

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

ANDRÉ LUIS GUNES RODRIGUES

**INFLUÊNCIA DA TEXTURA SUPERFICIAL NA
INDUÇÃO DE VIBRAÇÃO POR MEIO DE FLUXO DE
AR EM SISTEMA PIEZOELÉTRICO DE CONVERSÃO
DE ENERGIA**

SÃO CARLOS - SP

2022

ANDRÉ LUIS GUNES RODRIGUES

INFLUÊNCIA DA TEXTURA SUPERFICIAL NA
INDUÇÃO DE VIBRAÇÃO POR MEIO DE FLUXO DE AR
EM SISTEMA PIEZOELÉTRICO DE CONVERSÃO DE
ENERGIA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal De São Carlos para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Vitor Ramos Franco

SÃO CARLOS - SP

2022



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

Folha de Aprovação

Defesa de Dissertação de Mestrado do candidato André Luis Gunes Rodrigues, realizada em 05/05/2022.

Comissão Julgadora:

Prof. Dr. Vitor Ramos Franco (UFSCar)

Prof. Dr. Sidney Bruce Shiki (UFSCar)

Prof. Dr. Paulo Sérgio Varoto (EESC/USP)

O Relatório de Defesa assinado pelos membros da Comissão Julgadora encontra-se arquivado junto ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

Dedicatória

Dedico este trabalho *in memoriam* aos meus pais que sempre me ensinaram a lutar, estudar e nunca desistir. Tudo se torna mais complexo conforme os anos se passam e a experiência vêm, mas como os alemães dizem, “*as pessoas sempre são capazes de aprender, para isso somente basta quererem*”.

Agradecimentos

Eu gostaria primeiramente agradecer ao meu Orientador Prof. Dr. Vitor Ramos Franco que acima de tudo fez o máximo para que este trabalho pudesse ser concluído. Eu gostaria de agradecer aos Técnicos do DEMec Djalma Aparecido Lingnari Durici e Leonildo Bernardo Pivolto pelo auxílio na confecção dos corpos de prova. Gostaria também agradecer aqui ao Prof. Dr. Jorge Henrique Bidinotto da USP pelo apoio a realização dos ensaios em túnel de vento.

Eu gostaria de agradecer ao PPGEMec – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e a todos os professores que tive contato como aluno, eles são uma grande inspiração para todos que almejam o progresso da ciência.

Agradeço a realização deste presente trabalho com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) à UFSCar.

O poder se torna mais forte quando ninguém pensa,
Triste verdade que nos inspira a instigar o poder da sabedoria. Sócrates também disse:
Uma vida sem desafios não vale a pena ser vivida!

(Sócrates)

Rodrigues, A. L.G. **Influência da Textura superficial na Indução de Vibração por meio de fluxo de ar em Sistema Piezoelétrico de Conversão de Energia**. 2022. 112p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de São Carlos, 2022.

RESUMO

Sistemas piezoelétricos de conversão de energia PZTEH (*Piezoelectric Energy Harvesting Systems*) estão sendo cada vez mais utilizados, impulsionados pelo desenvolvimento dos componentes eletrônicos denominados ULPs (*Ultra Low Power*) os quais demandam um consumo baixo de energia. Proporcionando, portanto, aproveitamento desta energia, dada antes como perdida. A análise de sistemas vibracionais para a conversão de energia pelas cerâmicas piezoelétricas vem sendo muito estudada e novos componentes desenvolvidos, tanto no âmbito direto da conversão energética em novos projetos de transdutores quanto no estudo e desenvolvimento de conversores de energia, que venham a atuar de forma a amplificar a energia gerada. Alguns trabalhos indicam a utilização do vento como forma de excitação e produção energética em um sistema cantiléver de conversão de energia. Outros, verificaram que a interferência física de projeto, tais como influências aerodinâmicas como *flutter*, efeito galopante e de vórtex contribuem para a amplificação da vibração e, por consequência, na geração energética destes dispositivos. O objetivo deste trabalho está em analisar experimentalmente e de forma investigativa a influência da textura superficial nas características vibratórias de vigas cantiléver expostas ao vento. A usinagem de sulcos, furos e cavidades superficiais foi realizada na superfície de 16 vigas a fim de se avaliar seus comportamentos vibratórios quando estas são expostas a um fluxo de ar. Um transdutor piezoelétrico, tipo pastilha de PZT (Titanato Zirconato de Chumbo), foi rigidamente acoplado próximo à base de cada viga, funcionando como transdutor de energia. A energia convertida foi analisada por meio dos sinais elétricos de cada viga gerados pela vibração induzida pelas forças aeroelásticas. Os resultados obtidos mostraram que as texturas aplicadas na superfície das vigas influenciaram não somente nas propriedades mecânicas, mas também na obtenção de energia gerada por cada viga. Concluiu-se que as vigas cantiléver com menor rigidez e amortecimento não apresentaram resultados para serem utilizadas em sistemas excitados pelo vento para produção de EH (*energy Harvesting*), e que a textura superficial dos dispositivos pode ser um fator importante no aumento da geração de energia.

Palavras Chaves: *Energy Harvesting*, Vibração Induzida; Piezeletricidade; Viga Cantiléver; Textura Superficial.

Rodrigues, A. L.G. **Influência da Textura superficial na Indução de Vibração por meio de fluxo de ar em Sistema Piezoelétrico de Conversão de Energia**. 2022. 112p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de São Carlos, 2022.

ABSTRACT

Piezoelectric Energy Harvesting Systems PZTEH are being used more and more, driven by the development of electronic components called ULP (Ultra Low Power) that demand low energy consumption. This provides the use of energy, previously considered lost. The analysis of vibrational systems with energy conversion by piezoelectric ceramics has been studied and new components developed. This is either in the direct scope of energy conversion with new actuator projects or in the study and development of energy converters, which may act directly with ceramics or their transducer derivatives, with the intention of amplifying the generated energy.

Some publications indicate that the use of wind as an inductor or amplifier, in the gain of energy production in a cantilever system exposed to an air flow. Others verified that the physical design interference, analyzing this aerodynamic influence as flutter, galloping effect and vortex, contribute to the amplification of the amplitude of this vibration and, consequently, in the energy generation. The goal of this dissertation is to analyze experimentally and investigate the influence of surface texture on energy gain, by induction and interaction with the wind in a cantilever beam. The drilling of slots, circles holes and surface cavities (same slots and circles figures) will be evaluated in relation to this air interaction (generated turbulence) on the beam, forcing it to vibrate. A piezoelectric transducer, type buzzer (PZT - Titanate Zirconate Lead), will be rigidly attached near the base of the beam, working as an energy transducer. The results obtained showed that the textures applied to the surface of the beams influenced the mechanical properties and the energy generated by each beam. It was concluded that the cantilever beam with lower stiffness and damping is the best choice to be used with systems excited by wind for EH (energy harvesting) produce, and that the texture of surface can be an important factor to increase energy generation.

Key Words: Induced Vibration; Piezoelectricity; Energy Harvesting; Cantilever Bean; Surface Texture.

Lista de Abreviaturas e Siglas

ULP	<i>Ultra Low Power</i>
PZT	Titanate Zirconate Lead
EH	<i>energy harvesting</i>
PZTEH	<i>Piezoelectric Energy Harvesting Systems</i>
MEMS	<i>Micro-Electro-Mechanical Systems</i>
RMS	<i>Root Mean Square</i>
DAQ-SYS	<i>data acquisition system</i>
FRFs	Funções de Resposta em Frequência
PSD	Densidade Espectral de Potência
VIV	<i>Vortex-Induced-Vibration</i>
A	área de superfície
D	densidade de carga
E	campo elétrico
d_{31}	constante dielétrica
g_{33}	coeficiente voltaico
e	espessura
d e d^t	matrizes diretas de conversão do efeito piezoelétrico (índice “ t ” indica transposição)
Q_m	coeficiente piezoelétrico hidrostático
T	tensão
S	deformação
s^E	compliância mecânica sob um campo elétrico constante
ϵ^T	permissividade dielétrica
σ	tensão (F força sobre A área)
Q	carga elétrica no eletrodo
V	voltagem
U	energia total
W^{mec}	Energia mecânica útil por unidade de volume
W^{ele}	Energia elétrica por unidade de volume
$x(t)$	Sinal
$y(t)$	Sinal
$\ \tilde{S}_{xy}(f)\ ^2$	módulo quadrático do espectro cruzado de potências
$\tilde{S}_{xx}(f)\tilde{S}_{yy}(f)$	produto dos autos espectros de potências
$\tilde{\gamma}_{xy}^2(f)$	coerência dos sinais
E_x	energia do sinal
$ X(f) ^2$	energia/frequência
$G_x(f) \triangleq X(f) ^2$	Espectro de Densidade de Energia
SISO	<i>single input/single output</i>
ω	frequência natural
$G(\omega)$	função transferências
$tr(G)$	linha matricial G^* , $tr(G) = \sum_i g_{ii}$
$\ G\ _2^2$	norma H_2

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Domínios únicos para as fases tetragonal, ortorrômbica e romboédrica, com possível polarização de múltiplos domínios na engenharia de domínio.....	22
Figura 2 - Medição experimental do movimento de cisalhamento da face a partir de vibrometria a laser (esquerda).....	23
Figura 3 - Conversão simples e típica Mecânica – Elétrica / Elétrica – Mecânica.....	26
Figura 4 - Barra cantiléver Transdutora.....	29
Figura 5 - Transdutor de diafragma circular:8 a) vista superior; (b) vista lateral.....	29
Figura 6 - Prato Transdutor.....	29
Figura 7 - Transdutor piezoelétrico tipo pilha.....	29
Figura 8 - Transdutor tipo pastilha de PZT.....	30
Figura 9 - Modo efetivo d_{33}	31
Figura 10 - Esquema proposto de sistema multi ressonante para energia recuperável	33
Figura 11 - (a) Esquema de um conversor energético de ressonância sincronizada (b) saída de potência versus ressonância sintonizada.....	34
Figura 12 - Esquema de um coletor de energia “piezomagnetoelástico” sob excitação vertical.....	35
Figura 13 - Esquema de uma viga cantiléver excitada parametricamente e utilizada como conversor de energia.....	36
Figura 14 - Modelo físico de corpos esculpidos com estrutura biônica (orgânica flexível). (a) Esquema com saliências; (b) esquema com cavidades.....	37
Figura 15 - Diagrama esquemático do VIVPEH com estrutura biônica: (a) diagrama físico no teste do túnel de vento; (b) esquema equivalente.....	37
Figura 16 - (a) Desenho esquemático de um recuperador de energia, (b) fotografia, (c) desenho esquemático do MEMS, (d) Contornos de linhas de fluxo.....	38
Figura 17 - Modelo de viga de cantiléver, espessura de borda.....	39

Figura 18 - Diagrama esquemático de um <i>Harvester</i> de PZT e viga cantiléver.....	40
Figura 19 - Vigas, lisa e com diferentes tipos de furos (superficiais e vazados)	43
Figura 20 - Desenho (a) representativo do conversor de energia considerando diferentes padrões de textura superficial: lisa, usinagem de rasgos superficiais e vazados. (b) diferentes conversores produzidos.....	47
Figura 21 - Modelo esquemático do teste de impacto.....	49
Figura 22 – Setup experimental utilizado no teste de impacto.....	49
Figura 23 - Fixação das vigas no ensaio <i>Bump test</i>	50
Figura 24 - Desenho esquemático do ensaio de fluxo de vento. a) Vista lateral b) Vista frontal	51
Figura 25 - Setup experimental utilizado no ensaio em túnel de vento.....	52
Figura 26 - Sinais de tensão elétrica (obtido pelo PZT) e de força (martelo) obtidos em um dos testes de impacto da viga RL01V.....	54
Figura 27 - Variação temporal da velocidade do escoamento na saída do túnel de vento (medida pelo tubo de Pitot)	56
Figura 28 - Representação gráficas das Norma H2 e H ∞	58
Figura 29 - FRFs mecânicas (mec) e elétricas (ele) das vigas FS01, FS02, FS03 e L01 (Grupo 1 da tabela 8)	60
Figura 30 - FRFs mecânicas (mec) e elétricas (ele) das vigas FV01, FV02, FV03 e L01 (Grupo 4 da tabela 8)	61
Figura 31 - FRFs mecânicas (mec) e elétricas (ele) das vigas RLS01, RLS02, RLS03 e L01 (Grupo 2 da tabela 8)	62
Figura 32 - FRFs mecânicas (mec) e elétricas (ele) das vigas RLV01, RLV 02, RLV 03 e L01 (Grupo 5 da tabela 8)	63
Figura 33 - FRFs mecânicas (mec) e elétricas (ele) das RTS01 e RTS02 e L01 (Grupo 3 da tabela 8)	64
Figura 34 - FRFs mecânicas (mec) e elétricas (ele) das RTV01 e RTV02 e L01 (Grupo 6 da tabela 8)	65
Figura 35 - FRFs mecânicas (mec) e elétricas (ele) das vigas FS01, FS02, FS03 e L01 (Grupo 1 da tabela 8), 0 – 300[Hz].....	66
Figura 36 - Coerência da viga F01V na faixa de 0 a 100Hz.....	67

Figura 37 - Coerências máximas relativas as frequências fundamentais de cada viga.....	67
Figura 38 - Coerência nos ensaios do <i>Bump test</i> para a frequência fundamental de cada viga....	68
Figura 39 - PSD relativas aos sinais das Vigas FS_01_02_03 e L01.....	70
Figura 40 - PSD relativas aos sinais das Vigas FV_01_02_03 e L01.....	71
Figura 41 – PSD relativa a viga F02V.....	72
Figura 42 - PSD relativas aos sinais das Vigas RLS_01_02_03 e L01.....	73
Figura 43 - PSD relativas aos sinais das Vigas RLV_01_02_03 e L01.....	74
Figura 44 - PSD curvas relativas as vigas RL01V e RL02V.....	75
Figura 45 - PSD relativas aos sinais das Vigas RTS_01_02_03 e L01.....	76
Figura 46 - PSD relativas aos sinais das Vigas RTV_01_02_03 e L01.....	77
Figura 47 - Comparação dos sinais RMS das vigas.....	78
Figura 48 - Análises da Norma H2 em relação as frequências naturais e em todo o espectro da frequência.....	79
Figura 49 - PSD da viga RTV02, avaliada em intervalos de 3s de 0 até 15s.....	80
Figura 50 - PSD da viga RTV02, avaliada em intervalos de 3s de 15 até 30s.....	81
Figura 51 - PSD da viga FS01, avaliada em intervalos de 3s de 0 até 15s.....	82
Figura 52 - PSD da viga FS01, avaliada em intervalos de 3s de 15 até 30s.....	82
Figura 53 - Potência em [W] calculada com uma resistência fictícia de 100[Ohm].....	86

LISTA DE TABELAS

1 - Especificações técnicas de alguns dispositivos piezoelétricos, custos e vida útil.....	28
2 - Propriedades Mecânicas (Alumínio 1100 Norma ASTM B 209)	41
3 - Propriedades físicas da liga de alumínio 1100 (Alumínio 1100 Norma ASTM B 209)	42
4 - Características da pastilha de PZT.....	42
5 - Descrição das vigas com usinagens na forma de furos – F.....	44
6 - Descrição das vigas com usinagens na forma rasgos longitudinais – RL.....	45
7 - Descrição das vigas com usinagens na forma de rasgos transversais – RT.....	46
8 - Grupos de análise.....	53
9 - Rotação do motor e velocidade de saída do vento.....	56

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	15
1.1 Motivação	17
1.2 Objetivo da pesquisa.....	17
1.3 Estrutura da Dissertação	18
2 REVISÃO DA LITERATURA	19
2.1 Histórico dos Materiais Piezoelétricos	19
2.2 Características do Titanato Zirconato de Chumbo $Pb(ZrTi)O_3$ - PZT.	20
2.3 Fundamentos Físicos de Materiais Piezoelétricos	20
2.4 Outras Cerâmicas com características Piezoelétricas	25
2.5 Transdutores de PZT como Geradores MEMS.....	25
2.6 Vibração como Fonte de Energia em Foco em <i>Energy Harvesting</i>	30
2.7 Forças Aero Elásticas como Indutor de Vibracional	36
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	41
3.1 Construção do Dispositivo de EH	41
3.2 Ensaio Experimentais	47
3.3 Análise dos resultados experimentais	52
3.3.1 Análise das Funções de Resposta em Frequência (FRFs)	52
3.3.2 Análise da Vibração Induzida pelo Vento em Termos de Geração Energética.....	55
4 ANÁLISE DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS E DISCUSSÃO.....	59
4.1 Teste de impacto (<i>Bump test</i>)	60
4.1.1 Análise da coerência dos sinais do teste de impacto	66
4.2 Ensaio em Túnel de Vento	69
4.2.1 Análise das PSD's Relativos aos Testes de Vento	69
4.2.2 Análise do Valor RMS dos Sinais Medidos pelos PZTs	77
4.2.3 Análise da Norma H_2 das Vigas	79
4.3 Ação da força Aéreo Elástica como Indutora de Vibração	80
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÃO	84
REFERÊNCIAS	87

ANEXO A – Desenhos de Projetos dos Corpos de Provas.....	92
---	-----------

1 INTRODUÇÃO

Energy Harvesting (EH) é uma forma de se transformar ou reutilizar fontes de energia, ou seja, a utilização ou reutilização de energia do meio (YANG et al., 2018). O Brasil já faz isto com as hidroelétricas há muitos anos. O conceito atual se aplica ao aproveitamento de fontes ainda não tão fáceis de se extrair energia ou a utilização de fontes cuja energia é considerada perdida. O calor residual, a radiação eletromagnética ambiental e as vibrações são fontes típicas de energia recuperável (ALLAMRAJU et al., 2015). O desenvolvimento de componentes micro eletromecânicos, de baixo consumo energético, os chamados MEMS (*Micro-Electro-Mechanical Systems*), possibilitou o desenvolvimento de micro geradores energéticos para a coleta destas formas de energia, cujas construções dependem do tipo de fonte de energia e do modo de operação.

A vibração é um exemplo deste tipo de energia perdida, caracterizada pela baixa densidade energética, mas alta disponibilidade, podendo assim ser recuperável (JAMES et al. 2014). A vibração pode ser causada por efeitos naturais ou derivada da utilização de equipamentos eletromecânicos, motores de combustão interna, etc. Esta energia perdida, por exemplo na forma de movimentos indesejados, pode ser recuperada por dispositivos eletromagnéticos (mecânicos), eletromecânicos (transdutores) ou por dispositivos de estado sólido como cerâmicas de PZT (IEEE *Standard on Piezoelectricity*, 1988; Rodrigues et al. 2021).

Comparando-se a “energia recuperada” por meio de vibração com outras fontes geradoras, tais como fotovoltaica, eólica e termo voltaicas, estas apresentam potência de saída entre μW e mW (SARKER et al. 2019). A recente evolução na eficiência das cerâmicas de PZT na geração de energia proporcionou, nos últimos 20 anos, um aumento das pesquisas para a aplicação em sensores e dispositivos de baixo consumo chamados ULP’s (sigla do inglês *Ultra Low Power*), muito aplicados na medicina, comunicação, diversão e outros (RAJU, 2008). Como estes dispositivos estão se tornando, de tempos em tempos, menores (escala milimétrica), estão operando também com baixo consumo de energia. A tendência é que os geradores energéticos, para estes dispositivos, também venham a ter esta mesma escala de grandeza. Isto

estimula o estudo, desenvolvimento e emprego de cerâmicas de PZT ou transdutores de PZT como dispositivos geradores de baixa densidade energética (DU, 2017; ILYAS, 2018).

A utilização da energia recuperada não reescreve as regras para os *designs* de projetos, mas algumas de suas práticas recomendadas podem ser contraintuitivas para muitos engenheiros (RAJU, 2008). Componentes eletrônicos como Bluetooth, com baixo consumo de energia, são estímulos para o uso de energia renováveis, propiciando a automação e a autossustentabilidade de vários componentes, postados em lugares e ou situações, nas quais a interferência humana torna-se difícil ou inapropriada (ILYAS, 2018). Esta é uma grande motivação das pesquisas nas áreas de energias recuperáveis e na utilização e desenvolvimentos de micro geradores.

A vibração mecânica mostrou-se ser uma fonte de energia abundante que combinada com transdutores energéticos pode funcionar como transformador de energia recuperável, gerando energia elétrica. A cerâmica de PZT e diversos transdutores derivados desta cerâmica são amplamente utilizados no contexto de aproveitamento da vibração. Estudos da aplicabilidade e eficiência energética em sistemas piezoelétricos mostram que os transdutores estão sendo pesquisados como geradores de energia para equipamentos *wireless* (BIBO, et al., 2014). As induções de vibração por meios biomecânicos são motivadores em pesquisas e projetos de desenvolvimento em diversas áreas; na área da medicina, cirurgias invasivas seriam reduzidas, e na área da comunicação, tornaria diversos sistemas mais eficientes (JIN et al., 2019).

O fluxo aerodinâmico como indutor de vibração vem sendo, já há alguns anos, aplicado e investigado no campo dos transportes, em pesquisas de análise estrutural e na conversão de energia (SHEVTSOV, et al., 2017). A sua associação às vigas cantiléver é quase que intuitiva, sendo que diversas composições mecânicas ainda vêm sendo pesquisadas, como o efeito *flutter*, o galopante, entre outros (BIBO, et al., 2014).

Muitas pesquisas e desenvolvimento de materiais, circuitos elétricos, baterias e mecanismos de transdução energética ainda vem sendo realizadas com o intuito do aproveitamento da energia antes desperdiçada. Além disso, a otimização e o desenvolvimento de novos transdutores também são frentes de trabalho em diversas pesquisas (UCHINO, 2009).

Este trabalho analisará experimentalmente a utilização da energia mecânica na forma de vibração (mecânica cinética), induzida pelo fluxo de ar, e ampliada pela interação fluxo de ar e texturas superficiais usinadas, transformando a energia cinética em elétrica por meio de um

transdutor de PZT, como micro gerador energético, se beneficiando de um alto “fator-Q” (JAMES, et al., 2014), que é definido como a razão entre a frequência central da ressonância e a largura de banda de meia potência. Os ressonadores com alto “fator-Q”, cerâmicas piezoelétricas que possuem um baixo coeficiente piezoelétrico hidrostático Q_m , ou seja, são materiais frágeis e possuem respectivamente um alto coeficiente voltaico g_{33} , como também devido ao seu d_{31} negativo, possuem uma alta constante dielétrica, portanto possuem baixo amortecimento (BEEBY et al., 2008; JAMES et al. 2014).

Neste contexto, este trabalho analisa a influência da textura superficial como forma de melhoria do ganho energético de vigas cantiléver utilizadas como sistemas de *Energy Harvesting*. As vigas, cujas superfícies são compostas por rasgos, furos e cavidades superficiais, possuem um transdutor piezoelétrico rigidamente acoplado em sua superfície de forma que a vibração mecânica possa ser convertida em energia elétrica. Cada viga é exposta a um fluxo de vento o qual gera forças aero elásticas forçando o sistema a vibrar.

1.1 Motivação

A utilização de energia renovável por meio de materiais piezoelétricos vem deixando de ser uma possibilidade para se tornar algo real, devido ao progresso e desenvolvimento dos sistemas eletrônicos de baixo consumo (ULP). Neste contexto, esta pesquisa é motivada pela busca de formas alternativas de melhoria do desempenho de conversores energéticos, de forma a possibilitar a sustentabilidade energética de dispositivos de comunicação, iluminação e etc.

1.2 Objetivo da pesquisa

O objetivo geral deste trabalho de pesquisa é realizar, de forma experimental e investigativa, a análise da textura superficial no desempenho de dispositivos piezoelétricos de conversão de energia formados por vigas cantiléver. A influência da superfície será avaliada

por meio da obtenção da energia gerada pelo dispositivo excitado por forças aero elásticas quando este é submetido a um fluxo de ar (vibração induzida pelo vento)

- Definir diferentes tipos de textura à serem fabricadas na superfície de cada viga;
- Determinar como a textura superficial influencia nas características modais de cada viga por meio da realização de um teste de impacto (análise da Função de Resposta em Frequência, FRF);
- Comparar diferentes dispositivos construídos de forma a verificar a diferença no desempenho energético do sistema excitado mecanicamente e pelo vento.
- Determinar de forma experimental a interação das forças aeroelásticas sobre as vigas induzindo-as a vibrar.

1.3 Estrutura da Dissertação

O trabalho está organizado em 4 partes. A primeira parte consiste na introdução do problema, apresentado no capítulo 1. A segunda parte, apresentada no capítulo 2, consta da revisão da literatura sobre o material escolhido, Transdutores de EH, vibração como fonte de EH, fluxo de ar como indutor de vibração e interferências físicas em um sistema vibracional induzido por fluxo de ar.

O desenvolvimento experimental de geradores de EH são apresentados no capítulo 3 e compõe a terceira parte. Neste capítulo, são apresentados os materiais utilizados nos experimentos, como também os métodos de análise e avaliação que dão respaldo analítico aos resultados obtidos. A quarta e última parte é composta pelos resultados, expostos e discutidos no capítulo 4, e pelas conclusões apresentadas no capítulo 5.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Esta revisão bibliográfica foi organizada com o objetivo de se entender a escolha do material a ser trabalhado, o PZT, desde o seu histórico desenvolvimento e as características físicas, mecânica e elétricas, análise dos transdutores derivados da cerâmica escolhida, como atuam e as disponibilidades financeiras e comerciais destes materiais, para a sua fácil aplicabilidade. Além disso, visa entender a vibração como fonte de energia recuperável, além da busca de conhecimento nos trabalhos envolvendo excitação de viga cantiléver por fluxo de ar e a potencialidade envolvendo os trabalhos atuais sobre textura superficial e vórtice como indutor de vibração.

2.1 Histórico dos Materiais Piezoelétricos

O efeito piezoelétrico dos materiais foi descoberto pelos irmãos Curie (Pierre e Jacques) estudando um cristal de quartzo em 1880 (UCHINO, 2009). O nome piezoelétrico vem do grego em que “piezo” significa pressão e por consequência eletricidade gerada da compressão mecânica. Gabriel Lipmann, em 1881, descobriu o efeito físico no qual o material piezoelétrico mostra uma deformação mecânica diretamente proporcional ao campo elétrico gerado. Esta descoberta ajudou Pierre Curie a estabelecer o papel da relação fundamental “tensão elétrica Vs deformação mecânica” nas leis físicas (UCHINO, 2009). As duas primeiras guerras impulsionaram a utilização e o emprego de cristais piezoelétricos como quartzo nos radares subaquáticos e, mais tarde, estendida a utilização nos relógios e muitos outros dispositivos e materiais. Chegando ao advento de um dos mais populares materiais piezoelétricos, o titanato zirconato de chumbo $Pb(ZrTi)O_3$ – PZT, que é empregado deste em diversos campos da Engenharia, como nos atuadores utilizados na usinagem de precisão, em projetos de manutenção de estruturas e predição de falhas, como micro geradores de energia, base da energia recuperável, e muitas outras aplicações (PRIYA; INMAN 2009).

2.2 Características do Titanato Zirconato de Chumbo $\text{Pb}(\text{ZrTi})\text{O}_3$ - PZT.

A cerâmica de titanato zirconato de chumbo $\text{Pb}(\text{ZrTi})\text{O}_3$ apresenta qualidades piezoelétricas e piroelétricas que são amplamente utilizadas em transdutores, atuadores e sensores, apesar de apresentarem propriedades mecânicas de baixa resiliência, que limitam na liberdade de criação de sensores com complexas curvas superficiais e incompatibilidade de impedância acústica entre cerâmicas e meio de transmissão. Além disso, a cerâmica de titanato zirconato de chumbo possui um baixo coeficiente piezoelétrico hidrostático (Q_m), ou seja, são materiais frágeis e possuem respectivamente um alto coeficiente voltaico (g_{33}), e devido ao seu d_{31} negativo, possuem uma alta constante dielétrica (JAMES et al. 2014). Esta alta constante dielétrica (d_{31}) é um fator importante na utilização do PZT em um sistema mecânico vibracional, como micro gerador de EH (PRIYA e INMAN 2009).

2.3 Fundamentos Físicos de Materiais Piezoelétricos

O efeito direto dos materiais piezoelétricos é a base da *Energy Harvesting* no que implica o aproveitamento energético relacionado a vibração mecânica. Sendo assim o processo é governado pela seguinte equação constitutiva (1), que conecta o domínio mecânico (tensão T e deformação S) com o domínio elétrico (campo elétrico E e densidade de carga D):

$$\begin{bmatrix} S \\ D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s^E & d^t \\ d & \varepsilon^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T \\ E \end{bmatrix} \quad (1)$$

em que, s^E é a compliância mecânica sob um campo elétrico constante, ε^T é a permissividade dielétrica, sob tensão T constante, d e d^t são as matrizes diretas de conversão do efeito piezoelétrico, em que o índice “ t ” indica transposição.

A maioria dos sistemas de EH opera em uma faixa de frequência muito abaixo da frequência de ressonância do elemento piezoelétrico utilizado. Estes elementos podem ser considerados, aproximadamente, como placas paralelas de capacitores (YANG et al., 2018).

Com base nesta explicação de YANG et al., (2018) para um elemento piezoelétrico (área de superfície A e espessura e) carregado com uma tensão σ , pode-se calcular aproximadamente a carga acumulada Q no eletrodo, com voltagem V e a energia total U como:

$$U = \frac{QV}{2} = \frac{(dT A)(gTt)}{2} = \frac{dgT^2(\text{volume})}{2} \quad (2)$$

em que a constante de corrente, da tensão na equação dada por g , corresponde aos coeficientes específicos do modo operacional (YANG et al., 2018). A Equação (2) simplificada, indica que um material, com alto valor de dxg terá uma alta densidade de potência quando o material piezoelétrico é diretamente deformado, explicitando o efeito piezoelétrico, o qual é dividido em dois fenômenos: o efeito piezoelétrico direto e o efeito piezoelétrico inverso (IEEE 1988).

- d , é definido como coeficiente de carga piezoelétrica:

$$d = \frac{\text{deformação desenvolvida}}{\text{campo elétrico aplicado}}; \quad d = \frac{\text{carga (elétrica) desenvolvida}}{\text{tensão aplicada}} \quad (3)$$

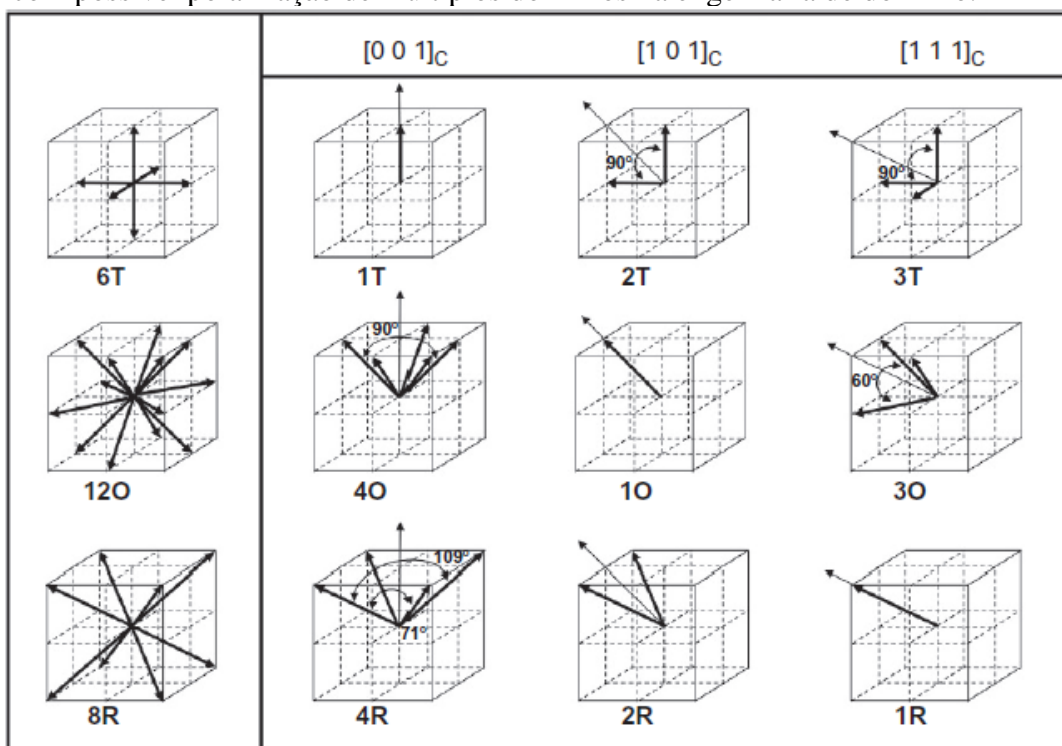
- g , é definido como coeficiente potencial:

$$g = \frac{\text{voltagem elétrica desenvolvida}}{\text{tensão mecânica aplicada}}; \quad g = \frac{\text{deformação (mecânica) desenvolvida}}{\text{voltagem aplicada}} \quad (4)$$

Para explicar as orientações axiais (d_{31} , d_{32} , e d_{33}) e os g 's, uma breve incursão no universo dos cristais é realizada a seguir. Tendo como exemplo um cristal único ferroelétrico, após crescimento, exhibe-se a polarização espontânea na direção (001) na fase tetragonal, na direção (101) na fase ortorrômbica, e na direção (111) na romboédrica (Figura 1). As características de domínio- único (plano único), representado pelo plano de atuação, do cristal piezoelétrico são dadas pelas orientações do coeficiente de carga: $d_{ij} \Rightarrow Q_m \Rightarrow k_{33}$ e k_{32} , sendo i e j dados dos planos cartesianos no volume do cristal. Conforme mostrado na Figura 1, para a fase tetragonal, existem seis direções equivalentes à direção (001), identificada como “6T”;

para a fase ortorrômbica, existem doze direções equivalentes à direção (101), rotuladas “12O”; e para a fase romboédrica, existem oito direções equivalentes para a direção (111), identificada como “8R.” Quando a direção de polarização induzida se alinha com a direção da polarização espontânea, domínios únicos se formam no cristal único, rotulado como "1T", "1O" e "1R" para o tetragonal, ortorrômbico, e fases romboédricas, respectivamente, com apenas uma variante de domínio favorecido pelo campo da polarização (UCHINO, 2009).

Figura 1 - Domínios únicos para as fases tetragonal, ortorrômbica e romboédrica, com possível polarização de múltiplos domínios na engenharia de domínio.



