,,210e9

```

MPDATA,PRXY,3,,0.29
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,DENS,3,,7850
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,MU,3,,0

!* -----
!* GEOMETRY PARAMETERS
!* -----
*SET,Lbt,0.049 !* Bot length
*SET,Lpiezo,0.00635 !* Piezoelectric Ceramic PZT-4 Thickness
*SET,Lamp1,0.1082 !* Amplificator Length (bottom)
*SET,Lamp2,0.055 !* Amplificator Length (top)
*SET,Lsonot,0.1315 !* Sonotrode length
*SET,Ltotal,0.33 !* Total beam length
*SET,Laba,0.034 !* Beam edge length
*SET,Lviga,Ltotal-2*Laba
!* Effective beam length (length of the beam between Langevins)
*SET,Aoffset,0.019 !*Piezoelectric diameter
*SET,ELang,0.002 !*Element size for Langevin
*SET,Evig,0.002 !*Element size for Beam
*SET,Mpar,0.02 !* Mass for bolts

!* -----
!* KEYPOINT CREATION
!* -----
!* Left Langevin (From bottom to top)
K,1,0,0,0
K,2,0,Lbt,0
K,3,0,Lbt+Lpiezo,0
K,4,0,Lbt+2*Lpiezo,0
K,5,0,Lbt+2*Lpiezo+Lamp1,0
K,6,0,Lbt+2*Lpiezo+Lamp1+Lamp2,0
K,7,0,Lbt+2*Lpiezo+Lamp1+Lamp2+Lsonot,0

!* Right Langevin (From bottom to top)
K,8,Lviga,,0
K,9,Lviga,Lbt,0
K,10,Lviga,Lbt+Lpiezo,0
K,11,Lviga,Lbt+2*Lpiezo,0
K,12,Lviga,Lbt+2*Lpiezo+Lamp1,0
K,13,Lviga,Lbt+2*Lpiezo+Lamp1+Lamp2,0
K,14,Lviga,Lbt+2*Lpiezo+Lamp1+Lamp2+Lsonot,0

!* Left Piezo (From bottom to top)
K,15,Aoffset,Lbt,0

```

```

K,16,Aoffset,Lbt+Lpiezo,0
K,17,Aoffset,Lbt+2*Lpiezo,0

!* Right Piezo (From bottom to top)
K,18,Lviga+Aoffset,Lbt,0
K,19,Lviga+Aoffset,Lbt+Lpiezo,0
K,20,Lviga+Aoffset,Lbt+2*Lpiezo,0

!* Beam edges (Left then right)
K,21,-Laba,Lbt+2*Lpiezo+Lamp1+Lamp2+Lsonot,0
K,22,Lviga+Laba,Lbt+2*Lpiezo+Lamp1+Lamp2+Lsonot,0

!* -----
!* LINE DEFINITION
!* Create straigth lines from keypoints
!* -----
LSTR,      1,      2  !* Line 1: Left Bot
LSTR,      2,      3  !* Line 2: Lower left piezo
LSTR,      3,      4  !* Line 3: Upper left piezo
LSTR,      4,      5  !* Line 4: Left amplifier (bottom)
LSTR,      5,      6  !* Line 5: Left amplifier (top)
LSTR,      6,      7  !* Line 6: Left sonotrode
LSTR,      8,      9  !* Line 7: Right Bot
LSTR,      9,     10  !* Line 8: Lower right piezo
LSTR,     10,     11  !* Line 9: Upper right piezo
LSTR,     11,     12  !* Line 10: Right amplifier (bottom)
LSTR,     12,     13  !* Line 11: Right amplifier (top)
LSTR,     13,     14  !* Line 12: Right sonotrode
LSTR,      7,     14  !* Line 13: Beam
LSTR,      7,     21  !* Line 14: Left beam edge
LSTR,     14,     22  !* Line 15: Right beam edge

!* -----
!* PIEZO SECTION
!* Draws areas which represent piezoelectric sections
!* -----
!* Left piezo
A,2,15,16,3 !* Lower
A,3,16,17,4 !* Top

!* Right piezo
A,9,18,19,10 !* Lower
A,10,19,20,11 !* Top

!* -----
!* VOLUME CREATION
!* Rotates piezo sections to create volumes

```

```

!* -----
!* Left piezo
VROTAT,1,,,,,2,3,360, !* creates volumes 1 to 4
VROTAT,2,,,,,2,3,360, !* creates volumes 5 to 8

!* Right piezo
VROTAT,3,,,,,8,9,360, !* creates volumes 9 to 12
VROTAT,4,,,,,8,9,360, !* creates volumes 13 to 16

VADD,1,2,3,      !* creates volume 17
VADD,17,4        !* creates volume 1
VADD,5,6,7,8     !* creates volume 2
VADD,9,10,11,12  !* creates volume 3
VADD,13,14,15,16 !* creates volume 4

!* -----
!* AREA DEFINITION
!* Defines the areas from the piezo volumes perimeter
!* -----
!* Left piezo
AADD,7,11,15,19 !sup !* creates area 1
AADD,5,9,13,17 !inf !* creates area 2
AADD,22,26,30,34 !sup !* creates area 3
AADD,20,24,28,32 !inf !* creates area 4

!* Right piezo
AADD,37,41,45,49 !sup !* creates area 5
AADD,35,39,43,47 !inf !* creates area 7
AADD,52,56,60,64 !sup !* creates area 8
AADD,50,54,58,62 !inf !* creates area 9

GPLOT

!* -----
!* SECTION CREATION
!* Creates sections for the beam elements
!* -----
SECTYPE, 1, BEAM, CSOLID, , 0 !*Bot
SECOFFSET, CENT
SECDATA,0.02,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0
SECTYPE, 2, BEAM, CSOLID, , 0 !* Piezo
SECOFFSET, CENT
SECDATA,0.019,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0
SECTYPE, 3, BEAM, CSOLID, , 0 !* Amp
SECOFFSET, CENT
SECDATA,0.013,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0
SECTYPE, 4, BEAM, RECT, , 0 !* Sono (old)
SECOFFSET, CENT

```

```

SECDATA,0.026,0.05,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0
SECTYPE, 5, BEAM, RECT, , 0 !* Beam (rectangular)
SECOFFSET, CENT
SECDATA,0.003,0.05,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0
SECTYPE, 6, BEAM, RECT, , 0 !* Sono inferior section (rectangular)
SECOFFSET, CENT
SECDATA,0.026,.050,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0
SECTYPE, 7, BEAM, RECT, , 0 !* Sono upper section (rectangular)
SECOFFSET, CENT
SECDATA,0.004,0.050,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0
SECTYPE,8,TAPER, ,
!* Left Sonotrode (Tapered section between sono inferior and upper sections)
SECDATA, 6,,Lbt+2*Lpiezo+Lamp1+Lamp2,,
SECDATA, 7,,Lbt+2*Lpiezo+Lamp1+Lamp2+Lsonot,,
SECTYPE,9,TAPER, ,
!* Right Sonotrode (Tapered section between sono inferior and upper sections)
SECDATA, 6,Lviga,Lbt+2*Lpiezo+Lamp1+Lamp2,,
SECDATA, 7,Lviga,Lbt+2*Lpiezo+Lamp1+Lamp2+Lsonot,,

!* -----
!* SECTION ASSIGNMENT TO LINES
!* -----
LSEL,S,LINE, ,1,4,3 !*Left bot + amp
LESIZE,1,ELang, , , , , ,1
LESIZE,4,ELang, , , , , ,1
LATT,2,,2,,,1
LMESH, ALL
LSEL,S,LINE, ,7,10,3 !*Right bot + amp
LESIZE,7,ELang, , , , , ,1
LESIZE,10,ELang, , , , , ,1
LATT,2,,2,,,1
LMESH, ALL
LSEL,S,LINE, ,5 !* Left amp
LESIZE,5,ELang, , , , , ,1
LATT,2,,2,,,3
LMESH, ALL
LSEL,S,LINE, ,11 !* Right amp
LESIZE,11,ELang, , , , , ,1
LATT,2,,2,,,3
LMESH, ALL
LSEL,S,LINE, ,6 !* Left sono
LESIZE,6,ELang, , , , , ,1
LATT,2,,2,,,8
LMESH, ALL
LSEL,S,LINE, ,12 !* Right sono
LESIZE,12,ELang, , , , , ,1
LATT,2,,2,,,9
LMESH, ALL

