



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
Escola Politécnica

PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UM TRANSPORTADOR DE
MATERIAL PARTICULADO

Guilherme Victor Selicani

São Paulo
2016

Prefácio

Essa monografia é um trabalho de formatura realizado no departamento de engenharia mecatrônica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo em 2015.

Autor: Guilherme Victor Selicani

Orientador: Prof. Dr. Emílio Carlos Nelli Silva

Data: 03/02/2016

Resumo

Nesse trabalho de conclusão de curso utiliza-se a tecnologia de motores lineares ultrassônicos para construir um transportador material particulado para equipamentos laboratoriais de alta precisão. A aplicação de atuadores ultrassônicos piezelétricos no transporte de grãos é escolhida para o projeto pois apresenta as vantagens de transportar o material de sem prejudicar a qualidade dos grãos, rápido acionamento, estrutura mecânica simples, fácil manutenção e compatibilidade com o ambiente laboratorial. O modelo de motor linear adotado consiste de uma viga excitada uma de suas frequências naturais de flexão por dois transdutores do tipo Langevin. Foi utilizado o software comercial de elementos finitos ANSYS para conduzir as simulações computacionais do projeto.

Palavras-chave: Motor linear ultrassônico, transportador de partículas, motor piezelétrico.

Abstract

In this graduation thesis the technology used in linear ultrasonic motors is applied to build a powdered material transporter for high precision laboratorial equipment. Linear ultrasonic piezoelectric actuators are well suited for the project's application because it can transport the powdered material without damage, it have fast starting, simple mechanical structure, simple maintenance and compatibility with the laboratorial environment. The model of linear ultrasonic motor employed consists of a beam excited in one of its flexural natural frequencies by two Langevin transducers. The commercial finite element method software ANSYS is used to conduct the computational simulations of the project.

Key Words: Ultrasonic linear motor, powdered material transporter, piezoelectric motor.

Agradecimentos

Agradeço ao orientador Prof. Dr. Emílio Carlos Nelli Silva por todos conselhos e auxílio dados por todo decorrer do trabalho.

Agradeço ao mestrando Gilles Pierre Loïc Thomas, aos doutorando Tiago Ramos e Rubem Sales e ao Professor Flávio Buiochi pelo suporte e compartilhamento de experiência indispensáveis para o sucesso desse projeto.

Agradeço a todos os funcionários da Escola Politécnica que atuaram na construção do protótipo.

Agradeço a família e amigos pelo apoio durante todos esses anos de graduação.

Sumário

1. Introdução	1
1.1 Objetivo.....	1
1.2 Metodologia	1
1.3 Justificativa	2
1.4 Especificações do projeto	5
2. Fundamentação Teórica.....	5
2.1 Princípio operacional de motores ultrassônicos	5
2.2 Materiais piezelétricos	8
2.3 MEF piezelétrico	9
2.4 Motores de onda propagante	10
2.5 Seleção do acionamento e modelo do protótipo.....	13
3. Implementação Numérica.....	14
4. Metodologia experimental	15
4.1 Transdutor Langevin e sonotrodo	16
4.2 Acionamento	17
5. Projeto do transportador	20
5.1 Análise modal do transdutor Langevin.....	20
5.2 Modelo do transportador montado	22
6. Resultados	25
.....	27
7. Resultados Experimentais	30
8. Conclusões.....	34
9. Referências.....	37
10. Apêndices.....	39
10.1 Modelo de viga com seção em “U”	39
10.2 Considerações a respeito do material particulado	40
11. Anexos	42
A.1 Análise Modal Modelo 2D Langevin.....	42
A.2 Análise Modal Modelo Montado	53
A.3 Análise Modal Modelo Montado	74

A.4 Análise Harmônica: Viga de seção em “U”	99
A.5 Código em Matlab para pós-processamento	105
A.6 Script de aciamento	108
C. Desenhos de Fabricação	127

Lista de Figuras

Figura 1: Ilustração do princípio de funcionamento do sistema [1].	1
Figura 2: Diagrama esquemático do rotary riffle [http://www.chem.mtu.edu/chem_eng/faculty/kawatra/CM3820_2009_Sampling.pdf].	4
Figura 3: Contador de Grãos [http://www.seedprocessing.nl/en/17/115/seed_counting,_weighing,_packing.html].	4
Figura 4: Sistemas de coordenadas do modelo analítico da viga [3].	6
Figura 5: a-) Exemplo de motor de superposição e b-) exemplo de motor de absorção [8].	11
Figura 6: Modelos de excitação de um modo(6.a), dois modos (6.b) e um modo usando variação de fase (6.c) (adaptado de [11]).	12
Figura 7: Estrutura adotada para o transportador.	14
Figura 8: Imagem que ilustra tanto o elemento PLANE 223 e 183 (Imagem retirada do tutorial do ANSYS).	15
Figura 9: Modelo bidimensional do transdutor Langevin.	21
Figura 10: Modelo 2D do transportador montado.	23
Figura 11: Acoplamento dos nós.	24
Figura 12: Condições de contorno.	25
Figura 13: Modo de vibrar adotado, frequência: 21296,8 Hz.	26
Figura 14: Onda propagante.	26
Figura 15: Gráfico de superfície ilustrando a variação da amplitude de deslocamento em função da fase.	27
Figura 16: Variação da amplitude de deslocamento em função da fase (outro ângulo).	27
Figura 18: Modulo da amplitude de deslocamento (um periodo).	28
Figura 19: Gráfico de superfície do módulo da amplitude de deslocamento.	29

Lista de Tabelas

Tabela 1: Confiabilidade de diversos métodos de amostragem [http://www.particlesciences.com/news/technical-briefs/2011/sampling-of-powders.html].	3
Tabela 2 : Propriedades do material piezelétrico PZT-4.	9
Tabela 3: Propriedades adotadas para os materiais isotrópicos.	20
Tabela 4: Frequências de Ressonância do transdutor Langevin.	21

1. Introdução

Nesse trabalho de formatura será elaborado um sistema de transporte para materiais particulados que utiliza um motor piezelétrico linear de ondas propagantes. O princípio de funcionamento é ilustrado na figura 1. Utilizando transdutores piezelétricos será criada uma propagante no transportador que carregará as partículas de uma posição à outra. A onda propagante impõe um movimento elíptico na superfície do transportador, assim objetos em contato são acelerados por atrito, conforme ilustrado na figura abaixo.

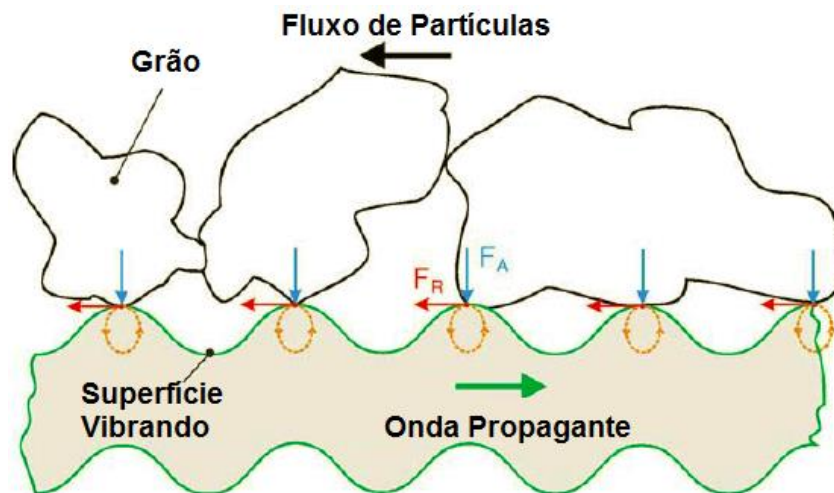


Figura 1: Ilustração do princípio de funcionamento do sistema [1].

1.1 Objetivo

O objetivo desse trabalho é projetar e construir um transportador de material particulado que seja capaz de fornecer vazão suficiente para uma determinada aplicação, além de garantir alta precisão e controlabilidade do fluxo.

1.2 Metodologia

O procedimento utilizado para construir este protótipo segue as seguintes etapas de projeto e construção:

1. **Simulação Computacional:** Primeiro será realizada a análise modal da estrutura do transportador, a fim de determinar as frequências dos modos de vibração de flexão da viga. Os valores obtidos aqui serão usados para determinar a frequência de excitação utilizada nos elementos piezelétricos na etapa posterior. Para isso será utilizado o software comercial de elementos finitos. Em

seguida, será criado um modelo computacional para realizar a análise do comportamento dinâmico do sistema. Será utilizado o software ANSYS para realizar essa simulação, onde será modelada a viga, conectada aos elementos piezelétricos.

- II. **Escolha de Parâmetros:** Com o modelo construído, será utilizada a metodologia de análise para determinar parâmetros construtivos do projeto. Isto é, serão realizadas simulações para diversos valores de dimensões da viga, materiais e tensões. O intuito é observar as trajetórias elípticas da superfície da viga e determinar aquela de maior deslocamento. Quando encontrada a configuração de parâmetros mais adequada pode-se prosseguir para etapas construtivas.
- III. **Desenho de conjunto:** A partir dos resultados obtidos nas etapas anteriores serão realizados os desenhos de fabricação e conjunto do mecanismo.
- IV. **Construção do protótipo:** A partir dos desenhos de conjunto e fabricação nessa etapa será dedicada atenção aos procedimentos envolvidos na construção, como por exemplo, determinação dos métodos de fabricação das peças, compra de material, etc.
- V. **Ensaio Experimentais:** Por fim será realizada uma série de experimentos, para diversas faixas de tensão, tamanhos de grão e frequências de excitação para avaliar o desempenho do sistema de transporte construído.

1.3 Justificativa

Existem aplicações na indústria química, alimentícia e farmacêutica nas quais ocorrem processos de mistura de substâncias onde uma ou mais delas são sólidos particulados [1]. Com intuito de alcançar um patamar de controle mais rigoroso na precisão de dosagem, foram propostas a utilização de diversos mecanismos que servem de solução para esta necessidade, como por exemplo, mecanismos de rosca-sem-fim, sistema com atuadores pneumáticos e sistemas com motores lineares piezelétricos. A opção a ser discutida nesse trabalho será a de um sistema que aplica um motor piezelétrico linear de ondas ultrassônicas. O mecanismo proposto foi escolhido por apresentar as seguintes vantagens de aplicação:

1. Estrutura mecânica simples: Processos de montagem e usinagem de materiais envolvidos necessários são considerados simples devido à ausência de geometrias complexas e uso de processos de junção de peças comuns (rebites e adesivo).

2. Respostas rápidas ao acionamento: Motores piezelétricos apresentam rápida resposta acionamento quando comparado com motores magnéticos.

3. Fácil manutenção: Peças simples implicam na facilidade de substituição de partes do sistema que por ventura tenham sido danificadas.

4. Compatibilidade com salas limpas (“Clean Room”) e salas de vácuo: Motores piezelétricos não emitem substâncias ou energia (calor ou ondas eletromagnéticas) em quantidades consideráveis sendo apropriado para ambientes controlados.

5. Aplicável em ambientes de temperaturas criogênicas: Muitos mecanismos de transporte (por exemplo, que usam fluidos) tem seu desempenho relacionado ao valor da temperatura ambiente. Motores piezelétricos não se enquadram nessa categoria, sendo aplicáveis em salas de baixas temperaturas.

O protótipo que será desenvolvido tem como propósito compor o sistema de transporte de equipamentos laboratoriais cuja função pode ser inspecionar qualidade, analisar, quantificar ou ainda alterar propriedades do material particulado.

Um exemplo de equipamento muito utilizado na indústria química, farmacêutica e de mineração é o *Spinning riffler* ou *Rotary riffler* (ver figura 2). Este aparelho atende à necessidade de determinar a distribuição estatística de tamanho das partículas de uma amostra, que é um fator relevante para diversos processos de obtenção de substâncias na indústria farmacêutica e também para análise de materiais advindos de mineração. Existem diversas técnicas empregadas para este fim, sendo a spin riffling preferida em muitas situações devido sua alta confiabilidade, como pode ser observado pelos valores de desvio percentual na medição do tamanho de grãos da tabela 1. O rotary riffler basicamente consiste de um alimentador e de um separador de amostra giratório. O alimentador geralmente possui um mecanismo vibratório que recebe os grãos de um recipiente de armazenamento e depois impõe movimento no material particulado, dirigindo-o para o prato giratório onde as partículas são divididas entre vários recipientes de amostra (ver figura 2). O transportador vibratório (ressaltado na figura 2) é um exemplo de aplicação do protótipo criado nesse trabalho.

Método	Desvio padrão relativo (%)
Aquartelamento com Cone	6.81
Amostragem com pá	5.14
Amostragem por tabela	2.09
Separação com calhas	1.01
Spin Riffling	0.125
Variação aleatória	0.076

Tabela 1: Confiabilidade de diversos métodos de amostragem
[<http://www.particlesciences.com/news/technical-briefs/2011/sampling-of-powders.html>].

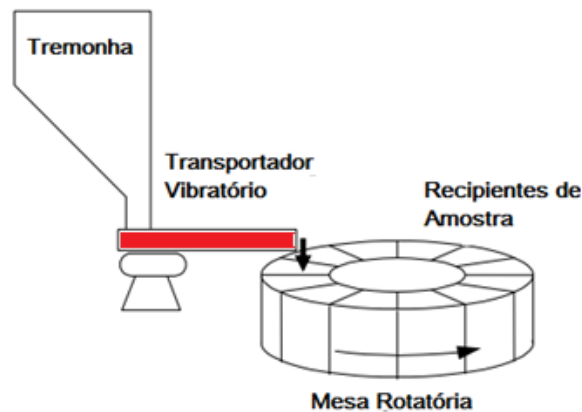


Figura 2: Diagrama esquemático do rotary riffle
[\[http://www.chem.mtu.edu/chem_eng/faculty/kawatra/CM3820_2009_Sampling.pdf\]](http://www.chem.mtu.edu/chem_eng/faculty/kawatra/CM3820_2009_Sampling.pdf).

O protótipo a ser projetado nesse trabalho, também pode ser aplicado em equipamentos laboratoriais de tratamento de grãos, presentes no ramo agroindústria (ver figura 3). Seletores e contadores de grãos, por exemplo, são máquinas que poderiam adotar essa tecnologia para realizar o transporte dos grãos com alta precisão (apresentando uma vantagem perante sistemas pneumáticos) e confiabilidade (apresentando uma vantagem perante roscas-sem-fim que podem agredir a integridade das sementes). Existe uma grande variedade de equipamentos dedicados à inspeção de qualidade de processos envolvendo materiais particulados, aqui foram mencionados apenas alguns, recomenda-se a página <http://www.seedprocessing.nl/> onde estão presentes mais informações sobre outros equipamentos direcionados a agroindústria que poderiam empregar a tecnologia de motor linear de ondas propagantes. O uso ou não do transportador de ondas propagantes que será elaborado nesse trabalho depende diretamente dos requisitos de projeto da aplicação sendo essa tecnologia mais apropriada para o ambiente laboratorial [1]. Foram apenas dois exemplos de possíveis aplicações de um transportador ultrassônico de materiais particulado, havendo outras possíveis aplicações adaptadas em outras áreas da indústria química e alimentícia.



Figura 3: Contador de Grãos
[\[http://www.seedprocessing.nl/en/17/115/seed_counting_weighing_packing.html\]](http://www.seedprocessing.nl/en/17/115/seed_counting_weighing_packing.html).

1.4 Especificações do projeto

O protótipo a ser construído deverá ser empregado como um subsistema em equipamentos laboratoriais, assim existem os seguintes requisitos do projeto:

Utilizar frequências ultrassônicas: Frequências abaixo de 20 kHz se enquadrariam no espectro sonoro audível e, portanto seriam inadequadas para o projeto visto que o som emitido pelo transportador em funcionamento geraria uma perturbação no ambiente. Logo o transportador deve operar em frequências acima de 20 kHz.

Transportar o material particulado numa distância de 300 mm: O transportador é projetado para ser utilizado como subsistema em equipamentos laboratoriais de bancada, desta forma suas dimensões espaciais devem ser compatíveis com o tamanho destes equipamentos (ver figura 3).

Apresentar velocidade máxima de 3cm/s: Desta forma o tempo de transporte das partículas seria de dez segundos, fazendo o transportador ser capaz de atender os requisitos de velocidade dos equipamentos laboratoriais nos quais pode ser empregado.

2. Fundamentação Teórica

2.1 Princípio operacional de motores ultrassônicos

Atualmente existe uma enorme variedade de tipos de motores piezelétricos e o princípio de funcionamento pode variar muito entre um tipo de motor e outro, porém todas essas variedades de motores obtêm movimento a partir da interação entre transdutores piezelétricos e uma estrutura mecânica. Dentre as diversas categorias de motores piezelétricos temos os motores ultrassônicos que são acionados por ondas estacionárias ou propagantes, para gerar movimento rotativo ou linear. Recomenda-se o texto de K. Uchino [2] para uma leitura mais aprofundada a respeito dos diversos princípios de funcionamento dos demais motores e sua categorização, aqui será dedicada atenção apenas a motores piezelétricos lineares ultrassônicos cujo princípio operacional é descrito em detalhes a seguir.

Considerando que o transportador é uma viga homogênea, sólida, contínua e isotrópica temos a seguinte equação de onda que descreve a flexão na viga [3]:

$$\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + \frac{\rho A}{EI} \frac{\partial^4 w}{\partial t^2} = 0 \quad (1)$$

Sendo:

w [m]: Deslocamento transversal ou variação no eixo Z (ver sistema de referência na figura 4);

ρ [kg/ m³]: Massa específica do material da barra;

E [Pa]: Módulo de Elasticidade do material da barra;

I [kg/m²]: Momento de inércia da seção transversal;

A [m²]: Área da seção transversal;

Sabendo que a solução dessa equação é expressa por uma expressão de onda propagante genérica dada pela seguinte expressão [3]:

$$w(x, t) = a \sin(\omega t - kx) \quad (2)$$

onde as constantes acima são [3]:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = \omega^{0.5} \left(\frac{\rho A}{EI} \right)^{0.25} \quad (3)$$

$$\omega = \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right)^2 \left(\frac{EI}{\rho A} \right)^{0.5} \quad (4)$$

λ [m]: Comprimento de onda;

ω [rad/s]: Frequência angular;

a [m]: Amplitude;

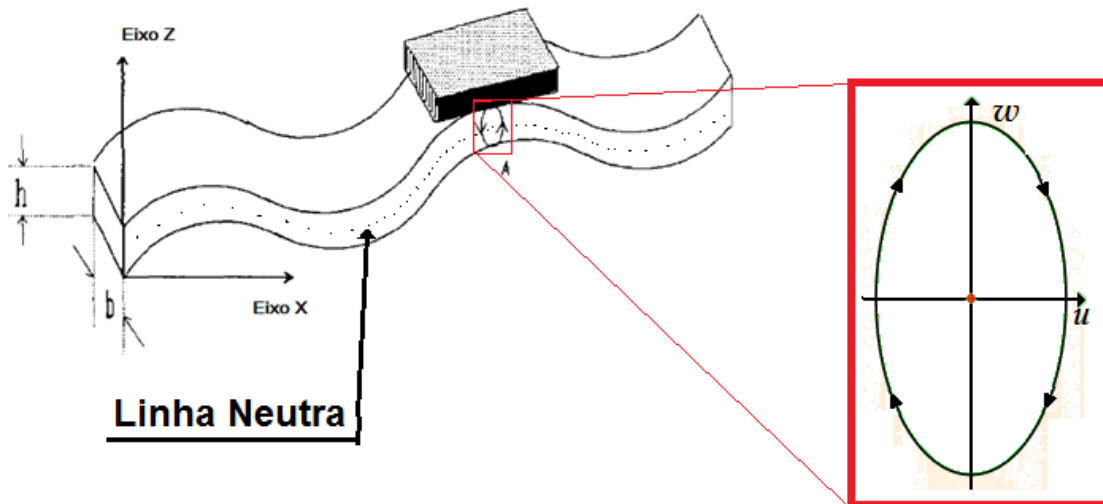


Figura 4: Sistemas de coordenadas do modelo analítico da viga [3].

Também se sabe que a equação de deslocamento longitudinal (eixo “X” na figura 4) é dada por:

$$u(x, z, t) = -z \frac{\partial w}{\partial x} = a z k \cos(\omega t - kx) \quad (5)$$

onde:

$z = h/2$ [m]: Se trata da distância da linha neutra à superfície da viga (ver figura 6);

Pela equação da identidade trigonométrica fundamental temos:

$$\frac{u^2}{(azk)^2} + \frac{w^2}{a^2} = 1 \quad (6)$$

Logo, a equação acima demonstra que os pontos da superfície da estrutura movem-se elipticamente, tal como averiguado em diversas simulações por métodos numéricos e dados experimentais que constam em [3].

Assumindo que a velocidade do material particulado seja a velocidade da onda propagante na direção X (ainda tratando-se do sistema de coordenadas ilustrado na figura 4), o que é uma hipótese razoável pois esta é a velocidade tangencial do ponto onde a elipse entra em contato com a partícula. Assim derivando a equação (5) em relação ao tempo temos a seguinte expressão:

$$v(x, z, t) = -\omega a z k \operatorname{sen}(\omega t - kx) = V_{Max} \operatorname{sen}(\omega t - kx) \quad (7)$$

Será assumido que a velocidade do material particulado em contato com a viga seja equivalente a amplitude “ V_{Max} ” da expressão (7). No apêndice A são feitas considerações em relação ao tamanho e formato das partículas, amplitude do deslocamento da viga e velocidade de propagação de onda para justificar essa simplificação.

Assim, basta que haja a presença de uma onda propagante na estrutura para assegurar o princípio operacional do sistema. As equações abaixo demonstram que o uso de duas fontes de excitação oscilatórias defasadas em 90° resulta na geração de uma onda progressiva. Seja equação genérica de onda estacionária [4]:

$$u_e(x, t) = a \cos(\omega t) \cos(kx) \quad (8)$$

Reescrevendo a expressão da onda progressiva e considerando as propriedades das funções matemáticas de seno e cosseno, temos:

$$\begin{aligned} u_p(x, t) &= a \cos(\omega t - kx) = a (\cos(\omega t) \cos(-kx) - \sin(\omega t) \sin(-kx)) = \\ u_p(x, t) &= a \cos(\omega t) \cos(kx) + a \cos(\omega t + \frac{\pi}{2}) \cos(kx + \frac{\pi}{2}) \end{aligned} \quad (9)$$

Portanto, entende-se que a onda progressiva é o somatório de duas ondas estacionárias defasadas em um quarto de onda [4] tanto no tempo quanto no espaço.

Observação: o índice “e” se refere à onda estacionária e o índice “p” se refere à onda propagante. A amplitude de deslocamento “a” é obtida impondo-se um campo de tensão elétrica no material piezelétrico em contato com a viga.

2.2 Materiais piezelétricos

Materiais piezelétricos apresentam a propriedade de gerar um campo de tensão elétrica em sua estrutura cristalina quando submetidos a esforços mecânicos que geram deformação, ou também o efeito inverso, isto é, apresentam deformações quando submetidos à tensão elétrica. As equações constitutivas da piezeletricidade podem ser escritas da seguinte maneira [5]:

$$\{T\} = [C^E][S] - [e]^t\{E\} \quad (10)$$

$$\{D\} = [e][S] + [\varepsilon^S]\{E\} \quad (11)$$

onde:

$[T]$ - matriz de tensão mecânica

$[S]$ - matriz de deformação mecânica

$\{E\}$ - vetor campo elétrico

$\{D\}$ - vetor deslocamento elétrico

$[C^E]$ - matriz de rigidez elástica obtida a campo elétrico constante

$$[C^E] = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & 0 & 0 & 0 \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} & 0 & 0 & 0 \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_{66} \end{bmatrix} \quad (12)$$

$[e]$ - matriz piezelétrica de tensão mecânica

$$[e] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & e_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & e_{24} & 0 & 0 \\ e_{31} & e_{32} & e_{33} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

$[\varepsilon^S]$ - matriz dielétrica obtida à deformação constante

$$[\varepsilon^S] = \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{33} \end{bmatrix} \quad (14)$$

Essa representação matricial é a mesma adotada pelo software utilizado para executar a simulação computacional. Pode-se consultar as referências [6] e [7] para uma leitura mais aprofundada a respeito de como inserir as propriedades do material no ambiente de simulação computacional utilizado, o Mechanical APDL. Nesse projeto foi empregada a cerâmica piezelétrica PZT-4, cujas propriedades matriciais estão presentes na tabela 2.

PZT-4			
Constantes Elásticas [10^{12} N/m ²]		Constantes Elétricas [10^{12} C/N]	
c_{11}	12.3	e_{15}	496
c_{12}	-4.05	e_{31}	-123
c_{13}	-5.31	e_{33}	289
c_{33}	15.5	Constantes Dielétricas [10^{12} F/m]	
c_{44}	39	ϵ_{11}	1475
c_{55}	39	ϵ_{22}	1475
c_{66}	32.7	ϵ_{33}	1300
Massa Específica [kg/m ³]			
ρ	7500		

Tabela 2 : Propriedades do material piezolétrico PZT-4.

2.3 MEF piezolétrico

As equações que representam o comportamento físico do material piezolétrico discretizado em elementos finitos são representadas na forma matricial abaixo[5]:

$$[M_{uu}]\{\ddot{U}\} + [C_{uu}]\{\dot{U}\} + [K_{uu}]\{U\} + [K_{u\phi}]\{\Phi\} = \{F\} \quad (15)$$

$$[K_{u\phi}]^T\{U\} + [K_{\phi\phi}]\{\Phi\} = \{Q\} \quad (16)$$

ou ainda na forma matricial:

$$\begin{bmatrix} [M_{uu}] & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{U} \\ \dot{\Phi} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [C_{uu}] & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} U \\ \Phi \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [K_{uu}] & [K_{u\phi}] \\ [K_{\phi u}] & [K_{\phi\phi}] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} U \\ \Phi \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F \\ Q \end{Bmatrix}$$

onde os termos são:

U: Deslocamento;

F: Força;

Q: Carga Elétrica;

Para cada elemento finito “e” assume-se:

$$\text{Matriz de rigidez mecânica: } [K_{uu}]_e = \iiint_{\Omega_e} [B_u]^T [c] [B_u] dV_e \quad (17)$$

$$\text{Matriz de acoplamento piezoelétrico: } [K_{u\phi}]_e = \iiint_{\Omega_e} [B_u]^T [e] [B_\phi] dV_e \quad (18)$$

$$\text{Matriz de rigidez elétrica: } [K_{\phi\phi}]_e = \iiint_{\Omega_e} [B_\phi]^T [\epsilon] [B_\phi] dV_e \quad (19)$$

$$\text{Matriz de Massa: } [M_{uu}]_e = \rho \iiint_{\Omega_e} [N_u]^T [N_u] dV_e \quad (20)$$

$[N_u]$: Função de interpolação de deslocamento.

$$\text{Matriz de amortecimento: } [C_{uu}] = \alpha[M_{uu}]_e + \beta[K_{uu}]_e \quad (21)$$

Sendo que as matrizes B são:

$$[B_u] = [B][N_u] \quad (22)$$

$$\text{Grad}([N_\phi][\hat{\Phi}]) = [B_u][\hat{\Phi}] \quad (23)$$

$$[B]^T = \begin{pmatrix} 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial z} & 0 & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 & \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial z} & 0 \\ \frac{\partial}{\partial x} & 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 & \frac{\partial}{\partial z} \end{pmatrix} \quad (24)$$

α : Constante de amortecimento da matriz da massa.

β : Constante de amortecimento da matriz de rigidez.

$[N_\phi]$: Função de interpolação de potencial elétrico.

$[\hat{\Phi}]$: Potencial elétrico nos nó de cada elemento.

Essas equações serão resolvidas internamente pelo software. A referência [5] apresenta a formulação teórica das equações do MEF para realizar a análise modal e harmônica em materiais piezelétricos.

2.4 Motores de onda propagante

Motores lineares de onda propagante utilizam a movimentação elíptica da superfície da viga decorrente da presença de uma onda propagante para realizar o movimento, contudo há diversas maneiras de se gerar a onda propagante na estrutura do motor. Com intuito de criar uma categorização os autores dos artigos [8][9] dividem os motores de onda propagante em dois tipos: motores de superposição e motores de absorção (ver figura 5).

Nos motores lineares de superposição o transdutor piezelétrico gera excitações harmônicas de deformação em uma estrutura cíclica (ver figura 5.a). Ao se excitar uma estrutura cíclica na sua frequência natural gera-se ondas de deformação que se propagam em ambos os sentidos da estrutura, a interação entre essas ondas resulta em uma onda estacionária. Conforme explicado na seção 2.1, a soma de duas ondas estacionárias defasadas em $\lambda/4$ geram uma onda propagante (ver equação 9), desta forma ao posicionar-se outro transdutor distanciado de um quarto do comprimento de onda ($\lambda/4$) do primeiro transdutor teremos uma onda propagante nesse tipo de estrutura.

Motores do tipo de absorção de um modo excitação utilizam um transdutor piezelétrico em um lado da viga para gerar a vibração na estrutura e outro transdutor para absorver as vibrações no outro lado viga. O transdutor é ligado a um circuito RL que tem como finalidade dissipar a energia da onda gerada inicialmente que iria ser refletida na extremidade da viga. A sobreposição da onda inicial com a onda refletida causaria a aparição de uma onda estacionária sobre a viga o que inviabilizaria o funcionamento do dispositivo. Um exemplo de protótipo que aplica esse princípio para construir um robô autônomo pode ser encontrado no artigo de Hariri et al[10] (ver figura 6.a).

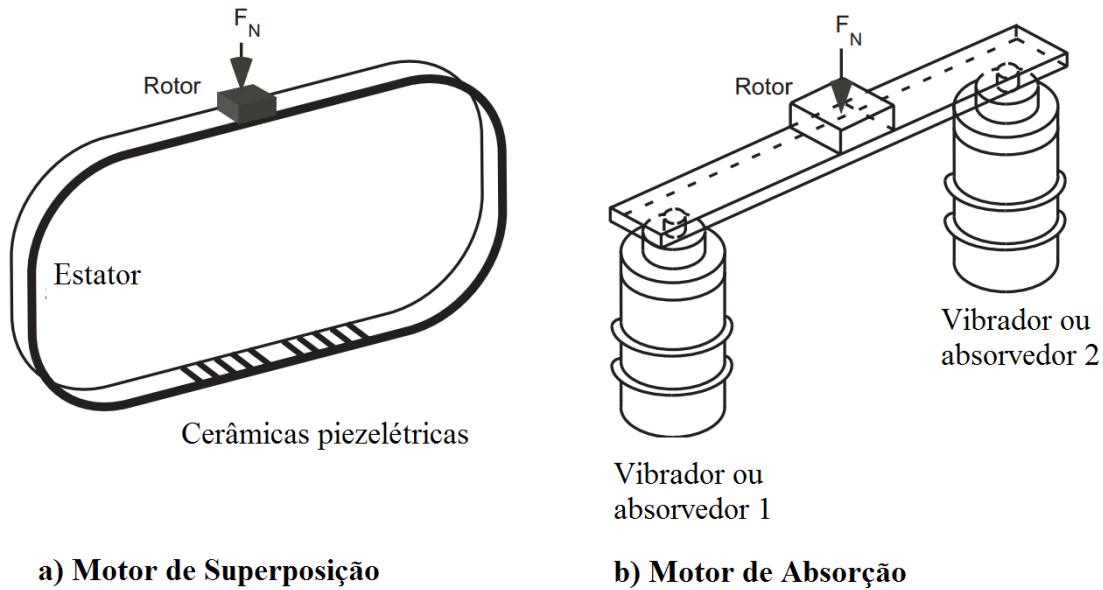


Figura 5: a-) Exemplo de motor de superposição e b-) exemplo de motor de absorção [8].

Outra forma possível de construir um motor linear similar ao de absorção é usando dois modos de excitação, isto consiste em aplicar excitações em ambos os lados da viga defasadas entre si no tempo, em frequências intermediárias entre dois modos de vibração vizinhos. O resultado é que um dos modos vizinhos é mais excitado do que o outro, gerando uma onda propagante na estrutura. Pode-se consultar os trabalhos de Loh e Ro[11] e Hariri et al [10] (ver figura 6.b) para uma leitura mais aprofundada, que aborda com detalhes aspectos construtivos e o princípio de funcionamento dessa abordagem. Pelos resultados apresentados pelo artigo de Loh e Ro [11] a diferença de fase que implica em maior velocidade do motor é de aproximadamente 90° e a frequência de operação que impõe maior velocidade está próxima a um valor médio entre duas frequências naturais da viga. Caso a frequência seja ligeiramente menor que a frequência média, o rotor se movimenta em uma sentido e caso a frequência seja ligeiramente maior, a o rotor se desloca no outro sentido. Se a frequência média for utilizada o rotor permanece imóvel.

