



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE TRANSPORTES**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE TRANSPORTES**

**BRUNO CAVALCANTE MOTA**

**CAPTAÇÃO E GERAÇÃO DE ENERGIA NO PAVIMENTO RODOVIÁRIO COM A**  
**APLICAÇÃO DE CÉLULAS PIEZOELÉTRICAS**

**FORTALEZA**

**2021**

BRUNO CAVALCANTE MOTA

CAPTAÇÃO E GERAÇÃO DE ENERGIA NO PAVIMENTO RODOVIÁRIO COM A  
APLICAÇÃO DE CÉLULAS PIEZOELÉTRICAS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Transportes. Área de concentração: Infraestrutura de Transportes.

Orientadora: Profa. Dra. Suelly Helena de Araújo Barroso.

FORTALEZA

2021

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Biblioteca Universitária

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

- M871c Mota, Bruno Cavalcante.  
Captação e geração de energia no pavimento rodoviário com a aplicação de células piezoelétricas / Bruno Cavalcante Mota. – 2021.  
131 f. : il. color.
- Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Fortaleza, 2021.  
Orientação: Profa. Dra. Suelly Helena de Araújo Barroso.
1. Piezoeletricidade. 2. Análises multifísicas. 3. Módulo Dinâmico. 4. Tráfego de veículos. 5. Potência elétrica. I. Título.

CDD 388

---

BRUNO CAVALCANTE MOTA

CAPTAÇÃO E GERAÇÃO DE ENERGIA NO PAVIMENTO RODOVIÁRIO COM A  
APLICAÇÃO DE CÉLULAS PIEZOELÉTRICAS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Transportes. Área de concentração: Infraestrutura de Transportes.

Aprovada em: 27/09/2021.

BANCA EXAMINADORA

---

Profª. Dra. Suelly Helena de Araújo Barroso (Orientadora)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. PhD. Jorge Barbosa Soares  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. PhD. Adelino Jorge Lopes Ferreira  
Universidade de Coimbra (UC)

---

Prof. PhD. Lélío Antônio Teixeira Brito  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)

A Deus.

Em memória de minha mãe Rita Maria Cavalcante e de meu pai Luiz Cavalcante Mota, que agora cuidam de mim, juntos, do reino de Deus.

## AGRADECIMENTOS

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo apoio financeiro à minha pesquisa com a manutenção da bolsa de auxílio.

À minha orientadora, Professora Dra. Suelly Helena de Araújo Barroso, pela excelente orientação, pelo tempo gasto, pelas palavras ditas e por todo o apoio desde a graduação, tornando-se uma referência para mim como profissional e pessoa. Se um dia eu for um pouco do que a senhora é, serei uma pessoa realizada.

À minha mãe, Rita Maria Cavalcante, por não ter saído do meu lado durante toda a minha vida. Por ter abdicado de muitas coisas em função de mim e do meu irmão e por ter resistido o máximo que pode e, mesmo não estando mais aqui comigo, creio que segue aplaudindo minhas vitórias e me cobrindo de amor.

À banca examinadora, composta pelos Professores PhD. Jorge Barbosa Soares, Lélío Antônio Teixeira Brito e Adelino Jorge Lopes Ferreira, por todas as contribuições ao trabalho, bem como o tempo dispendido na leitura e avaliação dele.

À minha família por todo o apoio e compreensão frente a momentos atípicos e difíceis enfrentados durante minha trajetória acadêmica, principalmente meu irmão Júnior, minha cunhada Rozeleny e meus sobrinhos Davy, Evylen, Sofia e Giselly.

Aos meus amigos, Mateus Brito, Manu Silva, Paulo Victor, Mateus Vitor, Tallys Pereira, Carlos Maciel, Vinicius Fernandes, Filipe Ramalheiro, Renata Souza, Marcelo, Nicollas Venâncio, pelos momentos vividos e compartilhados durante esse percurso e por nunca terem deixado faltar um ombro amigo e uma boa conversa quando mais precisei. Ao Lucas Sasaki pelo apoio nos procedimentos realizados na *Universal Test Machine* (UTM) e ao Bruno Albuquerque Neto pela colaboração nos ensaios laboratoriais e análise dos vídeos gerados.

Ao Professor Heber Oliveira que se tornou uma das minhas maiores referências acadêmicas e de vida de como ser, agir e lidar frente a todos os obstáculos encontrados no meio do caminho. Pelo senhor, toda a minha admiração e respeito. À Professora Verônica Castelo Branco por todo o apoio, empatia e carinho num dos momentos mais complicados da minha vida. E em geral, a todos os professores do Departamento de Engenharia de Transportes e aos integrantes do Laboratório de Mecânica dos Pavimentos por não terem soltado a minha mão.

À todas as pessoas que se uniram em corrente de oração, apoio e financeiramente para me ajudarem em um dos momentos mais difíceis da minha vida: a internação e falecimento da minha mãe por Covid-19 e o desabamento do teto da casa que morávamos.

*“há fé para tentar alguma coisa nova. quem sabe, correr pelas avenidas mais movimentadas, os bairros mais periféricos, os mais politizados, as ruas mais burguesas, tudo isso em alta velocidade e em grande massa, sabendo que quanto maiores essas variáveis, toda a energia que a gente gastar vai ser reaproveitada. vai ser ressignificada. vai ser transformada. energia essa que iluminará nossas casas, nossas estradas. que iluminará nossas vidas (Bruno Mota).”*



## RESUMO

Emerge na sociedade atual um aumento da demanda por energia elétrica. Frente à diminuição do volume de chuvas nas áreas das hidrelétricas e a extensão continental do Brasil, há a necessidade de novas alternativas de captação e geração de energia limpas e sustentáveis. A piezoeletricidade surge como uma alternativa de micro geração de energia, permitindo a captação das vibrações e deformações ocasionadas no pavimento. Em razão de o pavimento ser submetido ao tráfego de milhões de veículos, ele se torna um ambiente propício para a aplicação de elementos piezoelétricos, transformando as deformações e vibrações exercidas em suas camadas em energia elétrica. Dessa forma, o objetivo geral deste trabalho é investigar o uso da piezoeletricidade como fonte de energia renovável aplicada no pavimento rodoviário. Para isso, foram realizadas três etapas metodológicas para verificar a quantidade de potência e energia elétrica capaz de ser gerada por meio de células piezoelétricas: (i) simulação em software de análises multifísicas; (ii) ensaio laboratorial com os elementos piezoelétricos e (iii) estimativa de produção de energia a partir da simulação em ambiente real. Os resultados indicam que a resistência causa sensibilidade nos dados de potência elétrica. Outros fatores como frequência, carga, quantidade de células e espaçamento influenciam a quantidade obtida de potência. Com relação aos valores de potência para a etapa de simulação, o maior valor obtido foi de 648,8 mW, considerando carregamento de 10,2 kN, frequência de 20 Hz e um maior espaçamento entre 4 células. Para os ensaios laboratoriais a melhor resposta elétrica foi observada com a utilização de 8 células, retornando uma potência de 226,9 mW para 10,2 kN e 20 Hz. A análise dos resultados aponta que há correlação entre os ensaios laboratoriais e as simulações computacionais, podendo ser obtido até 76,56 MWh de energia por mês para a aplicação do protótipo em condições ideais na BR-222, no estado do Ceará. Logo, demonstrou-se a piezoeletricidade como uma alternativa promissora para complementar a matriz elétrica brasileira e reduzir impactos ambientais no sistema natural.

**Palavras-chave:** Piezoeletricidade. Análises multifísicas. Módulo Dinâmico. Tráfego de veículos. Potência elétrica.

## ABSTRACT

An increase in the demand for electric energy is emerging in today's society. Faced with the decrease in rainfall in the hydroelectric plant areas and the continental extension of Brazil, there is a need for new alternatives for capturing and generating clean and sustainable energy. Piezoelectricity emerges as an alternative of micro power generation, allowing capturing the vibrations and deformations within pavements. Because the pavement is subjected to traffic of millions of vehicles, it becomes environment suitable for the application of piezoelectric elements, transforming the deformations and vibrations in its layers into electrical energy. Thus, the overall objective of this research is to investigate the use of piezoelectricity as a source of renewable energy applied to pavement. To this end, three methodological steps were performed to verify the amount of power and electrical energy capable of being generated by means of piezoelectric cells: (i) simulation in multiphysics analysis software; (ii) laboratory test with the piezoelectric elements and (iii) estimation of energy production from the simulation in real environment. The results indicate that resistance causes sensitivity in the electric power data. Other factors such as frequency, load, number of cells and spacing affect the amount of power obtained. Regarding the power values for the simulation step, the highest value obtained was 648.8 mW considering load of 10.2 kN, frequency of 20 Hz, and a larger spacing between 4 cells. For the laboratory tests the best electrical response was observed with the use of 8 cells, returning a power of 226.9 mW for 10.2 kN and 20 Hz. The analysis of the results indicated that there is a correlation between the laboratory tests and the computer simulations, and it is possible to obtain up to 76.56 MWh of energy per month for the application of the prototype in ideal conditions on BR-222, in the state of Ceará. Thus, the piezoelectricity was demonstrated as a promising alternative to complement the Brazilian electric matrix and reduce environmental impacts on the natural system.

**Keywords:** Piezoelectricity. Multiphysics analysis. Dynamic Module. Vehicle traffic. Electric power.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Camadas do pavimento flexível .....	18
Figura 2 – Matriz elétrica do Brasil em 2019 .....	23
Figura 3 – Representação da área de contato dos pneus no pavimento.....	27
Figura 4 – Impacto da carga de um veículo “trucado” em um pavimento com irregularidades longitudinais, a 90 km/h. ....	29
Figura 5 – Efeito piezoelétrico direto .....	30
Figura 6 – Efeito piezoelétrico inverso.....	30
Figura 7 – Modos de operação de um sistema piezoelétrico .....	35
Figura 8 – Composição atômica do PZT .....	36
Figura 9 – Forma do transdutor <i>Bridge</i> .....	37
Figura 10 – Esquematização do experimento com viga piezoelétrica.....	38
Figura 11 – Protótipo com células piezoelétricas para viaduto rodoviário .....	39
Figura 12 – Procedimento experimental com PZT em mistura asfáltica .....	41
Figura 13 – Sistema de captação de energia implantado em via de Portugal.....	43
Figura 14 – Protótipos laboratoriais para captação de energia em pavimento rodoviário .....	44
Figura 15 – Representação de elementos piezoelétricos em pavimento rodoviário.....	48
Figura 16 – Sistema gerador de energia em praça de pedágio no Rio Grande do Sul .....	49
Figura 17 – Componentes do protótipo .....	57
Figura 18 – Distribuição das células piezoelétricas entre as placas .....	58
Figura 19 – Malha adotada pelo protótipo.....	62
Figura 20 – Carregamento distribuído no protótipo .....	63
Figura 21 – Protótipo laboratorial de geração de energia.....	65
Figura 22 – Equipamentos de apoio para a realização dos ensaios .....	65
Figura 23 – Corpo de prova da mistura asfáltica padrão .....	66
Figura 24 – Célula piezoelétrica utilizada .....	68
Figura 25 – <i>Universal Test Machine</i> (UTM-25) .....	69
Figura 26 – Ensaio de compressão com a célula piezoelétrica.....	70
Figura 27 – Representação da tensão mecânica na célula piezoelétrica e no protótipo .....	92
Figura 28 – Resultado do ensaio de compressão na célula piezoelétrica .....	104
Figura 29 – Célula piezoelétrica fraturada .....	105
Figura 30 – Distribuição dos protótipos na via.....	111

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Matriz elétrica renovável do Brasil (por ano) .....	23
Gráfico 2 – Matriz elétrica do estado do Ceará em 2019 .....	24
Gráfico 3 – Potência gerada para a aplicação de 5 Hz .....	75
Gráfico 4 – Potência gerada para a aplicação de 10 Hz .....	75
Gráfico 5 – Potência gerada para a aplicação de 20 Hz .....	75
Gráfico 6 – Potência para 4 células e $R = 28,4919 \text{ M}\Omega$ .....	77
Gráfico 7 – Potência para 4 células mais espaçadas e $R = 28,4919 \text{ M}\Omega$ .....	77
Gráfico 8 – Potência para 8 células e $R = 14,2460 \text{ M}\Omega$ .....	77
Gráfico 9 – Potência para 16 células e $R = 7,1230 \text{ M}\Omega$ .....	77
Gráfico 10 – Potência para 4 células e $R = 14,2460 \text{ M}\Omega$ .....	78
Gráfico 11 – Potência para 4 células mais espaçadas e $R = 14,2460 \text{ M}\Omega$ .....	78
Gráfico 12 – Potência para 8 células e $R = 7,1230 \text{ M}\Omega$ .....	78
Gráfico 13 – Potência para 16 células e $R = 3,5615 \text{ M}\Omega$ .....	78
Gráfico 14 – Potência para 4 células e $R = 7,1230 \text{ M}\Omega$ .....	78
Gráfico 15 – Potência para 4 células mais espaçadas e $R = 7,1230 \text{ M}\Omega$ .....	78
Gráfico 16 – Potência para 8 células e $R = 3,5615 \text{ M}\Omega$ .....	79
Gráfico 17 – Potência para 16 células e $R = 1,7807 \text{ M}\Omega$ .....	79
Gráfico 18 – Potência em função da frequência para 4 células e $F = 10,2 \text{ kN}$ .....	80
Gráfico 19 – Potência em função da frequência para 4 células mais espaçadas e $F = 10,2 \text{ kN}$ .....	80
Gráfico 20 – Potência em função da frequência para 8 células e $F = 10,2 \text{ kN}$ .....	80
Gráfico 21 – Potência em função da frequência para 16 células e $F = 10,2 \text{ kN}$ .....	80
Gráfico 22 – Potência e tensão elétrica a partir da variação da resistência para 4 células ( $F = 10,2 \text{ kN}$ ) .....	81
Gráfico 23 – Potência e tensão elétrica a partir da variação da resistência para 4 células mais espaçadas ( $F = 10,2 \text{ kN}$ ) .....	81
Gráfico 24 – Potência e tensão elétrica a partir da variação da resistência para 8 células ( $F = 10,2 \text{ kN}$ ) .....	82
Gráfico 25 – Potência e tensão elétrica a partir da variação da resistência para 16 células ( $F = 10,2 \text{ kN}$ ) .....	82
Gráfico 26 – Tensão elétrica para 4 células mais espaçadas e $R = 28,4919 \text{ M}\Omega$ .....	84
Gráfico 27 – Tensão elétrica para 4 células mais espaçadas e $R = 14,2460 \text{ M}\Omega$ .....	84
Gráfico 28 – Tensão elétrica para 4 células mais espaçadas e $R = 7,1230 \text{ M}\Omega$ .....	85

Gráfico 29 – Potência em função da tensão aplicada no conjunto de células .....	87
Gráfico 30 – Potência em função da tensão aplicada no CP .....	87
Gráfico 31 – Tensão mecânica para 4 células ( $R = 7,123 \text{ M}\Omega$ ) .....	88
Gráfico 32 – Tensão mecânica para 4 células mais espaçadas ( $R = 7,123 \text{ M}\Omega$ ).....	89
Gráfico 33 – Tensão mecânica para 8 células ( $R = 3,5615 \text{ M}\Omega$ ) .....	89
Gráfico 34 – Tensão mecânica para 16 células ( $R = 1,7807 \text{ M}\Omega$ ) .....	89
Gráfico 35 – Tensão mecânica para a situação de 5 Hz e menores resistências elétricas .....	90
Gráfico 36 – Potência elétrica para o conjunto de 4 células.....	94
Gráfico 37 – Voltagem para o conjunto de 4 células .....	94
Gráfico 38 – Potência elétrica para o conjunto de 4 células mais espaçadas .....	96
Gráfico 39 – Voltagem para o conjunto de 4 células mais espaçadas .....	96
Gráfico 40 – Potência elétrica para o conjunto de 8 células.....	98
Gráfico 41 – Voltagem para o conjunto de 8 células .....	98
Gráfico 42 – Potência elétrica para o conjunto de 16 células.....	100
Gráfico 43 – Voltagem para o conjunto de 16 células .....	100
Gráfico 44 – Potência gerada para a aplicação de 5 Hz em laboratório .....	101
Gráfico 45 – Potência gerada para a aplicação de 10 Hz em laboratório .....	101
Gráfico 46 – Potência gerada para a aplicação de 20 Hz em laboratório .....	102
Gráfico 47 – Potência gerada em laboratório a partir das tensões nas células .....	103
Gráfico 48 – Potência gerada em laboratório a partir das tensões no CP.....	104
Gráfico 49 – Comparação entre as potências elétricas para 4 células .....	108
Gráfico 50 – Comparação entre as potências elétricas para 4 células+e .....	108
Gráfico 51 – Comparação entre as potências elétricas para 8 células .....	109
Gráfico 52 – Comparação entre as potências elétricas para 16 células .....	109

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dados de geração de energia no pavimento rodoviário.....	51
Tabela 2 – Coordenadas das células piezoelétricas (em mm, a partir da borda).....	58
Tabela 3 – Tensões reais aplicadas no CP e nas células.....	59
Tabela 4 – Parâmetros físicos e elétricos para o protótipo.....	60
Tabela 5 – Dimensões dos corpos de prova da mistura asfáltica.....	66
Tabela 6 – Volume de vazios dos corpos de prova.....	67
Tabela 7 – Propriedades da célula piezoelétrica.....	67
Tabela 8 – Dados de tráfego para o km 33 da BR-222.....	72
Tabela 9 – Tensões elétricas para os valores ótimos de resistência.....	76
Tabela 10 – Tensões elétricas máximas obtidas nas simulações.....	83
Tabela 11 – Equações para obtenção da potência a partir da carga aplicada.....	86
Tabela 12 – Tensão mecânica observada.....	91
Tabela 13 – Respostas elétricas para a situação de 4 células.....	93
Tabela 14 – Respostas elétricas para a situação de 4 células mais espaçadas.....	95
Tabela 15 – Respostas elétricas para a situação de 8 células.....	97
Tabela 16 – Respostas elétricas para a situação de 16 células.....	99
Tabela 17 – Equações para obtenção da potência elétrica (laboratório).....	103
Tabela 18 – Percentuais de variação entre as simulações e o laboratório.....	107
Tabela 19 – Potência simulada para trecho da BR-222 na situação ideal.....	112
Tabela 20 – Potência simulada para trecho da BR-222 na situação com limitações.....	112
Tabela 21 – Preços dos equipamentos.....	113
Tabela 22 – Serviços de pavimentação.....	114

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

Aneel	Agência Nacional de Energia Elétrica
A	Área da célula piezoelétrica
Ac	Área de contato
ABRACE	Associação Brasileira de Grandes Consumidores Industriais de Energia e de Consumidores Livres
ANFAVEA	Associação Nacional de Fabricantes de Veículos Automotores
CCEE	Câmara de Comercialização de Energia Elétrica
E	Campo elétrico externo
c	Capacitância interna do protótipo
Ce	Carga por eixo
CPTEC	Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
L	Comprimento da figura
CA	Concreto Asfáltico
$\epsilon_0$	Constante de permissividade no vácuo
$\epsilon_r$	Constante de permissividade relativa
g	Constante de tensão piezoelétrica
d	Constante piezoelétrica
CP	Corpo de prova
CA	Corrente alternada
I	Corrente elétrica
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
CO <sub>2</sub>	Dióxido de carbono
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
SO <sub>2</sub>	Enxofre
h	Espessura da célula piezoelétrica
FN	<i>Flow Number</i>
PVDF	Fluoreto de polivinilideno
F	Força
f	Frequência
$\omega_0$	Frequência de ressonância

IRI	<i>International Roughness Index</i>
LAMPO	Laboratório Multidisciplinar Em Pesquisa Odontológica
LOCEM	Laboratório de Telecomunicações e Ciência e Engenharia de Materiais
LWT	<i>Loaded Wheel Test</i>
MD	Módulo Dinâmico
CO	Monóxido de carbono
NO <sub>2</sub>	Nitrogênio
O <sub>3</sub>	Ozônio
PP	Polipropileno
P	Potência elétrica
PLD	Preço de Liquidação de Diferenças
P <sub>c</sub>	Pressão de contato
P <sub>i</sub>	Pressão de inflação
R <sub>E</sub>	Resistência externa
R <sub>I</sub>	Resistência interna
T <sub>c</sub>	Temperatura de Curie
V	Tensão elétrica
PZT	Titanato zirconato de chumbo
UTM	<i>Universal Test Machine</i>
UFC	Universidade Federal do Ceará
VMD	Volume Médio Diário



## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	17
<b>1.1</b>	<b>Considerações iniciais</b> .....	17
<b>1.2</b>	<b>Problema de pesquisa</b> .....	19
<b>1.3</b>	<b>Justificativa</b> .....	19
<b>1.4</b>	<b>Objetivos</b> .....	20
<b>1.4.1</b>	<i>Objetivo geral</i> .....	20
<b>1.4.2</b>	<i>Objetivos específicos</i> .....	20
<b>1.5</b>	<b>Estrutura da dissertação</b> .....	21
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	22
<b>2.1</b>	<b>Captação de energia</b> .....	22
<b>2.2</b>	<b>A influência das cargas e velocidades na estrutura do pavimento</b> .....	26
<b>2.3</b>	<b>O efeito piezoelétrico</b> .....	29
<b>2.4</b>	<b>Geração de energia elétrica em pavimentos</b> .....	39
<b>2.5</b>	<b>Análise exploratória da revisão</b> .....	50
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	56
<b>3.1</b>	<b>Primeira etapa: simulações multifísicas</b> .....	56
<b>3.1.1</b>	<i>Componentes do protótipo</i> .....	56
<b>3.1.2</b>	<i>Variáveis analisadas</i> .....	57
<b>3.1.3</b>	<i>O software COMSOL</i> .....	60
<b>3.1.3.1</b>	<i>Condições de contorno</i> .....	61
<b>3.1.3.2</b>	<i>Limitações das simulações</i> .....	63
<b>3.2</b>	<b>Segunda etapa: ensaios laboratoriais</b> .....	64
<b>3.2.1</b>	<i>Materiais</i> .....	64
<b>3.2.1.1</b>	<i>Protótipo</i> .....	64
<b>3.2.1.2</b>	<i>Mistura asfáltica</i> .....	66
<b>3.2.1.3</b>	<i>Célula piezoelétrica</i> .....	67
<b>3.2.2</b>	<i>Procedimento de ensaio</i> .....	68
<b>3.2.2.1</b>	<i>Módulo dinâmico adaptado</i> .....	68
<b>3.2.2.2</b>	<i>Ensaio de compressão</i> .....	70
<b>3.2.3</b>	<i>Limitações dos ensaios laboratoriais</i> .....	71
<b>3.3</b>	<b>Terceira etapa: simulação em ambiente real</b> .....	72
<b>3.4</b>	<b>Custos de aplicação</b> .....	73

<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	74
<b>4.1</b>	<b>Análise das simulações multifísicas</b> .....	74
<b>4.1.1</b>	<i>Tensões e potências elétricas</i> .....	74
<b>4.1.2</b>	<i>Tensão mecânica</i> .....	88
<b>4.2</b>	<b>Análise dos ensaios laboratoriais</b> .....	92
<b>4.2.1</b>	<i>Respostas elétricas</i> .....	92
<b>4.2.2</b>	<i>Compressão mecânica na célula piezoelétrica</i> .....	104
<b>4.3</b>	<b>Análise comparativa entre as simulações computacionais e os ensaios laboratoriais</b> .....	105
<b>4.4</b>	<b>Análise da simulação em ambiente real para o protótipo simulado</b> .....	110
<b>4.5</b>	<b>Análise dos custos de aplicação do protótipo simulado</b> .....	113
<b>5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	116
<b>5.1</b>	<b>Principais contribuições</b> .....	116
<b>5.2</b>	<b>Principais constatações</b> .....	116
<b>5.2.1</b>	<i>Principais resultados com relação às simulações multifísicas</i> .....	116
<b>5.2.2</b>	<i>Principais resultados com relação aos ensaios de laboratório</i> .....	118
<b>5.2.3</b>	<i>Principais resultados com relação à simulação do protótipo em ambiente real</i> ...	119
<b>5.3</b>	<b>Sugestões para trabalhos futuros</b> .....	119
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	121
	<b>APÊNDICE I – MANUAL DE EXECUÇÃO DAS SIMULAÇÕES</b> .....	130

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Considerações iniciais

As mudanças climáticas tem sido um dos temas mais emergentes da sociedade atual, frente às crescentes questões de poluição ambiental, como a elevada quantidade de resíduos de toda ordem e as emissões de gases ozônio (O<sub>3</sub>), monóxido de carbono (CO), os dióxidos de carbono (CO<sub>2</sub>), de nitrogênio (NO<sub>2</sub>) e de enxofre (SO<sub>2</sub>). Além disso, a quantidade limitada de recursos não-renováveis, como o petróleo, gás natural e carvão, acaba gerando um aumento da demanda por energia limpa e sustentável.

Conforme a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), a matriz elétrica brasileira é predominantemente composta por fontes renováveis, das quais a hídrica representa 64,9 % do total da oferta interna. Ainda há a utilização de fontes como a eólica e solar, que representam, respectivamente, 8,6 % e 1,0 % do percentual total. No Estado do Ceará, a energia eólica representa 43,6 % do total gerado, enquanto a solar condiz a 3,2 %, sendo a maior fatia representada pela energia proveniente de termelétricas, com 53,1 % (EPE, 2020a). No entanto, o Ceará não é autossuficiente do ponto de vista energético, dependendo da produção das hidrelétricas para atender à demanda por energia elétrica.

Contudo, em 2021, o Brasil vivencia um alerta crítico relacionado às questões energéticas. Frente ao baixo índice de chuvas nas regiões centro-oeste e sudeste, os volumes de água das hidrelétricas foram reduzidos, impossibilitando suprir o percentual correspondente de sua participação na matriz energética brasileira. Dessa forma, foi necessária a ativação de usinas termelétricas, ocorrendo um acréscimo no percentual proveniente de fontes não-renováveis que, em 2019, atingiu 17,7 % da matriz. Como forma de mitigação do problema, a captação e geração de energia por fontes renováveis têm sido utilizada. (EPE, 2020a; G1, 2021a; CNN BRASIL, 2021; AGÊNCIA SENADO, 2021).

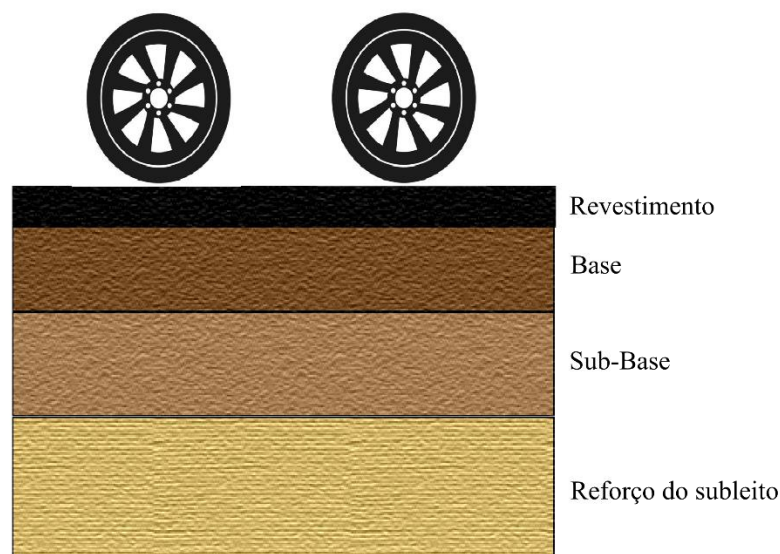
De acordo com o princípio da conservação da energia, em um sistema isolado ela permanece constante, ou seja, se conserva e, após o uso, se transforma e se propaga no espaço (ROSA, 2005). Assim, existem outras formas de energia que podem ser obtidas a partir da transformação direta de energia ambiente (hidráulica, solar, eólica, mecânica, etc.) para energia elétrica, por meio de um material ou mecanismo de transdução. Alguns dos materiais de captação de energia mais comuns para conversão em energia elétrica são: (i) usinas hidrelétricas para geração de energia a partir da água; (ii) painéis solares fotovoltaicos para

transformar energia solar; (iii) geradores eólicos para converter a energia dos ventos e (iv) transdutores piezoelétricos para conversão da vibração proveniente da energia mecânica.