```



```

LSEL,S,LINE, ,13 !* Beam
LESIZE,13,EVig, , , , , ,1
LATT,2,,2,,,5
LMESH,      ALL
LSEL,S,LINE, ,14,15 !* Edges
LESIZE,14,EVig, , , , , ,1
LESIZE,15,EVig, , , , , ,1
LATT,2,,2,,,5
LMESH,      ALL

!* -----
!* SECTION ASSIGNMENT TO VOLUMES
!* -----
MSHAPE,0,3D
MSHKEY,2
FLST,5,4,6,ORDE,2
FITEM,5,1
FITEM,5,-4
CM,_Y,VOLU
VSEL, , , ,P51X
CM,_Y1,VOLU
CHKMSH,'VOLU'
CMSEL,S,_Y
VATT,1,,1,,,
VMESH,_Y1
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
CMDELE,_Y2

!* -----
!* BOLT MASSES
!* Adds masses of the M8 bolts (significant value) to the
!* regions they would be located
!* -----
*SET,NODENUM,0
R,14,0,Mpar/2,0
TYPE,14
REAL,14
KSEL,ALL

!* Left Bot
KSEL,S,,,2
NSLK,S
*GET,NODENUM,NODE,,NUM,MAX
E,NODENUM

!* Left Amp
KSEL,S,,,4

```

```

KSEL,A,,,11
NSLK,S
*GET,NODENUM,NODE,,NUM,MAX
E,NODENUM

!* Right Bot
KSEL,S,,,9
NSLK,S
*GET,NODENUM,NODE,,NUM,MAX

!* Right Amp
E,NODENUM
KSEL,S,,,11
NSLK,S
*GET,NODENUM,NODE,,NUM,MAX
E,NODENUM

R,14,0,Mpar,0
TYPE,14
REAL,14
KSEL,ALL

!* Left Sono
KSEL,S,,,6
NSLK,S
*GET,NODENUM,NODE,,NUM,MAX
E,NODENUM

!* Right Sono
KSEL,S,,,13
NSLK,S
*GET,NODENUM,NODE,,NUM,MAX
E,NODENUM

!* -----
!* COUPLE
!* Couples the ceramic surfaces from the volumes to the beams
!*which are in contact with them
!* -----
!*Upper Left Piezo
KSEL,S,,, 4
NSLK,S
ASEL,S,,,3
NSLA,A,1
CP,NEXT,UY,ALL

!*Lower Left Piezo
KSEL,S,,,2

```

```

NSLK,S
ASEL,S,,,2
NSLA,A,1
CP,NEXT,UY,ALL

!*Upper Right Piezo
KSEL,S,,,11
NSLK,S
ASEL,S,,,8
NSLA,A,1
CP,NEXT,UY,ALL

!*Lower Right Piezo
KSEL,S,,,9
NSLK,S
ASEL,S,,,7
NSLA,A,1
CP,NEXT,UY,ALL

!* Reselects all areas
ALLSEL,ALL,ALL
EPlot

!* -----
!* CONTACT CREATION
!* Between surfaces of the ceramics
!* -----
/COM, CONTACT PAIR CREATION - START
CM,_NODECM,NODE
CM,_ELEMCM,ELEM
CM,_KPCM,KP
CM,_LINECM,LINE
CM,_AREACM,AREA
CM,_VOLUCM,VOLU
/GSAV,cwz,gsav,,temp
MP,MU,1,0
MAT,1
R,3
REAL,3
ET,3,170
ET,4,174
KEYOPT,4,9,1
KEYOPT,4,10,2
R,3,
RMORE,
RMORE,,0
RMORE,0
KEYOPT,4,1,5

```

```

! Generate the target surface
ASEL,S,,1
CM,_TARGET,AREA
TYPE,3
NSLA,S,1
ESLN,S,0
ESLL,U
ESEL,U,ENAME,,188,189
NSLE,A,CT2
ESURF
CMSEL,S,_ELEMCM
! Generate the contact surface
ASEL,S,,,4
CM,_CONTACT,AREA
TYPE,4
NSLA,S,1
ESLN,S,0
NSLE,A,CT2 ! CZMESH patch (fsk qt-40109 8/2008)
ESURF
ALLSEL
ESEL,ALL
ESEL,S,TYPE,,3
ESEL,A,TYPE,,4
ESEL,R,REAL,,3
/PSYMB,ESYS,1
/PNUM,TYPE,1
/NUM,1
EPLLOT
ESEL,ALL
ESEL,S,TYPE,,3
ESEL,A,TYPE,,4
ESEL,R,REAL,,3
CMSEL,A,_NODECM
CMDEL,_NODECM
CMSEL,A,_ELEMCM
CMDEL,_ELEMCM
CMSEL,S,_KPCM
CMDEL,_KPCM
CMSEL,S,_LINECM
CMDEL,_LINECM
CMSEL,S,_AREACM
CMDEL,_AREACM
CMSEL,S,_VOLUCM
CMDEL,_VOLUCM
/GRES,cwz,gsav
CMDEL,_TARGET
CMDEL,_CONTACT
/COM, CONTACT PAIR CREATION - END

```

```

!*
!*
/COM, CONTACT PAIR CREATION - START
CM,_NODECM,NODE
CM,_ELEMCM,ELEM
CM,_KPCM,KP
CM,_LINECM,LINE
CM,_AREACM,AREA
CM,_VOLUCM,VOLU
/GSAV,cwz,gsav,,temp
MP,MU,1,0
MAT,1
R,4
REAL,4
ET,5,170
ET,6,174
KEYOPT,6,9,1
KEYOPT,6,10,2
R,4,
RMORE,
RMORE,,0
RMORE,0
KEYOPT,6,1,5
! Generate the target surface
ASEL,S,,,5
CM,_TARGET,AREA
TYPE,5
NSLA,S,1
ESLN,S,0
ESLL,U
ESEL,U,ENAME,,188,189
NSLE,A,CT2
ESURF
CMSEL,S,_ELEMCM
! Generate the contact surface
ASEL,S,,,9
CM,_CONTACT,AREA
TYPE,6
NSLA,S,1
ESLN,S,0
NSLE,A,CT2 ! CZMESH patch (fsk qt-40109 8/2008)
ESURF
ALLSEL
ESEL,ALL
ESEL,S,TYPE,,5
ESEL,A,TYPE,,6
ESEL,R,REAL,,4
/PSYMB,ESYS,1