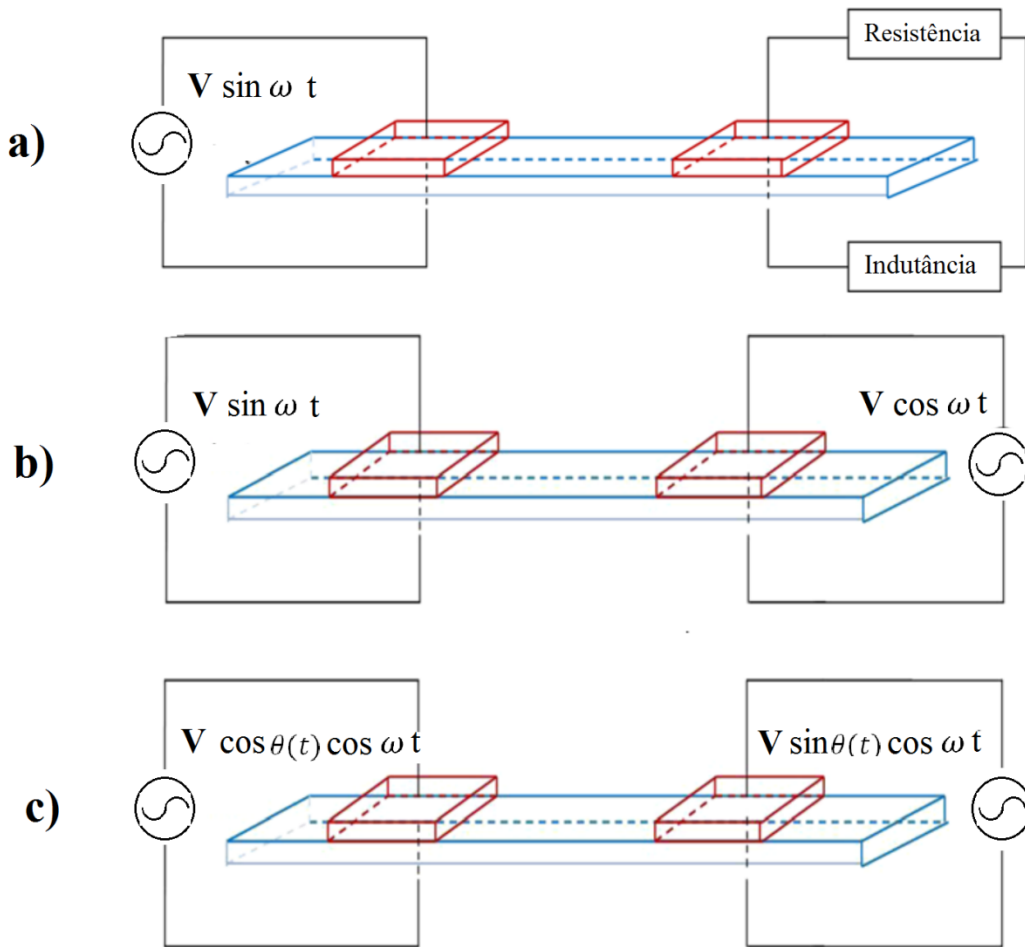


Figura 6: Modelos de excitação de um modo(6.a), dois modos (6.b) e um modo usando variação de fase (6.c) (adaptado de [11]).

Um terceiro modo possível de acionar o motor é utilizando variação de fase em um dos atuadores, conforme apresentado por em Daysuke Koyama em [14]. Nesse método de acionamento excitações harmônicas de mesma frequência são aplicadas nos transdutores de forma a gerar uma onda estacionária na viga (ver figura 6.c). A distância entre os atuadores $d = \frac{(2n+1)}{4} \lambda$ deve garantir a diferença de fase espacial de $\pm\pi/2$ entre as ondas estacionárias geradas, onde $n \in N$ e λ é o comprimento da onda estacionária excitada an viga. A deslocamento de flexão da viga no eixo neutro é dado apresentado na equação (26) onde “A” é a amplitude de deslocamento e “k” é o numero de onda:

$$u = A \cos \theta \cos kx \cos \omega t \pm A \sin \theta \sin kx \cos \omega t = A \cos(kx \pm \theta) \cos \omega t \quad (26)$$

A equação (26) mostra que ao variar a fase “ θ ” a onda estacionária desloca-se na direção do comprimento da viga, sendo possível controlar a onda a partir da fase. A relação entre a variação da fase e o deslocamento da onda não é linear.

2.5 Seleção do acionamento e modelo do protótipo

Nesse projeto optou-se por adotar o design de motor similar ao apresentado nos trabalhos de referência [4] e [11], que utiliza transdutores Langevin, porém que seja acionado por variação de fase conforme a referência [14]. A figura 7 ilustra a estrutura adotada para o transportador. Os motivos para essa escolha foram:

Estrutura mais robusta

Motores de superposição conforme os da figura 5.a apresentam um funcionamento muito sensível ao valor de carregamento externo quando comparados aos motores lineares de viga simples. Portanto um motor com estrutura de viga simples (similar a figura 5.b) é mais apropriado para a aplicação.

Melhor desempenho

O uso de transdutores do tipo Langevin parafusados à estrutura apresenta melhor desempenho quando comparado a simplesmente colar cerâmicas piezelétricas a estrutura. Para aplicações de alta frequência as placas de cerâmica ficam reestritas a baixos valores de comprimento (quando comparados com a dimensão de largura), uma vez que os modos de vibrar da viga para altas frequências apresentam maiores número de onda, ou seja, a onda propagante possui menor comprimento de onda. Ao utilizar cerâmicas de baixo comprimento observa-se que a *flexão principal da cerâmica se dá no sentido da seção transversal da viga*, pois a maior dimensão da cerâmica é paralela a dimensão de largura da viga. Nesse caso, o deslocamento é máximo no centro da viga e muito baixo próximos a extremidades da mesma. Por isso, a onda propagante gerada apresenta baixos deslocamentos, ou seja, baixo desempenho. Portanto optou-se por utilizar transdutores Langevin.

Acionamento mais eficiente

Os métodos de acionamento de absorção e excitação de dois modos (figuras 6.a e 6.b respectivamente) indicados por [4],[10] e [11] além de serem prejudicados pela presença de amortecimento no material da viga são muito sensíveis a incertezas inerentes a fabricação. A excitação de dois modos requer que a frequência de operação do transportador seja a média aritmética de duas frequências naturais de flexão da viga. Tal frequência deve também ser igual a frequência natural dos transdutores Langevin pois assim maiores amplitudes de deslocamento são obtidas. Existe muita inexatidão com associadas as propriedades do material e qualidade de fabricação de todas as peças para garantir a frequência de operação desejada. Assim, foi escolhido o método de acionamento usado no levitador de partículas da referência [14] (figura 6.c), porque o acionamento é mais simples, confiável e o amortecimento do material não prejudica o funcionamento do dispositivo.

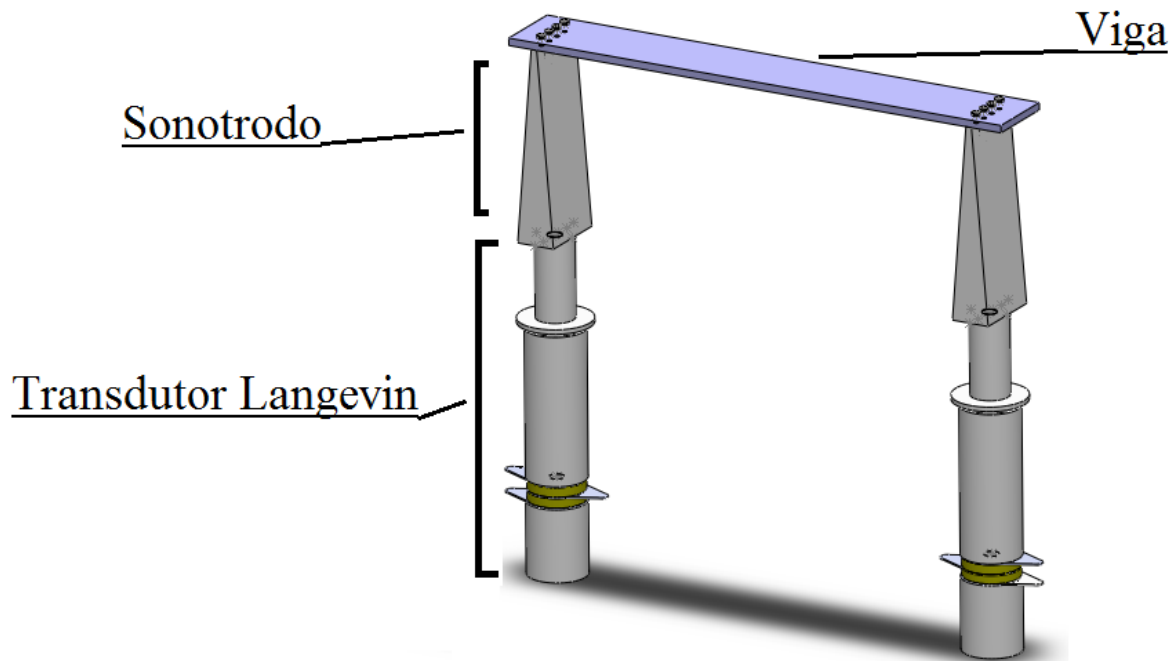


Figura 7: Estrutura adotada para o transportador.

3. Implementação Numérica

As partes do transportador serão modeladas com auxílio do software comercial de elementos finitos ANSYS utilizando linguagem APDL (ANSYS Parametric Design Language) serão realizadas análises modais e harmônica. A linguagem APDL permite utilização de comandos para definição de geometrias, criação de malhas, definição condições de contorno cujas entradas são parâmetros, ou seja, variáveis de programação definidas pelo usuário, havendo também uma interface gráfica que auxilia no desenvolvimento do pré-processamento, solução e pós-processamento. A linguagem APDL também permite o uso estruturas lógicas tradicionais de programação como, por exemplo, IF-THEN-ELSE e loops WHILE.

Os códigos elaborados para obter os resultados apresentados nesse texto se encontram nos anexos A. A seguir segue uma descrição genérica adotada nas simulações. A simulação computacional é dividida em três etapas:

1-) Pré-processamento: Nessa etapa são definidos os valores dos parâmetros de análise e em seguida cria-se a geometria. Depois disso, é gerada a malha da estrutura. Para as cerâmicas piezelétricas é utilizado o elemento do tipo “PLANE223” que dispõe de 8 nós (ver figura 8) onde as propriedades do material PZT-4 que constam na tabela 2 são definidas, sendo que sua polarização da cerâmica se encontra na direção Y. Para as demais partes da estrutura é utilizado o elemento “PLANE183” que possui 8 nós (ver também na figura 8). Ambos os tipos de elementos podem ser configurados como elementos finitos planos ou axissimétricos. Quando um elemento axissimétrico é

empregado, é possível definir também a posição do eixo de simetria adotado para esse elemento. Uma descrição mais detalhada a respeito desses tipos de elementos finitos pode ser encontrada no manual do software.

2-) Solução: Nessa etapa seleciona-se o tipo de análise a ser feita (modal ou harmônica) para em seguida definir as condições de contorno e parâmetros da simulação como método de solução e frequências utilizadas.

3-) Pós-processamento: Nessa etapa obtém-se a visualização de resultados através de gráficos, animações, tabelas etc.

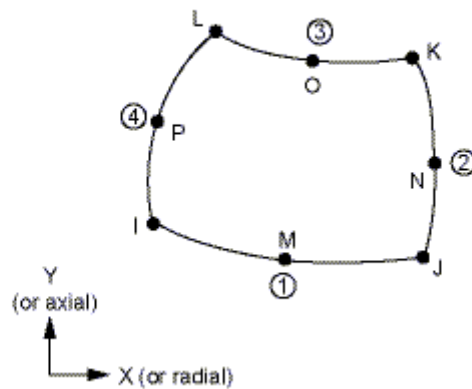


Figura 8: Imagem que ilustra tanto o elemento PLANE 223 e 183 (Imagem retirada do tutorial do ANSYS).

4. Metodologia experimental

Nessa seção são apresentados detalhes de sobre como foi realizado acionamento elétrico do transportador e como deve ser montado o transportador. Nos anexos C do trabalho constam os desenhos de fabricação e conjunto de todas as peças que compõe o protótipo.

4.1 Transdutor Langevin e sonotrodo

O transdutor Langevin utilizado é composto por três peças identificadas como “Bot”, “Amp” e “Sono” (ver anexo C). Onde a parte de baixo “Bot” (parte inferior) liga as cerâmicas ao amplificador “Amp” (amplificador) por meio de um parafuso M10, existe também um pequeno tubo “iso” de PVC isolando o parafuso das cerâmicas. Um parafuso M10 sem cabeça une o amplificador ao sonotrodo “Sono” e quatro parafusos M3 devem prender o transportador ao sonotrodo. Na figura 9 indica-se as partes principais do transdutor, maiores detalhes podem ser observados no anexo C .

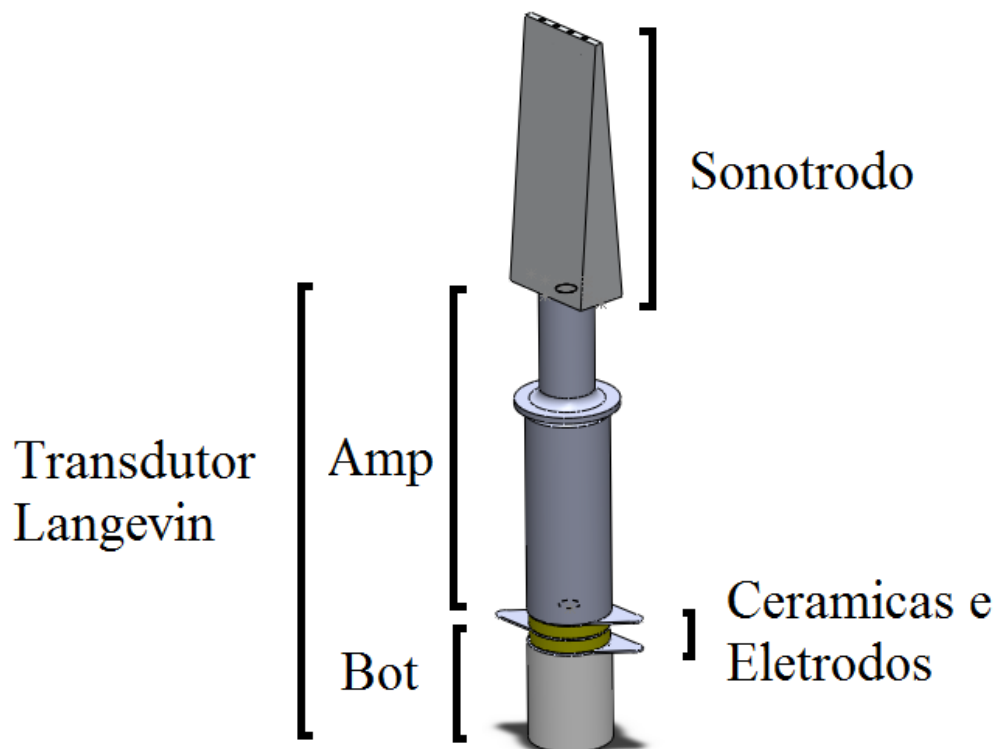


Figura 9: Identificação das partes do transdutor Langevin e sonotrodo.

Em cada Langevin são usadas duas cerâmicas de PZT-4 com 1.5” (38,1 mm) de diâmetro externo, 0.5” (12,7 mm) de diâmetro interno e 0.25” (6,35 mm) de espessura. As cerâmicas são inseridas no transdutor com suas polaridades apontando em sentidos opostos e é necessário aplicar uma pré-tensão nas cerâmicas para prevenir sua quebra durante a expansão. Os valores de pré-tensão recomendados se encontram entre 30 Pa e 40 Pa um torquímetro é utilizado para aplicar um valor de torque que implique nessa tensão na superfície das cerâmicas. Um cálculo aproximado é realizado determinar o valor a ser aplicado.

$$\tau = 0,2 \cdot F \cdot d_{M10} = \frac{0,2 \cdot P_c \cdot d_{M10}}{A_c} \quad (27)$$

Onde:

τ : Torque aplicado no parafuso;

$F = P_c/A_c$: Força aplicada no parafuso;

P_c : Pré-tensão aplicada na cerâmica onde $30 Pa < P_c < 40Pa$;

$A_c = \frac{\pi(d_{ext}^2 - d_{int}^2)}{4}$: Área das cerâmicas sujeita a carregamento;

$d_{ext} = 38,1$ mm :Diametro externo da cerâmica;

$d_{int} = 12,7$ mm :Diametro interno da cerâmica;

$d_{M10} = 10$ mm: Diametro externo do parafuso;

Portanto, aplicando os valores das dimensões da cerâmica e do parafuso o torque que deve ser aplicado varia entre 60 N.m até 79 N.m aproximadamente. Tais valores de torque são considerados altos para parafusos M10, então utilizou-se parafusos de alta resistência. A durante a aplicação do torque no parafuso é recomendado tomar a precaução de curto circuitar os eletrodos da cerâmicas piezelétricas para dissipar a diferença de tensão advindo da pré-carga.

O sonotrodo é uma peça responsável por transferir a energia vibratória do transdutor de forma a causar flexão na viga. O sonotrodo não faz parte do transdor Langevin.

4.2 Acionamento

O diagrama da figura 10 ilustra esquematicamente as conexões elétricas realizadas para o acionar do motor. Um gerador de funções é utilizado para criar dois sinais senoidais defasados de baixa tensão que são a conectados aos amplificadores. Os sinais de tensão amplificada são conectados finalmente nos transdutores Langevin. Para identificar as frequências naturais dos transdutores Langevin e dos transportadores, foi utilizado o vibrômetro a laser. O vibrômetro fornece um sinal “V” de tensão proporcional à velocidade de deslocamento no ponto de medição. O sinal senoidal é observado por um osciloscópio e a frequência “ ω ” é a mesma do gerador de funções. Integrando o sinal de velocidade temos que a amplitude de deslocamento “A” é:

$$A = \frac{V}{\omega} \quad (28)$$

Os equipamentos utilizados no acionamento do motor foram:

Gerador de funções: Agilent 33500B capaz de criar sinais senoidais em frequências de até 30Mhz com amplitude de 100mV.

Amplificador de sinais: AR Worldwide Model 800A3 opera na faixa de 10kHz-3MHz de frequência com potência nominal de 800 W.

Vibrômetro a laser: Polytec OFV-5000 detecta oscilações de até 10m/s de até 24MHz.

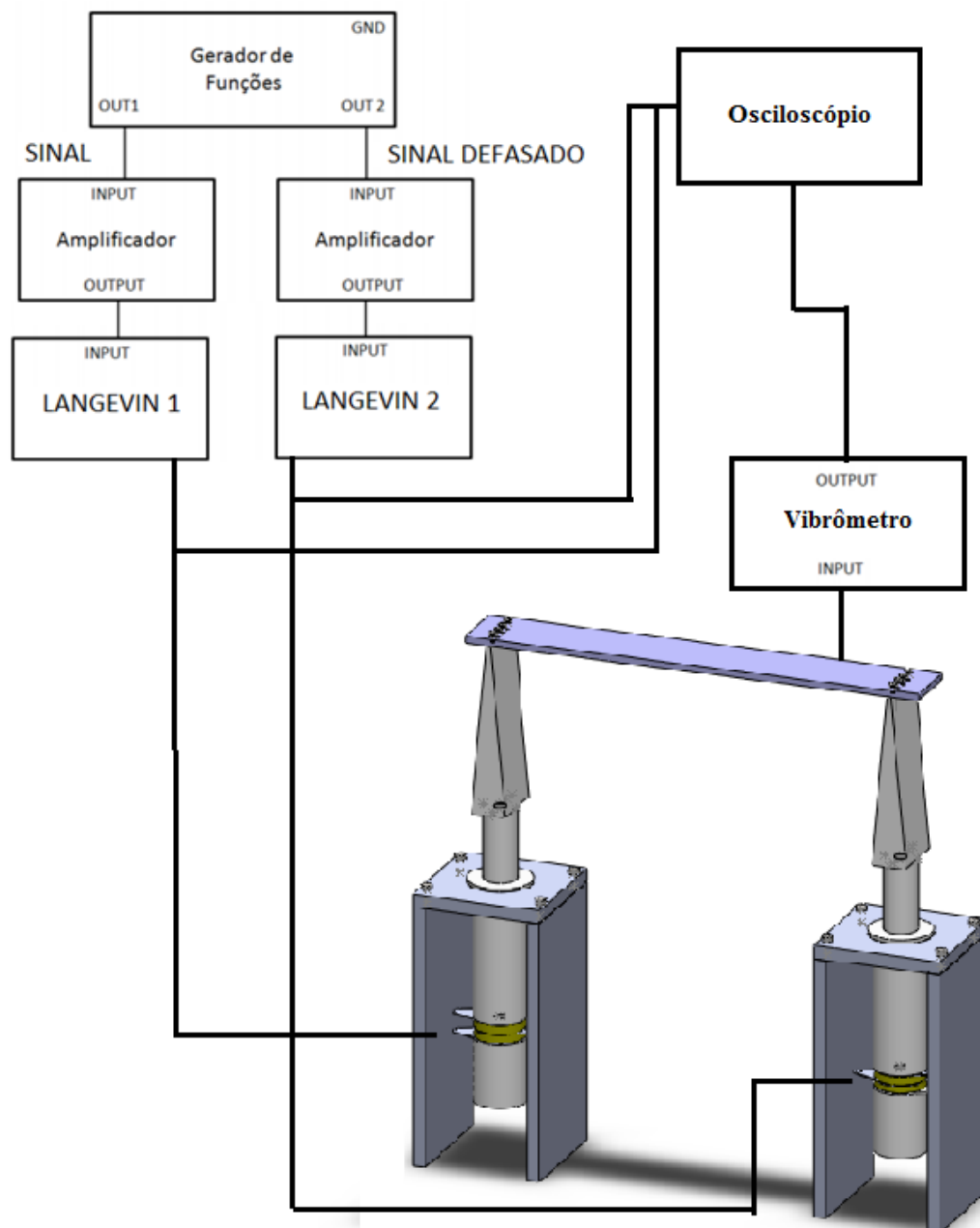


Figura 10: Esquema de conexões elétricas.

Para gerar os sinais de acionamento por variação de fase (ver figura 6.c) conecta-se o gerador de funções a um computador por meio de um cabo ethernet. Um script de MATLAB que utiliza as funções da biblioteca *VISA Support from Instrument Control Toolbox* é usado para gerar o sinal desejado. Tal biblioteca foi desenvolvida para auxiliar o uso de diversos equipamentos da empresa *Agilent*. O código utilizado pode ser encontrado no anexo A.6 deste trabalho.

5. Projeto do transportador

Foram criados dois modelos bidimensionais, o primeiro modelo considera apenas um transdutor Langevin, enquanto o segundo modelo representa todo o protótipo. Modelos 2D foram escolhidos porque possuem menor custo computacional quando comparado com uma simulação tridimensional e também porque nem todos os modos de vibrar da estrutura são interessantes para o projeto, os modos de vibrar relevantes estão contidos no plano bidimensional estudado.

Materiais

Ligas de alumínio possuem boa impedância e normalmente são empregados em motores ultrassônicos lineares. Como não se sabe com exatidão qual a liga de alumínio disponível na oficina da universidade, foram assumidos os valores arbitrários para as propriedades mecânicas para a liga alumínio e aço dos parafusos. A tabela 3 apresenta os valores adotados e ambas as ligas foram modeladas como materiais isotrópicos .

Material	Módulo de Young [GPa]	Peso específico [kg/m ³]	Coefficiente de Poisson
Alumínio	70	2700	0,33
Aço	210	7846.3	0.29

Tabela 3: Propriedades adotadas para os materiais isotrópicos.

Para realizar as simulações recorreu-se ao software comercial de elementos finitos ANSYS, conforme explica o item 3. O procedimento de projeto consistiu em primeiro, realizar análise modais da estrutura. Em seguida é realizada uma análise harmônica para obter os deslocamentos dos nós na superfície da viga. Os códigos para construção dos modelos podem ser encontrados nos anexos A.

5.1 Análise modal do transdutor Langevin

Inicialmente é realizada a análise modal do transdutor Langevin utilizando um modelo bidimensional axissimétrico. Os elementos “PLANE 183” e “PLANE223” são utilizados no modo axissimétrico para malhar as regiões de material isotrópico e piezelétrico, respectivamente. O eixo de simetria é coincidente ao eixo cartesiano vertical de coordenadas y da simulação e a geometria do modelo deve estar presente do lado direito plano onde o eixo x tem coordenadas positivas para que não haja erros. A figura 11 ilustra geometria do modelo além de indicar quais elementos e materiais foram empregados em cada região do transdutor Langevin. As áreas modeladas como aço são os parafusos. Apenas metade do parafuso sem cabeça é considerada nesse modelo.

Nenhuma condição de contorno é aplicada e todas as regiões de materiais e elementos distintos foram coladas umas nas outras. A malha contém um total de 3680 elementos e 11604 nós. A tabela 4 contém as oito primeiras frequências de ressonância obtidas. O código em APDL está disponível no anexo A.1.

Modo	Frequência [Hz]
1	0
2	12235
3	22050
4	30866
5	36531
6	41756
7	47617
8	53596

Tabela 4: Frequências de Ressonância do transdutor Langevin.

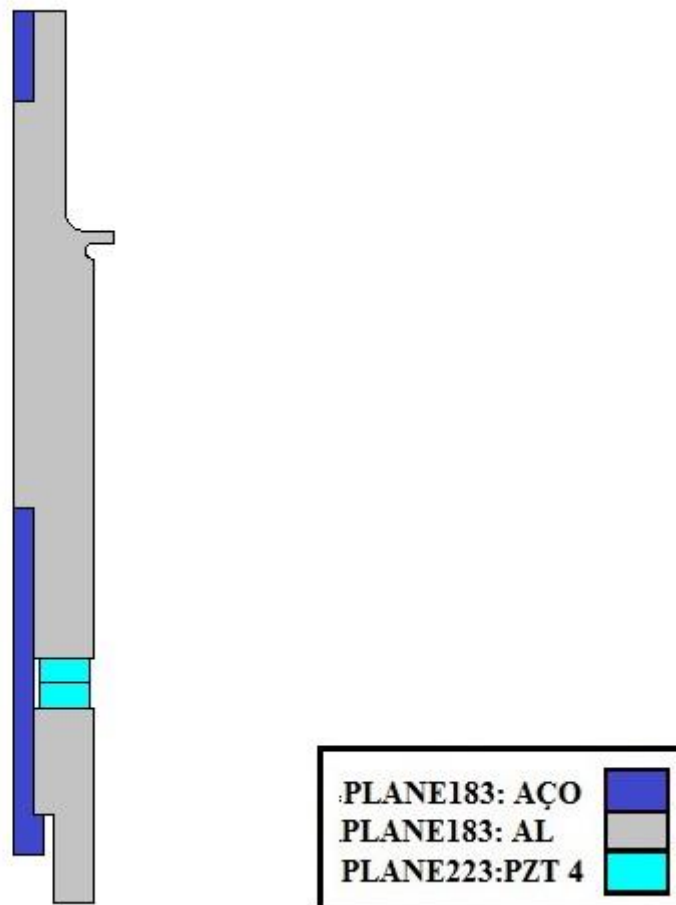


Figura 9: Modelo bidimensional do transdutor Langevin.

5.2 Modelo do transportador montado

O modelo do transportador montado contém os dois transdutores Langevin, sonotrodos e a viga principal, conforme ilustra a figura 12. A malha do modelo possui um total de elementos 5579 e 18164 nós e os códigos para construção desse modelo podem ser encontrados nos anexos A.2 e A.3. Considerações gerais sobre o modelo:

1-) Representatividade: Os parafusos M3 que unem os sonotrodos à viga foram ignorados e a presença da metade do parafuso sem cabeça que liga o sonotrodo ao transdutor Langevin também. Essas duas simplificações foram adotadas pois não é possível fazer uma representação absolutamente fiel do transportador em duas dimensões. Porém um modelo tridimensional do transportador completo apresentaria um custo computacional muito mais alto e como muitas análises harmônicas serão conduzidas é mais vantajoso optar pelo modelo 2D, embora esse seja menos representativo. Tendo em vista que já existem incertezas associadas as propriedades mecânicas dos materiais, erros de fabricação e montagem das peças e diferenças de pré-tensão aplicada aos parafusos, um modelo 3D também apresentaria diferenças com relação ao protótipo real.

2-) Largura da viga: A partir da equação (3) pode-se obter a equação (29). Segundo a equação (27), a frequência natural independe da largura da viga para seções transversais retangulares. A independência da largura também foi verificada utilizando o software de elementos finitos. Quanto mais largo é a viga mais material o transportador pode carregar. Por isso, o valor máximo de 50 mm permitido pelo Langevin será adotado para o projeto.

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{\left(\frac{2\pi}{\lambda_n^1}\right)^2 \left(\frac{EI}{\rho A}\right)^{0.5}}{2\pi} = \frac{2\pi}{\lambda_n^2} \left(\frac{E}{\rho} \frac{bh^3}{12h}\right)^{0.5} = h\pi \sqrt{\frac{E}{3\rho}} \frac{1}{\lambda_n^2} \quad (29)$$

Onde:

L [m]: Comprimento da viga;

b [m]: Largura da viga;

h [m]: Espessura da viga;

$\lambda_n = 2L/n$ [m]: Comprimento de onda [m] ;

$n \geq 1$ e $n \in N$

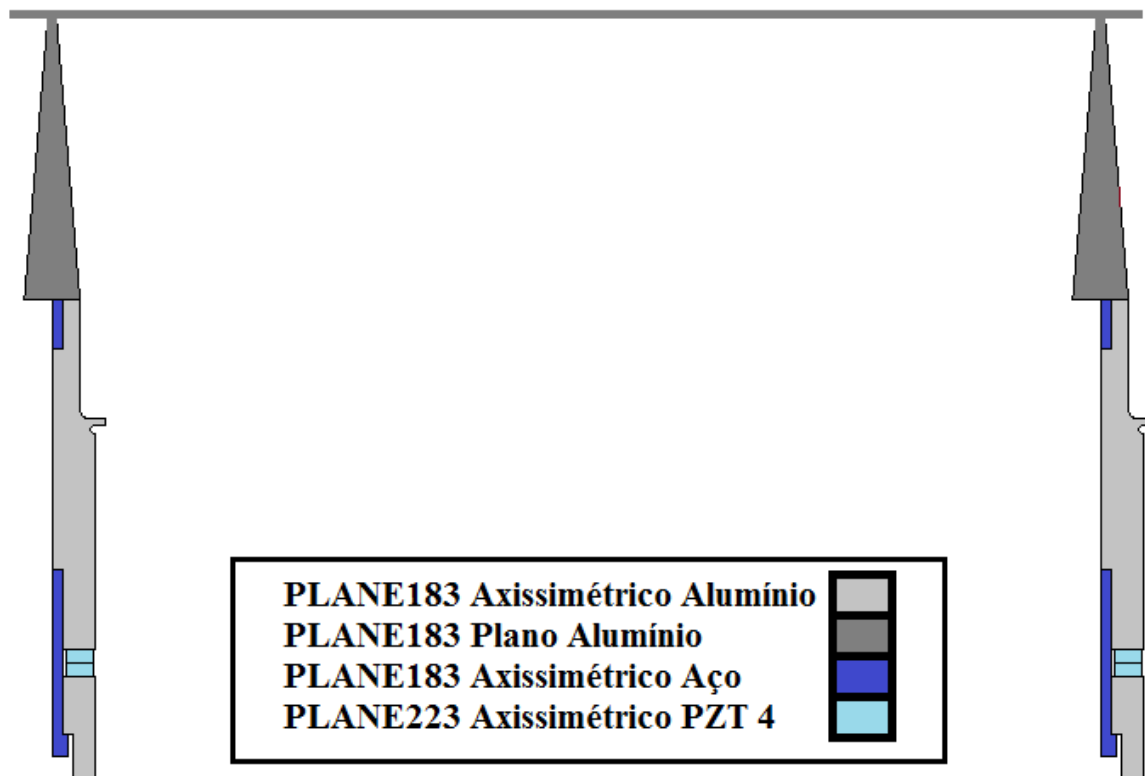


Figura 10: Modelo 2D do transportador montado.

3-) Elementos finitos de diferentes tipos: A figura 12 ilustra os tipos de elementos finitos empregados nas diversas regiões do modelo. Os elementos “PLANE 183” e “PLANE223” são utilizados no modo axissimétrico para malhar as regiões de material isotrópico e piezelétrico pertencentes aos transdutores Langevin, respectivamente. Elementos “PLANE 183” do tipo plano, considerando tensão plana com espessura de 50mm , são utilizados nas regiões dos sonotrodos e viga onde ambos são de liga de alumínio.

Elementos finitos planos são simulados em conjunto com elementos axissimétricos e elementos axissimétricos de diferentes eixo de simetria são simulados no mesmo modelo. A execução dessas duas práticas exige alguns cuidados de programação para que a modelagem seja realizada corretamente. Ao utilizar elementos finitos axissimétricos deve-se considerar apenas uma metade da geometria, conforme explicado na seção 5.2.1. Todas as áreas de diferentes materiais e elementos foram coladas entre si e a ausência de uma das metades da geometria do transdutor Langevin adiciona complexidade ao modelo, isto é, a metade não representada da geometria não pode ser colada ao sonotrodo. Para contornar esse problema, os nós da malha do sonotrodo em contato com a metade respresentada do transdutor Langevin são acoplados simetricamente, um a um, aos nós da outra metade do sonotrodo conforme ilustra a figura 13. O acoplamento consiste em igualar os deslocamentos em todas as direções dos nós pertencentes a essas duas linhas. Outro cuidado a ser tomado é o de definir um

segundo sistema de coordenadas cartesianas onde o eixo y seja coincidente ao eixo de axissimetria do segundo transdutor Langevin. Deve-se especificar o eixo de axissimetria adotado para os elementos axissimétricos de cada região antes de discretizar o modelo.