A captação de energia elétrica através da piezoelectricidade tem apresentado vantagens (independência de fatores climáticos, não necessita de grandes áreas para instalação, elevada quantidade de potência gerada) quando comparada a outros métodos de obtenção de energia limpa como a energia eólica, solar e a térmica (KOKKINOPOULOS *et al.*, 2014). Os materiais com propriedades piezoelétricas geram uma tensão elétrica quando induzidos por tensão ou deformações variáveis com o tempo. É necessário, então, que o transdutor piezoelétrico seja altamente sensível e esteja localizado o mais próximo possível da área de contato para absorver as vibrações e deformações de forma efetiva. A partir da conversão da energia mecânica liberada no pavimento rodoviário, torna-se possível gerar eletricidade suficiente para a alimentação de semáforos, sistemas de monitoramento estrutural de saúde e para carregar veículos elétricos (NIASAR *et al.*, 2019).

O pavimento pode ser classificado como rígido, quando composto por placas de concreto ou flexível, quando revestido por misturas asfálticas. No geral, a sua estrutura é composta por uma camada de revestimento, seguida das camadas granulares (base, sub-base e, se necessário, um reforço do subleito), construídas sob o subleito. É importante ressaltar que, no projeto de um pavimento, o estado de tensões e deformações aos quais a estrutura estará submetida deve ser determinado, de forma a possibilitar o dimensionamento para a vida útil de projeto sem a intercorrência de defeitos estruturais. A Figura 1 apresenta a estrutura de um pavimento flexível.

Figura 1 – Camadas do pavimento flexível



Fonte: O autor (2021)

O pavimento rodoviário recebe em sua estrutura o tráfego de milhões de veículos que, conseqüentemente, geram vibrações e deformações em suas camadas. No Brasil, de acordo com o Ministério da Infraestrutura (2021), a frota veicular é composta por 108.222.494 veículos, sendo 58.125.111 apenas de automóveis. Essas vibrações podem, não só causar danos ao pavimento, mas também ocasionar um desperdício energético, visto a quantidade de energia liberada pelos veículos (ZHU *et al.*, 2012). Dessa forma, a piezoelectricidade surge como uma alternativa de solução, permitindo a captação das vibrações e deformações ocasionadas.

Diante do exposto e considerando o aumento de 26,5 % no consumo de energia elétrica pelo consumidor livre no estado do Ceará, quando comparado com dados do mesmo período em 2020 (CCEE, 2021), torna-se necessária a proposição de alternativas que complementem a matriz energética do país, sem causar danos ambientais e financeiros à população. Ainda, a Empresa de Pesquisa Energética (EPE) prevê um crescimento de 3,6 % ao ano até 2029 na demanda de energia no Brasil, um acréscimo de 2.900 megawatts médios anualmente (EPE, 2020b). Logo, atendê-la de modo eficiente, sustentável e acessível aos consumidores será um grande desafio para os próximos anos.

## **1.2 Problema de pesquisa**

O problema de pesquisa deste trabalho está relacionado à robustez exigida pela matriz energética brasileira, frente às dimensões continentais do país, necessitando de alternativas que a complemente, distribuindo energia para todas as localidades. Dessa forma, considerando a grande extensão de rodovias, há uma subutilização destas, que poderiam estar sendo aproveitadas para complementar o sistema elétrico do país, uma vez que há tecnologia para tal.

## **1.3 Justificativa**

Existe uma demanda internacional com relação à geração de energias e ao uso de tecnologias mais limpas para sua produção. Há preocupação com a utilização de fontes não-renováveis e a possível escassez de recursos hídricos para produção de energia, associando-se às condições de incerteza trazidas pelas mudanças climáticas. Assim, a utilização de matrizes sustentáveis na política energética, que priorizem o desenvolvimento de tecnologias viáveis

para o abastecimento e o acesso à energia, possibilita o crescimento econômico, social e ambiental de uma região.

Destaca-se também que, por o Brasil ser um país com dimensões continentais, há uma limitação de geração de energia, em que existem muitas áreas onde não tem disponibilidade de energia elétrica, devido a necessidade de uma rede que possibilite a chegada àquele ponto. Logo, torna-se importante que sejam investigadas novas alternativas e tecnologias que possam complementar a matriz elétrica brasileira, inclusive utilizando estruturas já existentes, como é o caso das estradas.

A área rodoviária se mostra promissora na geração de energias renováveis (por exemplo, mecânica e solar), desde que sejam realizadas pesquisas que fundamentem a sua prática. O uso da energia mecânica, na concepção de rodovias, pode representar uma alternativa para construção de estradas geradoras de energia, contribuindo para o desenvolvimento sustentável de cidades inteligentes.

Considera-se, no entanto, que o estágio de desenvolvimento do uso dessa tecnologia na pavimentação ainda é inicial no âmbito das universidades e centros de pesquisas. Dessa forma, este trabalho justifica-se diante da necessidade de inserção de novos métodos de captação de energias renováveis, que possibilitem o desenvolvimento sustentável de grandes centros urbanos sem causar danos ambientais ao sistema natural, investigando a piezoelectricidade como possível alternativa.

## **1.4 Objetivos**

### ***1.4.1 Objetivo geral***

O objetivo geral deste trabalho é investigar o uso da piezoelectricidade como fonte de energia renovável aplicada no pavimento rodoviário.

### ***1.4.2 Objetivos específicos***

Com o intuito de atingir o objetivo geral, foram delineados alguns objetivos específicos:

- a) propor um protótipo piezoelétrico para captação e geração de energia no pavimento rodoviário;

- b) otimizar o protótipo piezoelétrico, de forma a maximizar a quantidade de energia gerada e diminuir a tensão exercida nas células;
- c) avaliar a quantidade de energia gerada no protótipo por meio de simulações multifísicas e ensaio laboratorial, variando carga, frequência, resistência elétrica, espaçamento e quantidade de células;
- d) comparar a realização de ensaios laboratoriais com simulações computacionais realizadas com os mesmos parâmetros e;
- e) analisar os custos da aplicação de um protótipo piezoelétrico simulado, verificando o período de retorno do investimento.

### **1.5 Estrutura da dissertação**

O primeiro capítulo introduz a questão das mudanças climáticas e o impacto ambiental relativo às energias renováveis e não-renováveis e a possibilidade do uso de novas tecnologias de geração de energia em pavimentos rodoviários, frente ao elevado tráfego ao qual essas estruturas estão submetidas. Ainda, são apresentadas a problemática, a justificativa e os objetivos geral e específicos que nortearam este trabalho. Conclui-se o capítulo com a descrição sumária do conteúdo desta dissertação.

O segundo capítulo apresenta uma revisão bibliográfica dividida em quatro partes: (i) formas de captação de energia; (ii) a influência das cargas e velocidade na estrutura do pavimento; (iii) o efeito piezoelétrico e (iv) métodos de produção de energia nos pavimentos rodoviários em níveis internacional e nacional.

O terceiro capítulo aborda os materiais e métodos utilizados para a execução deste estudo, dividindo-se em quatro etapas: (i) simulações computacionais; (ii) ensaio laboratorial; (iii) simulação de aplicação em ambiente real e (iv) análise de custos.

No quarto capítulo são analisados os resultados obtidos pela realização das três primeiras etapas, observando se há correlação entre as simulações e o ensaio laboratorial, bem como propondo a aplicação do sistema em locais da cidade de Fortaleza/Ceará. Ainda, é feita uma análise dos custos e benefícios da aplicação da tecnologia.

O quinto capítulo apresenta as conclusões deste trabalho e as sugestões para trabalhos futuros.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

No presente capítulo apresenta-se uma revisão da literatura acerca das formas de captação de energia, seguida da abordagem dos efeitos do tráfego na estrutura do pavimento rodoviário, a partir da aplicação de variadas tensões e velocidades. Na sequência, abordou-se o efeito piezoelétrico, com os principais conceitos e equações que regem a sua utilização. Posteriormente, foram relatadas as principais pesquisas envolvendo geração de energia elétrica em rodovias em nível nacional e internacional e, por fim, foi realizada uma análise crítica das pesquisas relatadas.

### 2.1 Captação de energia

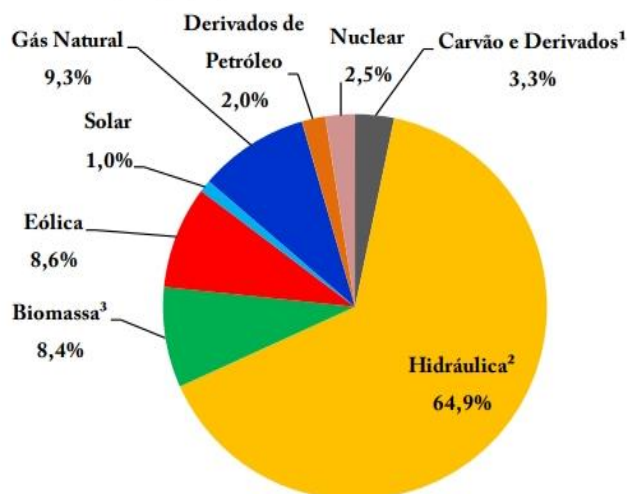
Um dos problemas da sociedade atual é atender a demanda energética. Em conformidade com dados da Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE), no estado do Ceará houve um aumento de 26,5 % no consumo de energia pelo consumidor livre, ao comparar abril de 2021 com o mesmo período de 2020. Esse percentual é acima do dobro do observado no Brasil, com crescimento de 13,1 %. Observa-se, então, um *déficit* quando analisado o aumento em megawatts por parte das distribuidoras, havendo um crescimento de 0,3 % em nível nacional e de 2,0 % no Ceará (CCEE, 2021).

A captação de energia (do inglês *energy harvesting*) é descrita como o processo de conversão da energia ambiente em outras formas como, por exemplo, a energia elétrica (KAZMIERSKI E BEEBY, 2011). A energia é captada, convertida, armazenada e utilizada através de fontes diversas, empregando interfaces e dispositivos de armazenamento (KHALIGH E ONAR, 2010). Existem dois grupos principais de captação de energia: (i) as fontes de macro energia, associadas à energia hídrica, solar, eólica e oceânica e (ii) as fontes de micro energia, relacionadas às provenientes de vibrações mecânicas, movimento acústico, eletrostática, eletromagnética, calor e outras (KHALIGH E ONAR, 2010; HARB, 2011).

Segundo a EPE (2020a), o Brasil dispõe de uma matriz elétrica predominantemente de fontes renováveis, em que a hídrica representa 64,9 % do total da oferta interna (ver Figura 2). Contudo, devido à baixa incidência de chuvas nas áreas em que estão instaladas as hidrelétricas, tem ocorrido um acréscimo quanto ao percentual proveniente de fontes não renováveis, representando 17,7 % em 2019.



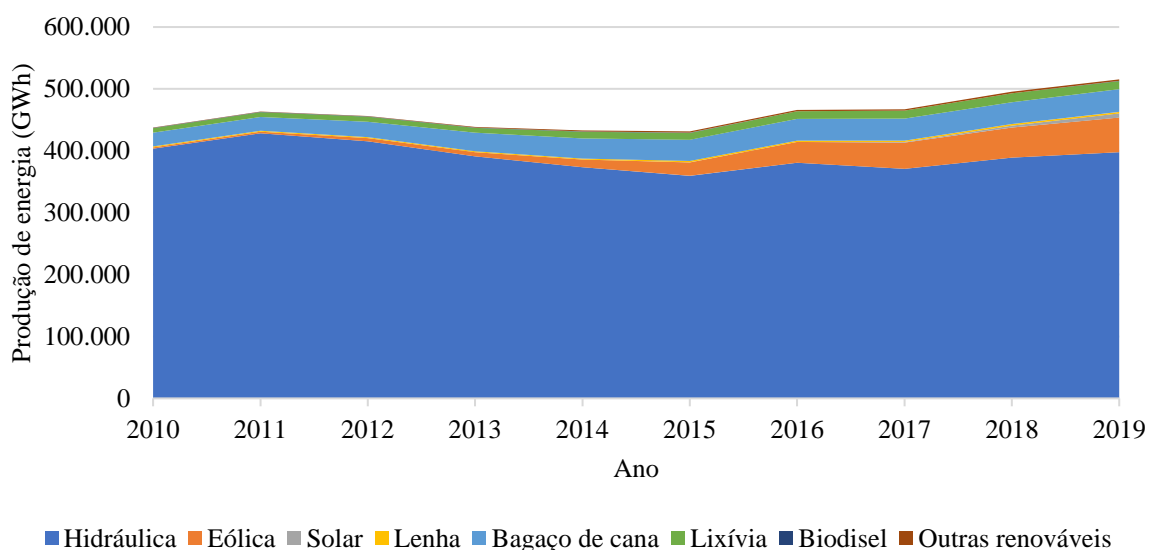
Figura 2 – Matriz elétrica do Brasil em 2019



Fonte: EPE (2020a)

Esse avanço é perceptível com o tempo, em que as fontes renováveis passaram de 437.409 GWh produzidos em 2010 para 515.438 GWh em 2019, representando um aumento de quase 18 %. Quando detalhada a matriz renovável (ver Gráfico 1), há destaque para a energia eólica, que aumentou de 2.177 GWh produzidos em 2010 para 55.978 GWh em 2019, sendo elevada em mais de 2.400 %. A energia solar, apesar de ainda em ascendência, passou de 0,0 GWh em 2010 para 6.655 GWh em 2019. Contudo, as fontes não-renováveis passaram de 78.389 GWh para 110.890 GWh, um crescimento de 41,5 %, o que se torna preocupante frente às questões climáticas e ambientais (EPE, 2020a).

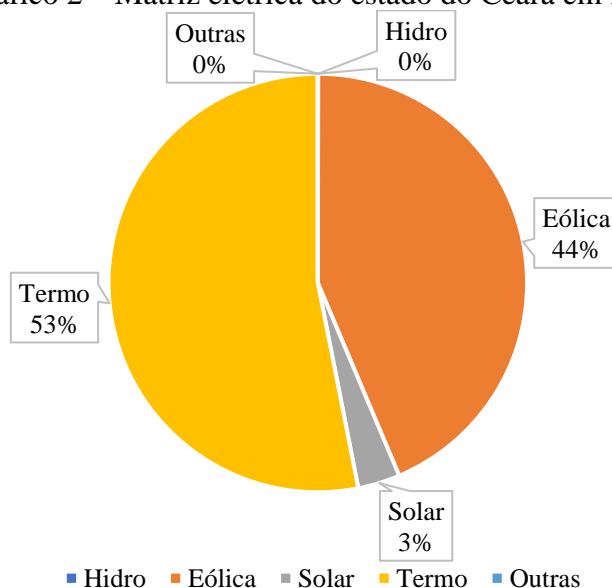
Gráfico 1 – Matriz elétrica renovável do Brasil (por ano)



Fonte: Elaborado pelo autor (2021) a partir de dados da EPE (2020a)

No estado do Ceará, a situação é um pouco diferente da nacional. Em termos gerais, foram produzidos 15.798 GWh, 12.957 GWh e 14.396 GWh nos anos de 2017, 2018 e 2019, respectivamente. Quando considerado o dado mais recente, observa-se que dos 14.396 GWh produzidos em 2019, 6.279 GWh eram provenientes da energia eólica, considerada a principal fonte renovável do estado, sendo seguida da energia solar com 469 GWh, enquanto que a hidráulica corresponde a apenas 4 GWh (ver Gráfico 2). Contudo, há uma preocupação, visto que 7.643 GWh são gerados a partir de termoelétricas, a base de carvão.

Gráfico 2 – Matriz elétrica do estado do Ceará em 2019



Fonte: Elaborado pelo autor a partir de dados de EPE (2020a)

De acordo com dados do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC), as chuvas ficaram abaixo da média para todos os anos da última década (aproximadamente 1.300 mm), quando observado para as regiões Sudeste e Centro-Oeste. Nesses valores, destaca-se o ano de 2014, em que foram acumulados apenas 778 mm na região Sudeste e 1.103 mm na Centro-Oeste, representando uma queda de 40 % e 15 %, respectivamente. São nessas regiões que se localizam as hidrelétricas responsáveis por mais da metade da energia elétrica total do país (CPTEC, 2021).

A redução da quantidade de chuvas provoca, então, o aumento no preço da energia elétrica fornecida aos consumidores. Em concordância com a Associação Brasileira de Grandes Consumidores Industriais de Energia e de Consumidores Livres (ABRACE), a média do Preço de Liquidação de Diferenças (PLD) em setembro de 2020 foi de R\$ 77,77/MWh para a região Nordeste e de R\$ 100,84/MWh para as demais regiões do país. Esse

valor representa um aumento de 9,3 % para a região Nordeste, 48,8 % para a região Norte e de 21,7 % para as demais regiões, quando comparados com o PLD médio de 2018 (ABRACE, 2018, 2020).

Em decorrência do baixo volume das hidrelétricas, tem ocorrido a ativação das usinas termelétricas e, devido ao custo elevado de produção de energia, o valor tem sido repassado aos consumidores diretos. O sistema de bandeiras tarifárias busca compensar o aumento desses custos. Assim, em julho de 2021 a Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel), aumentou em 52 % o patamar 2 da bandeira vermelha nas contas de energia elétrica, atingindo R\$ 9,49 por cada 100 kWh de consumo (G1, 2021a; CORREIO BRAZILIENSE, 2021).

Como medida para reduzir os impactos ambientais e financeiros, tem crescido o investimento em fontes alternativas renováveis de energia. Conforme a Aneel, a quantidade de unidades no Ceará com geração própria de energia, por meio de painéis solares, dobrou em 2020 com relação a dados de 2019. De acordo com a Aneel, em termos quantitativos, a potência instalada cresceu de 66,9 GW para 156,7 GW em um ano (G1, 2021b).

Rosa (2005) ressalta que a energia solar é a mais abundante, dentre os recursos renováveis. O autor destaca que a relativa estabilidade de temperatura da Terra sugere um quase equilíbrio entre a entrada e saída de energia, sendo a radiação solar incidente responsável por 173.000 TW dessa inserção.

Outra fonte renovável em ascensão, principalmente em estados como o Ceará, é a energia eólica. Com base em Gannoum (2014), a indústria do setor eólico apresentou uma taxa média anual de crescimento de 2,3 GW desde o ano de 2009. Pinto e Santos (2019) apontam que, em 2015, o Brasil atingiu 21.626 GWh em termos totais de geração de energia eólica, representando um crescimento da ordem de 90 vezes o registrado em 2006 (23 GWh). Um fator que contribui para o crescimento da energia eólica é a redução nos preços dos parques eólicos. O custo do investimento passou de R\$ 7.497,00/kW instalado em 2006 para R\$ 4.313,00/kW instalado em 2010 (RICOSTI, 2011).

Como forma de micro geração de energia, a vibração se insere de forma promissora, podendo ser convertida por meio de sistemas eletromecânicos, eletromagnéticos e piezoelétricos (HARB, 2011). Assim, por meio das fontes de captação de energia investigadas, Harb (2011) destaca dois grupos de tecnologias com potencial para serem implementados em pavimentos: (i) utilizando a radiação solar e (ii) a energia mecânica proveniente das cargas dos veículos.

## 2.2 A influência das cargas e velocidades na estrutura do pavimento

De acordo com Medina e Motta (2015), o crescimento demográfico nas grandes cidades brasileiras demanda mais transporte em massa e, conseqüentemente, para assegurar o desenvolvimento do local, mais investimentos em infraestrutura. Historicamente, 60 % da carga e 95 % dos passageiros que circulam no Brasil são transportados por rodovias (MEDINA E MOTTA, 2015).

Dados da Associação Nacional de Fabricantes de Veículos Automotores (ANFAVEA) mostram que, em 2020, foram licenciados 2.058.437 veículos automotores novos produzidos no país, sendo 89.678 caminhões e 13.931 ônibus (ANFAVEA, 2021). Em janeiro de 2021, a frota veicular automotiva no Brasil era de 108.222.494, enquanto que há 20 anos atrás equivalia a 29.722.950 veículos, havendo um crescimento de, aproximadamente, 364 %. Na composição da frota atual, encontram-se 2.883.818 caminhões, 661.314 ônibus e 58.125.111 automóveis (MINISTÉRIO DA INFRAESTRUTURA, 2021).

Dessa forma, essa quantidade de veículos impõe elevadas requisições de tensões nos pavimentos rodoviários. No caso, para uma única roda de veículo que trafegue sobre a estrutura do pavimento, essas solicitações podem ser caracterizadas por: (i) magnitude da carga por roda ou força aplicada (N ou kgf); (ii) pressão de contato do pneu com o pavimento (MPa, kPa ou kgf/cm<sup>2</sup>); (iii) área de contato (cm<sup>2</sup>) e (iv) velocidade de aplicação ou tempo de duração. Ainda, o número de aplicações das cargas é um dos fatores determinantes para a vida útil da estrutura (YODER E WITCZAK, 1975).

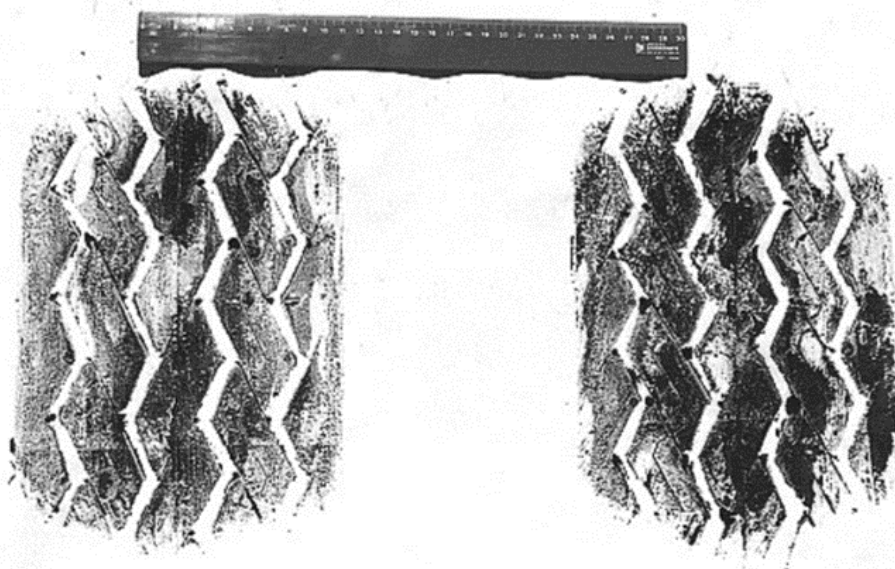
A magnitude da carga de uma roda varia de, aproximadamente, 1.980 N até 198.000 N, englobando automóveis e grandes aviões, respectivamente. A força e a pressão transmitem energia mecânica à estrutura do pavimento, que, por sua vez, a dissipa entre as suas camadas. Sendo assim, a área de contato do pneu com o pavimento é obtida a partir da relação entre a carga aplicada e a pressão de enchimento do pneu (YODER E WITCZAK, 1975).

Quando comparado ao pavimento, o pneu possui uma deformabilidade cerca de 20 vezes maior. Contudo, ambas as deformações são elásticas e, após cessada a aplicação da carga, retornam à sua forma original. As pressões no pavimento rodoviário variam de 0,15 MPa a 0,60 MPa e a força aplicada pelo pneu de um automóvel e de um caminhão de eixo simples típico são aproximadamente iguais a 1.980 N e 24.500 N, respectivamente (YODER E WITCZAK, 1975; MEDINA E MOTTA, 2015).

Conforme Fernandes Júnior (1994) as hipóteses realizadas de que os efeitos da distribuição das pressões do pneu no pavimento eram dispensáveis, fizeram com que os métodos de dimensionamento considerassem apenas a carga por eixo. O autor relata estudos que comprovam o aumento da área de contato com a pressão de enchimento do pneu constante e a carga sendo elevada e a diminuição quando a carga é mantida constante e a pressão de enchimento é aumentada.

Albano (2000) desenvolveu um estudo sobre a pressão de contato dos pneus no pavimento. O autor realizou a medida dos valores da área de contato ( $A_c$ ) e determinou a pressão de contato ( $P_c$ ), o que permitiu uma comparação com modelos clássicos de pavimentos flexíveis apresentados por Boussinesq. Esses modelos eram constituídos por um meio homogêneo ou por meios estratificados, em que as áreas de contato são consideradas circulares e as pressões uniformemente distribuídas. A Figura 3 mostra a representação dessa área de contato dos pneus no pavimento.

Figura 3 – Representação da área de contato dos pneus no pavimento



Fonte: Albano (2000)

Albano (2000) percebeu que, para as cargas de 95 kN, 102 kN e 120 kN, a área de contato entre os pneus e a superfície do pavimento era menor que a  $A_c$  correspondente, sugerindo possibilidades mais severas de deterioração dos pavimentos. O autor também testou combinações da Carga por eixo ( $C_e$ ) e da Pressão de Inflação ( $P_i$ ) de 100 kN e 552 kPa (80 psi), 120 kN e 552 kPa (80 psi), bem como 120 kN e 620 kPa (90 psi), observando que a pressão de contato era maior que a de enchimento. Contudo, para a mecânica dos pavimentos,

essas pressões são iguais, o que acaba por subestimar os efeitos da carga por eixo e da pressão dos pneus.

Huang (2003) descreve que a forma geométrica da  $A_c$  que melhor representa a realidade é a de um retângulo completado nas extremidades menores por dois semicírculos. A  $A_c$  bruta é calculada por meio da Equação 1, sendo  $L$  o comprimento da figura e  $0,6L$  sua largura, conforme apresentado anteriormente na Figura 3.

$$A_c = 0,5227L^2 \quad (1)$$

Outro ponto importante é relativo à trajetória dos veículos em um mesmo ponto a partir de um determinado número de operações. Pereira (1985) relata que a cada 9 operações, apenas 4 incidem no mesmo ponto de análise, com uma taxa de 2,25 obtida da relação entre operações e coberturas.

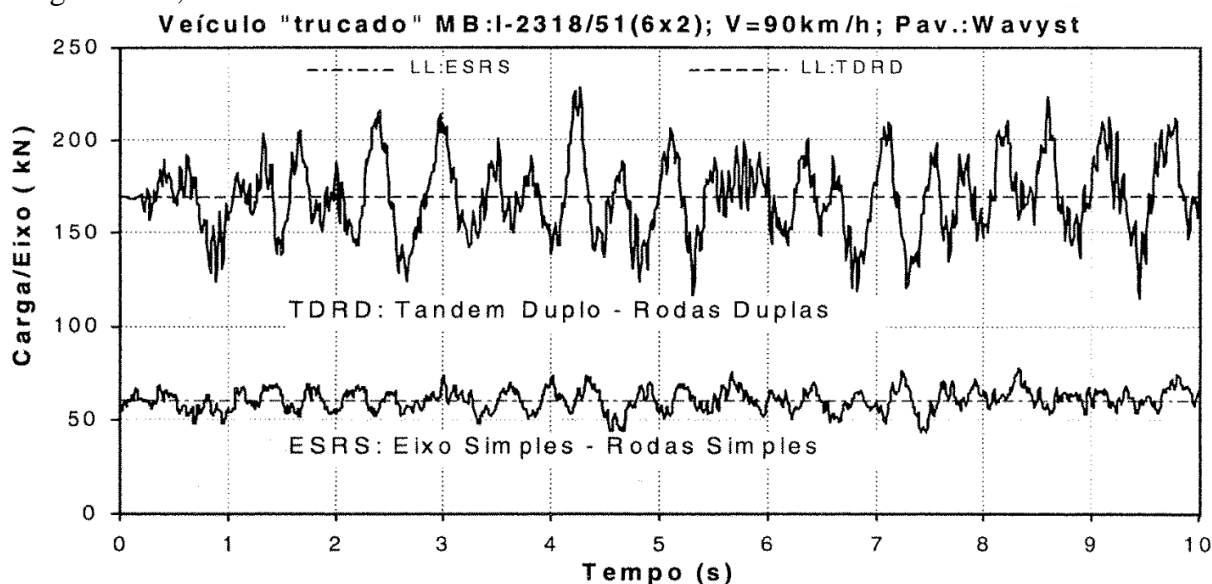
Duarte *et al.* (2017) ressaltam as diferentes situações de movimento dos veículos rodoviários, tais como rolamento livre, frenagem, acelerando ou girando. Cada uma dessas situações os submete a forças e momentos com distribuições distintas, que dependerão de suas características, tais como suspensão, geometria, massa e características dos pneus, entre outras. Dessa forma, esse comportamento torna-se essencial para estimar a quantidade de energia transmitida ao pavimento.