```

```

/PNUM,TYPE,1
/NUM,1
EPlot
ESEL,ALL
ESEL,S,TYPE,,5
ESEL,A,TYPE,,6
ESEL,R,REAL,,4
CMSEL,A,_NODECM
CMDEL,_NODECM
CMSEL,A,_ELEMCM
CMDEL,_ELEMCM
CMSEL,S,_KPCM
CMDEL,_KPCM
CMSEL,S,_LINECM
CMDEL,_LINECM
CMSEL,S,_AREACM
CMDEL,_AREACM
CMSEL,S,_VOLUCM
CMDEL,_VOLUCM
/GRES,cwz,gsav
CMDEL,_TARGET
CMDEL,_CONTACT
/COM, CONTACT PAIR CREATION - END
/MREP,EPlot

!* -----
!* DAMPENING
!* Simple Model which assigns a global percentual dampening to the system
!* -----
ALPHAD,0,
BETAD,0,
DMPRAT,0.00,

!* -----
!* GRAVITATIONAL PULL
!* Has no effect
!* -----
!ACEL,0,-9.80,0,

```

7.2.2 Análise Modal

Código para obter as frequências de ressonância do sistema.

```

!* -----
!* MODAL SOLUTION
!* -----
/SOLU
!* Start

```

```

ANTYPE,2
MODEOPT,LANB,100
EQLV,SPAR
MXPAND,0, , ,0
LUMPM,0
PSTRES,0

!* Definition of modal parameters
!* Number of modes to extract
*SET,Nmodes,100
!* Start frequency
*SET,StartF,15000
!* Stop frequency
*SET,StopF,50000
MODEOPT,LANB,Nmodes,StartF,StopF, ,OFF

!*Launch Solution
/STATUS,SOLU
SOLVE
FINISH

```

7.2.3 Análise Harmônica: Onda Analógica

Código que realiza uma análise harmônica com transdutores defasados no tempo de um ângulo ϕ .

```

!* -----
!* HARMONIC SOLUTION
!* -----
!* Solution settings
*SET,FOP, 20600 !* Operating frequency
/SOL
ANTYPE,3
HROPT,FULL
HROUT,ON
LUMPM,0
EQLV, ,0,
PSTRES,0
HARFRQ,FOP,FOP,
NSUBST,1,
KBC,1

!* Electric loads
*SET,fase,0 !* Setup fase
*SET,VA,300 !* Eletric Voltage in terminals
*SET,V0,0 !* GND
FINISH

```

```

fase=3.14159265359/2 !* Update Phase
VLangevin1=VA
VLangevin2=VA
GND=V0

!* Carregamento Elétrico
/SOL

!* Sets Ground value for middle ceramic areas
FLST,2,4,5,ORDE,4
FITEM,2,1
FITEM,2,4
FITEM,2,5
FITEM,2,9
!/GO
DA,P51X,VOLT,GND

!* VOLTAGE LANGEVIN 1
FLST,2,2,5,ORDE,2
FITEM,2,2
FITEM,2,3
/GO
!* Set Voltages on Langevin 1 (No phase)
DA,2,VOLT,VLangevin1
DA,3,VOLT,-VLangevin1

!* VOLTAGE LANGEVIN 2
FLST,2,2,5,ORDE,2
FITEM,2,7
FITEM,2,8
/GO
!* Set Voltage on Langevin 2
!* (phase changes proportion between real and imaginary parts)
DA,7,VOLT,VLangevin2*cos(fase),VLangevin2*sin(fase)
DA,8,VOLT,-VLangevin2*cos(fase),-VLangevin2*sin(fase)

FINISH !* End of Solution

```

7.2.4 Exportar resposta temporal

Código que exporta o comportamento da viga ao longo do tempo em uma série de arquivos contendo a amplitude em Y ao longo da viga para um período de onda após um análise do time **time-harmonic** feita com os resultados da análise harmônica.

```

!* -----
!* TIME HARMONIC EXPORT
!* -----

```



```

str1='C:\....\' !* Set destination directory
str3='.txt' !* Set file type to export
*Dim, NodeNoArray,array, 5000 !Array used to save nodes No.
steps=36 !* Define number of steps to save

Lsel,s,,13,15,1 !*Selects line 13 to line 15 (beam +edges) with steps of 1
Nsl1,s,1 !* Selects nodes in line
*Get,LinNodes,node,0,count !* Get the number of nodes in the selected set
SelNode=0 !* Counter to save the selected node number
*Do,i,1,LinNodes !*Loop to save Nodes numbers
NodeNo=NDNEXT(SelNode)
!* NDNEXT(N) Next selected node having a node number greater than N.
NodeNoArray(i)= NodeNo
SelNode=NodeNo
*Enddo

!* Define loop variables
*dim,nodalresult,,LinNodes,steps+1
*dim,nodalX,,LinNodes

!* -----
!* LOOP START
!* This loop saves the Y deformation of nodes through time
!* -----
flag=1
i=1
*DOWHILE,flag
*GET,nodalX(i,1),NODE,NodeNoArray(i),LOC,X
*IF,i,EQ,LinNodes-1,EXIT
i=i+1
*ENDDO

step=0

!* LOOP THROUGH RESULTS
*SET,FLAG,1
*DOWHILE,flag
*IF,step,EQ,steps,EXIT

/POST1
HRCPLX,1,1,step*10
PLNSOL, U,Y

flag2=1
i=1
*DOWHILE,flag2
*GET,nodalresult(i,step+1),NODE,NodeNoArray(i),U,Y

```

```

*IF,i,EQ,LinNodes-1,EXIT
i=i+1
*ENDDO

str2=CHRVAL(step/steps*360)
Diretorio=STRCAT(Str1,STRCAT(Str2,Str3))
!*File name=Path+Step Number+File type
*c fopen,Diretorio
*VLEN, i, 1 !*Write results to file
*VWRITE,NodeNoArray(1),nodalX(1),nodalresult(1,step+1)
(F8.0,g16.8,g16.8)
*cfclose
step=step+1

*ENDDO

```

7.2.5 Análise Harmônica: Onda Digital

Código utilizado para o loop de simulações harmônicas com amplitudes dos transdutores variando de acordo com um ângulo θ .

```

!* -----
!* HARMONIC SOLUTION - DIGITAL
!* -----
!* Solution settings
*SET,FOP, 20600 !* Operating frequency
/SOL
ANTYPE,3
HROPT,FULL
HROUT,ON
LUMPM,0
EQSLV, ,0,
PSTRES,0
HARFRQ,FOP,FOP,
NSUBST,1,
KBC,1

!* -----
!* LOOP OF HARMONIC SOLUTIONS
!* The loop runs a harmonic simulation for each value of theta and the
!*equivalent amplitude for the Langevins
!* -----

!* Loop settings
!*
*SET,STEPS,36 !* Number of harmonic steps
*SET,STEP,1 !* Simulation step starts at one

```

```

*SET,FLAG,1 !* Stop flag

!* Electric loads
*SET,fase,0 !* Setup fase
*SET,VA,300 !* Eletric Voltage in terminals
*SET,V0,0 !* GND
FINISH

!step=0
FINISH
*DOWHILE,FLAG
*IF,STEP,EQ,STEPS+1,EXIT

fase=2*3.14159265359*STEP/STEPS !* Update phase
Vlangevin1=VA*SIN(fase) !* Sets Voltages amplitude to each langevin
Vlangevin2=VA*COS(fase)
GND=V0

!* Sets Ground value for middle ceramic areas
FLST,2,4,5,ORDE,4
FITEM,2,1
FITEM,2,4
FITEM,2,5
FITEM,2,9
!/GO
DA,P51X,VOLT,GND

!* VOLTAGE LANGEVIN 1
FLST,2,2,5,ORDE,2
FITEM,2,2
FITEM,2,3
/GO
!* Set Voltages on Langevin 1 (In phase with Langevin 2)
DA,2,VOLT,Vlangevin1
DA,3,VOLT,-Vlangevin1
!*
!* VOLTAGE LANGEVIN 2
FLST,2,2,5,ORDE,2
FITEM,2,7
FITEM,2,8
/GO
!* Set Voltages on Langevin 2 (In phase with Langevin 1)
DA,7,VOLT,Vlangevin2
DA,8,VOLT,-Vlangevin2

SOLVE !* Resolve de novo