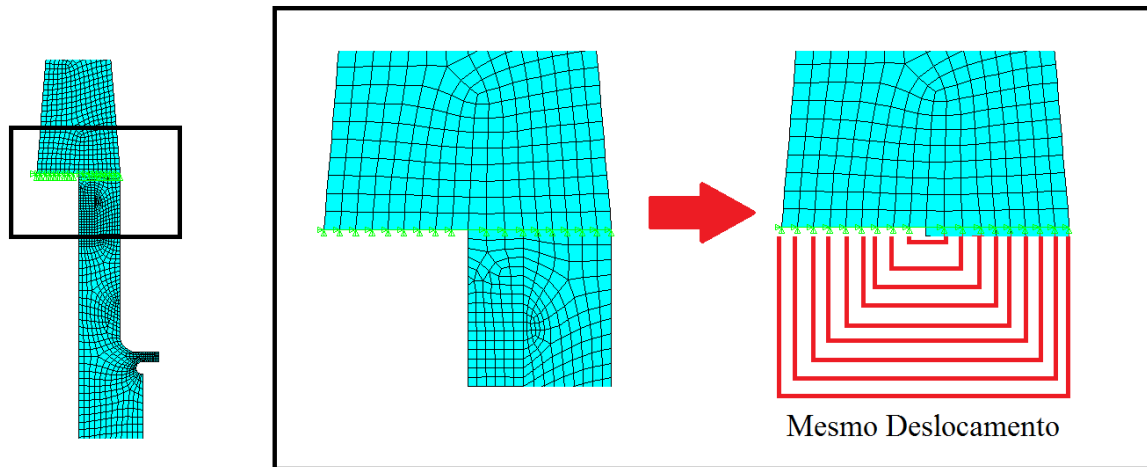


Figura 11: Acoplamento dos nós.

4-) Condições de contorno adotadas : Para a análise modal utiliza-se apenas uma condição de contorno, que é a restrição de movimento na direção horizontal “x” nas linhas centrais dos transdutores langevin. Essa condição de contorno é empregada pois o suporte empregado para sustentar o transportador restringe esse movimento. Para a análise harmônica são também aplicados os carregamentos de potencial elétricos nas cerâmicas piezelétricas, ver figura 12. A linha de contato entre as cerâmicas possui carga nula, enquanto as outras duas faces remanescentes recebem carregamentos elétricos de sinais opostos. Na prática as cerâmicas são posicionadas com suas polarizações apontadas em sentidos opostos e apenas um mesmo sinal de tensão elétrica é empregado nessas duas faces, porém no ambiente computacional é mais simples programar um carregamento de sinal oposto do que redefinir a polarização do material piezelétrico. Os sinais elétricos dos dois Langevins possuem fases diferentes conforme mencionado na seção 2.4.

É executado uma análise harmônica para cada fase aplicada no carregamento. Os deslocamentos nodais da linha superior da viga são armazenados em uma matriz para cada uma das análises harmônicas. Ao término das simulações os resultados de deslocamento nodal são exportados pelo ANSYS em vários arquivos de texto (.txt) para um diretório especificado pelo usuário (ver as últimas linhas do código no anexo A.3). O pós-processamento continua no Matlab, deve-se executar o código em do anexo A.5 onde é feito a leitura dos dados, ordenamento de nós e construção de gráficos 2D que auxiliam a visualização da onda propagante.

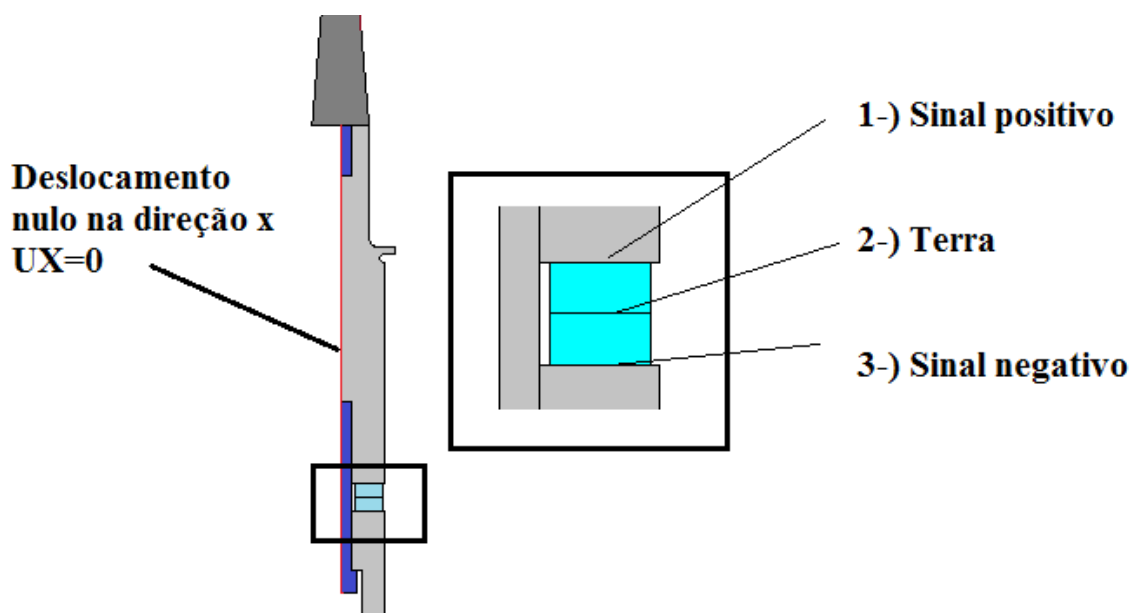


Figura 12: Condições de contorno.

6. Resultados

O modo de vibrar adotado pode ser visto na figura 13, onde a frequência de operação obtida pela simulação por MEF foi de 21296,8 Hz. A figura 14 ilustra o deslocamento das ondas estacionárias em função da fase aplicada nos sinais, em outras palavras a onda propagante. A amplitude de deslocamento varia de acordo com o valor de amortecimento estabelecido na modelagem do material. Para ligas de alumínio recomenda-se que seja adotado um valor entre 0,5 e 1,0%. Na figura 14, o módulo da amplitude máxima varia de acordo com a fase “ θ ” do sinal de acionamento, conforme ilustra as figuras 15 e 16. Para um carregamento de 300 V (máximo permitido) e amortecimento do material de 1% foi observado que o módulo de amplitude máxima varia em torno 0,55 μm .

A figura 18 ilustra o módulo da amplitude de deslocamento na direção Y. Observe que as figuras 14 e 17 apresentam dois ciclos de deslocamento da onda propagante para uma variação na fase de 360°. As figuras 18 e 19 apresentam apenas um ciclo da onda propagante. O módulo do deslocamento é apresentado em figuras a parte para ilustrar a trajetória das partículas de pequeno porte que ficam presas aos nós da onda propagante.

O deslocamento dos nós da onda propagante é não linear em função da fase “ θ ”. A figura 20 mostra a variação da posição dos nós da onda propagante em função de “ θ ”.

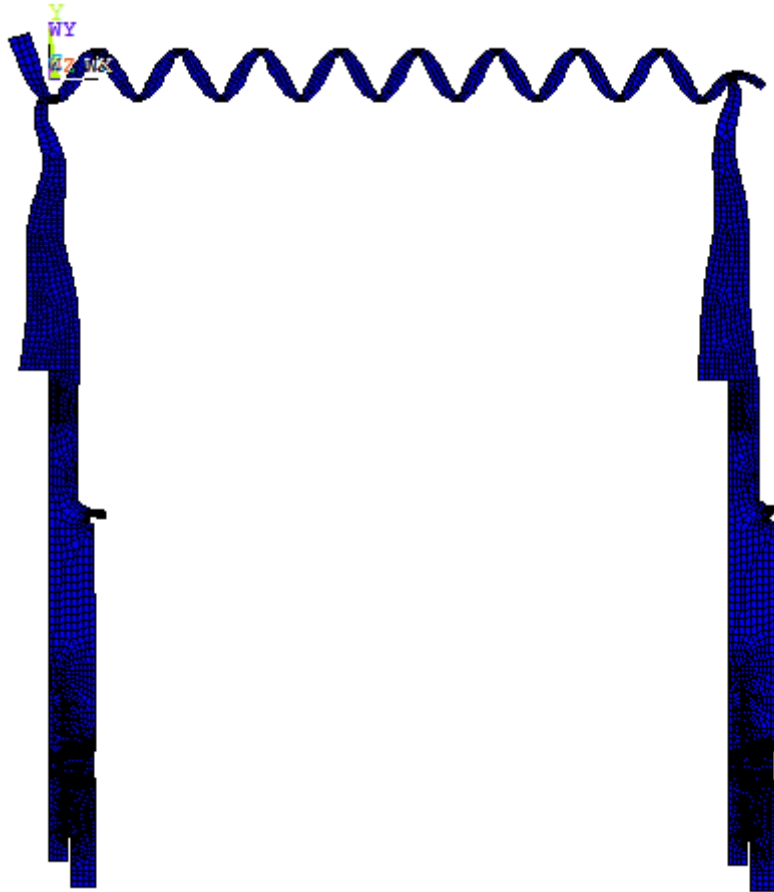


Figura 13: Modo de vibrar adotado, frequência: 21296,8 Hz.

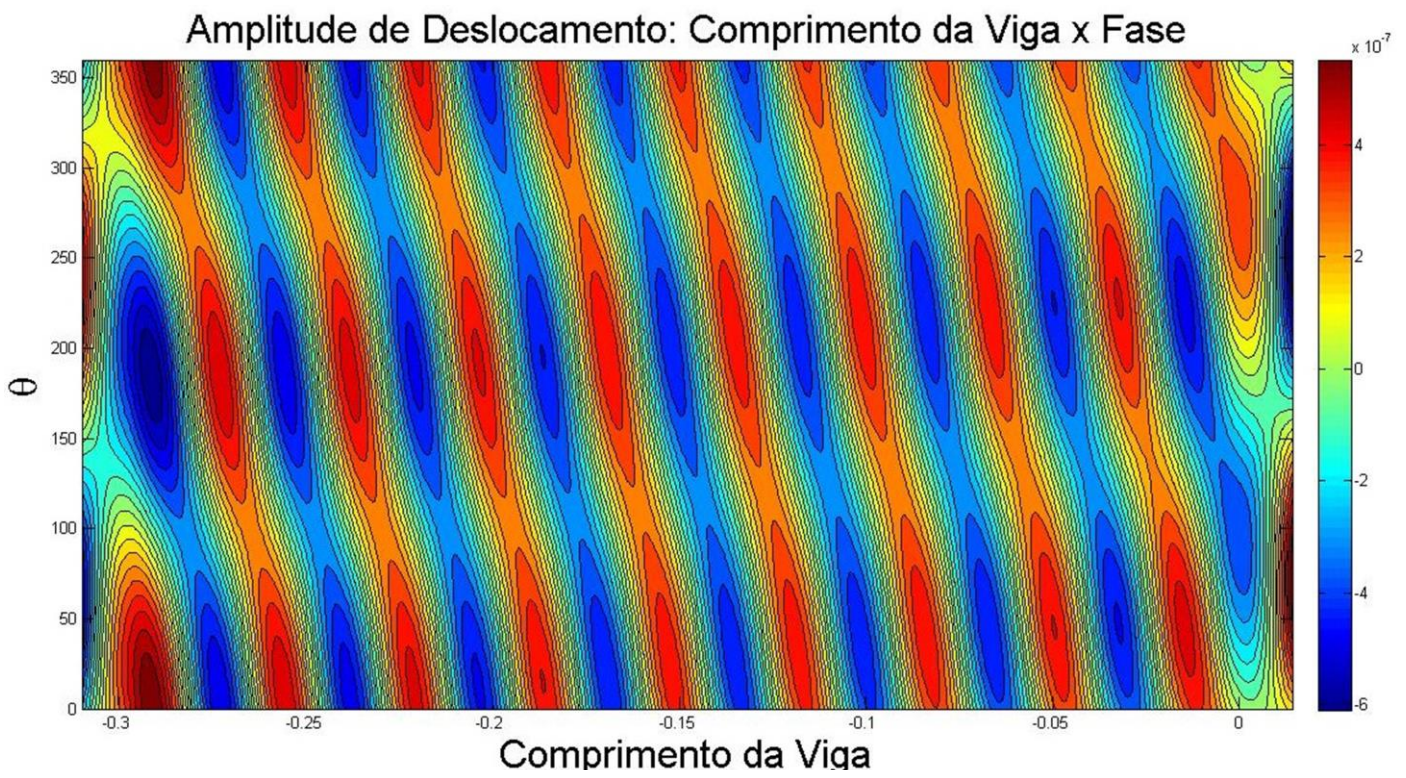


Figura 14: Onda propagante.

Amplitude de Deslocamento: Comprimento da Viga x Fase

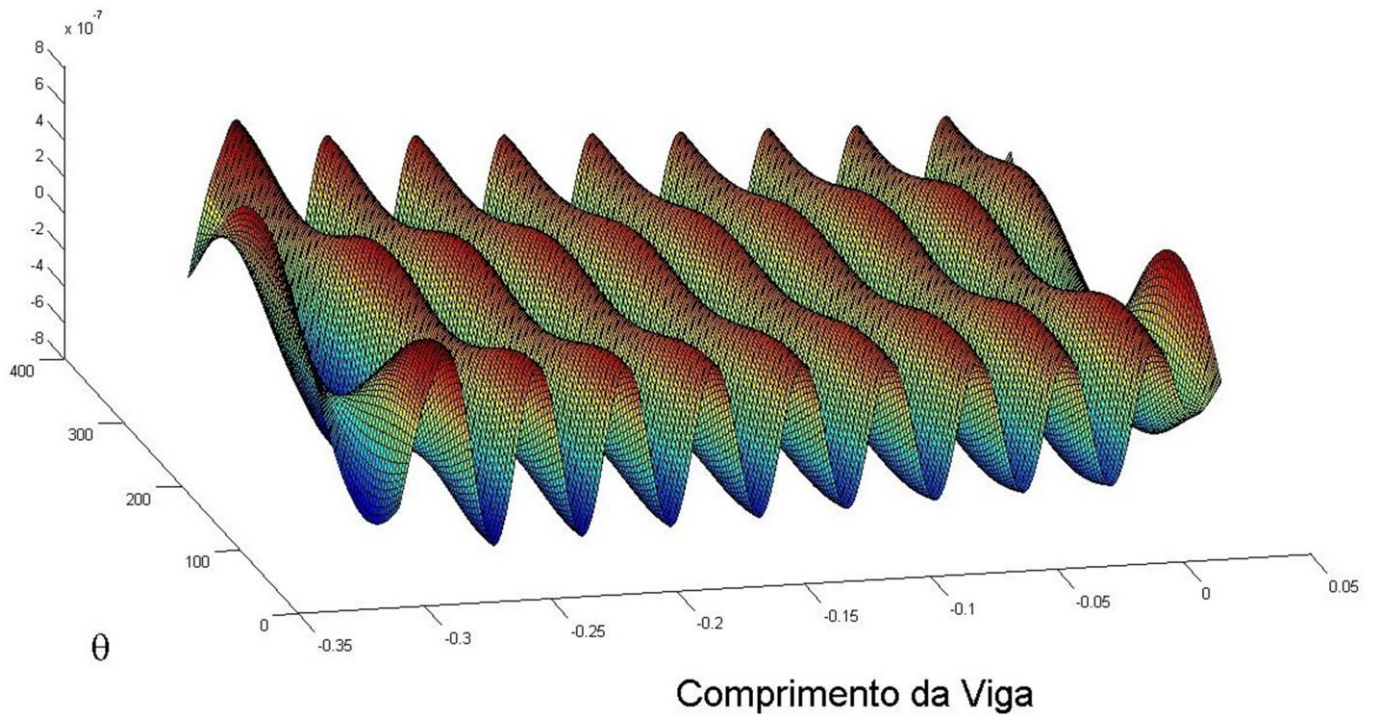


Figura 15: Gráfico de superfície ilustrando a variação da amplitude de deslocamento em função da fase.

Amplitude de Deslocamento: Comprimento da Viga x Fase

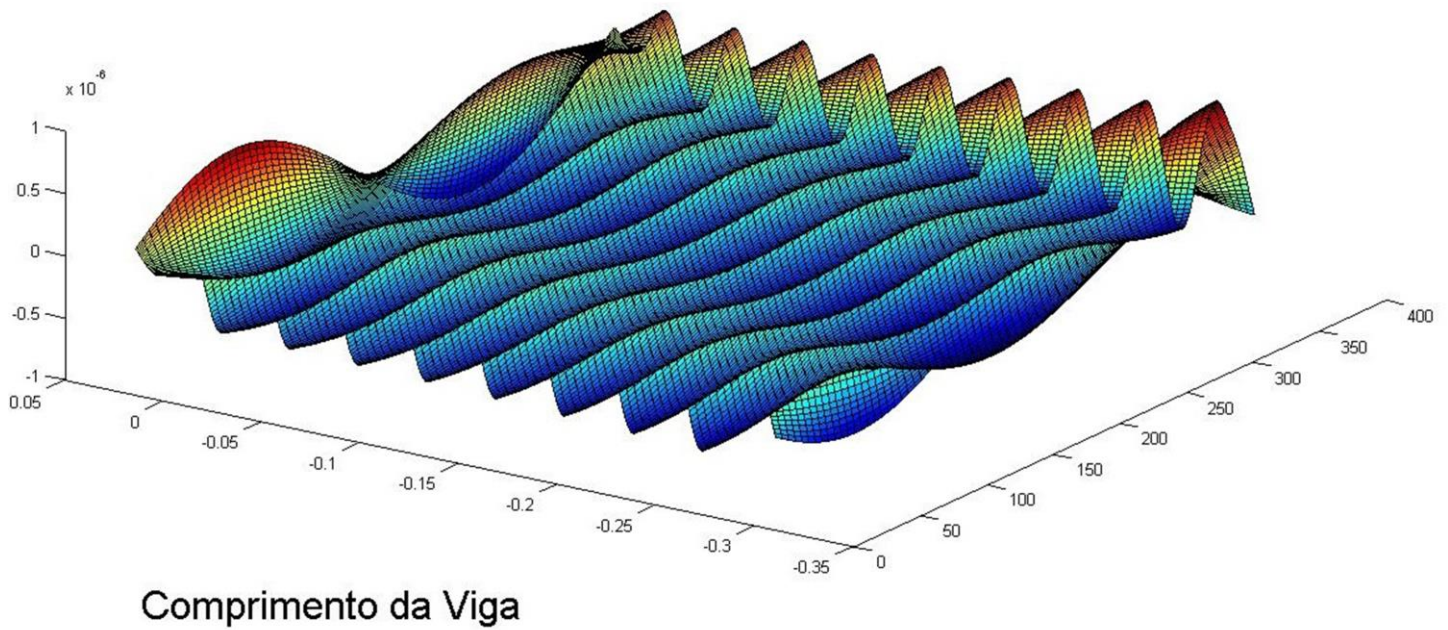


Figura 16: Variação da amplitude de deslocamento em função da fase (outro ângulo).

Módulo da Amplitude de Deslocamento: Comprimento da Viga x Fase

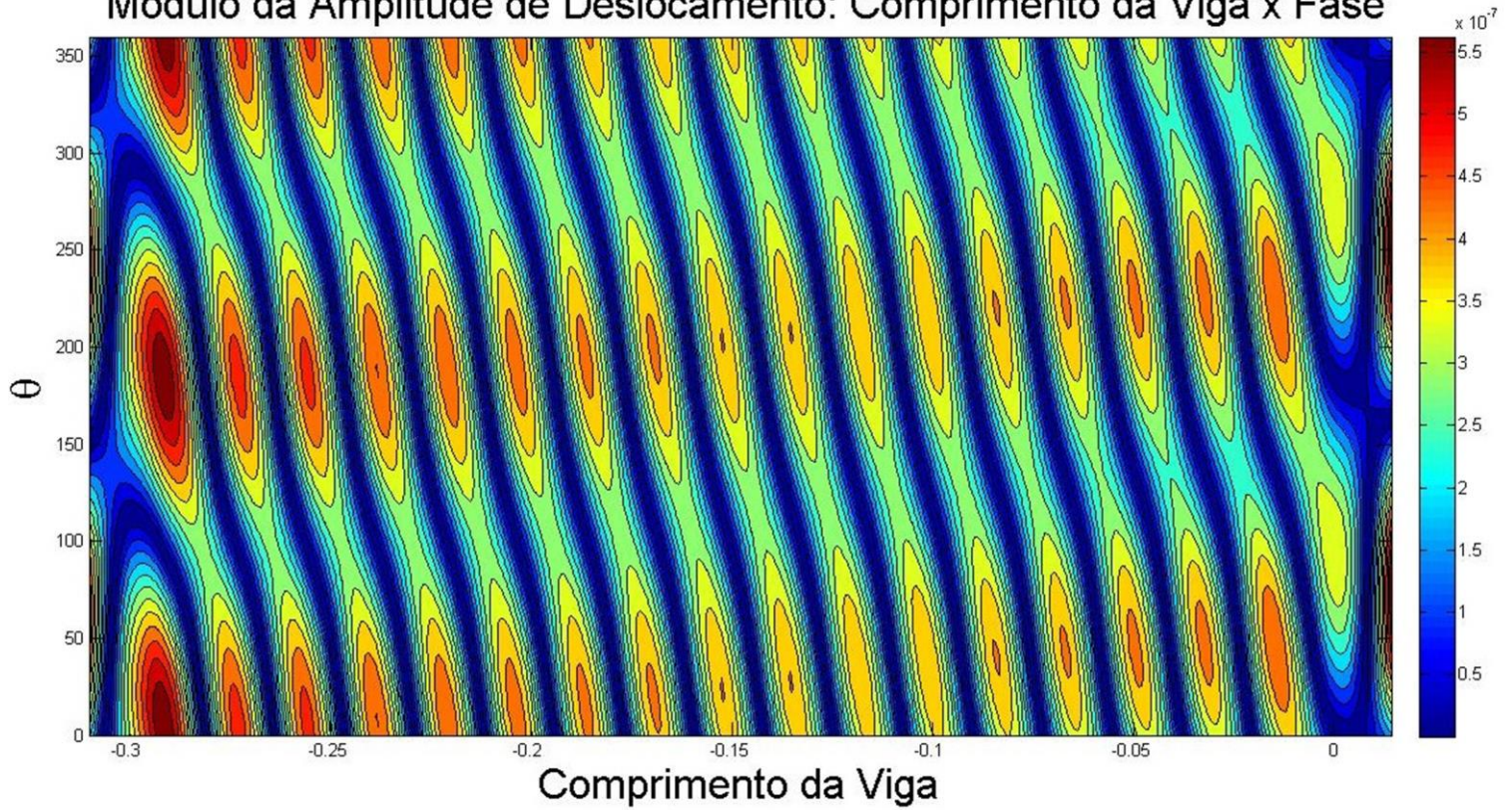


Figura 17: Modulo da Amplitude de deslocamento.

Módulo da Amplitude de Deslocamento: Comprimento da Viga x Fase

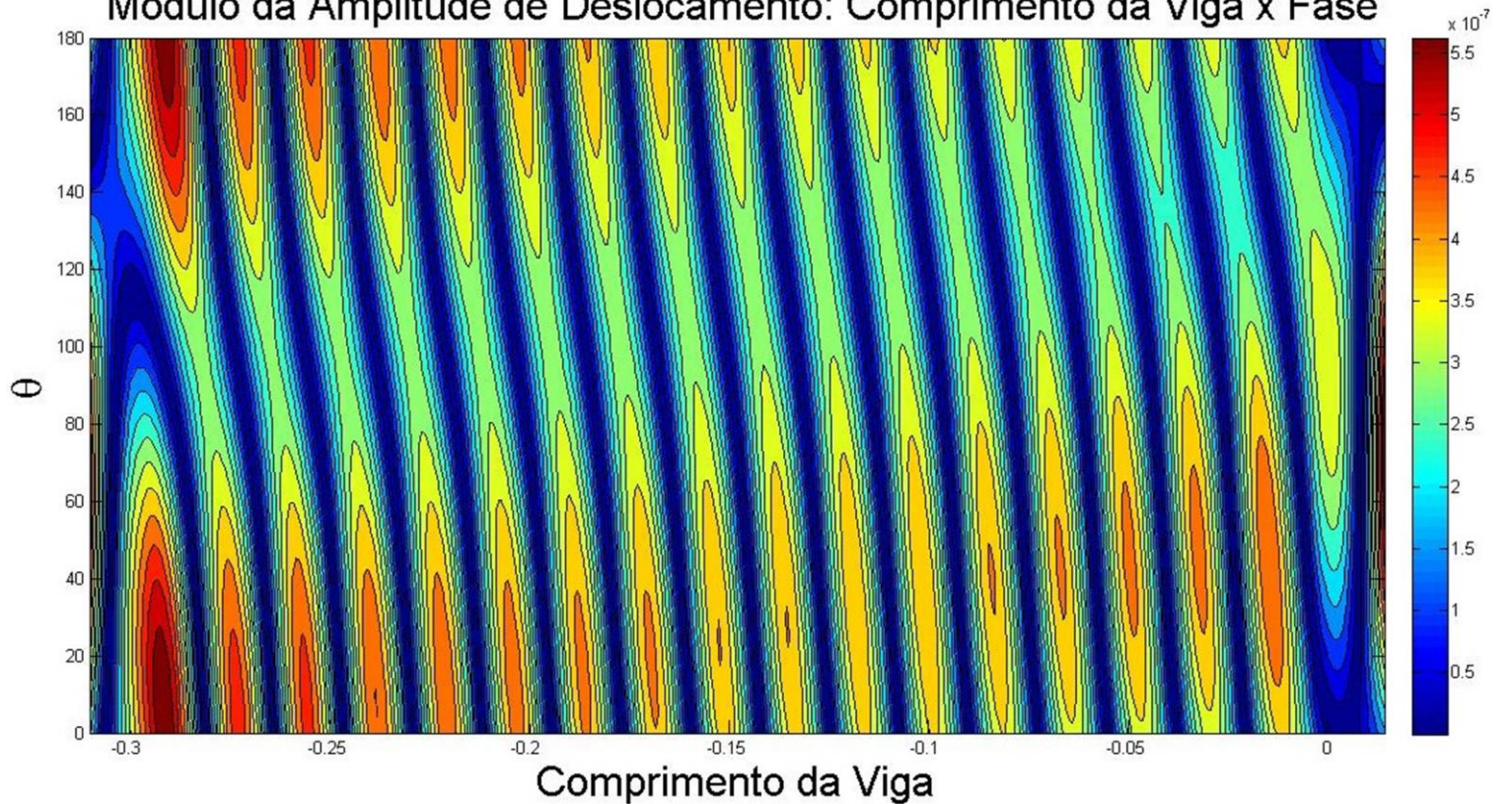
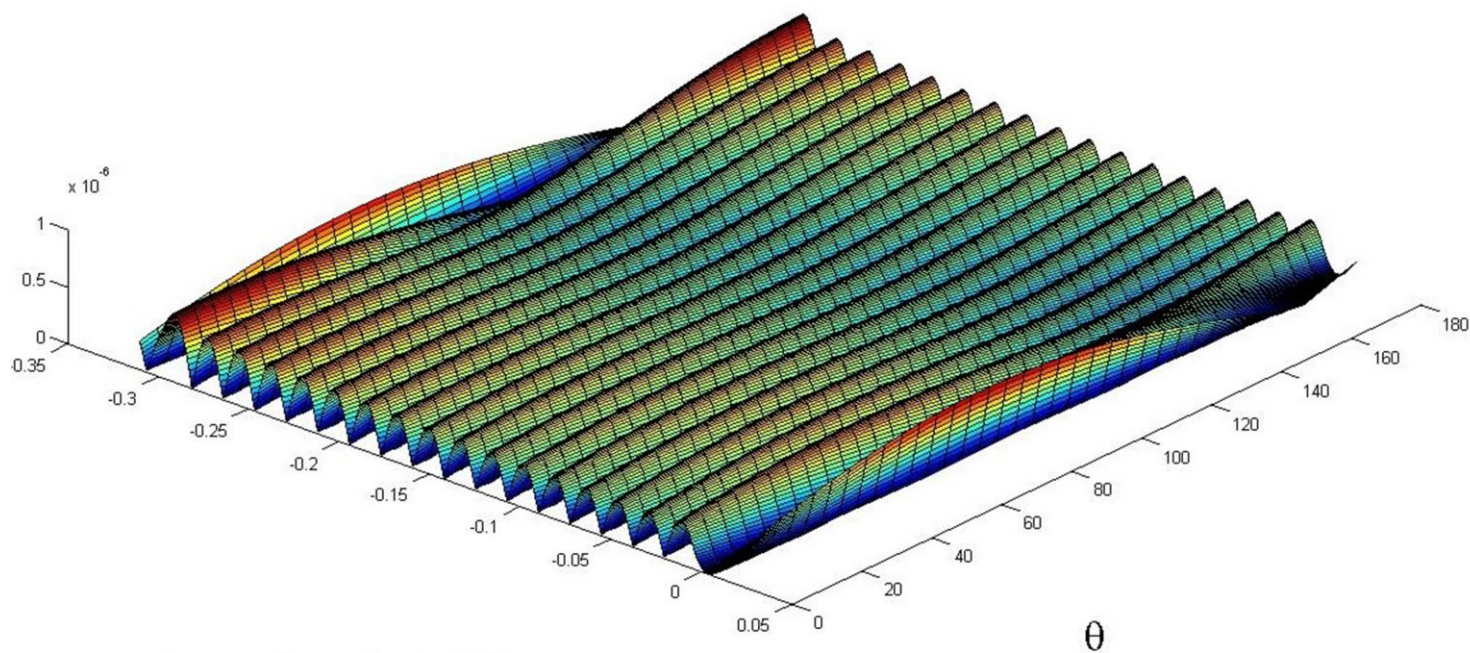


Figura 17: Modulo da amplitude de deslocamento (um periodo).

Módulo da Amplitude de Deslocamento: Comprimento da Viga x Fase



Comprimento da Viga

Figura 18: Gráfico de superfície do módulo da amplitude de deslocamento.

Posição do nó da onda propagante x Fase θ

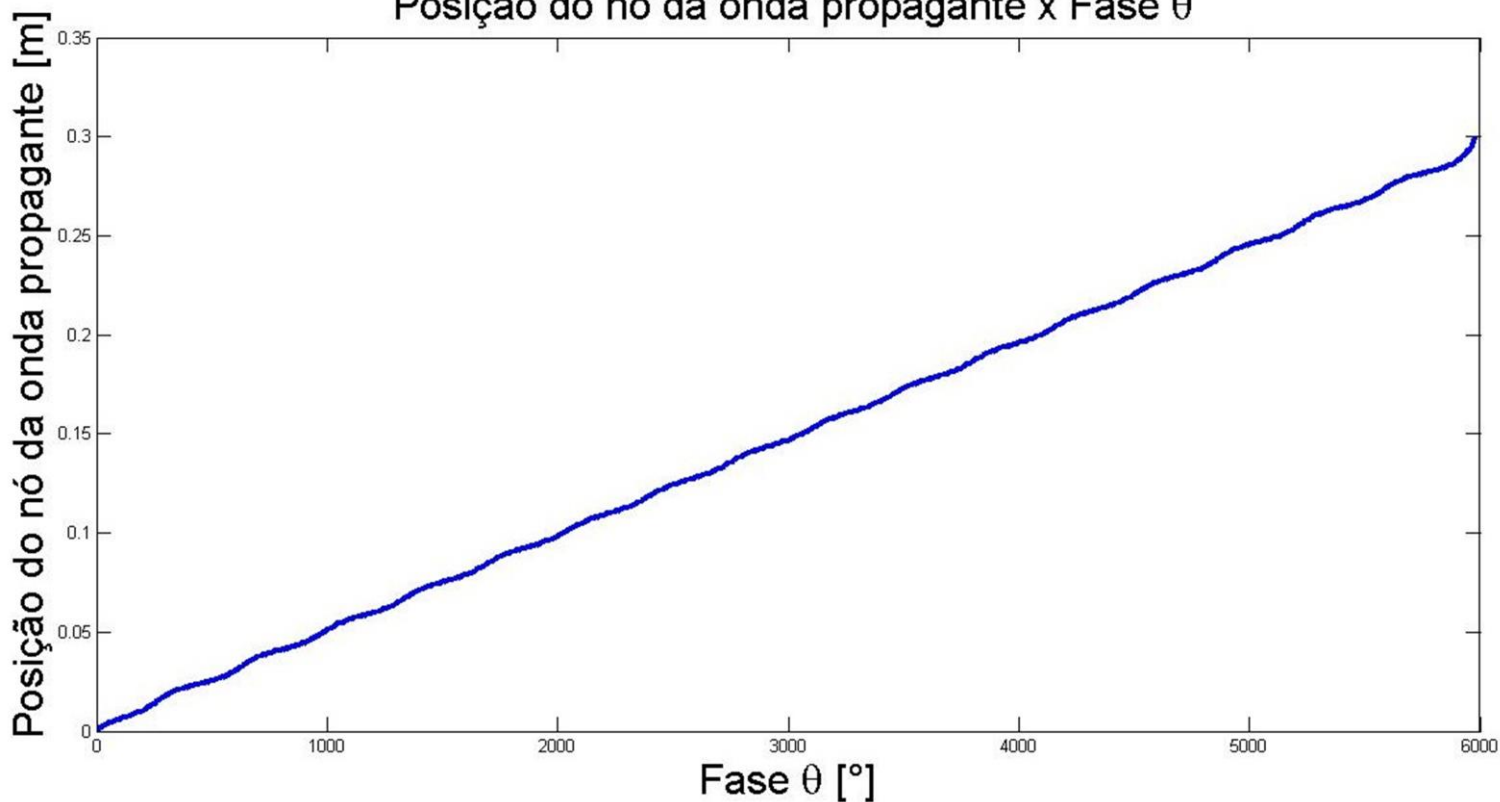


Figura 20: Posição do nó da onda propagante em função da fase.