Cabe também destacar a influência da irregularidade longitudinal do pavimento na distribuição das cargas dos veículos para as suas camadas. De acordo com DNER (1994, p. 2), ela pode ser definida como “o desvio da superfície da rodovia em relação a um plano de referência, que afeta a dinâmica dos veículos, a qualidade do rolamento e as cargas dinâmicas sobre a via”. Posto isso, há a existência de um índice internacional para a medição da irregularidade, intitulado *International Roughness Index* (IRI), sendo um parâmetro estatístico (em m/km), formulado para quantificar os desvios da superfície do pavimento em relação à proposta em projeto (ALMEIDA *et al.*, 2019).

Fernandes Júnior e Barbosa (2000) simularam o impacto dinâmico gerado sobre irregularidades isoladas de um pavimento. Foi observado a geração de sobrecargas seguidas de alívios que, por sua vez, vão se dissipando até atingir o valor da carga estática (ver Figura 4). Os autores constataram que as sucessivas irregularidades fazem com que ocorram picos de sobrecarga e alívio por todo o perfil longitudinal do pavimento. Também foi destacado que a velocidade exerce influência no coeficiente de impacto ( $f$ ) para pavimentos com elevados

valores de IRI, destacando a relevância dos efeitos dinâmicos das cargas na estrutura do pavimento.

Figura 4 – Impacto da carga de um veículo “trucado” em um pavimento com irregularidades longitudinais, a 90 km/h.



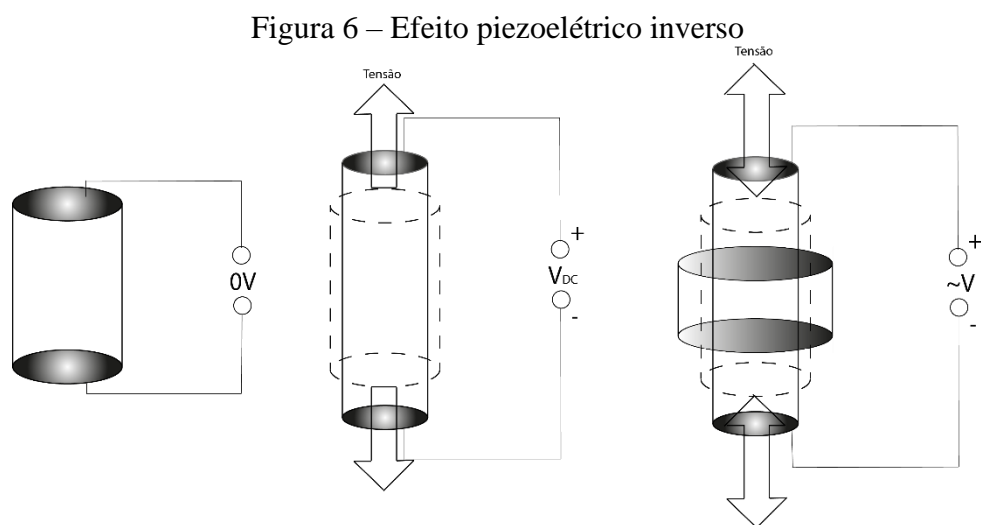
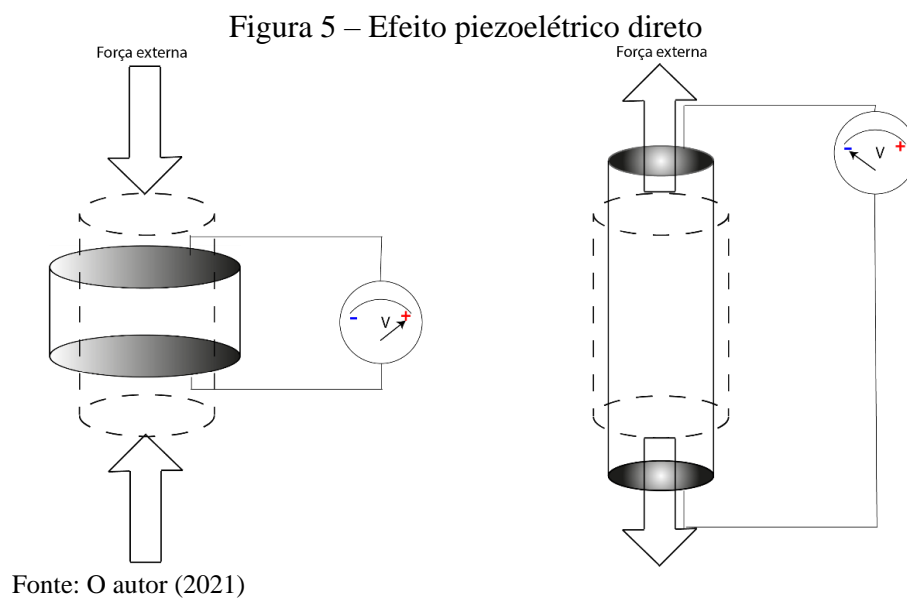
Fonte: Fernandes Júnior e Barbosa (2000)

Diante dos estudos investigados, ressalta-se a importância de considerar a área de contato do pneu com o pavimento para que seja possível estimar as regiões de influência da carga. Essas áreas são importantes para a definição do local de aplicação de materiais nas camadas dos pavimentos que sirvam para captar a energia nelas dissipada. Inclui-se, ainda, os parâmetros de comportamento do usuário (como velocidade e direção) e de características dos veículos e do pavimento, destacando a irregularidade longitudinal, como fatores que influenciam as tensões e deformações geradas.

### 2.3 O efeito piezoelétrico

O termo piezo é derivado do grego *piezein*, que significa pressionar ou pressão. Pierre e Jaques, os irmãos Curie, são relatados por Sousa *et al.* (2016) como os descobridores do efeito piezoelétrico em 1880, no final do século XIX. Os irmãos descobriram que o efeito piezoelétrico era exibido em seu estado natural em cristais de quartzo, conhecido como sal de Rochelle, em que ao serem submetidos a cargas mecânicas tornaram-se eletricamente carregados.

Conforme Callister (2016), a polarização elétrica é induzida no elemento como resultado de uma alteração dimensional, por meio de uma deformação mecânica produzida pela aplicação de uma força, representando o efeito direto da piezoelectricidade (ver Figura 5). Isso ocorre porque há um deslocamento da posição do centro de cargas negativas, que na posição neutra (sem aplicação de tensão), era igual a das cargas positivas (GAIOTTO, 2012). Ainda, em 1881, foi descoberto o efeito inverso (ver Figura 6) por Gabriel Lippmann, que deduziu matematicamente que alguns materiais se deformam mecanicamente ao serem eletricamente polarizados (SOUSA *et al.*, 2016).





Assim, antes de qualquer discussão, faz-se necessário conhecer o material e as propriedades do seu campo de atuação por meio de uma revisão sobre os conceitos dos materiais piezoelétricos. Segundo Syed (2001), as características são:

- a) tensão mecânica (T): relação entre a força aplicada e a área transversal do elemento;
- b) deformação (S): é a deformação mecânica, ou seja, proveniente da pressão exercida;
- c) campo elétrico (E): relação entre a tensão gerada ou aplicada à distância entre os eletrodos;
- d) deslocamento elétrico (D): produto entre a intensidade do campo elétrico (E) e a permissividade elétrica à tensão mecânica constante ( $\epsilon^T$ );
- e) permissividade elétrica ( $\epsilon$ ): fator de proporcionalidade entre o deslocamento elétrico (D) e um campo elétrico (E), com a aplicação de uma tensão mecânica constante (T). Esse deslocamento pode ser dado pela Equação 2:

$$D = \epsilon^T E \quad (2)$$

- f) constante piezoelétrica (d): está relacionada a deformação (S) desenvolvida como consequência da resposta a um campo elétrico (E) aplicado, sem tensão mecânica (T) aplicada. Os valores típicos estão entre 20 e 800 pico Coulomb por Newton (pC/N) aplicado, para cerâmicas piezoelétricas de PZT. Pode ser obtida pela Equação 3:

$$S = d^T E \quad (3)$$

- g) constante de elasticidade piezoelétrica ou conformidade ( $s^E$ ): relaciona a tensão aplicada em razão de uma tensão mecânica (T), com atuação de um campo elétrico (E) constante. O inverso da constante de conformidade ( $s^E$ ) é conhecido como Módulo de Young que é dado pela Equação 4:

$$S = s^E T \quad (4)$$

- h) coeficiente de acoplamento eletromecânico (k): é a capacidade de um material piezoelétrico converter a energia mecânica em energia elétrica e vice-versa.

Também pode ser definida como a eficiência piezoelétrica do elemento, sendo obtida pela Equação 5. Esse valor é único para cada modo de vibração, apresentando um número menor que a unidade. Também há a possibilidade de relacioná-lo com outros coeficientes piezoelétricos, conforme Equação 6. Os valores típicos variam de 0,02 (2 % de eficiência) a 0,75 (75 % de eficiência), para cerâmicas piezoelétricas de PZT.

$$k = \sqrt{\frac{\text{EnergiaElétricaArmazenada}}{\text{EnergiaMecânicaDeEntrada}}} \quad (5)$$

$$k = \frac{d}{\sqrt{s^E \epsilon^T}} \quad (6)$$

- i) fator de qualidade mecânica ( $Q_m$ ): medida das perdas mecânicas do material, ou seja, relacionado ao amortecimento. Ele é essencial para se determinar a qualidade de resposta, permitindo analisar a nitidez do pico de ressonância

Kang *et al.* (2016) abordam que os materiais piezoelétricos foram investigados para atingirem alta constante de carga piezoelétrica ( $d$ ), constante de voltagem ( $g$ ) e fator de acoplamento mecânico ( $Q_m$ ). Uchino (2000) expressa cada fator da seguinte forma:

- a) Tensão piezoelétrica (pm/V) e carga (pC/N) constante regidas pela Equação 7.

$$x = dE \quad (7)$$

em que  $x$  e  $E$  são tensão e campo elétrico externo.

- b) Constante de tensão piezoelétrica (Vm/N) a partir das Equações 8 e 9.

$$g = \frac{d}{\epsilon_0 \epsilon_r} \quad (8)$$

$$E = gx \quad (9)$$

em que  $g$  é a constante de tensão piezoelétrica.

- c) Energia elétrica inicial (Equação 10).

$$El_0 = \frac{1}{2} \epsilon_0 \epsilon_r E^2 \quad (10)$$

d) Energia mecânica armazenada (Equação 11).

$$E_{m_a} = \frac{x^2}{s} \quad (11)$$

em que  $s$  é a tensão aplicada.

e) Fator de acoplamento eletromecânico, obtido pela relação entre as Equações 10 e 11 (Equação 12).

$$k^2 = \frac{d^2}{\epsilon_0 \epsilon_r s} \quad (12)$$

f) Fator de qualidade mecânica (Equação 13).

$$Q_m = \frac{\omega_0}{2\Delta\omega} \quad (13)$$

em que  $\omega_0$  é a frequência de ressonância.

Kang *et al.* (2016) ressaltam que quanto maior o coeficiente de transdução, obtido pelo produto entre  $d \times g$ , mais elevada será a potência elétrica de saída. Portanto, os valores de  $d$  e  $g$  são os critérios essenciais de escolha para os materiais piezoelétricos utilizados em sistemas de captação de energia.

A tensão elétrica (V) gerada no elemento com essa característica é obtida a partir da Equação 14, na qual a voltagem cresce de forma linear. Contudo, por meio de simulações em um *software* de análises multifísicas, Mota (2019) verificou que esse aumento depende mais da espessura da célula do que de sua área.

$$V = \frac{dFh}{\epsilon_r \epsilon_0 A} \quad (14)$$

em que  $d$  (C/N) é a constante piezoelétrica,  $F$  (N) é a força aplicada,  $h$  (m) é a espessura e  $A$  (m<sup>2</sup>) é a área da célula. As constantes de permissividade relativa e de permissividade no vácuo são representadas por  $\epsilon_r$  (F/m) e  $\epsilon_0$  (F/m), respectivamente. As variáveis  $d$  e  $\epsilon_r$  dependem do tipo de material utilizado.

É válido ressaltar que a constante de permissividade relativa corresponde a uma medida do aumento de capacidade de armazenar energia no meio dielétrico sob efeito de um campo elétrico. Ela também pode estar associada com a quantidade de cargas elétricas que podem ser armazenadas em um determinado volume. Quanto maior o seu valor, maior a quantidade de cargas elétricas que o capacitor associado será capaz de armazenar em suas armaduras. Ainda, a permissividade do vácuo, ou espaço livre, corresponde a  $8,854 \times 10^{-12}$  F/m (Farads por metro).

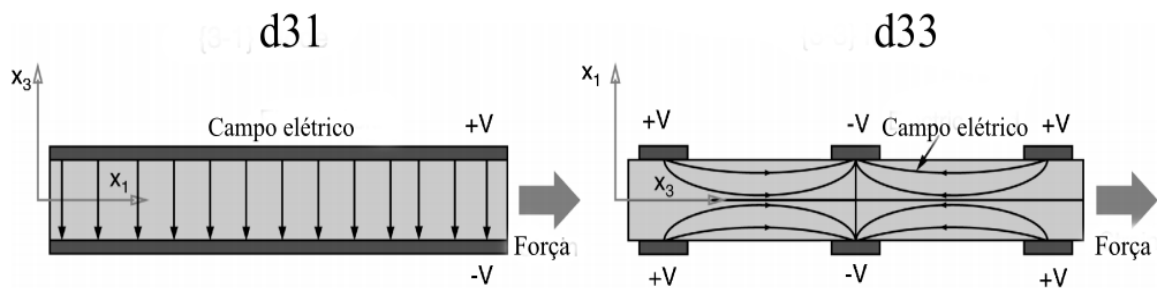
De acordo com Mitcheson *et al.* (2008), o efeito direto pode ser utilizado para micro geração de energia. Isso torna-se possível devido ao armazenamento de parte do trabalho mecânico, gerado por meio da aplicação de uma força externa, como energia de tensão elástica e parte no campo elétrico associada com a polarização induzida do material.

Baldwin *et al.* (2011) descrevem a piezoeletricidade como um efeito que ocorre naturalmente em estruturas policristalinas, que não possuam nenhum centro de simetria, em que os eixos polares de dipolos não possuam uma direção comum. Logo, quando um esforço mecânico de compressão é aplicado ao cristal, inicialmente orientados aleatoriamente, os eixos polares tornam-se alinhados e produzem uma carga elétrica na sua superfície. Ainda, Goldstein *et al.* (2002) ressaltam que oscilações mecânicas com pequenas amplitudes podem ser aproximadas de uma senoidal. Gaskill (1978) afirma que, com a mesma frequência, a resposta de um sistema linear para um comportamento senoidal também resulta na mesma representação de onda.

De acordo com a Triunfo Concepa (2018), um elevado número de cristais (quartzo, turmalina, tartarato de potássio e sódio, etc.) sofrem o efeito piezoelétrico de forma natural quando apresentam estrutura interna sem simetria. Assim, ao ser aplicada uma força de tração ou compressão no material, há a ocorrência de uma polarização elétrica na sua superfície em decorrência da distância entre as cargas positivas e negativas serem alteradas.

Os materiais com propriedades piezoelétricas são capazes de gerar uma diferença de potencial entre suas extremidades quando são submetidos a deformações. De acordo com Dutoit *et al.* (2005), um sistema piezoelétrico possui um modo de acoplamento, denominado d31 ou d33 (ver Figura 7). O modo d31 ocorre quando a força é aplicada perpendicularmente a direção dos polos e o d33 quando essa força é aplicada na mesma direção. Dutoit *et al.* (2005) descobriram que o modo d33, normalmente, gera uma maior quantidade de energia.

Figura 7 – Modos de operação de um sistema piezoelétrico



Fonte: Adaptado de Dutoit *et al.* (2005)

Os dois tipos comuns de materiais piezoelétricos utilizados para captação de energia são os piezocerâmicos e os piezopolímeros. O primeiro é frágil e produz níveis mais altos de tensão elétrica, como exemplo se tem o titanato zirconato de chumbo (PZT). O segundo é mais flexível, porém menos eficiente em termos de tensão produzida, o mais comum é o fluoreto de polivinilideno (PVDF) (BHALLA *et al.*, 2017).

Sodano *et al.* (2005) relatam que o PZT, por ser um material mais rígido, está mais propenso à fadiga. Enquanto que Lee *et al.* (2005) ressaltam que o PVDF é mais flexível e resiste a maiores cargas e níveis de deformação, contudo, apresentam voltagem mais variável com o aumento de temperatura.

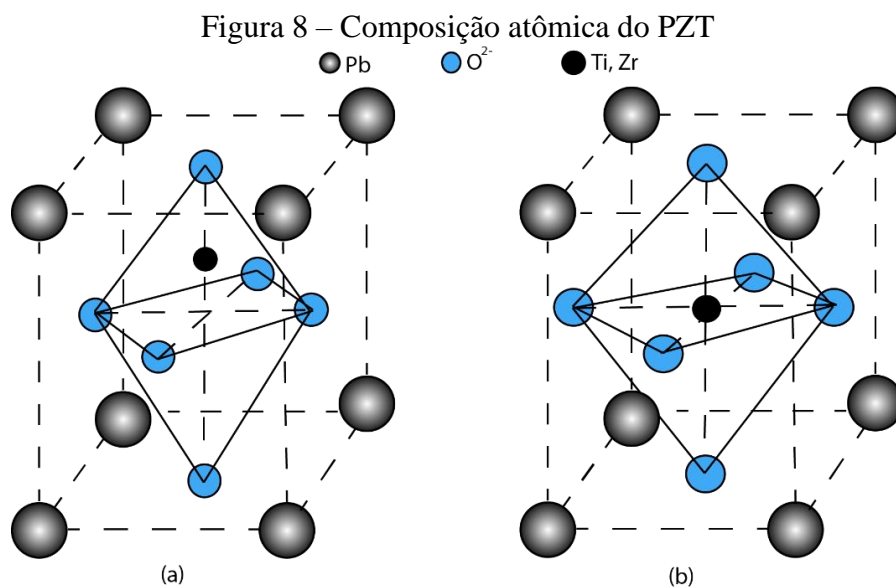
Entre os materiais piezoelétricos cerâmicos estão incluídos os titanatos de bário e chumbo ( $\text{BaTiO}_3$  e  $\text{PbTiO}_3$ ), o zirconato de chumbo ( $\text{PbZrO}_3$ ), o zirconato-titanato de chumbo (PZT) [ $\text{Pb}(\text{Zr,Ti})\text{O}_3$ ], e o niobato de potássio ( $\text{KNbO}_3$ ). A piezoelectricidade passa a ser identificada em materiais que possuem estruturas cristalinas complexas e com baixo grau de simetria. Aquecer uma amostra policristalina acima da sua temperatura de Curie possibilita o aprimoramento do seu comportamento piezoelétrico (CALLISTER, 2016). Heywang e Thomann (1984) ressaltam quem as propriedades das cerâmicas do tipo PZT dependem da sua composição.

As cerâmicas do tipo PZT são encontradas com facilidade no mercado. Elas são classificadas em cinco grupos, que podem ser utilizados como geradores de energia elétrica. De acordo com Rodrigues (2016), são eles:

- a) PZT-2: detém de propriedades inferiores em quase todos os fatores quando comparado aos tipos PZT-4 e PZT-5A, podendo ser utilizado apenas em situações que aceitem uma baixa constante dielétrica;

- b) PZT-4: têm elevada resistência à despolarização e baixas perdas dielétricas quando submetido a altas tensões e tensão mecânica, podendo ser usado em sistemas de geração de energia que utilizem fortes cargas;
- c) PZT-5A: possuem elevada resistividade quando sujeito a altas temperaturas (caso inseridos em misturas asfálticas), além de alta sensibilidade e elevado tempo de estabilidade, permitindo uma constância de resposta elétrica com a aplicação de cargas;
- d) PZT-5H: a sua sensibilidade supera a da cerâmica do tipo PZT-5A, sendo semelhante a ela na maioria dos outros parâmetros. A diferença encontra-se no seu baixo ponto de Curie que limita a variação de temperatura aceitável para aplicação ocasionando um uso menos efetivo;
- e) PZT-8: semelhante ao PZT-4, contudo apresenta maiores perdas mecânicas e dielétricas quando submetido a situações de alta tensão.

Sakamoto (2006) exemplifica que o PZT é composto por estruturas microscópicas aglomeradas, nomeadas de domínios. Esses, por sua vez, quando se encontram abaixo da temperatura de Curie, se formam a partir de células tetragonais distorcidas. Os domínios se distribuem de forma aleatória, o que reduz a ocorrência do efeito piezoelétrico de forma macroscópica. Entretanto, as propriedades piezoelétricas podem ser ativadas a partir de uma polarização do material, que ocorre com o seu aquecimento acima da temperatura de Curie. Dessa forma, as células unitárias do PZT se organizam de forma cúbica simétrica, conforme Figura 8.



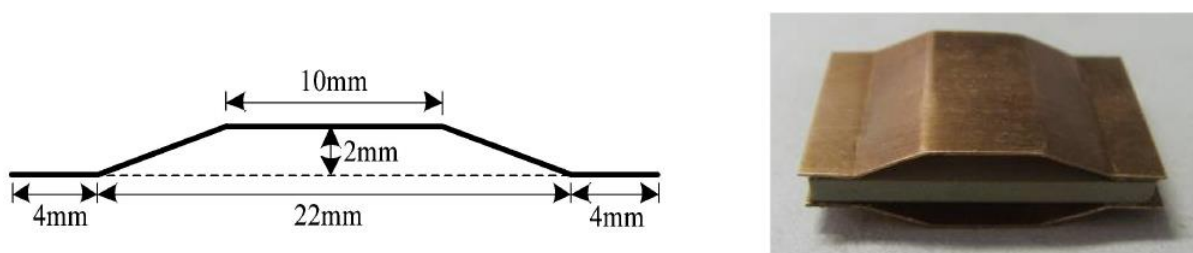
(a) anterior ao aquecimento; (b) acima da temperatura de Curie.

Fonte: O autor (2021)

Para Ramadass e Chandrakasan. (2010), a captação de energia vibratória ambiente através de sistemas piezoelétricos é uma técnica que pode fornecer potencialmente de 10 W a 100 W de potência. Contudo, uma das principais limitações das células piezoelétricas existentes encontra-se na composição de seu circuito de interface.

Zhao *et al.* (2012) estudaram as configurações de aplicação de células piezoelétricas de PZT do tipo 5H (devido ao elevado  $d \times g$ ) em pavimentos rodoviários. Os autores testaram configurações de acoplamento com elementos de transferência de carga e eletrodos, identificando que os tipos *Bridge* (ver Figura 9) e *Cymbal* seriam os mais viáveis para o caso, devido sua eficiência razoável e rigidez moderada, próxima do pavimento asfáltico. A resistência das multicamadas do *Cymbal* e *Bridge* são aceitáveis em comparação com a fadiga do pavimento. Para uma tensão de 0,7 MPa e aplicação de 1 Hz de frequência foram gerados, aproximadamente, 168 V para o tipo *Bridge*.

Figura 9 – Forma do transdutor *Bridge*



Fonte: Zhao *et al.* (2012).

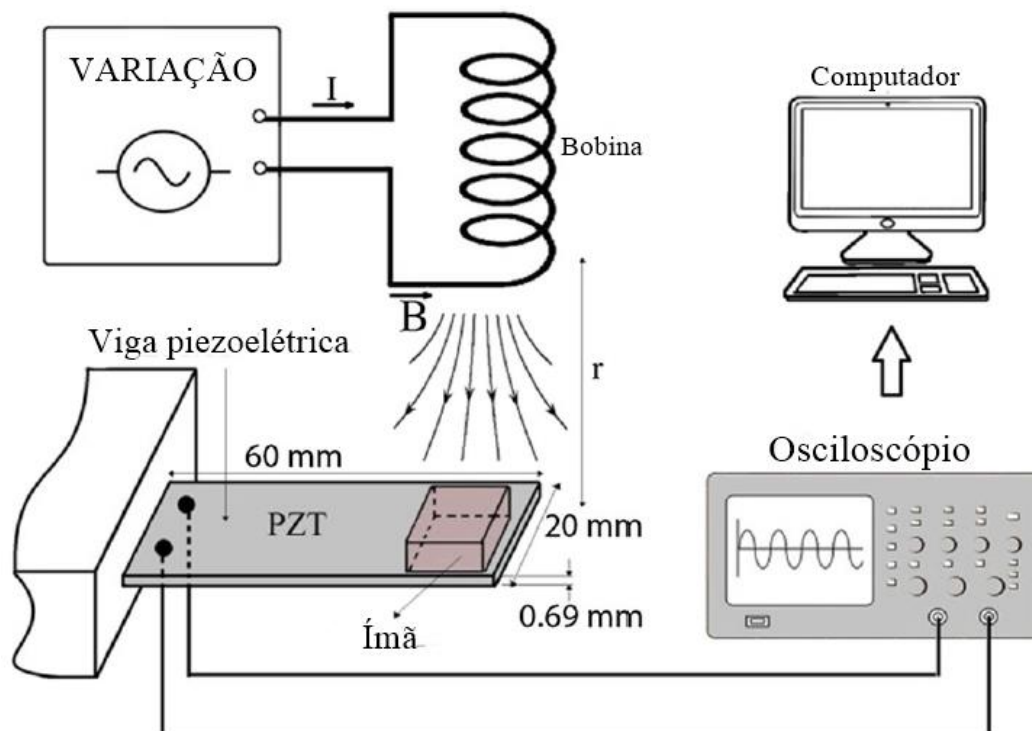
Jasim *et al.* (2018) sugerem discos piezoelétricos como um material eficiente de captação de energia por meio de tensões provocadas em pavimentos asfálticos, considerando a operação em baixas frequências. Contudo, eles podem se degradar, tanto eletricamente quanto mecanicamente, ao longo do tempo devido à tensão cíclica induzida nas camadas do pavimento (WANG H. *et al.*, 2018). Sendo assim, esses efeitos devem ser considerados ao se projetar uma unidade de captação de energia piezoelétrica.

Rangel (2014) caracterizou um material piezoelétrico do tipo PZT de geometria cilíndrica tubular, que foi submetido a uma compressão de forma cíclica no sentido axial. Para isso, foram realizadas simulações computacionais e ensaios experimentais em laboratório, pelos quais foi possível observar diferenças entre a quantidade de potência gerada para uma e três células. Quando utilizada apenas uma, a potência elétrica gerada foi de 2,5 mW, a partir da aplicação de uma força de 45,8 N e de uma frequência de 285 Hz. Enquanto que, ao serem

utilizadas em conjunto de três células, apresentaram potência de  $159 \mu\text{W}$ ,  $212 \mu\text{W}$  e  $313 \mu\text{W}$  cada uma, respectivamente.

Bezerra Júnior *et al.* (2018) realizaram experimentos com dispositivos piezoelétricos do tipo PZT para medição de corrente alternada (CA), com frequência de 60 Hz. Para isso, fixaram a célula piezoelétrica em uma extremidade, enquanto que instalaram um ímã permanente na outra (ver Figura 10). Dessa forma, a interação entre um campo magnético e o dispositivo cria uma vibração mecânica. Como consequência do efeito piezoelétrico, uma tensão elétrica é gerada nos terminais de saída do elemento de PZT. Em relação às correntes elétricas (15–60 A), a sensibilidade do aparelho foi medida de 1,5 cm ( $19,87 \text{ mV/A}$ ) a 4,0 cm ( $3,31 \text{ mV/A}$ ), destacando-se a boa resposta para a primeira distância (r).

Figura 10 – Esquemática do experimento com viga piezoelétrica



Fonte: Adaptada de Bezerra Júnior *et al.* (2018).

Conforme apresentado, a piezoeletricidade possui características que possibilitam a sua aplicação a partir do efeito piezoelétrico direto em pavimentos rodoviários, devido às tensões e deformações as quais esse tipo de estrutura é submetido. Sendo assim, torna-se necessário investigar a aplicabilidade frente ao tráfego de veículos e suas características de carga e velocidade.