```

```
STEP=STEP+1
```

```
*ENDDO
```

```
!* END LOOP
```

```
FINISH !* End of Solution
```

7.2.6 Exportar Onda Digital

Código que exporta o resultado do loop de simulações em uma série de arquivos contendo a amplitude em Y ao longo da viga para cada valor de θ entre 10 e 360. Este código deve ser executado após o script de análise harmônica da onda digital.

```
!* -----
```

```
!* DIGITAL EXPORT
```

```
!* -----
```

```
str1='C:\....\' !* Set destination directory
```

```
str3='.txt' !* Set file type to export
```

```
*Dim, NodeNoArray,array, 5000 !Array used to save nodes No.
```

```
steps=36 !* Define number of steps to save
```

```
Lsel,s,,,13,15,1 !*Selects line 13 to line 15 (beam +edges) with steps of 1
```

```
Nsll,s,1 !* Selects nodes in line
```

```
*Get,LinNodes,node,0,count !* Get the number of nodes in the selected set
```

```
SelNode=0 !* Counter to save the selected node number
```

```
*Do,i,1,LinNodes !*Loop to save Nodes numbers
```

```
NodeNo=NDNEXT(SelNode)
```

```
!* NDNEXT(N) Next selected node having a node number greater  
! than N.
```

```
NodeNoArray(i)= NodeNo
```

```
SelNode=NodeNo
```

```
*Enddo
```

```
!* Define loop variables
```

```
*dim,nodalresult,,LinNodes,steps+1
```

```
*dim,nodalX,,LinNodes
```

```
!* -----
```

```
!* LOOP START
```

```
!* This loop saves the Y deformation of nodes for each phase
```

```
!* -----
```

```
flag=1
```

```
i=1
```

```
*DOWHILE,flag
```

```
*GET,nodalX(i,1),NODE,NodeNoArray(i),LOC,X
```

```
*IF,i,EQ,LinNodes-1,EXIT
```

```
i=i+1
```

```
*ENDDO
```

```

step=0

!* LOOP THROUGH RESULTS
*SET,FLAG,1
*DOWHILE,flag
*IF,step,EQ,steps+1,EXIT

!*Gets result for each step (Each result for a harmonic response to a phase)
/POST1
SET,step
PLNSOL, U,Y, 0,1.0

flag2=1
i=1
*DOWHILE,flag2
*GET,nodalresult(i,step+1),NODE,NodeNoArray(i),U,Y
*IF,i,EQ,LinNodes-1,EXIT
i=i+1
*ENDDO

str2=CHRVAL(step/steps*360)
Diretorio=STRCAT(Str1,STRCAT(Str2,Str3))
!*File name=Path+Step Number+File type
*c fopen,Diretorio
*VLEN, i, 1 !*Write results to file
*VWRITE,NodeNoArray(1),nodalX(1),nodalresult(1,step+1)
(F8.0,g16.8,g16.8)
*cfc close
step=step+1

*ENDDO

```

7.2.7 Estudo da aba

Código que realiza um loop da análise da onda digital para diversos tamanhos de aba variando de 1 à 50mm. Para cada valor de aba, o programa cria uma pasta e exporta uma série de arquivos contendo a amplitude em Y ao longo da viga para cada valor de θ entre 10 e 360.

```

/BATCH
!* -----
!* FILES ORGANISATION
!* In order to run this code, the folder path to this file
!* must be set. The path and name for the Digital harmonic
!* file for Ansys must also be set to be ran by this code
!* -----

```

```

!*
*SET,FolderPath,'C:\....\'
*SET,DigitalHarmonic,'C:\....\....txt'

!* -----
!* EDGE LOOP SETUP
!* This code runs like the usual parameter setup up until geometry definition
!* -----
!*

!* Geometry
*SET,Lbt,0.049 !* Bot
*SET,Lpiezo,0.00635 !* Piezoelectric Ceramic PZT-4
*SET,Lamp1,0.1082 !* AMP (bottom)
*SET,Lamp2,0.055 !* AMP(top)
*SET,Lsonot,0.1315 !* Sonotrodo
*SET,Ltotal,0.33 !* Total beam size
*SET,Laba,0.001 !* Beam Edge
*SET,Lviga,Ltotal-2*Laba !* Beam
*SET,Aoffset,0.019 !*Piezo area
*SET,ELang,0.002 !*Element size for Langevin
*SET,Evig,0.002 !*Element size for Beam
*SET,Mpar,0.02 !* Mass for bolt

!* -----
!* LOOP START
!* From here on, the code runs a loop which redraws the keypoints and lines
!* defines coupling, contacts as usual, then runs another loop inside
!* of harmonic simulations as in the digital wave code
!* -----

!* Loop setup
*SET,SOLN,1
*DOWHILE,SOLN
*IF,Laba,EQ,0.054,EXIT !*Stops when edge size equals 54mm

/PREP7

*IF,Laba,NE,0.01,THEN
PARSAV,SCALAR,'saveparam','txt'
/CLEAR,START
PARRES,NEW,'saveparam','txt'
SOLN=1
*ENDIF

!* Clear all geometry in the environment
VSEL,ALL
VCLEAR,ALL

```

```

ASEL,ALL
ACLEAR,ALL
LSEL,ALL
LCLEAR,ALL
KSEL,ALL
KCLEAR,ALL
VSEL,ALL
VDELE,ALL
ASEL,ALL
ADELE,ALL
LSEL,ALL
LDELE,ALL
KSEL,ALL
KDELE,ALL
EDELE,ALL

!* Redefines beam length (changes according to edge size)
Lviga=Ltotal-2*Laba

!* -----
!* LOOP START
!* From here on, the code runs a loop which redraws the keypoints and lines
!* defines coupling, contacts as usual up until the definition of gravity
!* then runs another loop inside with a file
!* of harmonic simulations as in the digital wave code
!* -----
!* Create points
!*
!* .....

!* HARMONIC SOLUTION
!* Runs the Digital Harmonic code

/INPUT,DigitalHarmonic,'txt',FolderPath,, 0

str0=CHRVAL(Laba*1000)
fldrName=STRCAT(STRCAT(FolderPath,STRCAT('rst\'',str0)),'\')
/MKDIR,fldrName

Laba=Laba+0.001

str1=FolderPath
str3='.txt'
*Dim, NodeNoArray,array, 5000 !Array used to save nodes No.
steps=36

Lsel,s,,,13,15,1 !From line 13 to line 15 (beam +edges) with steps of 1