7. Resultados Experimentais

O protótipo foi contruido e os circuitos de acionamento e medição foram instalados, ver figura 21. As frequências naturais medidas dos transdutores Langevin construídos foram de **22250 Hz** e **22150 Hz** e quando comparadas ao resultado teórico (22050 Hz) apresentam diferenças de **0,9%** e **0,45%**, respectivamente. A amplitude de deslocamento dos transdutores Langevin variam com a frequência do sinal de excitação. Conforme esperado, para excitações de frequência distantes dos valores de ressonância o ganho de amplitude é significativamente menor. Devido a limitações construtivas, ambos os transdutores apresentam amplitudes de deslocamento diferentes para a mesma frequência. Para obter o mesmo deslocamento em ambos transdutores é necessário aumentar o a tensão de entrada do transdutor que apresenta menor amplitude de deslocamento.

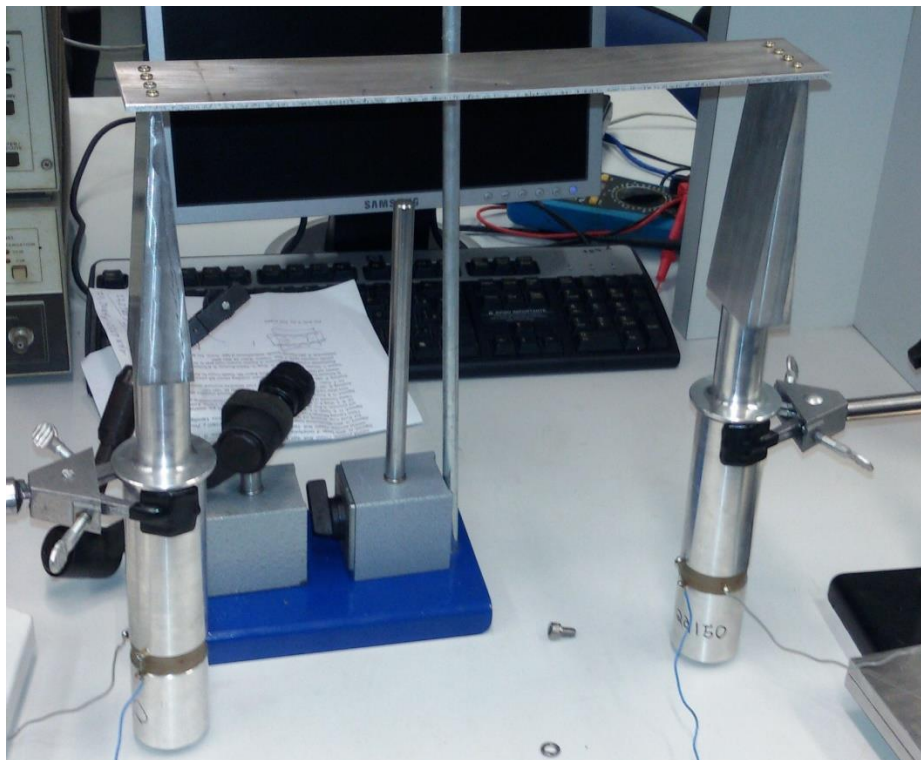
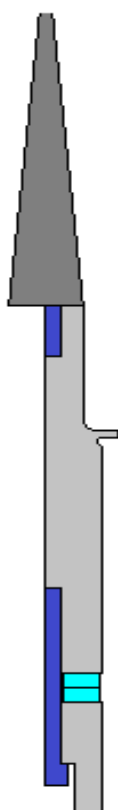


Figura 21: O protótipo construído.

A frequência natural do protipo montado, ou seja, a frequência de operação do transportador é diferente das frequências de ressonância dos transdutores Langevin. Portanto, para frequências próximas de 21300 Hz a amplitude de deslocamento dos transdudres é insuficientes para excitar uma onda propagante de amplitude de deslocamento capaz de movimentar as particulas. Ao acionar o transportador, é possível observar uma onda propagante de amplitude baixa utilizando o vibrômetro a laser. Os valores de amplitude de deslocamento teóricos obtidos pelo modelo computacional (ver figura 17) são satisfatórios e por isso o protótipo foi construído. Porém, era esperado que a diferença entre as frequências de ressonância do protótipo montado e dos

Langevins fossem menores. Além disso é possível que o parâmetro de amortecimento adotado no modelo computacional seja muito baixo quando comparado com o valor experimental, explicando as diferença entre os resultados esperados e observados. É necessário reajustar o projeto da viga de forma que a frequência de ressonância do modo de vibrar da viga esteja dentro do intervalo de frequências de operação dos transdutores Langevin.

A fim de investigar os motivos da discrepância entre os resultados obtidos por meio da simulação computacional e o que foi obtido com o protótipo construído, foram medidas as frequências de ressonância dos transdutores Langevin acoplados com os sonotrodos. O intuito dessa medição era comparar os valores de frequência natural com os resultados apresentados por um novo modelo computacional incluído apenas o transdutor Langevin acoplado com ao sonotrodo, conforme ilustra a figura 22. Nesse modelo foram empregadas as mesmas propriedades de material, mesmos elementos finitos e condições de contorno da modelagem do protótipo montado (fig. 13) apresentados anteriormente na seção 5.2. O código para construção desse modelo pode ser encontrado no anexo A.7 desse texto.



Modo	Frequência [Hz]
1	0
2	6881,19
3	15752,2
4	21424,8
5	29127,9

Figura 22: Modelo computacional composto por Langevin e sonotrodo e tabela de resultados de frequência de ressonância obtidas.

As primeiras frequências de ressonância ultrassônicas medida experimentalmente para os dois transdutores Langevin contruídos foram de 20470 e 20618 Hz. Divergindo em 4.4% e 3.76%, respectivamente, do valor calculado pelo modelo computacional

(21424,8 Hz). Os transdutores contruídos apresentam maior ganho de amplitude de deslocamento em uma frequência mais baixa do que a esperada, explicando portanto porquê os resultados de deslocamentos do modelo montado (figura 13) terem diferidos do que foi observado experimentalmente. O principal fator associado a diferença entre os resultados são as incertezas das propriedades do material. Na prática, as propriedades elásticas, piezoelétrica e de constante dielétricas fornecidas pelo fabricante do material da cerâmica apresentam erros maiores do que 2.5%, 5% e 10% respectivamente [15]. Além disso, a liga de alumínio utilizada para fabricar a viga, sonotrodos e transdutores Langevins e a liga de aço dos parafusos são desconhecidas e portanto existe mais uma incerteza nos valores de propriedades assumidos para esses materiais.

Dado que os valores de ressonância dos transdutores Langevin são conhecidos, é possível então reprojeter a viga do transportador para que o modo de vibrar desejado dessa peça tenha frequência natural próxima a ressonância dos transdutores. Para determinar as frequências naturais dos possíveis projetos de viga foram utilizadas duas abordagens: a primeira foi a expressão da equação (29) e a outra foi uma modelagem com MEF. Os resultados apresentados pelas duas abordagens são coerentes entre si (para boa parte dos modos), porém, a expressão analítica provém um modelo mais simples e que é capaz de apresentar os resultados de maneira mais clara e com menor custo computacional. O modelo em MEF é usado apenas para validação e comparação de resultados. Ambos os códigos para construção desses modelos podem ser encontrados nos anexos A.8 e A.9.

A figura 23 ilustra os valores de frequência natural de flexão em função do modo de vibrar escolhido e do comprimento total da viga, para uma viga de 3mm de espessura e modo de elasticidade de 70 GPa. A massa da viga construída anteriormente foi medida em uma balança eletrônica de precisão de 0.01g. O intuito dessa medição era obter a massa específica do material da viga e reduzir a incerteza no cálculo das frequências naturais. Obteve-se que a massa específica da liga é de aproximadamente **3007,6 kg/m³**. A fim de selecionar projetos de viga que apresentem modos de vibrar próximos da ressonância dos transdutores Langevin, foi criada a figura 24 onde estão destacadas na região em azul os projetos de viga cujo modo de vibrar de flexão esteja dentro do intervalo de 20400 e 20700 Hz. A região branca e vermelha apresentam projetos de viga com frequência de ressonância fora do intervalo desejado.

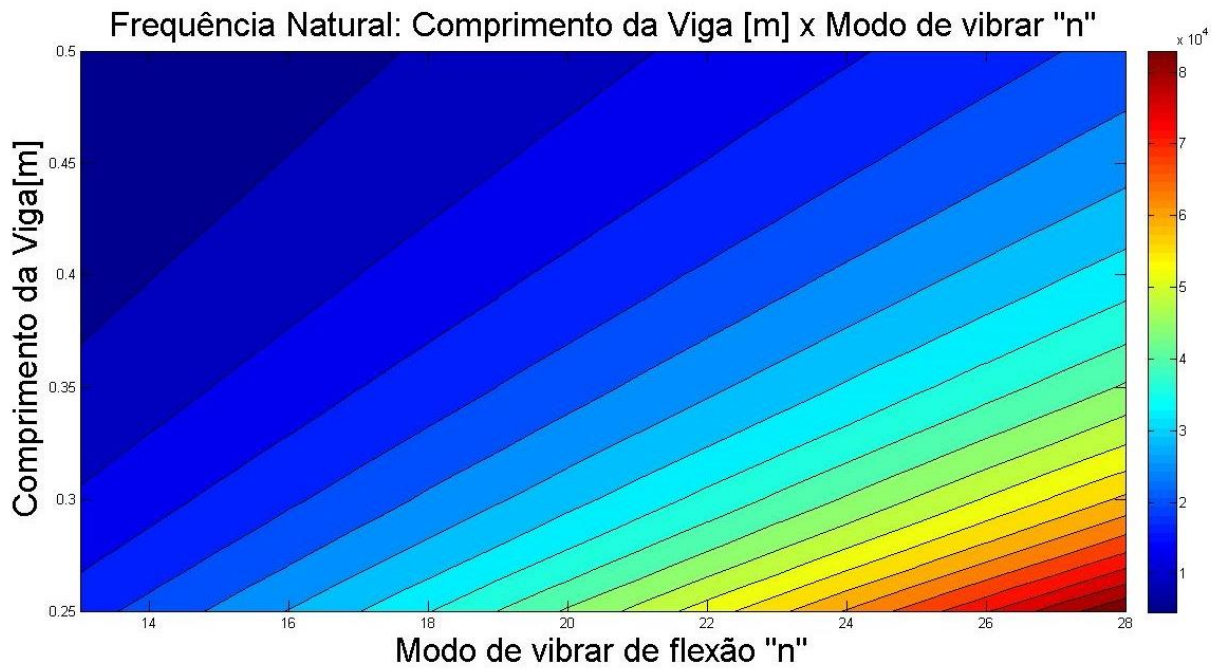


Figura 23: Frequências naturais de flexão em função do comprimento da viga e modo de vibrar selecionando.

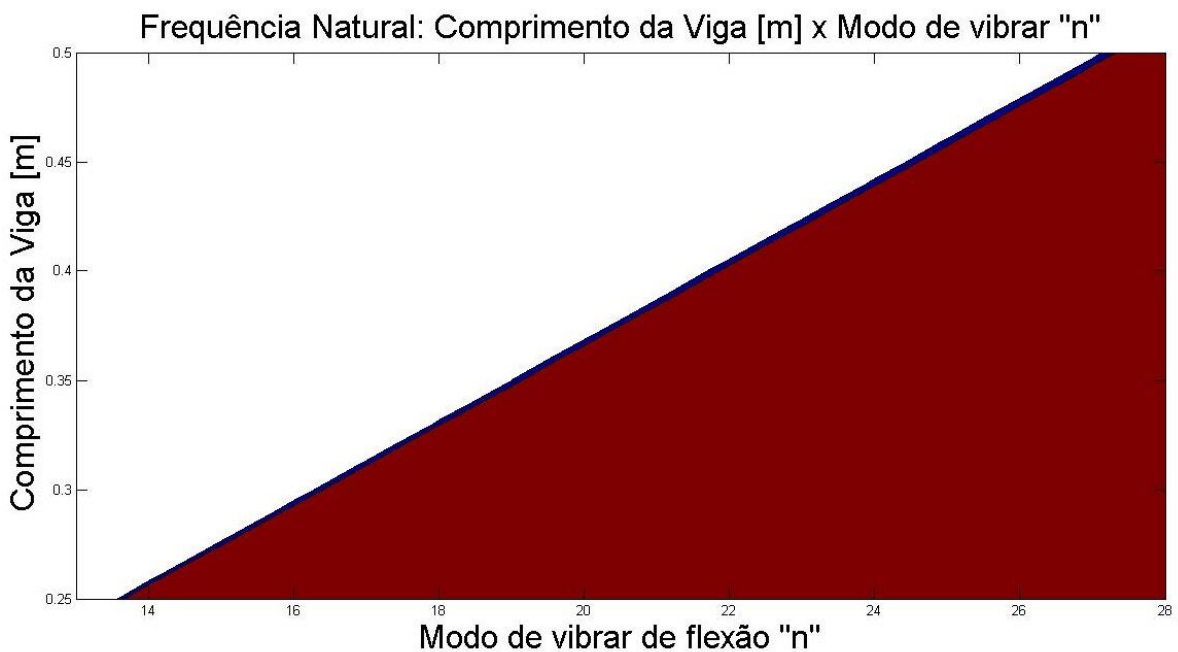


Figura 24: Espaço no gráfico com projetos de viga entre 20400 e 20700 Hz (Região em azul).

A figura 25 apresenta o comprimento de onda dos possíveis projeto de viga apresentados. O comprimento de onda do modo de vibrar selecionado é uma informação relevante para determinar o ponto de posicionamento dos transdutores Langevin sobre a viga. A distância entre os dois Langevins é a distância útil onde as partículas serão transportadas e essa distância deve ser maximizada. Além disso, para que seja gerada uma onda propagante a distância entre os dois transdutores deve garantir a defasagem de um quarto do comprimento da onda estacionária do modo selecionado.

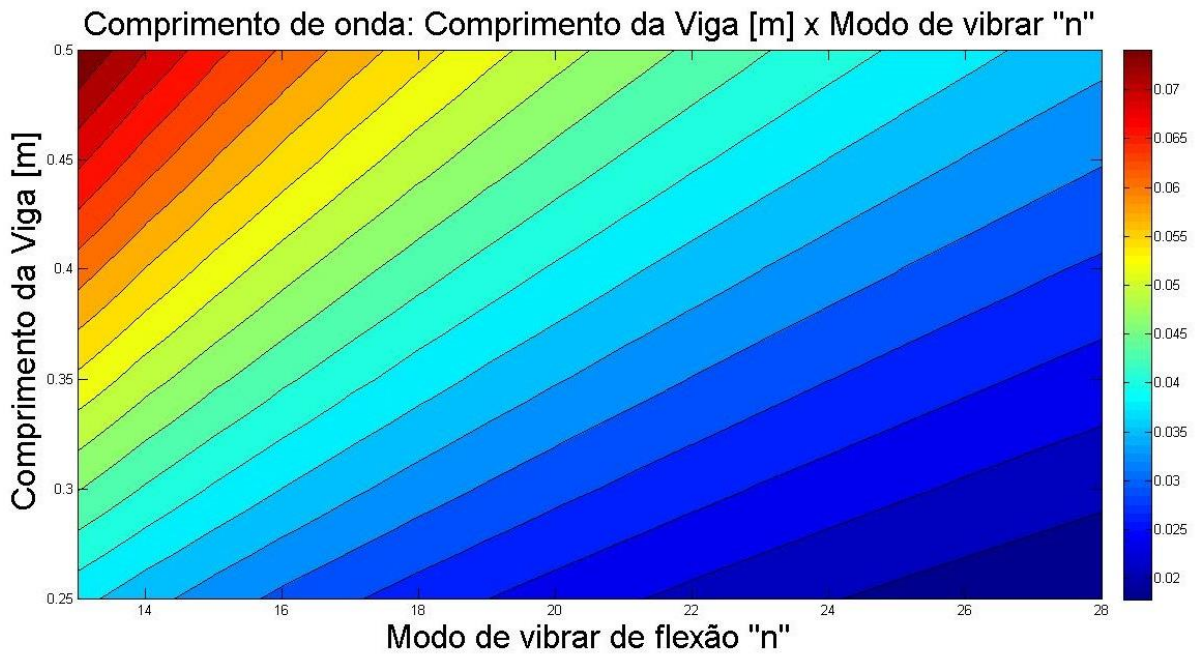


Figura 25: Comprimento de onda em função do comprimento da viga e do modo de vibrar selecionado.

A tabela 5 mostra alguns possíveis projetos de reajuste da viga do transportador, enquanto a tabela 6 mostra a diferença entre as frequências de ressonância obtidas pelos modelos analítico e numérico. Os resultados apresentados pelos dois modelos divergem entre si.

Tabela 5: Projetos possíveis para reajuste da viga do transportador

Modo	Comprimento [m]	Comprimento util [m]	Posição do Langevin [m]
14	0.250	0.2232	0.0134

Tabela 6: as frequências de ressonância obtidas pelos modelos analítico e numérico.

Modo	Frequência modelo Analítico [Hz]	Frequência modelo numérico [Hz]
14	20580	18362

Ao acionar o protótipo construído com as dimensões apresentadas na tabela 5 na faixa de frequência de operação dos transdutores Langevins, observou-se que o décimo terceiro ($n=13$) modo vibrar de flexão da viga era excitado em uma frequência próxima ao valor esperado para o décimo quarto modo de vibrar segundo o modelo analítico. A figura 26 mostra a onda estacionária obtida para a frequência de 20485 Hz. Observe que o material particulado encontra-se estagnado nos nós da onda estacionária da viga. A presença de 12 nós e 13 vales caracterizam o décimo terceiro modo de vibrar de flexão conforme ilustra a figura 27.

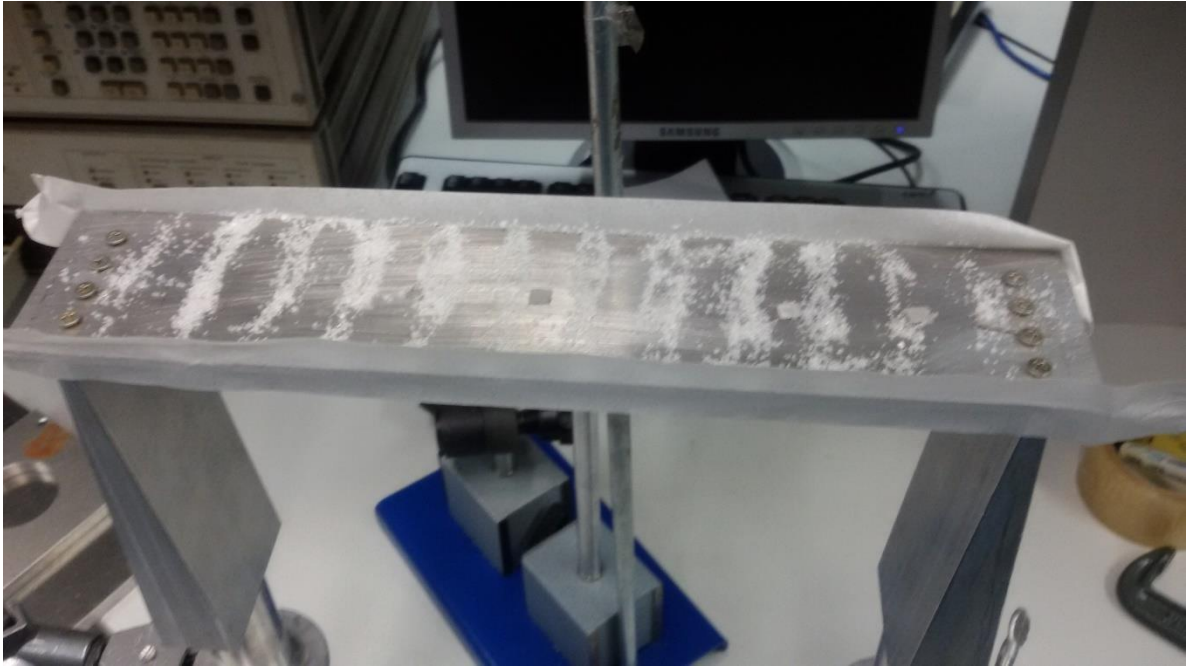


Figura 19: Décimo terceiro modo de vibrar observado experimentalmente na frequência de 20485 Hz. As fitas nos cantos da viga são apenas para impedir a queda do material.



Figura 207: Ilustração do décimo terceiro modo de vibrar de flexão conforme apresentada pelo ANSYS.

A partir do resultado obtido experimentalmente foi possível obter o valor do módulo de elasticidade do material a partir da equação (26):

$$E = \frac{f_n^2}{(h\pi)^2} (\lambda_n^2)^2 (3\rho) = \frac{f_n^2}{(h\pi)^2} \left(\frac{2L}{n}\right)^4 (3\rho) \quad (30)$$

Onde:

$L=0.25$ m : Comprimento da viga;

$\rho = 3007.6$ kg/m³: Massa específica do material;

$h=0.003$ m : Espessura da viga;

$\lambda_n = 2L/n$ [m]: Comprimento de onda [m] ;

$n = 13$: $n \in N$

O módulo de elasticidade da viga obtido pela equação (30) foi de aproximadamente 93.278 GPa. Nenhuma liga de alumínio foi encontrada em catálogos de materiais com as propriedades de densidade e módulo de elasticidade apresentadas.

Como inicialmente esperava-se excitar o décimo quarto modo de vibrar de flexão da viga, o posicionamento dos Langevins não estavam adequados para gerar a onda propagante. Foi realizada uma tentativa de reajustar a posição dos Langevins porém a viga foi avariada no processo de usinagem. Um novo projeto de viga deve ser reconduzido.

8. Conclusões

Nesse trabalho foi proposta uma solução para o desenvolvimento de um transportador de material particulado e foi realizada uma modelagem computacional do transportador. Infelizmente, após a construção do protótipo do transportador não foi possível observar os resultados esperados de forma a garantir o funcionamento do dispositivo. Para obter uma onda propagante de maiores deslocamento ainda é necessário realizar um ajuste no projeto da viga, contudo não foi possível realizar isso a tempo de cumprir o prazo de entrega do projeto.

9. Referências

- [1] **M. Mracek**, J. Wallaschek, **2004**, “A system for powder transport based on piezoelectrically excited ultrasonic progressive waves”, *Materials Chemistry and Physics*, páginas:378–380.
- [2] **Kenji Uchino**, **1997**, “Piezoelectric ultrasonic motors: Overview”, *IOP Publishing Ltd.*
- [3] **Atsuo Kawamura** and Norihiko, **1991**, “Linear Ultrasonic Piezoelectric Actuator “, *IEEE Transactions on industry applications*, VOL 27. NO. 1, paginas 23-26.
- [4] **G.H. Kim**, J.W. Park e S.H. Jeong, **2008**, “Analysis of dynamic characteristics for vibration of flexural beam in ultrasonic transport system”, *Journal of Mechanical Science and Technology*- paginas 1428~1434.
- [5] **Reinhard Lerch**, **1990**, “Simulation of Piezoelectric Devices by Two- and Three-Dimensional Finite Elements”, *IEEE Transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control* vol. 37. N°2- pags. 233-247.
- [6] **Solmaz Tarabi**, **2005**, “ Piezoelectrics for heterogeneous medium”, Master of science material, University of Texas.
- [7] **Po-Shiun Chen**, **2006**, “ Analysis and design of piezoelectric micro-actuator”, Master of mechanical engineering.
- [8] **José M. Fernandez** e Yves Perriard, **2004**, “Characteristics, Modeling and Simulation of a Traveling Wave Ultrasonic Linear Motor”, 2247-2250 *IEEE International Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control Joint 50th Anniversary Conference*.
- [9] **Tobias Hemsel**, Jorg Wallaschek, **2000**, “State of the art and development trends of ultrasonic linear motors”, paginas 663-666 *IEEE Ultrasonic Symposium* .
- [10] **H. Hariri**, Y Bernard and A Razek, **2014** , “A traveling wave piezoelectric beam robot”, *IOP Publishing Ltd.*
- [11] **Byoung-Gook Loh** and Paul I. Ro , **2000**, “An Object Transport System Using Flexural Ultrasonic Progressive Waves Generated by Two-Mode Excitation”, *IEEE* paginas 994-999.
- [12] **Richard G. Holdich**, “ Fundamentals of particle technology” , **2006**, Midland Information technology and publishing.
- [13] **Toshiiku Sashida** e Takashi Kenjo, “ An Introduction to Ultrasonic Motors” , **1993**, Claredon Press- Oxford.

[14] **Daysuke Koyama** e Kentaro Nakamura, “ Noncontact Ultrasonic Transportation of Small Objects Over Long Distances in Air Using a Bending Vibrator and a Reflector”, **2010**, *IEEE Transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control* vol. 57. N°5- pags. 1152-1159.

[15] **C. Y. Kiyono**, N. Perez, E. C. N. Silva, “ Determination of full piezoelectric complex parameters using gradient-based optimization”, **2016**, *IOP Publishing Ltd*.

10. Apêndices

10.1 Modelo de viga com seção em “U”

Experimentou-se projetar um modelo de viga com seção em “U” com cerâmicas coladas a estrutura conforme mostram as figuras 22 e 24:

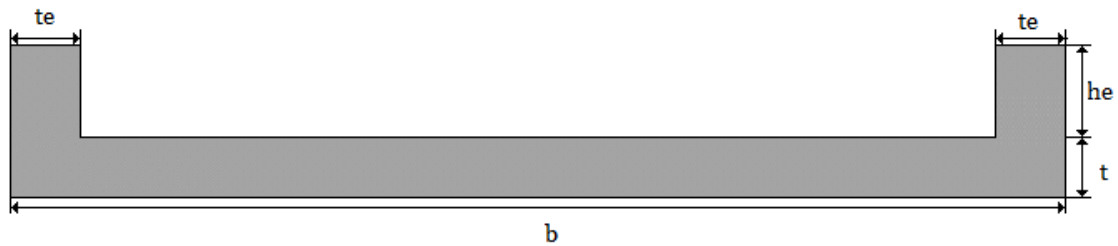


Figura 22: Modelo de viga em seção em "U".

Contudo os resultados obtidos foram insatisfatórios mesmo para um modelo que desconsidera amortecimento. Não somente os valores de deslocamento da superfície da viga apresentaram resultados insuficientes mas também pode-se observar complicações adicionais associadas a geometria da seção da viga. Para altos valores de “ he ”, maiores são os gradientes de deslocamento na direção da seção da viga. A figura 23 ilustra o deslocamento para uma viga de seção em “U” enquanto a a figura 24 ilustra a mesma viga com seção retangular. Percebe-se que a seção em “U” introduz uma rigidez adicional que acaba comprometendo o desempenho do motor uma vez que as velocidades obtidas se tornam menores.

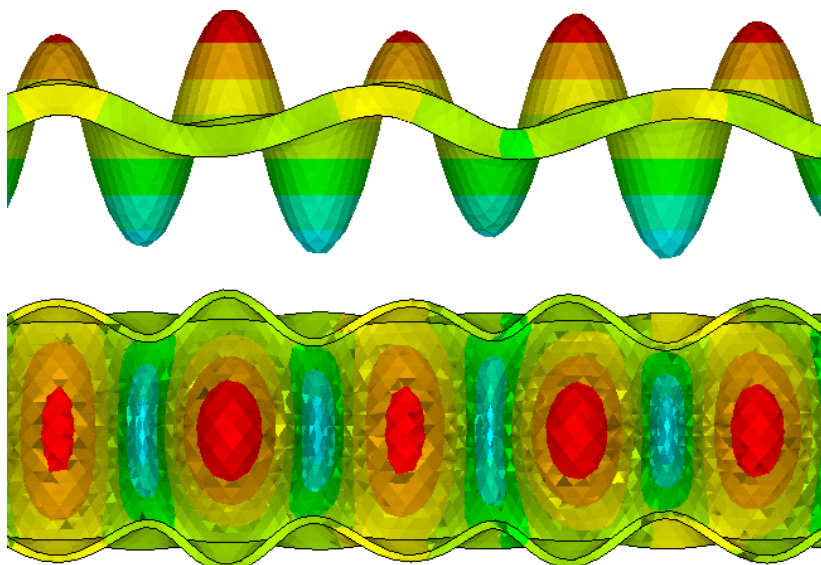


Figura 23: Deslocamento para viga de seção em “U”.

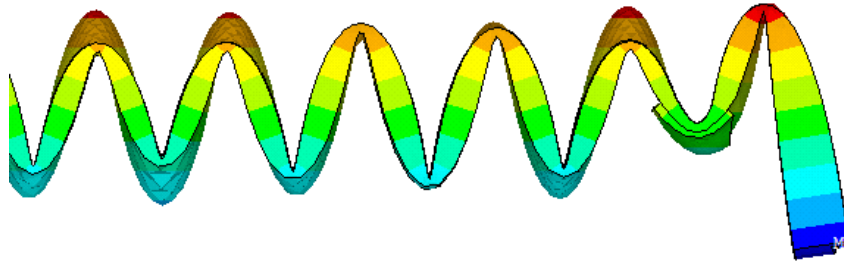


Figura 24: Deslocamento- viga de seção retangular.

Outra complicação observada foi que para algumas frequências era possível observar na análise harmônica a interferência de uma onda estacionária na direção da seção transversal da viga conforme ilustra a figura 25. Tal movimento desnecessário implicaria em perdas adicionais de energia.

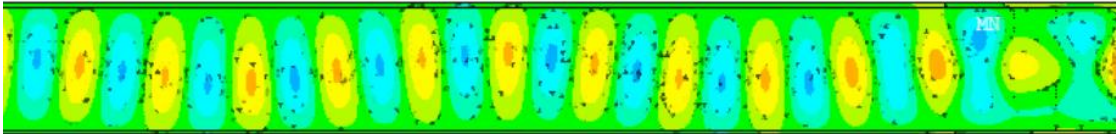


Figura 25: Interferência da onda estacionária na direção da seção transversal.

Devido aos problemas apresentados pode-se concluir que a seção retangular é mais apropriada para esse projeto do que a seção em “U”. No apêndice A há um código usado para gerar análise harmônica da viga de seção em “U”.

10.2 Considerações a respeito do material particulado

Materiais particulados possuem formato irregular, em seu livro texto o autor R. Holdich [12] discute diversos métodos de como caracterizar partículas. Após observação experimental decidiu-se por representar as propriedades de forma de uma partícula ao comparar sua geometria natural a uma esfera. Uma forma de realizar a quantificação de forma é analisando a constante de esfericidade de Wedell (Ψ) que compara a área superficial da partícula com a área superficial de uma esfera hipotética de mesmo volume:

$$\Psi = \frac{\text{Área da esfera}}{\text{Área da partícula}} \quad (30)$$

Como é de conhecimento comum, a forma geométrica da esfera apresenta a menor relação área/volume possível, o que implica que a esfericidade de Wedell seja uma constante de valores fracionários [6]. Na tabela abaixo lista-se exemplos de valores dessa constante para diversos grãos e como estes são classificados:

Descrição	Esfericidade de Wadell	Exemplo
Esférico	1.000	Gotas de vidro, látex de calibração
Arredondado	0.82	Gotas atomizadas
Cúbico	0.806	Açúcar, calcita
Angular	0.66	Minerais triturados
Em lascas	0.54	Gipsita, talco.
Plaqueta	0.22	Argilas, caulino, mica, grafita

Tabela A: Exemplos de números de Wedell para diversos grãos(Holdich [12]- capítulo 2).

O formato que as partículas apresentam interfere na forma com que as mesmas escoam sobre a superfície de transporte. O escoamento é facilitado para partículas com formato semelhante ao de esferas (Wadell próximo de 1) [12]. Partículas de baixa esfericidade tendem a se acumular dificultando e muitas vezes interrompendo o fluxo do material (ver figura 26). Devido ao seu princípio de funcionamento o motor piezeletrico linear não apresenta esse tipo de problema de entupimento que sistemas baseados em transporte por meio de fluidos ou mera gravidade apresentam.

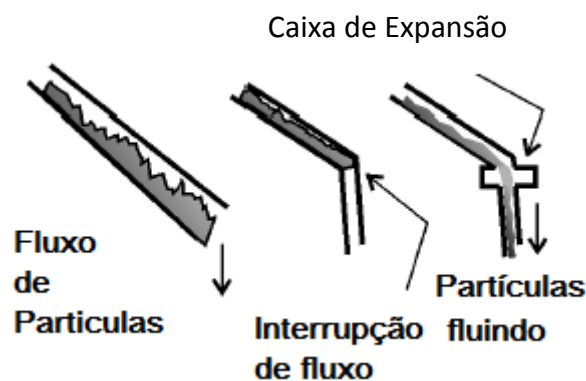


Figura 26: Problema recorrente no transporte de grãos (Holdich [6]- capítulo 10).