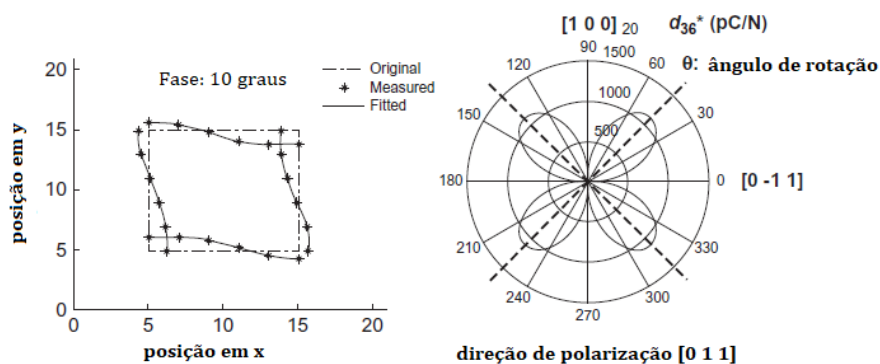
Fonte: UCHINO, 2009

Para otimizar as propriedades piezoelétricas, multi – domínios (planos) podem ser formados pela polarização com um campo elétrico suficientemente grande em direções diferentes da direção de polarização espontânea rotulados “2T” e “3T” para a fase tetragonal, “4O” e “3O” para fase ortorrômbica, e “4R” e “2R” para a fase romboédrica. Em vários domínios cristalinos unitários, a polarização macroscópica pode gerar vários domínios, com inclinações mais fáceis de polarização nos domínios com maiores propriedades piezoelétricas. As características distintas podem ser comparadas aos cristais de domínio unitários (planos

únicos) e dos domínios múltiplos (múltiplos planos). Em geral, devido a fácil rotação de polarização e o movimento das fronteiras de domínio, em múltiplos domínios de cristais, os coeficientes piezoelétricos, $[d_{ijk}]$, aumentam e o fator mecânico (módulo de Young) de qualidade Q_m (fator- Q) diminui, significando que o material se torna frágil. Com isso, a direção de polarização varia da polarização espontânea, levando um cristal de cortes especiais, para otimização dos modos de vibração, com as funcionalidades piezoelétricas k_{15} e k_{36} . No modo k_{36} , uma placa piezoelétrica vibra com cisalhamento de movimento de face, como mostrado na Figura (2). O modo k_{36} é o único modo de cisalhamento em que a direção de polarização se alinha com a direção da condução do campo elétrico, o que pode ajudar na prática a manter a polarização por repolarização sob impulso de alto campo ativo (UCHINO, 2009). A otimização do coeficiente piezoelétrico d_{36}^* depende da direção de polarização e de dois outros coeficientes piezoelétricos, d_{32} e d_{31} , com base na rotação ângulo θ ,conforma apresentado na equação (5)

$$d_{36}^* = (d_{32} - d_{31}) \cdot \text{sen}(2\theta) \quad (5)$$

Figura 2 - Medição experimental do movimento de cisalhamento da face do cristal a partir de vibrometria a laser (esquerda).



Fonte: Uchino, 2009

O vetor de polarização estabelecido pela aplicação de uma voltagem DC alta é representado por uma seta apontando do eletrodo positivo para o polo negativo. Esta informação é transmitida por um ponto ou faixa na superfície do eletrodo mantida em alta tensão durante o processo de polarização (PRIYA; INMAN, 2009; YANG et al., 2018).

O coeficiente de carga piezoelétrica é um tensor de 3ª ordem que pode ser expresso por uma matriz (3x6) que correlaciona a área da unidade de carga deslocada (com eletrodos em curto-circuito), associado a uma tensão aplicada, de acordo com a equação (6)

$$D_i = d_{ij} T_j \quad (6)$$

Em que d_{ij} é o coeficiente de carga piezoelétrica [C / N], D é o dielétrico deslocamento [C / m²], e T é a tensão aplicada [N / m²].

O coeficiente de tensão piezoelétrica (g) é uma matriz 3 x 6 e correlaciona o campo elétrico (E) desenvolvido (com eletrodos em circuito aberto), associado a uma tensão (força/área) aplicada (T) de acordo com a equação (7)

$$E_i = -g_{ij} T_j \quad (7)$$

a tensão de tração é positiva, a tensão de compressão é negativa e g_{ij} é expresso em unidades de [V/m] e por [N/m²].

Coefficientes piezoelétricos são usados para relacionar parâmetros de entrada e parâmetros de saída. Os coeficientes de deformação piezoelétrica, d_{ij} , correlacionam a deformação (S) produzida por uma aplicação do campo elétrico, de acordo com a equação (8).

$$S = d_{ij} E \quad (8)$$

Em complemento um fator k (acoplamento eletromecânico) é introduzido para se avaliar a eficiência de materiais piezoelétricos, tanto na conversão de energia mecânica em elétrica, como na reação da aplicação da energia elétrica convertida em mecânica. Portanto, o coeficiente de acoplamento (k) é uma indicação da capacidade dos materiais em converter energia elétrica em energia mecânica. Especificamente, o quadrado do coeficiente de acoplamento é igual a relação entre a saída de energia mecânica e a entrada de energia elétrica. Isto é mais relevante para dispositivos de cerâmica sólida do que para elementos flexíveis, isto porque um elemento de flexão armazena uma parte de sua energia mecânica na montagem, equações (9) e (10) (PRIYA; INMAN, 2009; YANG et al., 2018).

- Energia mecânica útil por unidade de volume: $W^{\text{mec}} = \frac{S_p T_p}{2}$ (9)

- Energia elétrica por unidade de volume: $W^{\text{ele}} = \frac{D_i T_i}{2}$ (10)

Para se obter as dimensões de k , a energia convertida é relacionada a energia aplicada. Se a energia aplicada sobre o PZT for mecânica, o fator relacionado k é dado pela equação (11), Figura (3) (PRIYA; INMAN, 2009):

$$(k^2) = \frac{\text{energia mecânica convertida em energia elétrica}}{\text{energia mecânica aplicada}} \quad (11)$$

E se a energia aplicada sobre o PZT for elétrica, o fator relacionado k é dado pela equação (12), Figura 3 (PRIYA; INMAN, 2009):

$$(k^2) = \frac{\text{energia elétrica convertida em mecânica}}{\text{energia elétrica aplicada}} \quad (12)$$

2.4 Outros Compósitos com características Piezoelétricas

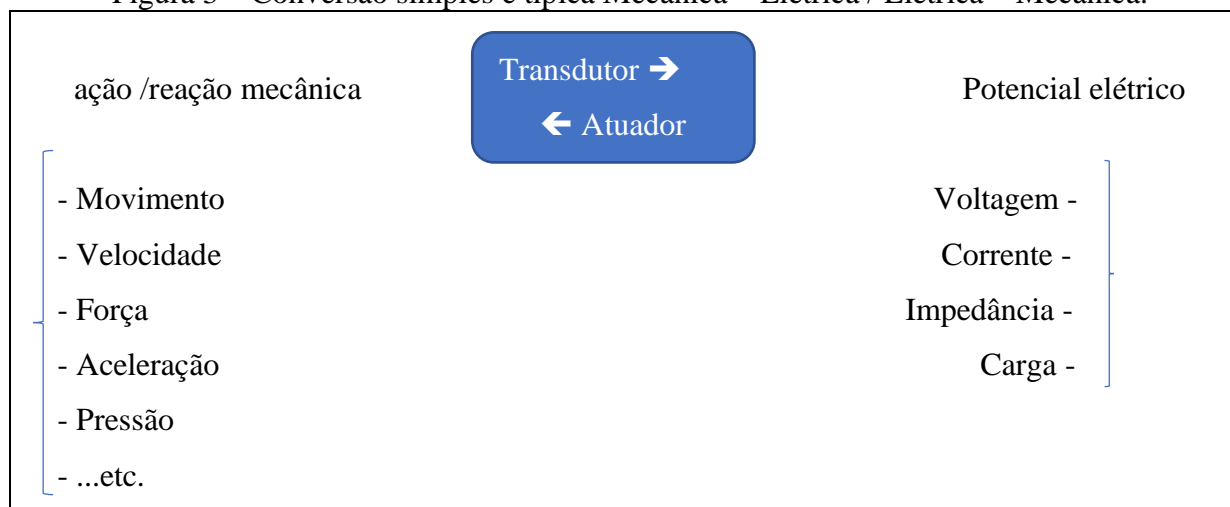
Outros materiais piezoelétricos comumente utilizados como conversores/geradores energéticos são: nitreto de alumínio e (AlN), óxido de zinco (ZnO), Titanato de Bário (BaTiO₃), fluoreto de polivinidileno (PVDF), PMN-PT (Pb [Mg_{1/3}Nb_{2/3}] O₃-PbTiO₃), PZN-PT (Pb[Zn_{1/3}Nb_{2/3}]O₃-PbTiO₃) (YANG et al., 2018).

2.5 Transdutores de PZT como Geradores MEMS

Um transdutor piezoelétrico, é um dispositivo que utiliza o efeito piezoelétrico para deslocamento espacial através da compressão mecânica, aceleração, tensão ou força convertendo-os em carga elétrica, como o atuador tem ação contrária como mostra a Figura 3.

Apesar de sensores piezoelétricos serem sistemas eletromecânicos que reagem à compressão, a sua sensibilidade à deformação é quase zero, sendo classificados como materiais frágeis (KUONO, 1984). Transdutores capazes de atuarem como geradores energéticos têm sido desenvolvidos e já é possível encontrá-los em quantidade ou variedade razoável no mercado comercial. Na atualidade, a pesquisa e desenvolvimento de equipamentos médicos portáteis, utilizam transdutores de PZT como fonte energética, tornando-os auto sustentáveis, vêm tornando-se de grande importância para a sustentabilidade, crescimento econômico e melhoria da qualidade de vida (PANDA et al., 2015). Os atuadores têm uma ação física e prática inversa aos transdutores utilizados como sensores. Enquanto os transdutores tem uma função de geração energética sendo excitados mecanicamente, os atuadores tem uma função motriz por meio de uma excitação elétrica, conforme mostrado na Figura (3).

Figura 3 – Conversão simples e típica Mecânica – Elétrica / Elétrica – Mecânica.



Fonte: adaptado de PRIYA; INMAN, 2009.

Desde a década de 1970 transdutores de PZT vêm sendo utilizados como fontes de energia (pilhas - *Stack*) acionadoras de mecanismos dinâmicos. Os PZTs se tornaram muito importantes como componentes eletroativos nos sistemas com atuadores inteligentes (SHEVTSOV et al., 2017). Kuono (1984) desenvolveu trabalhos sobre estes mecanismos, alertando sobre a necessidade de um sistema de correção “*on-line*” de máquinas de usinagem, que transmitiam erros devido a falhas de projeto ou do processo de fabricação das peças usinadas. Para a correção destes problemas, Kuono (1984) projetou um sistema *Fast Tool Servo* (FTS) que se

movia rapidamente e com precisão de micrômetros. Okazaki (1990), na mesma linha de sistemas FTS e piezo servo, projetou um mecanismo atuador com pilha PZT e um medidor de capacitância para tornos de diamante com alta precisão e alta resolução (na ordem deci – micrométrica).


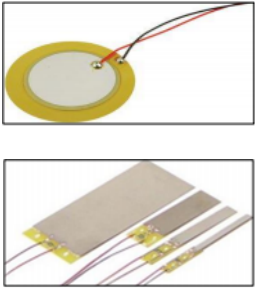
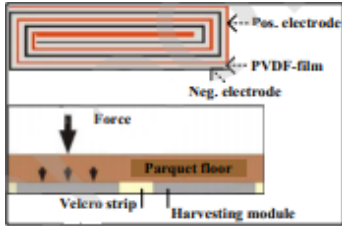
Nos dias atuais, os estudos são de dimensões nanométricas, o que faz com que os trabalhos sejam regidos no âmbito computacional em pesquisas e análises em elemento finito e funções algorítmicas (WANG; LI, 2019). A evolução dos computadores e softwares ajudaram muito nesta miniaturização e precisão dos mecanismos sendo empregados em diversas áreas, tais como na medicina.

O desenvolvimento de sensores *wireless* está sendo a grande motivação da pesquisa e desenvolvimento de dispositivos autossustentáveis. O rápido progresso dos sistemas ULPs e MEMS tem impulsionado as pesquisas e diversos transdutores de baixo custo, muitos, já disponíveis no mercado, foram desenvolvidos (PRYA; INMAN 2009; SCALET et al., 2017; DU, 2017).

Gljuš'čić et al. (2017) coletaram alguns dispositivos transdutores, apresentados na Tabela (1) que recuperam a energia antes perdida em energia elétrica útil.

A medicina é a área que mais está focada no momento na pesquisa de MEMS autossustentáveis, completando os sistemas de energia baseados em bateria existentes para biossensores implantáveis, aumentando assim operacionalidade do sensor e sua vida útil (KUTIŠ; MOUSSA, 2011; LUEKE et al. 2018). Muitos sistemas físicos estão sendo avaliados como fonte destes micros geradores de energia, como fotocélulas, termopares, vibração, vento e etc. Até o início deste século, muitas destas fontes eram consideradas somente nas pesquisas, devido a suas baixas densidades energéticas. Com a evolução, miniaturização e por consequência a redução da energia de sustentação necessária dos dispositivos eletrônicos (MEMS), nos dias atuais, estas fontes energéticas podem ser utilizadas, antes consideradas como energias perdidas, para a sustentabilidade destes equipamentos na área da medicina, comunicação e outras (ERTURK; INMAN, 2011; KUTIŠ; MOUSSA, 2011; SHEVTSOV et al. 2017; LUEKE et al., 2019).

Tabela 1-Especificações técnicas de alguns dispositivos piezoelétricos, custos e vida útil.

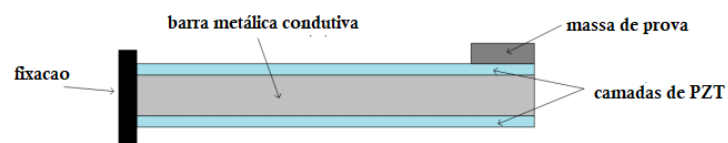
Empresa Produtora	Características e aplicabilidade	Dimensões (m)	Energia produzida	Figuras	Estimativa vida útil
Sound Power	-Fonte de energia para diversas aplicações -Geração de 0,1 W por pressão	0,5x0,5	0,1 W por pressão em dupla face		20 anos
Drum Harverst-Piezo pastilha de PZT	-Produz pouca energia -Produz energia necessária para sustentar ULP. -Baixo custo de fabricação -Simple processo de fabricação -Com alta resistência relativa.	Diversos	2,5 mW		20 anos
Camadas de Parquet PVDF (Fluoreto de polivinilideno)	-Desenvolvimento fácil, de baixo custo. -Pode ser criado em dimensões maiores, material de folha. -Os módulos são categorizados por meio de grande elasticidade. -Forte e resistente, podendo ser construído em qualquer dimensão -A eficiência energética subindo por meio da característica de as camadas.	Camadas	2,1mW pulsos de carga com 70kg		20 anos

Fonte: adaptado de Gljušćić et al. 2017.

Covaci e Gontean (2020) relacionam e descrevem alguns transdutores de PZT mostrados nas Figuras 4, 5, 6 e 7. Estes transdutores podem ser encontrados em diferentes formatos:

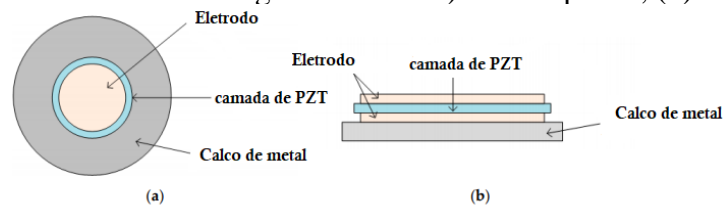
- Viga cantiléver - Figura (4)
- Diafragma circular - Figura (5)
- Tipo prato - Figura (6)
- Tipo pilha - Figura (7)

Figura 4 Barra cantiliver Transdutora.



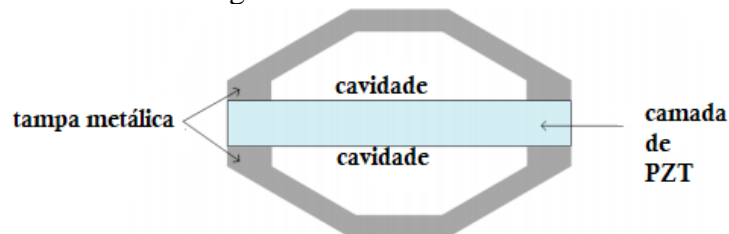
Fonte: COVACI; GONTEAN, 2020

Figura 5 Transdutor de diafragma circular: a) vista superior; (b) vista lateral.



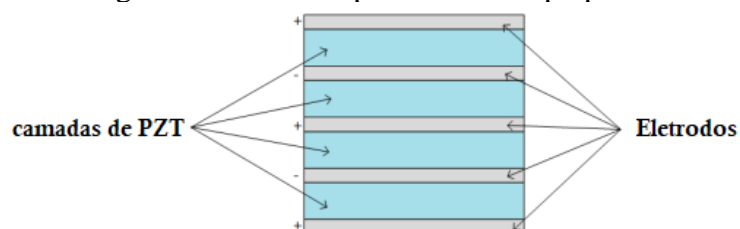
Fonte: COVACI; GONTEAN, 2020

Figura 6 Prato Transdutor.



Fonte: COVACI; GONTEAN, 2020

Figura 7 Transdutor piezoelétrico tipo pilha.



Fonte: COVACI; GONTEAN, 2020

Transdutores tipo pastilha de PZT, mostrados na Figura 8, foram analisados como recuperadores energéticos pelos autores (MISHRA et al., 2015; SCALET et al., 2017). Seus resultados mostraram que estes tipos de transdutores comerciais de baixo custo são propícios para atuarem em sistemas de conversão de energia. As características dielétricas, que qualificam os transdutores tipo pastilhas são por apresentarem uma piezeletricidade ativa. Isto os permite gerar uma energia de baixa amplitude elétrica sendo capaz de carregar baterias ou sustentar sistemas ULPs, como uma placa de Arduino, utilizando vibração como fonte (SCALET et al., 2017).

Figura 8- Transdutor tipo pastilha de PZT.



Fonte: Autor

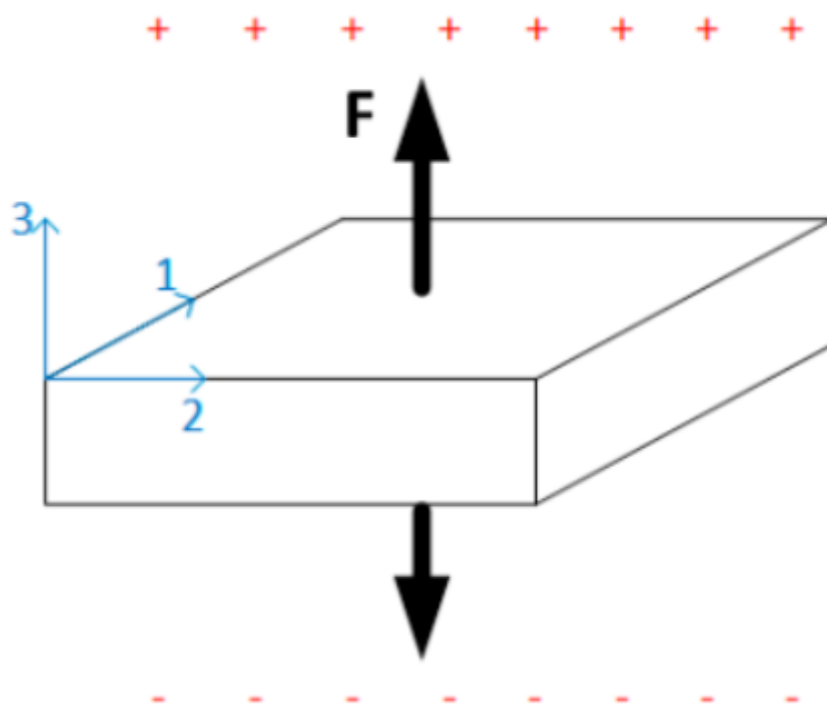
2.6 Vibração como Fonte de Energia em Foco em *Energy Harvesting*

De acordo com Sugino et al. (2017), importantes questões sobre tecnologia de *Energy Harvesting* no campo de mecânica vibracional envolvem a disponibilidade de vibração. A amplificação desta fonte de energia cinética para um transdutor de energia elétrica será o que tornará o aproveitamento desta energia viável. A estrutura que transmite as vibrações para uma massa inercial (transdutor) produzirá um deslocamento relativo entre eles, com a consequente

geração elétrica. Tal sistema possuirá uma frequência ressonante e pode ser projetado para corresponder à frequência característica do ambiente ativo (COVACI e GONTEAN, 2020).

EH por meio da vibração requer um mecanismo de transdução da energia mecânica para elétrica. Este deve estar acoplado ao sistema mecânico que o induzirá a deformação e gerar energia elétrica. Segundo Covaci e Gontean, (2020), a vibração é a fonte de energia mais adequada para os geradores inerciais. Uma viga elástica sujeita a uma vibração, tendo acoplada um transdutor tipo pastilha de PZT comercial, que apresenta uma camada fina de cerâmica de PZT orientada mono axialmente, isto é, $d_{31}=d_{32}=0$, sendo o eixo efetivo da camada de PZT alinhada ao plano x-y (Figura 9), garantindo assim os efeitos máximos do PZT na aplicação do transdutor d_{33} (COVACI; GONTEAN, 2020).

Figura 9 - Modo efetivo d_{33}



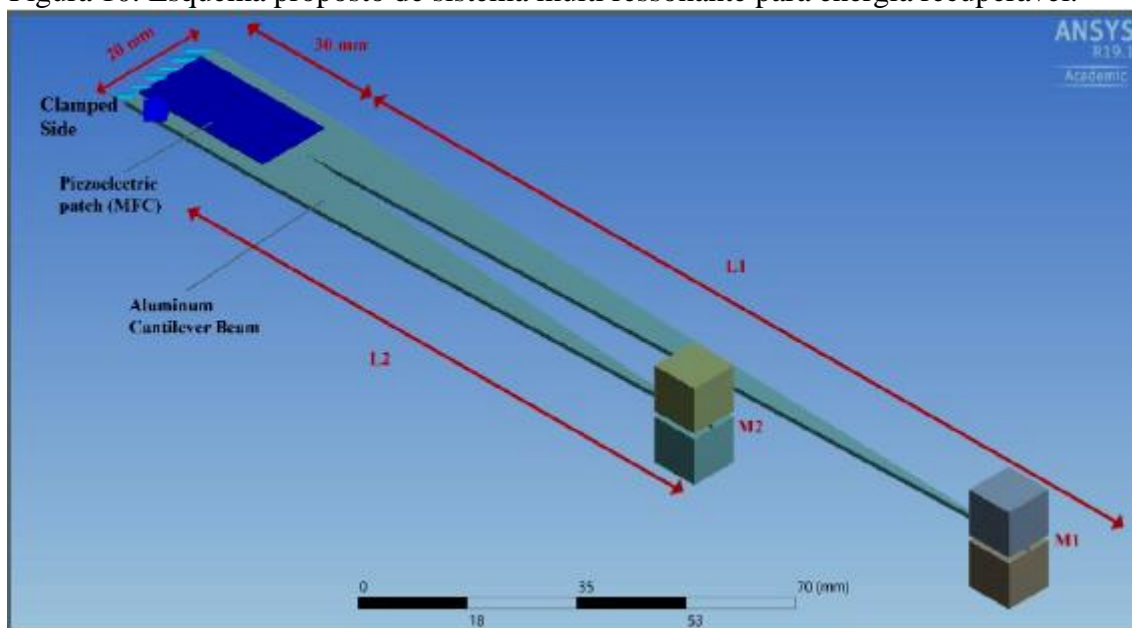
Fonte: adaptada de COVACI; GONTEAN, 2020.

O projeto de um sistema mecânico de conversão de energia, precisa maximizar o acoplamento entre a fonte de energia cinética e o mecanismo de transdução energético. Isto será definido pelas características da vibração do sistema. Podendo portanto projetar um sistema que corresponda à frequência característica do ambiente indutor. Neste caso, pode-se aumentar a amplitude de vibração do sistema, garantindo uma maior quantidade de energia convertida (BEEBY et al., 2006).

Sistemas piezoelétricos são geradores de EH de baixa frequência vibracional, enquanto geralmente os sistemas eletrodinâmicos de conversão são utilizados em sistemas de *Energy Harvester* de fontes com alta frequência vibracional, (IZADGOSHASB et al., 2006).

Izadgoshasb et al. (2006) sugerem, para a aplicação de PEH (*Piezoelectric Energy Harvesters*), a utilização de uma viga cantiléver metálica. Os autores afirmam que é comum utilizar-se apenas um modo de vibrar, ou seja, somente o modo fundamental da viga (primeiro modo de flexão). Os modos superiores são geralmente separados do modo fundamental e são considerados menos úteis para energia recuperada. Isso, por sua vez, resulta em uma das principais desvantagens do PEH: seu baixo desempenho quando a frequência de excitação da fonte vibratória está distante da frequência de ressonância. Assim, é essencial para os pesquisadores criarem novos projetos capazes de funcionar em uma faixa de frequência mais ampla, ou seja, captação de energia de banda larga. Um dos possíveis projetos é a utilização de PEH multimodal, que possui múltiplas frequências de ressonância dentro de uma faixa desejável (Figura 10) ou a partir da utilização de sistemas não lineares, como *harding* e *softing*.

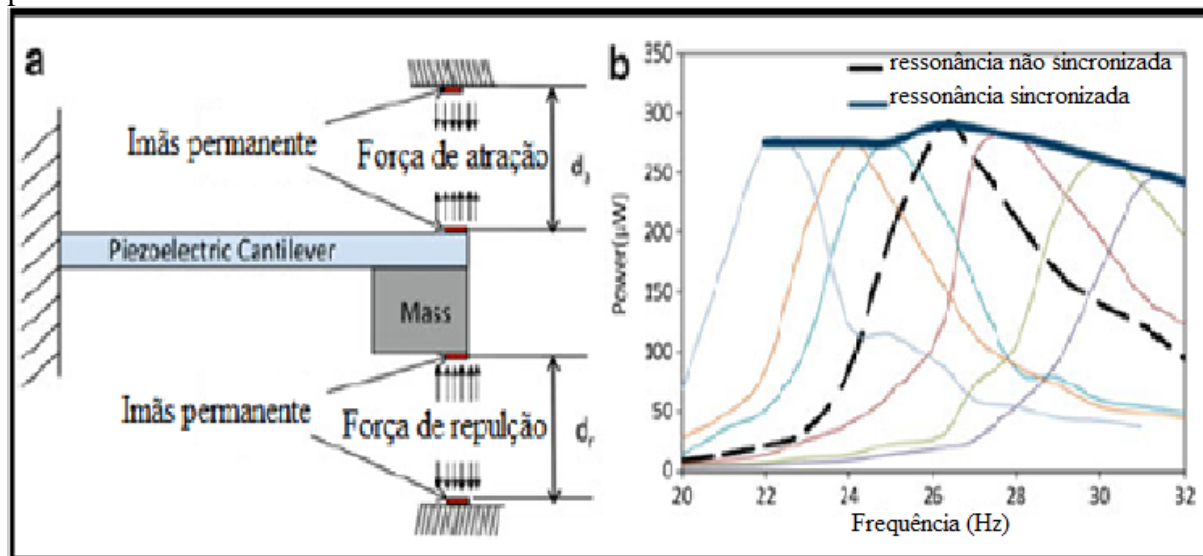
Figura 10. Esquema proposto de sistema multi ressonante para energia recuperável.



Fonte: Izadgoshasb et al., 2006.

As técnicas de captação de energia de banda larga vêm avançando nos últimos anos, elas cobrem a ressonância, técnica multimodal e a captação de energia em configurações não lineares como mostra a Figura 11 (TANG et al., 2013). A Figura 11-b mostra que a potência de saída foi prejudicada quando o amortecimento foi alterado.

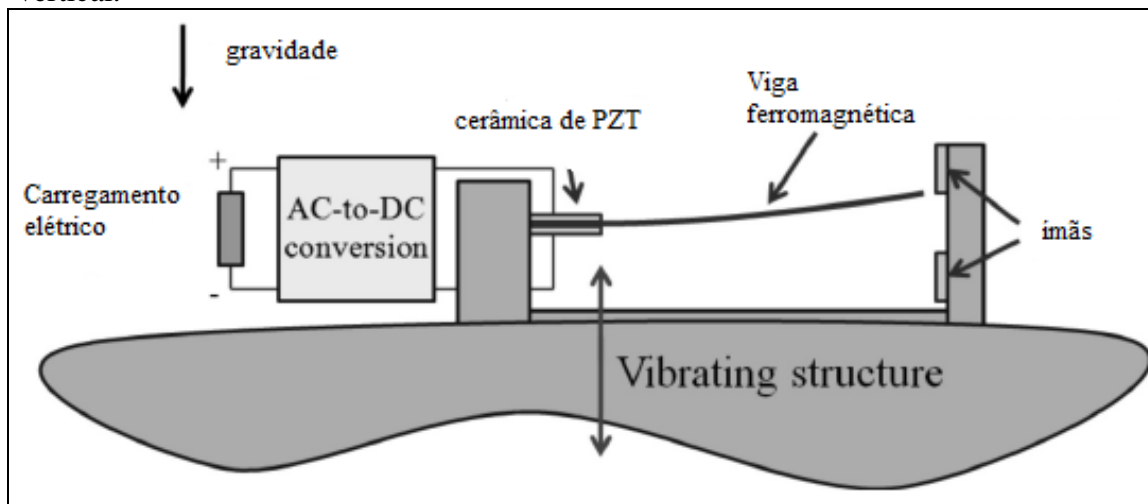
Figura 11 (a) Esquema de um conversor energético de ressonância sincronizada (b) saída de potência versus ressonância sincronizada.



Fonte: adaptado de TANG et al., 2013, direitos autorais IOP Publishing

Conversão de energia baseada em vibração utilizando viga cantiléver e material piezelétrico são utilizados por diversos autores já há algum tempo (IZADGOSHASB et al., 2006; DAQAQ et al., 2009; LEE et al., 2019). Vários estudos foram realizados neste dispositivo, variando desde a definição do sistema de armazenamento de energia, até a otimização geométrica do dispositivo para se obter a maior potência elétrica de saída, quando estes são excitados na sua frequência natural (FRANCO, 2014). Outras análises desse dispositivo envolvem a utilização de forças magnéticas Figura 12 de forma a ampliar a utilização do conversor energético, ou seja, aumentar a banda de frequência do sistema de forma a as “aproveitar” melhor as frequências da fonte excitadora (ERTUK e INMAN, 2011). Estas técnicas para fins de aumento da banda são conhecidas como *softening* ou *hardening*.

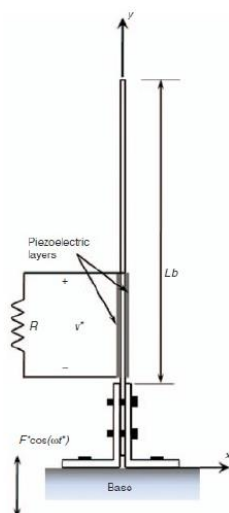
Figura 12 - Esquema de um coletor de energia “piezomagnetoelástico” sob excitação vertical.



Fonte: adaptado de ERTURK e INMAN, 2011.

Outra análise envolvendo vibração e viga cantiléver para EH é a excitação paramétrica, como como apresentado na Figura 13. Este tipo de análise também está na faixa dos estudos não lineares. O modelo considera as não linearidades geométricas, a inércia da viga e as não linearidades que representam a resistência do ar. Usando o método de escalas múltiplas, onde diferentes frequências de excitação os resultados foram analisados em RMS aceleração e média de potência por carregamento em Ohms [Ω], obteve-se expressões analíticas aproximadas para descrição de resposta do sistema, como queda de tensão através de uma carga puramente resistiva e potência de saída nas proximidades do primeiro princípio paramétrico de ressonância (DAQAQ et al., 2009).

Figura 13 - Esquema de uma viga cantiléver excitada parametricamente e utilizada como conversor de energia.



Fonte: DAQAQ et al., 2009.

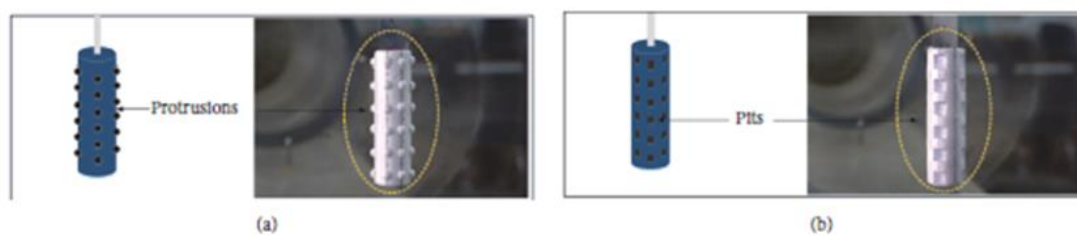
2.7 Forças Aero Elásticas como Indutor Vibracional

Muitas propostas foram e ainda estão sendo apresentadas para o desenvolvimento e obtenção de um sistema mecânico para maximizar o acoplamento entre a fonte de energia cinética e o mecanismo de transdução, o que dependerá inteiramente das características do movimento ambiental (BEEBY et al., 2006). A interação aerodinâmica/cantiléver indica ser uma qualificada interação para geração energética resultante da vibração. A seguir são apresentados alguns trabalhos nesta área.

Um problema comum, como citado aqui por diversos autores é a baixa largura de banda e conseqüentemente, a baixa eficiência de coleta ainda existente. Jin et al. (2019) propôs, com base em métodos experimentais, aumentar a amplitude de resposta da vibração, forçando a diminuição da velocidade do vento, através da textura em cilindros hemisfericamente alterados superficialmente com cavidades quadradas e protuberâncias cilíndricas (Figura 14). A vibração, induzida por vórtice, gera energia por meio de uma estrutura de fixação biônica, ou em outra descrição fixação de material flexível (Figura 15). Os resultados mostraram que as alterações, tanto com estruturas convexas ou estruturas com protuberâncias hemisféricas, tiveram excelentes efeitos no aumento da amplitude de vibração e quanto maior a amplitude, maior a

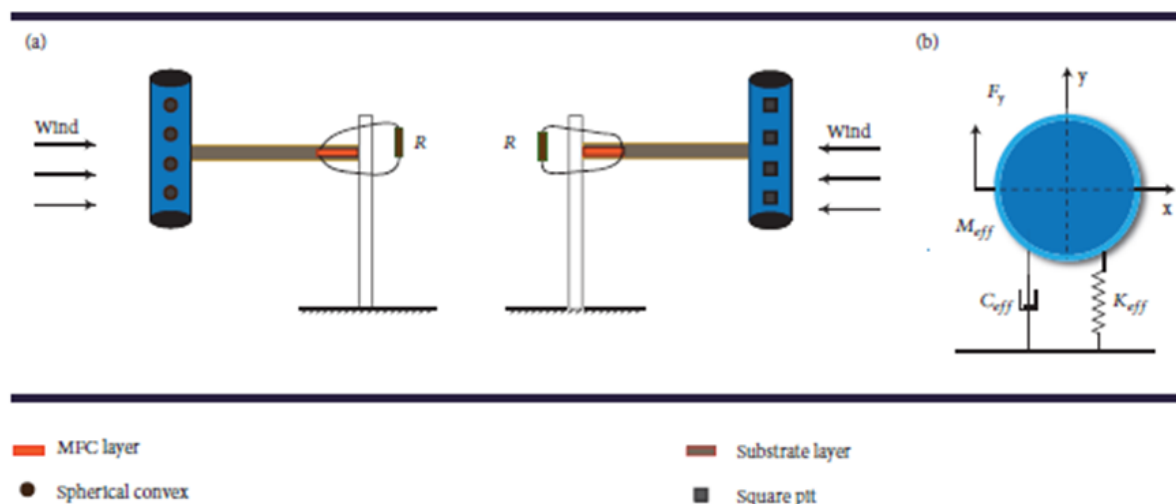
tensão gerada. A tensão medida foi de aproximadamente 50 V, muito superior a medida com cilindro liso.