```

```

Nsll,s,1
*Get,LinNodes,node,0,count !Get the number of nodes in the selected set
SelNode=0 !Counter to save the selected node number
*Do,i,1,LinNodes
NodeNo=NDNEXT(SelNode) !NDNEXT(N) Next selected node having
                        !a node number greater than N.
NodeNoArray(i)= NodeNo
SelNode=NodeNo
*Enddo

*dim,nodalresult,,LinNodes,steps+1
*dim,nodalX,,LinNodes
!* -----
!* LOOP START
!* -----
flag=1
i=1
*DOWHILE,flag
*GET,nodalX(i,1),NODE,NodeNoArray(i),LOC,X
*IF,i,EQ,LinNodes-1,EXIT
i=i+1
*ENDDO

step=0

!* LOOP THROUGH RESULTS
*SET,FLAG,1
*DOWHILE,flag
*IF,step,EQ,steps+1,EXIT

/POST1
SET,step
PLNSOL, U,Y, 0,1.0

flag2=1
i=1
*DOWHILE,flag2
*GET,nodalresult(i,step+1),NODE,NodeNoArray(i),U,Y
*IF,i,EQ,LinNodes-1,EXIT
i=i+1
*ENDDO

str2=CHRVAL(step/steps*360)
Diretorio=STRCAT(fldrName,STRCAT(Str2,Str3))
*cfopen,Diretorio
*VLEN, i, 1
*VWRITE,NodeNoArray(1),nodalX(1),nodalresult(1,step+1)
(F8.0,g16.8,g16.8)

```



```

*cfclose
step=step+1

*ENDDO

!PARSAV,SCALAR,'saveparam','.txt'

*ENDDO

```

7.3 Códigos MATLAB

A visualização de resultados e de loops de simulação pela interface do Ansys é complicada, considerando que muitas vezes necessita-se analisar gráficos com 2 variáveis simultaneamente (como posição na viga e θ). Desta maneira, optou-se por exportar os resultados utilizando o código APDL precedente e realizar o pós processamento no MATLAB.

Além disso, a solução e análise das equações analíticas utilizadas nos fundamentos teórico também foi feita com esse software.

Estes códigos podem ser executados diretamente do MATLAB salvando-os em um documento texto com terminação .m e alterando, se necessário, o diretório onde foram salvos os arquivos extraídos do Ansys.

7.3.1 Modos de vibrar da Viga

Este código calcula os primeiros 25 modos de vibrar em flexão para uma viga de Euler-Bernoulli com condições de contorno do tipo livre-livre.

```

clc; close all; clear;

% Viga
h = 3e-3;           %espessura
b = 50e-3;          %largura
A = b*h;            %área da seção da barra
I = b*h^3/12;       %momento de area
L = 330e-3;         %compr. total da barra
V = A*L;            %volume
L1 = 34e-3;         %posição de fixação do amplificador e transd.
L2 = L - L1;        %abas simétricas

% Material
rho = 2700;          %densidade do aluminio (kg/m3)
E = 70e9;            %GPa

% Some solutions of cos(beta_n*L)*cosh(beta_n*L)=1
% Extracted from Wolfram
BetaLs = [4.7300407448627040260,7.8532046240958375565,
10.995607838001670908,14.137165491257464177,

```

```

17.278759657399481438,20.420352245626061091,
23.561944902040455075,26.703537555508186248,
29.845130209103254267,32.986722862692819562,
36.128315516282622650,39.269908169872415463,
42.411500823462208720,45.553093477052001958,
48.694686130641795196,51.836278784231588435,
54.977871437821381673,58.119464091411174912,
61.261056745000968150,64.402649398590761388,
67.544242052180554627,70.685834705770347865,
73.827427359360141104,76.969020012949934342,
80.110612666539727581];

% 19o modo de vibrar
for n = 1:length(BetaLs);
betan=BetaLs(n)/L;
wn = (betan^2)*sqrt(E*I/(rho*A));
fn=wn/(2*pi);
X=0e-3:5e-4:L;
Wn_ = zeros(1,length(X));
eps=(cosh(betan*L)-cos(betan*L))/(sinh(betan*L)-sin(betan*L));
waittxt = ['Calculating mode ' num2str(n) '...'];
f=waitbar(0,waittxt);
for i=1:length(X)

bvar=betan*X(i);
if n>10
waitbar(i/length(X),f,waittxt);
Wn_(i) = (vpa(cosh(bvar))+cos(bvar))-eps*(vpa(sinh(bvar))+sin(bvar));
else
Wn_(i) = ((cosh(bvar))+cos(bvar))-eps*((sinh(bvar))+sin(bvar));
end

end
close(f)
modeName=['mode', num2str(n), '.mat'];
save(modeName,'fn','X','Wn_');
end

```

7.3.2 Simulação da onda propagante analógica

Este código implementa o método descrito em [7] para o estudo da propagação de ondas por variação da fase em uma viga.

```

% Eq. retirada do artigo: Loh e Ro "An object transport system using
% flexural ultrasonic progressive waves generated by two-mode excitation",
% ieee on ultr., ferr., and freq. contr., v.47, 2000.

```

```

clc; close all; clear;

```

```

% Modo de vibrar
n1 = 17;
n2 = n1+1;

% Recupera os resultados
MS_n1 = load(['modeshapes330mm/mode' num2str(n1) '.mat']);
figure; plot(MS_n1.X, MS_n1.Wn_/max(MS_n1.Wn_));
MS_n2 = load(['modeshapes330mm/mode' num2str(n2) '.mat']);
hold on; plot(MS_n2.X, MS_n2.Wn_/max(MS_n2.Wn_));
title('Sobreposição dos modos de vibrar da viga');
xlabel('Comprimento da viga (m)');
ylabel('Amplitude Normalizada');
legend(['Modo ' num2str(n1)], ['Modo ' num2str(n2)], 'Location', 'eastoutside');

% Propriedades da viga
b = 3e-3;           %espessura
h = 50e-3;          %largura
A = b*h;            %área da seção da barra
I = h*b^3/12;       %momento de area
L = MS_n1.X(end);   %compr. total da barra
V = A*L;            %volume
P = 1;              %Amplitude da força
% Material
E = 70e9; %GPa
rho=2700; %kg/m3

f_n1 = MS_n1.fn;    %freq. natural do modo n1
w_n1 = 2*pi*f_n1;   %freq. angular do modo n1
lambda_n1 = 2*pi*((E*I/(rho*A))^(0.25))/sqrt(w_n1); %comprimento de onda
k_n1 = 2*pi/lambda_n1; %número de onda do modo n1

f_n2 = MS_n2.fn;    %freq. natural do modo n2
w_n2 = 2*pi*f_n2;   %freq. angular do modo n2
lambda_n2 = 2*pi*((E*I/(rho*A))^(0.25))/sqrt(w_n2); %comprimento de onda
k_n2 = 2*pi/lambda_n2; %número de onda do modo n2

% Aplicacao da força
f = (f_n1+f_n2)/2; %freq. de excitação (Hz)
w = 2*pi*f;
L1 = 34e-3; %posição de fixação do amplificador e transd.
L2 = L - L1; %abas simétricas

N1=ceil(L1*1000*100);
N2=ceil(L2*1000*100);
phi19L1=MS_n1.Wn_(N1)/max(MS_n1.Wn_); %FUNÇÃO Mode Shape Normalizada
phi20L1=MS_n2.Wn_(N1)/max(MS_n2.Wn_); %FUNÇÃO Mode Shape Normalizada
phi19L2=MS_n1.Wn_(N2)/max(MS_n1.Wn_); %FUNÇÃO Mode Shape Normalizada