Acredita-se que a esfericidade das partículas pouco deva influenciar no desempenho do transportador piezelétrico por isso esse fator será desconsiderado na etapa de simulação. Contudo o tamanho das partículas influencia em outros aspectos como reatividade química e possíveis risco a saúde. Em reservatórios de partículas orgânicas e de particulados metálicos finos contendo alumínio ou magnésio ocorre o risco de explosões devido a alta reatividade das partículas de dimensões diminutas. Partículas de 1 à 10 microns são absorvidas nas dependências do pulmão humano e portanto causam complicações a saúde. Partículas menores que 1 micron saem novamente pelo dutos respiratório sem causar nenhuma complicação fisiológica e partículas de dimensões maiores tendem a ser filtradas pelos capilares nasais ou por muco presente nas vias respiratórias [12].

11. Anexos

Os códigos em APDL a seguir devem ser salvos em um documento .txt e executados no módulo mechanical APDL do ANSYS através selecionando o arquivo através de:

File-> Read input from...

Os códigos A.3 exporta arquivos .txt para um diretório especificado pelo usuário modificando as linhas de código conforme explicado nos comentários do código. Tais arquivos devem ser lidos pelo Matlab utilizando o código do anexo A.5. O diretório dos arquivos devem ser inserido no laço de leitura do código A.5.

A.1 Análise Modal Modelo 2D Langevin

```
/PREP7
```

```
/UNITS,SI
```

```
/RGB,INDEX,100,100,100,0
```

```
/RGB,INDEX,80,80,80,13
```

```
/RGB,INDEX,60,60,60,14
```

```
/RGB,INDEX,0,0,0,15
```

```
/REPLOT
```

```
!%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Definindo parâmetros geométricos %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
*SET,s_up,0.004/2!* Metade do Comprimento do contato com o amplificador
```

```
*SET,s_h,0.132 !* altura sonotrodo
```

```
*SET,s_d,0.011 !* largura da base do sonotrodo=2*s_d+2*s_up
```

```
*SET,sc_d,0.010 !* parafuso sem cabeça_diametro
```

```
*SET,sc_h,0.045 !* parafuso sem cabeça_altura
```

```
*SET,a_h1,0.0504 !* Amp_Altura
```

```
*SET,a_h2,0.003 !* Amp_Altura
```

```
*SET,a_h3,0.1004 !* Amp_Altura
```

```
*SET,a_dm,0.050 !* Amp_do filete ao maior diametro
```

SET,a_r1,0.005 ! Amp_raio do filete

SET,a_r2,0.002 ! Amp_raio do filete

SET,a_ds,0.026 ! Amp_diametro superior

SET,a_di,0.040 ! Amp_diametro inferior

SET,p_d1,0.010 ! parafuso_diametro principal

SET,p_dc,0.01545! parafuso_diametro cabeça

SET,p_h1,0.0375 ! parafuso_altura dentro do amp

SET,p_hc,0.010 ! parafuso_diametro principal

SET,c_de,0.0381 ! ceramica_diametro externo

SET,c_h,0.00635 ! ceramica_espessura

SET,c_di,0.0127 ! ceramica_diametro interno

SET,b_h,0.049 ! Bot_Altura

SET,b_hi,0.022 ! Bot_Altura interna

SET,b_ha,0.004 ! Bot_Altura anel

SET,b_de,0.040 ! Bot_diametro externo

SET,b_di,0.020 ! Bot_diametro interno

!*=*****

!* GEOMETRIA

!*=*****

!***** Variáveis de localização *****

$$d1=(a_{dm}-a_{ds})/2-a_{r1}$$

$$d2=-1*(a_{dm}-a_{di})/2$$

$$d3=(b_{de}-b_{di})/2$$

$$d4=(b_{di}-p_{d1})/2$$

$$d5=(p_{dc}-p_{d1})/2$$

$$A=-s_h$$

$$B=A-a_{h1-a_r1-a_{h2-2}a_{r2-a_{h3}}$$

$$C=B-2*c_h$$

!*##### PONTOS #####

$$K,0,0,-s_h,0,$$

$$K,0,0,0,0,$$

$$K,3,s_{up}+s_d,-s_h,0,$$

$$K,4,s_{up},0,0,$$

$$K,8,+0.5*sc_d,-0.5*sc_h-s_h,0,$$

$$K,0,0,-0.5*sc_h-s_h,0,$$

$$K,9,+0.5*sc_d,-s_h,0,$$

$$K,10,+0.5*sc_d,0.5*sc_h-s_h,0,$$

$$K,0,0,0.5*sc_h-s_h,0,$$

$$K,21,+p_d1/2,A-a_{h1-a_r1-a_{h2-2}a_{r2-a_{h3}+p_{h1}},0,$$

$$K,0,0,A-a_{h1-a_r1-a_{h2-2}a_{r2-a_{h3}+p_{h1}},0,$$

$$K,22,+a_{ds}/2,A,0,$$

$$K,0,0,A,0,$$

$$K,23,+a_{ds}/2,A-a_{h1},0,$$

K,0,0,A-a_h1,0,

K,24,+a_ds/2+a_r1,A-a_h1-a_r1,0,

K,0,0,A-a_h1-a_r1,0,

K,25,+a_ds/2+a_r1+d1,A-a_h1-a_r1,0,

K,26,+a_ds/2+a_r1+d1,A-a_h1-a_r1-a_h2,0,

K,0,0,A-a_h1-a_r1-a_h2,0,

K,27,+a_ds/2+a_r1+d1+d2,A-a_h1-a_r1-a_h2,0,

K,28,+a_ds/2+a_r1+d1+d2,A-a_h1-a_r1-a_h2-2*a_r2,0,

K,0,0,A-a_h1-a_r1-a_h2-2*a_r2,0,

K,29,+a_ds/2+a_r1+d1+d2,A-a_h1-a_r1-a_h2-2*a_r2-a_h3,0,

K,0,0,A-a_h1-a_r1-a_h2-2*a_r2-a_h3,0,

K,30,+p_d1/2,A-a_h1-a_r1-a_h2-2*a_r2-a_h3,0,

K,31,+a_ds/2,A-a_h1-a_r1,0,

K,34,+a_ds/2+a_r1+d1+d2-a_r2,A-a_h1-a_r1-a_h2-a_r2,0,

K,0,0,A-a_h1-a_r1-a_h2-a_r2,0,

K,36,+a_ds/2+a_r1+d1+d2,A-a_h1-a_r1-a_h2-a_r2,0,

K,54,p_d1/2,B,0,

K,0,0,B,0,

K,55,p_d1/2,B-2*c_h,0,

K,0,0,B-2*c_h,0,

K,56,c_di/2,B-2*c_h,0,

K,57,c_di/2,B-1*c_h,0,

K,0,0,B-1*c_h,0,

K,58,c_di/2,B,0,

K,59,c_de/2,B,0,

K,60,c_de/2,B-1*c_h,0,

K,61,c_de/2,B-2*c_h,0,

K,62,b_de/2,C,0,

K,0,0,C,0,

K,63,b_de/2,C-b_h,0,

K,0,0,C-b_h,0,

K,64,b_de/2-d3,C-b_h,0,

K,65,b_de/2-d3,C-b_h+b_hi,0,

K,0,0,C-b_h+b_hi,0,

K,66,b_de/2-d3,C-b_h+b_hi+b_ha,0,

K,0,0,C-b_h+b_hi+b_ha,0,

K,67,b_de/2-d3-d4,C-b_h+b_hi+b_ha,0,

K,68,b_de/2-d3-d4,C-b_h+b_hi,0,

K,69,b_de/2-d3-d4+d5,C-b_h+b_hi,0,

K,70,b_de/2-d3-d4+d5,C-b_h+b_hi-p_hc,0,

K,0,0,C-b_h+b_hi-p_hc,0,

!##### LINHAS #####

LARC,23,24,31,-a_r1,

LARC,27,34,36,+a_r2,

LARC,34,28,36,+a_r2,

!##### AREAS #####

A,1,9,8,5

A,3,9,8,5,7,21,30,29,28,34,27,26,25,24,23

A,7,21,68,69,70,38

A,58,57,60,59

A,57,60,61,56

A,55,62,63,64,65,68

AGLUE,ALL

!*=====

!* MALHA

!*=====

!*##### Material Properties #####

MPTEMP,,,,,,,,

MPTEMP,1,0

MPDATA,EX,3,,70000000000

MPDATA,PRXY,3,,0.33

MPDATA,DENS,3,,2700

MPTEMP,,,,,,,,

MPTEMP,1,0

MPDATA,EX,2,,210000000000

MPDATA,PRXY,2,,0.29

MPDATA,DENS,2,,7846.3

/COM, MATERIAL PROPERTIES OF LEAD ZIRCONATE TITANATE (PZT-4A)

/COM,

/COM, -- MATERIAL MATRICES (POLAR AXIS ALONG Y-AXIS): IEEE INPUT

/COM,

/COM, [s11 s13 s12 0 0 0] [0 d31 0] [ep11 0 0]

/COM, [s13 s33 s13 0 0 0] [0 d33 0] [0 ep33 0]

/COM, [s12 s13 s11 0 0 0] [0 d31 0] [0 0 ep11]

/COM, [0 0 0 s44 0 0] [0 0 d15]

/COM, [0 0 0 0 s66 0] [0 0 0]

/COM, [0 0 0 0 0 s44] [d15 0 0]

/COM,

/COM, - COMPLIANCE COEFFICIENTS, M2/N

S11=12.3E-12

```

S12=-4.05E-12

S13=-5.31E-12

S33=15.5E-12

S44=39.0E-12

S66=32.7E-12

/COM, - PIEZOELECTRIC STRAIN COEFFICIENTS, C/N

D15=4.96E-10

D31=-1.23E-10

D33=2.89E-10

/COM, - RELATIVE PERMITTIVITY AT CONSTANT STRESS

EP11=1475

EP33=1300

/COM, - DENSITY, KG/M3

RHO=7500

/NOPR

/COM,

/COM, -- MATERIAL MATRICES (POLAR AXIS ALONG Y-AXIS): ANSYS INPUT

/COM,

/COM, [s11 s13 s12 0 0 0] [0 d31 0] [ep11 0 0]

/COM, [s13 s33 s13 0 0 0] [0 d33 0] [0 ep33 0]

/COM, [s12 s13 s11 0 0 0] [0 d31 0] [0 0 ep11]

/COM, [0 0 0 s44 0 0] [d15 0 0]

/COM, [0 0 0 0 s44 0] [0 0 d15]

/COM, [0 0 0 0 0 s66] [0 0 0]

TB,ANEL,1,,,1 ! ANISOTROPIC ELASTIC COMPLIANCE MATRIX

TBDA,1,S11,S13,S12

TBDA,7,S33,S13

TBDA,12,S11

TBDA,16,S44

TB,PIEZ,1,,,1 ! PIEZOELECTRIC STRAIN MATRIX

TBDA,2,D31

```

TBDA,5,D33

TBDA,8,D31

TBDA,10,D15

TB,DPER,1,,1 ! DIELECTRIC PERMITTIVITY AT CONSTANT STRESS

TBDA,1,EP11,EP33

MP,DENS,1,RHO ! DENSITY

!*##### Defining elements#####

ET,1,PLANE223,1001,,1 ! PIEZOELECTRIC AXISYMMETRIC ELEMENT TYPE

ET,2,PLANE183 ! AXISYMMETRIC ELEMENT TYPE

ET,3,PLANE183 ! PLANE ELEMENT TYPE

KEYOPT,2,1,0

KEYOPT,2,3,1

KEYOPT,2,6,0

KEYOPT,3,1,0

KEYOPT,3,3,3

KEYOPT,3,6,0

R,1,0.05,

!*##### Meshing #####

!* Atribuições: Correspondência de area, elemento e material

FLST,5,2,5,ORDE,2

FITEM,5,1

FITEM,5,7

CM,_Y,AREA

ASEL,,,P51X

CM,_Y1,AREA

```
CMSEL,S,_Y
!*
CMSEL,S,_Y1
AATT, 2, 1, 2, 0,
CMSEL,S,_Y
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
!*
FLST,5,2,5,ORDE,2
FITEM,5,8
FITEM,5,-9
CM,_Y,AREA
ASEL,,,P51X
CM,_Y1,AREA
CMSEL,S,_Y
!*
CMSEL,S,_Y1
AATT, 3, 1, 2, 0,
CMSEL,S,_Y
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
!*
FLST,5,2,5,ORDE,2
FITEM,5,4
FITEM,5,-5
CM,_Y,AREA
ASEL,,,P51X
CM,_Y1,AREA
CMSEL,S,_Y
!*
CMSEL,S,_Y1
AATT, 1, 1, 1, 0,
CMSEL,S,_Y
```

CMDELE,_Y

CMDELE,_Y1

!* Criação da malha

SMRT,2

MSHAPE,0,2D

MSHKEY,0

FLST,5,6,5,ORDE,5

FITEM,5,1

FITEM,5,4

FITEM,5,-5

FITEM,5,7

FITEM,5,-9

CM,_Y,AREA

ASEL, , , ,P51X

CM,_Y1,AREA

CHKMSH,'AREA'

CMSEL,S,_Y

AMESH,_Y1

CMDELE,_Y

CMDELE,_Y1

CMDELE,_Y2

!* REFINAMENTO

EREF,ALL, , ,1,0,1,1

CMDELE,_Y1

!*=====

!* ANÁLISE MODAL

!*=====

/SOL
ANTYPE,2
MODOPT,LANB,20
EQSLV,SPAR
MXPAND,20,,0
LUMPM,0
PSTRES,0
MODOPT,LANB,20,,,OFF
SOLVE

A.2 Análise Modal Modelo Montado

/PREP7
/UNITS,SI

/RGB,INDEX,100,100,100,0
/RGB,INDEX,80,80,80,13
/RGB,INDEX,60,60,60,14
/RGB,INDEX,0,0,0,15
/REPLOT

!%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Definindo parâmetros geométricos %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

!* 19954.3 21296.8 21980.4 22802.8 23259.5

SET,fop,19954.3 ! Frequência de operação

SET,steps,36 ! número de simulações harmônicas

SET,step,1 ! Numero da simulação 1<step<steps

SET,fase,0 ! Diferença de fase entre os sinais

SET,VI,100 ! Tensão Elétrica

SET,Lu,0.30 ! Comprimento Útil

SET,t,0.003 ! Espessura da viga

SET,Aba,0.012162 ! Comprimento Aba

SET,thick,0.05 ! Thickness

SET,s_up,0.004/2! Metade do Comprimento do contato com o amplificador

SET,s_h,0.132 ! altura sonotrodo

SET,s_d,0.011 ! largura da base do sonotrodo= $2*s_d+2*s_up$

SET,sc_d,0.010 ! parafuso sem cabeça_diametro

SET,sc_h,0.045 ! parafuso sem cabeça_altura

SET,a_h1,0.0504 ! Amp_Altura1

SET,a_h2,0.003 ! Amp_Altura2

SET,a_h3,0.1004 ! Amp_Altura3

SET,a_dm,0.050 ! Amp_Maior diametro

SET,a_r1,0.005 ! Amp_raio do filete superior

SET,a_r2,0.002 ! Amp_raio do filete inferior

SET,a_ds,0.026 ! Amp_diametro superior

SET,a_di,0.040 ! Amp_diametro inferior

SET,p_d1,0.010 ! parafuso_diametro principal

SET,p_dc,0.01545! parafuso_diametro cabeça

SET,p_h1,0.0375 ! parafuso_altura dentro do amp

SET,p_hc,0.010 ! parafuso_diametro principal

SET,c_de,0.0381 ! ceramica_diametro externo

SET,c_h,0.00635 ! ceramica_espessura

SET,c_di,0.0127 ! ceramica_diametro interno

SET,b_h,0.049 ! Bot_Altura

SET,b_hi,0.022 ! Bot_Altura interna
SET,b_ha,0.004 ! Bot_Altura anel
SET,b_de,0.040 ! Bot_diametro externo
SET,b_di,0.020 ! Bot_diametro interno

!*=====

!* GEOMETRIA

!*=====

!%%%%%%%%%%%%%% Variáveis de localização %%%%%%%%%%%%%%%

L=Lu-2*s_up
Laba=Aba-s_up
d1=(a_dm-a_ds)/2-a_r1
d2=-1*(a_dm-a_di)/2
d3=(b_de-b_di)/2
d4=(b_di-p_d1)/2
d5=(p_dc-p_d1)/2
A=-s_h
B=A-a_h1-a_r1-a_h2-2*a_r2-a_h3
C=B-2*c_h
D=L+s_up
Ltot=L+2*(Laba+2*s_up)

!*##### PONTOS #####

K,1,0,-s_h,0,

K,2,0,0,0,

K,3,s_up+s_d,-s_h,0,

$K,4,s_{up},0,0,$

$K,8,+0.5*sc_d,-0.5*sc_h-s_h,0,$

$K,5,0,-0.5*sc_h-s_h,0,$

$K,9,+0.5*sc_d,-s_h,0,$

$K,10,+0.5*sc_d,0.5*sc_h-s_h,0,$

$K,6,0,0.5*sc_h-s_h,0,$

$K,21,+p_{d1}/2,A-a_{h1-a_{r1-a_{h2-2}*a_{r2-a_{h3+p_{h1},0}},$

$K,7,0,A-a_{h1-a_{r1-a_{h2-2}*a_{r2-a_{h3+p_{h1},0}},$

$K,22,+a_{ds}/2,A,0,$

$K,11,0,A,0,$

$K,23,+a_{ds}/2,A-a_{h1},0,$

$K,12,0,A-a_{h1},0,$

$K,24,+a_{ds}/2+a_{r1},A-a_{h1-a_{r1}},0,$

$K,13,0,A-a_{h1-a_{r1}},0,$

$K,25,+a_{ds}/2+a_{r1}+d1,A-a_{h1-a_{r1}},0,$

$K,26,+a_{ds}/2+a_{r1}+d1,A-a_{h1-a_{r1-a_{h2}},0,$

K,14,0,A-a_h1-a_r1-a_h2,0,

K,27,+a_ds/2+a_r1+d1+d2,A-a_h1-a_r1-a_h2,0,

K,28,+a_ds/2+a_r1+d1+d2,A-a_h1-a_r1-a_h2-2*a_r2,0,

K,15,0,A-a_h1-a_r1-a_h2-2*a_r2,0,

K,29,+a_ds/2+a_r1+d1+d2,A-a_h1-a_r1-a_h2-2*a_r2-a_h3,0,

K,16,0,A-a_h1-a_r1-a_h2-2*a_r2-a_h3,0,

K,30,+p_d1/2,A-a_h1-a_r1-a_h2-2*a_r2-a_h3,0,

K,31,+a_ds/2,A-a_h1-a_r1,0,

K,34,+a_ds/2+a_r1+d1+d2-a_r2,A-a_h1-a_r1-a_h2-a_r2,0,

K,17,0,A-a_h1-a_r1-a_h2-a_r2,0,

K,36,+a_ds/2+a_r1+d1+d2,A-a_h1-a_r1-a_h2-a_r2,0,

K,54,p_d1/2,B,0,

K,18,0,B,0,

K,55,p_d1/2,B-2*c_h,0,

K,19,0,B-2*c_h,0,

K,56,c_di/2,B-2*c_h,0,

K,57,c_di/2,B-1*c_h,0,

$K,20,0,B-1*c_h,0,$

$K,58,c_{di}/2,B,0,$

$K,59,c_{de}/2,B,0,$

$K,60,c_{de}/2,B-1*c_h,0,$

$K,61,c_{de}/2,B-2*c_h,0,$

$K,62,b_{de}/2,C,0,$

$K,32,0,C,0,$

$K,63,b_{de}/2,C-b_h,0,$

$K,33,0,C-b_h,0,$

$K,64,b_{de}/2-d3,C-b_h,0,$

$K,65,b_{de}/2-d3,C-b_h+b_{hi},0,$

$K,35,0,C-b_h+b_{hi},0,$

$K,66,b_{de}/2-d3,C-b_h+b_{hi}+b_{ha},0,$

$K,37,0,C-b_h+b_{hi}+b_{ha},0,$

$K,67,b_{de}/2-d3-d4,C-b_h+b_{hi}+b_{ha},0,$

$K,68,b_{de}/2-d3-d4,C-b_h+b_{hi},0,$

K,69,b_de/2-d3-d4+d5,C-b_h+b_hi,0,

K,70,b_de/2-d3-d4+d5,C-b_h+b_hi-p_hc,0,

K,38,0,C-b_h+b_hi-p_hc,0,

K,39,-s_up,0,0,

K,40,-s_up-s_d,-s_h,0,

nn=100

K,1+nn,0+D,-s_h,0,

K,2+nn,0+D,0,0,

K,3+nn,s_up+s_d+D,-s_h,0,

K,4+nn,s_up+D,0,0,

K,8+nn,+0.5*sc_d+D,-0.5*sc_h-s_h,0,

K,5+nn,0+D,-0.5*sc_h-s_h,0,

K,9+nn,+0.5*sc_d+D,-s_h,0,

K,10+nn,+0.5*sc_d+D,0.5*sc_h-s_h,0,

K,6+nn,0+D,0.5*sc_h-s_h,0,

K,21+nn,+p_d1/2+D,A-a_h1-a_r1-a_h2-2*a_r2-a_h3+p_h1,0,

K,7+nn,0+D,A-a_h1-a_r1-a_h2-2*a_r2-a_h3+p_h1,0,

$K,22+nn,+a_ds/2+D,A,0,$

$K,11+nn,0+D,A,0,$

$K,23+nn,+a_ds/2+D,A-a_h1,0,$

$K,12+nn,0+D,A-a_h1,0,$

$K,24+nn,+a_ds/2+a_r1+D,A-a_h1-a_r1,0,$

$K,13+nn,0+D,A-a_h1-a_r1,0,$

$K,25+nn,+a_ds/2+a_r1+d1+D,A-a_h1-a_r1,0,$

$K,26+nn,+a_ds/2+a_r1+d1+D,A-a_h1-a_r1-a_h2,0,$

$K,14+nn,0+D,A-a_h1-a_r1-a_h2,0,$

$K,27+nn,+a_ds/2+a_r1+d1+d2+D,A-a_h1-a_r1-a_h2,0,$

$K,28+nn,+a_ds/2+a_r1+d1+d2+D,A-a_h1-a_r1-a_h2-2*a_r2,0,$

$K,15+nn,0+D,A-a_h1-a_r1-a_h2-2*a_r2,0,$

$K,29+nn,+a_ds/2+a_r1+d1+d2+D,A-a_h1-a_r1-a_h2-2*a_r2-a_h3,0,$

$K,16+nn,0+D,A-a_h1-a_r1-a_h2-2*a_r2-a_h3,0,$

$K,30+nn,+p_d1/2+D,A-a_h1-a_r1-a_h2-2*a_r2-a_h3,0,$

$K,31+nn,+a_ds/2+D,A-a_h1-a_r1,0,$

$K,34+nn,+a_{ds}/2+a_{r1}+d1+d2-a_{r2}+D,A-a_{h1}-a_{r1}-a_{h2}-a_{r2},0,$

$K,17+nn,0+D,A-a_{h1}-a_{r1}-a_{h2}-a_{r2},0,$

$K,36+nn,+a_{ds}/2+a_{r1}+d1+d2+D,A-a_{h1}-a_{r1}-a_{h2}-a_{r2},0,$

$K,54+nn,p_{d1}/2+D,B,0,$

$K,18+nn,0+D,B,0,$

$K,55+nn,p_{d1}/2+D,B-2*c_h,0,$

$K,19+nn,0+D,B-2*c_h,0,$

$K,56+nn,c_{di}/2+D,B-2*c_h,0,$

$K,57+nn,c_{di}/2+D,B-1*c_h,0,$

$K,20+nn,0+D,B-1*c_h,0,$

$K,58+nn,c_{di}/2+D,B,0,$

$K,59+nn,c_{de}/2+D,B,0,$

$K,60+nn,c_{de}/2+D,B-1*c_h,0,$

$K,61+nn,c_{de}/2+D,B-2*c_h,0,$

$K,62+nn,b_{de}/2+D,C,0,$

$K,32+nn,0+D,C,0,$

$K,63+nn,b_{de}/2+D,C-b_h,0,$

$K,33+nn,0+D,C-b_h,0,$

$K,64+nn,b_{de}/2-d3+D,C-b_h,0,$

$K,65+nn,b_{de}/2-d3+D,C-b_h+b_{hi},0,$

$K,35+nn,0+D,C-b_h+b_{hi},0,$

$K,66+nn,b_{de}/2-d3+D,C-b_h+b_{hi}+b_{ha},0,$

$K,37+nn,0+D,C-b_h+b_{hi}+b_{ha},0,$

$K,67+nn,b_{de}/2-d3-d4+D,C-b_h+b_{hi}+b_{ha},0,$

$K,68+nn,b_{de}/2-d3-d4+D,C-b_h+b_{hi},0,$

$K,69+nn,b_{de}/2-d3-d4+d5+D,C-b_h+b_{hi},0,$

$K,70+nn,b_{de}/2-d3-d4+d5+D,C-b_h+b_{hi-p}_{hc},0,$

$K,38+nn,0+D,C-b_h+b_{hi-p}_{hc},0,$

$K,39+nn,-s_{up}+D,0,0,$

$K,40+nn,-s_{up-s_d}+D,-s_h,0,$

$K,141,-s_{up}-Laba,0,0,$

$K,142,-s_{up}-Laba,t,0,$

$K,143,3*s_{up}+Laba+L,0,0,$

K,144,3*s_up+Laba+L,t,0,

!##### LINHAS #####

LARC,23,24,31,-a_r1,

LARC,27,34,36,+a_r2,

LARC,34,28,36,+a_r2,

LARC,23+nn,24+nn,31+nn,-a_r1,

LARC,27+nn,34+nn,36+nn,+a_r2,

LARC,34+nn,28+nn,36+nn,+a_r2,

!##### AREAS #####

A,40,3,4,39

A,1,9,8,5

A,3,9,8,5,7,21,30,29,28,34,27,26,25,24,23

A,7,21,68,69,70,38

A,58,57,60,59

A,57,60,61,56

A,55,62,63 ,64,65,68

A,40+nn,3+nn,4+nn,39+nn

A,1+nn,9+nn,8+nn,5+nn

A,3+nn,9+nn,8+nn,5+nn,7+nn,21+nn,30+nn,29+nn,28+nn,34+nn,27+nn,26+nn,25+nn,24+nn,23+nn

A,7+nn,21+nn,68+nn,69+nn,70+nn,38+nn

A,58+nn,57+nn,60+nn,59+nn

A,57+nn,60+nn,61+nn,56+nn

A,55+nn,62+nn,63+nn ,64+nn,65+nn,68+nn

A,141,142,144,143

AGLUE,ALL

```
!*=====
!*          MALHA
!*=====
```

!##### Material Properties #####

MPTEMP,,,,,,,,

MPTEMP,1,0

MPDATA,EX,3,,70000000000

MPDATA,PRXY,3,,0.33

MPDATA,DENS,3,,2700

MPTEMP,,,,,,,,

MPTEMP,1,0

MPDATA,EX,2,,210000000000

MPDATA,PRXY,2,,0.29

MPDATA,DENS,2,,7846.3

/COM, MATERIAL PROPERTIES OF LEAD ZIRCONATE TITANATE (PZT-4A)

/COM,

/COM, -- MATERIAL MATRICES (POLAR AXIS ALONG Y-AXIS): IEEE INPUT

/COM,

/COM, [s11 s13 s12 0 0 0] [0 d31 0] [ep11 0 0]

/COM, [s13 s33 s13 0 0 0] [0 d33 0] [0 ep33 0]

/COM, [s12 s13 s11 0 0 0] [0 d31 0] [0 0 ep11]

/COM, [0 0 0 s44 0 0] [0 0 d15]

/COM, [0 0 0 0 s66 0] [0 0 0]

/COM, [0 0 0 0 0 s44] [d15 0 0]

/COM,

/COM, - COMPLIANCE COEFFICIENTS, M2/N

S11=12.3E-12

S12=-4.05E-12

S13=-5.31E-12

S33=15.5E-12

S44=39.0E-12

S66=32.7E-12

/COM, - PIEZOELECTRIC STRAIN COEFFICIENTS, C/N

D15=4.96E-10

D31=-1.23E-10

D33=2.89E-10

/COM, - RELATIVE PERMITTIVITY AT CONSTANT STRESS

EP11=1475

EP33=1300

/COM, - DENSITY, KG/M3

RHO=7500

/NOPR

/COM,

/COM, -- MATERIAL MATRICES (POLAR AXIS ALONG Y-AXIS): ANSYS INPUT

/COM,

/COM, [s11 s13 s12 0 0 0] [0 d31 0] [ep11 0 0]

/COM, [s13 s33 s13 0 0 0] [0 d33 0] [0 ep33 0]

/COM, [s12 s13 s11 0 0 0] [0 d31 0] [0 0 ep11]

/COM, [0 0 0 s44 0 0] [d15 0 0]

/COM, [0 0 0 0 s44 0] [0 0 d15]

/COM, [0 0 0 0 0 s66] [0 0 0]

TB,ANEL,1,,1 ! ANISOTROPIC ELASTIC COMPLIANCE MATRIX

TBDA,1,S11,S13,S12

TBDA,7,S33,S13

TBDA,12,S11

TBDA,16,S44

TB,PIEZ,1,,,1 ! PIEZOELECTRIC STRAIN MATRIX

TBDA,2,D31

TBDA,5,D33

TBDA,8,D31

TBDA,10,D15

TB,DPER,1,,,1 ! DIELECTRIC PERMITTIVITY AT CONSTANT STRESS

TBDA,1,EP11,EP33

MP,DENS,1,RHO ! DENSITY

!##### Defining elements#####

ET,1,PLANE223,1001,,1 ! PIEZOELECTRIC AXISYMMETRIC ELEMENT TYPE

ET,2,PLANE183 ! AXISYMMETRIC ELEMENT TYPE

ET,3,PLANE183 ! PLANE ELEMENT TYPE

KEYOPT,2,1,0

KEYOPT,2,3,1

KEYOPT,2,6,0

KEYOPT,3,1,0

KEYOPT,3,3,3

KEYOPT,3,6,0

R,1,thick,

!##### Meshing #####

FLST,5,3,5,ORDE,2

FITEM,5,16

FITEM,5,-18

CM,_Y,AREA

ASEL,,,P51X

CM,_Y1,AREA

```
CMSEL,S,_Y
!*
CMSEL,S,_Y1
AATT, 3, 1, 3, 0,
CMSEL,S,_Y
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
!*
FLST,5,2,5,ORDE,2
FITEM,5,2
FITEM,5,19
CM,_Y,AREA
ASEL,,,P51X
CM,_Y1,AREA
CMSEL,S,_Y
!*
CMSEL,S,_Y1
AATT, 2, 1, 2, 0,
CMSEL,S,_Y
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1

FLST,5,2,5,ORDE,2
FITEM,5,21
FITEM,5,23
CM,_Y,AREA
ASEL,,,P51X
CM,_Y1,AREA
CMSEL,S,_Y
!*
CMSEL,S,_Y1
AATT, 3, 1, 2, 0,
CMSEL,S,_Y
```

CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
!*
FLST,5,2,5,ORDE,2
FITEM,5,5
FITEM,5,-6
CM,_Y,AREA
ASEL, , , ,P51X
CM,_Y1,AREA
CMSEL,S,_Y
!*
CMSEL,S,_Y1
AATT, 1, 1, 1, 0,
CMSEL,S,_Y
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1

KWPAVE, 102
CSWPLA,11,0,1,1,

FLST,5,2,5,ORDE,2
FITEM,5,9
FITEM,5,20
CM,_Y,AREA
ASEL, , , ,P51X
CM,_Y1,AREA
CMSEL,S,_Y
!*
CMSEL,S,_Y1
AATT, 2, 1, 2, 11,
CMSEL,S,_Y
CMDELE,_Y

CMDELE,_Y1
!*
FLST,5,2,5,ORDE,2
FITEM,5,22
FITEM,5,24
CM,_Y,AREA
ASEL,,,P51X
CM,_Y1,AREA
CMSEL,S,_Y
!*
CMSEL,S,_Y1
AATT, 3, 1, 2, 11,
CMSEL,S,_Y
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
!*
FLST,5,2,5,ORDE,2
FITEM,5,12
FITEM,5,-13
CM,_Y,AREA
ASEL,,,P51X
CM,_Y1,AREA
CMSEL,S,_Y
!*
CMSEL,S,_Y1
AATT, 1, 1, 1, 11,
CMSEL,S,_Y
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1

WPCSYS,-1,0

FLST,2,2,5,ORDE,2
FITEM,2,16
FITEM,2,-17
AESIZE,P51X,0.005,
MSHAPE,0,2D
MSHKEY,0

FLST,5,2,5,ORDE,2
FITEM,5,16
FITEM,5,-17
CM,_Y,AREA
ASEL,,,P51X
CM,_Y1,AREA
CHKMSH,'AREA'
CMSEL,S,_Y
!*
AMESH,_Y1
!*
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
CMDELE,_Y2