Figura 14 - Modelo físico de corpos esculpados com estrutura biônica (orgânica flexível). (a) Esquema com protuberâncias; (b) esquema com cavidades.



Fonte: Jin et al., 2019

Figura 15 - Diagrama esquemático do VIVPEH com estrutura biônica: (a) diagrama físico no teste do túnel de vento; (b) esquema equivalente



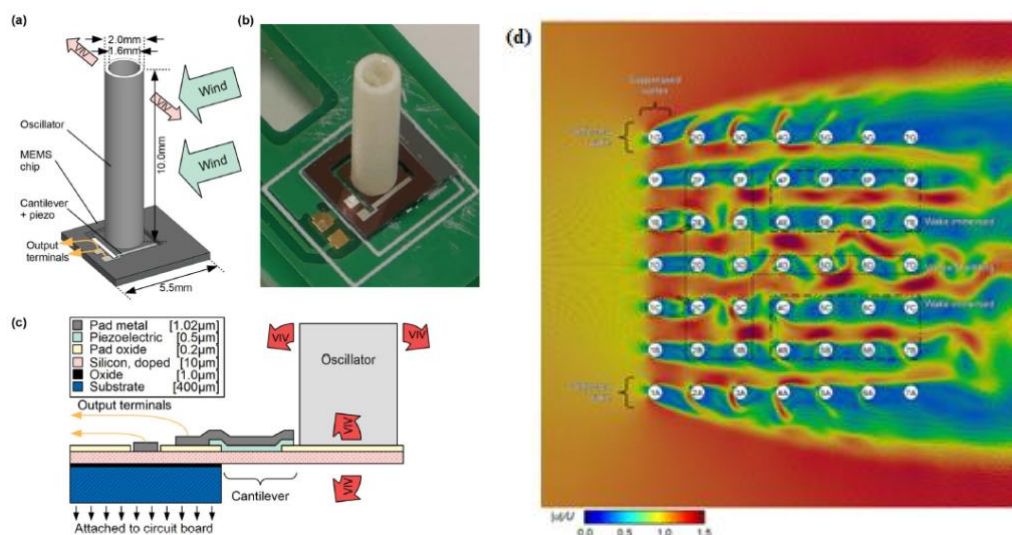
Fonte: JIN et al., 2019

Lee et al. (2019) analisaram a coleta de energia em um cilindro de silicone, em ambiente VIV (sigla do inglês *Vortex-Induced-Vibration*), integrado com chip de silício e também em um sistema formado por vários cilindros de silicone. Os dois dispositivos

MEMS foram conectados, separadamente, a um resistor de carga e expostos a diferentes velocidades de vento em um túnel de vento.

A Figura 16(a) apresenta o desenho esquemático de um recuperador de energia; a Figura 16(b), a fotografia do recuperador energético; a Figura 16(c), o desenho esquemático do dispositivo MEMS e a Figura 16(d), contornos de magnitude de velocidade normalizada encontrados pelos cilindros nesta formação. As linhas pretas finas são linhas de fluxo que indicam a direção do fluxo instantâneo em qualquer ponto dentro do domínio. O fluxo livre é da esquerda para a direita. A energia medida concentrou na faixa de nW , mas um aumento perceptível na produção de energia foi observado, comparando-se os resultados entre os coletores de energia unitário e múltiplos. O coletor de energia composto de uma formação com múltiplos cilindros (Figura 16d) teve uma geração energética superior.

Figura 16 - (a) Desenho esquemático de um recuperador de energia, (b) fotografia, (c) desenho esquemático do MEMS, (d) Contornos de linhas de fluxo.

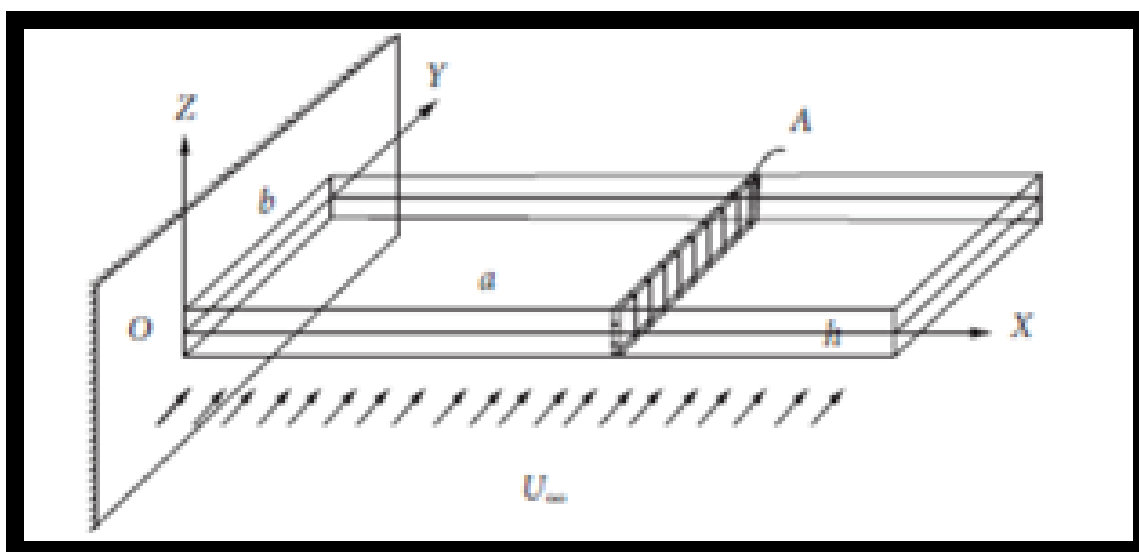


Fonte: adaptado de LEE et al., 2019

A relação entre velocidade crítica de *flutter*, indução vibracional e parâmetros dimensionais do sistema cantiléver Figura (17) foram avaliados por Ma et al. (2020). Os

resultados mostram que, quando o influxo da velocidade do vento atinge seu valor crítico, que é o ciclo limite da oscilação da viga em relação a espessura desta viga e, conseqüentemente, amortecendo ou desacelerando o ar. Isto tem um impacto significativo na velocidade crítica de vibração em uma viga fina.

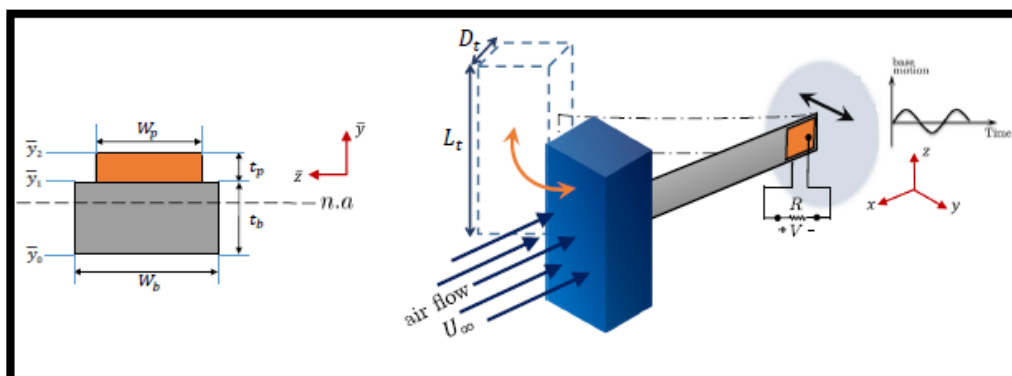
Figura 17 - Modelo de viga de *cantilever* espessura de borda.



Fonte: MA et al. 2020

Em modelos experimentais com excitação dinâmica sob ação denominada galopagem aero elástica combinada, a excitação da vibração ocorre devido ao choque frontal do fluxo de ar com um corpo fixado na extremidade frontal livre de uma viga cantiléver, induzindo a viga a vibrar Figura (18). Bibo et al. (2014) fixaram um transdutor de energia próximo a base fixa, obtendo assim benefícios da excitação de base. O sistema galopante tende a dividir o fluxo de ar de entrada em ambos os lados do corpo, dando origem a vibrações. Os ciclos de oscilações destas vibrações são limitados quando a velocidade de fluxo excede um valor crítico.

Figura 18 -Diagrama esquemático de um *Harvester* de PZT e viga cantiléver.



Fonte: Bibo et al., 2014.

A análise bibliográfica induz as tomadas de decisões, como também no embasamento teórico destas. Este estudo teve início com a cerâmica de PZT, seus transdutores derivados, a vibração como fonte de energia, a adoção da viga cantiléver, a posição que o conversor piezoelétrico será acoplado e por fim adoção de texturas nas vigas que terão o vento como fonte excitadora.

A escolha dos materiais a serem utilizados nos testes experimentais teve a influência do custo e a disponibilidade destes materiais, de forma a viabilizar a construção e aplicabilidade do dispositivo de conversão de energia. A utilização da vibração como fonte energética foi inspirada de Beeby et al., (2006); a utilização de um conversor comercial (pastilha de PZT) como gerador de energia foi inspirado de Covaci e Gontean (2020) e a aplicação de texturas como amplificador relacionado a vibração induzida pelo vento foi inspirada de Jin et al. (2019).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Construção do Dispositivo de EH

Na construção do *Harvester*, utilizou-se como subestrutura uma viga de liga de alumínio 1100H14 de 1mm de espessura, 30mm de largura e 300mm de comprimento. De acordo com o fornecedor, Qualinox Indústria LTDA, a liga 1100 não é tratável termicamente. No entanto, suas características de resistência mecânica podem ser alteradas por trabalho mecânico a frio, denominado encruamento, obtido pelos processos de laminação e recozimento. A Liga 1100 corresponde a um Alumínio não ligado de pureza mínima de 99,0% (conforme ABNT e ASTM). Outras propriedades da liga são apresentadas nas Tabelas 2 e 3.

Tabela 2 – Propriedades Mecânicas da liga de alumínio 1100 (Norma ASTM B 209)

NOMINAL	Limite de Resiliência(MPa)	Limite de Tração (MPa)
	Mínimo	Máximo
H14	110	130

Fonte: Qualinox Industria e Comercio LTDA

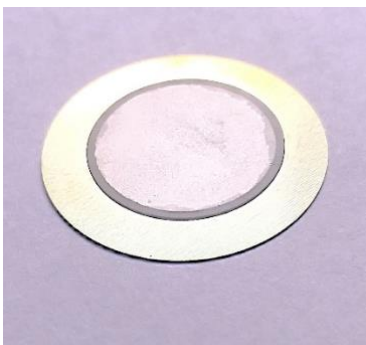
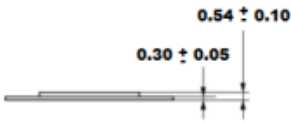
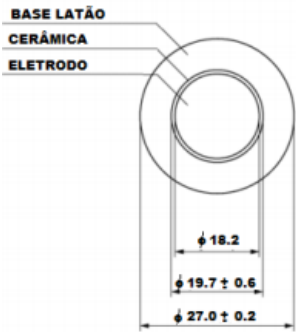
Tabela 3 – Propriedades físicas da liga de alumínio 1100 (Norma ASTM B 209)

Massa Específica	2,71 g/cm ³
Condutividade Térmica	0,53 Cal.cm/cm ² .S°C(25°C)
Condutividade Elétrica	62% IACS (20°C)
Ponto de Fusão	660°C
Módulo de Elasticidade	7030 kg/mm ²
Coefficiente de Dilatação	23x10 (20 - 100°C)

Fonte: Qualinox Industria e Comercio LTDA, 2021.

Para a confecção do *harvester*, foi utilizado o transdutor 7BB-27-4, de 27mm de diâmetro, contendo uma base de latão e cerâmica de PZT ativa com as características geométricas apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4 – Características da pastilha de PZT.

Tipo	Imagem	Descrição dimensionais	
		Espessura (mm)	Diâmetro (mm)
7BB-27-4			

Fonte: Autor

Vigas cantiléver de liga de alumínio 1100H14 foram usinadas com diferentes padrões de textura superficial, contendo furos, rasgos e sulcos. As vigas foram confeccionadas com padrões diferenciando-se em vazado, o qual representa a usinagem em toda a espessura da viga, e não vazado (superficial), o qual representa uma usinagem de somente 0,3 mm de profundidade Figura 19.

A Figura (19) apresenta, com mais detalhes, a diferença entre as diferentes configurações de superfície considerando a viga lisa e com diferentes tipos de furos (superficiais e vazados).

Figura 19 – Vigas, lisa e com diferentes tipos de furos (superficiais e vazados).



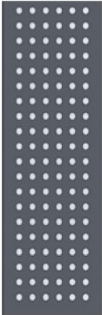


Fonte: Autor

Para o processo de usinagem e criação do padrão de textura superficial, utilizou-se o centro de usinagem D600 comando Siemens, do Departamento de Engenharia Mecânica da UFSCar, o qual possui potência instalada de 16,5 kW. A rotação empregada foi de 4000 rpm, e as fresas topo de 2, 4 e 6 mm foram utilizadas para gerar os diferentes padrões de textura superficial. Estas fresas são de metal duro (carboneto de tungstênio) com revestimento de nitreto de titânio-alumínio (TiAlN). Todos os desenhos técnicos dos padrões de textura confeccionados nas vigas estão disponíveis no Apêndice A. Vale ressaltar que estes desenhos não apresentam o PZT acoplado, apenas as características geométricas das vigas e suas texturas.

Diferentes tipos de texturas superficial foram usinados nas vigas, agrupadas em 3 categorias, a saber: furos Tabela (5), rasgos longitudinais Tabela (6) e rasgos transversais Tabela (7).




X-(Forma da usinagem superficial, YY-(número) e S-(superficial) e V-(vazada).Ex:F-(furo),01 e S-superficial(3mm de profundidade)

Tabela 5 – Descrição das vigas com usinagens na forma de furos - F

Tipo de Textura S e V							F01	F02	F03
	S			V					
Nome do desenho	F01S	F02S	F03S	F01V	F02V	F03V			
- quantidade de furos na direção transversal	6	4	3	6	4	3			
- quantidade de furos na direção longitudinal	67	45	27	67	45	27			
Dist. (mm) Ø Diâmetro(mm)	4 Ø 2	6 Ø4	4 Ø2, Ø4 e Ø6	4 Ø 2	6 Ø4	4 Ø2, Ø4 e Ø6			

Fonte: Autor

Tabela 6 – Descrição das vigas com usinagens longitudinais - RL

Tipo de Textura – S e V						
Nome do desenho	RL01	RL02	RL03	RL01	RL02	RL03
Nº de rasgos Longitudinais não vazado – S e vazados - V	7x4=> (28)	5x4=> (20)	6x3=> (18)			
-Distanciamento (mm)	h* - 6, v* - 8	h - 6, v - 28	h - 6, v - 15			
-Largura (L) (mm)	L** - 2	L - 2	L - 2, 4, 6			
-Comprimento (C) (mm)	C*** - 30	C - 30	C - 30			



*distanciamento: h horizontal
v vertical

**largura: L

***comprimento: C

Fonte: Autor

Tabela 7 - Descrição das vigas com usinagens transversais - **RT**

Tipo de Textura não vazada – S e vazada – V				
Rasgo			RT01	RT02
Nome do desenho	RT_01	RT_02		
Nº de rasgos Transversal – S e V	1x34 => (34)	1x19=> (19)		
Distanciamento	h-0 e v-8	h-0 e v-14,5		
largura (mm)	L-2	L- 2		
Comprimento (mm)	C-20	C-20		

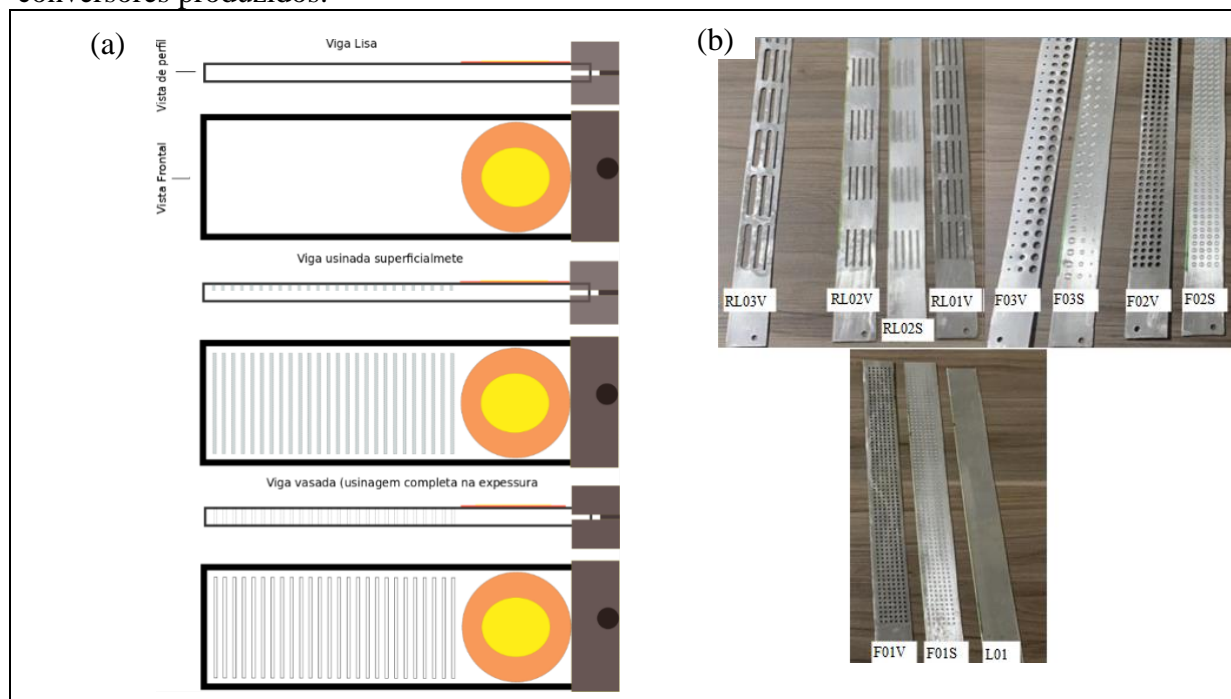
*distanciamento: h - horizontal
v - vertical

**largura: L

***comprimento:

Fonte: Autor

Figura 20 – Desenho (a) representativo do conversor de energia considerando diferentes padrões de textura superficial: lisa, usinagem de rasgos superficiais e vazados. (b) diferentes conversores produzidos.



Fonte: Autor

Um esquema do conversor de energia com as diferentes configurações de superfície pode ser visualizado na Figura (20a). Um total de 17 conversores foram confeccionados, alguns deles estão apresentados na Figura (20b). Nota-se que um PZT tipo pastilha, responsável pela conversão da deformação da viga (relacionada à vibração) em energia elétrica, foi rigidamente acoplado na superfície de cada viga próximo da base a ser engastada.

3.2 Ensaios Experimentais

As vigas foram submetidas a dois tipos de ensaios diferentes. O primeiro, com intuito de confirmar a qualidade das pastilhas de PZT e determinar a diferença nos parâmetros mecânicos relativos às texturas superficiais, foi o teste de impacto, também conhecido como *Bump Test*. Vale ressaltar que neste teste, o martelo excitou o dispositivo (mediante aplicação de um impacto próximo a base engastada) e os sinais de saída foram medidos de duas formas

diferentes: utilizando o PZT (acoplado próximo ao engaste) e um acelerômetro acoplado nas proximidades da extremidade livre do dispositivo. Os equipamentos utilizados no ensaio são descritos a seguir.

- acelerômetro:

- modelo: 333B30 (PCB Piezotronics)
- Número de série: LW69302
- Sensibilidade: 100.2 mV/g (10.21 nV/m/s²)
- BIAS de calibração: 10.9 VDC

- Martelo:

- modelo 086C03 - ICP® *IMPACT HAMMER* (PCB Piezotronics)
- tempo de carregamento para 1-10 é de 3 Wks (Wks- representa o atraso)
- tempo de carregamento para 11 – 20 é de 4 Wks

A aquisição dos sinais dos testes de impacto foi realizada considerando:

- Placa de aquisição:

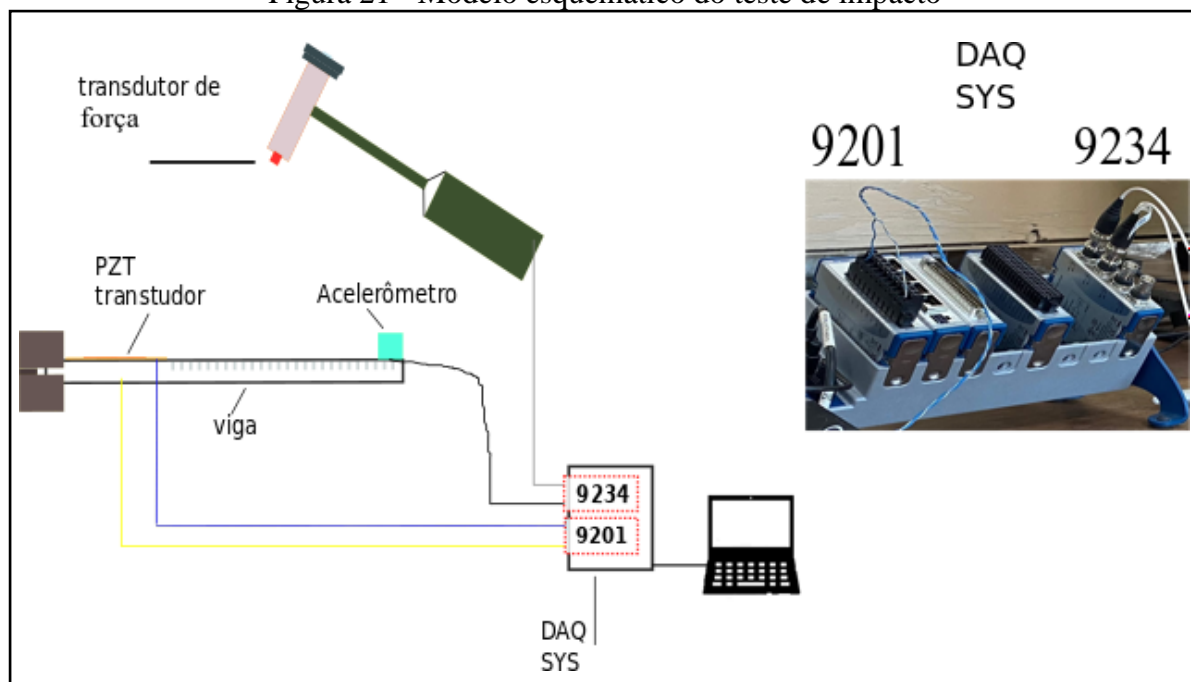
módulos NI 9201 (conectores da pastilha de PZT) e NI 9234 (Conectores do martelo de aquisição e acelerômetro). Marca: *National Instruments*

- Número de amostras: 102400
- frequência de amostragem: 12800 Hz
- tempo de aquisição: 102400/12800 (em segundo)

*Informações adaptadas, PCB PIEZOTRONICS: 3425 WALDEN AVE. DEPEW, NY 1404J (838) 684-0013

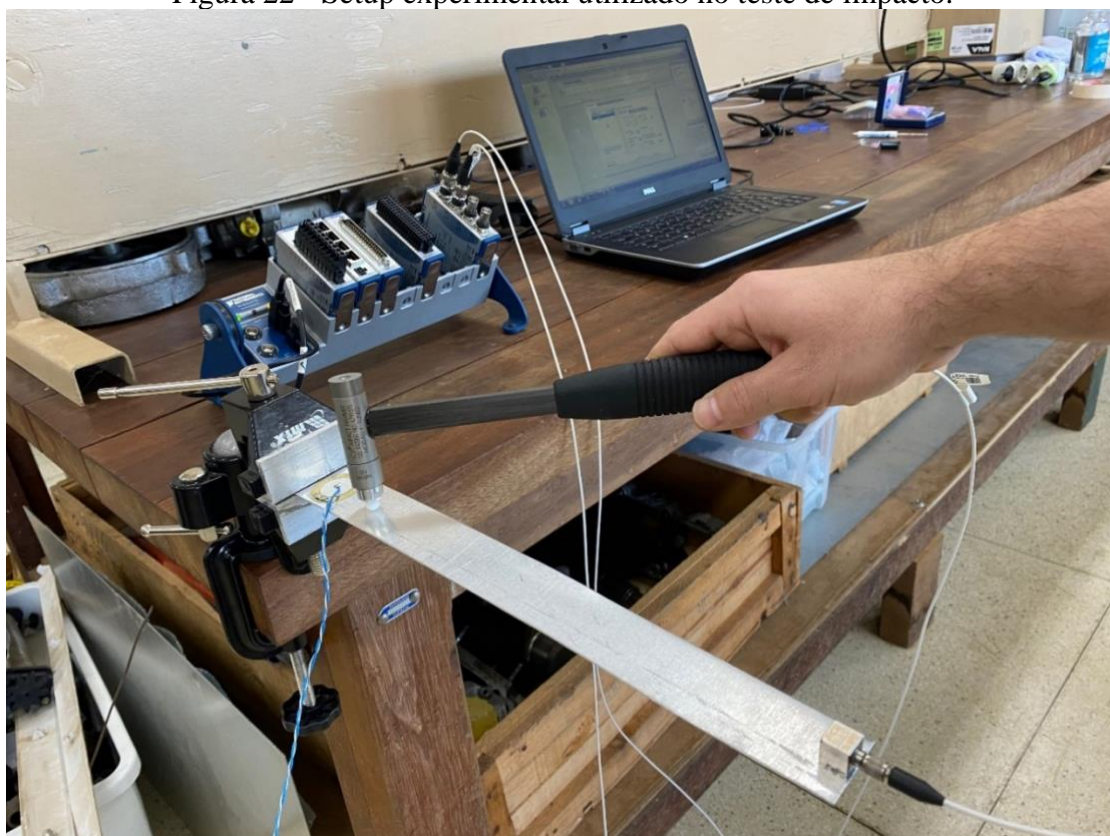
A configuração experimental para realização do teste de impacto pode ser vista na Figura (21). Uma fotografia da realização do teste, já com os equipamentos utilizados, pode ser vista na Figura (22).

Figura 21 - Modelo esquemático do teste de impacto



Fonte: Autor

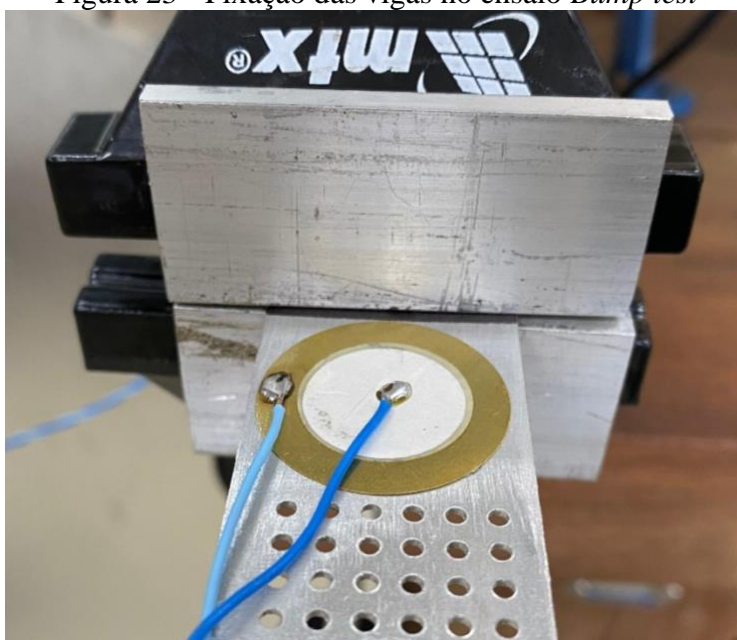
Figura 22 - Setup experimental utilizado no teste de impacto.



Fonte: Autor

As vigas foram engastadas com a utilização de uma morsa Figura (23), a qual foi fixada em uma bancada. Vale ressaltar que o engaste produzido não é ideal, mas, como todas as vigas foram fixadas da mesma forma, espera-se que a comparação entre os dispositivos não venha a ser pouco influenciada pelo engaste.

Figura 23 - Fixação das vigas no ensaio *Bump test*

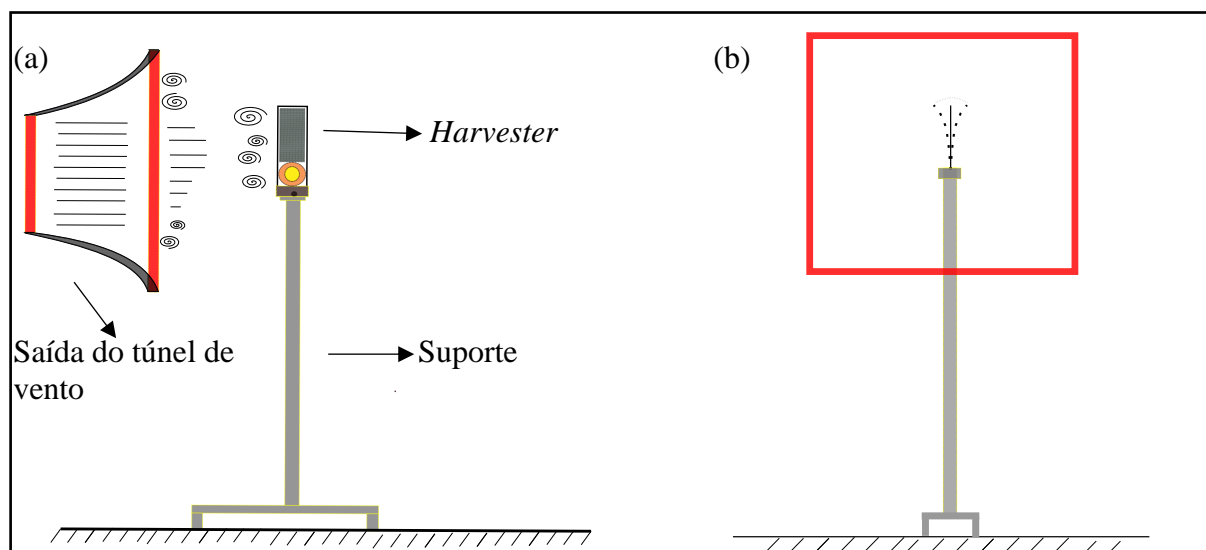


Fonte: Autor

Além do engaste, a Figura (23) mostra como foi realizada a solda dos cabos que conectam a pastilha de PZT ao módulo NI 9201 do DAQ-SYS (Figura 21).

O segundo ensaio consistiu em submeter o *harvester* à ação do vento. O ensaio em túnel de vento contou com a colaboração do Departamento de Engenharia Aeronáutica da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC) da Universidade de São Paulo (USP). A fim de avaliar a influência da textura superficial, o *harvester* foi rigidamente posicionado na saída do túnel de vento, de perfil em relação ao fluxo frontal de vento (com um ângulo de ataque de aproximadamente 1 grau), conforme mostrado na Figura (24). A excitação de vibração proveniente do vento é uma outra forma de excitação, sendo que na maioria dos casos, a excitação do conversor EH é realizada pela sua base. A movimentação do dispositivo (vibração induzida) é realizada por meio da geração de forças aero elásticas provenientes da ação do vento em contato com sua superfície.

Figura 24 - Desenho esquemático do ensaio de fluxo de vento. a) Vista lateral b) Vista frontal



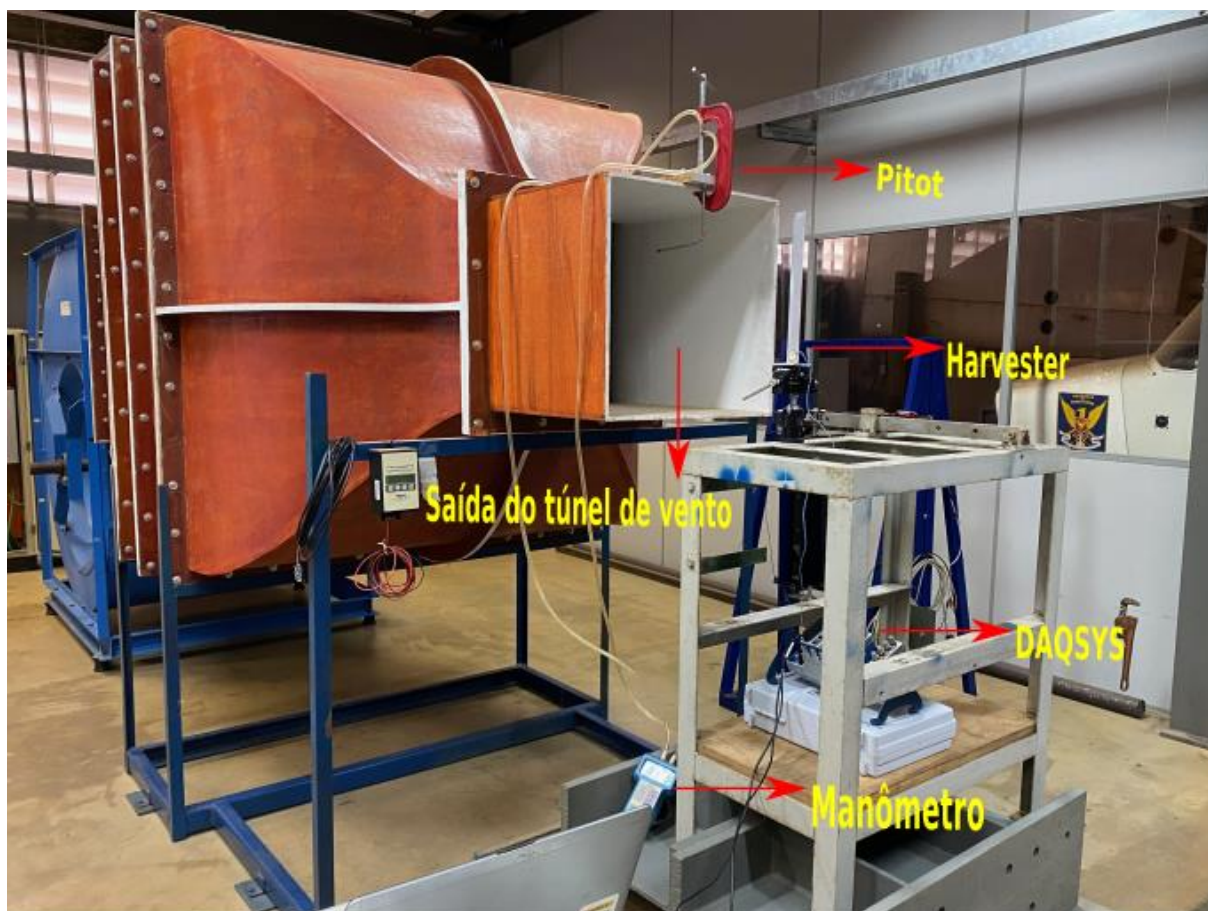
Fonte: Autor

O túnel de vento contém um ventilador construído pela empresa BerlinerLuft do Brasil e impulsionado por um motor WEG W22 Plus, o qual possui uma rotação de 1175 rpm. Para medir a velocidade do vento ao qual o *harvester* está submetido, o túnel de vento contou com um tubo de Pitot posicionado em sua saída e acoplado a um manômetro da marca DP-Calc TSI, conforme pode ser visto na configuração experimental da Figura (25).