```

```

phi20L2=MS_n2.Wn_(N2)/max(MS_n2.Wn_);    %FUNÇÃO Mode Shape Normalizada

C1=2*P*phi19L1/((w_n1^2-w^2)*sqrt(rho*A));
C2=2*P*phi20L2/((w_n2^2-w^2)*sqrt(rho*A));
C3=2*P*phi20L1/((w_n2^2-w^2)*sqrt(rho*A));
C4=2*P*phi19L2/((w_n1^2-w^2)*sqrt(rho*A));

x=linspace(0,L,1000);
TEMPO=0:1/(20*f):3/(1*f);
figure;
yxt=[];
for t=TEMPO
yxt = [yxt;(C1*sin(k_n1.*x-pi/4)*sin(2*pi*f*t)-C2*sin(k_n2.*x-pi/4)
*cos(2*pi*f*t))+(C3*sin(k_n2.*x-pi/4)*sin(2*pi*f*t)
-(C4*sin(k_n1.*x-pi/4)*cos(2*pi*f*t)))]';
plot(x,yxt);
grid on;
pause(0.1);
end

contourf(x,TEMPO,yxt);
title('Resultado Analítico da Propagação da Onda Analógica');
xlabel('Comprimento da viga (m)'); ylabel('Tempo (\mus)');

```

7.3.3 Pós Processamento ANSYS

Este código recebe os resultados de deslocamento nodal das análises harmônicas, ordena os nós baseado na posição dos nós e cria os gráficos de pós-processamento que representam o fenômeno de propagação da onda vistos ao longo deste trabalho.

```

close all; clear all; clc

steps=36; % Numero de passos ou análises harmônicas
nodes=166; % Numero de nós na linha superior da viga= LinNodes
nodenbr=zeros(steps,nodes);
posx=zeros(steps,nodes);
uy=zeros(steps,nodes);
% Leitura dos resultados nodais
for k=1:1:steps
step=k*360/steps;
str1=['results\'];
str2=int2str(step);
str3='.txt';
diretorio=[str1 str2 str3];
fid=fopen(diretorio);
file = fscanf(fid,'%f');

for i=1:1: numel(file)/3

```

```

j=2*(i-1);
nodenbr(k+1,i)=file(j+i);
posx(k+1,i)=file(j+i+1);
uy(k+1,i)=file(j+i+2);
end
end

% Ordenação por inserção
for i=1:1:nodes-1
mindex=i;
for j=(i+1):1:nodes
if posx(1,j)<posx(1,mindex)
mindex=j;
end
end
aux=posx(1,i);
posx(1,i)=posx(1,mindex);
posx(1,mindex)=aux;

for k=0:1:steps
min=uy(k+1,mindex);
aux=uy(k+1,i);
uy(k+1,i)=min;
uy(k+1,mindex)=aux;

min=nodenbr(k+1,mindex);
aux=nodenbr(k+1,i);
nodenbr(k+1,i)=min;
nodenbr(k+1,mindex)=aux;
end
end

fclose('all');

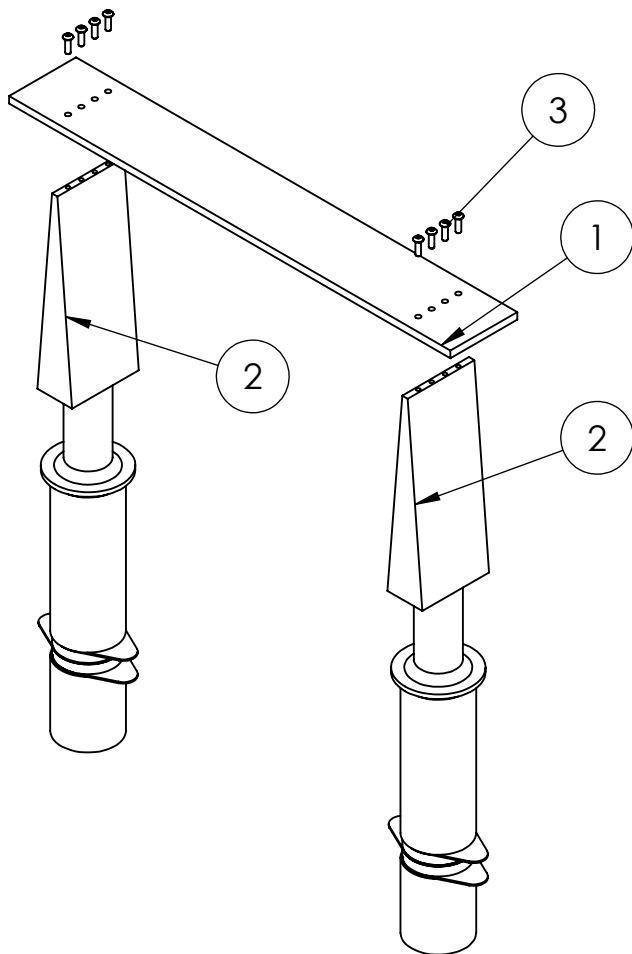
% ##### PLOTS #####
Y=0:360/steps:360;
X=posx(2,:);
Z=uy;
figure;
contourf(X,Y,Z,20);
title('Amplitude de Deslocamento','fontsize',12);
xlabel('Comprimento da Viga','fontsize',12); ylabel('Tempo','fontsize',12);
caxis([-1e-6 1e-6]); colorbar;
imgname = 'img.png';
saveas(gcf,imgname);

```

7.4 Desenhos de Fabricação

Aqui estão incluídos os desenhos das peças e da montagem do protótipo.

- Desenho de conjunto : Protótipo
- Desenho de conjunto : Langevin
- Viga
- Sonotrodo
- Amplificador
- Bot



Nº DO ITEM	Nº DA PEÇA	QTD.
1	Viga	1
2	LangevinAssembly	2
3	ISO 7380 - M3 x 10 - 10N	8

SE NÃO ESPECIFICADO:
DIMENSÕES EM MILÍMETROS
ACABAM. SUPERFÍCIE:
TOLERÂNCIAS:
LINEAR:
ANGULAR:

ACABAMENTO:

REBARBAR E
QUEBRAR
ARESTAS
AGUDAS

NÃO MUDAR ESCALA DO DESENHO

REVISÃO

	NOME	ASSINATURA	DATA		
DESEN.					
VERIF.					
APROV.					
MANUF					
QUALID					

MATERIAL:

PESO:

TÍTULO:

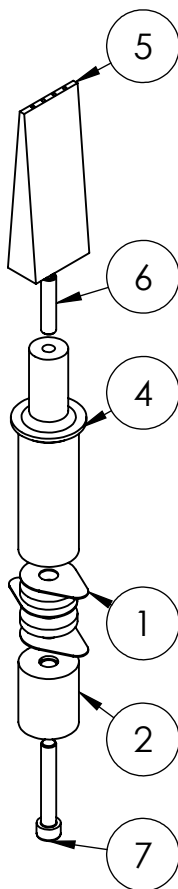
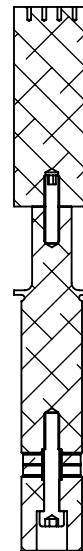
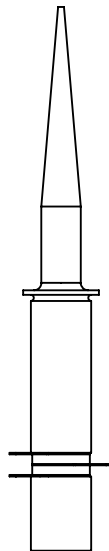
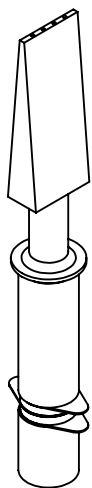
DES. Nº