FLST,5,12,5,ORDE,9
FITEM,5,2
FITEM,5,5
FITEM,5,-6
FITEM,5,9
FITEM,5,12
FITEM,5,-13
FITEM,5,19
FITEM,5,20
FITEM,5,-24

```
CM,_Y,AREA
ASEL,,,P51X
CM,_Y1,AREA
CHKMSH,'AREA'
CMSEL,S,_Y
!*
AMESH,_Y1
!*
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
CMDELE,_Y2
!*
```

```
!##### REFINAMENTO #####
```

```
FLST,5,14,5,ORDE,10
FITEM,5,2
FITEM,5,5
FITEM,5,-6
FITEM,5,9
FITEM,5,12
FITEM,5,-13
FITEM,5,16
FITEM,5,-17
FITEM,5,19
FITEM,5,-24
CM,_Y,AREA
ASEL,,,P51X
CM,_Y1,AREA
CMSEL,S,_Y
CMDELE,_Y
AREFINE,_Y1,,1,0,1,1
```

CMDELE,_Y1

SMRT,1

MSHAPE,0,2D

!*
CM,_Y,AREA

ASEL,,, 18

CM,_Y1,AREA

CHKMSH,'AREA'

CMSEL,S,_Y

AMESH,_Y1

CMDELE,_Y

CMDELE,_Y1

CMDELE,_Y2

FLST,5,1,5,ORDE,1

FITEM,5,18

CM,_Y,AREA

ASEL,,,P51X

CM,_Y1,AREA

CMSEL,S,_Y

CMDELE,_Y

AREFINE,_Y1,,2,0,1,1

CMDELE,_Y1

!*
!*##### Acoplamento de nós #####

nos=12

```

/PREP7

*dim,nleft,,nos

nleft(1,1)=2 ,4 ,6 ,14482 ,14486 ,14488 ,340,342,344,14364 ,14368 ,14370

*dim,nright,,nos

nright(1,1)=8 ,10 ,12 ,13795 ,13846 ,14490,346 ,348 ,350,13727 ,13730 ,14372

flag=1

i=1

j=1

*DOWHILE,flag

CP,j,UX,nleft(i,1),nright(i,1)

CP,j+1,UY,nleft(i,1),nright(i,1)

*IF,i,EQ,nos,EXIT

i=i+1

j=j+2

*ENDDO

```

```

!*##### Análise #####

```

```

/SOL

```

```

!*=====

```

```

!*          ANÁLISE MODAL

```

```

!*=====

```

```

ANTYPE,2

MODOPT,LANB,40

EQSLV,SPAR

MXPAND,40,,0

LUMPM,0

PSTRES,0

MODOPT,LANB,20,19000,25000,OFF

```

```
!*##### Condição de Contorno #####
```

```
!* Eixos imóveis
```

```
lin=6
```

```
*dim,linhas,,lin
```

```
linhas(1,1) = 14,16,29,50,52,65
```

```
flag=1
```

```
i=1
```

```
*DOWHILE,flag
```

```
DL,linhas(i,1), ,UX,0
```

```
*IF,i,EQ,lin,EXIT
```

```
i=i+1
```

```
*ENDDO
```

```
SOLVE
```

```
FINISH
```

```
/POST1
```

```
SET,FIRST
```

```
!*
```

```
/EFACET,1
```

```
PLNSOL, U,Y, 0,1.0
```

A.3 Análise Harmônica Modelo Montado

```
/PREP7
```

```
/UNITS,SI
```

```
!*##### Ajuste de cores #####
```

```
/RGB,INDEX,100,100,100, 0
```

/RGB,INDEX, 80, 80, 80,13

/RGB,INDEX, 60, 60, 60,14

/RGB,INDEX, 0, 0, 0,15

/REPLOT

!%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Definindo parâmetros geométricos %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

SET,fop, 21296.8 ! Frequência de operação

SET,Aba,0.012162 ! Comprimento Aba

SET,steps,36 ! número de simulações harmônicas

SET,step,1 ! Numero da simulação 1<step<steps

SET,fase,0 ! Diferença de fase entre os sinais

SET,VA,300 ! Amplitude de Tensão Elétrica

SET,Lu,0.30 ! Comprimento Útil

SET,t,0.003 ! Espessura da viga

SET,thick,0.05 ! Largura=espessura do elemento

SET,s_up,0.004/2! Metade do Comprimento do contato com o amplificador

SET,s_h,0.132 ! altura sonotrodo

SET,s_d,0.011 ! largura da base do sonotrodo=2*s_d+2*s_up

SET,sc_d,0.010 ! parafuso sem cabeça_diametro

SET,sc_h,0.045 ! parafuso sem cabeça_altura

SET,a_h1,0.0504 ! Amp_Altura1

SET,a_h2,0.003 ! Amp_Altura2

SET,a_h3,0.1004 ! Amp_Altura3

SET,a_dm,0.050 ! Amp_Maior diametro

SET,a_r1,0.005 ! Amp_raio do filete superior

SET,a_r2,0.002 ! Amp_raio do filete inferior

SET,a_ds,0.026 ! Amp_diametro superior

SET,a_di,0.040 ! Amp_diametro inferior

SET,p_d1,0.010 ! parafuso_diametro principal

SET,p_dc,0.01545! parafuso_diametro cabeça

SET,p_h1,0.0375 ! parafuso_altura dentro do amp

SET,p_hc,0.010 ! parafuso_diametro principal

SET,c_de,0.0381 ! ceramica_diametro externo

SET,c_h,0.00635 ! ceramica_espessura

SET,c_di,0.0127 ! ceramica_diametro interno

SET,b_h,0.049 ! Bot_Altura

SET,b_hi,0.022 ! Bot_Altura interna

SET,b_ha,0.004 ! Bot_Altura anel

SET,b_de,0.040 ! Bot_diametro externo

SET,b_di,0.020 ! Bot_diametro interno

!*=====

!* GEOMETRIA

!*=====

!*%%%%%%%%%%%%%% Variáveis de Offset %%%%%%%%%%

$L=Lu-2*s_{up}$

$Laba=Aba-s_{up}$

$d1=(a_{dm}-a_{ds})/2-a_{r1}$

$d2=-1*(a_{dm}-a_{di})/2$

$d3=(b_{de}-b_{di})/2$

$d4=(b_{di}-p_{d1})/2$

$$d5=(p_dc-p_d1)/2$$

$$A=-s_h$$

$$B=A-a_h1-a_r1-a_h2-2*a_r2-a_h3$$

$$C=B-2*c_h$$

$$D=L+s_up$$

$$Ltot=L+2*(Laba+2*s_up)$$

!##### PONTOS #####

$$K,1,0,-s_h,0,$$

$$K,2,0,0,0,$$

$$K,3,s_up+s_d,-s_h,0,$$

$$K,4,s_up,0,0,$$

$$K,8,+0.5*sc_d,-0.5*sc_h-s_h,0,$$

$$K,5,0,-0.5*sc_h-s_h,0,$$

$$K,9,+0.5*sc_d,-s_h,0,$$

$$K,10,+0.5*sc_d,0.5*sc_h-s_h,0,$$

$$K,6,0,0.5*sc_h-s_h,0,$$

$$K,21,+p_d1/2,A-a_h1-a_r1-a_h2-2*a_r2-a_h3+p_h1,0,$$

$$K,7,0,A-a_h1-a_r1-a_h2-2*a_r2-a_h3+p_h1,0,$$

$$K,22,+a_ds/2,A,0,$$

K,11,0,A,0,

K,23,+a_ds/2,A-a_h1,0,

K,12,0,A-a_h1,0,

K,24,+a_ds/2+a_r1,A-a_h1-a_r1,0,

K,13,0,A-a_h1-a_r1,0,

K,25,+a_ds/2+a_r1+d1,A-a_h1-a_r1,0,

K,26,+a_ds/2+a_r1+d1,A-a_h1-a_r1-a_h2,0,

K,14,0,A-a_h1-a_r1-a_h2,0,

K,27,+a_ds/2+a_r1+d1+d2,A-a_h1-a_r1-a_h2,0,

K,28,+a_ds/2+a_r1+d1+d2,A-a_h1-a_r1-a_h2-2*a_r2,0,

K,15,0,A-a_h1-a_r1-a_h2-2*a_r2,0,

K,29,+a_ds/2+a_r1+d1+d2,A-a_h1-a_r1-a_h2-2*a_r2-a_h3,0,

K,16,0,A-a_h1-a_r1-a_h2-2*a_r2-a_h3,0,

K,30,+p_d1/2,A-a_h1-a_r1-a_h2-2*a_r2-a_h3,0,

K,31,+a_ds/2,A-a_h1-a_r1,0,

K,34,+a_ds/2+a_r1+d1+d2-a_r2,A-a_h1-a_r1-a_h2-a_r2,0,

K,17,0,A-a_h1-a_r1-a_h2-a_r2,0,

K,36,+a_ds/2+a_r1+d1+d2,A-a_h1-a_r1-a_h2-a_r2,0,

K,54,p_d1/2,B,0,

K,18,0,B,0,

K,55,p_d1/2,B-2*c_h,0,

K,19,0,B-2*c_h,0,

K,56,c_di/2,B-2*c_h,0,

K,57,c_di/2,B-1*c_h,0,

K,20,0,B-1*c_h,0,

K,58,c_di/2,B,0,

K,59,c_de/2,B,0,

K,60,c_de/2,B-1*c_h,0,

K,61,c_de/2,B-2*c_h,0,

K,62,b_de/2,C,0,

K,32,0,C,0,

K,63,b_de/2,C-b_h,0,

K,33,0,C-b_h,0,

K,64,b_de/2-d3,C-b_h,0,

K,65,b_de/2-d3,C-b_h+b_hi,0,

K,35,0,C-b_h+b_hi,0,

K,66,b_de/2-d3,C-b_h+b_hi+b_ha,0,

K,37,0,C-b_h+b_hi+b_ha,0,

K,67,b_de/2-d3-d4,C-b_h+b_hi+b_ha,0,

K,68,b_de/2-d3-d4,C-b_h+b_hi,0,

K,69,b_de/2-d3-d4+d5,C-b_h+b_hi,0,

K,70,b_de/2-d3-d4+d5,C-b_h+b_hi-p_hc,0,

K,38,0,C-b_h+b_hi-p_hc,0,

K,39,-s_up,0,0,

K,40,-s_up-s_d,-s_h,0,

nn=100

K,1+nn,0+D,-s_h,0,

K,2+nn,0+D,0,0,

K,3+nn,s_up+s_d+D,-s_h,0,

K,4+nn,s_up+D,0,0,

$K,8+nn,+0.5*sc_d+D,-0.5*sc_h-s_h,0,$

$K,5+nn,0+D,-0.5*sc_h-s_h,0,$

$K,9+nn,+0.5*sc_d+D,-s_h,0,$

$K,10+nn,+0.5*sc_d+D,0.5*sc_h-s_h,0,$

$K,6+nn,0+D,0.5*sc_h-s_h,0,$

$K,21+nn,+p_d1/2+D,A-a_h1-a_r1-a_h2-2*a_r2-a_h3+p_h1,0,$

$K,7+nn,0+D,A-a_h1-a_r1-a_h2-2*a_r2-a_h3+p_h1,0,$

$K,22+nn,+a_ds/2+D,A,0,$

$K,11+nn,0+D,A,0,$

$K,23+nn,+a_ds/2+D,A-a_h1,0,$

$K,12+nn,0+D,A-a_h1,0,$

$K,24+nn,+a_ds/2+a_r1+D,A-a_h1-a_r1,0,$

$K,13+nn,0+D,A-a_h1-a_r1,0,$

$K,25+nn,+a_ds/2+a_r1+d1+D,A-a_h1-a_r1,0,$

$K,26+nn,+a_ds/2+a_r1+d1+D,A-a_h1-a_r1-a_h2,0,$

$K,14+nn,0+D,A-a_h1-a_r1-a_h2,0,$

$K,27+nn,+a_{ds}/2+a_{r1}+d1+d2+D,A-a_{h1-a_{r1-a_{h2}},0,$

$K,28+nn,+a_{ds}/2+a_{r1}+d1+d2+D,A-a_{h1-a_{r1-a_{h2-2*a_{r2}}},0,$

$K,15+nn,0+D,A-a_{h1-a_{r1-a_{h2-2*a_{r2}}},0,$

$K,29+nn,+a_{ds}/2+a_{r1}+d1+d2+D,A-a_{h1-a_{r1-a_{h2-2*a_{r2-a_{h3}}}},0,$

$K,16+nn,0+D,A-a_{h1-a_{r1-a_{h2-2*a_{r2-a_{h3}}}},0,$

$K,30+nn,+p_{d1}/2+D,A-a_{h1-a_{r1-a_{h2-2*a_{r2-a_{h3}}}},0,$

$K,31+nn,+a_{ds}/2+D,A-a_{h1-a_{r1}},0,$

$K,34+nn,+a_{ds}/2+a_{r1}+d1+d2-a_{r2}+D,A-a_{h1-a_{r1-a_{h2-a_{r2}}}},0,$

$K,17+nn,0+D,A-a_{h1-a_{r1-a_{h2-a_{r2}}}},0,$

$K,36+nn,+a_{ds}/2+a_{r1}+d1+d2+D,A-a_{h1-a_{r1-a_{h2-a_{r2}}}},0,$

$K,54+nn,p_{d1}/2+D,B,0,$

$K,18+nn,0+D,B,0,$

$K,55+nn,p_{d1}/2+D,B-2*c_h,0,$

$K,19+nn,0+D,B-2*c_h,0,$

$K,56+nn,c_{di}/2+D,B-2*c_h,0,$

$K,57+nn,c_{di}/2+D,B-1*c_h,0,$

$K,20+nn,0+D,B-1*c_h,0,$

$K,58+nn,c_{di}/2+D,B,0,$

$K,59+nn,c_{de}/2+D,B,0,$

$K,60+nn,c_{de}/2+D,B-1*c_h,0,$

$K,61+nn,c_{de}/2+D,B-2*c_h,0,$

$K,62+nn,b_{de}/2+D,C,0,$

$K,32+nn,0+D,C,0,$

$K,63+nn,b_{de}/2+D,C-b_h,0,$

$K,33+nn,0+D,C-b_h,0,$

$K,64+nn,b_{de}/2-d3+D,C-b_h,0,$

$K,65+nn,b_{de}/2-d3+D,C-b_h+b_{hi},0,$

$K,35+nn,0+D,C-b_h+b_{hi},0,$

$K,66+nn,b_{de}/2-d3+D,C-b_h+b_{hi}+b_{ha},0,$

$K,37+nn,0+D,C-b_h+b_{hi}+b_{ha},0,$

$K,67+nn,b_{de}/2-d3-d4+D,C-b_h+b_{hi}+b_{ha},0,$

$K,68+nn,b_{de}/2-d3-d4+D,C-b_h+b_{hi},0,$

$K,69+nn,b_{de}/2-d3-d4+d5+D,C-b_h+b_{hi},0,$

K,70+nn,b_de/2-d3-d4+d5+D,C-b_h+b_hi-p_hc,0,

K,38+nn,0+D,C-b_h+b_hi-p_hc,0,

K,39+nn,-s_up+D,0,0,

K,40+nn,-s_up-s_d+D,-s_h,0,

K,141,-s_up-Laba,0,0,

K,142,-s_up-Laba,t,0,

K,143,3*s_up+Laba+L,0,0,

K,144,3*s_up+Laba+L,t,0,

!##### LINHAS #####

LARC,23,24,31,-a_r1,

LARC,27,34,36,+a_r2,

LARC,34,28,36,+a_r2,

LARC,23+nn,24+nn,31+nn,-a_r1,

LARC,27+nn,34+nn,36+nn,+a_r2,

LARC,34+nn,28+nn,36+nn,+a_r2,

!##### AREAS #####

A,40,3,4,39

A,1,9,8,5

A,3,9,8,5,7,21,30,29,28,34,27,26,25,24,23

A,7,21,68,69,70,38

A,58,57,60,59

A,57,60,61,56

A,55,62,63 ,64,65,68

A,40+nn,3+nn,4+nn,39+nn

A,1+nn,9+nn,8+nn,5+nn

A,3+nn,9+nn,8+nn,5+nn,7+nn,21+nn,30+nn,29+nn,28+nn,34+nn,27+nn,26+nn,25+nn,24+nn,23+nn

A,7+nn,21+nn,68+nn,69+nn,70+nn,38+nn

A,58+nn,57+nn,60+nn,59+nn

A,57+nn,60+nn,61+nn,56+nn

A,55+nn,62+nn,63+nn ,64+nn,65+nn,68+nn

A,141,142,144,143

AGLUE,ALL

!*=====

!* MALHA

!*=====

!*##### Material Properties #####

MPTEMP,,,,,,

MPTEMP,1,0

MPDATA,EX,3,,7000000000

MPDATA,PRXY,3,,0.33

MPDATA,DENS,3,,2700

MPTEMP,,,,,,

MPTEMP,1,0

MPDATA,EX,2,,21000000000

MPDATA,PRXY,2,,0.29

MPDATA,DENS,2,,7846.3

```

/COM, MATERIAL PROPERTIES OF LEAD ZIRCONATE TITANATE (PZT-4A)

/COM,

/COM, -- MATERIAL MATRICES (POLAR AXIS ALONG Y-AXIS): IEEE INPUT

/COM,

/COM, [s11 s13 s12 0 0 0] [0 d31 0] [ep11 0 0]
/COM, [s13 s33 s13 0 0 0] [0 d33 0] [0 ep33 0]
/COM, [s12 s13 s11 0 0 0] [0 d31 0] [0 0 ep11]
/COM, [0 0 0 s44 0 0] [0 0 d15]
/COM, [0 0 0 0 s66 0] [0 0 0]
/COM, [0 0 0 0 0 s44] [d15 0 0]

/COM,

/COM, - COMPLIANCE COEFFICIENTS, M2/N

S11=12.3E-12

S12=-4.05E-12

S13=-5.31E-12

S33=15.5E-12

S44=39.0E-12

S66=32.7E-12

/COM, - PIEZOELECTRIC STRAIN COEFFICIENTS, C/N

D15=4.96E-10

D31=-1.23E-10

D33=2.89E-10

/COM, - RELATIVE PERMITTIVITY AT CONSTANT STRESS

EP11=1475

EP33=1300

/COM, - DENSITY, KG/M3

RHO=7500

/NOPR

/COM,

/COM, -- MATERIAL MATRICES (POLAR AXIS ALONG Y-AXIS): ANSYS INPUT

/COM,

```

```

/COM, [s11 s13 s12 0 0 0] [0 d31 0] [ep11 0 0]
/COM, [s13 s33 s13 0 0 0] [0 d33 0] [0 ep33 0]
/COM, [s12 s13 s11 0 0 0] [0 d31 0] [0 0 ep11]
/COM, [0 0 0 s44 0 0] [d15 0 0]
/COM, [0 0 0 0 s44 0] [0 0 d15]
/COM, [0 0 0 0 0 s66] [0 0 0]

```

```

TB,ANEL,1,,,1      ! ANISOTROPIC ELASTIC COMPLIANCE MATRIX

```

```

TBDA,1,S11,S13,S12

```

```

TBDA,7,S33,S13

```

```

TBDA,12,S11

```

```

TBDA,16,S44

```

```

TB,PIEZ,1,,,1     ! PIEZOELECTRIC STRAIN MATRIX

```

```

TBDA,2,D31

```

```

TBDA,5,D33

```

```

TBDA,8,D31

```

```

TBDA,10,D15

```

```

TB,DPER,1,,,1     ! DIELECTRIC PERMITTIVITY AT CONSTANT STRESS

```

```

TBDA,1,EP11,EP33

```

```

MP,DENS,1,RHO      ! DENSITY

```

```

!*##### Defining elements#####

```

```

ET,1,PLANE223,1001,,1 ! PIEZOELECTRIC AXISYMMETRIC ELEMENT TYPE

```

```

ET,2,PLANE183       ! AXISYMMETRIC ELEMENT TYPE

```

```

ET,3,PLANE183       ! PLANE ELEMENT TYPE

```

```

KEYOPT,2,1,0

```

```

KEYOPT,2,3,1

```

```

KEYOPT,2,6,0

```

```

KEYOPT,3,1,0

```

KEYOPT,3,3,3

KEYOPT,3,6,0

R,1,thick,

!*##### Meshing #####

FLST,5,3,5,ORDE,2

FITEM,5,16

FITEM,5,-18

CM,_Y,AREA

ASEL,,,P51X

CM,_Y1,AREA

CMSEL,S,_Y

!*

CMSEL,S,_Y1

AATT, 3, 1, 3, 0,

CMSEL,S,_Y

CMDELE,_Y

CMDELE,_Y1

!*

FLST,5,2,5,ORDE,2

FITEM,5,2

FITEM,5,19

CM,_Y,AREA

ASEL,,,P51X

CM,_Y1,AREA

CMSEL,S,_Y

!*

CMSEL,S,_Y1

AATT, 2, 1, 2, 0,

CMSEL,S,_Y

CMDELE,_Y

CMDELE,_Y1

FLST,5,2,5,ORDE,2

FITEM,5,21

FITEM,5,23

CM,_Y,AREA

ASEL, , , ,P51X

CM,_Y1,AREA

CMSEL,S,_Y

!*

CMSEL,S,_Y1

AATT, 3, 1, 2, 0,

CMSEL,S,_Y

CMDELE,_Y

CMDELE,_Y1

!*

FLST,5,2,5,ORDE,2

FITEM,5,5

FITEM,5,-6

CM,_Y,AREA

ASEL, , , ,P51X

CM,_Y1,AREA

CMSEL,S,_Y

!*

CMSEL,S,_Y1

AATT, 1, 1, 1, 0,

CMSEL,S,_Y

CMDELE,_Y

CMDELE,_Y1

KWPAVE, 102

CSWPLA,11,0,1,1,

FLST,5,2,5,ORDE,2

FITEM,5,9

FITEM,5,20

CM,_Y,AREA

ASEL, , , ,P51X

CM,_Y1,AREA

CMSEL,S,_Y

!*

CMSEL,S,_Y1

AATT, 2, 1, 2, 11,

CMSEL,S,_Y

CMDELE,_Y

CMDELE,_Y1

!*

FLST,5,2,5,ORDE,2

FITEM,5,22

FITEM,5,24

CM,_Y,AREA

ASEL, , , ,P51X

CM,_Y1,AREA

CMSEL,S,_Y

!*

CMSEL,S,_Y1

AATT, 3, 1, 2, 11,

CMSEL,S,_Y

CMDELE,_Y

CMDELE,_Y1

!*

FLST,5,2,5,ORDE,2

FITEM,5,12

FITEM,5,-13

CM,_Y,AREA

ASEL, , , ,P51X

CM,_Y1,AREA
CMSEL,S,_Y
!*
CMSEL,S,_Y1
AATT, 1, 1, 1, 11,
CMSEL,S,_Y
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1

WPCSYS,-1,0

FLST,2,2,5,ORDE,2
FITEM,2,16
FITEM,2,-17
AESIZE,P51X,0.005,
MSHAPE,0,2D
MSHKEY,0

FLST,5,2,5,ORDE,2
FITEM,5,16
FITEM,5,-17
CM,_Y,AREA
ASEL,,,P51X
CM,_Y1,AREA
CHKMSH,'AREA'
CMSEL,S,_Y
!*
AMESH,_Y1
!*
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
CMDELE,_Y2

FLST,5,12,5,ORDE,9

FITEM,5,2

FITEM,5,5

FITEM,5,-6

FITEM,5,9

FITEM,5,12

FITEM,5,-13

FITEM,5,19

FITEM,5,20

FITEM,5,-24

CM,_Y,AREA

ASEL, , , P51X

CM,_Y1,AREA

CHKMSH,'AREA'

CMSEL,S,_Y

!*

AMESH,_Y1

!*

CMDELE,_Y

CMDELE,_Y1

CMDELE,_Y2

!*

!##### REFINAMENTO #####

FLST,5,14,5,ORDE,10

FITEM,5,2

FITEM,5,5

FITEM,5,-6

FITEM,5,9

FITEM,5,12

FITEM,5,-13

```
FITEM,5,16
FITEM,5,-17
FITEM,5,19
FITEM,5,-24
CM,_Y,AREA
ASEL,,,P51X
CM,_Y1,AREA
CMSEL,S,_Y
CMDELE,_Y

AREFINE,_Y1,,,1,0,1,1
CMDELE,_Y1

SMRT,1
MSHAPE,0,2D
!*
CM,_Y,AREA
ASEL,,, 18
CM,_Y1,AREA
CHKMSH,'AREA'
CMSEL,S,_Y

AMESH,_Y1

CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
CMDELE,_Y2

FLST,5,1,5,ORDE,1
FITEM,5,18
CM,_Y,AREA
ASEL,,,P51X
CM,_Y1,AREA
```

CMSEL,S,_Y

CMDELE,_Y

AREFINE,_Y1,,2,0,1,1

CMDELE,_Y1

!*

!##### Acoplamento de nós #####

nos=12

/PREP7

*dim,nleft,,nos

nleft(1,1)=2,4,6,14482,14486,14488,340,342,344,14364,14368,14370

*dim,nright,,nos

nright(1,1)=8,10,12,13795,13846,14490,346,348,350,13727,13730,14372

flag=1

i=1

j=1

*DOWHILE,flag

CP,j,UX,nleft(i,1),nright(i,1)

CP,j+1,UY,nleft(i,1),nright(i,1)

*IF,i,EQ,nos,EXIT

i=i+1

j=j+2

*ENDDO

!##### Análise #####

!=====

!* ANÁLISE HARMÔNICA

!=====

/SOL

ANTYPE,3

HROPT,FULL

HROUT,ON

LUMPM,0

EQSLV, ,0,

PSTRES,0

HARFRQ,fop,fop,

NSUBST,1,

KBC,0

ALPHAD,0,

BETAD,0,

DMPRAT,0.01, !* ##### AMORTECIMENTO

!*=====

!* Condições de contorno

!*=====

!* ##### Eixos imóveis

lin=6

*dim,linhas,,lin

linhas(1,1) = 14,16,29,50,52,65

flag=1

i=1

*DOWHILE,flag

DL,linhas(i,1), ,UX,0

*IF,i,EQ,lin,EXIT

i=i+1

*ENDDO

!* ##### Carregamento Elétrico

DL,67, ,VOLT,0,0

DL,31, ,VOLT,0,0

!* ##### Identifica nós na linha superior da Viga

*Get,NoNodes,node,0,count !Get the number of nodes in the mesh

flag=1

i=1

j=1

*DOWHILE,flag

*IF,i,GT,NoNodes,EXIT

*GET,pivot,NODE,i,LOC,Y

*IF,pivot,GT,0.0029999,THEN

j=j+1

*ENDIF

i=i+1

*ENDDO

LinNodes=j-1

*Dim, MyNodeNoArray,array, LinNodes

flag=1

i=1

j=1

*DOWHILE,flag

*IF,i,GT,NoNodes,EXIT

*GET,pivot,NODE,i,LOC,Y

```

*IF,pivot,GT,0.0029999,THEN

MyNodeNoArray(j)=i

j=j+1

*ENDIF

i=i+1

*ENDDO

*dim,nodalresult,,LinNodes,steps+1

*dim,nodalX,,LinNodes

!* ##### Loop das análises Harmonicas

step=0

*DOWHILE,flag

*IF,step,EQ,steps+1,EXIT

fase=2*3.14159265359*step/steps !* Atualiza a fase

VAr1=VA*SIN(fase)          !* Reaplica o carregamento

VAi1=0

VAr2=VA*COS(fase)

VAi2=0

!* Carregamento Elétrico

/SOL

DL,71, ,VOLT,-VAr1,-VAi1

DL,69, ,VOLT,VAr1,VAi1

DL,35, ,VOLT,-VAr2,-VAi2

DL,33, ,VOLT,+VAr2,VAi2

```

```

SOLVE                                !* Resolve de novo

FINISH

/POST1

SET,FIRST

flag2=1

i=1

!* Laço de pós-processamento: Salva o deslocamento dos nós selecionados

*DOWHILE,flag2

*GET,nodalresult(i,step+1),NODE,MyNodeNoArray(i),U,Y

*IF,i,EQ,LinNodes,EXIT

i=i+1

*ENDDO

step=step+1

*ENDDO

!*##### Fim do LOOP #####

!* Laço para salvar a posição x dos nós

flag=1

i=1

*DOWHILE,flag

*GET,nodalX(i,1),NODE,MyNodeNoArray(i),LOC,X

*IF,i,EQ,LinNodes,EXIT

i=i+1

*ENDDO

```

```

!* Laço que exporta os dados para arquivos txt

!* ATENCAO: Inserir seu proprio diretorio nas variaveis str1 !

!* Executar o código em MATLAB em seguida para terminar o pos processamento

flag=1

step=0

str1='Desktop\postprocessing2\'

str3='.txt'

*DOWHILE,flag

*IF,step,EQ,steps+1,EXIT

str2=CHRVAL(step/steps*360)

Diretorio=STRCAT(Str1,STRCAT(Str2,Str3))

*cfopen,Diretorio

*VLEN, LinNodes, 1

*VWRITE,MyNodeNoArray(1),nodalX(1),nodalresult(1,step+1)

(F8.0,g16.8,g16.8)

*cfclose

step=step+1

*ENDDO

```

A.4 Análise Harmônica: Viga de seção em “U”

```

/PREP7

/UNITS,SI

!* Definindo variáveis

*SET,L,0.5

*SET,b,0.035

*SET,t,0.001

*SET,te,0.001

*SET,he,0.001

*SET,Lc,L/45

*SET,tc,0.0005

*SET,bc,0.035

```

f1=19667.6

f2=20468.6

f=(f1+f2)/2

!* Construindo geometria da estrutura

BLOCK,-L/45*1.5,L+L/45*1.5,0,b,0,t,

BLOCK,-L/45*1.5,L+L/45*1.5,0,te,t,t+he,

BLOCK,-L/45*1.5,L+L/45*1.5,b-te,b,t,t+he,

!* Unificando os volumes

FLST,2,3,6,ORDE,2

FITEM,2,1

FITEM,2,-3

VADD,P51X

!* Construindo geometria da cerâmica piezoelétrica

BLOCK,-lc/2,lc/2,0,bc,0,-tc,

BLOCK,L-lc/2,L+lc/2,0,bc,0,-tc,

!* Definindo o material: Alumínio

ET,1,SOLID186

MPTEMP,,,,,,,,

MPTEMP,1,0

MPDATA,EX,1,,72E9

MPDATA,PRXY,1,,0.33

MPTEMP,,,,,,,,

MPTEMP,1,0

MPDATA,DENS,1,,2700

!* Definindo o material: PZT-5A

ET,2,SOLID226, 1001,,0 !sólido 3D, 1001 =piezoelétrico

e31=-5.4

e33=15.8

e15=12.3

!TB data table, matrix piezo, núm. material

TB,PIEZ,2 !* PZT-5A

!TBDATA preenche matrix, início, valor [1 a 6]

TBDATA,1,0,0,e31 !* | 0 -5.4 0 | | 0 e31 0 |

TBDATA,4,0,0,e31 !* | 0 15.8 0 | | 0 e33 0 |

TBDATA,7,0,0,e33 !* | 0 -5.4 0 | | 0 e31 0 |

TBDATA,10,0,0,0 !* | 12.3 0 0 | = | e15 0 0 |

TBDATA,13,0,e15,0 !* | 0 0 12.3 | | 0 0 e15 |

TBDATA,16,e15,0,0 !* | 0 0 0 | | 0 0 0 |

c11=12.5E10

c12=7.54E10

c13=7.52E10

c33=11.1E10

c44=2.11E10

c66=.5*(c11-c12)

TB,ANEL,2

TBDATA,1,c11,c12,c13,0,0,0 !* | 12.5 7.52 7.54 0 0 0 | | c11 c13 c12 0 0 0 |

TBDATA,7,c11,c13,0,0,0 !* | 11.1 7.52 0 0 0 | | c33 c13 0 0 0 |

TBDATA,12,c33,0,0,0 !* | 12.5 0 0 0 | | c11 0 0 0 |

TBDATA,16,c66,0,0 !* | 2.11 0 0 | = | c44 0 0 |

TBDATA,19,c44,0 !* | 2.11 0 | | c44 0 |

TBDATA,21,c44 !* | 2.26 | | c66 |

e00=8.85E-12

eps1=916*8.85E-12

eps3=830*8.85E-12

MP,PERX,2,eps1 !* | 8.1066 0 0 | | eps11 0 0 |

MP,PERY,2,eps1 !* | 0 7.3455 0 | = | 0 eps33 0 |

MP,PERZ,2,eps3 !* | 0 0 8.1066 | | 0 0 eps11 |

MP,DENS,2,7650

!* Unindo as superfícies da cerâmica à estrutura

FLST,2,3,6,ORDE,3

FITEM,2,1

FITEM,2,-2

FITEM,2,4

VGLUE,P51X

!* Associa material à geometria

VATT, 2, , 2, 0

CM,_Y,VOLU

VSEL, , , , 3

CM,_Y1,VOLU

CMSEL,S,_Y

!*

CMSEL,S,_Y1

VATT, 1, , 1, 0

CMSEL,S,_Y

```
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
!*
!* Cria malha de elementos finitos
SMRT,7
MSHAPE,1,3D
MSHKEY,0
!*
FLST,5,3,6,ORDE,2
FITEM,5,1
FITEM,5,-3
CM,_Y,VOLU
VSEL,,,P51X
CM,_Y1,VOLU
CHKMSH,'VOLU'
CMSEL,S,_Y
!*
VMESH,_Y1
!*
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
CMDELE,_Y2
!*
!* Configurando análise harmônica
/SOL
!*
ANTYPE,3
!* Aplicando condições de contorno

FLST,2,2,5,ORDE,2
FITEM,2,5
```

```

FITEM,2,13

/GO

DA,P51X,VOLT,0,0

FLST,2,1,5,ORDE,1

FITEM,2,12

/GO

DA,P51X,VOLT,0,50

FLST,2,1,5,ORDE,1

FITEM,2,2

/GO

DA,P51X,VOLT,50,0

HARFRQ,0,f,

NSUBST, ,

KBC,1

!* Configurando análise modal

!* /SOL

!* ANTYPE,2

!* MODOPT,LANB,20

!* EQSLV,SPAR

!* MXPAND,20, , ,0

!* LUMPM,0

!* PSTRES,0

!* MODOPT,LANB,20,20000,22000, ,OFF

!-SET,NEXT

/SOL

/STATUS,SOLU

SOLVE

/VIEW,1,1,1,1

/ANG,1

/REP,FAST