Com o objetivo de se poder indicar qual tipo de textura superficial faz com que o dispositivo de conversão tenha um melhor desempenho em termos de geração energética, os sinais obtidos pelas pastilhas PZT (usando o módulo NI 9201 mencionado anteriormente) de cada *harvester* foram obtidos quando estes foram submetidos à ação do vento. Uma média temporal de três medidas foi utilizada para cada dispositivo. Os dados de aquisição neste teste foram:

- ° Número de amostras: 192000
- ° frequência de amostragem: 6400 Hz
- ° tempo de aquisição: 30 segundos

Figura 25 - Setup experimental utilizado no ensaio em túnel de vento



Fonte: Autor

3.3 Análise dos resultados experimentais

Como mencionado anteriormente, dois ensaios diferentes foram realizados (Ensaio de impacto e Ensaio em túnel de vento), com a finalidade de avaliar:

- a utilização das pastilhas de PZT como sensor de vibração;
- a influência das texturas superficiais e vazadas nas propriedades mecânicas das vigas, tais como rigidez, amortecimento e frequência natural
- a influência da textura superficial na indução da vibração quando o Harvester é exposto ao vento.

3.3.1 Análise das Funções de Resposta em Frequência (FRFs)

O teste de impacto foi realizado para validar a utilização das pastilhas de PZT na comparação direta das FRFs elétricas (obtidas pelo sinal da pastilha de PZT em relação ao sinal do martelo de impacto) e FRFs mecânicas (obtidas pelo acelerômetro na extremidade livre da viga com relação ao sinal do martelo de impacto). Neste contexto, as frequências de ressonância de cada sistema e a razão das amplitudes dos picos foram comparadas com a viga de referência (viga lisa).

Para a comparação dos *harvesters* com relação à quantidade de energia convertida, estes foram agrupados em relação ao tipo de textura, superficial (S) ou vazada (V), e ao tipo de usinagem, furos (F), rasgos longitudinais RL e rasgos transversais RT. A viga lisa (L) foi utilizada como referência para comparação, ou seja, a produções energéticas das vigas relativas as texturas foram comparadas com a viga lisa. A Tabela (8) apresenta os grupos de análise para comparação.

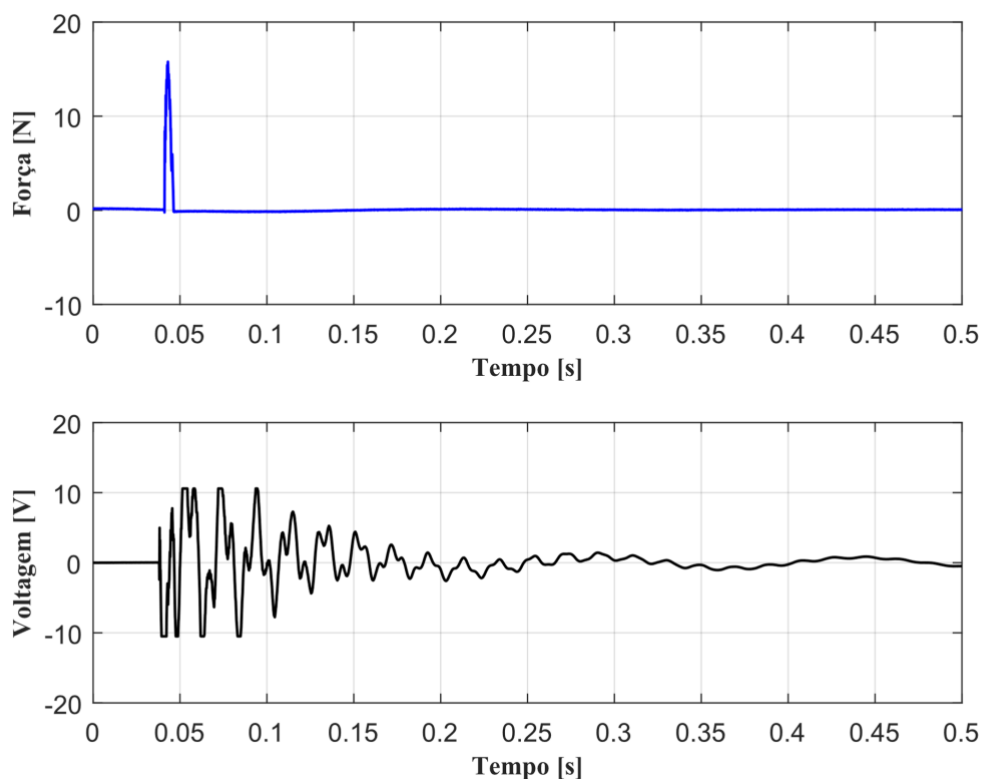
Tabela 8- Grupos de análise

1)	2)	3)
- L01 - FS01 - FS02 - FS03	- L01 - RLS01 - RLS02 - RLS03	- L01 - RTS01 - RTS02
4)	5)	6)
- L01 - FV01 - FV02 - FV03	- L01 - RLV01 - RLV02 - RLV03	- L01 - RTV01 - RTV02

Fonte: Autor

Para cada viga, foram realizados 5 testes de impacto e para cada teste, uma FRF foi obtida. A Figura (26) apresenta um sinal único de excitação do *harvester* RL01V obtido no teste de impacto.

Figura 26 – Sinais de tensão elétrica (obtido pelo PZT) e de força (martelo) obtidos em um dos testes de impacto da viga RL01V



Fonte:Autor

A fim de se avaliar o quanto o sinal de saída está relacionado com o sinal de entrada, utilizou-se a função de coerência. No Matlab®, a coerência é obtida por meio da aplicação do comando “*mscohere*”, o qual retorna valores entre zero e 1, sendo que o valor 1 indica 100% de coerência. Essa função utiliza a Densidade Espectral de Potência (PSD) nos cálculos. A função de coerência entre dois sinais $x(t)$ e $y(t)$ é estimada por meio da relação entre o módulo quadrático do espectro cruzado de potências $|\tilde{S}_{xy}(f)|^2$ e o produto dos autos espectros de potências $\tilde{S}_{xx}(f)\tilde{S}_{yy}(f)$, conforme apresentado na Equação (13).

$$\tilde{\gamma}_{xy}^2(f) = \frac{|\tilde{S}_{xy}(f)|^2}{\tilde{S}_{xx}(f)\tilde{S}_{yy}(f)} \quad (13)$$

Da desigualdade $|\tilde{S}_{xy}(f)|^2 \leq \tilde{S}_{xx}(f)\tilde{S}_{yy}(f)$, que define a variação entre 0 e 1, quando esta desigualdade for igual a 1, tem-se uma coerência de 100% e quando o denominador for

muito pequeno, tendendo a 0, a coerência tende a 0%. Portanto, $0 \leq \tilde{\gamma}_{xy}^2(f) \leq 1$. A estimativa do espectro cruzado é obtida tomando-se janelas sucessivas com trechos dos dois sinais considerados, estimando-se as densidades espectrais cruzadas para as componentes de frequências dos trechos de cada sinal e calculando-se o somatório do produto entre as potências de cada trecho (SHIN e HAMMOND, 2008; OPPENHEIM e WILLSKY, 2010).

Com os sinais de entrada e de saída medidos em cada dispositivo, aplicaram-se os estimadores espectrais (já implementados no software Matlab®, comando “*tffestimate*”) para se obter as FRFs. No final, a média das 5 FRFs foi utilizada para comparação das características mecânicas de cada dispositivo.

3.3.2 Análise da Vibração Induzida pelo Vento em Termos de Geração Energética

Para a análise da vibração induzida pelo vento proposta neste trabalho, o harvester foi posicionado de frente, na posição vertical e de perfil em relação ao fluxo do ar. A fim de induzir as forças aero elásticas nas vigas lisa e vazadas uma inclinação de aproximadamente 1° foi aplicada no *harvester* com relação ao seu eixo longitudinal. A rotação do motor do túnel de vento foi uniformemente variada, alterando-se, assim, a velocidade do fluxo de ar na saída do túnel. Para definir a relação entre rotação do motor e velocidade do vento a qual o harvester foi submetido, alterou-se a velocidade de rotação do motor uniformemente e a cada aumento de 100 rpm registrou-se a velocidade de saída do vento, conforme apresentado na Tabela (9). Assim, uma relação linear entre a rotação do motor e a velocidade do vento na saída do túnel pode ser obtida, conforme apresentado na Figura (27).

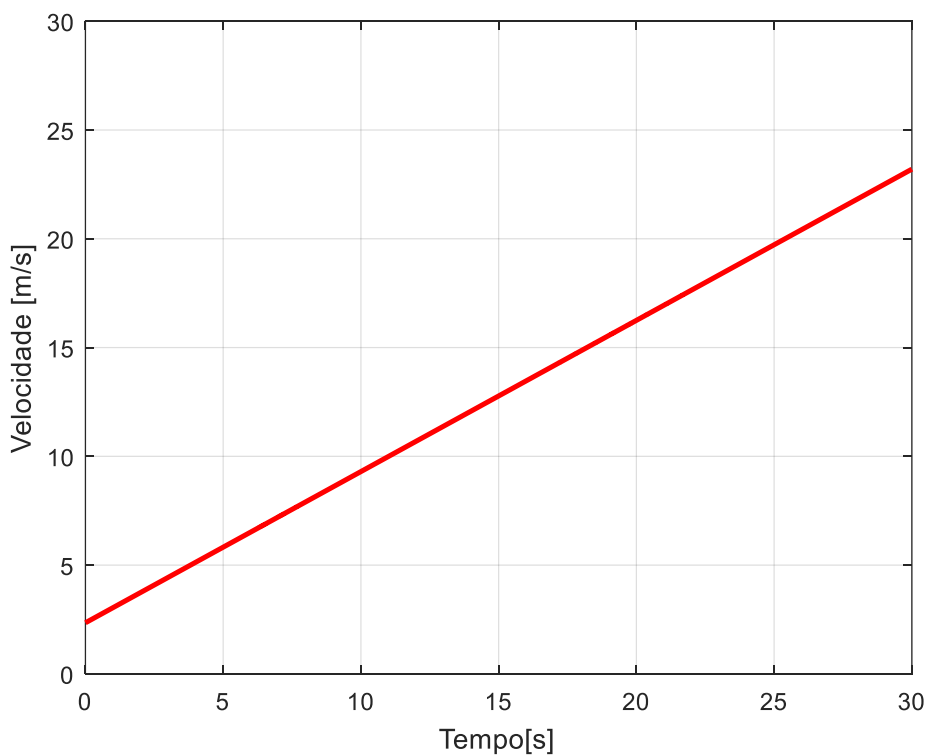
Tabela 9- Rotação do motor e vel. saída do vento

Tempo(s)	rpm	m / s
0	100	2,35
	200	5,2

	300	8 , 2
	400	11 , 2
	500	14,25
	600	17,25
	700	20 , 2
30	800	23 , 2

Fonte: Autor

Figura 27 - Variação temporal da velocidade do escoamento na saída do túnel de vento (medida pelo tubo de Pitot)



Fonte: Autor

Para analisar a produção energética e viabilizar a comparação entre os harvesters, 3 medidas foram realizadas. Os sinais provenientes do PZT foram medidos em um intervalo de 30 segundos, e nesse intervalo, a velocidade do vento foi variada conforme apresentado na

Figura (27). Para cada sinal, dois índices de produção energética foram utilizados: o valor RMS do sinal de tensão elétrica e um índice baseado na Norma H2, calculado utilizando-se a PSD.

O conceito de correlação de sinais e sua relação com as densidades espectrais de energia e de potência são bastante úteis nas análises em EH. Podendo-se verificar que as funções de correlação constituem adicionalmente uma análise dos sinais e sistemas. As correlações se baseiam nos conceitos de médias temporais e sinais de energia e de potência (Higuti e Kitano, 2003).

A energia/potência do sinal de saída depende do sinal de entrada e resposta em frequência do sistema. Como a operação de integração $\int_{-\infty}^{\infty} V(t)dt$, onde $V(t)$ é a variação da voltagem “V” no tempo “t”, apresenta as mesmas propriedades matemáticas da operação de média temporal, todas as propriedades da correlação de sinais de potência se mantêm, bastando substituir a potência pela energia. Portanto matematicamente, um sistema pode ser visto como uma interconexão de operações, ou uma transformação do sinal de entrada em um sinal ou saída (Higuti e Kitano, 2003).

A aplicação do teorema de Parseval permite discutir um sinal de energia a qual sendo uma quantidade finita, correspondendo a energia do sinal (18), isto permitirá a avaliação energia/frequência $|X(f)|^2$, onde a unidade é dada “energia/frequência”. A integral sobre todos pontos é usualmente chamada Espectro de Densidade de Energia (19), (Oppenheim e Willsky, 2010).

$$E_x = \int_{-\infty}^{\infty} |x(t)|^2 dt = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |X(j\omega)|^2 d\omega = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |X(f)|^2 df \quad (18)$$

$$G_x(f) \triangleq |X(f)|^2 \quad (19)$$

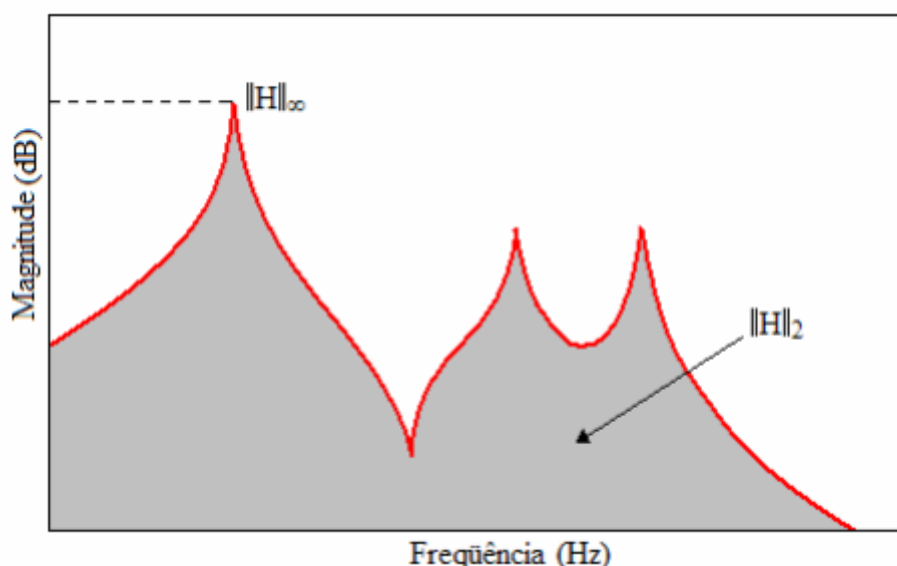
A Densidade Espectral de Potência (PSD), $S_x(f)$, representa a distribuição de potência em função da frequência. A potência do sinal, $P_x(f)$, é dada pela integral da PSD, conforme apresenta a equação (20).

$$P_x = \int_{-\infty}^{\infty} S_x(f) df = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{\frac{-T}{2}}^{\frac{T}{2}} x(t)x^*(t) dt \quad (20)$$

A análise de sistemas como o SISO (*single input single output*) tornou-se com o auxílio computacional uma peça primordial na avaliação de sistemas propostos de EH, devido a facilidade de implementação das análises no domínio do tempo e no domínio da frequência (PALMA, 2007), sendo a análise no domínio da frequência a mais propícia para sistemas de EH.

Normas de sistemas podem ser calculadas pela área da curva correspondente a FRF, denominada Norma H_2 ou podem corresponder ao maior pico desta FRF, denominada Norma H_∞ , conforme apresentado na Figura (28).

Figura 28 - Representação gráfica das Norma H_2 e H_∞



Fonte: PALMA (2007)

Dada uma Função de Transferência $G(\omega)$ de um sistema, Gawronski (1998) propõe a utilização da Norma H_2 do sistema definida pela equação (22).

$$\|G\|_2^2 = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \text{tr}(G^*(\omega)G(\omega)) d\omega \quad (22)$$

em que tr é o traço de $(G^*(\omega)G(\omega))$ da função transferência. Esta proposta de Gawronski em geral é aplicada a modelos modais. A proposta deste trabalho é utilizar um índice baseado na norma H_2 aplicada na curva de PSD (e não de FRF). Para um sistema SISO pode-se calcular a norma H_2 como a área abaixo da curva (na forma de integral). No Matlab®, a área abaixo da

curva é calculada utilizando-se o método trapezoidal, por meio da aplicação do comando “trapz” aplicado na curva da PSD.

Neste contexto, uma vez que 3 medidas foram tomadas para cada *harvester*, 3 valores RMS e de Norma H2 foram obtidos. No final, um valor RMS médio e uma média dos índices baseados na Norma H2 foram obtidos para comparação da produção energética de cada *harvester*.

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS E DISCUSSÃO

Neste capítulo será analisado os resultados dos testes de impacto (*Bump test*) e os resultados do teste do túnel de vento segundo os métodos propostos no Capítulo 3.

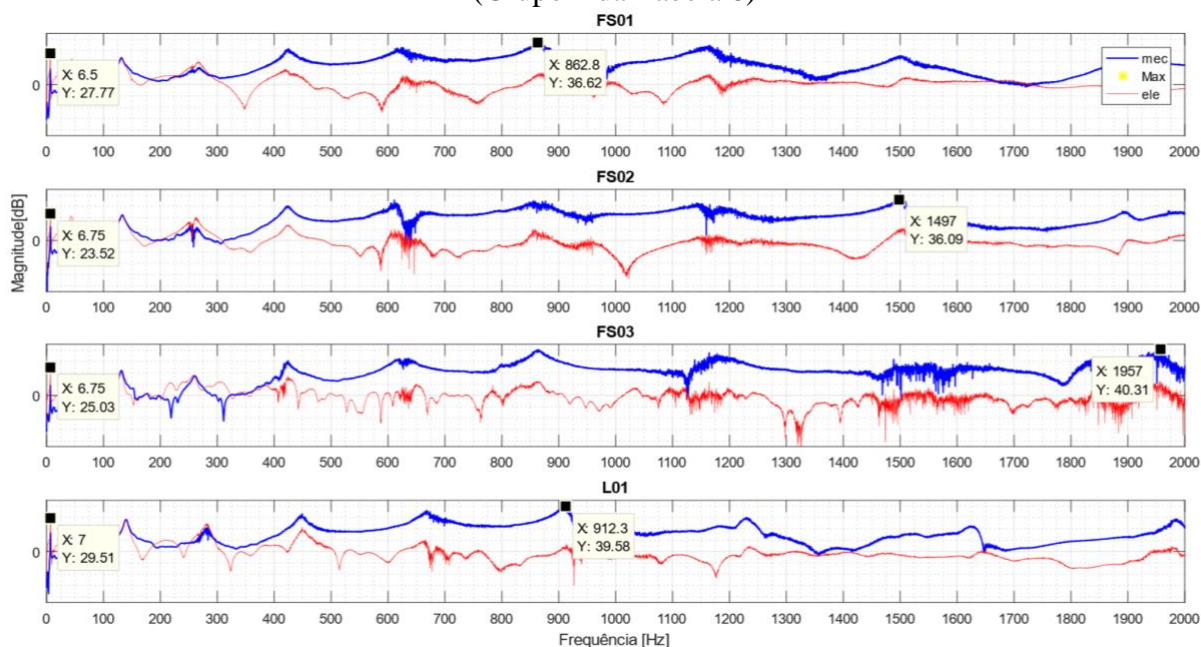
4.1 Teste de impacto (*Bump test*)

Este teste foi realizado nas dezessete vigas, com intuito de se verificar a validade da utilização das pastilhas de PZT na medição dos sinais da vibração induzida. Sendo estas pastilhas acopladas rigidamente a estrutura, as FRFs foram geradas e analisadas, em relação as alterações nas estruturas das vigas através das usinagens.

As FRFs foram analisadas seguindo a organização dos grupos de análise apresentados na Tabela (8).

A Figura (29) apresenta as FRFs das vigas do Grupo 1 de análise (FS01, FS02, FS03 e L01).

Figura 29 - FRFs mecânicas (mec) e elétricas (ele) das vigas FS01, FS02, FS03 e L01 (Grupo 1 da Tabela 8)



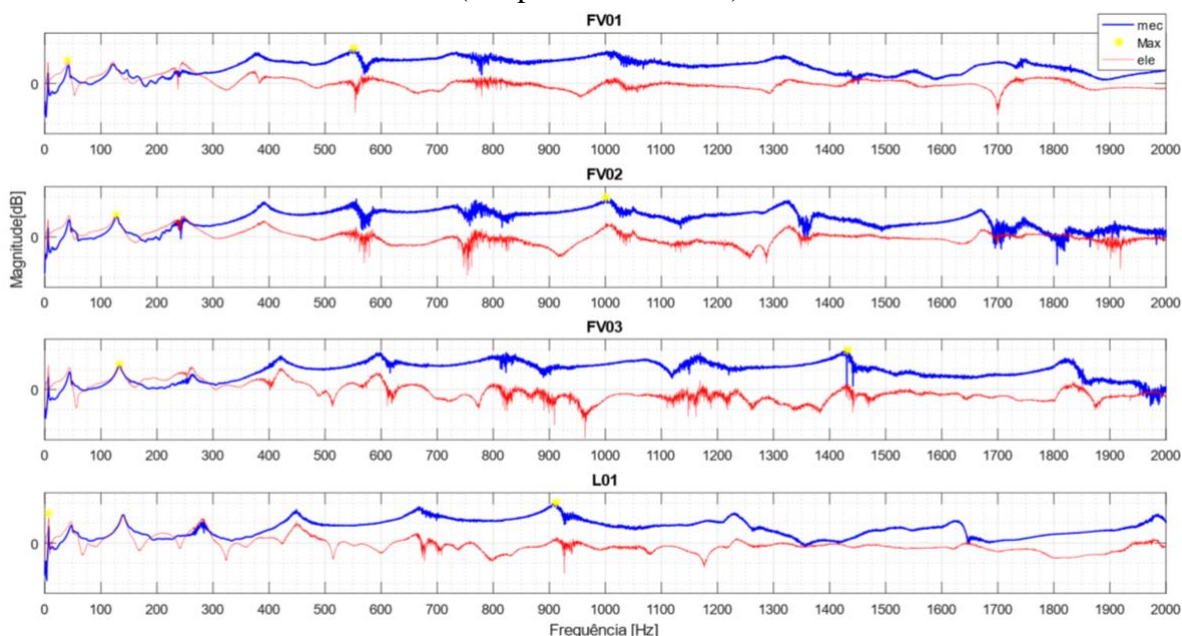
Fonte: Autor

Nesta Figura, pode-se observar a influência da fixação do acelerômetro na extremidade oposta a extremidade engastada da viga e em relação a pastilha de PZT. Esta ação alterou não somente a relação das frequências naturais em todas as vigas devido a extra massa do

acelerômetro, mas também as amplitudes das FRFs mecânicas das vigas, representadas pelas linhas azuis dos gráficos. Isto se repetirá em todos os gráficos das FRFs referentes aos testes de impactos.

Das cinco maiores amplitudes das FRFs dos sinais elétricos, dois são membros deste grupo. Sendo a FS01, na 3° posição de todas as vigas, com 27,77 V de magnitude, e a FS03 ocupando a 5°, com 25,03 V de magnitude. Já nos sinais mecânicos somente a viga FS03 continuou entre as cinco melhores, com uma magnitude de 40,31V, na segunda posição. A viga FS01 caiu para 13° posição com uma magnitude de 36,62 V. A viga L01, obteve a maior amplitude de sinal elétrico, ocupando assim o primeiro lugar de todas as vigas com 29,51V de magnitude. Mas no sinal mecânico o seu sinal caiu e como a FS01, que caiu dez posições em seu sinal mecânico, a L01 caiu para 6° posição com um sinal de 39,58 V de magnitude. A única viga do grupo ainda não citada é a FS02, que obteve com sinal elétrico de 23,52 V de magnitude a 11° posição e com um sinal mecânico de 36,09 V a 15° posição. Estes sinais obtidos pela viga FS02 demonstra que a sua rigidez foi muito alterada.

Figura 30 - FRFs mecânicas (mec) e elétricas (ele) das vigas FV01, FV02, FV03 e L01 (Grupo 4 da Tabela 8)

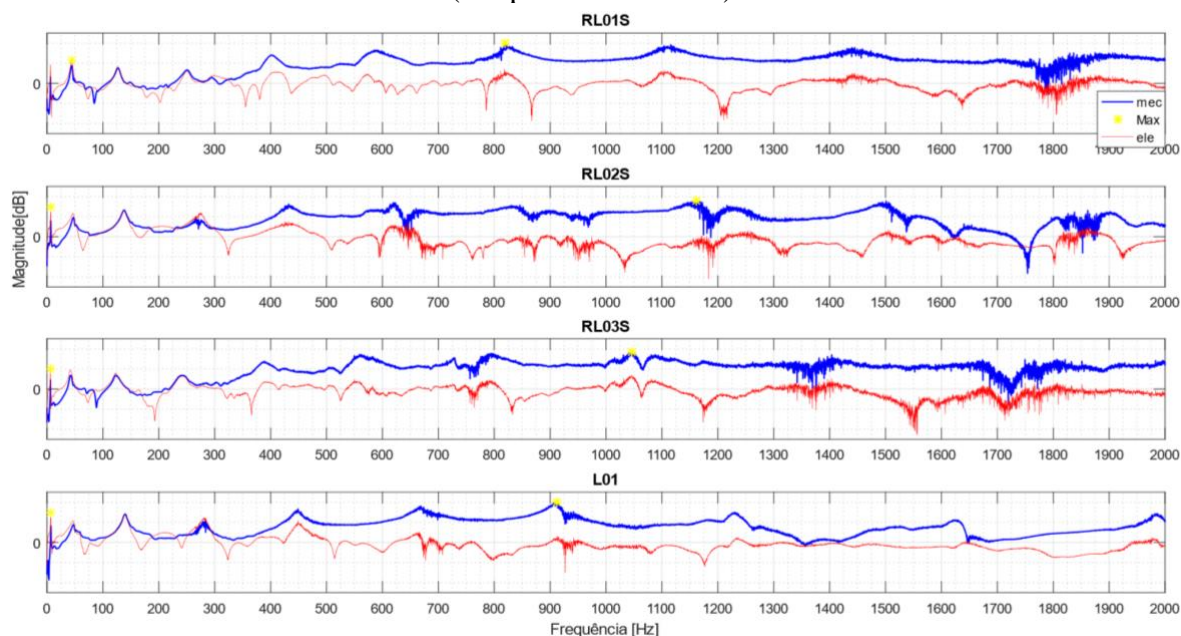


Fonte: Autor

A Figura (30) das FRFs das vigas FV01, FV02, FV03 e L01 mostra que ao contrário das suas de suas vigas irmãs sólidas, estas vigas de furos vazados apresentaram tanto nos sinais elétricos quanto mecânicos baixas amplitudes de sinais. O interessante neste grupo foi que os

sinais elétricos quanto mecânicos em termos de posições de amplitude de voltagem (V) apresentaram posições próximas, como por exemplo a FV03 ocupou a 6° posição na amplitude de sinal elétrico e a 7° no sinal mecânico. A viga FV01 a 13° e 10° e a viga FV02 a 15° e 11° nos sinais elétricos e mecânicos. Este comportamento pode ser um indicativo de alteração significativa da rigidez.

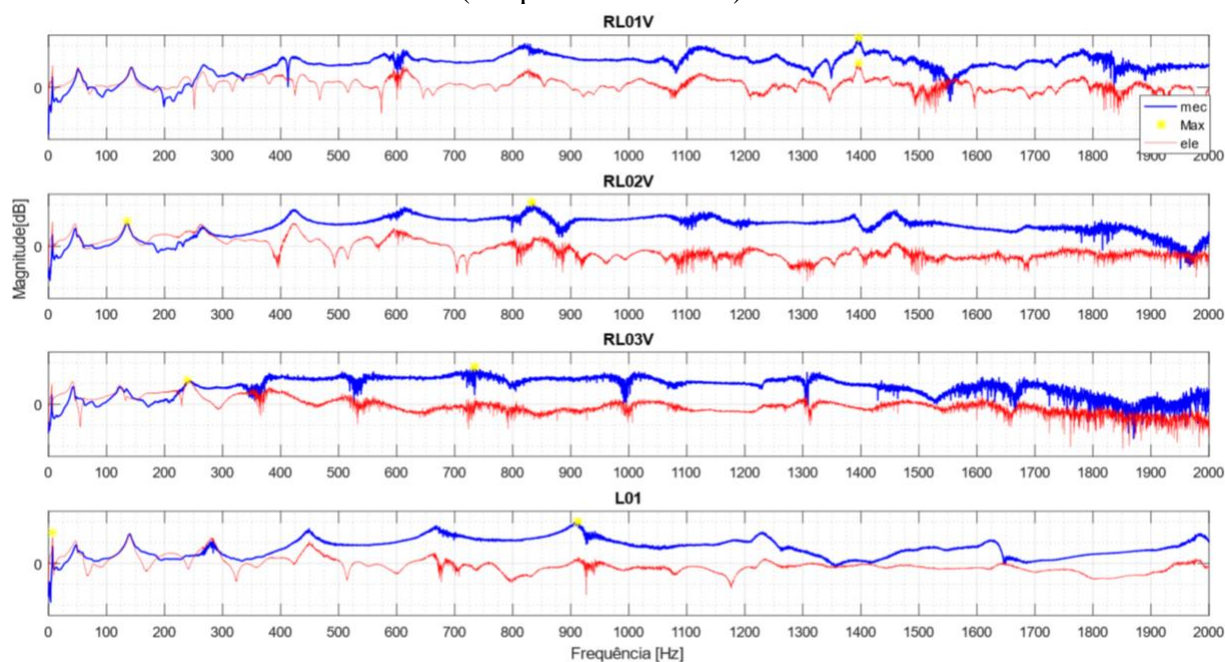
Figura 31 - FRFs mecânicas (mec) e elétricas (ele) das vigas RLS01, RLS02, RLS03 e L01 (Grupo 2 da Tabela 8)



Fonte: Autor

Neste grupo de vigas RLS01, RLS02 e RLS03 somente a viga RLS02 teve uma performance em termos de amplitude elétrica relativamente alta, colocando-se entre as 5 melhores vigas, na 2° posição, com uma amplitude de 29,05 V de magnitude. Mas também como as vigas L01 e FS01, quando se analisa a sua performam-se em termos de amplitude mecânica, verifica-se o resultado mais baixo em termos de magnitude de sinal com 35,59 V. As vigas RLS01 e RLS03 apresentaram resultados de amplitudes elétricas baixos, comparando-as com as outras. Estas vigas ficaram na 14° e 16° posições. Mas a RLS01 nos sinais mecânicos ocupa a 4° posição. A viga RLS03 sobe de penúltima posição dos sinais elétricos para 9° posição nos sinais mecânicos, na comparação direta com as outras 17 vigas.

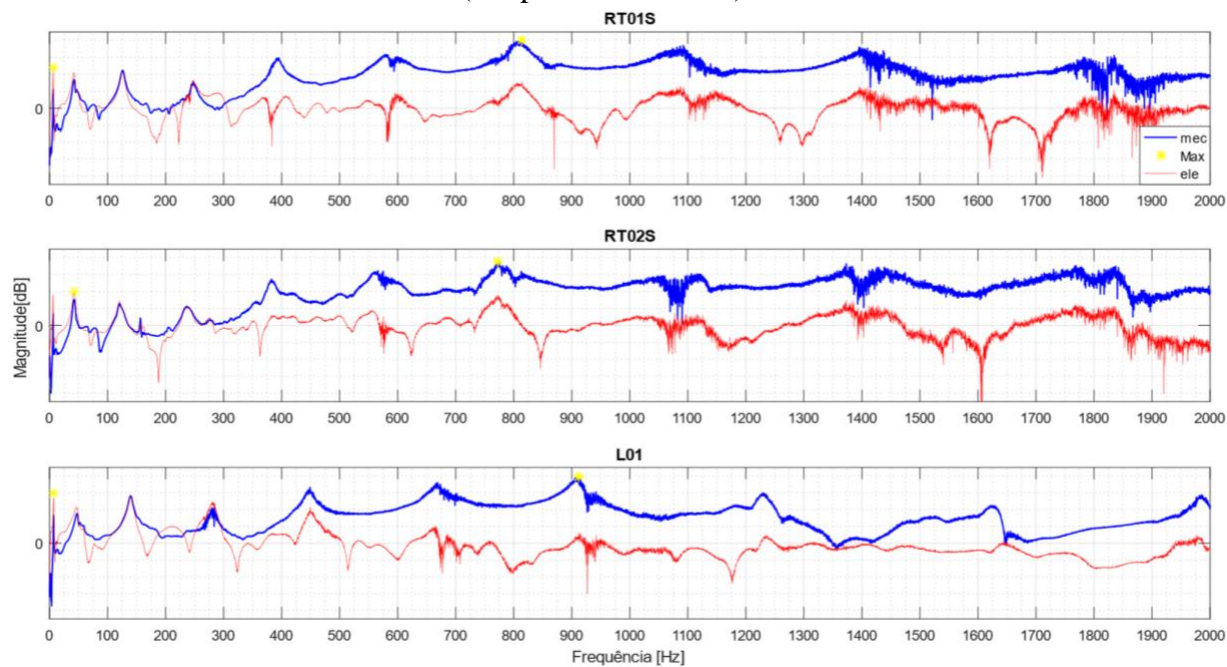
Figura 32 - FRFs mecânicas (mec) e elétricas (ele) das vigas RLV01, RLV 02, RLV 03 e L01 (Grupo 5 da Tabela 8)



Fonte: Autor

As vigas do grupo RLV01, RLV02, RLV03 em termos gerais em amplitudes máximas de sua FRFs elétricas, apresentam resultados medianos ocupando as seguintes posições RLV01 12° com uma magnitude de sinal da sua FRF elétrica de 22,87V, RLV02 7° posição, com 24,32 V e RLV03 a 10° com 23,57 V. Nos sinais mecânicos a viga RLV01 pula para a primeira posição com um sinal de 41,59 V. A viga RLV02 caiu da 7° posição nos sinais elétricos, para 16° nos sinais mecânicos. Sinalizando uma alteração em suas rigidezes. A viga RLV03 obteve sinais medianos também nos sinais mecânicos, ocupando a 10° posição entre todas vigas, com uma amplitude de 39,58 V.