## 2.4 Geração de energia elétrica em pavimentos

Devido aos problemas ambientais e ao esgotamento dos recursos provenientes de combustíveis fósseis, o uso de fontes de energia renováveis, naturais e não-convencionais tem surgido como uma alternativa frente à forma de geração de energia. Essa mudança resultou em um progresso substancial em pesquisas para identificar e desenvolver novas tecnologias e materiais que contribuam para a exploração efetiva dessas fontes. A captação de energia em pavimentos foi identificada, dentre as várias opções não-convencionais disponíveis, como sendo notavelmente promissora (AHMAD *et al.*, 2019).

Baldwin *et al.* (2011) desenvolveram um protótipo de captação de energia (ver Figura 11) a partir das cargas induzidas pelo tráfego em um viaduto rodoviário, por meio da utilização de células piezoelétricas. Os autores utilizaram dezesseis elementos de PZT do tipo 5A, com 2,0 mm de espessura. As respostas elétricas foram enviadas através de uma resistência de carga de 480  $\Omega$ . Assim, foram medidas as quedas de tensão através da resistência para estimar a saída instantânea de energia e a geração total. O protótipo foi submetido a uma carga de força cíclica, sendo a carga média, a amplitude de carga e a frequência de carga os parâmetros experimentais. A maior geração de energia observada foi de  $1,25 \times 10^{-6}$  Wh, ocorrendo com a aplicação de uma carga média de 44,5 kN, uma amplitude de 17,8 kN e frequência de 1,5 Hz. Foi comprovado o conceito de geração de energia piezoelétrica, contudo, a energia gerada estava abaixo do que seria necessário para ser considerada como uma carga elétrica moderada.

Figura 11 – Protótipo com células piezoelétricas para viaduto rodoviário



(a) seis células espessas de 2,032 mm em uma placa de apoio; (b) protótipo de rolamento totalmente montado.  
Fonte: Baldwin *et al.* (2011).

Yao *et al.* (2011) testaram duas geometrias para um transdutor piezoelétrico do tipo *Bridge* (arco e trapezoidal). Eles foram testados em uma *Universal Test Machine* (UTM)

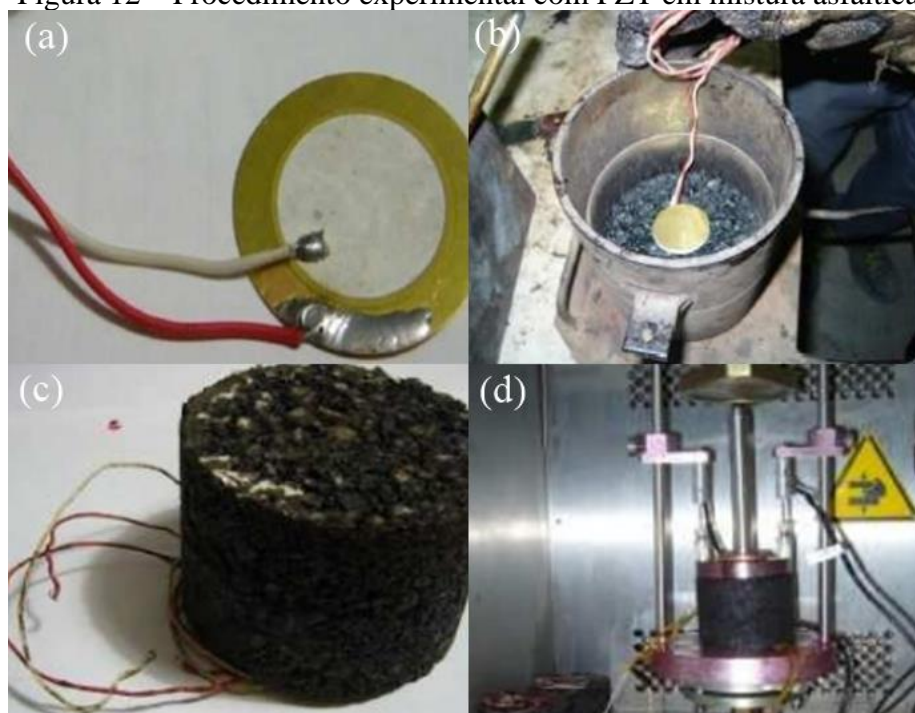
sob diferentes frequências e cargas distribuídas. A saída de tensão foi registrada por um osciloscópio, sendo obtidos 4 grupos de dados. A máxima tensão de saída registrada foi de 232 V, a partir do transdutor de arco, com a aplicação de uma pressão de 0,4 MPa e frequência de 5 Hz. Para o formato trapezoidal, o máximo de tensão obtido foi de 106 V, mostrando uma maior eficiência do tipo arco.

Xiang *et al.* (2013) realizaram um estudo paramétrico abrangente para demonstrar o efeito do amortecimento, o módulo Winkler (k), e a velocidade dos veículos em movimento na tensão e na potência de saída de um sistema piezoelétrico de captação de energia. Em simulações realizadas, foi observado que para um veículo com 10,5 kN de carga e com velocidade de 108 km/h, a quantidade de energia máxima gerada seria de 5,33 W, para um módulo de Winkler (k) próximo de zero. A tendência seria aumentar a velocidade para que se obtivesse os mesmos 5,33 W para valores superiores de k. Dessa forma, os autores concluíram que a produção de energia aumenta acentuadamente quando a velocidade do veículo está próxima da chamada velocidade crítica.

Cafiso *et al.* (2013) estudaram a eficácia e a quantidade de energia produzida por transdutores piezoelétricos inseridos no pavimento rodoviário. Os autores utilizaram um material do tipo PZT, com dimensões de  $80 \times 80 \times 30$  mm, posicionado entre a camada de rolamento e a camada de *binder*. Foi analisada a tensão mecânica exercida no sensor, no qual foi constatado que, para velocidades mais baixas, cria-se um tempo de carga maior sobre o elemento. No laboratório, com a aplicação de um eixo tandem de 1.200 N, em uma velocidade de 60 km/h, foi possível gerar  $2,43 \times 10^{-3}$  W de potência, quando inserida uma célula piezoelétrica com 30 mm de diâmetro e 0,085 mm de espessura em um corpo de prova (CP) de mistura asfáltica (ver Figura 12). O PZT, de forma isolada, consegue gerar  $2,59 \times 10^{-1}$  W de potência. Dessa forma, a energia produzida pelo transdutor piezoelétrico inserido no revestimento é muito baixa quando comparada à quantidade que pode ser produzida pela célula não embutida nas camadas do pavimento.

A captação de energia mecânica para conversão em energia elétrica também pode ser realizada por meio de sistemas eletromagnéticos e aplicada a outros meios, como o fluxo de pessoas. Duarte *et al.* (2013) descrevem o método *Waynergy*, o qual foi capaz de gerar 0,15 Wh, durante 1 h, com o tráfego de 675 pessoas. Os autores ainda concluem que a quantidade de energia gerada aumenta com o peso do pedestre.

Figura 12 – Procedimento experimental com PZT em mistura asfáltica



(a) célula piezoelétrica; (b) moldagem do CP; (c) CP com a célula inserida; (d) ensaio de módulo dinâmico na UTM.

Fonte: Cafiso *et al.* (2013)

Com a utilização de células piezoelétricas instaladas a 4 cm do topo da camada de revestimento e espaçadas em 220 cm, Sun *et al.* (2015) analisaram a quantidade de energia elétrica captada, a partir de pressões de contato e frequências exercidas pelos veículos, em um pavimento rodoviário. Os autores obtiveram cerca de  $2,78 \times 10^{-5}$  Wh de energia elétrica, mostrando que o tipo de captação é promissor. Os resultados mostraram, ainda, que a tensão provocada é linearmente variável com a pressão de contato, enquanto que a energia elétrica captada varia exponencialmente com essa aplicação de pressão. Quanto maior for a pressão de contato, maior será a energia elétrica captada e maior será a deformação e a tensão mecânica. A energia elétrica captada também aumenta com a frequência da carga. Realizando a simulação do protótipo, para um comprimento de um quilômetro, ao longo de duas pistas, cerca de 450 kWh de energia elétrica podem ser gerados, a partir de um tráfego de 600 caminhões pesados por hora, em média.

Zhang *et al.* (2016) investigaram a captação de energia piezoelétrica em decorrência da deformação nos pavimentos causada por veículos em movimentos. Sob uma condição geral de tráfego, com velocidade de 108 km/h, a saída máxima de energia pode chegar a 41,2 mW e 47,26 mW para uma carga de uma roda e para uma carga de quatro rodas, respectivamente. Também foi constatado que a captação de energia, a partir de uma carga de

quatro rodas individuais, não pode ser estimada simplesmente multiplicando a carga de uma roda quatro vezes. Além disso, a saída pode ser zero se o transdutor for colocado perto das bordas ou se a distância entre a roda e o transdutor for maior que 4 m.

Moure *et al.* (2016) testaram discos piezoelétricos com 29 mm de diâmetro e diferentes configurações para determinar as melhores condições para otimizar a conversão da energia mecânica em elétrica. Os que apresentaram melhores resultados foram integrados diretamente na mistura asfáltica para avaliar seu desempenho como transdutor de energia por meio da vibração em estradas. Após a realização dos ensaios, foram observadas densidades energéticas na faixa de 40 - 50 MWh/m<sup>2</sup>, obtidas a cada 100 m de estrada, com a utilização de 30.000 células piezoelétricas, que podem representar mais de 65 MWh em um ano.

Duarte e Ferreira (2016) avaliaram a utilização de fontes alternativas de geração de energia em pavimentos rodoviários. A piezoelectricidade foi a primeira a ser estudada por pesquisadores, ao compararem as tecnologias que utilizam a energia mecânica dos veículos como fonte de energia. Contudo, ela apresenta uma menor eficiência de conversão de energia frente aos sistemas eletromecânicos. Esses, juntamente com os sistemas hidráulicos, registraram os maiores valores de geração de energia em testes experimentais.

Como forma de continuidade aos estudos realizados para o tráfego de pedestres (DUARTE *et al.*, 2013), Duarte *et al.* (2016) descreveram um sistema inovador de captação de energia no pavimento, chamado *Waynergy Vehicles*. O protótipo do sistema foi instalado em um pavimento de um campus universitário para testes. Para isso, foram testadas velocidades de 10 km/h a 50 km/h e diferentes pesos de veículos. Os autores observaram que a maior potência foi obtida com 50 km/h e que, para essa mesma velocidade, o aumento da energia elétrica gerada por um veículo que pesa 2.000 kg em vez de 1.350 kg foi de 114 %. Contudo, esse aumento não foi tão expressivo quando modificadas as velocidades, apresentando um acréscimo de 23 % de 10 km/h para 50 km/h. Durante uma hora de pico, foi gerado 10,5 Wh de energia elétrica. A partir de melhorias no sistema, Duarte *et al.* (2019) verificaram que em 1 dia, o protótipo com dez módulos foi capaz de gerar até 152 Wh, com uma energia média de  $4,03 \times 10^{-2}$  Wh por veículo passando sobre o sistema (ver Figura 13).

Wang e Sun (2016) desenvolveram um protótipo com elementos piezoelétricos quadrados de 16 mm com 0,2 mm de espessura, inseridos em um anel de indução. Os autores obtiveram os efeitos dos parâmetros da estrutura sobre a tensão em circuito aberto. A partir da instalação do protótipo 4 cm abaixo do topo da camada de revestimento, obtém-se uma tensão de saída de, aproximadamente, 64,4 V, com a aplicação de uma pressão de 0,7 MPa. Ainda,

para uma frequência proveniente do veículo de 15 Hz, foi possível observar uma potência de saída de 0,705 mW.

Figura 13 – Sistema de captação de energia implantado em via de Portugal



Fonte: Duarte *et al.* (2019)

Song *et al.* (2016) criaram e otimizaram um sistema de captação de energia mecânica com a utilização de elementos piezoelétricos em modelo de viga. Para isso, ajustaram a frequência natural dos feixes com a utilização de uma massa em sua extremidade, considerando a vibração em pavimentos ocasionada pela frequência de veículos trafegando entre 60 km/h e 80 km/h. O sistema foi composto com 48 elementos piezoelétricos, com dimensões de  $30 \times 30 \times 10$  cm, e implementado a 5 cm do revestimento asfáltico. A partir dos resultados obtidos, os autores afirmaram que a coletora de energia pode gerar até 8,19 mW/m<sup>2</sup>, com uma potência de saída máxima de 736 mW. Esses autores ainda estimaram que com o tráfego de 600 veículos por hora, a densidade total de energia de saída seria de 4,91 Wh/m<sup>2</sup>.

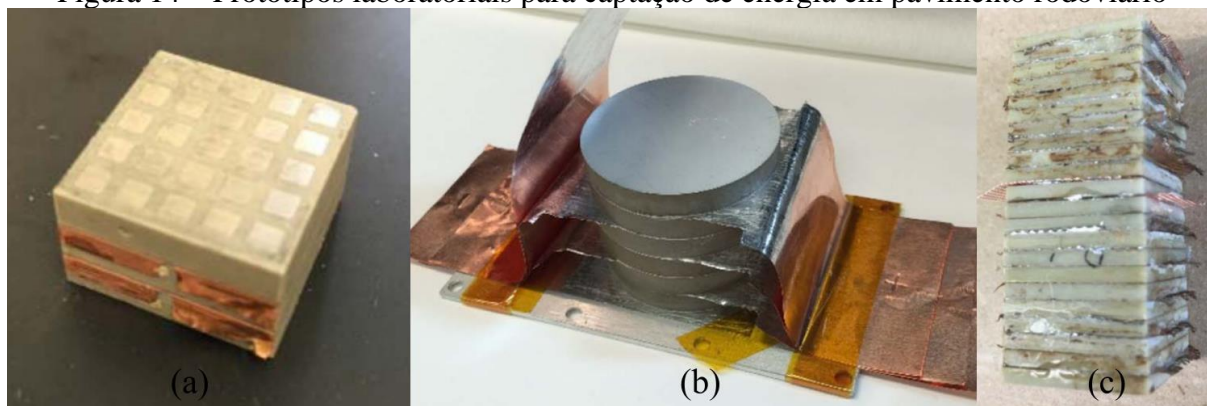
Papagiannakis *et al.* (2016) conceberam um sistema de captação de energia com elementos piezoelétricos, em que foram aplicadas cargas compressivas sinusoidais a uma frequência de 10 Hz, com uma magnitude de pico a pico variando de 0,5 kN a 3,5 kN. Inicialmente, foram testados dois protótipos: (i) um com 3 camadas ligadas em série, cada uma consistindo de 25 elementos prismáticos do tipo PZT de seção retangular, medindo 3,5 mm e (ii) outro composto de uma pilha com seis elementos cilíndricos de PZT-5A, com um diâmetro de 44,5 mm e uma espessura de 6 mm. Foi observada uma potência elétrica de 3,5 mW e 2 mW para os dois protótipos, respectivamente, ao serem aplicadas pressões de 9.000 kPa para o primeiro e 600 kPa para o segundo elemento.

Como forma de continuidade dos estudos da concepção de uma coletora de energia, Papagiannakis *et al.* (2017) otimizaram os protótipos anteriormente desenvolvidos e



formularam um terceiro (ver Figura 14), aplicando um carregamento com um valor médio de 2,5 kN e uma amplitude de 2,5 kN (ou seja, o pico de carga aplicado foi de 5,0 kN) e uma frequência de 10 Hz. Para uma única passagem de um pneu de caminhão de 44,48 kN, a potência elétrica gerada foi estimada entre 1,0 e 1,8 W.

Figura 14 – Protótipos laboratoriais para captação de energia em pavimento rodoviário



(a) protótipo com 3 camadas e células em paralelo; (b) protótipo com 6 camadas e células circulares e (c) protótipo com 21 elementos e células retangulares.

Fonte: Papagiannakis *et al.* (2017).

Najini e Muthukumaraswamy (2017) apresentaram um sistema baseado em simulação técnica para apoiar o conceito de geração de energia a partir do tráfego rodoviário utilizando materiais piezoelétricos. Para isso, foi simulada a implantação de um sistema real de rodovia com a utilização dos cristais piezoelétricos no *software* MATLAB. Com a instalação de 3.280 células piezoelétricas em 1 km de rodovia, um tráfego de 500 veículos por hora, a uma velocidade de 100 km/h, seria possível gerar 187,23 kWh de energia. Ainda, analisaram o investimento que possuía vantagem econômica ao ter seu custo nivelado ao de outras fontes renováveis de energia para o caso de aplicação nos Emirados Árabes.

Frente às necessidades de manutenções periódicas em pavimentos rodoviários e os elevados custos, Xiao *et al.* (2017) apresentam o sensor ePave que funciona sem fios para facilitar a utilização de procedimentos de gerência em pavimentos. O sistema inclui um módulo de autopotência, um sistema de ultrabaixo consumo, um módulo de transmissão sem fios e de gestão incorporado, utilizando a piezoelectricidade para supri-lo energeticamente. Para isso, foram realizados estudos empíricos para caracterizar o módulo piezoelétrico, a fim de otimizar a captação de energia. Em seguida, os autores desenvolveram um sistema de sensores integrados com o equipamento otimizado. Com a célula piezoelétrica integrada em uma placa de mistura asfáltica e submetida a uma frequência de 0,7 Hz, uma velocidade de

0,76 km/h, e uma pressão de roda do pneu de 0,7 MPa, a potência de saída atingiu um máximo de 16,8 mW a 200 k $\Omega$ .

Roshani *et al.* (2016, 2017, 2018) realizaram simulações computacionais (protótipo II) e ensaios laboratoriais com dois protótipos com células piezoelétricas em série (protótipo I) e em paralelo (protótipo III). Para as simulações, os autores modelaram os protótipos por elementos finitos, mostrando que a tensão vertical induzida pelos discos piezoelétricos no protótipo I está, aproximadamente, na superfície superior. Contudo, não foram comparados os valores de potência das modelagens com os obtidos em laboratório. Os sistemas desenvolvidos foram capazes de gerar até 1.487 mW e 64,12 mW, respectivamente, para caminhões trafegando a 65 km/h e até 33 mW e 1,36 mW, para os protótipos I e III, quando os veículos considerados foram carros de passeio, na mesma velocidade. A potência produzida a partir de 8 discos foi cerca de 50 % da produzida por 4 discos. No entanto, a energia gerada por 16 discos foi cerca de 70 % da obtida por 8 discos. Ainda, destacaram que o material piezoelétrico apresentou quedas de potência insignificantes com aumento da temperatura na faixa de 4 °C a 40 °C.

Jasim *et al.* (2017, 2018) utilizaram o modelo *Bridge* citado por Zhao *et al.* (2012), devido ao elevado coeficiente piezoelétrico e capacitância. Os autores formularam um módulo coletor de energia contendo múltiplos transdutores empilhados, testado sob pulso único e eventos cíclicos de carga. A análise experimental foi conduzida para investigar a falha por fadiga dos transdutores piezoelétricos após carga repetida. Os resultados da análise mostraram que dois modos de falha do material devem ser considerados em relação à resposta mecânica do transdutor: (i) falha de tração e (ii) de cisalhamento. A potência máxima de saída foi de 2,1 mW, com 70 kPa de pressão, carga resistiva de 400 k $\Omega$  e frequência de 5 Hz.

Como o PZT tem diversas variações, Xu *et al.* (2018) testaram três tipos (PZT-4, PZT-8 e PZT-5H) em experimentos laboratoriais para verificar a voltagem de saída com relação à variação da frequência de aplicação (1 Hz, 5 Hz e 10 Hz). Foram utilizados os carregamentos de 300 N, 500 N e 1000 N para a análise. A voltagem cresceu de forma mais expansiva para o PZT-5H, enquanto que para os demais, após 5 Hz a variação foi quase nula. Para 10 Hz e 1.000 N aplicados, o PZT-5H apresentou uma resposta de 70 V.

Kim *et al.* (2018) avaliaram a viabilidade técnica da incorporação de sistemas piezoelétricos em pavimentos asfálticos e de concreto. Os autores analisaram apenas a tensão gerada pela aplicação de uma força de 445 N e frequências variando de 1 Hz a 30 Hz pelo ensaio de *Loaded Wheel Test* (LWT), em que a maior média encontrada foi de 1,413 Vrms

para o revestimento asfáltico. Quando analisado para pavimentos rígidos, o valor da tensão caiu significativamente para 0,03 e 0,01 Vrms.

Ding *et al.* (2018) utilizaram vigas elásticas de camada dupla, inseridas sobre o solo da sub-base do pavimento, no intuito de investigar experimentalmente a coleta de energia piezoelétrica em estradas por meio do tráfego de veículos. Eles também desenvolveram um modelo interno de uma estrada em camadas para transformação piezoelétrica utilizando a ranhura do modelo de carga de tráfego. O máximo de potência obtido foi  $1,5 \times 10^{-3}$  W, para a condição de solo seco da sub-base com 60 cm de espessura, uma placa de concreto de 5 cm e uma força de 7.500 N sendo aplicada. Os resultados mostraram, ainda, que a influência da posição do transdutor sobre a tensão de saída e potência deve ser considerada e que a espessura do painel de concreto e a condição do solo da sub-base pode afetar a tensão e a potência de saída do transdutor piezoelétrico.

Wang C. *et al.* (2018a, 2018b) desenvolveram e avaliaram um dispositivo composto por até 4 células piezoelétricas ligadas em paralelo, com dimensões totais de 100 mm  $\times$  100 mm. De acordo com os resultados, a potência obtida foi de 0,88 mW, com uma magnitude de carga de 0,2 MPa, frequência de 10 Hz e resistência de 20 k $\Omega$ . A potência máxima observada foi de 11,67 mW, com a aplicação da carga de 0,7 MPa e frequência de 15 Hz, possuindo resistência de 10 k $\Omega$ . Os autores também avaliaram que a deformação global do dispositivo foi mínima e as saídas elétricas das unidades piezoelétricas se mantiveram estáveis para a aplicação de 40.000 ciclos de carga. Em uma otimização do protótipo com dimensões de 150 mm  $\times$  150 mm, para 0,7 MPa de tensão e 15 Hz de frequência, foi obtida uma potência máxima de 50,41 mW, com uma resistência de 4 k $\Omega$ .

Vázquez-Rodríguez *et al.* (2019) realizaram simulações a partir de uma bancada de testes que incluía um simulador de tração e adquiria os sinais elétricos dos materiais piezoelétricos para captar energia a partir da tensão por estímulos mecânicos análogos aos efeitos da estrada. Os resultados demonstraram que a potência máxima obtida pelas células de PZT foi de 3,4 mW, a partir de uma velocidade de 58 km/h e uma resistência de 2,36 G $\Omega$ .

Duarte *et al.* (2020) verificaram em campo a eficiência do sistema eletromecânico proposto por eles para geração de energia. Esse sistema tem uma geração de  $2,55 \times 10^{-5}$  kWh para um veículo de 2.000 kg a 50 km/h, utilizando uma superfície de 0,8 m de largura. Os autores ressaltaram que a aplicação proposta tem apenas 0,275 m de largura, na qual poderiam ser utilizados três sistemas e gerar até  $6,03 \times 10^{-5}$  kWh.

Aguiar (2020) analisou modelos de negócio com a aplicação de sistemas de captação de energia em pavimentos rodoviários por uma empresa de Portugal. Neste sentido,



a autora avaliou a aplicação de um sistema eletromecânico de geração de energia, em que um tráfego médio diário anual de 20.000 veículos, trafegando em uma velocidade média de 50km/h, ao longo da sua vida útil de 10 anos, teria potencial de produzir 195.813,81 kWh de energia elétrica. Assim, estimou-se o investimento total abaixo de € 57.000,00, para a extração desses benefícios, dos quais seriam € 31.500,00 em bens capitais e os custos associados variando entre os € 2.550,00 e aproximadamente € 3.000,00.

Zhang *et al.* (2020) estabeleceram um modelo eletromecânico com elementos piezoelétricos para captação de energia com parâmetros detalhados, incluindo a geometria, materiais e circuitos. Foram analisadas as influências das condições de fluxo de tráfego, como velocidade (20 km/h a 100 km/h) e densidade, na potência de saída das células piezoelétricas, empregando um método de lei de escala e teoria de fluxo de tráfego. Os autores observaram que quando a distância entre dois veículos consecutivos é linear com relação à velocidade, a potência de saída aumenta para atingir o valor máximo e depois diminui com o aumento da velocidade do veículo. A densidade de potência pode atingir aproximadamente 3,89 mW/cm<sup>3</sup> com a velocidade de tráfego ideal e os 1,74 mW/cm<sup>3</sup> com a velocidade do trânsito habitual analisada.

Wang S. *et al.* (2020) apresentaram uma estrutura de conversão de energia piezoelétrica de várias camadas para pavimentos, que evita o enfraquecimento da produção elétrica após o contato e realiza a vibração coordenada de cada elemento piezoelétrico. Os resultados indicaram que, a estrutura com a condição da distância do material piezoelétrico até à extremidade fixa de 7 mm e a amplitude de vibração de 4 mm sob condições típicas de tráfego rodoviário, tem o melhor desempenho de geração de energia e durabilidade. A tensão de saída do sistema, a 5 Hz de frequência de vibração, é de 5,2 V, em que a potência de saída pode atingir 3,14 mW, e a densidade até 0,0063 mW/mm<sup>3</sup>.

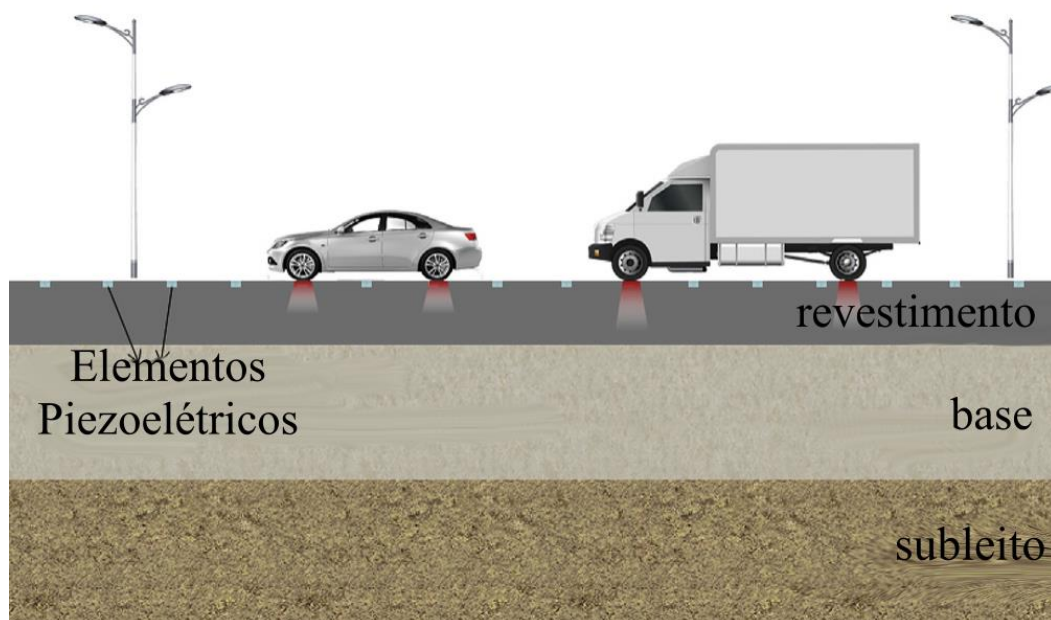
Cao *et al.* (2021) quantificaram a produção de energia de transdutores piezoelétricos sob carga de veículo e, posteriormente, estimaram a produção diária de energia dos pavimentos rodoviários (ver Figura 15). Os resultados mostraram que quanto maiores forem as cargas e as velocidades, maior será a potência energética. Um transdutor piezoelétrico pode produzir  $1,61 \times 10^{-8}$  kWh de energia numa única carga de 0,7 MPa. Sob o volume de tráfego diário de 1.797 veículos por dia com 6 eixos, a saída de energia de um único transdutor piezoelétrico pode atingir  $2,68 \times 10^{-4}$  kWh.

Os principais estudos brasileiros encontrados para geração de energia de pavimentos foram os de Cigognini *et al.* (2016), Oliveira e Soares (2018), Heller *et al.* (2019),

Mota (2019), Araújo e Guerreiro (2020) e Pinto (2020). Nos parágrafos que se seguem foram detalhados tais trabalhos.