ESCALA:1:4

FOLHA 1 DE 1

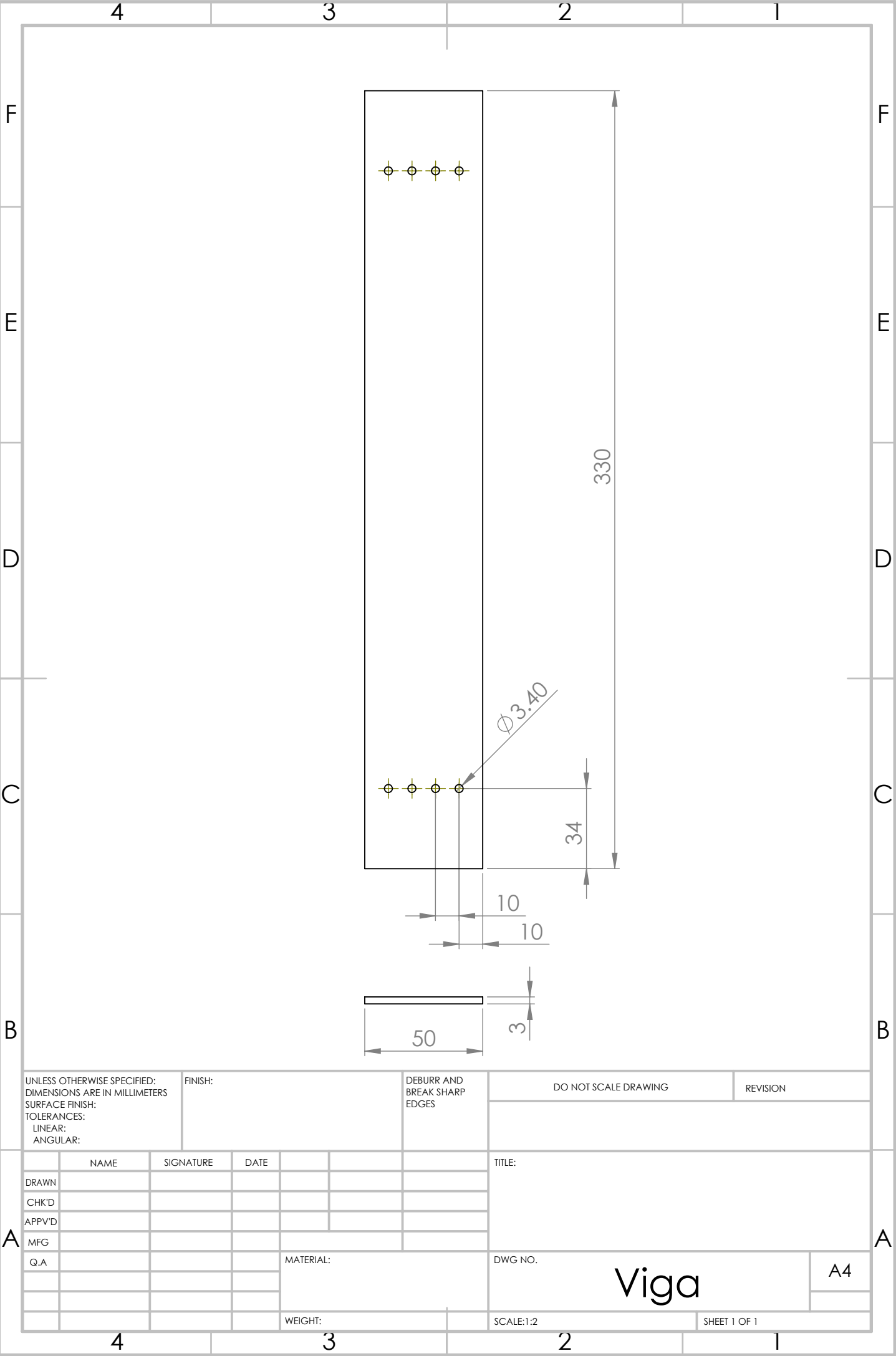
Prototipo-Transportador

A4



Nº DO ITEM	Nº DA PEÇA	QTD.
1	Conjunto Piezoelétrico	1
2	Bot Langevin	1
3	Cilindro isolamento	1
4	Amplificador Langevin	1
5	Sonotrodo	1
6	ISO 4026 - M10 x 45-N	1
7	ISO 4762 M10 x 65 - 32N	1

SE NÃO ESPECIFICADO: DIMENSÕES EM MILÍMETROS ACABAM. SUPERFÍCIE: TOLERÂNCIAS: LINEAR: ANGULAR:		ACABAMENTO:		REBARBAR E QUEBRAR ARESTAS AGUDAS		NÃO MUDAR ESCALA DO DESENHO		REVISÃO	
NOME		ASSINATURA		DATA		TÍTULO:			
DESEN.						DES. Nº LangevinAssembly ^{A4}			
VERIF.									
APROV.									
MANUF									
QUALID									
				MATERIAL:		ESCALA:1:5			
				PESO:		FOLHA 1 DE 1			



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:
DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS
SURFACE FINISH:
TOLERANCES:
LINEAR:
ANGULAR:

FINISH:

DEBURR AND
BREAK SHARP
EDGES

DO NOT SCALE DRAWING

REVISION

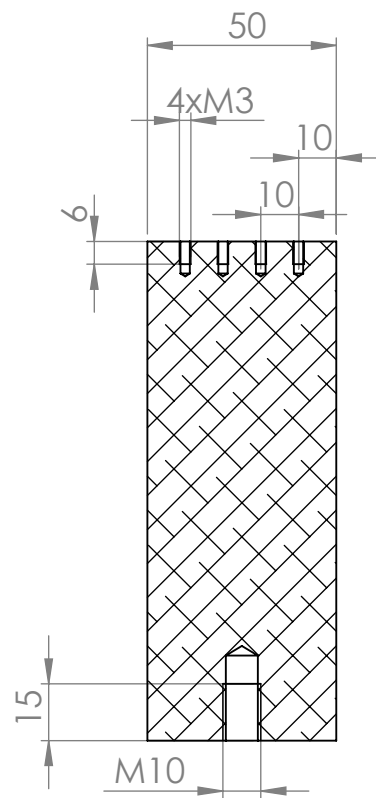
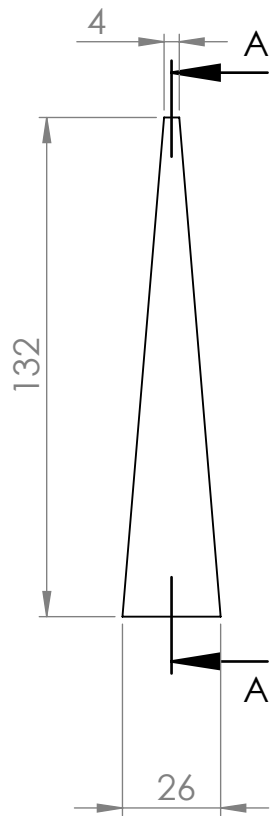
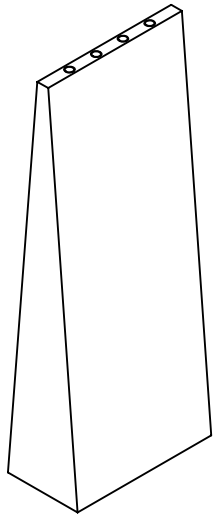
	NAME	SIGNATURE	DATE			
DRAWN						
CHK'D						
APPV'D						
MFG						
Q.A						

TITLE:	
DWG NO.	Viga
SCALE:1:2	SHEET 1 OF 1

MATERIAL:

WEIGHT:

A4



SEÇÃO A-A

SE NÃO ESPECIFICADO:
DIMENSÕES EM MILÍMETROS
ACABAM. SUPERFÍCIE:
TOLERÂNCIAS:
LINEAR:
ANGULAR:

ACABAMENTO:

REBARBAR E
QUEBRAR
ARESTAS
AGUDAS

NÃO MUDAR ESCALA DO DESENHO

REVISÃO

	NOME	ASSINATURA	DATA		
DESEN.					
VERIF.					
APROV.					
MANUF					
QUALID					

MATERIAL:

PESO:

TÍTULO:

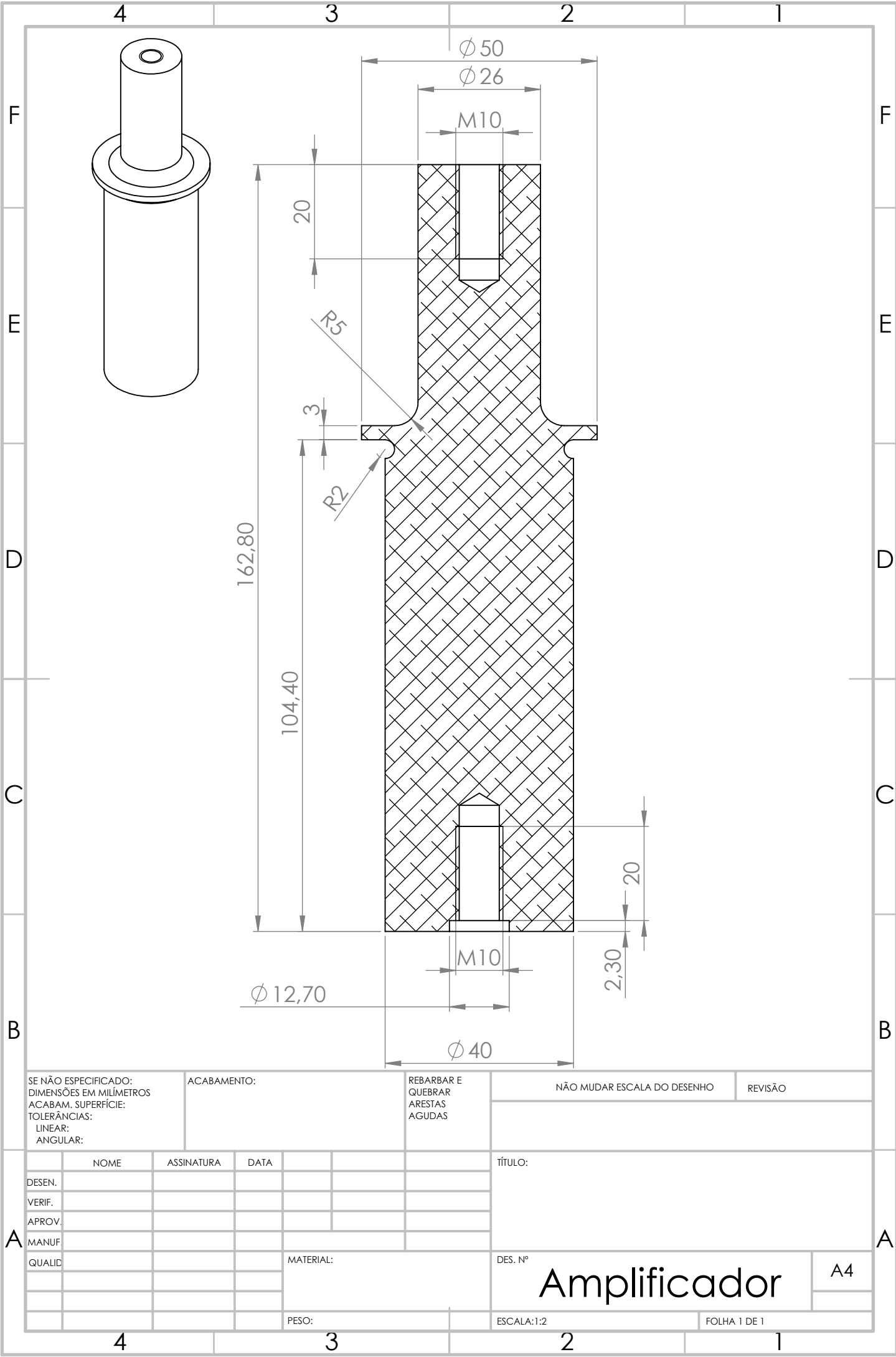
DES. Nº

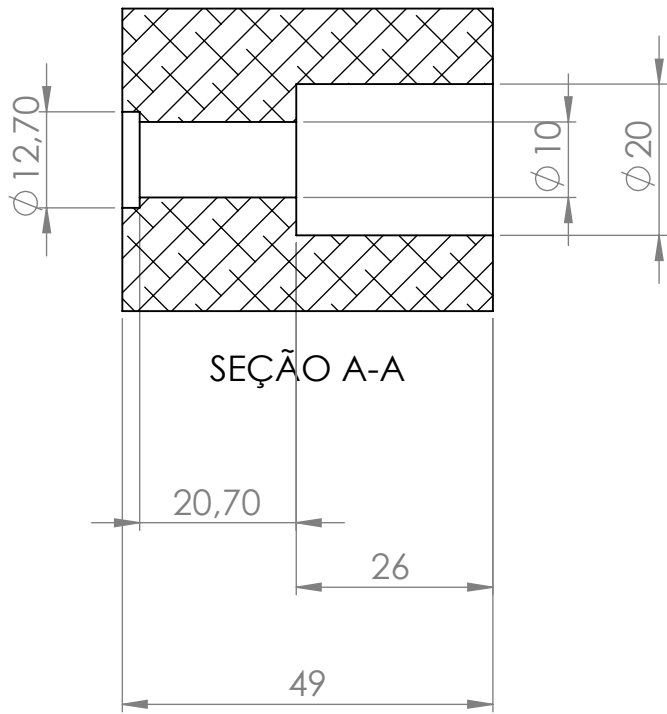
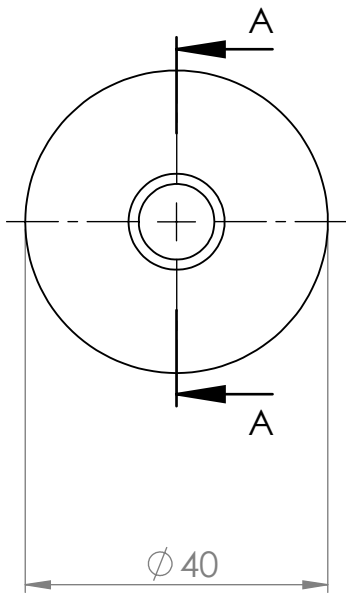
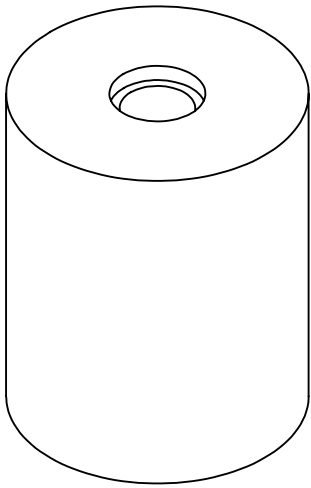
ESCALA:1:2

FOLHA 1 DE 1

Sono

A4





SE NÃO ESPECIFICADO:
DIMENSÕES EM MILÍMETROS
ACABAM. SUPERFÍCIE:
TOLERÂNCIAS:
LINEAR:
ANGULAR:

ACABAMENTO:

REBARBAR E
QUEBRAR
ARESTAS
AGUDAS

NÃO MUDAR ESCALA DO DESENHO

REVISÃO

	NOME	ASSINATURA	DATA		
DESEN.					
VERIF.					
APROV.					
MANUF					
QUALID					

MATERIAL:

PESO:

TÍTULO:

DES. Nº

ESCALA:1:1

FOLHA 1 DE 1

Bot

A4