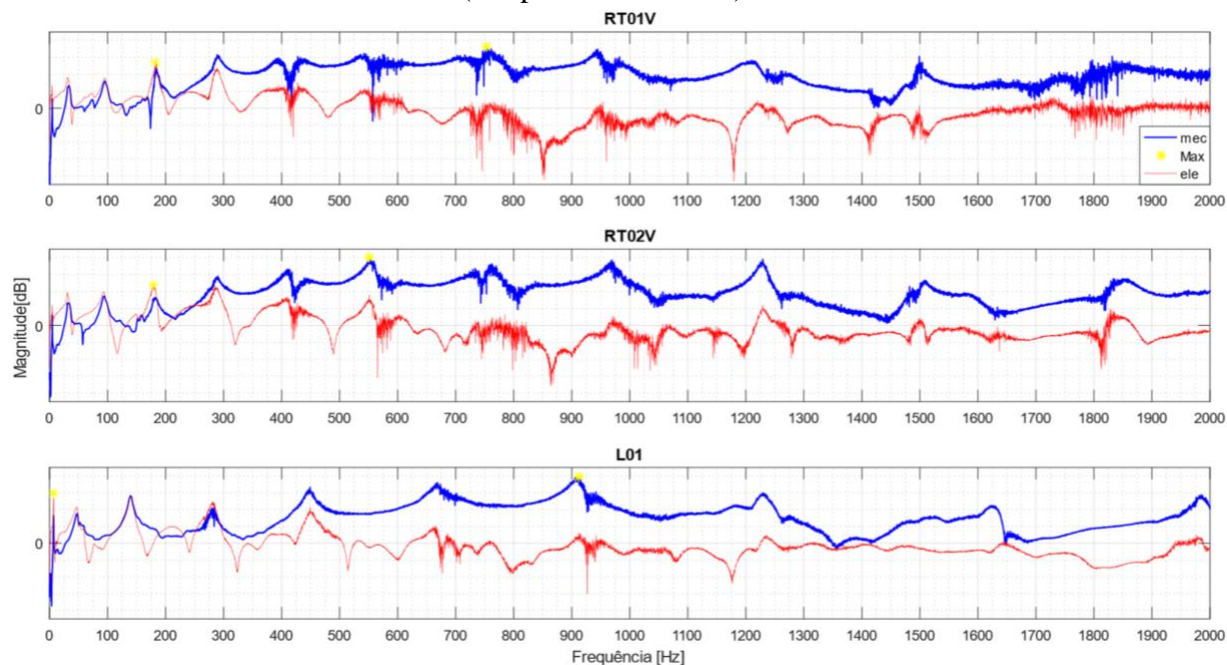
Figura 33 - FRFs mecânicas (mec) e elétricas (ele) das RTS01 e RTS02 e L01
(Grupo 3 da Tabela 8)



Fonte: Autor

A viga RTS01 obteve a 8^o posição entre todas as vigas em termos de amplitude de sinais elétricos com 24,26 V e a viga RTS02 V a última posição com 19,75 V. Nos sinais mecânicos a viga RTS01 ocupa a 5^o posição com 40,02V e a viga RTS02 obteve a 12^o posição, com 37,69V.

Figura 34 - FRFs mecânicas (mec) e elétricas (ele) das RTV01 e RTV02 e L01
(Grupo 6 da Tabela 8)

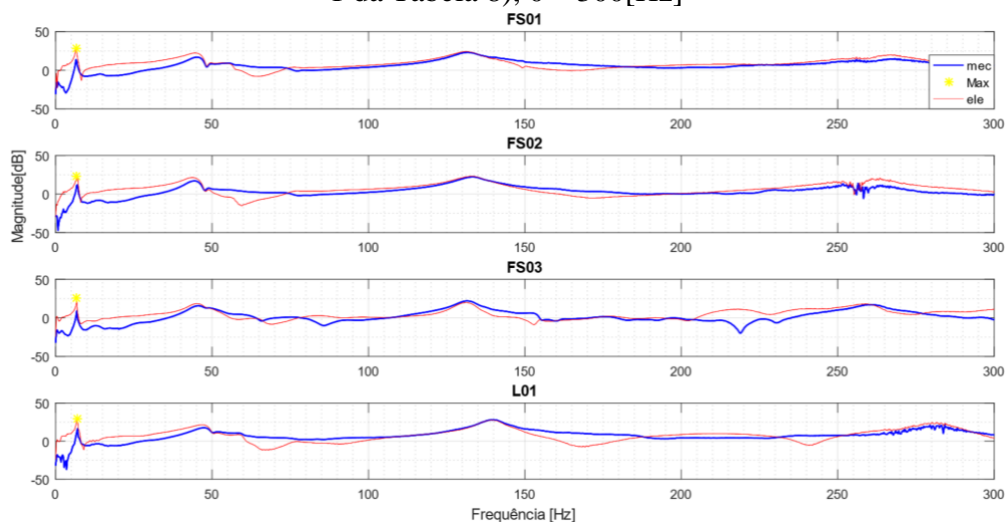


Fonte: Autor

As vigas RTV01 e RTV02 ocuparam nos sinais elétricos respectivamente a 4^o e a 9^o posição com os respectivos sinais 27,44 V e 24,13V. E nos sinais mecânicos a 14^o e a 3^o posição, com os respectivos sinais 36,39 V e 40,23 V. Estas discrepâncias nos sinais serão melhor discutidos no próximo item deste trabalho em relação as coerências dos sinais obtidos.

Os picos das FRFs mecânicas e elétricas tende a se coincidirem na faixa de 0 a 300 Hz para todas vigas. A Figura (35) das vigas FS01, FS02, FS03 e L01 foram geradas como exemplo.

Figura 35 - FRFs mecânicas (mec) e elétricas (ele) das vigas FS01, FS02, FS03 e L01 (Grupo 1 da Tabela 8), 0 – 300[Hz]



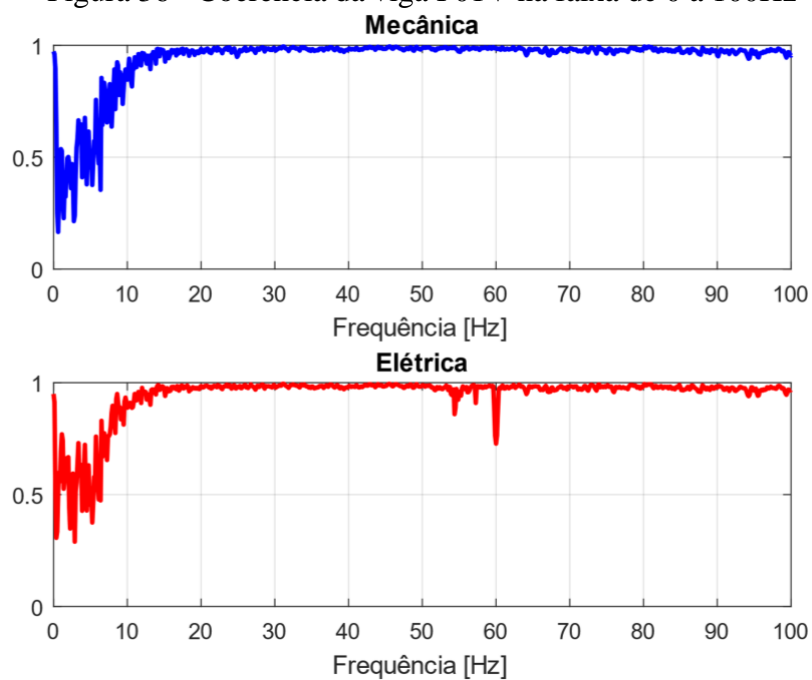
Fonte: Autor

Os resultados obtidos apesar da influência da posição de acoplamento do acelerômetro, validaram as pastilhas de PZT como um transdutor de sinal confiável. E forneceram importantes indicações em relação a alteração estrutural das vigas.

4.1.1 Análise da coerência dos sinais do teste de impacto

A análise da coerência dos resultados, indicaram se as ranhuras e rasgos aplicados às vigas, alteraram fundamentalmente a estrutura destas, afim de provocarem resultados imprevisíveis ou inesperados no teste de túnel de vento, como também validaram a utilização das pastilhas de PZT. A análise dos sinais de frequência fora das faixas das frequências de ressonância, já a partir de 20 Hz até 3000 Hz, tendem para todas as vigas, a coerência 1. Isto tanto para os sinais elétricos das pastilhas de PZT, quanto para os sinais mecânicos. Como mostra o exemplo, Figura (36) da viga F01V.

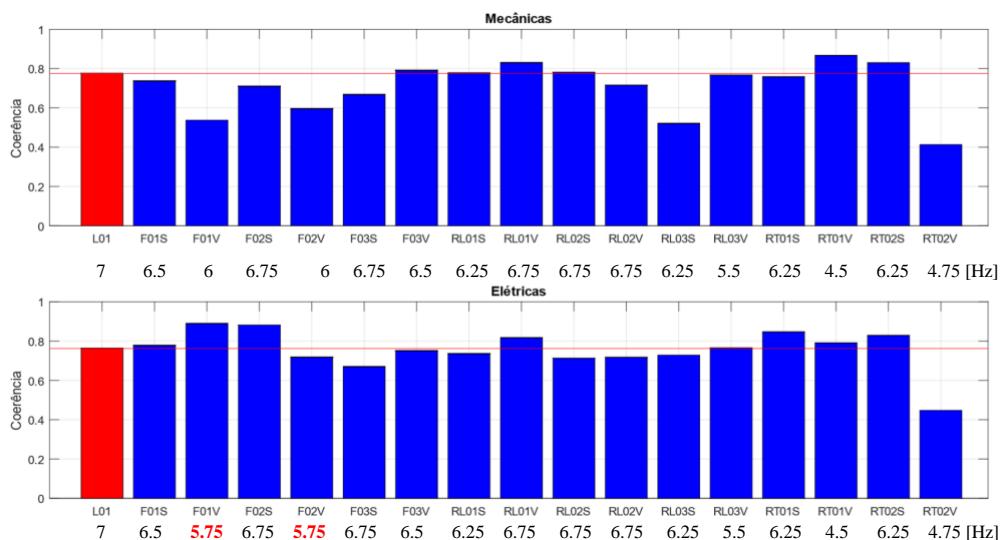
Figura 36 - Coerência da viga F01V na faixa de 0 a 100Hz



Fonte: Autor

Como diversos autores aqui citados definem a EH como uma fonte de energia de baixa frequência, a correlação foi analisada para a faixa de 0 – 10 Hz, diretamente relacionadas as faixas ao primeiro modo de vibrar das vigas. As frequências fundamentais de cada viga são indicadas diretamente abaixo dos respectivos nomes das vigas na Figura (37), onde as coerências foram analisadas para os ensaios mecânicos e elétricos.

Figura 37- Coerências máximas relativas as frequências fundamentais de cada viga



Fonte: Autor

Figura 38- Coerência nos ensaios do *Bump test* para a frequência fundamental de cada viga

Vigas	Elétrica	Mecânica	% =>	(dif. Estatística)
L01	0,7626	0,7749	1,5873	< 5%
F01S	0,7783	0,7372	5,5751	< 6%
F01V	0,8903	0,5373	65,699	> 10%
F02S	0,8821	0,7103	24,187	> 10%
F02V	0,7192	0,5966	20,55	> 10%
F03S	0,6706	0,6681	0,3742	< 5%
F03V	0,7507	0,7907	5,0588	< 6%
RL01S	0,7366	0,7779	5,3092	< 6%
RL01V	0,8167	0,8303	1,638	< 5%
RL02S	0,7137	0,7809	8,6055	< 10%
RL02V	0,7172	0,7149	0,3217	< 5%
RL03S	0,7288	0,5208	39,939	> 10%
RL03V	0,7652	0,7661	0,1175	< 5%
RT01S	0,8467	0,7578	11,731	> 10%
RT01V	0,7912	0,8671	8,7533	< 10%
RT02S	0,8293	0,8296	0,0362	< 5%
RT02V	0,4478	0,4129	8,4524	< 10%

Fonte: Autor

Estes resultados mostram divergências grandes entre coerências dos ensaios mecânicos e elétricos para as vigas F01V, F02V e RL03S, provavelmente devido a influência do posicionamento do acelerômetro na extremidade das vigas e alteração significativa da rigidez destas. A viga RT02V apresenta em ambos os ensaios, mecânico e elétrico, uma baixa coerência. Indicando assim que a textura empregada à esta viga, venha apresentar resultados de baixa confiabilidade e imprevisíveis. As vigas L01, F01S, F03S, F03V, RL01S, RL01V, RL02V, RL03V, RT02S apresentaram no geral uma coerência acima de 70% e um desvio entre os testes mecânicos e elétricos menores do que 6% Figuras (37) e (38), indicando uma boa confiabilidade nos resultados a serem obtidos por estas vigas no teste de túnel de vento.

As F01V, F02S, F02V, RL03S, RT01S, RT01V apresentaram na maioria dos casos uma alta coerência, mas uma distorção entre os testes mecânicos e elétricos acima de 10%. Já se é possível verificar, como indicado na Figura (37), que as vigas F01V e F02V apresentam uma discordância na frequência natural, entre os ensaios mecânicos e elétricos, isto presumidamente devido a modificação estrutural em conjunto com posição de fixação do acelerômetro. Com uma grande alteração da rigidez, devido a remoção de massa e o efeito da adição da massa do acelerômetro, Rao (2009) em seu livro didático explica que uma massa “m” sendo deslocada a uma distância $x(t)$ quando uma força $F(t)$ for aplicada sobre ela na mesma direção, segunda lei

de Newton, resulta em $\vec{F}(t) = \frac{d}{dt} (m \frac{d\vec{x}(t)}{dt})$. Sendo a massa m constante $Massa(\text{total}) = \text{massa X}$ a aceleração (*Bump test*). Como neste ensaio o acelerômetro foi alocado na extremidade das vigas, este é mais um fator que alterou a posição das frequências naturais nas vigas e em particular nas vigas F01V e F02V.

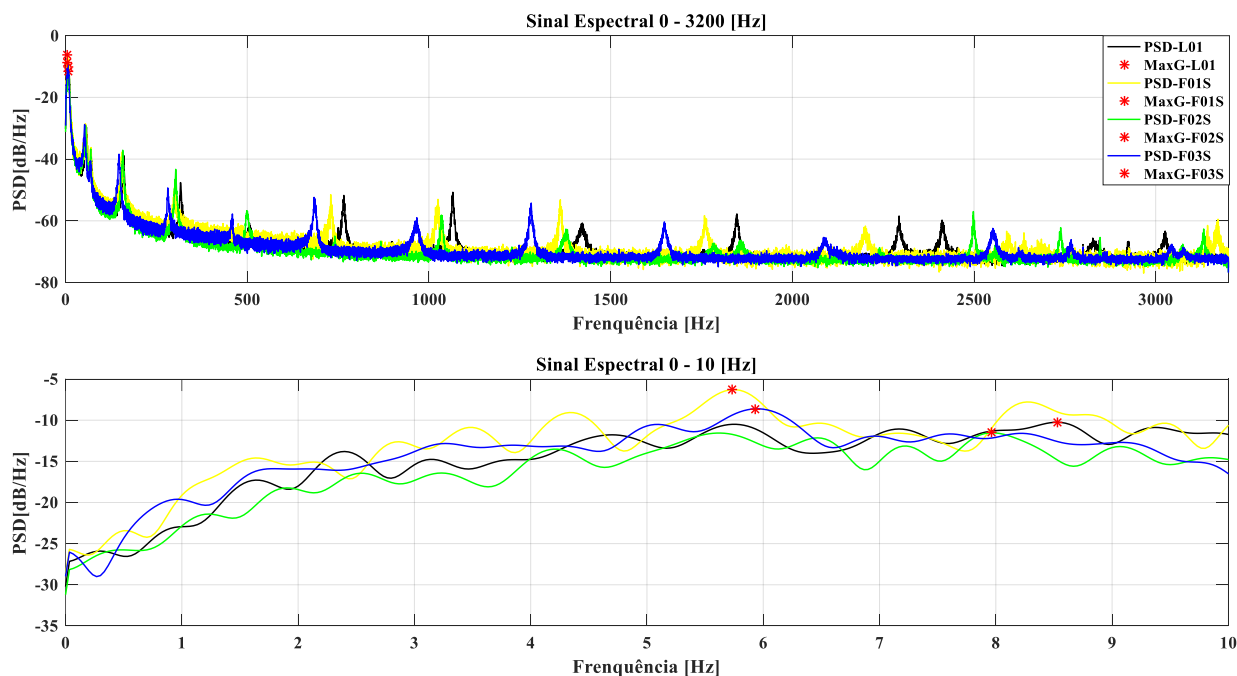
4.2 Ensaio em Túnel de Vento

Os resultados do ensaio de vento foram avaliados em relação suas produções energéticas através dos resultados de suas PSD, RMS e norma H₂.

4.2.1 Análise das PSD's Relativas aos Testes de Vento

As vigas foram separadas em grupos como descrito na Tabela (8), levando sempre a viga padrão L01 lisa (sem usinagem) como referência, para a análise dos resultados obtidos. Estes grupos são um total de 6 analisados.

Figura 39- PSDs relativas aos sinais das Vigas FS01, FS02, FS03 e L01 (Grupo 1 da Tabela 8)



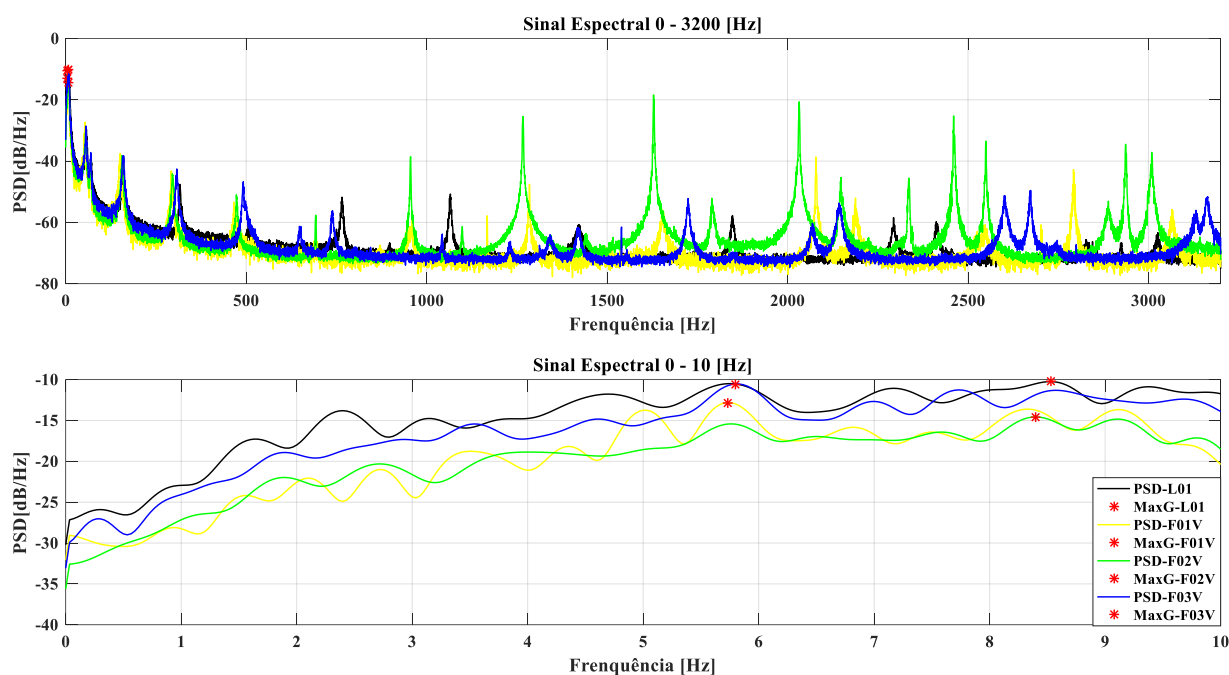
Fonte: Autor

O grupo 1 da Tabela (8) de vigas FS01, FS02, FS03 e L01 apresenta um padrão vibratório similar em modos de vibrar entre todas as vigas na zona denominada de baixa frequência até 300 Hz. A partir dos 500 Hz as vigas começam a apresentar um distanciamento entre modos de vibrar relativos a estas faixas de frequência. A partir de aproximadamente 750 Hz, os modos de vibrar de cada viga, apresentam um distanciamento visível entre si, apesar de ainda próximos umas das outras. A Figura (39) na parte da frequência de 0 à 10 Hz FS01 tem uma amplitude maior do que as amplitudes das outras vigas deste mesmo grupo. Como para este grupo as maiores amplitudes se dão nesta faixa de frequência estas vigas podem apresentar um ganho energético maior do que a viga de referência L01. As amplitudes de energia com maiores picos tendem a diminuir com o aumento das frequências, com a FS01 apresentando picos maiores que as outras em todo o espectro da frequência.

O grupo 4 da Tabela (8) de vigas FV01, FV02, FV03 e L01 possui diferentemente do grupo 1 da Tabela (8), uma das vigas, a FV02, se destoando em relação a amplitude de sua PSD, apresentando altas amplitude em todo o espectro da frequência. Diferentemente de suas similares do grupo 1, que apresentam suas máximas amplitudes próximas as frequências

naturais e com tendência de queda com o aumento da frequência. Este padrão não ocorre para a viga FV02. Possivelmente devido a alteração da rigidez desta viga, com uma maior remoção de massa, alterando por consequência a sua frequência natural - Figura (40).

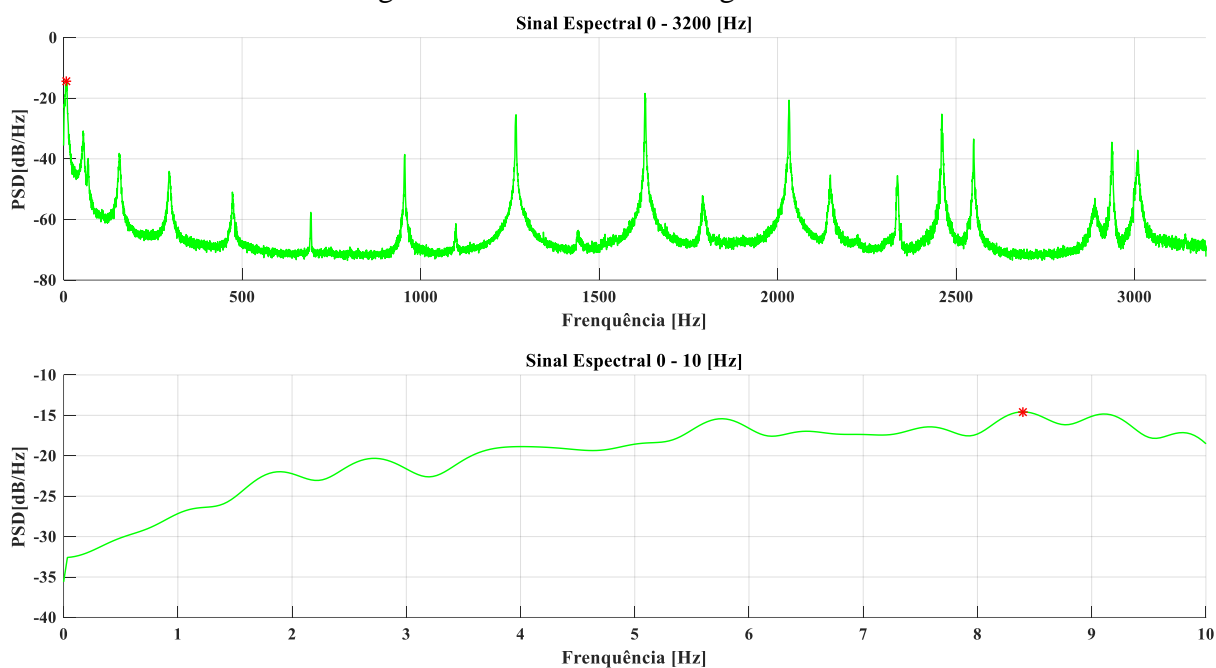
Figura 40 - PSDs relativas aos sinais das Vigas FV01, FV02 FV03 e L01 (Grupo 4 da Tabela 8)



Fonte: Autor

A Figura (40) induz a suspeita, de que pelo menos a viga F02V possa gerar Energia em todo o espectro da frequência e não somente restrito as faixas de baixas frequência. Devido a este fator a Figura 41 foi plotada com somente a viga F02V. Esta viga F02V se destacou das demais desde o *Bump test*. Induzindo a especulação se esta textura possa ser uma textura positiva para a geração energética em todo espectro da frequência. Pois apresenta picos elevados de amplitude de sua PSD em todo o espectro da frequência. Com altas amplitudes próximas as frequências naturais tendendo a diminuir como as outras vigas deste grupo, mas aumentando próximo a 1000 Hz mantendo estas altas amplitudes em todo espectro da frequência.

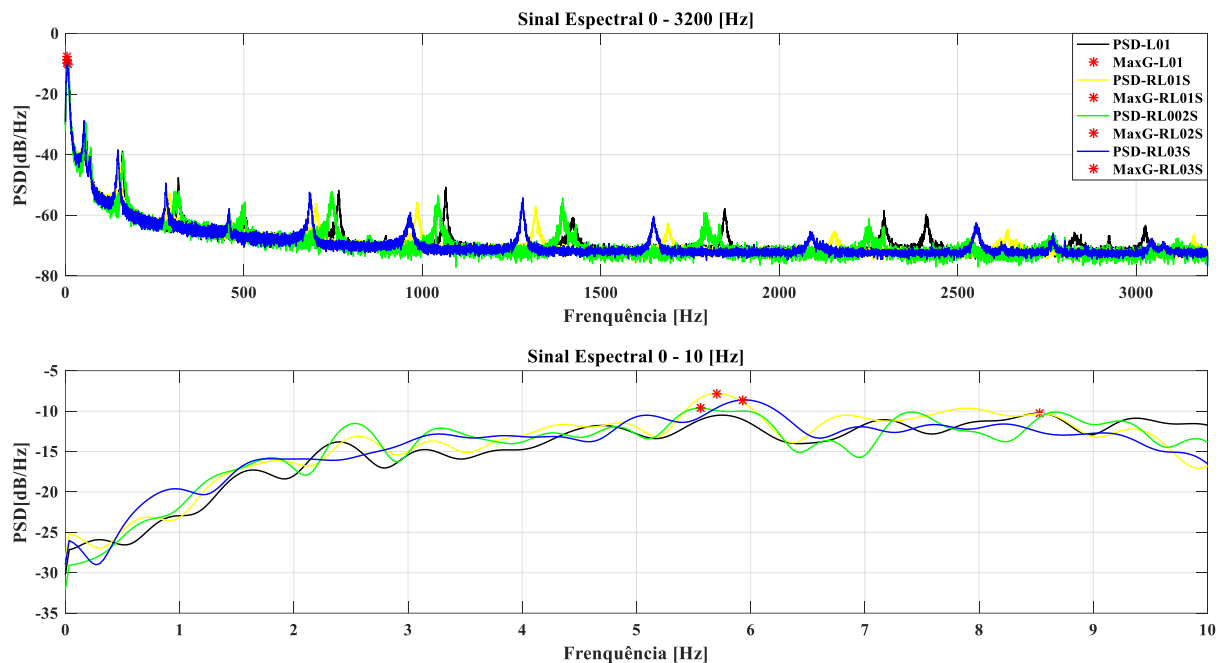
Figura 41 - PSD relativa a viga F02V



Fonte: Autor

A Figura (42) respectiva ao grupo 2 da Tabela (8), apresenta uma certa similaridade visual ao grupo 1 da mesma Tabela. Mas este grupo 2 os modos modais tendem a se divergir a partir aproximadamente de 250Hz. A diminuição rápida das amplitudes das PSDs é visível. Mostrando que a maior parte da energia gerada para este grupo se dá abaixo dos 50Hz. A viga RLS01 é a viga com maior amplitude do grupo. Apresentando uma amplitude mais alta até mesmo que a viga de referência L01.

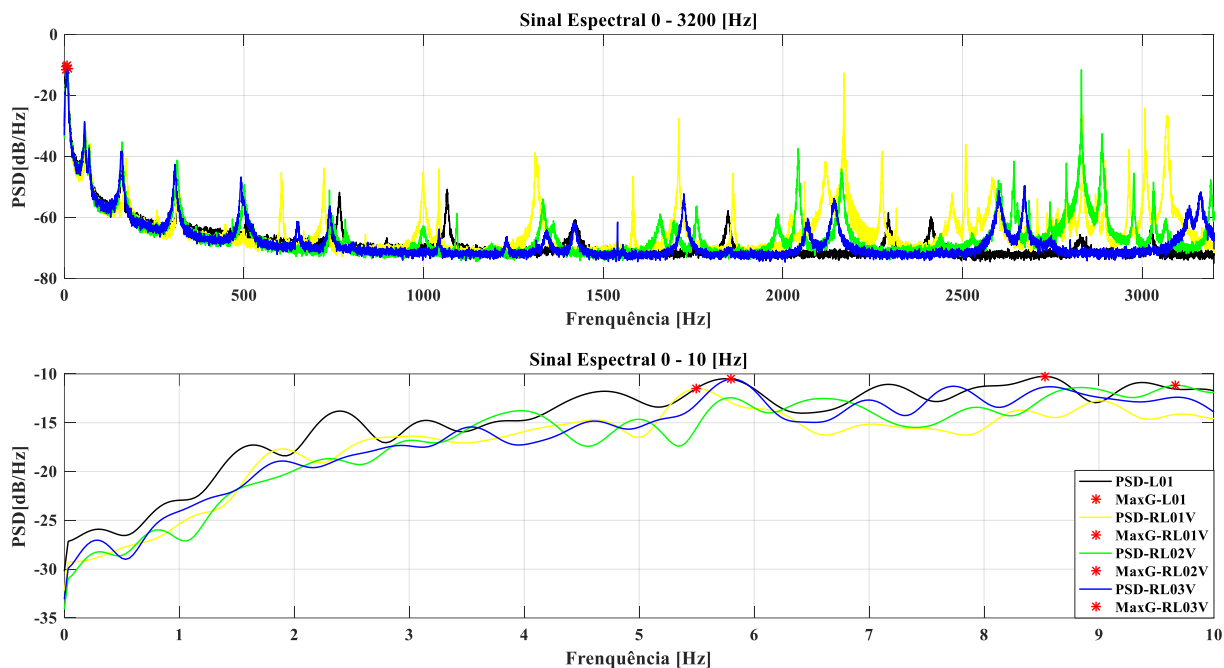
Figura 42 - PSDs relativas aos sinais das Vigas RLS01, RLS02, RLS03 e L01
(Grupo 2 da Tabela 8)



Fonte: Autor

O grupo 5 da Tabela (8) também apresentou uma uniformidade modal até aproximadamente 500 Hz. Mas com as vigas RL01V e RL02V apresentaram amplitudes altas fora da faixa de baixas frequências naturais e portanto, em todo o espectro da frequência. Sendo estes picos de amplitudes, indo acima de 2000Hz para RL01V e 2800Hz para RL02V - Figura (43).

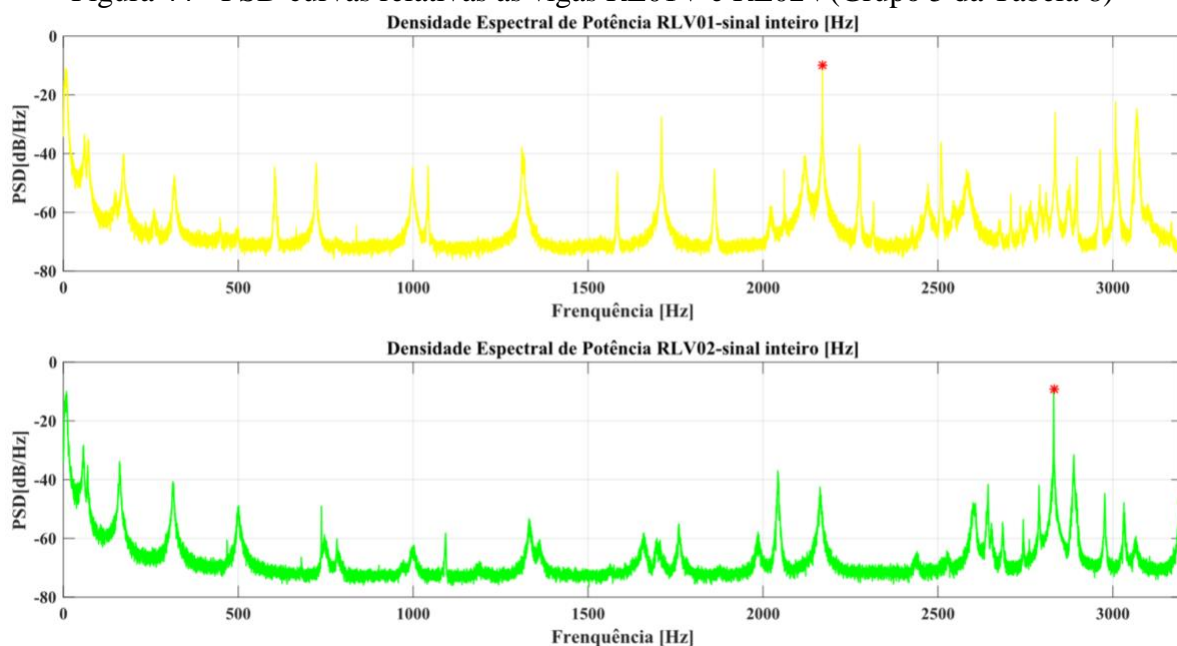
Figura 43 - PSDs relativas aos sinais das Vigas RLV01, RLV02, RLV03 e L01
(Grupo 5 da Tabela 8)



Fonte: Autor

A fim de análise dos gráficos relativos as vigas RL01V e RL02V são mostrados individualmente na Figura (44). Estas duas vigas foram, de todas as dezessete vigas, as únicas que apresentaram uma amplitude máxima fora da faixa de suas frequências naturais. As duas vigas como a F02V dão a impressão de produzirem energia em todo o espectro da frequência.