Cigognini *et al.* (2016) realizaram estudos preliminares com células piezoelétricas de 35 mm de diâmetro, utilizadas para alimentar lâmpadas *leds* de 3 V em um viaduto local. Levando isso em consideração, as autoras ponderaram que a proposta de geração de energia sustentável utilizando a piezoelectricidade no viaduto de Fazenda Vilanova, adaptada ao asfalto, seria possível. Aplicadas em escala maior, estima-se que com a vibração sofrida pelas pressões dos veículos, a energia poderá ser armazenada em baterias e distribuída.

Figura 15 – Representação de elementos piezoelétricos em pavimento rodoviário



Fonte: Adaptado de Cao *et al.* (2021).

Sousa *et al.* (2016) realizaram um estudo sobre a utilização de elementos piezoelétricos para geração de energia elétrica na cidade de Balsas, no Maranhão. Os autores propuseram um modelo autônomo de semáforos a serem alimentados por essa energia, apresentando como vantagens um baixo impacto ambiental e um bom custo-benefício a longo prazo. De acordo com pesquisas realizadas pelos autores, o sistema proposto seria capaz de gerar até 2,5 kW/m, atendendo aos 500 W de potência necessários para funcionamento do conjunto semafórico no cruzamento analisado.

Oliveira e Soares (2018) se propuseram avaliar diferentes possibilidades de captação de energia a partir do pavimento utilizando um simulador de tráfego de grande porte.

Contudo, ainda não foram divulgados resultados. Entretanto, espera-se a concepção de um trecho de pavimento gerador de energia elétrica dentro da cidade de Fortaleza.

Heller *et al.* (2019) utilizaram transdutores piezoelétricos em vibração livre em uma praça de pedágio na BR-290, no estado do Rio Grande do Sul (ver Figura 16). O objetivo era que a instalação servisse como subsídios para futuras aplicações em larga escala, sendo utilizada como sistema de microgeração de energia de coletores de dados de tráfego e pavimento. A potência máxima foi de  $19,2 \mu\text{W}$  para uma caixa com 4 transdutores.

Figura 16 – Sistema gerador de energia em praça de pedágio no Rio Grande do Sul



Fonte: Heller *et al.* (2019).

Mota (2019) realizou análises multifísicas em células piezoelétricas, identificando a espessura como a propriedade geométrica que mais contribui para a geração de energia no pavimento. O autor ainda simulou a aplicação em ambiente real, no qual seria capaz de gerar até 2,514 GW por ano com um tráfego de 600 veículos por dia, a uma velocidade de 65 km/h.

Araújo e Guerreiro (2020) realizaram análises do consumo energético com a aplicação do piso piezométrico e seu custo-benefício em três espaços de Brasília: (i) Feira da Torre de TV; (ii) Feira dos Importados e (iii) Plataforma da Rodoviária de Brasília. Foram estimados os valores de 0,825 kWh, 200 kWh e 7.000 kWh para cada local, respectivamente. Para simular as energias geradas, as autoras utilizaram como base os 25 sensores (com 35 mm de diâmetro) em  $1 \text{ m}^2$  de placa do estudo da UNICAMP.

Pinto (2020) desenvolveu um estudo baseado na simulação de implantação de dispositivos piezoelétricos em cruzamentos urbanos controlados por semáforo de três cidades distintas. O autor encontrou até 7,67 kW/dia sendo gerados devido ao tráfego existente nas vias analisadas, evidenciando o potencial de utilização em meio urbano como fonte complementar à rede elétrica existente.

Mota e Barroso (2021) realizaram simulações multifísicas em diferentes geometrias de elementos piezoelétricos, de forma estacionária e dinâmica. Os autores verificaram que a espessura da célula é a propriedade geométrica que mais influenciou no potencial elétrico gerado, sendo capaz de produzir até 306,37 MW de potência elétrica por ano.

## 2.5 Análise exploratória da revisão

A análise exploratória da revisão possui um caráter avaliativo das tecnologias de geração de energia abordadas no presente trabalho, em que foram compiladas as variáveis utilizadas como carga, frequência, resistência, material e configuração geométrica do elemento piezoelétrico que resultaram nas saídas elétricas máximas. Ainda, foram destacadas as potências, voltagens ou saídas energéticas máximas registradas e/ou estimadas por cada protótipo.

A partir do apresentado na Tabela 1, torna-se possível identificar e correlacionar algumas propriedades utilizadas nos sistemas mencionados neste trabalho. As primeiras observações são relativas ao tipo de material. Dentre as pesquisas, predominou-se a utilização do efeito piezoelétrico para transformar energia mecânica em elétrica, diferindo apenas o tipo do elemento, sendo o PZT-5H mais usual devido as propriedades dielétricas superiores ao PZT-2, PZT-4 e PZT-5A. Contudo, algumas pesquisas não discriminam o tipo do PZT utilizado.

Ainda relacionado às propriedades do material, Mota (2019) destacou que uma maior espessura do elemento piezoelétrico colabora com o aumento da voltagem gerada. Ao analisar as geometrias utilizadas para elementos piezoelétricos, observou-se que a maior espessura foi de 1,0 cm, adotada por Xiang *et al.* (2013) e Zhang *et al.* (2016), resultando em 5,33 W e 47 mW de potência, respectivamente. O resultado de Xiang *et al.* (2013) é o maior observado para a tecnologia piezoelétrica e que, ao ser comparado em questão de força e espessura com outras pesquisas, permite constatar a observação da influência da espessura. Contudo, o de Zhang *et al.* (2016), apesar de usar a mesma força, resultou em uma potência inferior, que pode ser devido a posição de instalação no pavimento, a 30 cm abaixo do topo da camada de revestimento, enquanto que Xiang *et al.* (2013) aplicam a 15 cm.

Tabela 1 – Dados de geração de energia no pavimento rodoviário

Autores	Propriedades do material				Parâmetros de entrada				Respostas elétricas			Obs.
	Tipo	A (cm <sup>2</sup> )	E (cm)	$d_{33}$ ( $\times 10^{-12}$ C/N)	F (kN)	Fq (Hz)	R ( $\Omega$ )	QC	V (V)	P (W)	E (Wh)	
Baldwin <i>et al.</i> (2011)	PZT-5A	52,4	0,20	-	17,8 (Am) e 44,5 (FM)	1,5	480	16	0,65	-	$1,25 \times 10^{-6}$	-
Yao <i>et al.</i> (2011)	PZT-5H	6,0	0,20	670	0,24	5,0	-	1	232	-	-	-
Xiang <i>et al.</i> (2013)	-	100,0	1,00	593	10,5	-	$5 \times 10^5$	-	1.600	5,33	-	108 km/h; 15 cm abaixo do revestimento
Cafiso <i>et al.</i> (2013)	PZT	7,07	0,01	-	1,2	-	-	1	1,6	$2,43 \times 10^{-3}$	-	60 km/h
Duarte <i>et al.</i> (2013)	Eletro	$2,5 \times 10^3$	16,0	-	-	-	-	-	25,0	12	0,15	Pedestres com 75 kg pulando; 675 ped/h
Sun <i>et al.</i> (2015)	PZT-5A	-	-	12,5	80	7,41	-	1	862,4	-	$2,78 \times 10^{-5}$	4 cm do topo do revestimento
Zhang <i>et al.</i> (2016)	PZT-5H	100	1,0	-274 ( $d_{31}$ )	10,5	-	$8 \times 10^5$	-	194	$4,7 \times 10^{-2}$	-	30 cm abaixo do topo do revestimento; 108 km/h
Moure <i>et al.</i> (2016)	PZT	6,61	0,03	460	0,59	4	$1 \times 10^6$	-	12	$16 \times 10^{-6}$	$65,8 \times 10^6$	2 cm abaixo do topo do revestimento. Energia para 30.000 células, em um ano
Duarte <i>et al.</i> (2016)	Eletro	$5,6 \times 10^3$	20,0	-	-	-	-	-	-	190	10,5	50 km/h; 715 veic/d; 2.000 kg; energia em um dia
Song <i>et al.</i> (2016)	PZT-PZNM	14,4	0,02	450	-	10	$70 \times 10^3$	48	14,36	$184 \times 10^{-6}$	$2,95 \times 10^3$	UTM; circuito aberto; 5 cm abaixo do topo do revestimento; 600 veic/h
Wang e Sun (2016)	PZT-8	2,56	0,02	1.050	$1,8 \times 10^{-1}$	15	-	-	64,42	$0,7 \times 10^{-3}$	-	4 cm abaixo do topo do pavimento
Papag. <i>et al.</i> (2016)	PZT-5A	19,8	0,6	-	3,5	10	-	-	-	$3,5 \times 10^{-3}$	240,95	Energia por ano
Papag. <i>et al.</i> (2017)	PZT-5A	18,5	0,62	-	44,5	10	-	-	-	1,8	993	Energia por ano
Najini e Muthu. (2017)	PZT-5H	0,01	0,01	-274 ( $d_{31}$ )	-	-	$800 \times 10^3$	-	188	0,19	$187 \times 10^3$	5 cm abaixo do topo do revestimento; 100 km/h; 3.280 células; 1 km de rodovia; 444 veic/h
Xiao <i>et al.</i> (2017)	PZT	14,2	0,15	720	0,1	0,7	$200 \times 10^3$	-	3,3	$16,8 \times 10^{-3}$	-	-
Rosh. <i>et al.</i> (2018)	PZT	0,64	0,8	290	44,5	10	-	4	-	1,49	360,53	65 km/h; 40.000 veic/d

Tabela 1 – Dados de geração de energia no pavimento rodoviário (continuação)

Autores	Propriedades do material				Parâmetros de entrada				Respostas elétricas			Obs.
	Tipo	A (cm <sup>2</sup> )	E (cm)	$d_{33} (\times 10^{-12} \text{ C/N})$	F (kN)	F <sub>q</sub> (Hz)	R ( $\Omega$ )	QC	V (V)	P (W)	E (Wh)	
Jasim <i>et al.</i> (2018)	PZT-5X	10,24	0,2	750	3,56	5	$400 \times 10^3$	16	-	2,1	-	-
Xu <i>et al.</i> (2018)	PZT-5H	20,25	0,5	700	1,0	10	-	4	70	-	-	-
Kim <i>et al.</i> (2018)	PZT	-	-	-	0,44	30	-	6	1,41	-	-	Pavimento asfáltico; LWT
Ding <i>et al.</i> (2018)	PZT	4,0	0,4	-	7,5	15	$40 \times 10^3$	-	-	$1,5 \times 10^{-3}$	-	Placa de concreto de 5 cm
Wang C. <i>et al.</i> (2018)	PP	100	-	-	$70 \times 10^{-3}$	15	$4 \times 10^3$	4	-	$50,41 \times 10^{-3}$	-	Utilizando polipropileno
Vázq. <i>et al.</i> (2019)	PZT	-	-	260	-	-	$2,4 \times 10^9$	-	$5,6 \times 10^3$	$3,4 \times 10^{-3}$	-	-
Duarte <i>et al.</i> (2019)	Eletro	5.600	20,0	-	-	-	-	-	-	-	152,0	3.237 veic/d; 50 km/h; 2.000 kg; energia em um dia; 50 cm do topo do revestimento
Zhang <i>et al.</i> (2020)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Pesquisa de revisão. Não foram dados dos autores. 3,89 mW/cm <sup>3</sup> .
Wang S. <i>et al.</i> (2020)	PZT-5H	25	0,02	-	-	5	700	-	5,2	$3,14 \times 10^{-3}$	-	-
Cao <i>et al.</i> (2021)	PZT-5H	0,28	-	670	1-6	-	-	-	-	0,231	0,268	1.797 veic/h, 55 km/h a 125 km/h
Cigog. <i>et al.</i> (2016)	PZT	9,62	-	-	-	-	-	-	3,0	-	-	Microescala
Sousa <i>et al.</i> (2016)	PZT	9,62	-	-	-	2	-	-	7,19	$2,5 \times 10^3$	-	Simulação; para o tráfego específico; 1 Hz para a situação de potência
Heller <i>et al.</i> (2019)	PZT-5H	5,0	-	-	-	-	$100 \times 10^3$	-	-	$19,2 \times 10^{-6}$	-	Vibração livre
Mota (2019)	PZT-5H	0,575	0,62	593	44,5	10	$14 \times 10^6$	4	-	5,18	-	Simulações; Tráfego de 600 veic/h; 65 km/h
Araújo e Guerr. (2020)	PZT	9,62	-	-	-	-	-	25	-	-	$7 \times 10^6$	Simulação a partir do tráfego existente em uma rodoviária
Pinto (2020)	PZT	$1,6 \times 10^3$	-	-	-	-	-	-	-	$7,67 \times 10^3$	-	1.300 kg; simulação cruzamento semafor.

Tabela 1 – Dados de geração de energia no pavimento rodoviário (conclusão)

Autores	Propriedades do material				Parâmetros de entrada				Respostas elétricas			Obs.
	Tipo	A (cm <sup>2</sup> )	E (cm)	$d_{33} (\times 10^{-12} \text{ C/N})$	F (kN)	Fq (Hz)	R ( $\Omega$ )	QC	V (V)	P (W)	E (Wh)	
Mota e Barroso (2021)	PZT-5H	0,575	0,62	593	24,5	10	$14 \times 10^6$	4	-	$306,37 \times 10^6$	-	Potência em um ano para tráfego de 600 veic/h com velocidade de 65 km/h

A: área; E: espessura; d: constante piezoelétrica; F: força; Fq: frequência; R: resistência; QC: quantidade de células; V: voltagem; P: potência; E: energia; Am: amplitude; FM: força média; Obs.: observações; PP: polipropileno.

Fonte: O autor (2021)

Outro parâmetro importante do material está relacionado a sua constante piezoelétrica ( $d_{33}$ ) que orienta a relação entre a deformação dimensional da célula piezoelétrica e a tensão elétrica, e entre a formação de cargas elétricas e a tensão mecânica exercida no material. Assim, leva-se a análise de que, quanto maior esse valor, mais cargas elétricas estão sendo formadas. O maior valor observado foi o de 1.050 C/N, do material utilizado por Wang e Sun (2016), resultando em uma potência de 0,7 mW. Contudo, o tipo é o PZT-8, que apresenta maiores perdas dielétricas. O segundo maior valor foi o de 750 C/N, adotado por Jasim *et al.* (2018), retornando uma potência de 2,1 W, sendo a terceira melhor quando relacionada a essa propriedade. Possivelmente, o seu valor poderia ser maior caso a espessura fosse superior aos 2 mm existentes.

Com relação aos parâmetros de entrada, foram considerados a carga, a frequência, a resistência e a quantidade de elementos aplicados como influentes na resposta elétrica do protótipo ou elemento. As forças aplicadas variaram de 0,1 kN (ou 100 N) até 80 kN, repetindo-se o valor de 44,5 kN como usual para quantificar a carga de roda de veículos do tipo caminhão (PAPAGIANNAKIS *et al.*, 2017; ROSHANI *et al.*, 2018; MOTA, 2019). A maior carga aplicada foi a de Sun *et al.* (2015), com 80 kN, possibilitando gerar até  $2,78 \times 10^5$  Wh.

As frequências aplicadas partiram de 0,7 Hz até 30 Hz, sendo o valor de 10 Hz mais usualmente encontrado, por representar velocidades próximas de 60 km/h, mais comuns nas rodovias. Autores que simularam diversas frequências destacam que quanto maiores são elas, menores são os tempos de carregamento no elemento piezoelétrico, resultando em uma resposta elétrica mais elevada. Na Tabela 1 foram destacadas apenas aquelas que geraram os melhores resultados.

A resistência elétrica também é destacada. Roshani *et al.* (2018) e Mota (2019) destacam que a resistência interna do protótipo precisa ser igual a resistência externa. Caso isso não ocorra, pode acontecer uma queda abrupta da potência elétrica, tanto com a utilização de resistências inferiores quanto superiores à ótima. Essa resistência pode ser controlada por resistores ou caixas de resistências. A escala utilizada pela maioria das pesquisas foi a de k $\Omega$ , também havendo M $\Omega$  e G $\Omega$ . Esse valor é definido a partir da capacitância do protótipo, calculado conforme a quantidade de elementos e considerando a sua constante piezoelétrica.

A quantidade de elementos piezoelétricos é avaliada por algumas pesquisas. A partir da utilização de mais elementos, observou-se uma redução da potência elétrica em razão de a carga ser dissipada para mais elementos, reduzindo o impacto mecânico na célula piezoelétrica.



Como resposta elétrica, as pesquisas destacam a voltagem e a potência obtida. Alguns autores ainda investigam a quantidade de energia gerada, a partir da aplicação dos parâmetros de entrada em função do tempo. Pela Tabela 1 é possível constatar que o sistema eletromecânico adotado por Duarte *et al.* (2013, 2016, 2019, 2020) é superior ao piezoelétrico, resultando em potências próximas de 200 W, gerando mais de 150 Wh de energia para um tráfego de veículos específico.

Quando analisadas as potências geradas com a utilização do PZT, observa-se que há uma correlação direta entre o aumento da carga, da frequência e da espessura da célula piezoelétrica. Valores da constante piezoelétrica e da espessura de instalação dos elementos no pavimento também contribuem. Quando instalados mais próximos da superfície, as cargas são mais efetivas, contudo, há a possibilidade de ocorrência de fadiga mais rapidamente.

Por fim, ressalta-se que a energia gerada depende do tráfego de veículos existente na via, da velocidade dos veículos e de parâmetros como carga, resistência elétrica e posição no pavimento. Destaca-se a necessidade de autores publicarem todos os dados referentes às suas pesquisas, de modo que se possa analisar e comparar as metodologias de forma mais efetiva, sem separar por propriedades, como foi realizado nesta análise. Contudo, como nem todas as pesquisas destacam todos os parâmetros analisados, a avaliação conjunta dos diversos valores de entrada é dificultada.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentados os métodos adotados: (i) simulação multifísica, com a apresentação dos componentes do protótipo, das variáveis analisadas, dos procedimentos de execução e das limitações das simulações; (ii) ensaio laboratorial, abordando o procedimento de ensaio e suas limitações e (iii) estimativa de potência com aplicação do protótipo simulado em ambiente real. Ainda, são apresentados os materiais utilizados em cada etapa, incluindo propriedades físicas, geométricas e químicas, quando aplicável.

#### 3.1 Primeira etapa: simulações multifísicas

A primeira etapa consistiu da realização de simulações computacionais com as células piezoelétricas arranjadas em um protótipo, a partir de um *software* de análises multifísicas, o COMSOL *Multiphysics*. A licença foi cedida pelo Laboratório de Telecomunicações e Ciência e Engenharia de Materiais (LOCEM), da Universidade Federal do Ceará (UFC). Assim, foram simulados quatro arranjos com as células piezoelétricas entrepostas entre placas de cobre e um corpo de prova (CP) de mistura asfáltica. O protótipo concebido foi submetido à aplicação de cargas, frequências e resistências, permitindo verificar a voltagem e a potência obtida.

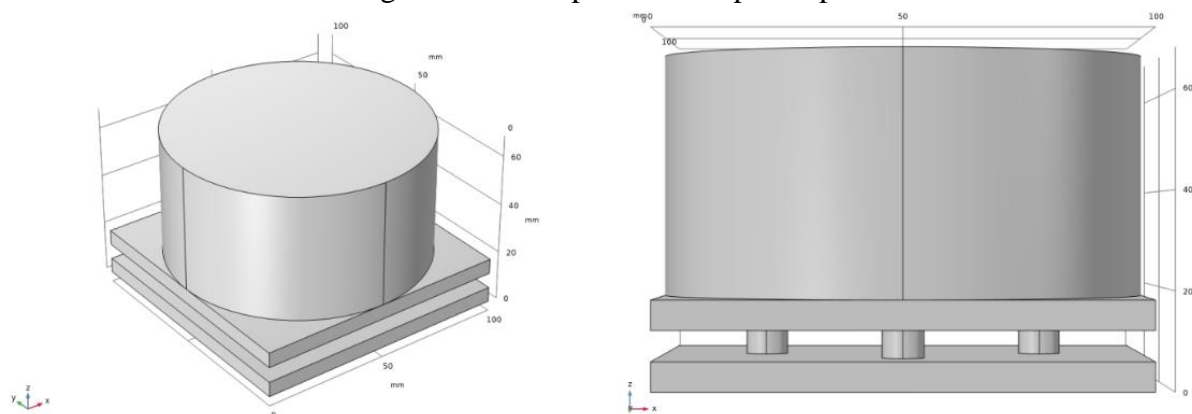
##### 3.1.1 Componentes do protótipo

Para a composição do protótipo, foram selecionados três materiais: (i) CP de mistura asfáltica padrão; (ii) placas de cobre e (iii) células piezoelétricas (ver Figura 17). As dimensões adotadas foram de 100 mm × 100 mm para as placas de cobre, 100 mm de diâmetro e 50 mm de altura para o CP e 8,56 mm de diâmetro e 6,20 mm de altura para as células piezoelétricas. O CP da parte inferior não foi incluso na análise, por não interferir na potência gerada.

A mistura asfáltica possui módulo de elasticidade (E) igual a 8.082 MPa, em função da presença de cal em sua composição; massa específica ( $\delta$ ) de 2.240,00 kg/m<sup>3</sup> e coeficiente de Poisson ( $\nu$ ) de 0,35. As placas de cobre possuem E de 110 GPa,  $\delta$  de 9.310,83 kg/m<sup>3</sup>,  $\nu$  de 0,35 e condutividade térmica igual a 400 W/m×K. Esses dados são referentes aos dados fornecidos no próprio *software*, com exceção das densidades e do módulo de

elasticidade da mistura, proveniente de Vale (2020). As células piezoelétricas foram definidas com o material PZT-5H, uma constante piezoelétrica ( $d_{33}$ ) de  $450 \times 10^{-12}$  C/N,  $\delta$  de 7.816,63 kg/m<sup>3</sup> e temperatura de Curie (TC) de 250 °C, conforme o fabricante. O PZT-5H foi escolhido com base nas aferições da análise bibliográfica, sendo o material mais utilizado e com melhores respostas dielétricas.

Figura 17 – Componentes do protótipo



Fonte: O autor (2021).

### 3.1.2 Variáveis analisadas

Como relatado em Ding *et al.* (2018) e Roshani *et al.* (2018), a posição e a quantidade de células piezoelétricas influenciam na quantidade de energia gerada. Contudo, não foram expostos valores pelos citados autores. Dessa forma, nesta etapa foram realizadas simulações em *software* de análises multifísicas, com o arranjo de quatro (4), oito (8) e dezesseis (16) células piezoelétricas, além de um arranjo alternativo com maiores espaçamentos para o protótipo com 4 células. Na Tabela 2 estão as coordenadas de cada célula piezoelétrica, sendo as células mais espaçadas identificadas pela variação +e. A distribuição dessas células piezoelétricas nas placas de cobre é exposta na Figura 18.

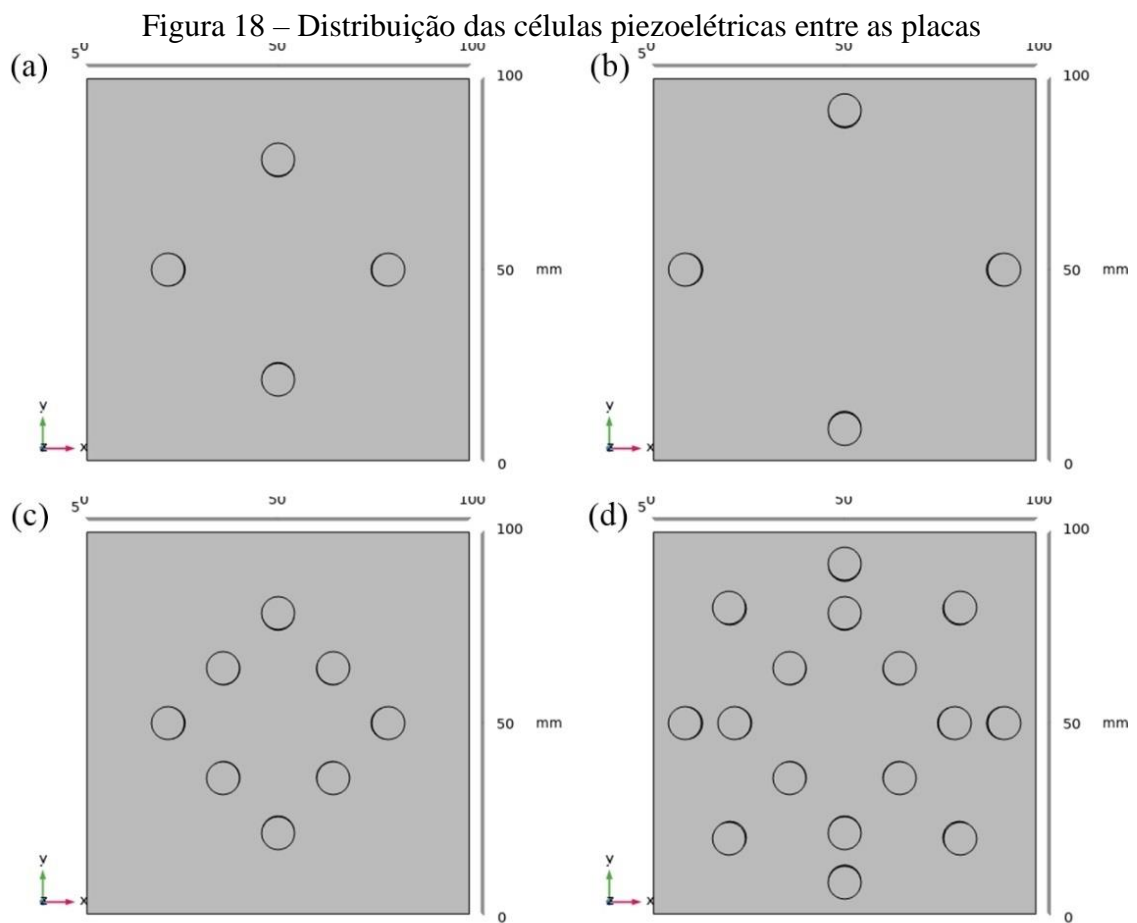
A escolha da quantidade de células baseou-se na observação de problemas de fraturamento precoce dos elementos piezoelétricos quando submetidos às cargas muito elevadas. Dessa forma, foram escolhidas 4, 8 e 16 células para verificar o ponto ótimo entre a potência gerada e a quantidade de elementos, de modo que o sistema resista às cargas dinâmicas as quais o pavimento rodoviário é submetido. Não foram testadas quantidades inferiores a 4 devido a proporção de 6:1.000 entre a área da célula piezoelétrica e a área da

placa de cobre, possibilitando que, ao utilizar menores quantidades de célula, as tensões não se distribuíssem de forma efetiva aos elementos.

Tabela 2 – Coordenadas das células piezoelétricas (em mm, a partir da borda)

Células	Posições (mm)			Células	Posições (mm)		
	x	y	z		x	y	z
1	50,0	21,4	6,0	11	80,0	20,0	6,0
2	21,4	50,0	6,0	12	20,0	80,0	6,0
3	50,0	78,6	6,0	13	8,6	50,0	6,0
4	78,6	50,0	6,0	14	50,0	8,6	6,0
5	35,7	35,7	6,0	15	91,4	50,0	6,0
6	35,7	64,3	6,0	16	50,0	91,4	6,0
7	64,3	35,7	6,0	1+e	8,6	50,0	6,0
8	64,3	64,3	6,0	2+e	50,0	8,6	6,0
9	20,0	20,0	6,0	3+e	91,4	50,0	6,0
10	80,0	80,0	6,0	4+e	50,0	91,4	6,0

Fonte: O autor (2021).



Fonte: O autor (2021).

Para verificar a potência (em mW) e a tensão elétrica (em V), foram aplicadas cargas de 3,4 kN, 5,1 kN, 6,8 kN, 8,5 kN e 10,2 kN no topo do revestimento asfáltico, de forma distribuída por toda a área. Quando aplicadas no CP inserido no protótipo e posteriormente distribuídas às células piezoelétricas, essas forças equivalem a distintas tensões. Assim, foi elaborada a Tabela 3 para identificar as tensões reais que estão sendo aplicadas. Yoder e Witczak (1975) e Medina e Motta (2015) destacam que a pressão dos pneumáticos no pavimento rodoviário varia de 0,15 a 0,70 MPa. Dessa forma, as forças escolhidas abrangem uma ampla variedade de tensões, possibilitando obter a potência específica para qualquer valor ao qual o pavimento esteja submetido.