```

```
FINISH

/POST1

SET,FIRST

PLNS,U,Z

ANHARM,12,0.5
```

A.5 Código em Matlab para pós-processamento

```
% Esse código recebe os resultados de deslocamento nodal das análises
% harmônicas, ordenas os nós baseado na posição dos nós e cria os
gráficos
% de pos-processamento.
```

```
close all
clear all
clc
```

```
steps=72;      % Numero de passos ou análises harmônicas
nodes=607;    % 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=0:1:steps
```

```
    step=k*360/steps;
    str1='c:\users\guilherme\desktop\postprocessing2\';
    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

% ##### PLOTS
#####

Y=0:360/steps:360;
X=posx(1,:);
Z=uy;
contourf(X,Y,Z,20);
title('Amplitude de Deslocamento: Comprimento da Viga x
Fase','fontsize',12);
xlabel('Comprimento da Viga','fontsize',12);
ylabel('\theta','fontsize',24);

figure
hold on
surf(X,Y,Z)
title('Amplitude de Deslocamento: Comprimento da Viga x
Fase','fontsize',12);
xlabel('Comprimento da Viga','fontsize',12);
ylabel('\theta','fontsize',24);
cor=['b','r','g','y','k','m'];

figure
hold on
for i=1:1:steps
    j=int8(i/12);
    if j<1
        j=1;
    end
    plot(X,uy(i,:),cor(j));
end
hold off
title('Amplitude de Deslocamento x Comprimento da
Viga','fontsize',12);
xlabel('Comprimento da Viga','fontsize',12);
ylabel('Amplitude de Deslocamento','fontsize',12);

figure

```

```

hold on

plot(X,uy(1,:), 'b', 'LineWidth',3);
plot(X,uy(25,:), 'r', 'LineWidth',3);
plot(X,uy(49,:), 'k', 'LineWidth',3);

title('Amplitude de Deslocamento x Comprimento da
Viga', 'fontsize',12);
xlabel('Comprimento da Viga', 'fontsize',12);
ylabel('Amplitude de Deslocamento', 'fontsize',12);
legend(' \Theta=0^\circ', ' \Theta=120^\circ', ' \Theta=240^\circ')

hold off

muy=abs(uy);
muy2=muy(1:steps/2+1,:);
k=1;

for i=1:1:steps/2

    [pks,locs] = findpeaks(-muy2(i,:));

    for j=1:numel(pks);

        if posx(1,locs(j))<=0 && posx(1,locs(j))>=-0.3

            way(k)=-posx(1,locs(j));
            k=k+1;

        end

    end

end

way=sort(way);
way2=zeros(17,steps/2);
[imax jmax]= size(muy2);
k=0;

for i=1:16
    for j=1:imax-1
        way2(i,j)=way(k+j);
    end
    k=k+j;
end

j=1;
for i=k:numel(way)
    way2(17,j)=way(i);
    j=j+1;
end

% ##### PLOTS
% #####

figure

```

```

Y=0:360/steps:360;
X=posx(1,:);
Z=muy;
contourf(X,Y,Z,12);
title(' Módulo da Amplitude de Deslocamento: Comprimento da Viga x
Fase', 'fontsize',12);
xlabel('Comprimento da Viga','fontsize',12);
ylabel('\theta','fontsize',24);

```

figure

```

Y2=0:360/steps:180;
Z=muy2;
contourf(X,Y2,Z,12);
title(' Módulo da Amplitude de Deslocamento: Comprimento da Viga x
Fase', 'fontsize',12);
xlabel('Comprimento da Viga','fontsize',12);
ylabel('\theta','fontsize',24);

```

figure

```

Z=-muy;
contourf(X,Y,Z,12);
title(' Módulo da Amplitude de Deslocamento: Comprimento da Viga x
Fase', 'fontsize',12);
xlabel('Comprimento da Viga','fontsize',12);
ylabel('\theta','fontsize',24);

```

figure

```

plot(0:10:598*10,way,'LineWidth',3);
title(' Posição do nó da onda propagante x Fase
\theta', 'fontsize',12);
xlabel('Fase \theta [°]','fontsize',24);
ylabel('Posição do nó da onda propagante [m]','fontsize',12);

```

figure

```

hold on
Z=muy2;
surf(X,Y2,Z)
title('Módulo da Amplitude de Deslocamento: Comprimento da Viga x
Fase', 'fontsize',12);
xlabel('Comprimento da Viga','fontsize',12);
ylabel('\theta','fontsize',24);

```

A.6 Script de aciomento

```

%% Initialization
%Parameters
IP = '169.254.5.21';
f = 21300;
phi_ini1 =0;
phi_ini2 = 0;

```

```

a_max1 = 0.1;
a_max2 = 0.1;
amin = 0.007;
%%
%Connection
vAddress = ['TCPIP0::' IP '::inst0::INSTR']; %build visa address
string to connect
fgen = visa('AGILENT',vAddress); %build IO object
fgen.Timeout = 15; %set IO time out
%open connection to 33500A/B waveform generator
try
fopen(fgen);
catch exception %problem occurred throw error message
uiwait(msgbox('Error occurred trying to connect to the 33522, verify
correct IP address'));
rethrow(exception);
end
fprintf (fgen, '*IDN?');
idn = fscanf (fgen);
fprintf('Connected to: \n')
fprintf (idn)
fprintf ('\n\n')
%%
%Configure
fprintf(fgen, 'unit:angl deg');
fprintf(fgen, ['source1:apply:sin ' num2str(f) ', ' num2str(a_max1)
',0']);
fprintf(fgen, ['source1:phase ' num2str(phi_ini1)]);
fprintf(fgen, ['source2:apply:sin ' num2str(f) ', ' num2str(a_max2)
',0']);
fprintf(fgen, ['source2:phase ' num2str(phi_ini2)]);
%% Test 1
% fprintf(fgen, ['source1:voltage ' num2str(a_max1)]);
% fprintf(fgen, ['source2:voltage ' num2str(a_max2)]);
% fprintf(fgen, ['source1:voltage:limit:high ' num2str(a_max1+0.001)]);
% fprintf(fgen, ['source2:voltage:limit:high ' num2str(a_max2+0.001)]);
% fprintf(fgen, ['source1:voltage:limit:low ' num2str(amin-0.002)]);
% fprintf(fgen, ['source2:voltage:limit:low ' num2str(amin-0.002)]);
% fprintf(fgen, 'source1:voltage:limit:state on');
% fprintf(fgen, 'source2:voltage:limit:state on');
% fprintf(fgen, 'source1:voltage:range:auto 0');
% fprintf(fgen, 'source2:voltage:range:auto 0');
%%
pause(5)
x=0:0.01:2*pi;
figure(1)
for theta = 0:1:1*360
a1 = a_max1*cos(theta*2*pi/360);
a2 = a_max2*sin(theta*2*pi/360);
if abs(a1) < amin
if a1 ~= 0
a1 = amin*a1/abs(a1);
else
a1 = amin;
end
end
if abs(a2) < amin
if a2 ~= 0
a2 = amin*a2/abs(a2);
else
a2 = amin;

```

```

end
end
if a1 < 0
phi1 = phi_ini1+180;
%phi2 = phi_ini2+180;
a1 = abs(a1);
else
%phi2 = phi_ini2;
phi1 = phi_ini1;
end
if a2 < 0
phi2 = phi_ini2+180;
%phi1 = phi_ini1-180;
a2 = abs(a2);
else
phi2 = phi_ini2;
%phi1 = phi_ini1;
end
fprintf(fgen, ['source1:voltage ' num2str(a1)]);
fprintf(fgen, ['source1:phase ' num2str(phi1)]);
fprintf(fgen, ['source2:voltage ' num2str(a2)]);
fprintf(fgen, ['source2:phase ' num2str(phi2)]);
pause(0.001)
a1
a2
phi1
phi2
plot(x, cos(x+phi1)*a1+sin(x+phi2)*a2)
end
for theta = 0:-1:-360
a1 = a_max1*cos(theta*2*pi/360);
a2 = a_max2*sin(theta*2*pi/360);
if abs(a1) < amin
if a1 ~= 0
a1 = amin*a1/abs(a1);
else
a1 = amin;
end
end
if abs(a2) < amin
if a2 ~= 0
a2 = amin*a2/abs(a2);
else
a2 = amin;
end
end
if a1 < 0
phi1 = phi_ini1+180;
%phi2 = phi_ini2+180;
a1 = abs(a1);
else
%phi2 = phi_ini2;
phi1 = phi_ini1;
end
if a2 < 0
phi2 = phi_ini2+180;
%phi1 = phi_ini1-180;
a2 = abs(a2);
else
phi2 = phi_ini2;
%phi1 = phi_ini1;

```

```

end
fprintf(fgen, ['source1:voltage ' num2str(a1)]);
fprintf(fgen, ['source1:phase ' num2str(phi1)]);
fprintf(fgen, ['source2:voltage ' num2str(a2)]);
fprintf(fgen, ['source2:phase ' num2str(phi2)]);
pause(0.2)
a1
a2
phi1
phi2
plot(x,cos(x+phi1)*a1+sin(x+phi2)*a2)
end
%%
%Read Error
fprintf(fgen, 'SYST:ERR?');
errorstr = fscanf (fgen);
% error checking
if strncmp (errorstr, '+0,"No error"',13)
errorcheck = 'Arbitrary waveform generated without any error\n';
fprintf (errorcheck)
else
errorcheck = ['Error reported: ', errorstr];
fprintf (errorcheck)
end
fclose (fgen);

```

A.7 Modelo Langevin acoplado ao sonotrodo

/PREP7

/UNITS,SI

/RGB,INDEX,100,100,100,0

/RGB,INDEX,80,80,80,13

/RGB,INDEX,60,60,60,14

/RGB,INDEX,0,0,0,15

/REPLOT

```

!*%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%

```

Definindo

parâmetros

geométricos

SET,Lu,0.30 ! Comprimento Útil

SET,t,0.003 ! Espessura da viga

SET,Aba,0.012162 ! Comprimento Aba

SET,thick,0.05 ! Thickness

SET,s_up,0.004/2! Metade do Comprimento do contato com o amplificador

SET,s_h,0.132 ! altura sonotrodo

SET,s_d,0.011 ! largura da base do sonotrodo= $2*s_d+2*s_{up}$

SET,sc_d,0.010 ! parafuso sem cabeça_diametro

SET,sc_h,0.045 ! parafuso sem cabeça_altura

SET,a_h1,0.0504 ! Amp_Altura1

SET,a_h2,0.003 ! Amp_Altura2

SET,a_h3,0.1004 ! Amp_Altura3

SET,a_dm,0.050 ! Amp_Maior diametro

SET,a_r1,0.005 ! Amp_raio do filete superior

SET,a_r2,0.002 ! Amp_raio do filete inferior

SET,a_ds,0.026 ! Amp_diametro superior

SET,a_di,0.040 ! Amp_diametro inferior

SET,p_d1,0.010 ! parafuso_diametro principal

SET,p_dc,0.01545! parafuso_diametro cabeça

SET,p_h1,0.0375 ! parafuso_altura dentro do amp

SET,p_hc,0.010 ! parafuso_diametro principal

SET,c_de,0.0381 ! ceramica_diametro externo

SET,c_h,0.00635 ! ceramica_espessura

SET,c_di,0.0127 ! ceramica_diametro interno

SET,b_h,0.049 ! Bot_Altura

SET,b_hi,0.022 ! Bot_Altura interna

SET,b_ha,0.004 ! Bot_Altura anel

SET,b_de,0.040 ! Bot_diametro externo

SET,b_di,0.020 ! Bot_diametro interno

!*=*****

!* GEOMETRIA

!*=*****

!%%%%%%%%%%%%%% Variáveis de localização
%%%%%%%%%%%%%%

$$L=Lu-2*s_{up}$$

$$Laba=Aba-s_{up}$$

$$d1=(a_{dm}-a_{ds})/2-a_{r1}$$

$$d2=-1*(a_{dm}-a_{di})/2$$

$$d3=(b_{de}-b_{di})/2$$

$$d4=(b_{di}-p_{d1})/2$$

$$d5=(p_{dc}-p_{d1})/2$$

$$A=-s_h$$

$$B=A-a_{h1}-a_{r1}-a_{h2}-2*a_{r2}-a_{h3}$$

$$C=B-2*c_h$$

$$D=L+s_{up}$$

$$Ltot=L+2*(Laba+2*s_{up})$$

!##### PONTOS #####

K,1,0,-s_h,0,

K,2,0,0,0,

$K,3,s_{up}+s_d,-s_h,0,$

$K,4,s_{up},0,0,$

$K,8,+0.5*sc_d,-0.5*sc_h-s_h,0,$

$K,5,0,-0.5*sc_h-s_h,0,$

$K,9,+0.5*sc_d,-s_h,0,$

$K,10,+0.5*sc_d,0.5*sc_h-s_h,0,$

$K,6,0,0.5*sc_h-s_h,0,$

$K,21,+p_d/2,A-a_h1-a_r1-a_h2-2*a_r2-a_h3+p_h1,0,$

$K,7,0,A-a_h1-a_r1-a_h2-2*a_r2-a_h3+p_h1,0,$

$K,22,+a_{ds}/2,A,0,$

$K,11,0,A,0,$

$K,23,+a_{ds}/2,A-a_h1,0,$

$K,12,0,A-a_h1,0,$

$K,24,+a_{ds}/2+a_r1,A-a_h1-a_r1,0,$

K,13,0,A-a_h1-a_r1,0,

K,25,+a_ds/2+a_r1+d1,A-a_h1-a_r1,0,

K,26,+a_ds/2+a_r1+d1,A-a_h1-a_r1-a_h2,0,

K,14,0,A-a_h1-a_r1-a_h2,0,

K,27,+a_ds/2+a_r1+d1+d2,A-a_h1-a_r1-a_h2,0,

K,28,+a_ds/2+a_r1+d1+d2,A-a_h1-a_r1-a_h2-2*a_r2,0,

K,15,0,A-a_h1-a_r1-a_h2-2*a_r2,0,

K,29,+a_ds/2+a_r1+d1+d2,A-a_h1-a_r1-a_h2-2*a_r2-a_h3,0,

K,16,0,A-a_h1-a_r1-a_h2-2*a_r2-a_h3,0,

K,30,+p_d1/2,A-a_h1-a_r1-a_h2-2*a_r2-a_h3,0,

K,31,+a_ds/2,A-a_h1-a_r1,0,

K,34,+a_ds/2+a_r1+d1+d2-a_r2,A-a_h1-a_r1-a_h2-a_r2,0,

K,17,0,A-a_h1-a_r1-a_h2-a_r2,0,

K,36,+a_ds/2+a_r1+d1+d2,A-a_h1-a_r1-a_h2-a_r2,0,

K,54,p_d1/2,B,0,

K,18,0,B,0,

K,55,p_d1/2,B-2*c_h,0,

K,19,0,B-2*c_h,0,

K,56,c_di/2,B-2*c_h,0,

K,57,c_di/2,B-1*c_h,0,

K,20,0,B-1*c_h,0,

K,58,c_di/2,B,0,

K,59,c_de/2,B,0,

K,60,c_de/2,B-1*c_h,0,

K,61,c_de/2,B-2*c_h,0,

K,62,b_de/2,C,0,

K,32,0,C,0,

K,63,b_de/2,C-b_h,0,

K,33,0,C-b_h,0,

K,64,b_de/2-d3,C-b_h,0,

K,65,b_de/2-d3,C-b_h+b_hi,0,

K,35,0,C-b_h+b_hi,0,

K,66,b_de/2-d3,C-b_h+b_hi+b_ha,0,

K,37,0,C-b_h+b_hi+b_ha,0,

K,67,b_de/2-d3-d4,C-b_h+b_hi+b_ha,0,

K,68,b_de/2-d3-d4,C-b_h+b_hi,0,

K,69,b_de/2-d3-d4+d5,C-b_h+b_hi,0,

K,70,b_de/2-d3-d4+d5,C-b_h+b_hi-p_hc,0,

K,38,0,C-b_h+b_hi-p_hc,0,

K,39,-s_up,0,0,

K,40,-s_up-s_d,-s_h,0,

!*##### LINHAS #####

LARC,23,24,31,-a_r1,

LARC,27,34,36,+a_r2,

LARC,34,28,36,+a_r2,

!*##### AREAS #####

A,40,3,4,39

A,1,9,8,5

A,3,9,8,5,7,21,30,29,28,34,27,26,25,24,23

A,7,21,68,69,70,38

A,58,57,60,59

A,57,60,61,56

A,55,62,63 ,64,65,68

AGLUE,ALL

!*=====

!* MALHA

!*=====

!*##### Material Properties #####

MPTEMP,,,,,,,,

MPTEMP,1,0

MPDATA,EX,3,,7000000000

MPDATA,PRXY,3,,0.33

MPDATA,DENS,3,,2700

MPTEMP,,,,,,,,

MPTEMP,1,0

MPDATA,EX,2,,21000000000

MPDATA,PRXY,2,,0.29

MPDATA,DENS,2,,7846.3

/COM, MATERIAL PROPERTIES OF LEAD ZIRCONATE TITANATE (PZT-4A)

/COM,

/COM, -- MATERIAL MATRICES (POLAR AXIS ALONG Y-AXIS): IEEE INPUT

/COM,

/COM, [s11 s13 s12 0 0 0] [0 d31 0] [ep11 0 0]

/COM, [s13 s33 s13 0 0 0] [0 d33 0] [0 ep33 0]

/COM, [s12 s13 s11 0 0 0] [0 d31 0] [0 0 ep11]

/COM, [0 0 0 s44 0 0] [0 0 d15]

/COM, [0 0 0 0 s66 0] [0 0 0]

/COM, [0 0 0 0 0 s44] [d15 0 0]

/COM,

/COM, - COMPLIANCE COEFFICIENTS, M2/N

S11=12.3E-12

S12=-4.05E-12

S13=-5.31E-12

S33=15.5E-12

S44=39.0E-12

S66=32.7E-12

/COM, - PIEZOELECTRIC STRAIN COEFFICIENTS, C/N

D15=4.96E-10

D31=-1.23E-10

D33=2.89E-10

/COM, - RELATIVE PERMITTIVITY AT CONSTANT STRESS

EP11=1475

EP33=1300

/COM, - DENSITY, KG/M3

RHO=7500

/NOPR

/COM,

/COM, -- MATERIAL MATRICES (POLAR AXIS ALONG Y-AXIS): ANSYS INPUT

/COM,

/COM, [s11 s13 s12 0 0 0] [0 d31 0] [ep11 0 0]

/COM, [s13 s33 s13 0 0 0] [0 d33 0] [0 ep33 0]

/COM, [s12 s13 s11 0 0 0] [0 d31 0] [0 0 ep11]

/COM, [0 0 0 s44 0 0] [d15 0 0]

/COM, [0 0 0 0 s44 0] [0 0 d15]

/COM, [0 0 0 0 0 s66] [0 0 0]

TB,ANEL,1,,,1 ! ANISOTROPIC ELASTIC COMPLIANCE MATRIX

TBDA,1,S11,S13,S12

TBDA,7,S33,S13

TBDA,12,S11

TBDA,16,S44

TB,PIEZ,1,,,1 ! PIEZOELECTRIC STRAIN MATRIX

TBDA,2,D31

TBDA,5,D33

TBDA,8,D31

TBDA,10,D15

TB,DPER,1,,,1 ! DIELECTRIC PERMITTIVITY AT CONSTANT STRESS

TBDA,1,EP11,EP33

MP,DENS,1,RHO ! DENSITY

!*##### Defining elements#####

ET,1,PLANE223,1001,,1 ! PIEZOELECTRIC AXISYMMETRIC ELEMENT TYPE

ET,2,PLANE183 ! AXISYMMETRIC ELEMENT TYPE

ET,3,PLANE183 ! PLANE ELEMENT TYPE

KEYOPT,2,1,0

KEYOPT,2,3,1

KEYOPT,2,6,0

KEYOPT,3,1,0

KEYOPT,3,3,3

KEYOPT,3,6,0

R,1,thick,

!*##### Meshing #####

CM,_Y,AREA

ASEL,,, 8

CM,_Y1,AREA

CMSEL,S,_Y

!*

CMSEL,S,_Y1

AATT, 3, 1, 3, 0,

CMSEL,S,_Y

CMDELE,_Y

CMDELE,_Y1

!*

FLST,5,2,5,ORDE,2

```
FITEM,5,2  
  
FITEM,5,9  
  
CM,_Y,AREA  
  
ASEL, , , ,P51X  
  
CM,_Y1,AREA  
  
CMSEL,S,_Y  
  
!*  
  
CMSEL,S,_Y1  
  
AATT, 2, 1, 2, 0,  
  
CMSEL,S,_Y  
  
CMDELE,_Y  
  
CMDELE,_Y1  
  
!*  
  
FLST,5,2,5,ORDE,2  
  
FITEM,5,10  
  
FITEM,5,-11  
  
CM,_Y,AREA  
  
ASEL, , , ,P51X  
  
CM,_Y1,AREA  
  
CMSEL,S,_Y  
  
!*  
  
CMSEL,S,_Y1  
  
AATT, 3, 1, 2, 0,  
  
CMSEL,S,_Y  
  
CMDELE,_Y  
  
CMDELE,_Y1  
  
!*  
  
FLST,5,2,5,ORDE,2  
  
FITEM,5,5
```

```
FITEM,5,-6

CM,_Y,AREA

ASEL,,,P51X

CM,_Y1,AREA

CMSEL,S,_Y

!*

CMSEL,S,_Y1

AATT, 1, 1, 1, 0,

CMSEL,S,_Y

CMDELE,_Y

CMDELE,_Y1

!*

!*

FLST,2,1,5,ORDE,1

FITEM,2,8

AESIZE,P51X,0.005,

MSHAPE,0,2D

MSHKEY,0

!*

CM,_Y,AREA

ASEL,,, 8

CM,_Y1,AREA

CHKMSH,'AREA'

CMSEL,S,_Y

!*

AMESH,_Y1

!*

CMDELE,_Y
```

CMDELE,_Y1

CMDELE,_Y2

!*

SMRT,1

FLST,5,6,5,ORDE,5

FITEM,5,2

FITEM,5,5

FITEM,5,-6

FITEM,5,9

FITEM,5,-11

CM,_Y,AREA

ASEL, , , ,P51X

CM,_Y1,AREA

CHKMSH,'AREA'

CMSEL,S,_Y

!*

AMESH,_Y1

!*

CMDELE,_Y

CMDELE,_Y1

CMDELE,_Y2

!*

!##### REFINAMENTO #####

!##### Acoplamento de nós #####

nos=3

```

/PREP7

*dim,nleft,,nos

nleft(1,1) = 2,4,6

*dim,nright,,nos

nright(1,1) = 8,10,12

flag=1

i=1

j=1

*DOWHILE,flag

CP,j,UX,nleft(i,1),nright(i,1)

CP,j+1,UY,nleft(i,1),nright(i,1)

*IF,i,EQ,nos,EXIT

i=i+1

j=j+2

*ENDDO

!##### Análise #####

/SOL

!*=====

!*          ANÁLISE MODAL

!*=====

ANTYPE,2

MODOPT,LANB,10

EQLV,SPAR

MXPAND,10,,0

```

```
LUMPM,0
PSTRES,0
MODOPT,LANB,10,0,200000, ,OFF
```

```
!*##### Condição de Contorno #####
```

```
!* Eixos imóveis
```

```
lin=3
```

```
*dim,linhas,,lin
```

```
linhas(1,1) = 11,13,26
```

```
flag=1
```

```
i=1
```

```
*DOWHILE,flag
```

```
DL,linhas(i,1), ,UX,0
```

```
*IF,i,EQ,lin,EXIT
```

```
i=i+1
```

```
*ENDDO
```

```
SOLVE
```

```
FINISH
```

```
/POST1
```

```
SET,FIRST
```

```
!*
```

```
/EFACET,1
```

```
PLNSOL, U,Y, 0,1.0
```

A.8 Analise modal da vida simples

/PREP7

/UNITS,SI

/RGB,INDEX,100,100,100,0

/RGB,INDEX,80,80,80,13

/RGB,INDEX,60,60,60,14

/RGB,INDEX,0,0,0,15

/REPLOT

!%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
Definindo parâmetros geométricos

SET,L,0.44 ! Comprimento Útil

SET,t,0.003 ! Espessura da viga

SET,thick,0.05 ! Comprimento Viga

SET,s_up,0.004 ! Comprimento do contato com o amplificador

BLC4,0,0,L,t

!* AADD,ALL

!*=====

!* MALHA

!*=====

!*##### Material Properties #####

```
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,EX,1,,70000000000
MPDATA,PRXY,1,,0.33
MPDATA,DENS,1,,2700
```

```
!*##### Defining elements#####
```

```
ET,1,PLANE183      ! PLANE ELEMENT TYPE
KEYOPT,1,1,0
KEYOPT,1,3,3
KEYOPT,1,6,0
R,1,thick,
```

```
AATT, 1, 1, 1, 0,
```

```
SMRT,6
MSHAPE,0,2D
MSHKEY,0
```

```
!*
```

```
CM,_Y,AREA
ASEL,,, 1
CM,_Y1,AREA
```

```
CHKMSH,'AREA'
```

```
CMSEL,S,_Y
```

```
!*
```

```
AMESH,_Y1
```

```
!*
```

```
CMDELE,_Y
```

CMDELE,_Y1

CMDELE,_Y2

!*

FLST,5,1,5,ORDE,1

FITEM,5,1

CM,_Y,AREA

ASEL, , , ,P51X

CM,_Y1,AREA

CMSEL,S,_Y

CMDELE,_Y

!*

!*

AREFINE,_Y1, , ,5,0,1,1

CMDELE,_Y1

!*

/SOL

ANTYPE,2

MODOPT,LANB,20

EQSLV,SPAR

MXPAND,50, , ,0

LUMPM,0

PSTRES,0

MODOPT,LANB,50,50,200000, ,OFF

SOLVE

FINISH

```

/POST1

SET,FIRST

!*

/EFACET,1

PLNSOL,U,Y,0,1.0

```

A.9 Código em MATLAB para projeto de viga

```

% Código para determinar frequência natural da viga simples de seção
% retangular

clc
clear all
close all

rho=2700;
E=70e9;
t=0.003;
L=0.25:0.001:0.5;
n=13:1:28;
lamb=zeros(numel(L),numel(n));
f=zeros(numel(L),numel(n));
fc=zeros(numel(L),numel(n));

for i=1:1:numel(L)
    for j=1:1:numel(n)
        lamb(i,j)=L(i)/(n(j)*0.5);
        f(i,j)=pi*t*sqrt(E/(3*rho))/(lamb(i,j)^2);
        fc(i,j)=abs(f(i,j)-20550)/20550;
    end
end

% plotings

figure
contourf(n,L,lamb,20);
title('Comprimento de onda: Comprimento da Viga [m] x Modo de vibrar
"n"', 'fontsize',24);
ylabel('Comprimento da Viga [m]', 'fontsize',24);
xlabel('Modo de vibrar de flexão "n"', 'fontsize',24);

figure
contourf(n,L,f,20);

title('Frequência Natural: Comprimento da Viga [m] x Modo de vibrar
"n"', 'fontsize',24);
ylabel('Comprimento da Viga[m]', 'fontsize',24);
xlabel('Modo de vibrar de flexão "n"', 'fontsize',24);

figure
contourf(n,L,fc,20);

```

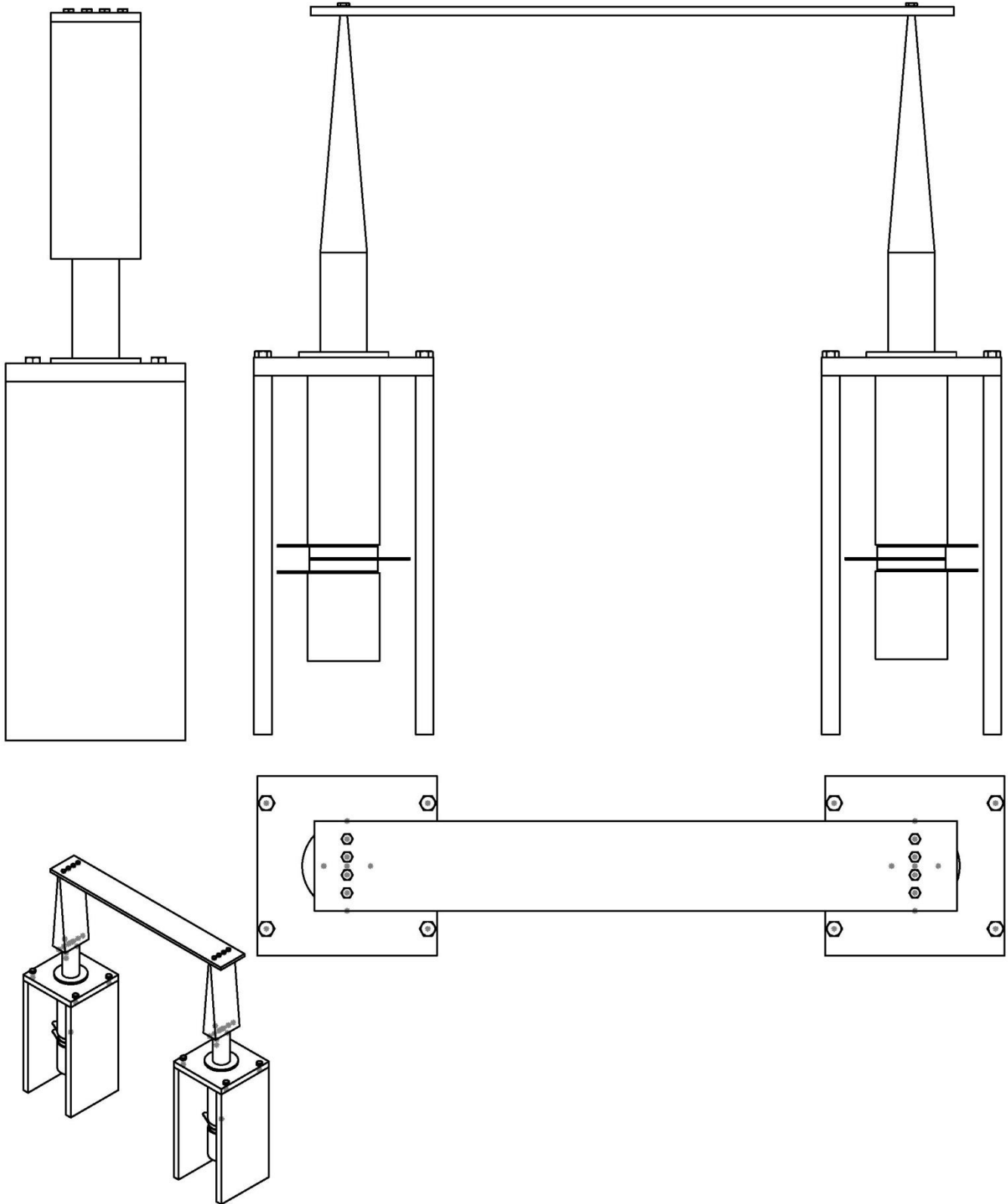
```
title('Frequência Natural: Comprimento da Viga [m] x Modo de vibrar  
"n"', 'fontsize', 24);  
ylabel('Comprimento da Viga[m]', 'fontsize', 24);  
xlabel('Modo de vibrar de flexão "n"', 'fontsize', 24);
```

```
figure  
plot(n, f(1, :));
```