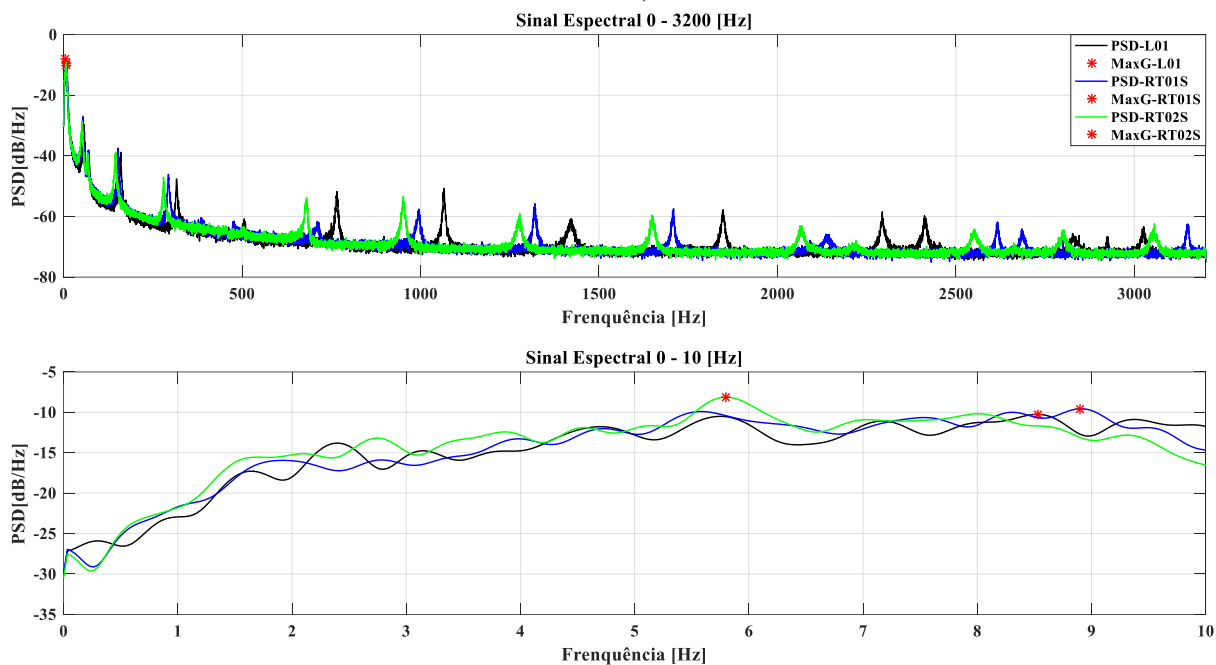
Figura 44 - PSD curvas relativas as vigas RL01V e RL02V(Grupo 5 da Tabela 8)



Fonte: Autor

O grupo 3 da Tabela (8) é o que compõe as vigas RTS01 e RTS02. Este como o grupo 2 da Tabela (8), apresentam a baixas frequências um distanciamento modal próximos, quase que uniforme. A partir aproximadamente de 250Hz, os modos de frequência começam a se distanciar, como mostra a Figura (45). O declínio na amplitude das PSD neste grupo é muito mais ostensivo se comparados aos primeiros grupos de vigas apresentados até agora.

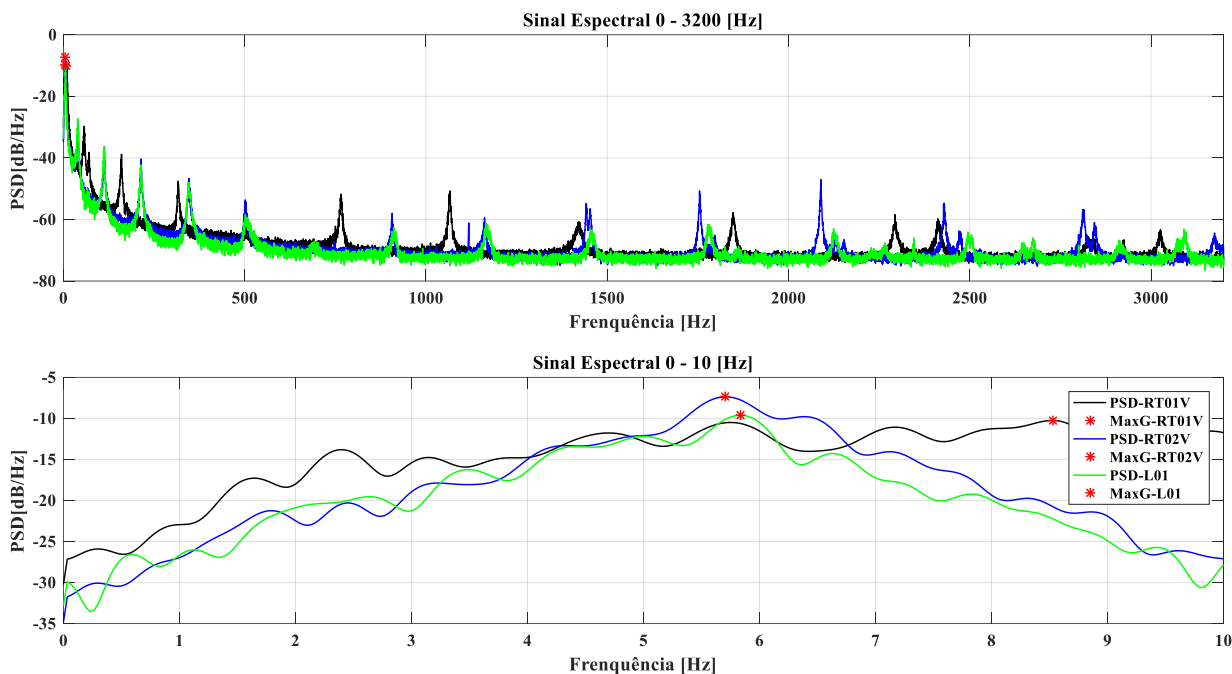
Figura 45 - PSDs relativas aos sinais das Vigas RTS01, RTS02, RTS03 e L01 (Grupo 3 da Tabela 8)



Fonte: Autor

O grupo 6) é o último da Tabela (8) que representa as vigas RTV01 e RTV02, A Figura (46) referentes a este grupo mostra uma desuniformidade modal que se apresenta desde as faixas de baixas frequências, nas proximidades dos 20 Hz e se prolongando até as altas. As amplitudes das PSDs parecem não serem significativas fora da faixa das frequências naturais.

Figura 46- PSDs relativas aos sinais das Vigas RTV01, RTV02, RTV03 e L01 (Grupo 6 da Tabela 8)



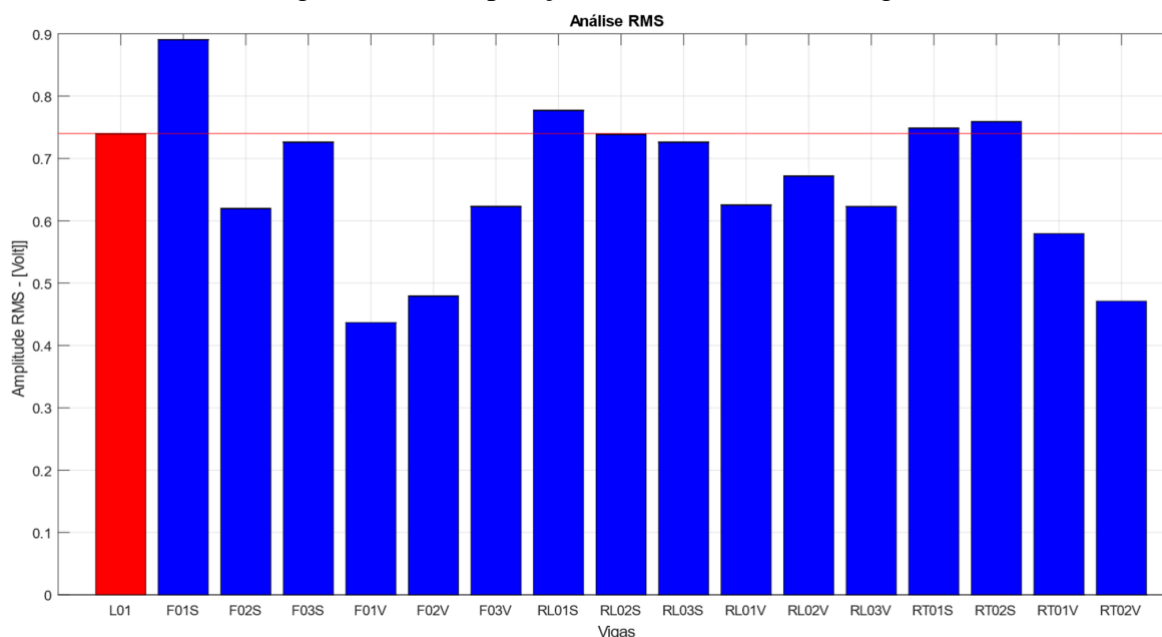
Fonte: Autor

A análise das PSD das vigas mostrou que a maioria das vigas apresentam um ganho de maior energia piezoelétrica próximos a seus modos fundamentais de vibrar. Algumas vigas, especificando: F02V, RL01V e RL02V fugiram do padrão afirmado, mas devido as suas estruturas, ou seja, suas rigidezes terem sido grandemente alteradas. Portanto apresentam picos altos em todos seus espectros de frequência.

4.2.2 Análise do Valor RMS dos Sinais Medidos pelos PZTs

Análises de eficiência energética, tem de se avaliar a *Root Mean Square* – RMS que é definido como valor eficaz. Sendo um sinal contínuo este é um método importante para comparação de sistemas envolvidos Figura 47.

Figura 47 – Comparação dos sinais RMS das vigas



Fonte: Autor

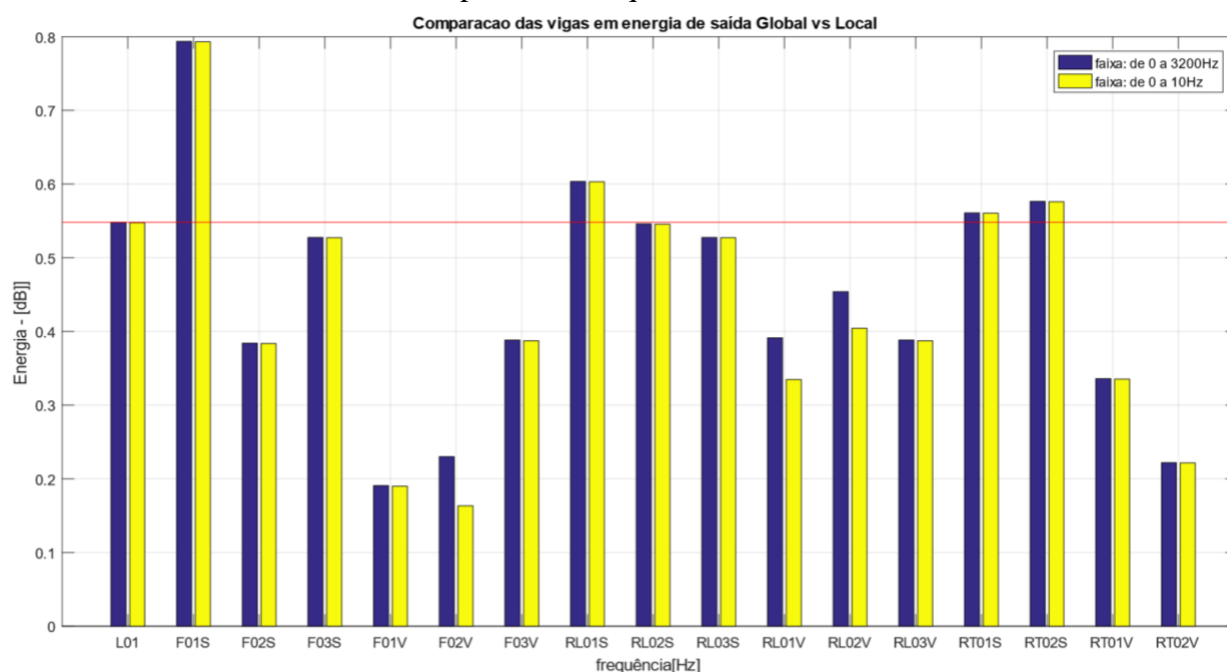
A análise da RMS é um forte indicativo da produção energética das vigas, já que o sinal é dado em volt das pastilhas de PZT. Como as PSD's já haviam indicado, todas as vigas com usinagem vazadas, tiveram sua rigidez seriamente alterada, tendo uma ação negativa, no tocante geração de energia EH. As vigas sólidas, com usinagem superficial e portanto, sendo realmente somente uma modificação da textura das vigas, apresentaram resultados próximos aos resultados da viga L01 (não usinada), com a exceção somente das vigas F01S, F02S e RLS01, a primeira com uma RMS 20,4% maior do que a viga de referência L01 e a segunda -16,22% RMS menor do que a viga de referência L01 e a RLS01 com 5,4% de sinal da RMS maior do que a viga L01. As vigas F03S, RL03S apresentaram resultados 1,35% abaixo do RMS da viga referência L01. A viga RL02S, apresentou uma um RMS igual ao da viga L01 e as RT01S e RT02S apresentaram resultados respectivamente 1,35% e 2,70% levemente superior ao da viga L01. A viga F01S com 20,4% e RL01S e 5,4% foram as vigas que obtiveram resultados de RMS superiores ao da viga L01. Sendo a viga F02S a única viga das denominadas sólidas que obteve resultado de RMS muito abaixo da viga de referência, 16,22%. A análise de RMS mostrou-se contraria a PSD das vigas F02V, RL01V e RL02V que apresentaram amplitudes relativamente altas em todo o espectro de suas frequências, mas apresentaram sinais baixos ou negativos de RMS em relação a viga referência L01. Indicando que a rigidezes destas vigas,

foram alteradas, não contribuindo, assim, para uma geração energética EH. Fato também observado para viga F02S, a única viga das chamadas sólidas, que teve sua estrutura igualmente alterada, tendo como consequência uma baixa energia de saída registrada.

4.2.3 Análise da Norma H₂ das Vigas

A análise da norma H₂ mostra que a energia gerada nas faixas das frequências próximas as frequências naturais de cada viga é, em sua maioria, quase que o total de toda a energia gerada no espectro da frequência 0 – 3200 Hz, como pode ser visto na Figura (48). Os resultados reforçam os resultados de RMS, mostrando que viga FS01 gerou cerca de 64% a mais de energia que a viga de referência L01.

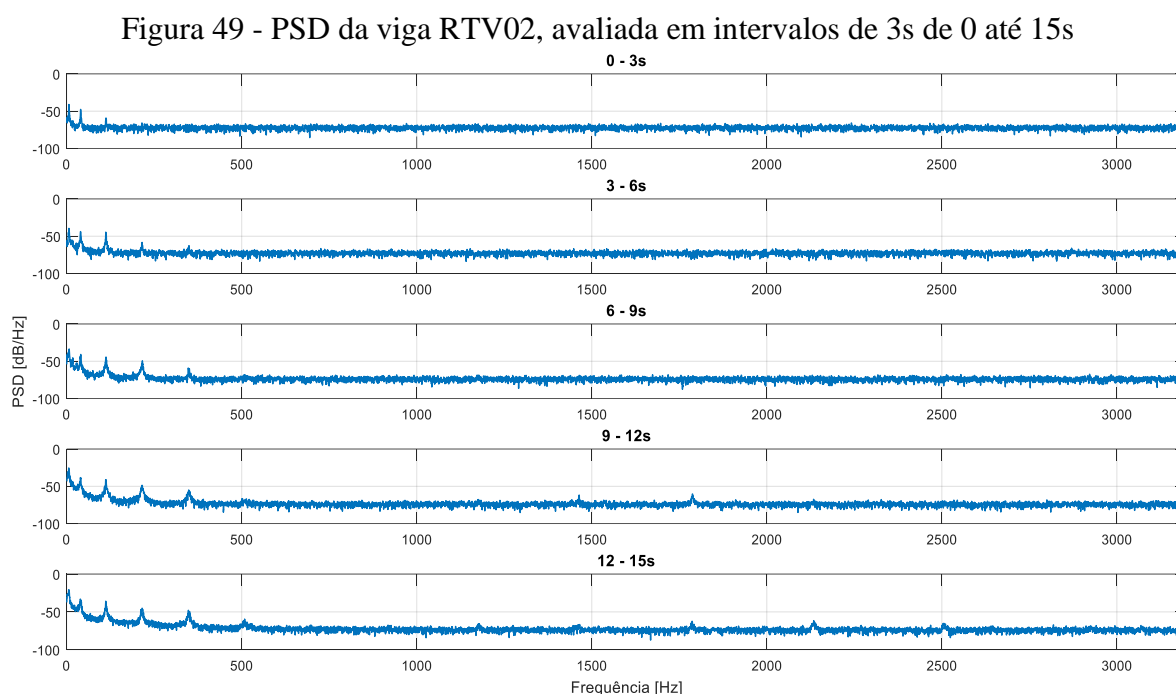
Figura 48- Análises da Norma H₂ em relação as frequências naturais e em todo o espectro da frequência



Fonte: Autor

4.3 Ação da força Aero Elástica como Indutora de Vibração

A influência da força Aero Elástica será analisada analiticamente como parte deste estudo experimental. Este trabalho abre um campo para diversos trabalhos de modelagem aprimorando assim os resultados aqui já apresentados.

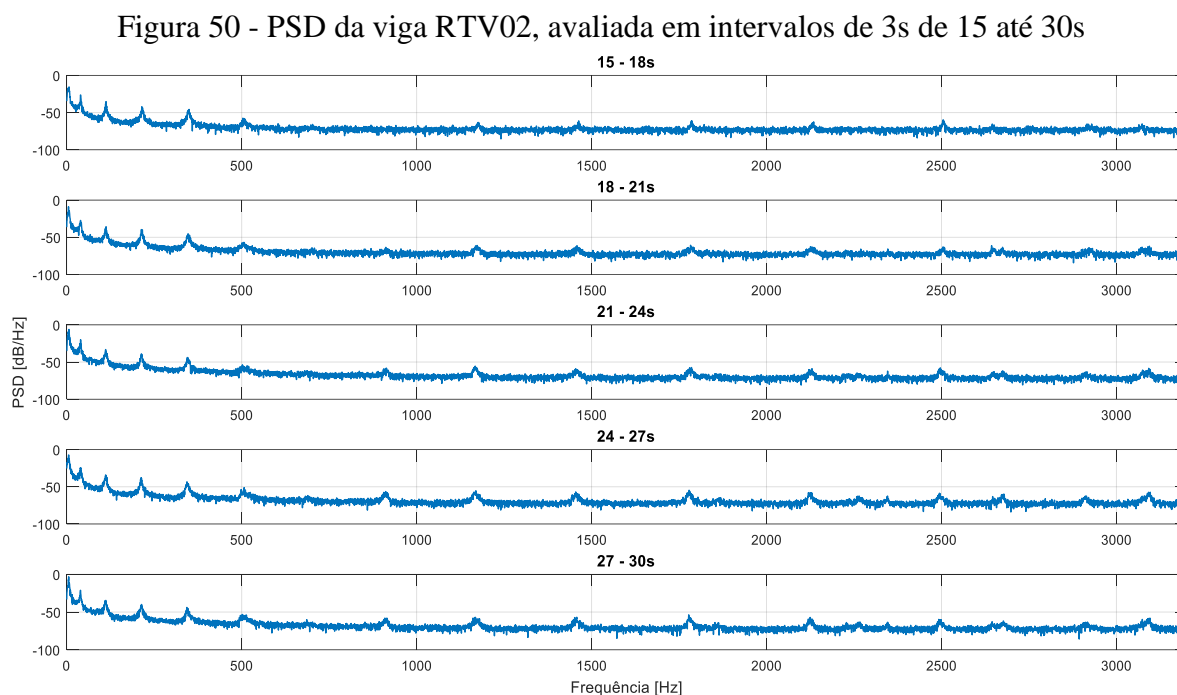


Fonte: Autor

A Figura (49) apresenta a reação em frequência da viga RTV02 a indução de forças aero elásticas sobre esta viga em particular. Esta ação se repete em todas as vigas.

Analisando a Figura (49) pode-se verificar que apesar desta análise se iniciar em zero segundo, o início das tomadas de dados se deu, para todas as vigas, quando a velocidade de rotação do motor atingia 100rpm ou velocidade de saída do vento, medida pelo Pitot que fica postado na saída do túnel de indução Figura (28), indicava de 2,35m/s Tabela (9). Portanto o início desta análise se dá quando já existe uma excitação da viga pela força aero elástica. Pode-se observar nos cinco gráficos plotados na Figura 49 que a amplitude das 3 primeiras PSDs, apresentadas no primeiro gráfico de 0 – 3s aumentam gradativamente até o último gráfico da

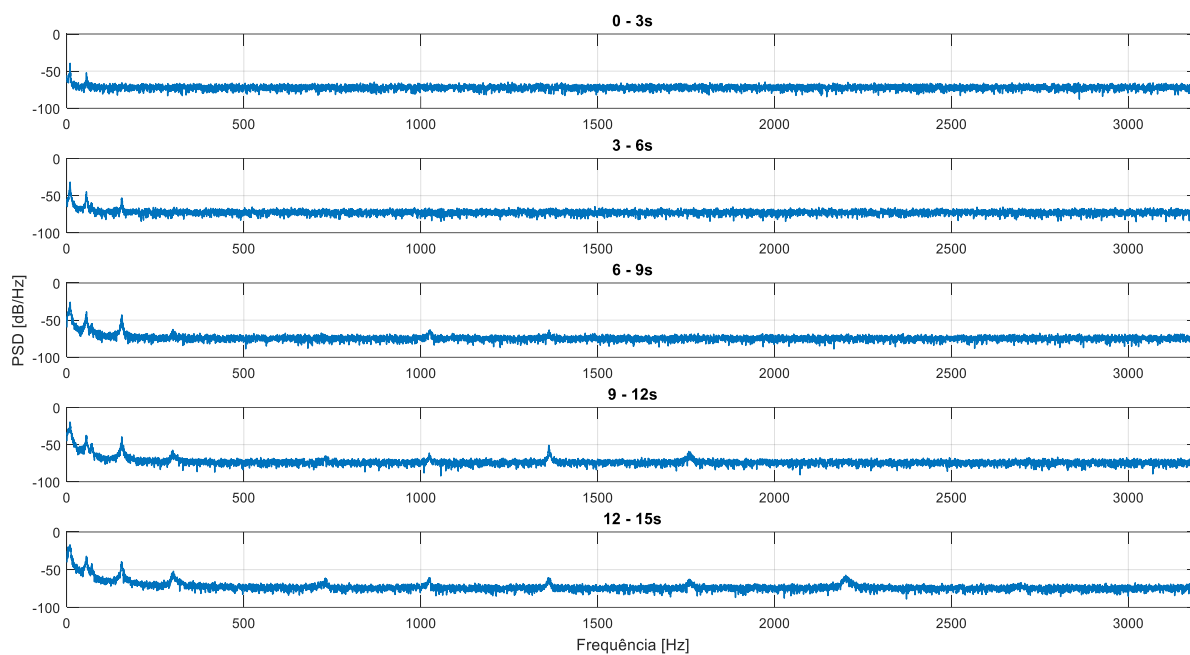
Figura (49), que varia de 12 até 15s. Este tempo de 15s ainda não pertence a faixa temporal da frequência fundamental na maioria das vigas, mas é próximo.



Fonte: Autor

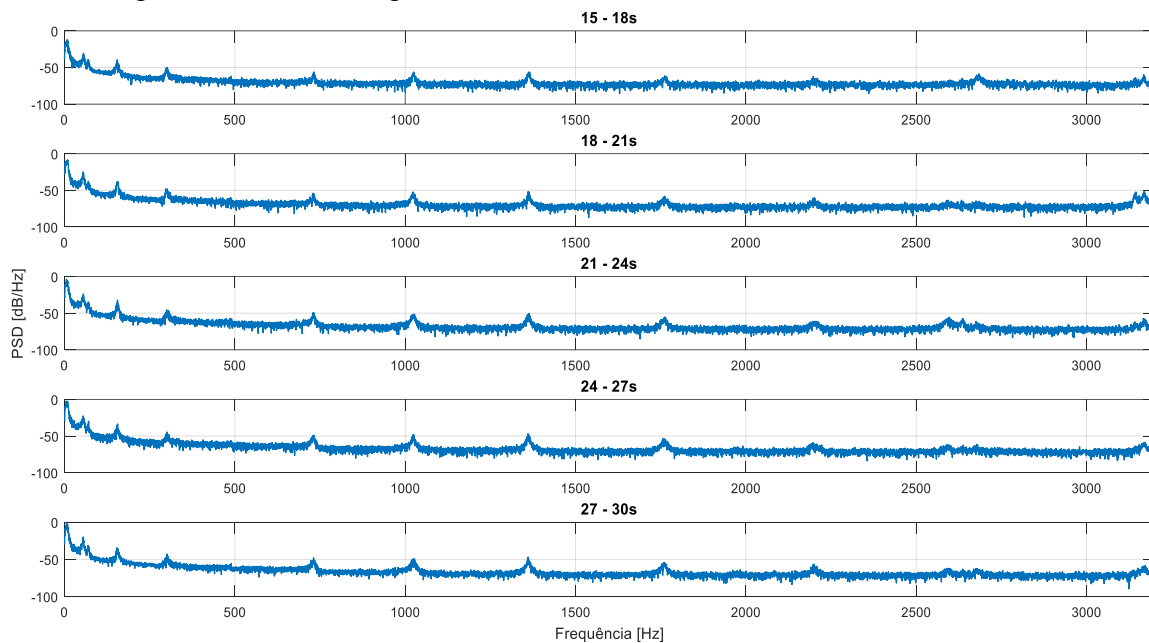
Continuando a análise da mesma viga, mas agora olhando a Figura (50), pode-se verificar tanto um aumento das amplitudes dos modos modais próximos a frequência natural da viga, como o número quantitativo de modos vibracionais aumentam com o tempo. Estas duas últimas Figuras (49) e (50) evidenciam que as maiores amplitudes das PSDs, se dão próximas aos modos fundamentais, sedimentando, portanto, os resultados obtidos na análise das da norma H₂.

Figura 51 - PSD da viga FS01, avaliada em intervalos de 3s de 0 até 15s



Fonte: Autor

Figura 52 - PSD da viga FS01, avaliada em intervalos de 3s de 15 até 30s



Fonte: Autor

As Figuras (51) e (52) foram adicionadas somente afim de confirmar a afirmativa de que a reação as forças aero elásticas eram similares em todas as vigas. Aqui acima são expostas uma das piores vigas em termos de sinal de RMS a viga RTV02, e a viga entre todas que apresentou o melhor resultado de RMS a FS01. Indicando assim que apesar de serem expostas ao mesmo tipo de ação externa a textura vem a influenciar positivamente ou negativamente em termos de geração energética EH.

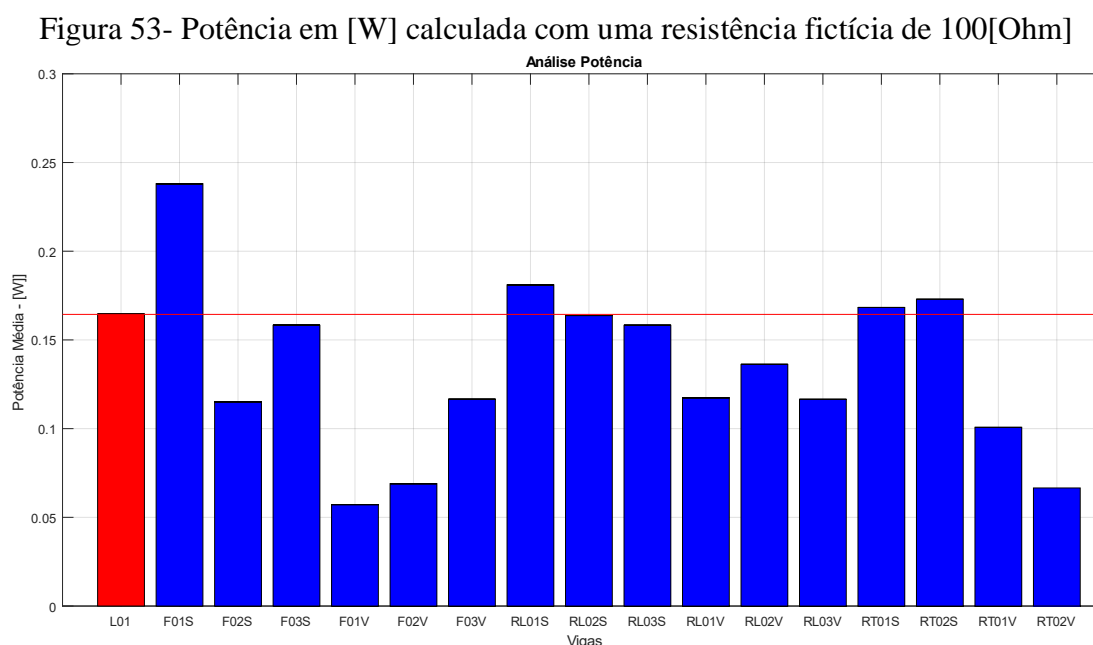
A textura, juntamente com o fluxo de ar, apresentou uma importante influência na amplitude da vibração, influenciando assim, diretamente na produção energética (PRIYA e INMAN, 2009).

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÃO

A aplicação previa do *Bump test* foi importante para auxílio desta investigação experimental. Este teste validou a utilização das pastilhas de PZT, como também indicou que as alterações estruturais nas texturas usinadas como texturas vazadas (FV01, FV02, FV03, RLV01, RLV02, RLV03 e RTV01, RTV02), indicando que este tipo de modificação tem um efeito negativo para geração energética através da vibração, por alterar muito a rigidez das vigas.

O efeito aero elástico como indutor de vibração, também se mostrou suscetível ao tipo de textura superficial aplicado as vigas, indicando claramente sua interação, como indutor de vibração através das forças aeroelásticas. Atuando em todas as vigas, da mesma forma, mas estas reagindo dependentemente da textura aplicada. Como as vigas foram usinadas com diferentes texturas, responderam de forma particular a vibração induzida. Portanto apresentando resultados individuais de energia de saída. Como ficou claro nos resultados da análise RMS e norma H₂. As texturas empregadas a viga FS01 em conjunto com o efeito aeroelástico induzindo vibração, geraram um sinal de RMS em Volt 20,4% e 64% em (dB/Hz) maior que a viga de referência L01. Somente 5 vigas (FS03, RLS02, RLS03, RTS01, RTS02) apresentaram sinais de RMS na faixa entre $\pm 5\%$, ou seja, estatisticamente não se pode afirmar diferença com a viga referência L01. As vigas restantes apresentaram uma diferença estatística maior ou menor que os 5 %, mas desta somente a viga RLS01 apresentou um valor de 5,4% maior que a viga de referência L01, portanto tendo uma textura que apresenta um ganho em EH com a interação com as forças aeroelásticas. A influência das texturas superficiais das vigas em conjunto com a indução aeroelástica de vibração é evidente com os resultados obtidos aqui. As texturas empregadas obtiveram resultados positivos ou negativos para a geração de EH.

A afirmação a seguir é baseada em um dado quase que empírico, pois o experimento não utilizou um resistor, mas como Oppenheim e Willsky (2010) indicam o resistor sendo uma constante, considerado o intervalo de tempo $t_1 \leq t \leq t_2$, em representações físicas como é dado neste experimento, utilizasse a integral $(\frac{1}{R}) \int_{t_1}^{t_2} |V(t)|^2 dt$, portanto para se calcular a potência gerada por cada viga, empregou-se para o cálculo um resistor teórico de 100 Ohm, para todas as vigas, como mostra a Figura (53) os resultados de Potência gerada.



Fonte: Autor

A viga F01S foi a viga com maior produtividade energética, 58,67% em (W) maior do que a viga de referência L01. Este fato, de que a viga FS01 foi a viga que apresentou uma potencialidade de geração energética maior do que as outras vigas, já havia sido confirmado pela análise de RMS e norma H_2 das vigas. Esta análise de potência somente foi introduzida aqui para se mostrar que este gerador, teoricamente, produz uma potência de saída, maior do que a viga de referência e cerca de 100 vezes maior do que a potência de saída requerida por um dispositivo eletrônico *bluetooth* da MICROCHIP TECHNOLOGY INC., (2014). Esta potência de saída requeria pelo dispositivo *bluetooth* é de 2,24mW. A potência alcançada pela viga FS01 foi de 238mW no intervalo de 0 a 30s, suprindo assim a energia de saída requerida, mostrando a potencialidade dos resultados deste trabalho.

As texturas superficiais mostraram que elas interferem na amplificação da vibração. Devido à grande interferência na estrutura das vigas, as texturas devem se restringir somente as superfícies das vigas, portanto com uma mínima remoção de massa. A investigação de outras configurações de textura são promissoras.

Para trabalhos futuros uma análise modal tanto na aplicação de outras configurações de textura como também a máxima possível profundidade a ser aplicada, tendo como referência a viga F01S. Diferentes ataques do fluxo de ar com maiores angulações a partir de 0° (frontal) até o posicionamento 90° (perfil). Aplicação de diversos resistores para uma análise real da potência de saída como a estocagem desta energia em baterias.

REFERÊNCIAS

ALLAMRAJU, K. V.; IVANI, R.; KORLAC, S. Investigation of Design Parameters and Actuator Constraints in Piezoelectric Energy Harvesters. **Materials Today: Proceedings Elsevier Ltd**, v.2, 1577 – 1584, 2015. doi: 10.1016/j.matpr.2015.07.084

BEEBY, S. P.; TUDOR, M. J.; WHITE, N. M. Energy harvesting vibration sources for microsystems applications. **Measurement Science and Technology Journal IOP Publishing Ltd.**, v.17, p 175 – 195, 2006. doi:10.1088/0957-0233/17/12/R01

BEEBY, S.P.; TORAH, R.N.; TUDOR, M.J. Kinetic Energy Harvesting. ACT Workshop on Innovative Concepts. ESA-ESTEC 28-29 January 2008.

BIBO, Amin.; ABDELKEFI, Abdessattar; DAQAQ, Mohammed F. Modeling and Experimental Validations of a Piezoelectric Energy Harvester under Combined Galloping and Base Excitations. In: ASME 2014 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference IDETC/CIE, 2014, Buffalo, New York, USA **DETC2014-34524**.

COVACI, C., GONTEAN, A. Piezoelectric Energy Harvesting Solutions: A Review. **Sensors MDPI Journal**, v.20, 37p, 2020. doi:10.3390/s20123512

DAQAQ, M.F.; STABLER, C.; QAROUSH, Y.; SEUACIUC-OSÓRIO, T. Investigation of Power Harvesting via Parametric Excitations, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, v. 20, p. 545-557, 2009. doi 10.1177/1045389X08100978

DU, Sijun. **Energy-efficient Interfaces for Vibration Energy Harvesting**. 2017. 163p. Tese (Doctor of Philosophy) - Department of Engineering, University of Cambridge, Cambridge, 2017.

ERTURK, Alper.; INMAN, Daniel J. Piezoelectric Energy Harvesting. John Wiley & Sons, Ltd., 2011, cap.3-4, p.49-119.

FRANCO, Vitor Ramos, **Técnicas de Otimização Aplicadas em Sistemas de Conversão de Energia**. 2014. 129p. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

GAWRONSKI, Wodek K., **Dynamics and Control of Structures**. Springer Science+Business Media, LLC, 1998. Cap 4 p.71-87. ISBN 978-1-4757-5033-1

GLJUŠ'CI'Ć, P.; ZELENKA, S.; BLAŽEVI'Ć, D.; KAMENAR, E. Kinetic Energy Harvesting for Wearable Medical Sensors. *Sensors MDPI*, v.19, p.338 – 345, 2012.