Tabela 3 – Tensões reais aplicadas no CP e nas células

Cargas (kN)	Tensão no CP (MPa)	Tensão nas células (MPa)					
		4 células		8 células		16 células	
		Total	Unitária	Total	Unitária	Total	Unitária
3,40	0,43	14,77	3,69	7,39	0,92	3,69	0,23
5,10	0,65	22,16	5,54	11,08	1,38	5,54	0,35
6,80	0,87	29,54	7,39	14,77	1,85	7,39	0,46
8,50	1,08	36,93	9,23	18,46	2,31	9,23	0,58
10,20	1,30	44,31	11,08	22,16	2,77	11,08	0,69

Fonte: O autor (2021)

Para simular as velocidades dos veículos trafegando na via, adotaram-se as frequências de 5 Hz, 10 Hz e 20 Hz, que correspondem a 33 km/h, 60 km/h e 115 km/h. Essas velocidades correspondentes foram obtidas a partir da Equação 15 proposta por Song *et al.* (2016), em que  $f$  é a frequência em Hz e  $v$  é a velocidade, em km/h.

$$v = \frac{f+1,2127}{0,1867} \quad (15)$$

Outra consideração importante é acerca da resistência do protótipo. Conforme Roshani *et al.* (2018) e Mota (2019) relatam, para que se obtenha uma potência elétrica máxima, a resistência interna ( $R_I$ ) do protótipo deve ser igual a resistência externa ( $R_E$ ). A  $R_I$  é obtida a partir da Equação 16 e foi utilizada nas simulações realizadas nessa etapa.

$$R_I = \frac{1}{2\pi cf} \quad (16)$$

em que,  $c$  é a capacitância interna do protótipo (em F) e  $f$  é a frequência aplicada no protótipo (em Hz). O valor de  $R_I$  é obtido em  $M\Omega$ . A capacitância interna do protótipo depende do número de discos piezoelétricos. A Tabela 4 apresenta todos os parâmetros piezoelétricos adotados para as combinações de células. Esses são os valores ótimos de resistência para cada situação de frequência e quantidade de células aplicadas, que possibilitarão retornar a máxima potência elétrica obtida no protótipo, calculados a partir da Equação 16, apresentada anteriormente.

Tabela 4 – Parâmetros físicos e elétricos para o protótipo

Quantidade de células	4			8			16		
Espessura (m)	0,0062			0,0062			0,0062		
Área (m <sup>2</sup> )	$2,3020 \times 10^{-4}$			$4,6039 \times 10^{-4}$			$9,2078 \times 10^{-4}$		
d33 (C/N)	$450 \times 10^{-12}$			$450 \times 10^{-12}$			$450 \times 10^{-12}$		
$\epsilon_0$ (F/m)	3400			3400			3400		
$\epsilon_r$ (F/m)	$8,85 \times 10^{-12}$			$8,85 \times 10^{-12}$			$8,85 \times 10^{-12}$		
Capacitância (F)	$1,1172 \times 10^{-9}$			$2,2344 \times 10^{-9}$			$4,4688 \times 10^{-9}$		
Frequência (Hz)	5	10	20	5	10	20	5	10	20
Resistência (M $\Omega$ )	28,4919	14,2460	7,1230	14,2460	7,1230	3,5615	7,1230	3,5615	1,7807

Fonte: O autor (2021).

### 3.1.3 O software COMSOL

O COMSOL *Multiphysics* é um *software* interativo para modelar e simular problemas científicos e de engenharia. Sua interface engloba todas as etapas do fluxo de modelagem, atingindo desde a definição de geometrias, propriedades físicas e de materiais que descrevem fenômenos específicos até a solução e pós-processamento de modelos para a produção e análise de resultados precisos e confiáveis. A plataforma pode ser usada sozinha ou expandida com as funcionalidades de qualquer combinação de módulos complementares para simular eletromagnetismo, mecânica estrutural, acústica, mecânica dos fluidos, transferência de calor, engenharia química e outros.

O *software* contempla diferentes tipos de estudo, como *solvers* transientes ou estacionários para a análise de uma interface física específica. Uma discretização numérica apropriada do modelo matemático também é recomendada, oferecendo uma sequência do *solver* e as configurações de visualização e pós-processamento que são específicas para diferentes fenômenos físicos. As interfaces físicas também podem ser acopladas livremente para descrever processos que envolvem múltiplos fenômenos físicos.

Os modelos multifísicos que constam no *software* consideram uma variada gama de condições de operação e efeitos físicos. Desse modo, torna-se possível o uso de modelos

para compreender, projetar e otimizar processos e dispositivos conforme condições reais de operação, como a aplicação de células piezoelétricas no pavimento rodoviário. As geometrias, por exemplo, são definidas por sequências de operações, em que cada uma delas recebe parâmetros de entrada para facilitar edições e estudos paramétricos em modelos multifísicos. A conexão associativa entre a definição da geometria e as configurações físicas definidas permite que qualquer alteração na geometria propague automaticamente as alterações relacionadas em todas as configurações do modelo associado.

Os métodos de discretização predominantes são baseados em elementos finitos. Dessa forma, o algoritmo de criação de malha cria uma malha com os tipos de elementos apropriados para corresponder aos métodos numéricos associados. Por exemplo, o algoritmo padrão pode usar malha tetraédrica livre ou uma combinação de malha tetraédrica e de camada limite, com uma combinação de tipos de elementos, a fim de fornecer resultados mais rápidos e precisos. Diversos tipos de malha podem ser utilizados durante o processo de solução ou em diferentes etapas do estudo, como o refinamento de malha, remalhamento ou a malha adaptativa.

### 3.1.3.1 Condições de contorno

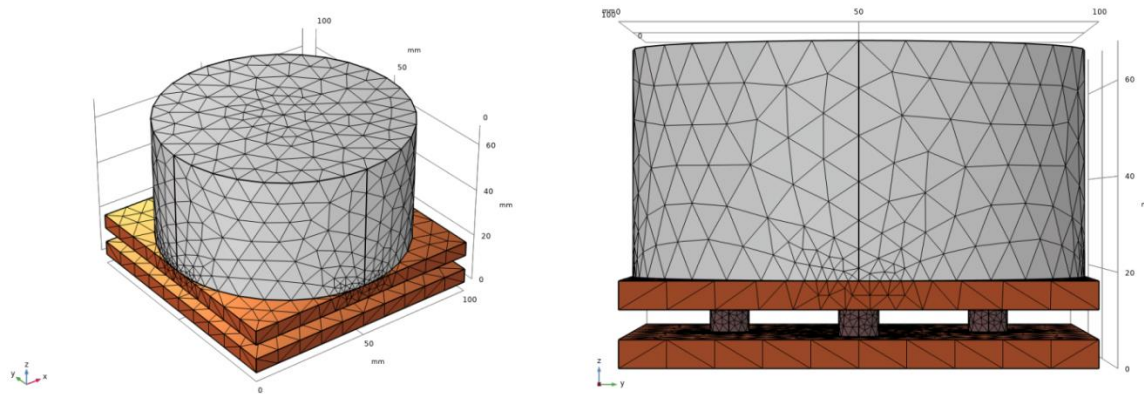
Foram realizadas as análises das frequências e cargas adotadas no tocante a quantidade de potência elétrica, em miliwatts (mW), e da voltagem gerada, em volts (V), além da tensão mecânica acumulada nas células e a verificação da resistência interna do protótipo. O procedimento efetuado para as simulações no *software* seguiu as instruções e passo-a-passo definidos em COMSOL (2015) e no Apêndice I.

Os modelos multifísicos propostos pelo *software* consideram uma variedade de possíveis condições de operação e efeitos físicos. Assim, possibilita a utilização de modelos para entender, projetar e otimizar protótipos e dispositivos para condições reais de operação. A malha foi definida como triangular, de tamanho normal, controlada pelo *software* (ver Figura 19).

As geometrias dos elementos são definidas a partir de sequências de operações, em que cada uma delas é capaz de receber parâmetros de entrada, facilitando edições e estudos paramétricos. Qualquer alteração na geometria ocasiona automaticamente mudanças em todas as configurações do modelo associado, tornando a conexão associativa entre as propriedades físicas e a estrutura geométrica. Os algoritmos adotados criam uma malha com

os tipos de elementos apropriados para a correspondência com os métodos numéricos associados, vide a discretização baseada em elementos finitos.

Figura 19 – Malha adotada pelo protótipo



Fonte: O autor (2021)

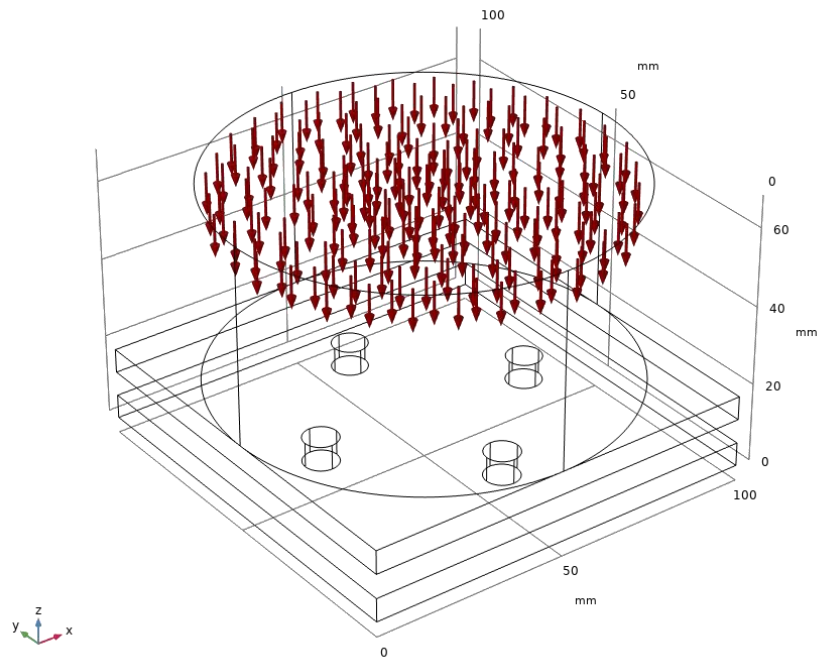
O procedimento de análise utilizou o assistente de modelo (*Model Wizard*) para a dimensão espacial em 3D. As interfaces físicas foram com dispositivos piezoelétricos (*Piezoelectric Devices*) e com circuito elétrico (*Electrical Circuit*). Os tipos de estudo foram o estacionário (*Stationary*) e o domínio da frequência (*Frequency Domain*). As placas de cobre e o corpo de prova de mistura asfáltica foram consideradas materiais com comportamento linear elástico, enquanto as células foram consideradas apenas materiais piezoelétricos.

Com o desenho do CP, das placas e das células, foi escolhida a face inferior da placa de cobre para fixação. A face superior do corpo de prova é selecionada para a aplicação das forças, por meio da função *Boundary Load*. Toda a face foi selecionada e a força foi aplicada igualmente em todos os pontos da malha correspondente, como um carregamento distribuído. A Figura 20 apresenta o carregamento distribuído no protótipo.

Nas definições do módulo eletrostático, a face inferior das células foi definida como fio terra e a face superior como a limitante para o potencial flutuante. Essa consideração permite que seja realizada a simulação de dois eletrodos medindo a diferença de potencial existente. Também foi definida uma sonda pontual para analisar o potencial elétrico. Ainda, foi adicionado um resistor para inserção das resistências apresentadas anteriormente na Tabela 4.



Figura 20 – Carregamento distribuído no protótipo



Fonte: O autor (2021).

O sistema foi submetido à integração de ordem 4, realizada pelo *software*. Para obter-se a voltagem e a potência elétrica, de acordo com a frequência, foram inseridas as Equações 17 e 18 na plotagem dos gráficos na interface do programa. Elas foram definidas em função do circuito adotado com o resistor (COMSOL, 2015).

$$0.5*\text{realdot}(\text{cir.R1\_i},\text{cir.R1\_v}) \quad (17)$$

$$\text{abs}(\text{cir.R1\_v}) \quad (18)$$

em que *realdot* retorna um único resultado, *cir* é o circuito gerado, *R1* é o resistor, *i* é a corrente, *v* é a voltagem e *abs* é o valor absoluto.

### 3.1.3.2 Limitações das simulações

As simulações possuem algumas limitações frente às condições de contorno apresentadas anteriormente. A fixação de uma face, a adoção de fio terra apenas na parte inferior da célula e o potencial flutuante na face superior limita a análise. A não-união dos elementos também pode causar valores diferentes dos reais, bem como a adoção de algumas

propriedades dielétricas das células piezoelétricas, frente a não realização de ensaios com o material adotado (PZT-5H).

### **3.2 Segunda etapa: ensaios laboratoriais**

A segunda etapa consistiu de um ensaio laboratorial com o protótipo proposto na primeira etapa, visando comparar os resultados obtidos de voltagem e potência elétrica. Para isso, foi realizado o ensaio de Módulo Dinâmico (MD) na *Universal Test Machine* (UTM-25) com uma mistura asfáltica padrão do tipo concreto asfáltico (CA), duas placas de cobre e células piezoelétricas do tipo PZT-5H, devido à excelente resposta elétrica descrita nas pesquisas da etapa de revisão. Ainda, foi realizado um teste de compressão com a célula piezoelétrica utilizada, a fim de compreender qual o máximo de tensão que a célula suporta.

#### **3.2.1 Materiais**

Os materiais utilizados para a composição do protótipo foram os mesmos utilizados na etapa de simulações computacionais, possibilitando verificar a ocorrência de correlação entre os resultados obtidos. Foram utilizados, ainda, materiais para captação da voltagem, corrente e para fixação das células piezoelétricas entre as placas de cobre. Todos eles são descritos nesta seção.

##### **3.2.1.1 Protótipo**

O protótipo foi composto por um corpo de prova de mistura asfáltica do tipo concreto asfáltico (CA), dividido em duas partes. Entre os corpos de prova foram adicionadas duas placas de cobre quadradas, com 100 mm de lado e 6 mm de espessura. No meio das placas foram adicionadas as células piezoelétricas, com 6,2 mm de altura e 8,56 mm de diâmetro. (ver Figura 21).

Para fixação das células piezoelétricas nas posições simuladas no *software*, foi fabricada uma placa de poliestireno com as mesmas configurações, inserida entre as placas de cobre. Ainda, para diminuir as irregularidades em decorrência da superfície das placas de cobre, foi utilizada uma pasta de cobre nas superfícies superior e inferior das células piezoelétricas (ver Figura 22). As placas de cobre possuíam massa de 559,8 g para a parte

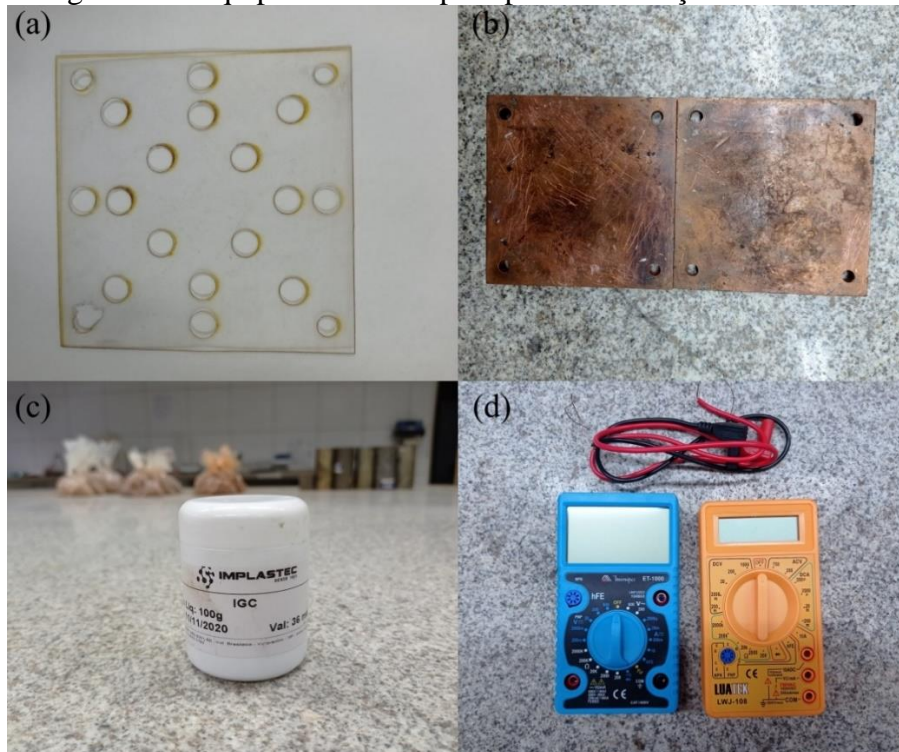
superior e 557,5 g para a parte inferior, resultando em uma densidade de 9.330,00 kg/m<sup>3</sup> e 9.291,67 kg/m<sup>3</sup>, respectivamente.

Figura 21 – Protótipo laboratorial de geração de energia



Fonte: O autor (2021)

Figura 22 – Equipamentos de apoio para a realização dos ensaios



(a) placa de poliestireno para fixação das células; (b) placas de cobre para condução elétrica; (c) epóxi eletrocondutivo e (d) multímetros utilizados.

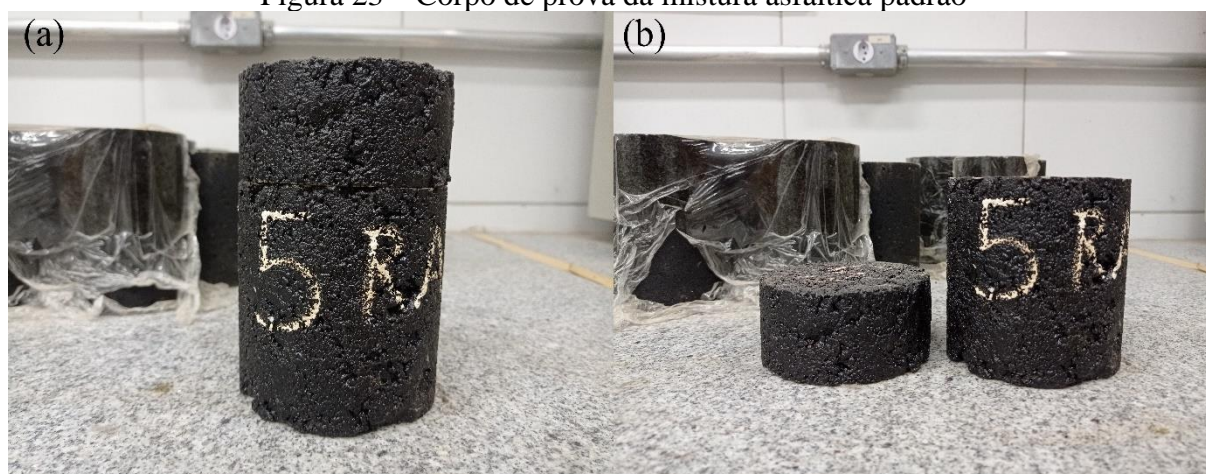
Fonte: O autor (2021).

As placas de cobre foram ligadas a um multímetro digital para leitura da tensão e da corrente elétrica em cada uma das situações de aplicação de carga, frequência e quantidade de células. Foram separados dois multímetros: (i) LWJ-108 e (ii) ET-1000, em razão de a bateria do primeiro ter acabado antes da finalização dos ensaios totais.

### 3.2.1.2 Mistura asfáltica

Como o objetivo deste trabalho não foi avaliar a mistura asfáltica, foi adotada uma mistura padrão de CA, do Laboratório de Mecânica dos Pavimentos (LMP), para a realização de todos os ensaios com o objetivo de apenas verificar os efeitos da mudança de carga, frequência, posição e quantidade de células. Foi utilizado um corpo de prova (CP) para cada rodada de ensaios de mesma configuração (4 ao todo). Na Figura 21 está representado um dos corpos de prova utilizados e na Tabela 5 as dimensões para cada CP, superior e inferior.

Figura 23 – Corpo de prova da mistura asfáltica padrão



(a) CP número 5, inteiro; (b) CP número 5, partido.

Fonte: O autor (2021)

Tabela 5 – Dimensões dos corpos de prova da mistura asfáltica

Identificação do CP	Diâmetro (mm)	Parte superior (mm)	Parte inferior (mm)
5	100,0	49,8	100,2
7	100,0	49,6	100,0
12	100,0	49,9	99,8
14	100,0	50,0	85,0

Fonte: O autor (2021)

A mistura asfáltica era composta de brita 3/4" (28 %) e 3/8" (20 %), pó de pedra (50 %) e cal (2 %) como agregados, dentro dos limites da faixa C do Departamento Nacional

de Infraestrutura de Transportes (DNIT). Em razão da presença de cal, o módulo de elasticidade da mistura (E) foi igual a 8.082 MPa. A temperatura de compactação foi de 136 °C, sendo o Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) aquecido a 148 °C e os agregados a 158 °C. Na Tabela 6 são apresentados os valores relativos ao volume de vazios dos CPs. O *Flow Number* (FN) da mistura foi de 754. As diferenças de volume de vazios não impactaram na potência elétrica obtida. Os resultados da mistura foram obtidos por Vale (2020).

Tabela 6 – Volume de vazios dos corpos de prova

Número do CP	5	7	12	14
Massa seca (g)	2.617,9	2.612,8	2.616,0	2.425,7
Massa submersa (g)	1.458,1	1.455,8	1.455,3	1.347,5
Massa saturada superfície seca (g)	2.268,4	2.619,5	2.624,9	2.430,4
Densidade aparente (Gmb)	2,237	2,245	2,237	2,240
Volume de vazios (%)	4,49	4,13	4,50	4,35
Nº de giros do compactador	100	100	100	85

Fonte: O autor (2021)

### 3.2.1.3 Célula piezoelétrica

As células piezoelétricas foram adquiridas comercialmente. O processo de escolha da célula foi baseado na análise de Mota (2019), em que foi relatado que a espessura era a propriedade geométrica que mais influenciava no potencial elétrico do elemento. Dessa forma, foram pesquisadas diversas configurações de células e a encontrada com maior espessura foi a adotada neste trabalho, com 6,2 mm de altura e 8,56 mm de diâmetro (ver Figura 24). O material utilizado foi o PZT-5H, relatado por pesquisadores como o tipo de maior capacidade dielétrica. As propriedades piezoelétricas da célula estão apresentadas na Tabela 7.

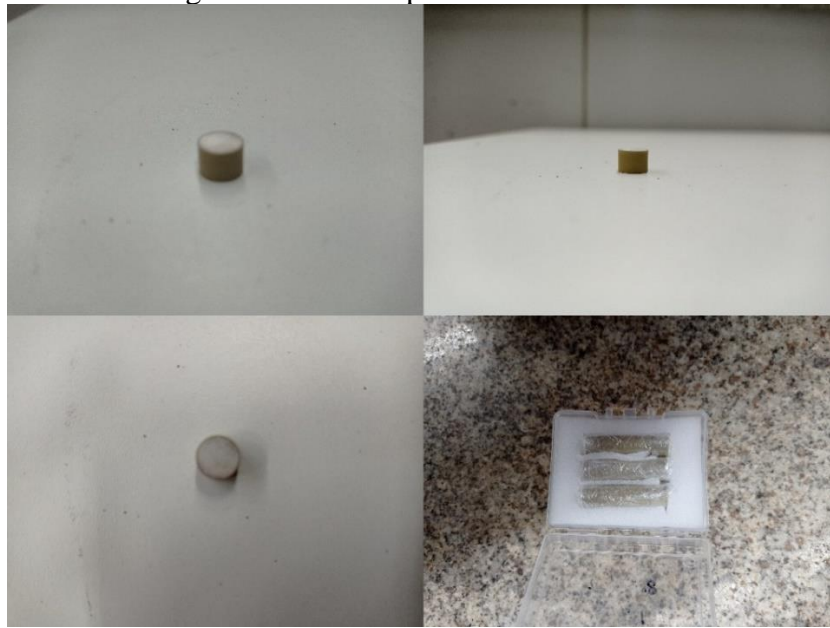
Tabela 7 – Propriedades da célula piezoelétrica

Propriedades	Símbolos	Valores
Constante dielétrica	E	2200 ± 10
Capacitância (pF)	C	180 ± 10
Temperatura de Curie (°C)	Tc	250
Fator de dissipação (%)	tgδ	≤ 2,0
Frequência (kHz)	Fa	195 ± 5
Impedância ressonante (Ω)	R	≤ 180
Coefficiente de acoplamento eletromecânico (%)	K33	≥ 60
Fator de qualidade mecânica	Qm	≥ 60
Constante de carga piezoelétrica (×10 <sup>-12</sup> C/N)	d33	450

Fonte: O autor (2021)



Figura 24 – Célula piezoelétrica utilizada



Fonte: O autor (2021)

### 3.2.2 Procedimento de ensaio

O procedimento de ensaio foi realizado em duas etapas: (i) módulo dinâmico adaptado na UTM-25, para verificação das voltagens e correntes, a partir da aplicação de forças e frequências e (ii) compressão da célula piezoelétrica para encontrar a tensão máxima a ser submetida. A primeira ocorreu no Laboratório de Mecânica dos Pavimentos (LMP) e a segunda no Laboratório Multidisciplinar em Pesquisa Odontológica (LAMPO), em função do tamanho da célula.

#### 3.2.2.1 Módulo dinâmico adaptado

O ensaio foi realizado na UTM-25 (ver Figura 25), com a aplicação de carregamento cíclico de compressão do tipo *haversine* no protótipo. Para isso, foram definidas as mesmas tensões adotadas na etapa de simulação, apresentadas anteriormente na Tabela 3. As forças aplicadas variaram em 1,7 kN e foram aplicadas com o intuito de gerar uma linha de tendência, possibilitando obter a potência e a tensão elétrica a partir de qualquer valor. Em razão do fraturamento dos elementos piezoelétricos com a aplicação de amplitudes maiores, optou-se por não elevar essa força acima de 10,2 kN. Quando foram aplicados 24,5 kN, carga equivalente a uma roda de um caminhão com eixo simples, ocorreu o fraturamento das células em virtude de as placas de cobre não serem totalmente planas e a irregularidade não ter sido

totalmente sanada com a utilização da pasta de cobre. Essa irregularidade ocasiona uma distribuição de tensões irregular nas células, facilitando sua quebra.

Considerando o fraturamento precoce dos elementos em função da irregularidade nas superfícies das placas de cobre, foram adotadas as frequências de 5 Hz, 10 Hz e 20 Hz. Elas representam, aproximadamente, as velocidades de 33 km/h, 60 km/h e 115 km/h, respectivamente, conforme apresentado anteriormente. Assim, o protótipo foi submetido a ciclos de um minuto de aplicação: 300, 600 e 1.200 ciclos, na devida ordem.

Figura 25 – *Universal Test Machine (UTM-25)*



Fonte: O autor (2021).

Diante do exposto, o ensaio ocorreu em 120 etapas, sendo repetidas as quantidades de ciclos para cada par de tensões com frequência nos 4 cenários analisados, um para monitorar a voltagem (em milivolts) e outro a corrente elétrica (em miliampere). A potência elétrica foi calculada utilizando a Equação 19.

$$P = VI \quad (19)$$

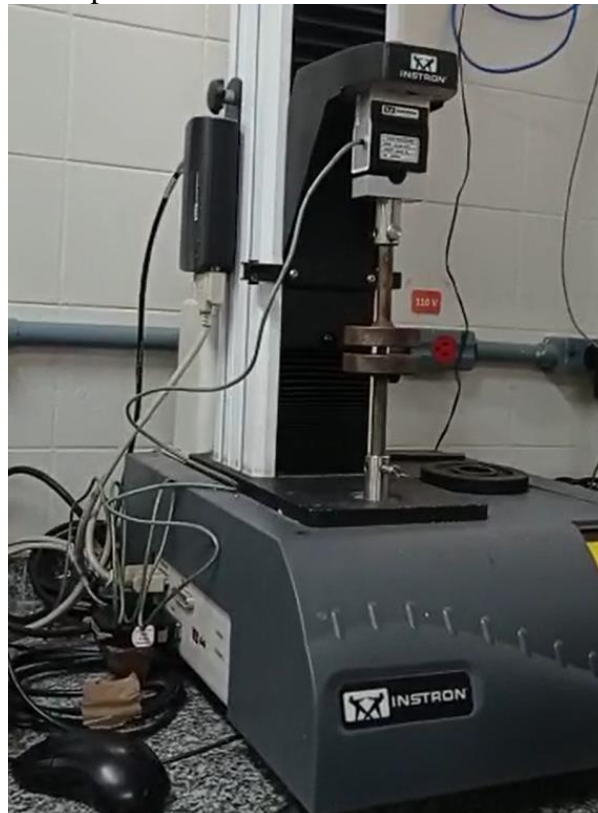
em que P é a potência elétrica (em mW), V é a tensão elétrica (em mV) e I é a corrente (em mA).