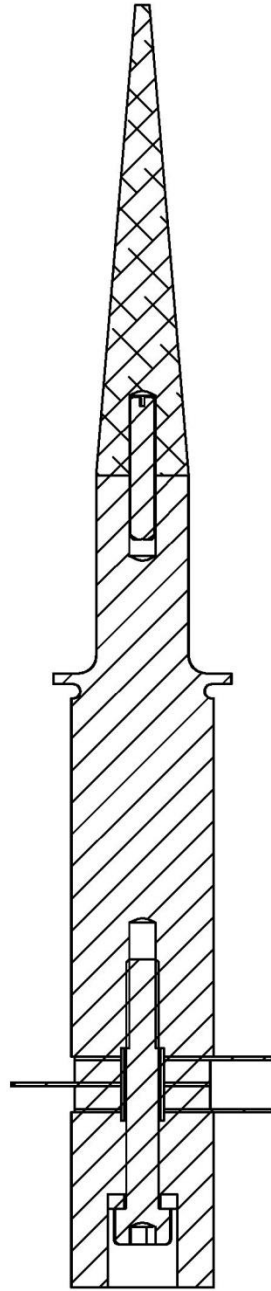
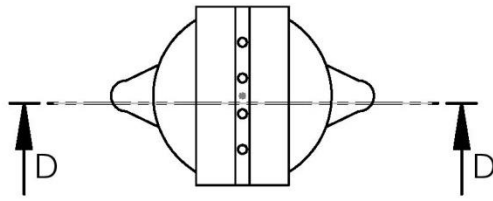
```
figure  
v=[20400, 20700];  
contourf(n, L, f, v);
```

```
title('Frequência Natural: Comprimento da Viga [m] x Modo de vibrar  
"n"', 'fontsize', 24);  
ylabel('Comprimento da Viga [m]', 'fontsize', 24);  
xlabel('Modo de vibrar de flexão "n"', 'fontsize', 24);
```

B. Desenhos de Fabricação

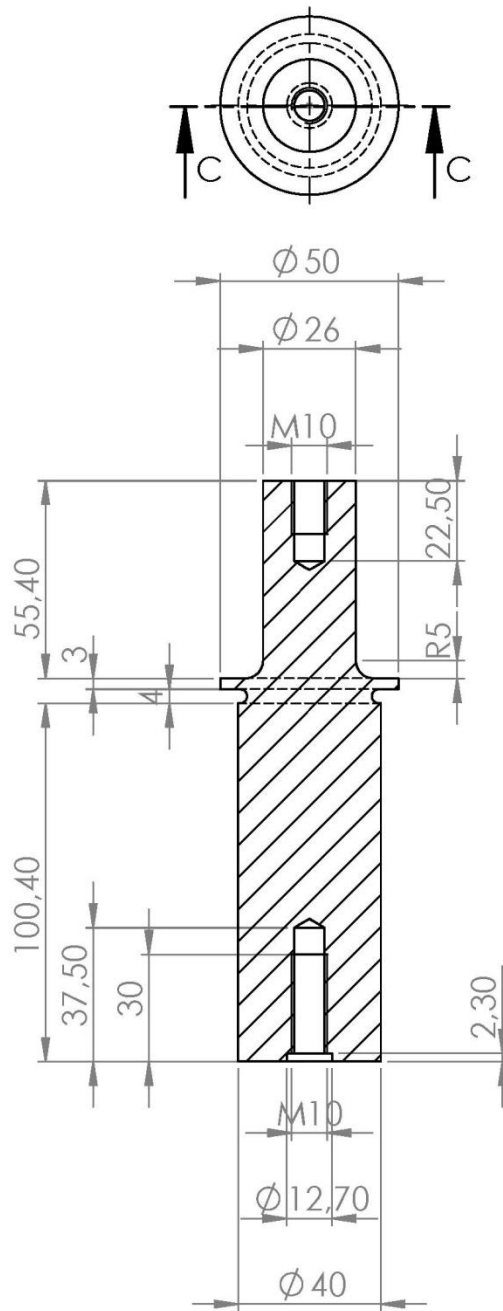


SE NÃO ESPECIFICADO: DIMENSÕES EM MILÍMETROS ACABAM. SUPERFÍCIE: TOLERÂNCIAS: LINEAR: ANGULAR:		ACABAMENTO:		DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		NÃO MUDAR A ESCALA DO DESENHO		REVISÃO	
NOME		ASSINATURA		DATA		TÍTULO:			
DES.						DES. Nº Desenho de Conjunto A4			
VERIF.									
APROV.									
MANUF									
QUALID									
				MATERIAL:		PESO:		ESCALA: 1:3	
								FOLHA 1 DE 1	



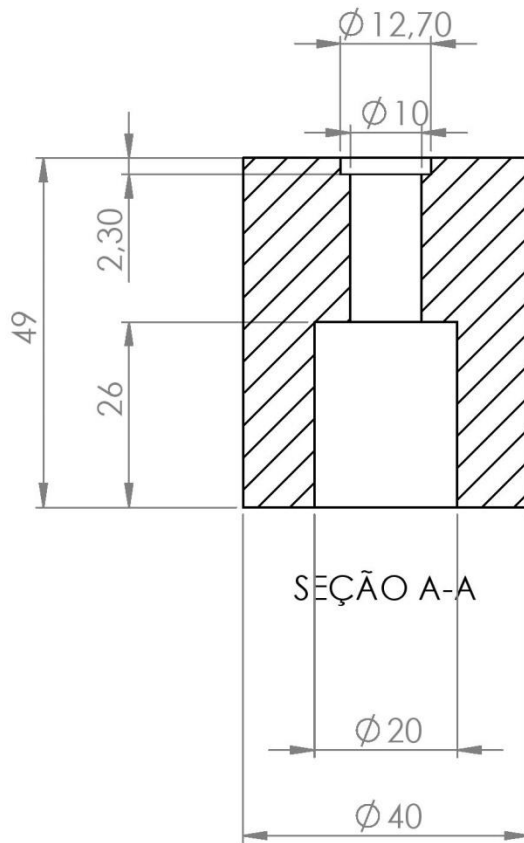
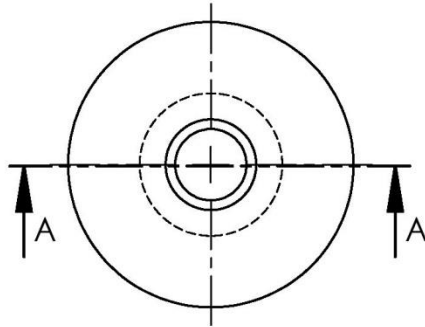
SEÇÃO D-D

SE NÃO ESPECIFICADO: DIMENSÕES EM MILÍMETROS ACABAM. SUPERFÍCIE: TOLERÂNCIAS: LINEAR: ANGULAR:		ACABAMENTO:		DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		NÃO MUDAR A ESCALA DO DESENHO		REVISÃO	
DES.		ASSINATURA		DATA		TÍTULO:			
VERIF.									
APROV.									
MANUF									
QUALID						MATERIAL:		DES. Nº	
								Langevin	
						PESO:		ESCALA: 1:2	
								FOLHA 1 DE 1	
								A4	

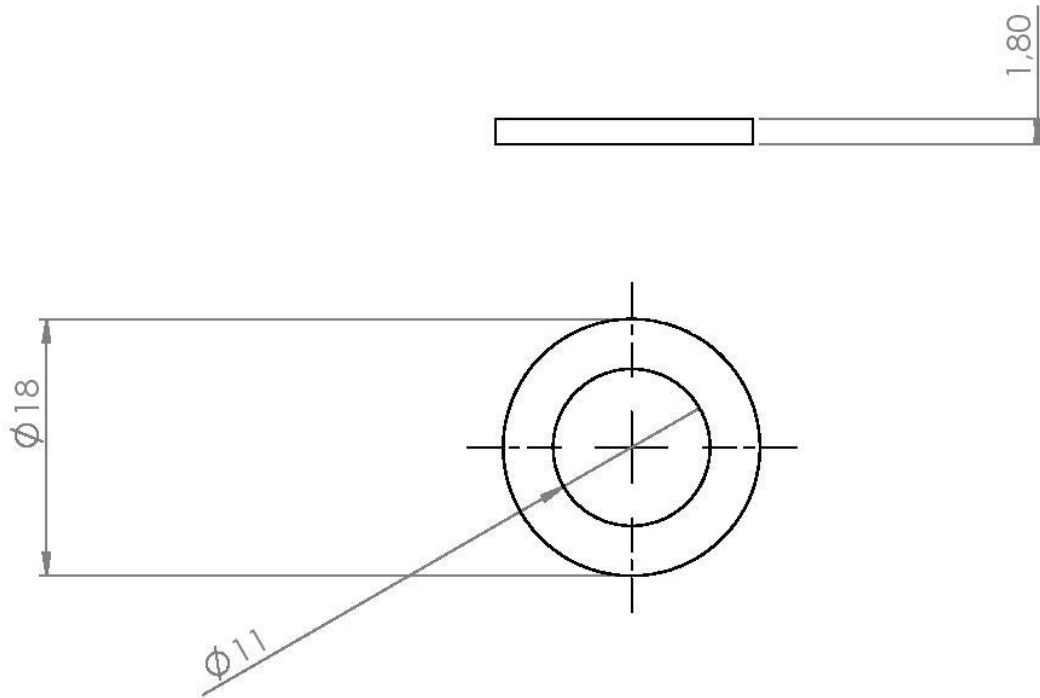


SEÇÃO C-C

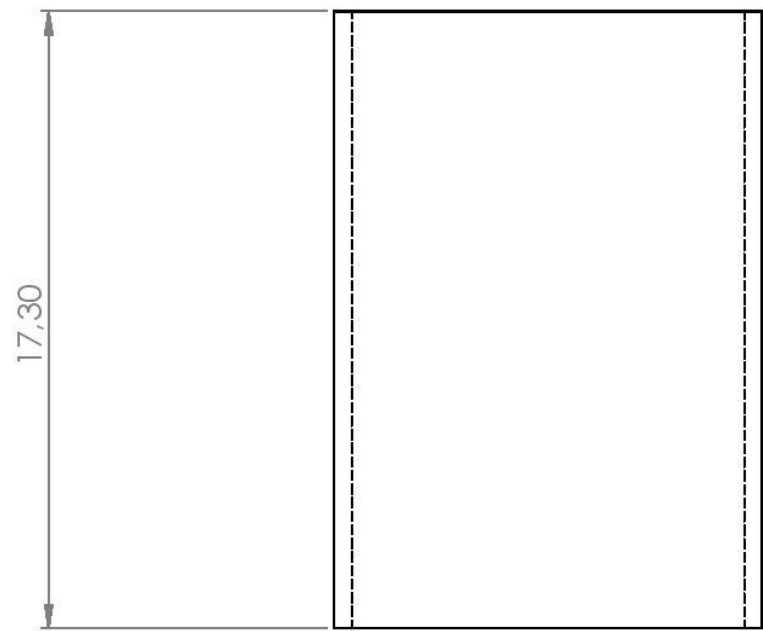
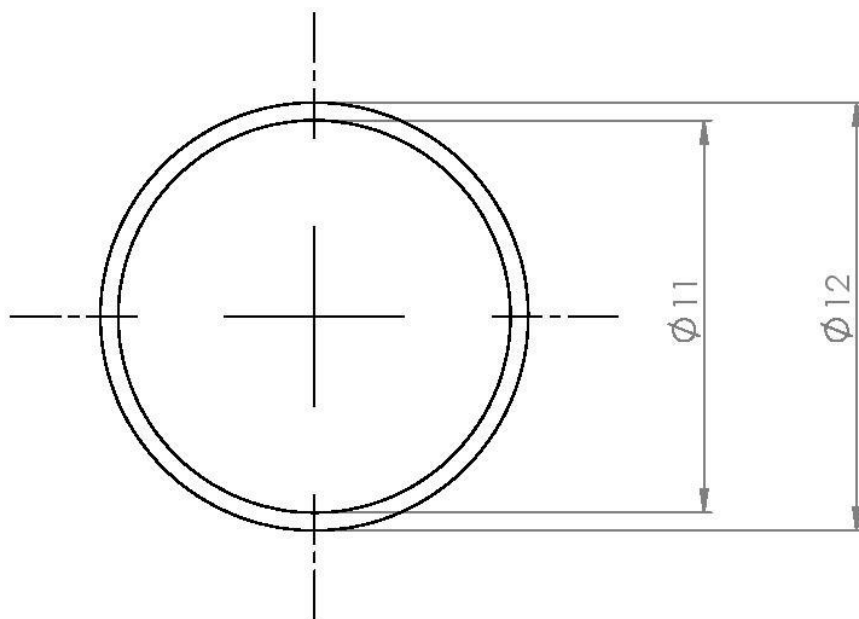
SE NÃO ESPECIFICADO: DIMENSÕES EM MILÍMETROS ACABAM. SUPERFÍCIE: TOLERÂNCIAS: LINEAR: ANGULAR:		ACABAMENTO:		DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		NÃO MUDAR A ESCALA DO DESENHO		REVISÃO	
DES.		ASSINATURA		DATA		TÍTULO:			
VERIF.									
APROV.									
MANUF									
QUALID						MATERIAL:		DES. Nº	
								AMP_v02	
						PESO:		ESCALA: 1:2	
								FOLHA 1 DE 1	
								A4	



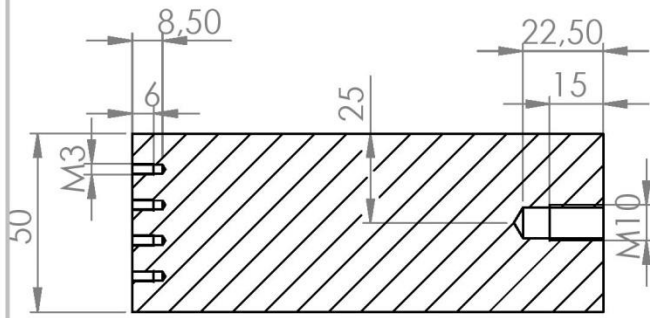
SE NÃO ESPECIFICADO: DIMENSÕES EM MILÍMETROS ACABAM. SUPERFÍCIE: TOLERÂNCIAS: LINEAR: ANGULAR:		ACABAMENTO:		DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		NÃO MUDAR A ESCALA DO DESENHO		REVISÃO	
NOME		ASSINATURA		DATA		TÍTULO:			
DES.									
VERIF.									
APROV.									
MANUF									
QUALID					MATERIAL:	DES. Nº		BOT_v02	
								A4	
					PESO:	ESCALA: 1:1		FOLHA 1 DE 1	



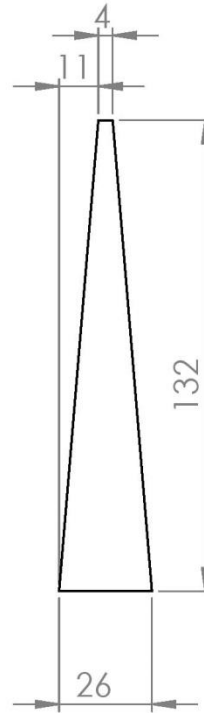
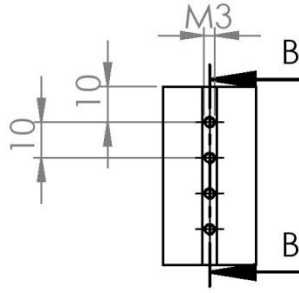
SE NÃO ESPECIFICADO: DIMENSÕES EM MILÍMETROS ACABAM. SUPERFÍCIE: TOLERÂNCIAS: LINEAR: ANGULAR:		ACABAMENTO:		DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		NÃO MUDAR A ESCALA DO DESENHO		REVISÃO	
NOME		ASSINATURA		DATA		TÍTULO:			
DES.						anel			
VERIF.									
APROV									
MANUF									
QUALID				MATERIAL:		DES. Nº		A4	
				PESO:		ESCALA:2:1		FOLHA 1 DE 1	



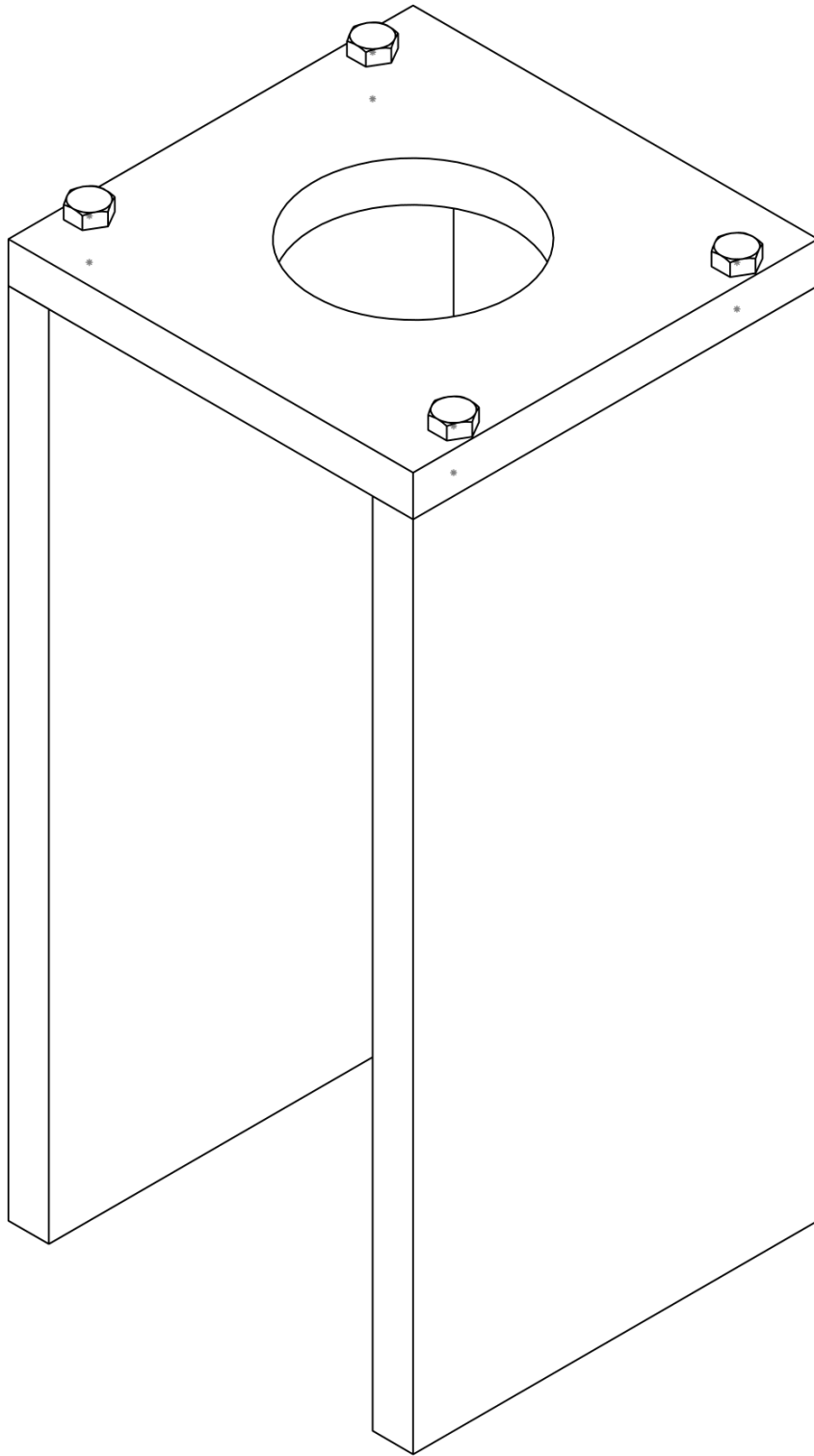
SE NÃO ESPECIFICADO: DIMENSÕES EM MILÍMETROS ACABAM. SUPERFÍCIE: TOLERÂNCIAS: LINEAR: ANGULAR:		ACABAMENTO:		DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		NÃO MUDAR A ESCALA DO DESENHO		REVISÃO	
NOME		ASSINATURA		DATA		TÍTULO:			
DES.						<div style="text-align: center; font-size: 2em; font-weight: bold;">iso</div>			
VERIF.									
APROV									
MANUF									
QUALID				MATERIAL:		DES. Nº		A4	
				PESO:		ESCALA:5:1		FOLHA 1 DE 1	



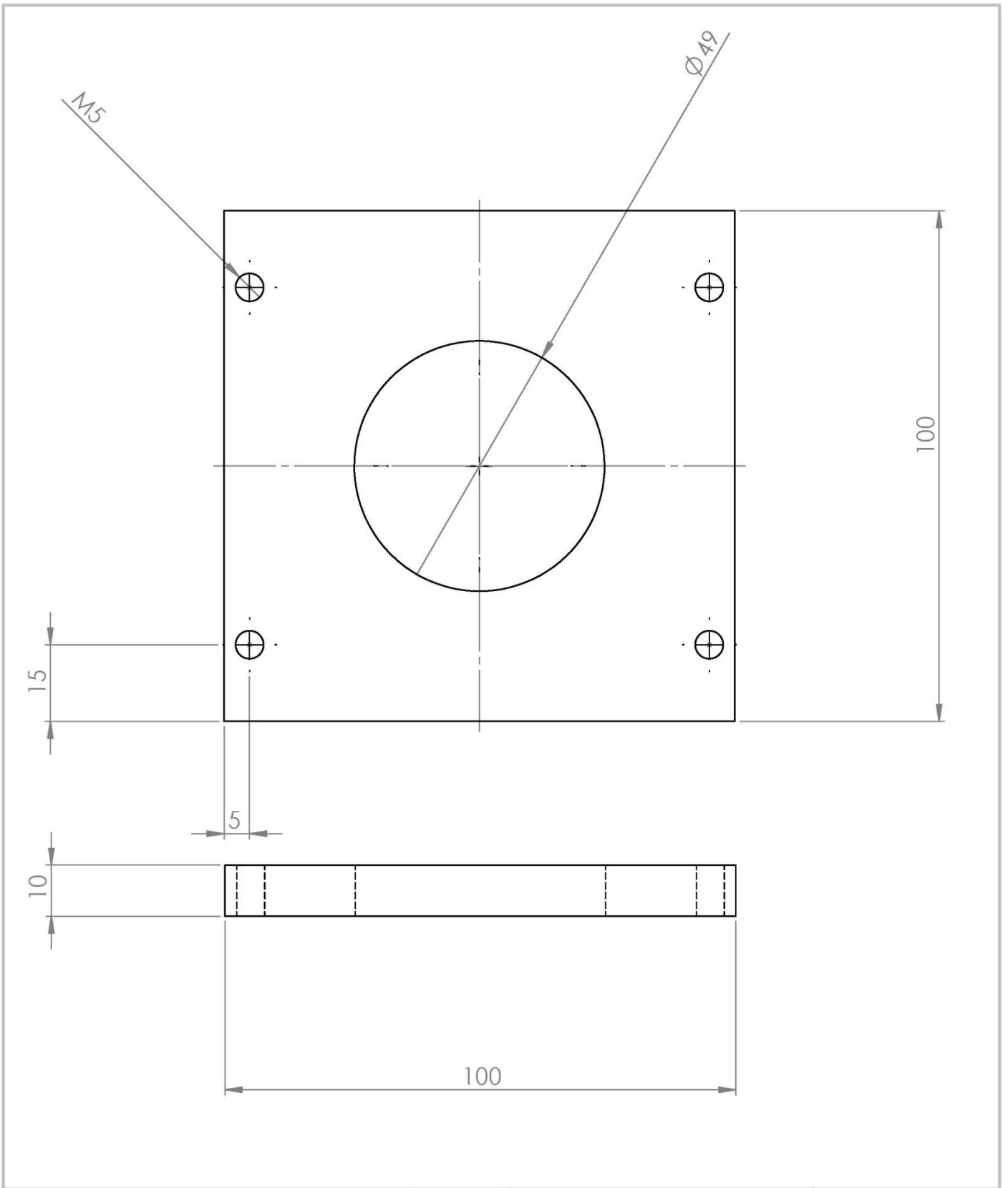
SEÇÃO B-B



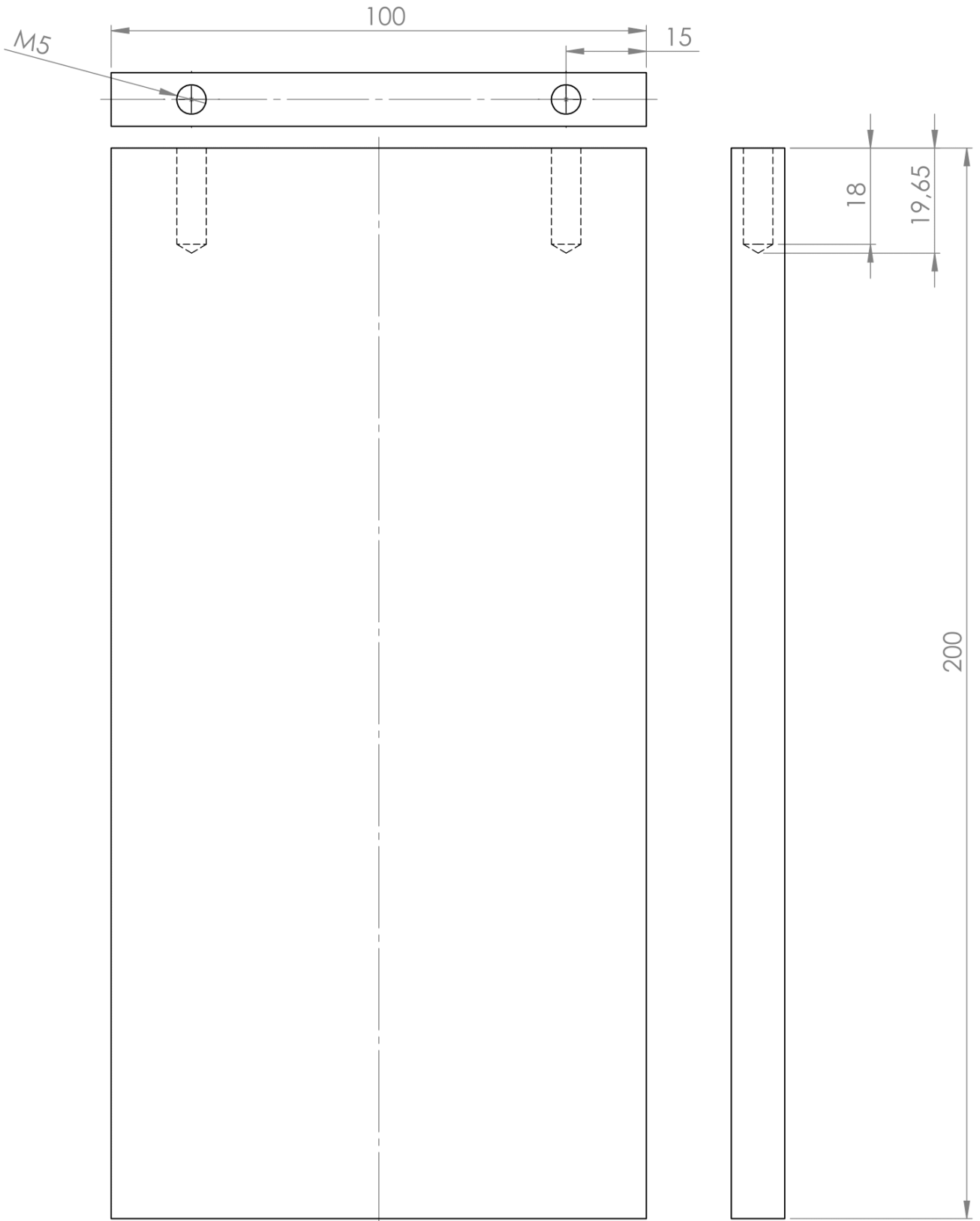
SE NÃO ESPECIFICADO: DIMENSÕES EM MILÍMETROS ACABAM. SUPERFÍCIE: TOLERÂNCIAS: LINEAR: ANGULAR:		ACABAMENTO:		DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		NÃO MUDAR A ESCALA DO DESENHO		REVISÃO	
NOME		ASSINATURA		DATA		TÍTULO:			
DES.						<p style="text-align: center; font-size: 2em; margin: 0;">Sono</p>			
VERIF.									
APROV.									
MANUF									
QUALID				MATERIAL:		DES. Nº		A4	
PESO:				ESCALA: 1:2		FOLHA 1 DE 1			



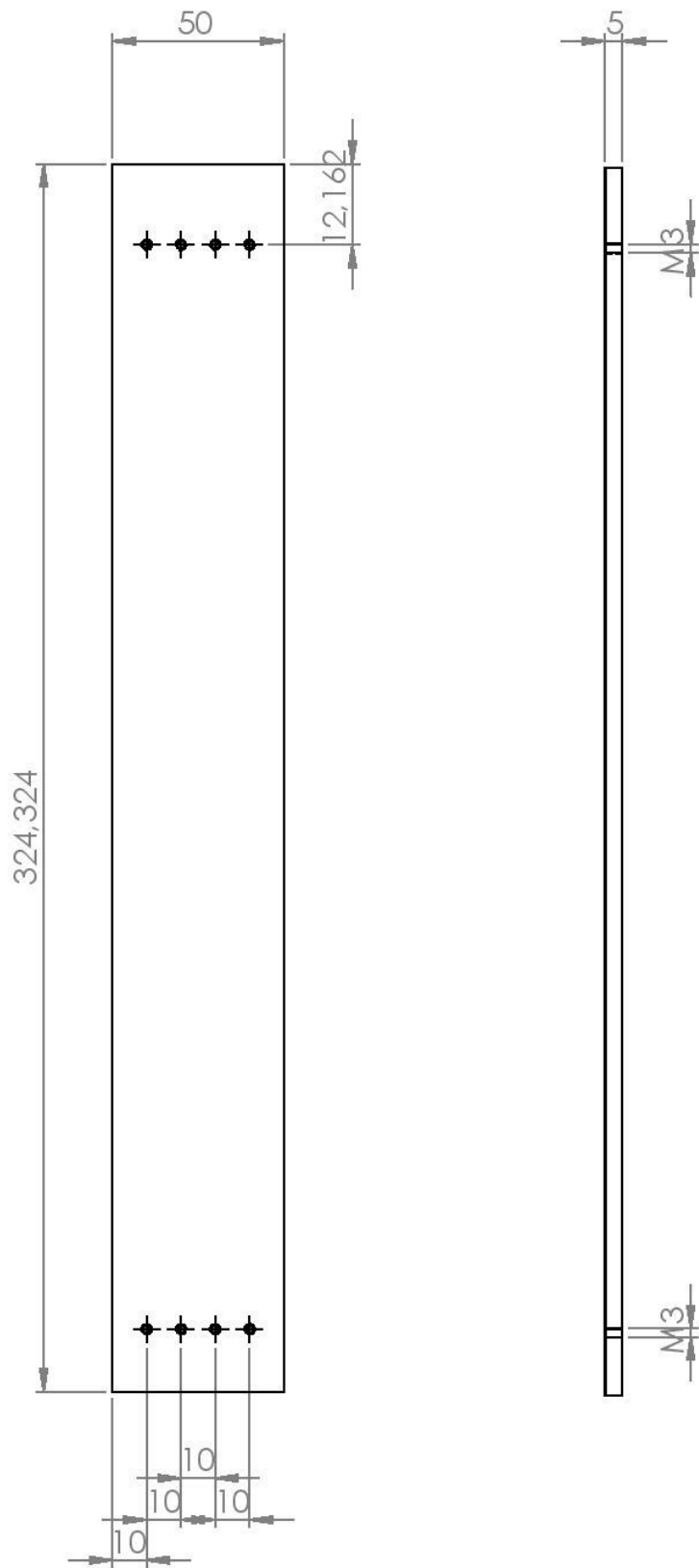
SE NÃO ESPECIFICADO: DIMENSÕES EM MILÍMETROS ACABAM. SUPERFÍCIE: TOLERÂNCIAS: LINEAR: ANGULAR:		ACABAMENTO:		DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		NÃO MUDAR A ESCALA DO DESENHO		REVISÃO	
NOME		ASSINATURA		DATA		TÍTULO:			
DES.						Suporte			
VERIF.									
APROV.									
MANUF.									
QUALID.									
				MATERIAL:		DES. Nº		A4	
				PESO:		ESCALA: 1:1.2		FOLHA 1 DE 1	



SE NÃO ESPECIFICADO: DIMENSÕES EM MILÍMETROS ACABAM. SUPERFÍCIE: TOLERÂNCIAS: LINEAR: ANGULAR:		ACABAMENTO:		DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		NÃO MUDAR A ESCALA DO DESENHO		REVISÃO	
NOME		ASSINATURA		DATA		<p style="font-size: 24px; text-align: center;">Quantidade: 2</p>			
DES.		VERIF.		APROV.					
MANUF		QUALID		MATERIAL: METAL					
PESO:		DESC. Nº		Sup_Cima					
ESCALA: 1:1		FOLHA 1 DE 1		A4					



SE NÃO ESPECIFICADO: DIMENSÕES EM MILÍMETROS ACABAM. SUPERFÍCIE: TOLERÂNCIAS: LINEAR: ANGULAR:		ACABAMENTO:		DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		NÃO MUDAR A ESCALA DO DESENHO		REVISÃO	
DES.		ASSINATURA		DATA		TÍTULO:			
VERIF.									
APROV.									
MANUF.									
QUALID.						MATERIAL:		DES. Nº	
								Sup_Vertical v02	
								A4	
				PESO:		ESCALA:1:2		FOLHA 1 DE 1	



SE NÃO ESPECIFICADO: DIMENSÕES EM MILÍMETROS ACABAM. SUPERFÍCIE: TOLERÂNCIAS: LINEAR: ANGULAR:		ACABAMENTO:		DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		NÃO MUDAR A ESCALA DO DESENHO		REVISÃO	
NOME		ASSINATURA		DATA		TÍTULO:			
DES.									
VERIF.									
APROV.									
MANUF.									
QUALID.					MATERIAL:	DES. Nº		Transportador	
					PESO:	ESCALA: 1:2		FOLHA 1 DE 1	
								A4	