ILYAS, M.; S. Piezoelectric Energy Harvesting: Methods, Progress, and Challenges. **Momentum Press®**, LLC. cap.1-4, p.1-29, 2018.

HIGUTI, T. R.; KITANO, C; Princípios de Comunicações Sinais e Sistemas. Universidade Estadual Paulist “Júlio de Mesquita Filho”, Faculdade de Engenharia Elétrica de Ilha Solteira. 2003, cap-6, pág. 149-158.

IEEE Standard on Piezoelectricity, **The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.** p 1-74, 1988.

IZADGOSHASB, I.; LIM, Y. Y; PADILLA, R. V.; SEDIGHI, M.; NOVAK, J. P.; Performance Enhancement of a Multiresonant Piezoelectric Energy Harvester for Low Frequency Vibrations. **Energies Journal MDPI**, v.12, 16p, 2006. doi:10.3390/en12142770

JAMES, N.K.; LAFONT, U.; VAN DER ZAAG, S.; GROEN, W. A. Piezoelectric and mechanical properties of fatigue resistant, self-healing PZT-ionomer composites. **IOP Publishing**, v.23, n.5, 9p, 2014. doi:10.1088/0964-1726/23/5/055001

JIN, Z.; LI, G.; WANG, J.; Zhang, Z. Design, Modeling, and Experiments of the Vortex-Induced Vibration Piezoelectric Energy Harvester with Bionic Attachments. **Energies Journal MDPI**, v.12, 13p, 2019. doi.org/10.1155/2019/1670284

KUONO, E. A Fast Response Piezoelectric Actuator for Servo Correction of Systematic Errors in Precision Machining. **Annals of the CIRP**, v 33, p.369 – 372, 1984.

KUTIŠ, V.; MOUSSA, W. A. MEMS-Based Power Generation Techniques for Implantable Biosensing Applications. **Sensors MDPI Journal**, v.11, p. 1433 - 1460, 2011. doi 10.3390/s110201433

LEE, Y. J.; QI, Y.; ZHOU, G.; LUA, K. B. Vortex-induced vibration wind energy harvesting by piezoelectric MEMS device in formation. **Nature/scientific reports**, v.9, 11p., 2019. doi 10.1038/s41598-019-56786-0

LUEKE, J.; DZUBA, J.; PAULECH, J.; MURÍN, J.; LALINSKÝ, T. MEMS piezoelectric pressure sensor - modelling and simulation. **Published by Elsevier Ltd.**, v.48, p. 698 - 703, 2019. doi.org/10.1016/j.ijleo.2018.10.054

Ma, L.; Yao, M.; Zhang, W.; Lou, K.; Cao, D.; Niu, Y. A Novel Aerodynamic Force and Flutter of the High-Aspect-Ratio *Cantiléver* Plate in Subsonic Flow. **Hindawi.**, v.2020, 17p, 2020. doi 10.1155/2020/8841590

MICROCHIP TECHNOLOGY INC. 2019, Datasheet DS70005342D, ATSAMB11XR/ZR 404p.

MISHRA, R.; JAIN, S.; DURGAPRASAD, C.; SAHU, S.; Vibration Energy Harvesting Using Drum Harvesters. **Journal of Applied Engineering Research**. v.14, p. 34995 - 35001, 2015.

OKASAKI, Y.; A Micro-Positioning Tool Post Using a Piezoelectric Actuator for Diamond Turning Machines. **Precision Engineering Journal**, v.12, n.3, p. 151 - 156, 1990.

OPPENHEIM, A. V.; WILLISKY, S. A.; **Signais e sistemas**. Pearson Prentice Hall 2° ed., 2010. cap.4 -6, p.200-305. ISBN 978-85-7605-504-4

PALMA, P., H., T. **Identificação Experimental e Controle Ativo de Vibrações Aplicadas em Estruturas Inteligentes**, 2007 148.p Dissertação (Mestrado) Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – Campus Ilha Solteira, 2007.

PANDA, P., K.; JULAI, S.; SAHOO, B., F., M.; CHANDRAIAH, M. RAGHAVAN, S., MANOJ, B.; RAMAKRISHNA, J.; KIRAN, P.: Piezoelectric Energy Harvesting Using PZT Bimorphs and Multilayered Stacks. **Electronic Materials Journal**, v.41, n.11, p. 4349 - 4353 2015. doi 10.1007/s11664-015-3959-2

PRIYA, Shashank; INMAN, Daniel j. **Energy Harvesting Technologies**. Springer Science+Business Media, LLC., 2009. cap.2-4, p.97-119. DOI 10.1007/978-0-387-76464-1

RAO, S. Singiresu. **Vibracoes Mecânicas. Pearson Prentice Hall.** 2009 cap.2-4, p.50-177. ISBN 978-85-7605-200-5

Rodrigues, A. L. G.; Franco, V. R.; Bazani, M. A., Application of energy harvesting of vibrations caused by passing trains. XXVII Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica. 2021. doi://10.26678/ABCM.CREEM2020.CRE2020-0055

TEXAS INSTRUMENTS INCORPORATED. Murugavel Raju. **MCU Strategic Marketing.**, SLYY018, Novembro 2008

SARKER, M. R.; JULAI, S.; SABRI, M. F. M.; SAID, S. M.; ISLAM, M. M.; TAHIR, M., Review of piezoelectric energy harvesting system and application of optimization techniques to enhance the performance of the harvesting system. **Pre-proof Journal Published by Elsevier**, v.300, 50p, 2019. doi.org/10.1016/j.sna.2019.111634

SCALET, T.; VIANA, J. F.; ARTHUR, R.; ARNOLD, F. J. Experimental Evaluation of Piezoelectric Buzzers as Devices for Energy Harvesting. **Brazilian Technology Symposium.** 2017, v.1, ISSN 2447 - 8326.

SHEVTSOV, S. N.; SOLOVIEV, A. N.; PARINOV, I. A.; CHERPAKOV, A. V.; CHEBANENKO, V.A. **Piezoelectric Actuators and Generators for Energy Harvesting.** Springer Science+Business Media, LLC., 2017. cap.1-2, p.1-47. doi.org/10.1007/978-3-319-75629-5_1

SHIN, K.; HAMMOND, J. K.; **Fundamentals of Signal Processing for Sound and Vibration Engineers.** John Wiley & Sons Ltd., 2008. Cap. 6-7, p. 145-218.

SUGINO, C.; LEADENHAM, S.; RUZZENE, M.; ERTURK, A. An investigation of electroelastic bandgap formation in locally resonant piezoelectric metastructures. **Smart Materials and Structures Journal IOP Publishing Ltd.**, v.26, 10p. 2017. doi.org/10.1088/1361-665X/aa6671

TANG, L.; YANG, Y, M. J.; SOH, C. K. Broadband Vibration Energy Harvesting Techniques. **N. Elvin and A. Erturk (eds.), Advances in Energy Harvesting Methods.**, cap 2, p 17 – 61, 2013. doi 10.1007/978-1-4614-5705-3 2

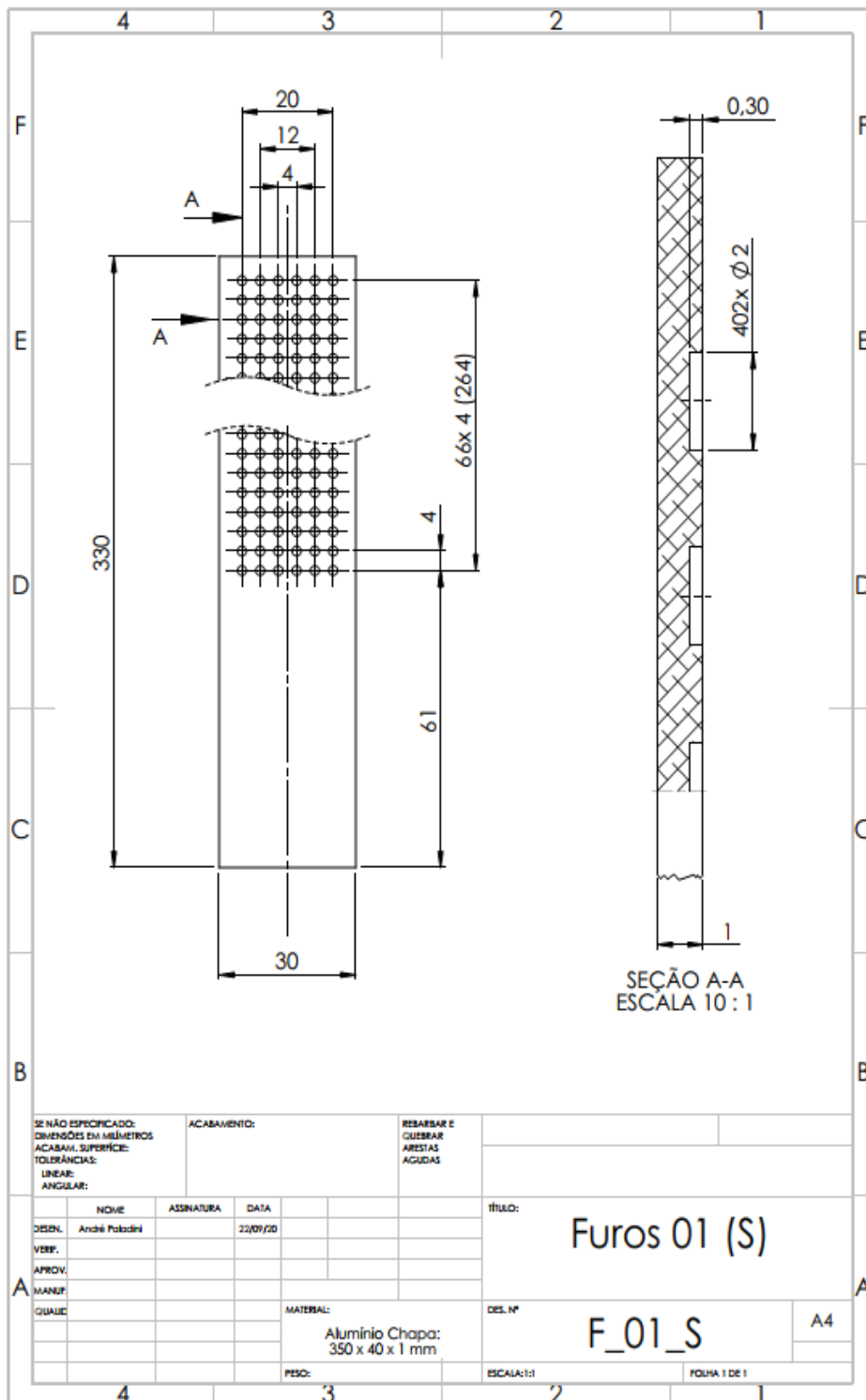
TEXAS INSTRUMENTS INCORPORATED. Murugavel Raju. **MCU Strategic Marketing.**, SLYY018, Novembro 2008.

UCHINO, Kenji, Advanced **Piezoelectric Materials Science and Technology**. Elsevier Ltd., 2009. cap.1, p.3 - 35. DOI 10.1007/978-0-387-76464-1

YANG, Z.; ZHOU, S.; ZU, J.; INMAN, D. High-Performance Piezoelectric Energy Harvesters and Their Applications. **Joule Journal ScienceDirect**, v.2, p 642-697, 2018. doi.org/10.1016/j.joule.2018.03.011

WANG, G.; Li, W. Manufacturing of lens arrays using fast tool servo system based on error correcting algorithm. **International Journal for Light and Electron Optics Elsevier GmbH**, v.178, p. 698 - 703, 2019. doi.org/10.1016/j.ijleo.2018.10.054

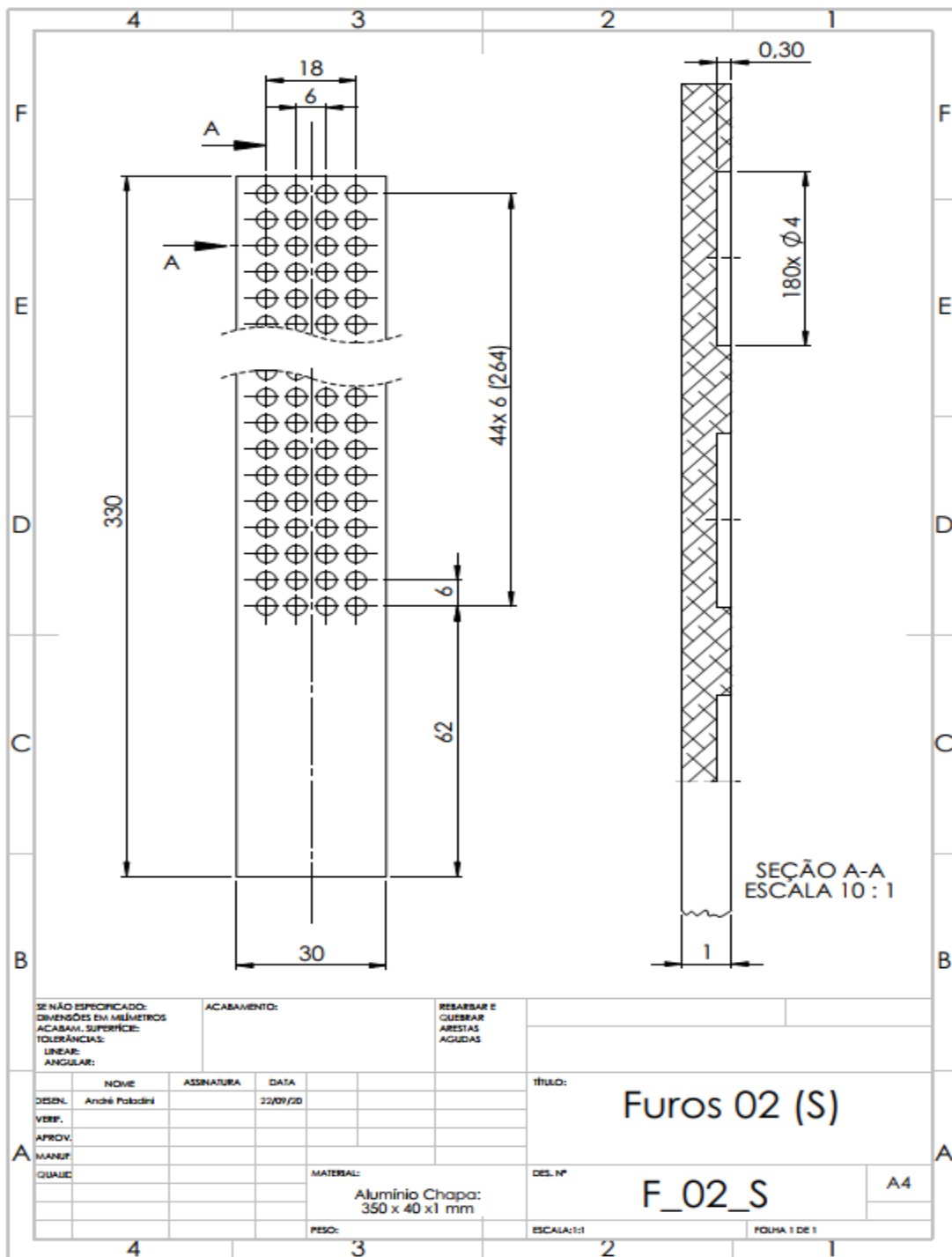
Apêndice A – Desenhos de Projetos dos Corpos de Provas



SEÇÃO A-A
ESCALA 10 : 1

SE NÃO ESPECIFICADO: DIMENSÕES EM MILÍMETROS ACABAM. SUPERFÍCIE: TOLERÂNCIAS: LINHAS: ANGULAR:			ACABAMENTO:	RESBARBAR E QUEBRAR ARESTAS AGUDAS	
NOVE	ASSINATURA	DATA			TÍTULO:
DESEN. André Paladini		22/09/20			Furos 01 (S)
VERIF.					
APROV.					
MANUF.					
QUALID.					
			MATERIAL:		DES. Nº
			Aluminio Chapa: 350 x 40 x 1 mm		F_01_S
			PESO:		ESCALA: 1:1
					FOLHA 1 DE 1

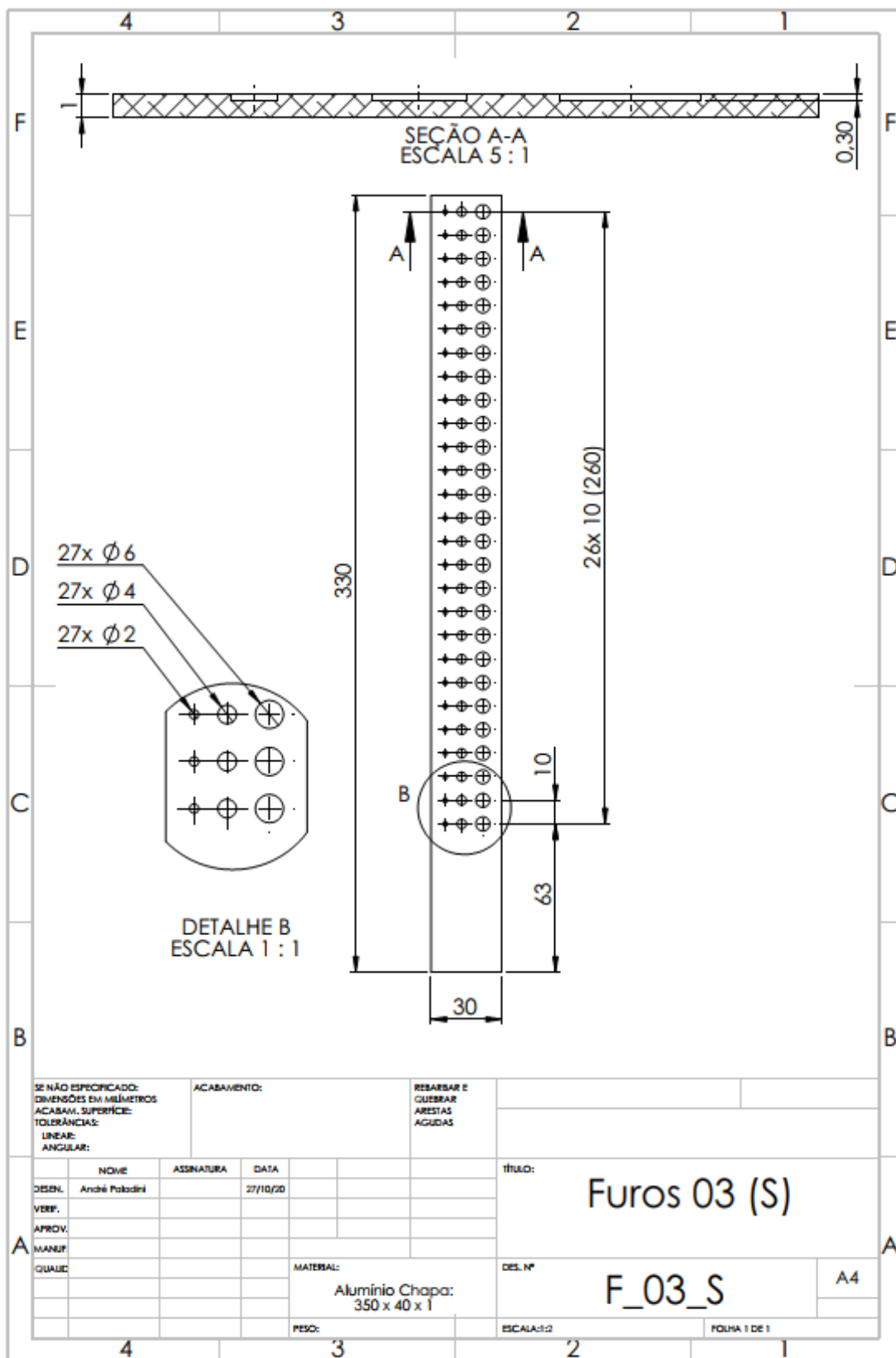
A4

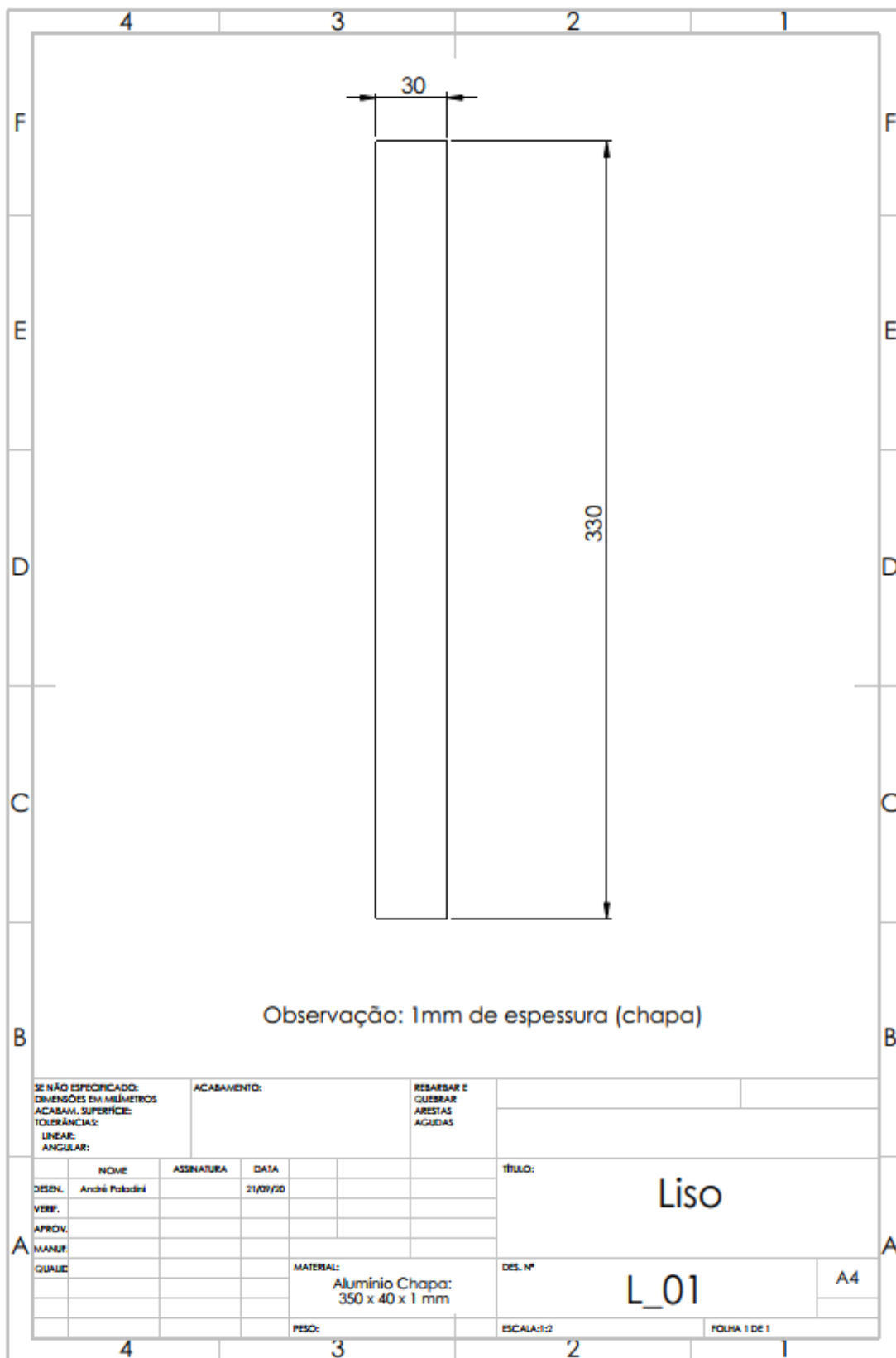


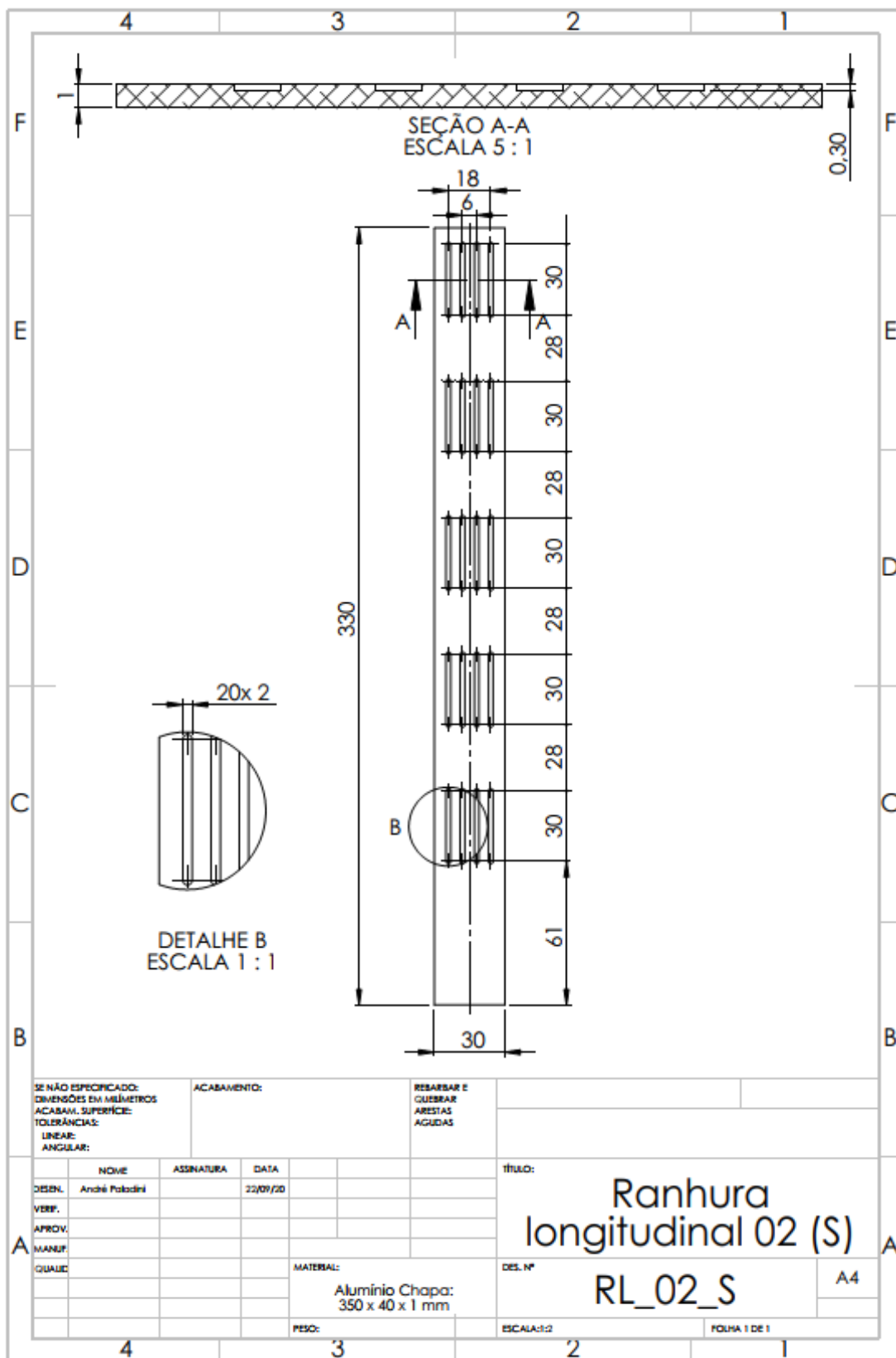
SE NÃO ESPECIFICADO: DIMENSÕES EM MILÍMETROS ACABAM. SUPERFÍCIE: TOLERÂNCIAS: LINEAR: ANGULAR:		ACABAMENTO:	REBARBAR E QUEBRAR ARESTAS AGUDAS	
DESIGN.	NOBRE	ASSINATURA	DATA	título: Furos 02 (S)
VERIF.	André Pabodini		22/09/20	
APROV.				
MANUF.				
QUALID.			MATERIAL: Alumínio Chapa: 350 x 40 x 1 mm	DES. Nº F_02_S
			PESO:	ESCALA: 1:1
				FOLHA 1 DE 1

SEÇÃO A-A
ESCALA 10 : 1

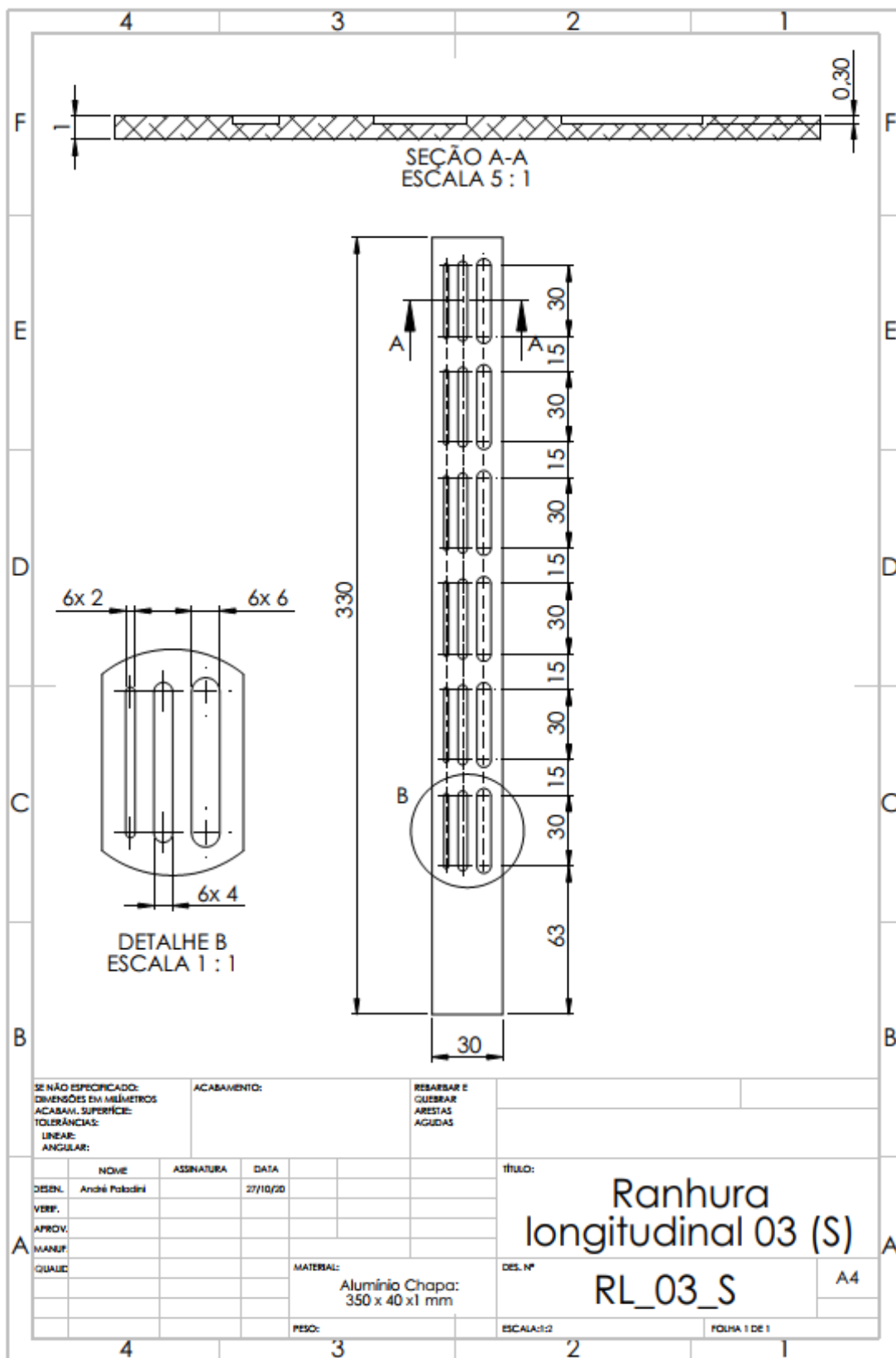
A4

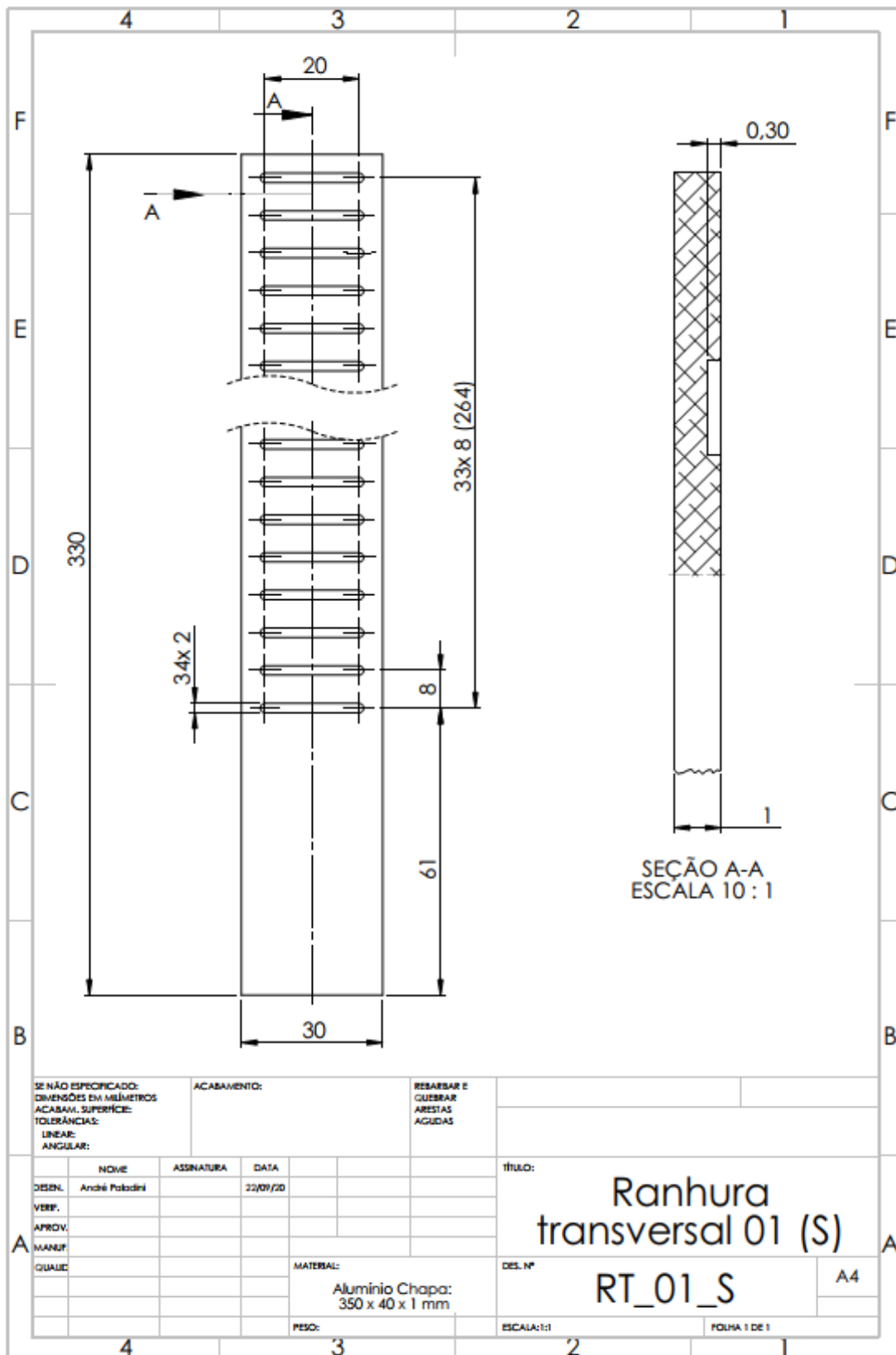






SE NÃO ESPECIFICADO: DIMENSÕES EM MILÍMETROS ACABAM. SUPERFÍCIE: TOLERÂNCIAS: LINEAR: ANGULAR:			ACABAMENTO:	RESBARBAR E QUEBRAR ARESTAS AGUDAS	
DESIGN.	NOBRE	ASSINATURA	DATA	TÍTULO:	
VERIF.	André Paladini		22/09/20	Ranhura longitudinal 02 (S)	
APROV.				DES. Nº	A4
MANUF.				RL_02_S	
QUALID.				ESCALA: 1:2	FOLHA 1 DE 1
				MATERIAL:	
				Alumínio Chapa:	
				350 x 40 x 1 mm	
				PESO:	





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

ACABAMENTO:

REBARBAR E
QUEBRAR
ARESTAS
AGUDAS

	NOME	ASSINATURA	DATA
DESEN.	André Paladini		22/09/20
VERIF.			
APROV.			
MANUF.			
QUALC.			