Para monitorar a voltagem e a corrente foram gravados e analisados vídeos de cada etapa. Como resultados do ensaio de módulo dinâmico (MD) obtiveram-se as cargas aplicadas e o tempo de aplicação. Os valores apresentados nos vídeos gravados foram cruzados com os de carga obtidos do ensaio de MD. Apesar de, na UTM ser aplicada uma ampla faixa de forças, foi considerada apenas a maior, de mesmo modo para a voltagem e corrente, visto a imprecisão de análise do instante exato de aplicação (em milissegundos) e captação pelo multímetro e o cruzamento desses dados.

### 3.2.2.2 Ensaio de compressão

O ensaio de compressão foi realizado na máquina de ensaio universal Instron (ver Figura 26). A célula piezoelétrica foi inserida entre as bases da máquina e comprimida a deslocamentos de 0,1 mm, até atingir a carga de ruptura. A execução partiu da aplicação da célula de carga máxima existente de 5 kN até o rompimento ou atingir o valor limite para parar o ensaio. Como resultado, foi gerada a curva de deslocamento e carga do material, bem como a tensão máxima a qual a célula piezoelétrica foi submetida.

Figura 26 – Ensaio de compressão com a célula piezoelétrica



Fonte: O autor (2021)



### 3.2.3 Limitações dos ensaios laboratoriais

A execução do ensaio laboratorial ocorreu com limitações, principalmente por falta de financiamento para compra de materiais como um osciloscópio e uma caixa padrão de resistência. A pandemia da Covid-19 também impossibilitou parceria com outros laboratórios da Universidade Federal do Ceará (UFC) que pudessem ceder os equipamentos para a realização dos ensaios.

Um dos pontos mais destacados na seção de revisão bibliográfica foi a necessidade de igualar a resistência interna do protótipo com a resistência externa, sendo possível por meio de uma caixa padrão de resistência. Caso a resistência externa esteja maior ou menor que a interna, a potência elétrica decai de forma acentuada. Assim, a maior limitação do ensaio laboratorial foi a ausência de conferência e equiparação dessas resistências para que os resultados dos ensaios laboratoriais fossem iguais ou mais próximos possíveis das simulações multifísicas. Em razão dessa limitação, foram calculadas as resistências para cada par de força e frequência aplicada, utilizando a Equação 20.

$$R = \frac{V^2}{P} \quad (20)$$

em que R é a resistência (em  $\Omega$ ), V é a tensão elétrica (em V) e P é a potência elétrica (em W).

Outra limitação é que a medição de voltagem e corrente foi realizada em etapas distintas, o que pode ocasionar mudanças nas forças aplicadas e nos valores coletados. Dessa forma, foram realizadas interpolações de valores para igualar as forças aplicadas nos dois ensaios e nos valores de corrente, quando necessário.

Ainda, a irregularidade das placas de cobre possibilitou que as tensões se distribuíssem de forma desproporcional entre as células, o que pode ocasionar mudanças nos resultados obtidos. Apesar da tentativa de preencher os vazios entre as áreas de contato com uma pasta de cobre, o problema ainda ocorreu, fraturando alguns elementos piezoelétricos.

Com relação ao ensaio de compressão, a limitação foi relativa à célula de carga, em que o maior valor era de 5 kN, impossibilitando a aplicação de forças maiores. Dessa forma, foi impossível determinar a tensão de rompimento do elemento, visto que a máquina atingiu a carga limite antes do fraturamento da célula piezoelétrica.

Por fim, com relação à análise dos vídeos gravados, apesar de serem obtidos diversos valores de tensão elétrica e corrente, ocorreu a impossibilidade de cruzá-los com a carga aplicada, visto que o ângulo de fase do ensaio não foi determinado. Isso poderia ser solucionado com a utilização de um osciloscópio, que representaria a senoidal das voltagens captadas no sistema.

### 3.3 Terceira etapa: simulação em ambiente real

A terceira etapa ocorreu com a simulação de aplicação do protótipo em um trecho da BR-222, localizado na cidade de Caucaia, no estado do Ceará. A justificativa de escolha do trecho foi baseada nas observações retiradas da seção de revisão bibliográfica, em que são sugeridas vias expressas ou de alta velocidade, com elevado volume de tráfego. O pavimento da BR-222 é submetido a um alto tráfego de veículos comerciais e comuns que impactam diretamente na sua estrutura, devido às cargas aplicadas. Ainda, considerando a relevância da rodovia para o desenvolvimento do país, definiu-se a mesma como local de estudo desta etapa.

De acordo com Torquato e Silva, Bastos e Soares (2015), a camada de revestimento desse trecho é composta por mistura do tipo Concreto Asfáltico (CA) possuindo 5 cm de espessura. Logo em seguida tem-se uma camada de *binder* com 6 cm de espessura. Dessa forma, o protótipo seria instalado entre as camadas de rolamento e de *binder*.

O Volume Médio Diário (VMD) foi coletado para o km 33 da BR-222, situado na cidade de Caucaia, no estado do Ceará (Latitude: -3.703694444, Longitude: -38.85297222). Nesse trecho, a rodovia é configurada como pista simples. Os dados apresentados na Tabela 8 são relativos ao ano de 2018, apresentado em veículos por dia, para cada dia da semana.

Tabela 8 – Dados de tráfego para o km 33 da BR-222

Dias	Segunda	Terça	Quarta	Quinta	Sexta	Sábado	Domingo
Sentido	Total	Total	Total	Total	Total	Total	Total
Caminhões e ônibus (2 eixos)	1.200	1.246	1.302	1.346	1.359	904	521
Veículos de passeio	7.294	6.657	6.660	6.861	8.198	7.499	6.496

Fonte: DNIT (2019)

Para essa análise, foram considerados apenas os carros de passeio e o conjunto de ônibus e caminhões de 2 eixos, sendo adotadas as cargas de 1,98 kN e 24,5 kN por roda para cada, respectivamente (YODER e WITCZAK, 1975; MEDINA e MOTTA, 2015; CONTRAN, 2006). A velocidade máxima permitida na via é de 60 km/h. Para essa análise foi considerado que todos os veículos estavam trafegando no limite de velocidade.

Para o cálculo do volume médio horário foi realizada a média simples dos volumes médios diários e divididos por 24 horas. Obteve-se um volume de veículos de passeio de 296 veic/h e de 47 veic/h do conjunto ônibus e caminhões de 2 eixos. Dessa forma, os valores de carga foram aplicados nas equações obtidas na etapa anterior para a frequência de 10 Hz, correspondendo a aproximadamente 60 km/h, para obter a potência elétrica e a voltagem. Assim, foram realizados os cálculos de impacto do volume, considerando a potência constante durante o tempo. Por fim, foram realizadas as simulações no *software* COMSOL com as cargas adotadas para verificar o nível de correlação da extrapolação dos dados com os valores obtidos diretamente pelo programa.

Nessa etapa foi considerado que a aplicação ocorreria sem interferências, com placas de cobre totalmente planas e um pavimento sem irregularidade longitudinal considerável, apesar de que, conforme Guedes e Oliveira (2018), o IRI médio para o km 22 da BR-222 (local mais próximo do tráfego coletado com resultados encontrados para irregularidade) é igual a 1,95 m/km, sendo considerado excelente pelo DNIT (2011), por ser menor que 2,5 m/km.

### **3.4 Custos de aplicação**

Para essa etapa, foram quantificados os valores das placas de cobre, das células piezoelétricas e caixas de resistência a serem instaladas no trecho adotado no tópico 3.3. A quantidade de energia elétrica, em kWh, foi comparada às observadas com a utilização de outras fontes renováveis de energia existentes no estado do Ceará, realizando uma análise de custos e compensação frente ao valor pago por kWh.

Também foi verificado o período de retorno do investimento com base no consumo médio de kWh no estado do Ceará. Para essa análise, foi considerada que a potência obtida na simulação de aplicação em ambiente real permanece constante em função do tempo, adotado em hora.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo foram apresentados os resultados para as quatro etapas do método de pesquisa. Nas simulações multifísicas foram abordadas as influências das resistências, forças, frequências, quantidade de células e espaçamento na quantidade de tensão e potência elétrica gerada. Ainda, em um subtópico, foram discutidas as tensões mecânicas exercidas nas células piezoelétricas e o impacto no seu possível fraturamento. Para o ensaio laboratorial foram apresentadas as mesmas análises, excluindo-se a influência das resistências em decorrência da limitação apresentada pela não utilização da caixa de resistência externa.

Na etapa de estimativa de produção de energia em um trecho real de rodovia foram apresentadas as potências totais, conforme o tráfego e parâmetros adotados na seção de métodos do capítulo anterior. Por fim, na etapa final foram demonstrados e comparados os custos de implantação e retorno financeiro por meio da piezoelectricidade com outras fontes renováveis de geração de energia.

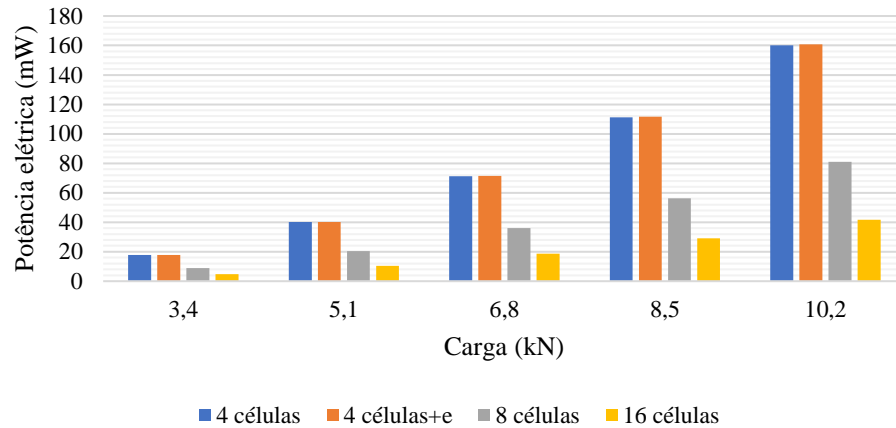
### 4.1 Análise das simulações multifísicas

#### 4.1.1 Tensões e potências elétricas

A primeira etapa foi realizada, aplicando as forças de 3,4 kN, 5,1 kN, 6,8 kN, 8,5 kN e 10,2 kN em função da quantidade de células e das frequências de 5 Hz, 10 Hz e 20 Hz. Os resultados obtidos foram plotados nos gráficos 3, 4 e 5, correspondentes às frequências citadas, de forma sequencial. Os valores de potência foram obtidos para a resistência interna correspondente a cada frequência e combinação de células, exposta na Tabela 4 e apresentada anteriormente no item 3.1.2. As resistências adotadas foram calculadas de forma a retornarem os valores máximos de potência para cada combinação de frequência e quantidade de células. O conjunto de 4 células mais espaçadas foi representado por “+e”.

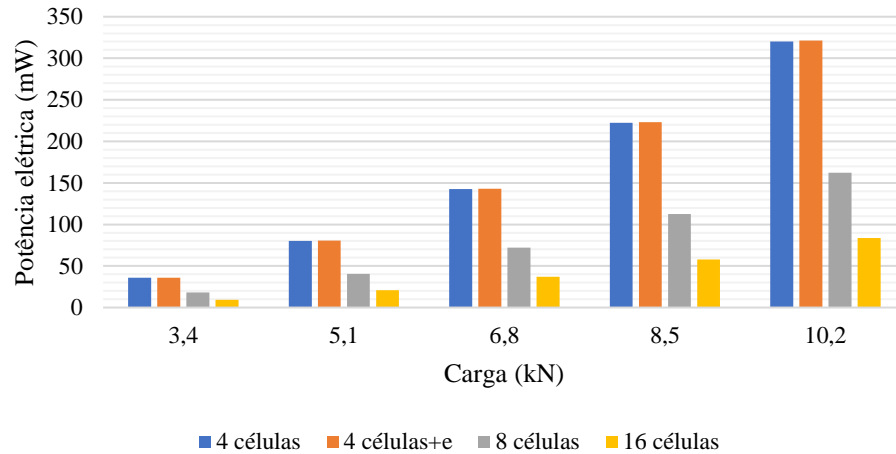
Diante do exposto nos gráficos de 3 a 5, observa-se que a potência gerada diminui com o aumento da quantidade de células aplicadas. Isso ocorre devido a força aplicada se distribuir igualmente para um maior somatório de áreas das células piezoelétricas. Contudo, essa diminuição de potência elétrica não ocorre de forma proporcional. Com relação ao conjunto de 4 células piezoelétricas, a combinação de 8 reduz em média 49 % e a de 16 em 74 %. Ainda, com relação ao conjunto de 8 células, a combinação de 16 reduz 48 %, em média.

Gráfico 3 – Potência gerada para a aplicação de 5 Hz



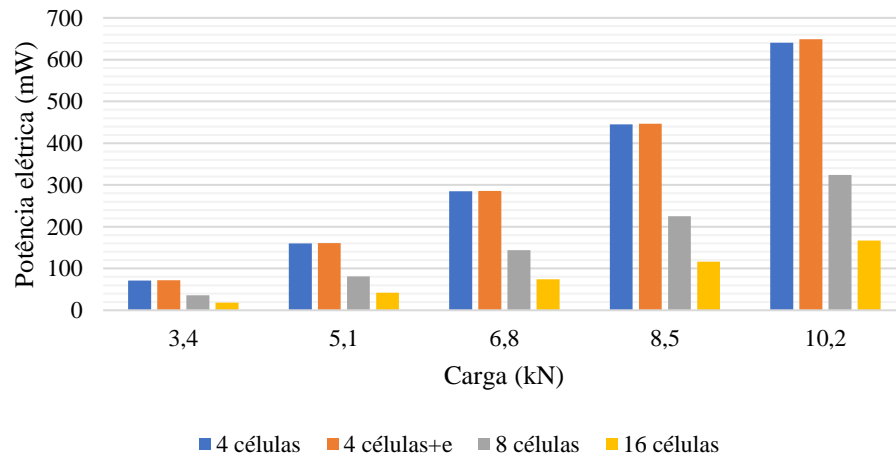
Fonte: O autor (2021)

Gráfico 4 – Potência gerada para a aplicação de 10 Hz



Fonte: O autor (2021)

Gráfico 5 – Potência gerada para a aplicação de 20 Hz



Fonte: O autor (2021)

Outro resultado importante é com relação ao espaçamento das células piezoelétricas. Foram testadas duas configurações de posicionamento para o conjunto de 4 células piezoelétricas e observou-se que para a situação de células mais espaçadas a potência gerada foi um pouco maior. Com relação a outra configuração esse aumento representa, em média, 0,39 %. Esse crescimento de potência acontece em razão de o efeito piezoelétrico de uma célula interferir menos na atuação das demais ao seu redor.

Com relação aos valores de potência obtidos com os resultados otimizados da resistência, o maior valor obtido foi para 10,2 kN e 20 Hz, com 4 células mais espaçadas, resultando em 648,8 mW. Seguindo a mesma tendência, o menor valor foi obtido para 3,4 kN e 5 Hz, com 16 células, sendo igual a 4,7 mW. Dessa forma, constatou-se que a potência aumenta diretamente com a elevação da carga e da frequência aplicada. Contudo, ela reduz com o aumento da quantidade de células.

Quando analisadas as tensões elétricas, observou-se que foram as mesmas para ambas as frequências testadas, variando apenas com relação as forças aplicadas e a quantidade de células. Isso ocorreu devido as resistências terem variado conforme as frequências testadas, com o objetivo de obter-se os valores máximos de potência. Os valores de tensão elétrica são apresentados na Tabela 9 e variaram de 258 V a 3.026 V para as configurações de 16 células e 4 células mais espaçadas, respectivamente.

Tabela 9 – Tensões elétricas para os valores ótimos de resistência

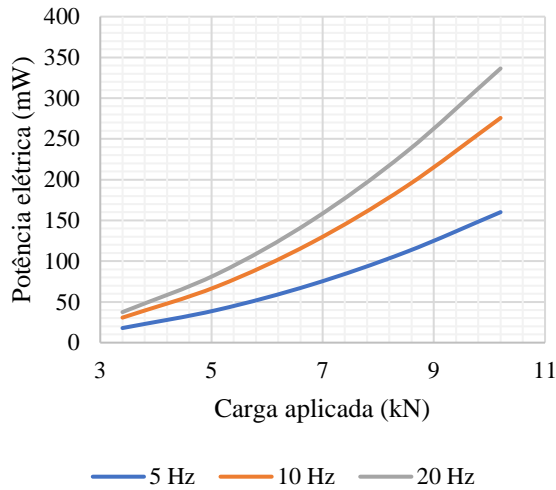
Quantidade de células piezoelétricas	Frequências (Hz)	Forças aplicadas (kN)				
		3,4	5,1	6,8	8,5	10,2
		Tensão elétrica (V)				
4	5	1009	1512	2015	2518	3021
	10	1009	1512	2015	2518	3021
	20	1009	1512	2015	2518	3021
4+e	5	1010	1514	2018	2522	3026
	10	1010	1514	2018	2522	3026
	20	1010	1514	2018	2522	3026
8	5	508	761	1014	1267	1520
	10	508	761	1014	1267	1520
	20	508	761	1014	1267	1520
16	5	258	386	515	643	771
	10	258	386	515	643	771
	20	258	386	515	643	771

Fonte: O autor (2021)

A análise realizada posteriormente foi relativa aos valores de resistência e a sua influência na potência elétrica, a partir da variação da frequência e da carga aplicada. Nesse

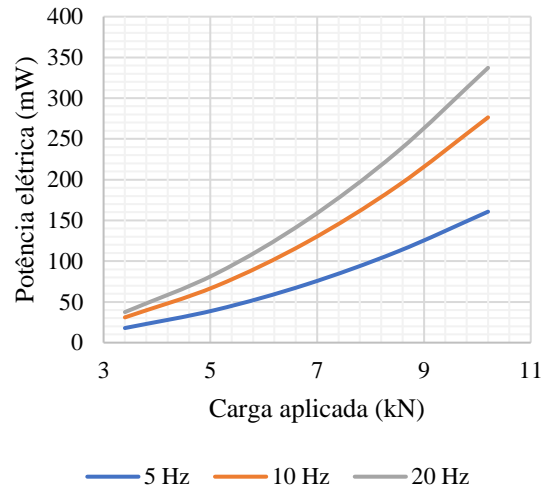
sentido, foi testada a mesma resistência (5 valores, apresentados na Tabela 4) para aplicação de ambas as frequências. Os gráficos de 6 a 17 apresentam os valores de potência conforme a resistência aplicada e a quantidade de células piezoelétricas.

Gráfico 6 – Potência para 4 células e  $R = 28,4919 \text{ M}\Omega$



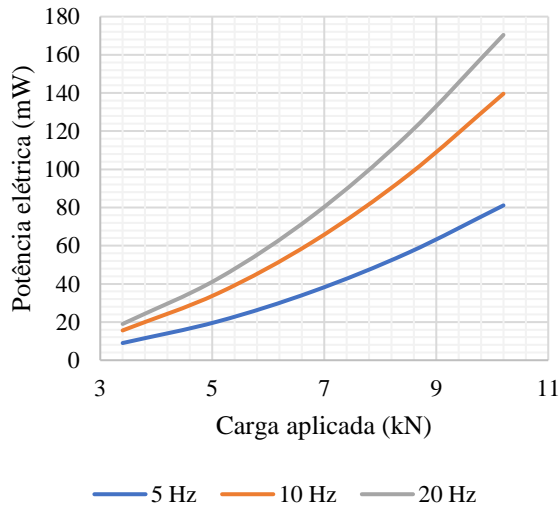
Fonte: O autor (2021)

Gráfico 7 – Potência para 4 células mais espaçadas e  $R = 28,4919 \text{ M}\Omega$



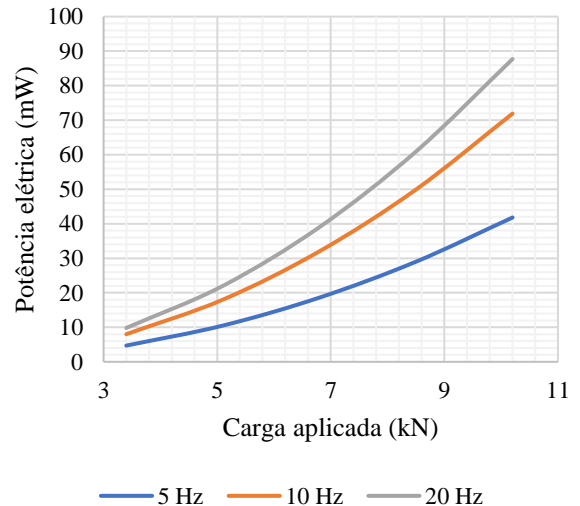
Fonte: O autor (2021)

Gráfico 8 – Potência para 8 células e  $R = 14,2460 \text{ M}\Omega$

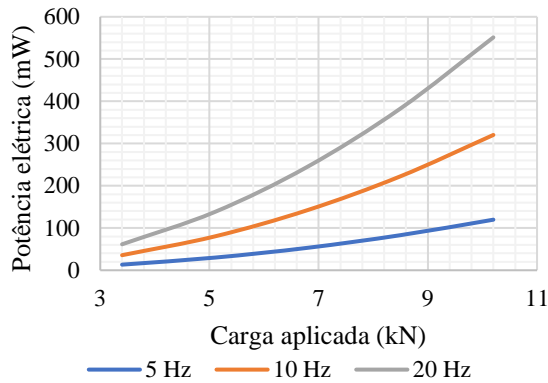


Fonte: O autor (2021)

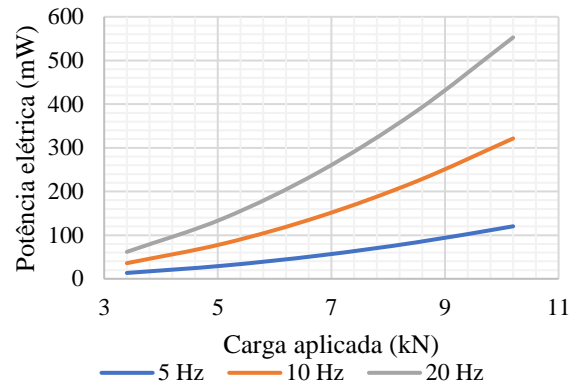
Gráfico 9 – Potência para 16 células e  $R = 7,1230 \text{ M}\Omega$



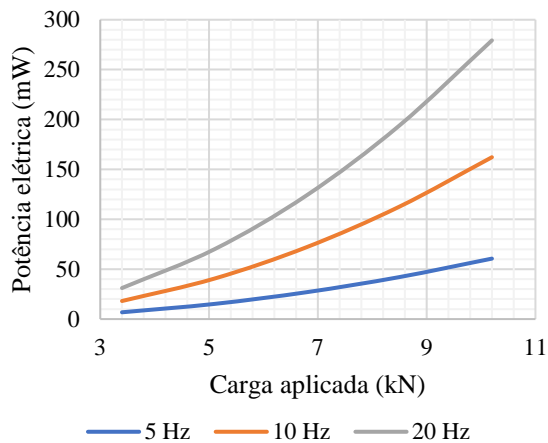
Fonte: O autor (2021)

Gráfico 10 – Potência para 4 células e  $R = 14,2460 \text{ M}\Omega$ 

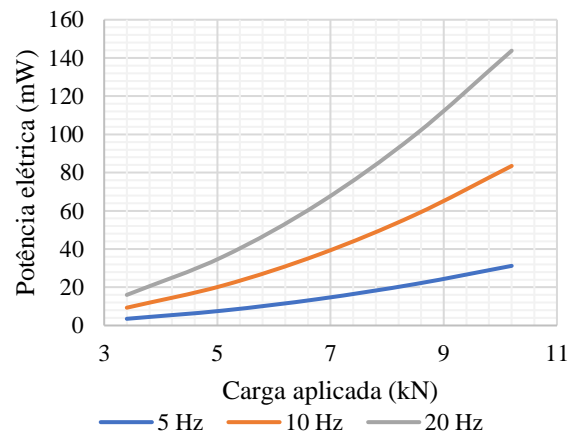
Fonte: O autor (2021)

Gráfico 11 – Potência para 4 células mais espaçadas e  $R = 14,2460 \text{ M}\Omega$ 

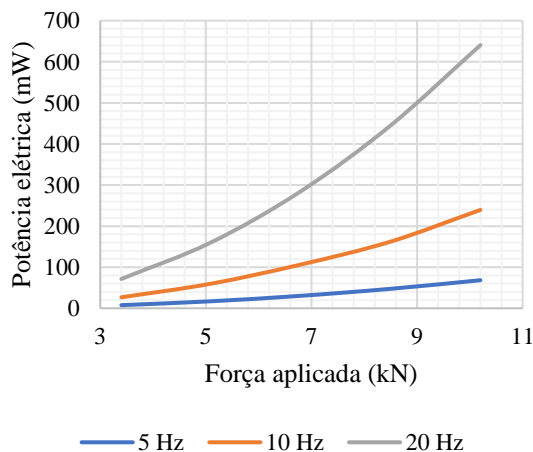
Fonte: O autor (2021)

Gráfico 12 – Potência para 8 células e  $R = 7,1230 \text{ M}\Omega$ 

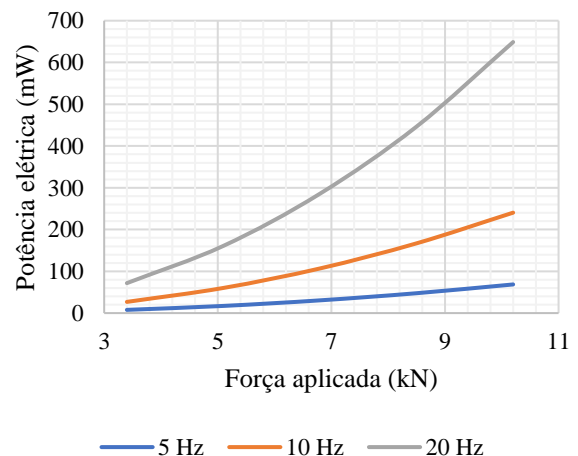
Fonte: O autor (2021)

Gráfico 13 – Potência para 16 células e  $R = 3,5615 \text{ M}\Omega$ 

Fonte: O autor (2021)

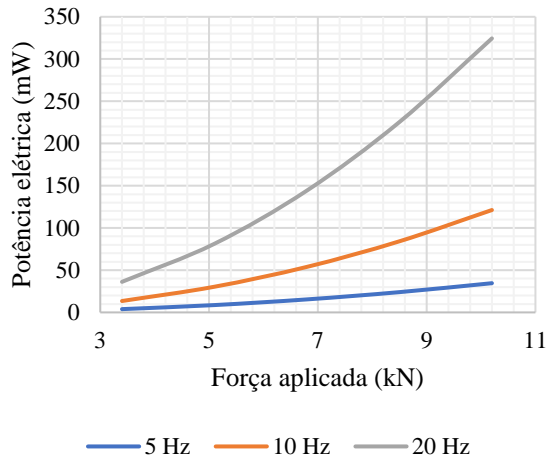
Gráfico 14 – Potência para 4 células e  $R = 7,1230 \text{ M}\Omega$ 

Fonte: O autor (2021)

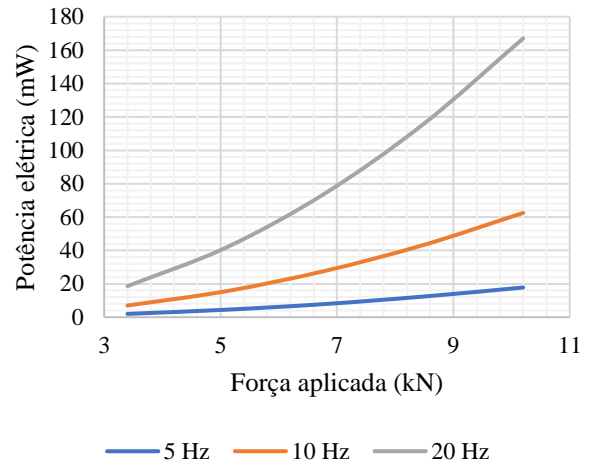
Gráfico 15 – Potência para 4 células mais espaçadas e  $R = 7,1230 \text{ M}\Omega$ 

Fonte: O autor (2021)



Gráfico 16 – Potência para 8 células e  $R = 3,5615 \text{ M}\Omega$ 

Fonte: O autor (2021)

Gráfico 17 – Potência para 16 células e  $R = 1,7807 \text{ M}\Omega$ 

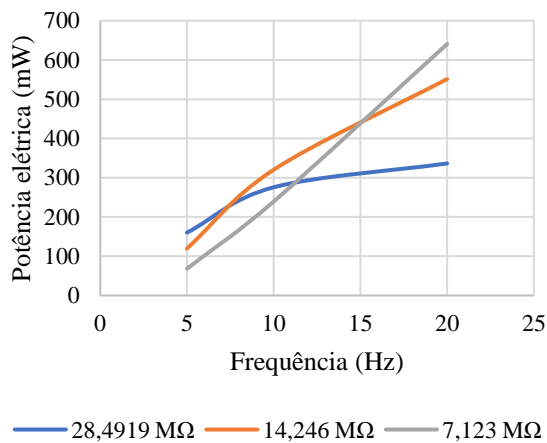
Fonte: O autor (2021)

Diante dos gráficos apresentados, observa-se a sensibilidade da potência à variação da resistência interna do protótipo. Para a frequência de 5 Hz, em resistências mais altas (gráficos de 6 a 9) apresentou-se um coeficiente angular mais elevado, abrangendo um maior intervalo de potências geradas para as forças aplicadas. Para as situações de 4 células, 4 células mais espaçadas, 8 células e 16 células, esse intervalo abrange 17,9 - 160,1 mW, 17,9 - 160,7 mW, 9,0 - 81,1 mW e 4,7 - 41,8 mW, respectivamente. Enquanto que, para a situação de resistências mais baixas, esse intervalo é de 7,6 - 68,3 mW, 7,7 - 68,6 mW, 3,9 - 34,6 mW e 2,0 - 17,8 mW, em sequência para 4, 4+e, 8 e 16 células. Ressalta-se que as resistências foram reduzidas em 75 %, quando comparadas as mais baixas com as mais altas, contudo, as potências diminuiram 57,4 % para o intervalo citado. Ainda, pelos gráficos de 14 a 17, notou-se a proximidade da curva a uma reta para as resistências mais baixas, na situação de 5 Hz de frequência.