TÍTULO:

Ranhura transversal 01 (S)

DES. Nº

RT_01_S

A4

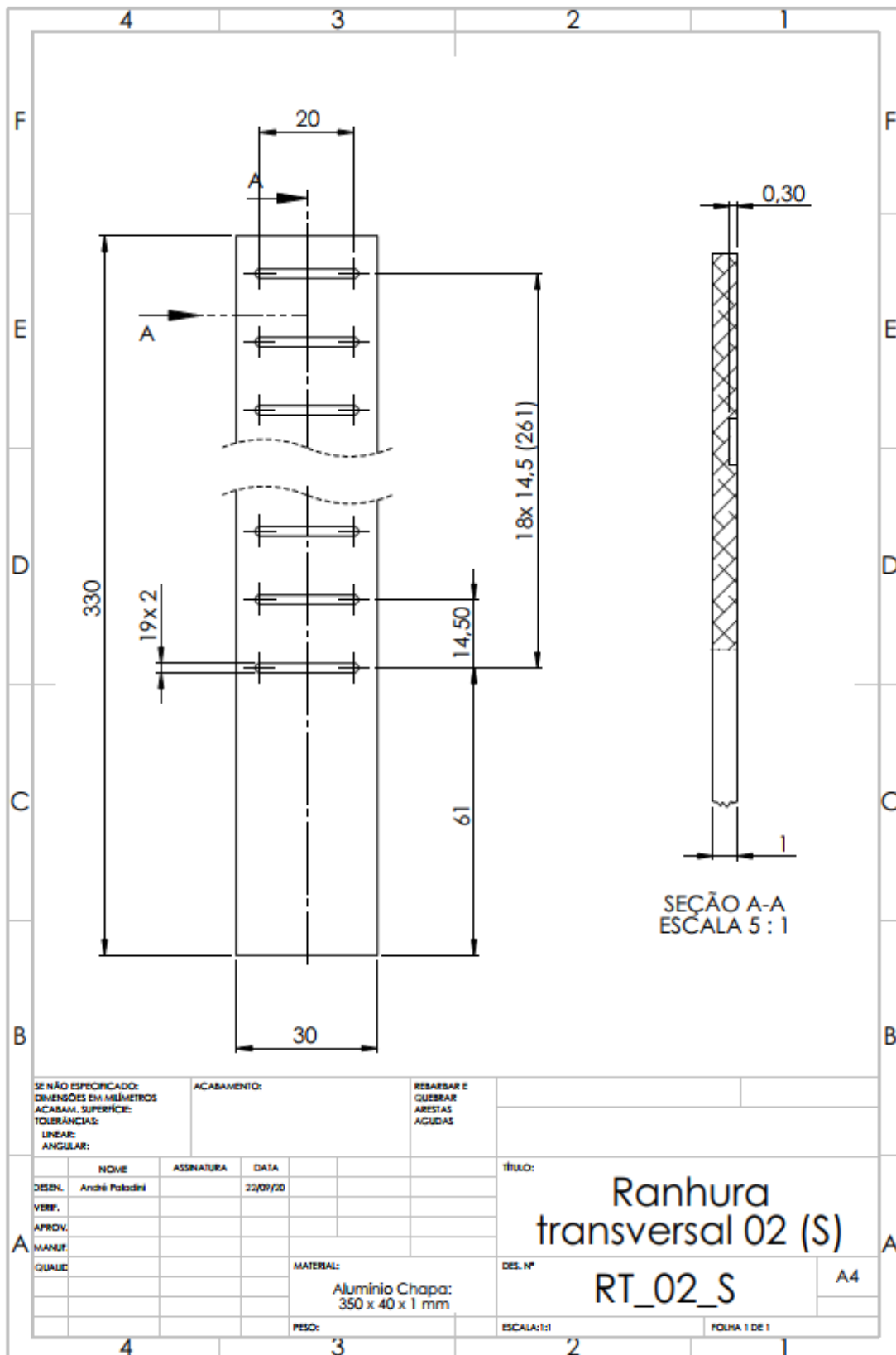
MATERIAL:

Aluminio Chapa:
350 x 40 x 1 mm

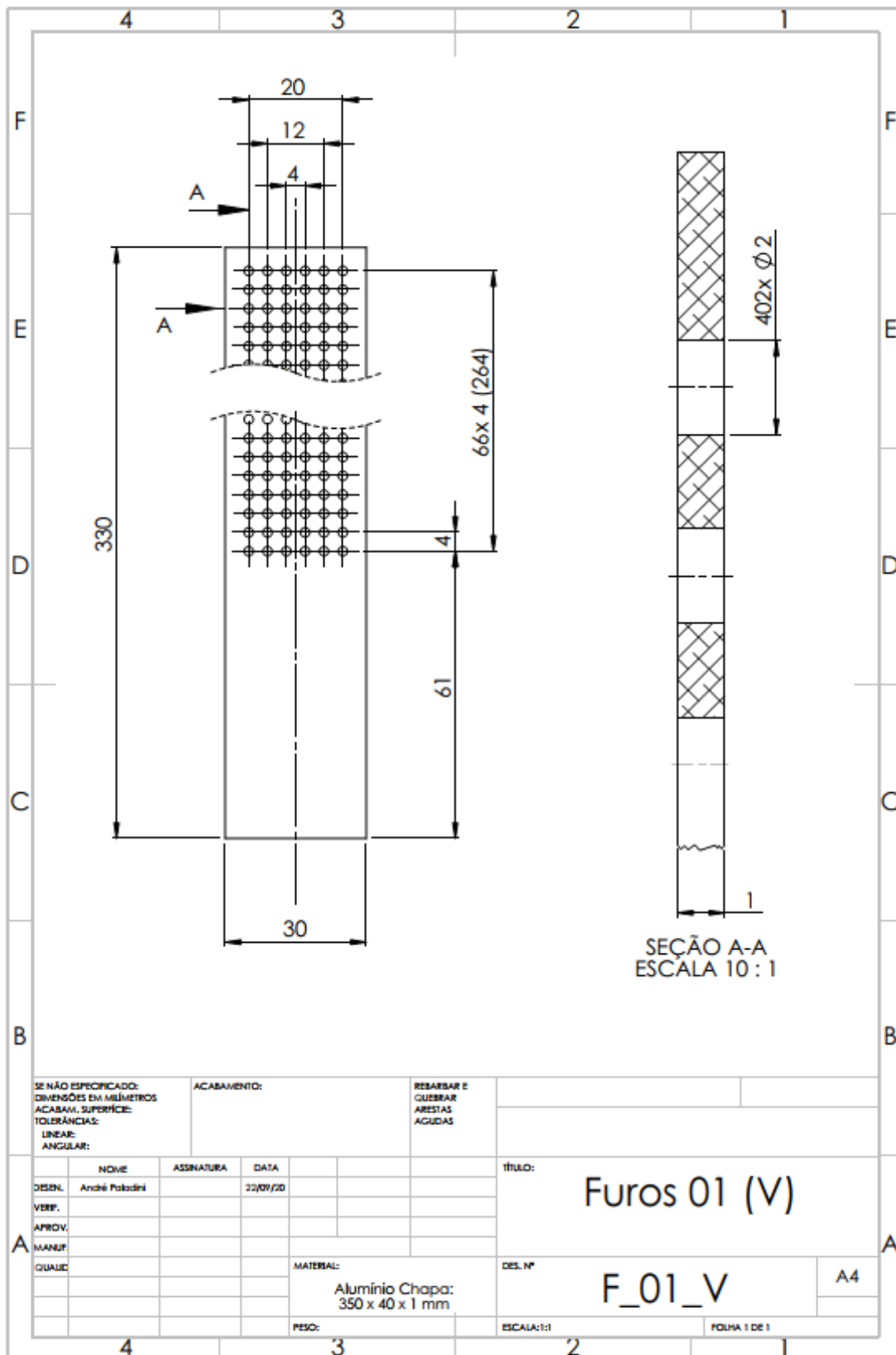
PESO:

ESCALA:1:1

FOLHA 1 DE 1



SE NÃO ESPECIFICADO: DIMENSÕES EM MILÍMETROS ACABAM. SUPERFICIE: TOLERÂNCIAS: LINEAR: ANGULAR:				ACABAMENTO:	RESBARBAR E QUEBRAR ARESTAS AGUDAS		
DESIGN.	NOBRE	ASSINATURA	DATA	TÍTULO:			
VERIF.	André Paladini		22/09/20	Ranhura transversal 02 (S)			
APROV.							
MANUF.				DES. Nº			
QUALID.				MATERIAL:			
				Aluminio Chapa: 350 x 40 x 1 mm			
				PESO:			
				ESCALA:1:1			
				FOLHA 1 DE 1			
				A4			



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

ACABAMENTO:

RESBARBAR E
 QUEBRAR
 ARESTAS
 AGUDAS

	NOME	ASSINATURA	DATA
DESEN.	André Paladini		22/09/20
VERIF.			
APROV.			
MANUF.			
QUALIC.			

TÍTULO:

Furos 01 (V)

DES. Nº

F_01_V

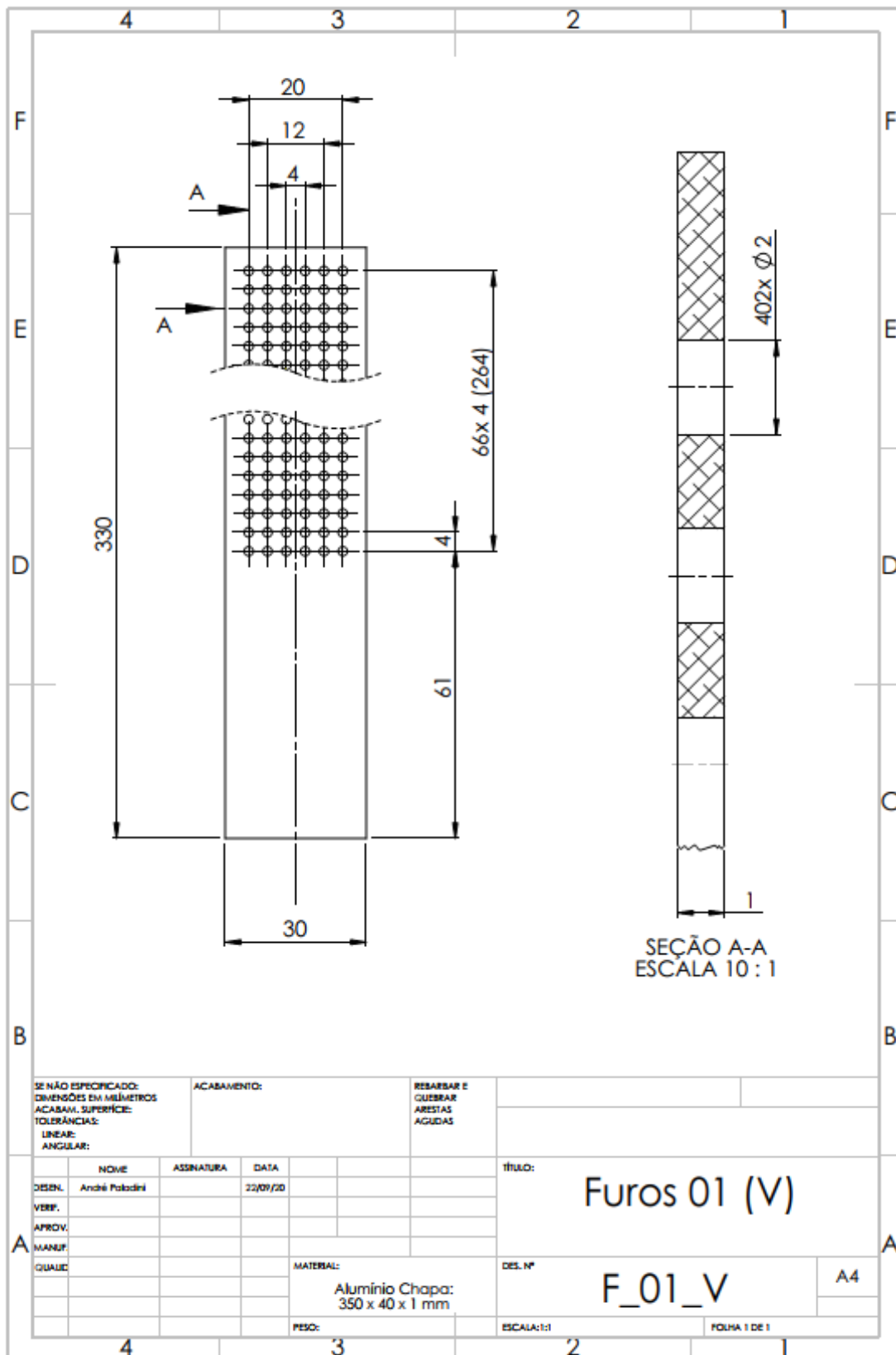
A4

MATERIAL:
 Alumínio Chapa:
 350 x 40 x 1 mm

PESO:

ESCALA:1:1

FOLHA 1 DE 1



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

ACABAMENTO:

RESBARBAR E
QUEBRAR
ARESTAS
AGUDAS

	NOME	ASSINATURA	DATA
DESEN.	André Paladini		22/09/20
VERIF.			
APROV.			
MANUF.			
QUALIC.			

TÍTULO:

Furos 01 (V)

DES. Nº

F_01_V

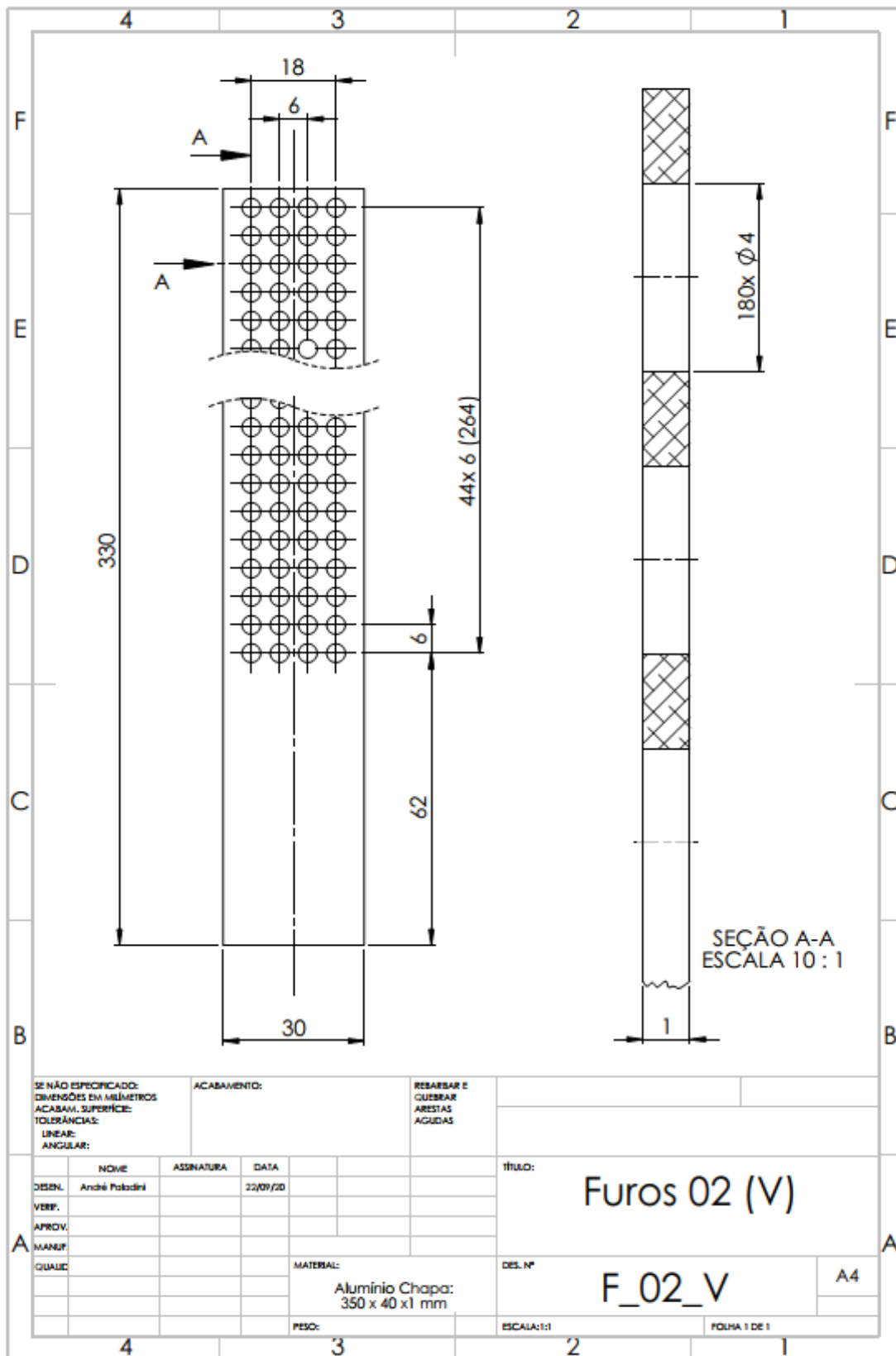
A4

MATERIAL:
Alumínio Chapa:
350 x 40 x 1 mm

PESO:

ESCALA:1:1

FOLHA 1 DE 1



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

ACABAMENTO:

REBARBAR E
QUEBRAR
ARESTAS
AGUDAS

	NOME	ASSINATURA	DATA
DESEN.	André Paladini		22/09/20
VERIF.			
APROV.			
MANUF.			
QUALID.			

TÍTULO:

Furos 02 (V)

DES. Nº

F_02_V

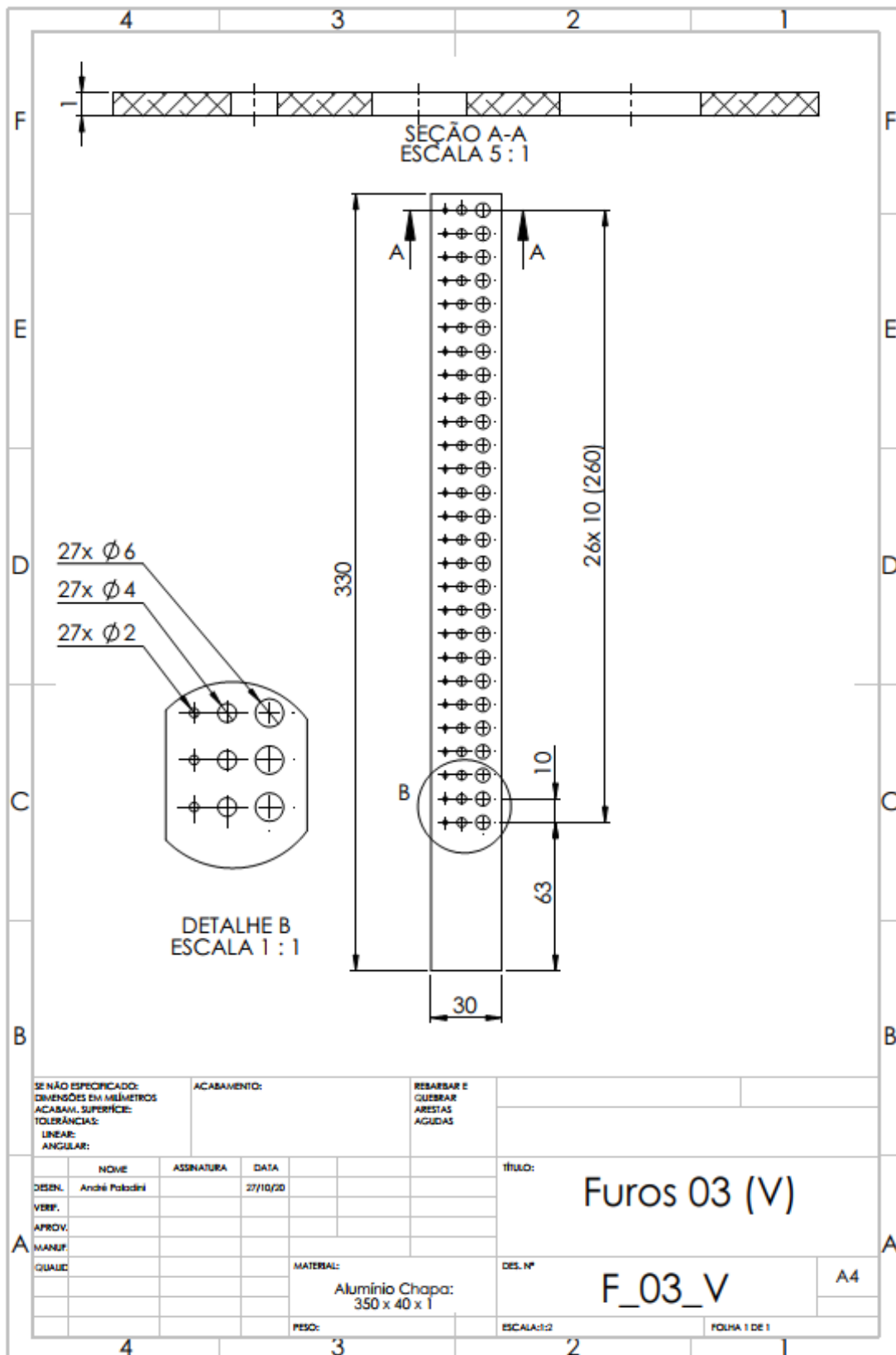
A4

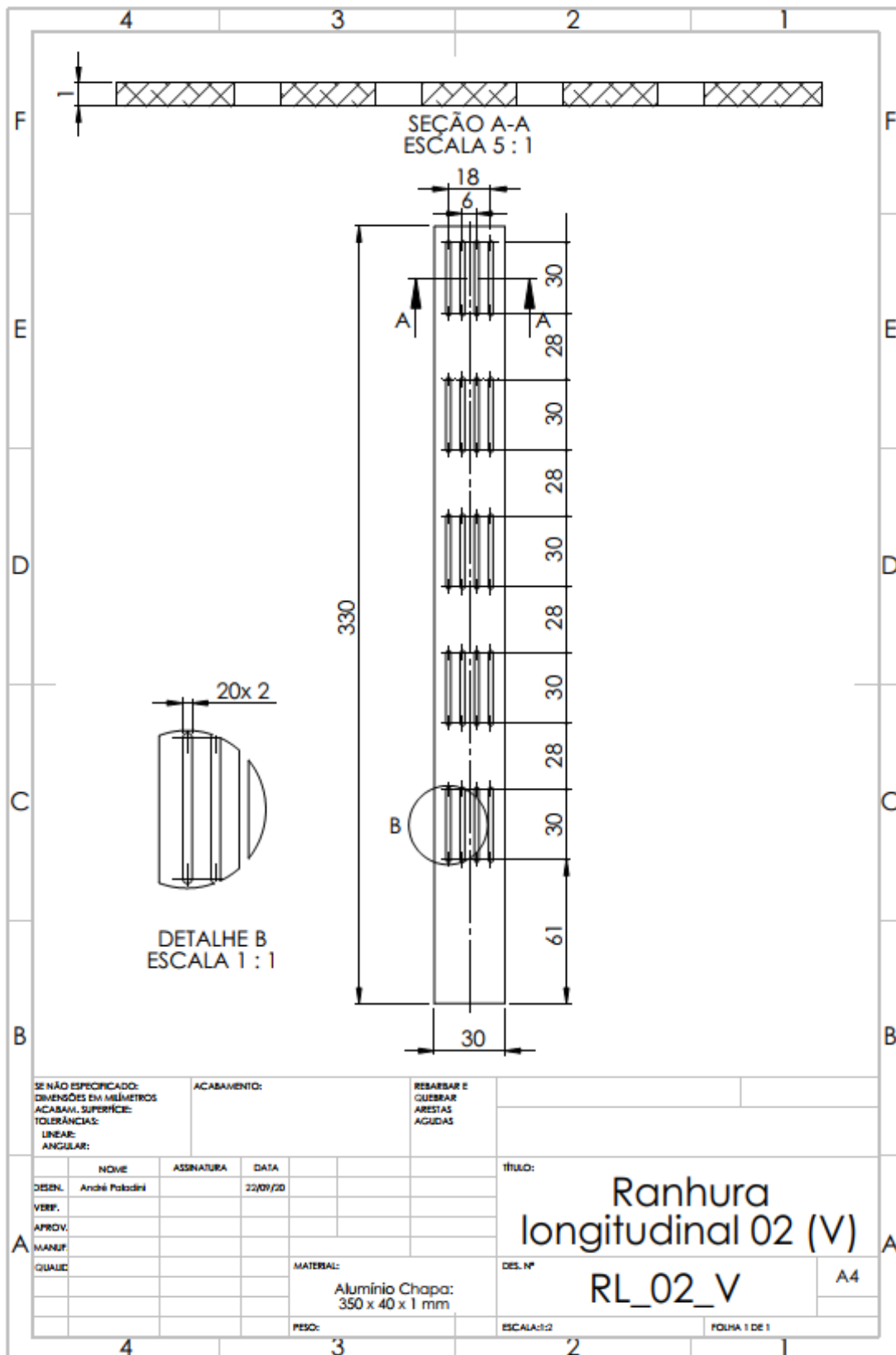
MATERIAL:
Alumínio Chapa:
350 x 40 x 1 mm

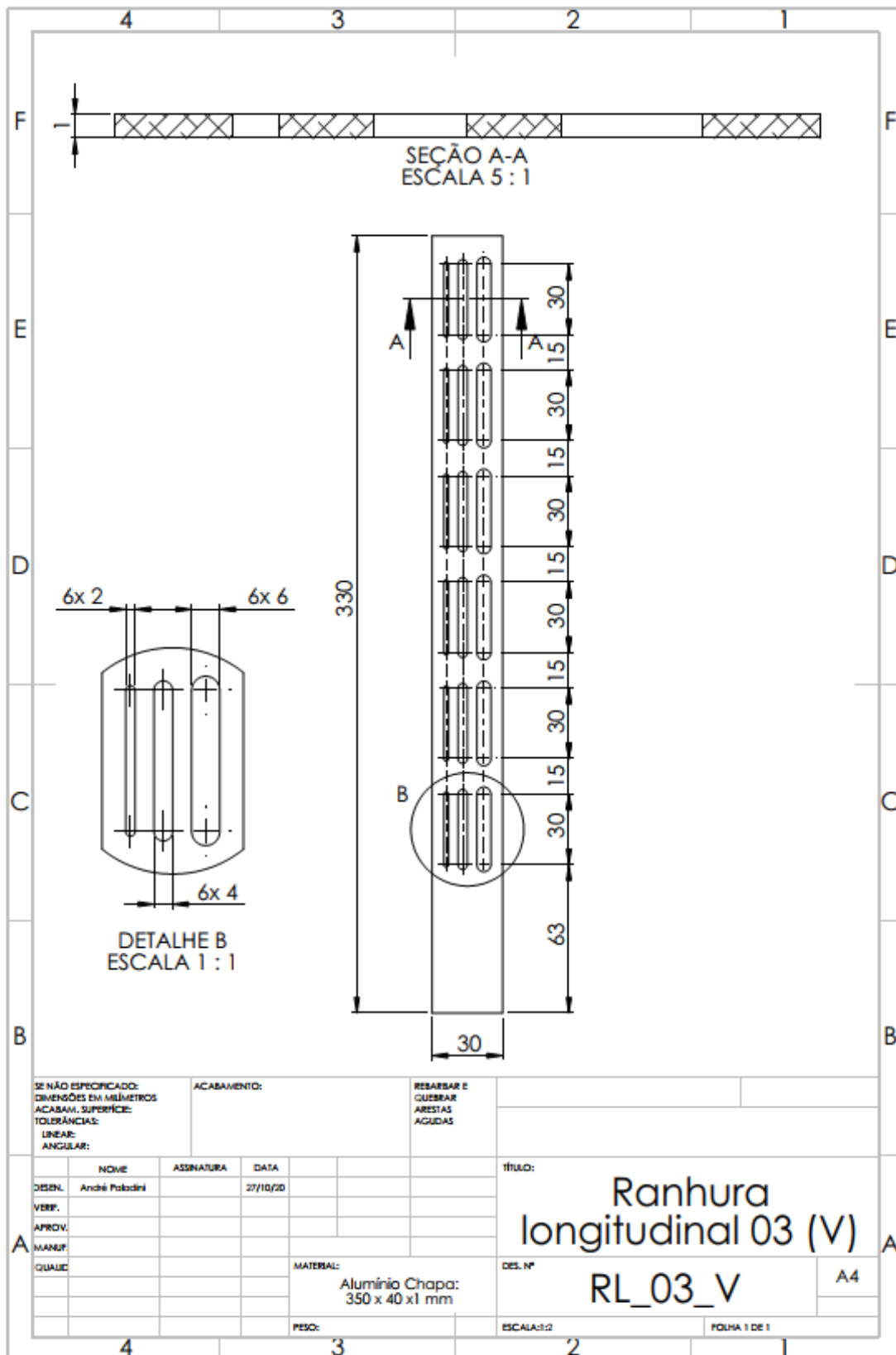
PESO:

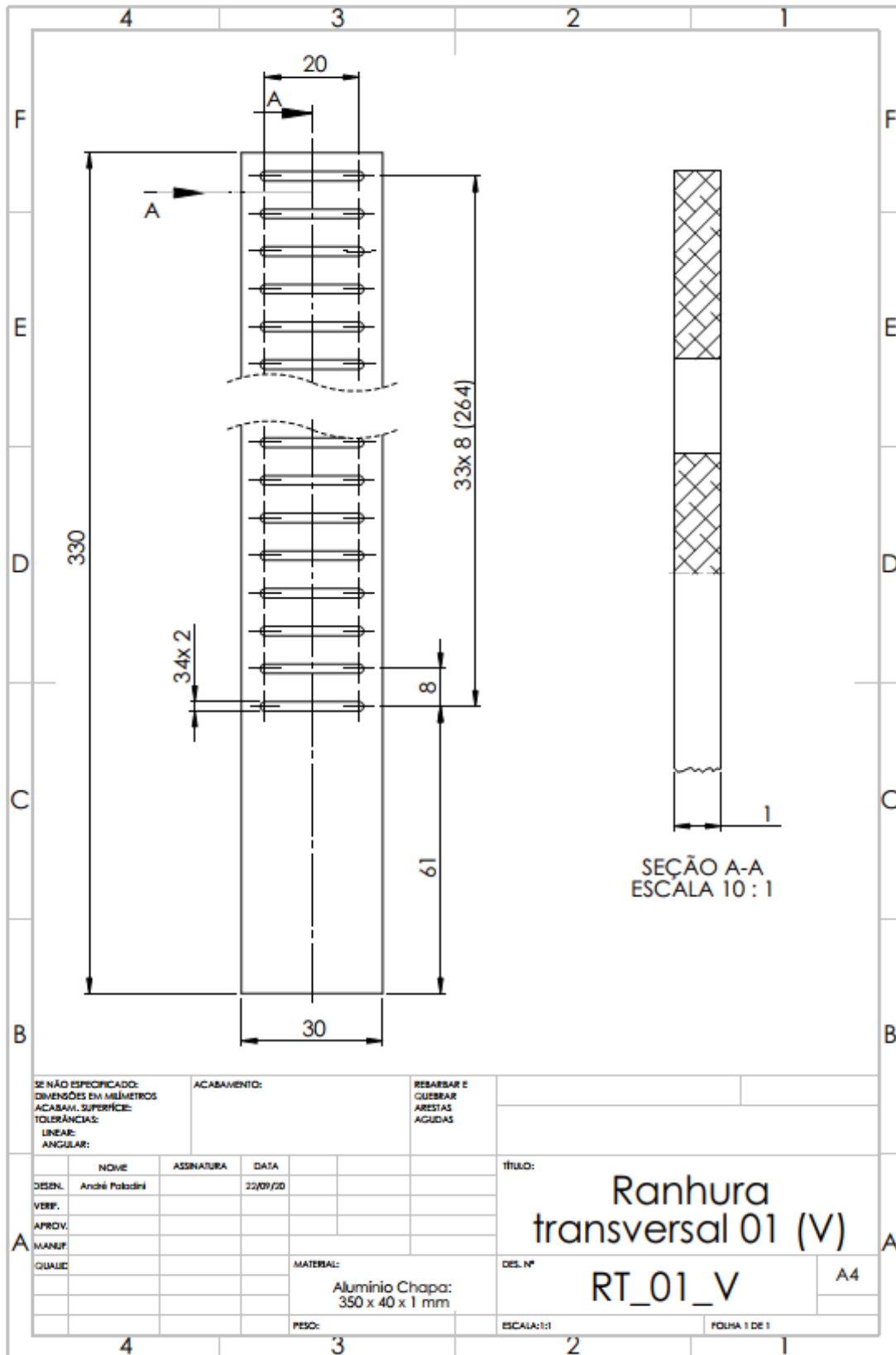
ESCALA:1:1

FOLHA 1 DE 1









SE NÃO ESPECIFICADO: DIMENSÕES EM MILÍMETROS ACABAM. SUPERFÍCIE: TOLERÂNCIAS: LINEAR: ANGULAR:			ACABAMENTO:	RESBARBAR E QUEBRAR ARESTAS AGUDAS	
DES. Nº	NOBRE	ASSINATURA	DATA	TÍTULO:	
	André Paladini		22/09/20	Ranhura transversal 01 (V)	
VERIF.				DES. Nº	
APROV.				RT_01_V	
MANUF.				A4	
QUALID.				MATERIAL:	ESCALA:1:1
				Aluminio Chapa: 350 x 40 x 1 mm	FOLHA 1 DE 1
				PESO:	