Com relação à frequência de 10 Hz, o seu melhor comportamento ocorreu para a resistência intermediária testada (gráficos de 10 a 13), em ambas as situações de variação de quantidade de células piezoelétricas. Como exemplo, cita-se a potência obtida para a carga de 10,2 kN na situação de 4 células mais espaçadas, no valor de 321,4 mW para a resistência de 14,2460  $\text{M}\Omega$ . Esse valor é reduzido para 276,4 mW na resistência de 28,4919  $\text{M}\Omega$ , representando uma queda de 14,0 % para uma resistência 50 % superior a ótima. Ainda, decaiu para 240,4 mW, representando 25,2 % a menos para a resistência de 7,1230  $\text{M}\Omega$ , que corresponde à 50 % da ótima.

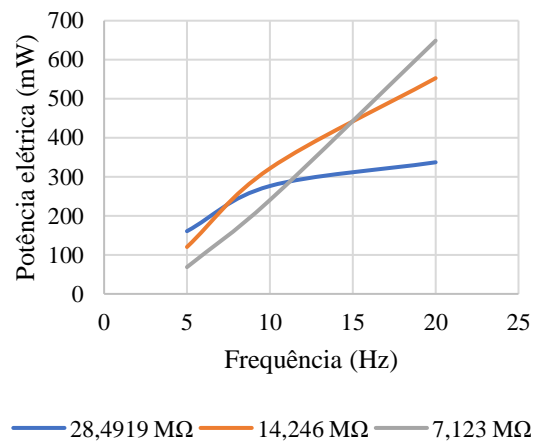
Para a frequência de 20 Hz, a menor resistência testada para cada combinação de células foi a que apresentou o máximo de potência. Quando comparados os valores de potência elétrica para  $R = 7,1230 \text{ M}\Omega$  com  $R = 28,4919 \text{ M}\Omega$ , houve um aumento de, em média, 90,6 %. Na situação de 4 células mais espaçadas, com aplicação de 10,2 kN, a potência máxima obtida para a menor resistência foi de 648,8 mW, enquanto que para a maior foi 337,2 mW. Nos gráficos de 18 a 21 foram apresentadas as potências em função da frequência, para cada situação de resistência, de acordo com a aplicação da força de 10,2 kN em 4, 4+e, 8, e 16 células, possuindo como coeficiente de variação apenas a quantidade de células piezoelétricas. O comportamento das curvas repete-se para as demais forças testadas.

Gráfico 18 – Potência em função da frequência para 4 células e  $F = 10,2 \text{ kN}$



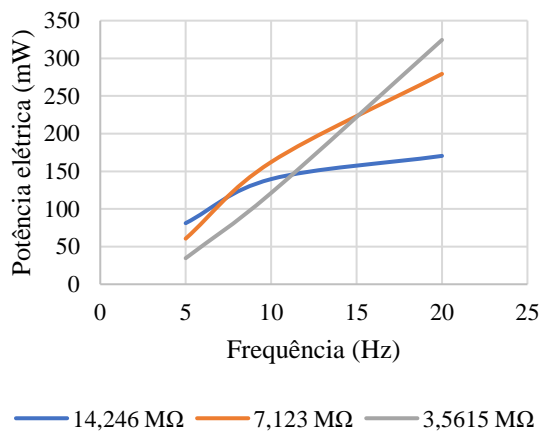
Fonte: O autor (2021)

Gráfico 19 – Potência em função da frequência para 4 células mais espaçadas e  $F = 10,2 \text{ kN}$



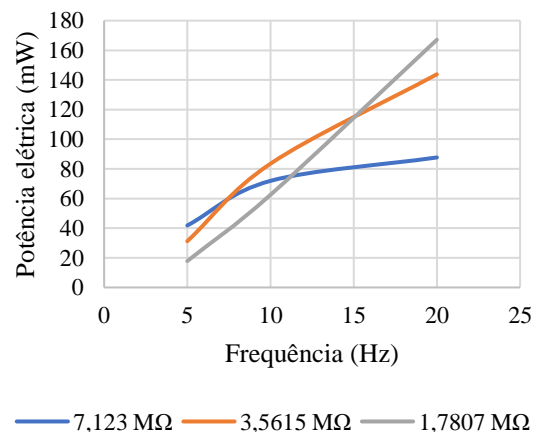
Fonte: O autor (2021)

Gráfico 20 – Potência em função da frequência para 8 células e  $F = 10,2 \text{ kN}$



Fonte: O autor (2021)

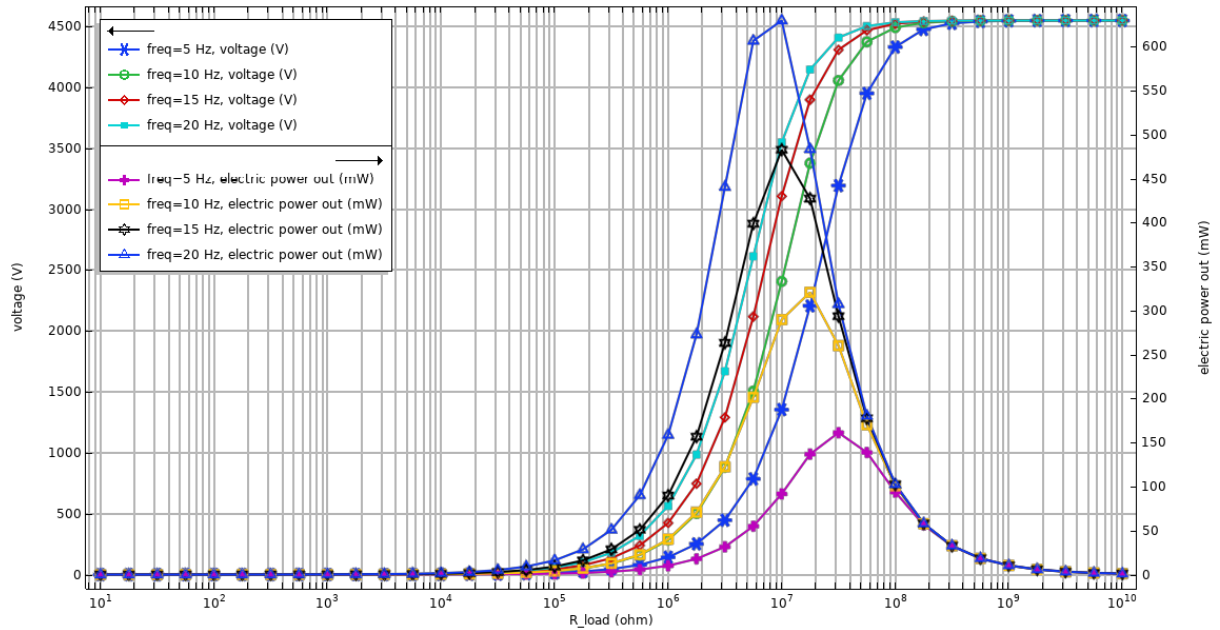
Gráfico 21 – Potência em função da frequência para 16 células e  $F = 10,2 \text{ kN}$



Fonte: O autor (2021)

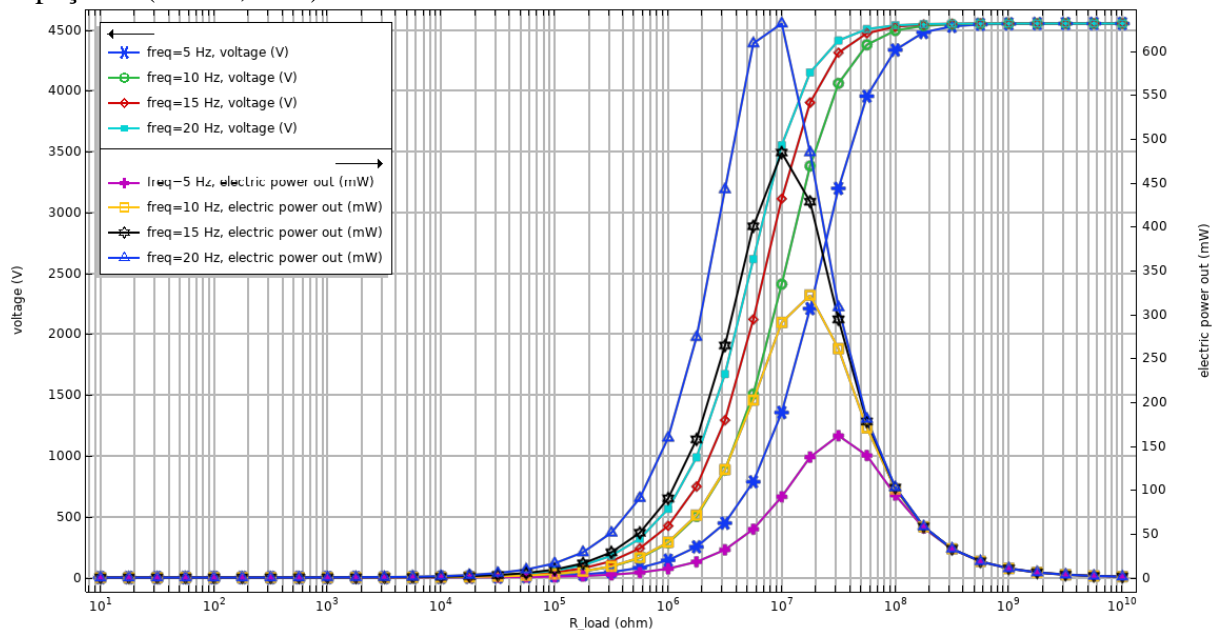
Ainda, foi simulada a potência e a tensão elétrica máxima obtidas a partir da variação da resistência no eixo x, fixando a frequência e a carga. Os Gráficos 22 a 25 apresentam essa variação para a força de 10,2 kN. O mesmo padrão de comportamento é observado para as demais forças.

Gráfico 22 – Potência e tensão elétrica a partir da variação da resistência para 4 células ( $F = 10,2$  kN)



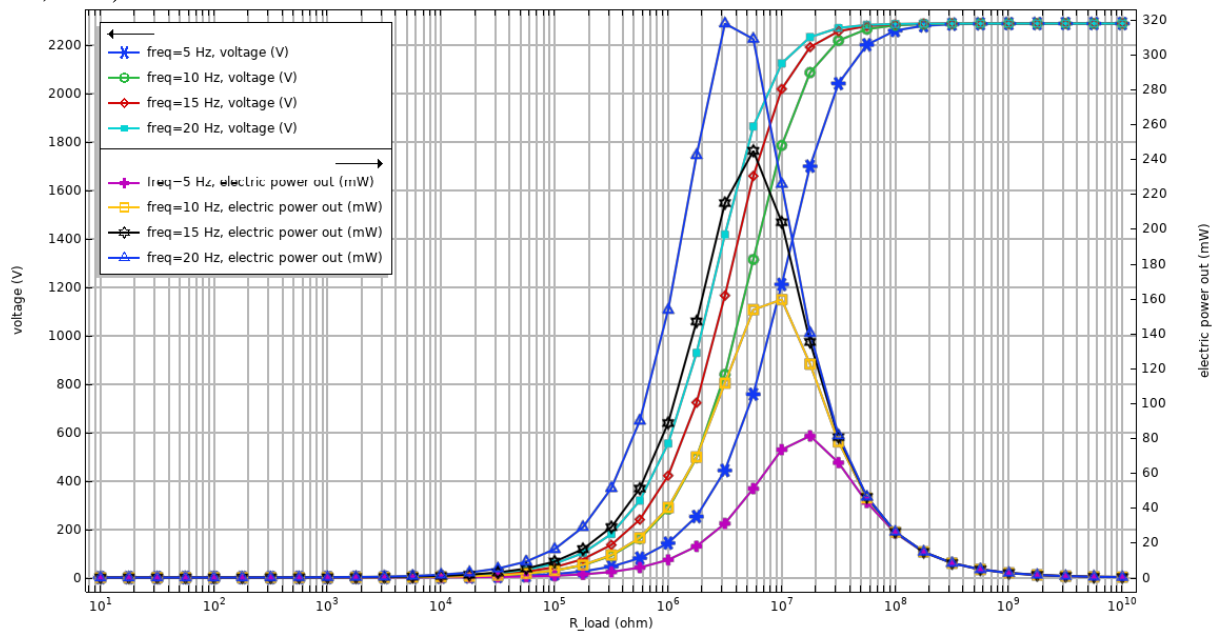
Fonte: O autor (2021)

Gráfico 23 – Potência e tensão elétrica a partir da variação da resistência para 4 células mais espaçadas ( $F = 10,2$  kN)



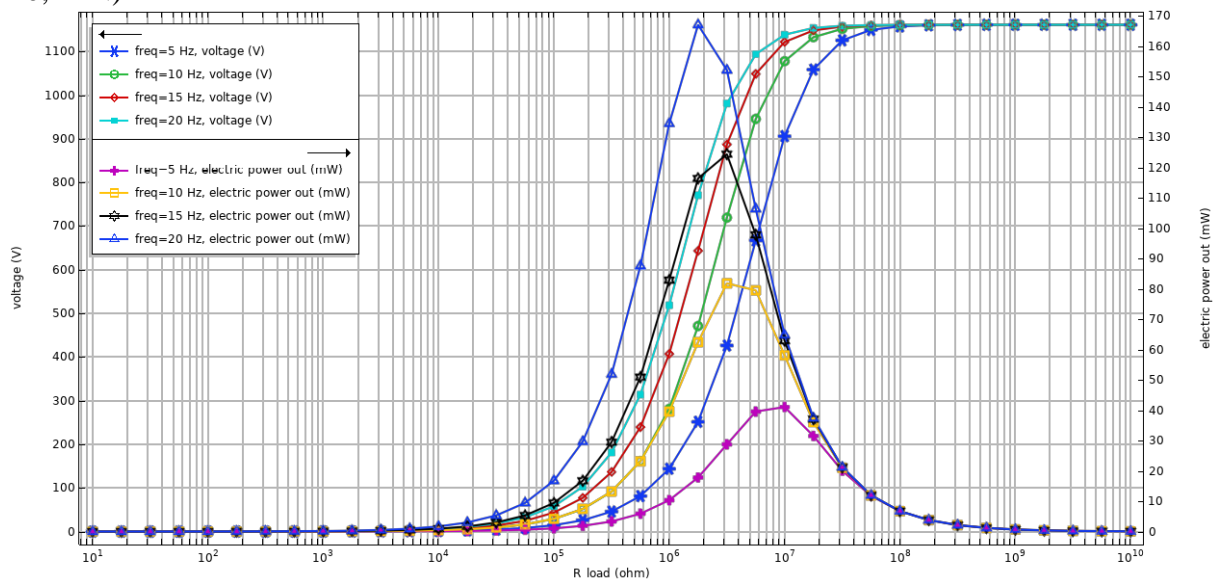
Fonte: O autor (2021)

Gráfico 24 – Potência e tensão elétrica a partir da variação da resistência para 8 células ( $F = 10,2 \text{ kN}$ )



Fonte: O autor (2021)

Gráfico 25 – Potência e tensão elétrica a partir da variação da resistência para 16 células ( $F = 10,2 \text{ kN}$ )



Fonte: O autor (2021)

Com relação às tensões elétricas, não foi identificado o mesmo padrão de comportamento com a mudança das resistências. Foi observado que as tensões decaíram com a diminuição da resistência elétrica (ver Tabela 10). É válido ressaltar que esses seriam os valores máximos a serem obtidos. Em campo, não se chegariam a eles, principalmente por serem de alta tensão. Ainda, os valores apresentados na Tabela 10 estão aproximadamente

iguais aos obtidos a partir do cálculo apresentado na Equação 14, com uma diferença média de 5 %.

Tabela 10 – Tensões elétricas máximas obtidas nas simulações

Quantidade de células	Resistência (M $\Omega$ )	Frequência (Hz)	Forças (kN)					
			3,4	5,1	6,8	8,5	10,2	
			Tensão elétrica (V)					
4	28,4919	5	1009	1512	2015	2518	3021	
		10	1324	1984	2643	3303	3963	
		20	1462	2191	2920	3649	4378	
	14,2460	5	617	924	1231	1539	1847	
		10	1009	1512	2015	2518	3021	
		20	1323	1983	2643	3303	3963	
	7,1230	5	329	494	658	822	986	
		10	617	924	1232	1539	1847	
		20	1009	1512	2015	2518	3021	
4+e	28,4919	5	1008	1514	2018	2522	3026	
		10	1320	1986	2647	3308	3969	
		20	1460	2194	2923	3653	4383	
	14,2460	5	618	926	1234	1542	1850	
		10	1010	1514	2018	2522	3026	
		20	1320	1986	2647	3308	3969	
	7,1230	5	330	494	659	824	989	
		10	617	926	1234	1542	1850	
		20	1010	1514	2018	2522	3026	
8	14,2460	5	508	761	1014	1267	1520	
		10	666	998	1330	1663	1995	
		20	736	1103	1470	1837	2204	
	7,1230	5	310	465	620	774	929	
		10	508	761	1014	1267	1520	
		20	666	998	1330	1663	1995	
	16	3,5615	5	166	248	331	414	496
			10	310	465	620	775	929
			20	508	761	1014	1267	1520
7,1230		5	258	386	515	643	771	
		10	338	506	675	844	1012	
		20	373	559	746	932	1118	
3,5615		5	158	236	315	393	472	
		10	258	386	515	643	771	
		20	338	506	675	843	1012	
1,7807	5	84	126	168	210	252		
	10	158	236	315	393	472		
	20	258	386	515	643	771		

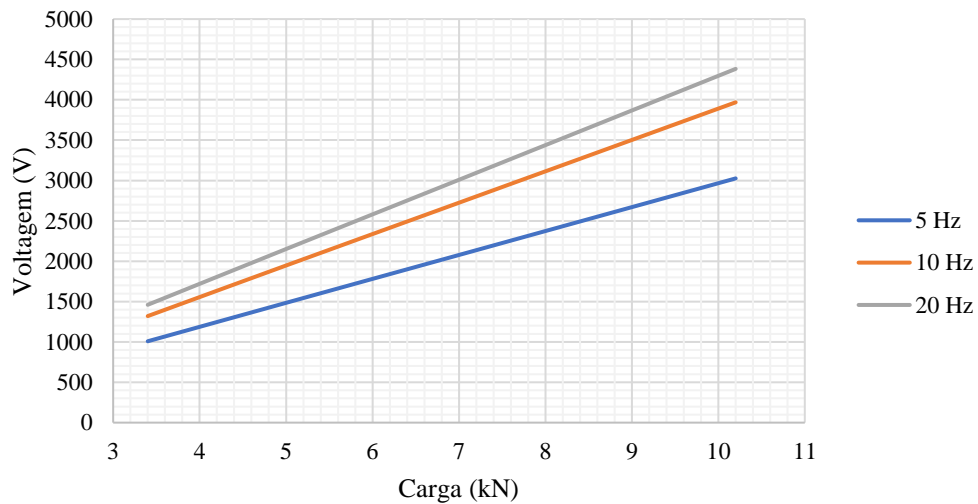
Fonte: O autor (2021)

Quanto à aplicação de frequências, percebeu-se que, com relação à resistência maior, houve reduções médias de 67 %, 53 % e 31 % nos valores de potência elétrica para 5

Hz, 10 Hz e 20 Hz, respectivamente, ao ser adotada a menor resistência entre as testadas. A mesma tendência com relação ao aumento de cargas e frequências também ocorre para as tensões elétricas que também são elevadas.

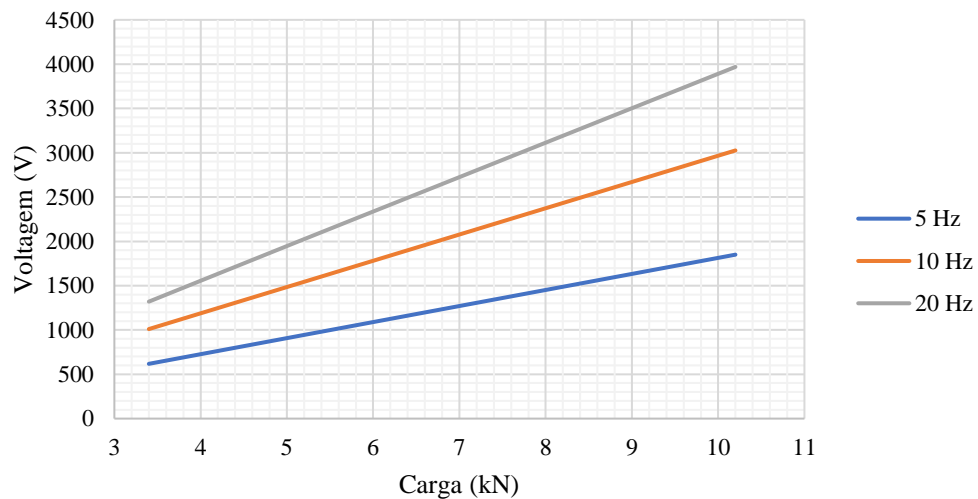
Ainda, foi possível observar que a potência cresce de forma exponencial (conforme gráficos de 6 a 17), na medida que as frequências são aumentadas. Contudo, as voltagens crescem de forma linear, conforme apresentado nos gráficos 26, 27 e 28 para o conjunto de 4 células mais espaçadas e para as resistências de 28,4919 M $\Omega$ , 14,2460 M $\Omega$  e 7,1230 M $\Omega$ , respectivamente. As demais combinações de células seguem o mesmo padrão de comportamento.

Gráfico 26 – Tensão elétrica para 4 células mais espaçadas e R = 28,4919 M $\Omega$

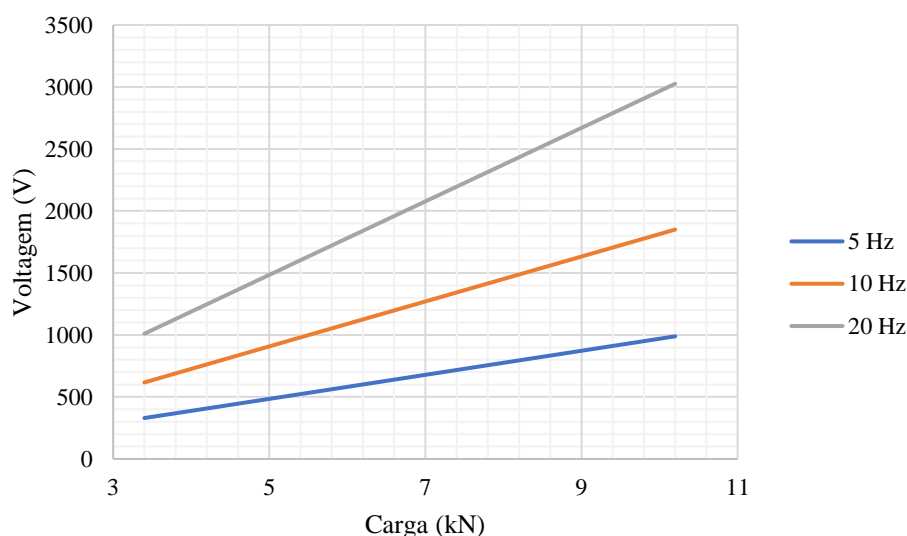


Fonte: O autor (2021)

Gráfico 27 – Tensão elétrica para 4 células mais espaçadas e R = 14,2460 M $\Omega$



Fonte: O autor (2021)

Gráfico 28 – Tensão elétrica para 4 células mais espaçadas e  $R = 7,1230 \text{ M}\Omega$ 

Fonte: O autor (2021)

Constata-se, então, que as potências elétricas são dependentes de variáveis como a frequência (ou velocidade do veículo) de aplicação, a carga aplicada, a resistência elétrica e da quantidade de células, que se relacionam entre si. A relação de dependência de mais de uma variável impossibilita uma análise mais simples. Entretanto, é possível afirmar, com base nas análises multifísicas geradas pelo *software*, que quanto maiores as variáveis de carga e frequência, melhores serão os resultados de potência elétrica obtida.

No sentido inverso, a quantidade de células quando é aumentada reduz a produção elétrica do protótipo, visto que a tensão aplicada no topo do CP distribui-se uniformemente para uma área maior, fazendo com que cada célula piezoelétrica receba uma menor quantidade de carga. Outro fator que contribui para a diminuição da potência elétrica é a resistência elétrica do protótipo. Com o aumento da quantidade de células, há uma diminuição da resistência elétrica do protótipo, causada pela relação inversa com a capacitância, demonstrada pela Equação 16 na seção 3.1.2.

Assim, relacionando-se os valores da Tabela 10 com a Equação 14 apresentada na seção 2.3, comprova-se que a tensão elétrica é reduzida com elevação da área de aplicação. Dessa forma, obtendo-se tensões e resistências elétricas menores, a potência também reduz, visto a relação direta entre as duas variáveis, representada pela Equação 20 na seção 3.2.3.

Diante disso e com base nos comportamentos dos valores de potência com as variações mencionadas, foram geradas 36 equações para obter a potência elétrica a partir da aplicação de diferentes cargas, fixando as demais variáveis. Na Tabela 11 foram apresentadas

as equações geradas (21 a 56), em que x é a carga aplicada (em kN) e y é a potência elétrica gerada (em mW).

Tabela 11 – Equações para obtenção da potência a partir da carga aplicada

Quantidade de células	Resistências (MΩ)	Frequências (Hz)	Equações	R <sup>2</sup>	
4	28,4919	5	$y = 1,5575x^{1,9944}$ (Eq. 21)	1,00	
		10	$y = 2,6618x^{1,998}$ (Eq. 22)	1,00	
		20	$y = 3,2539x^{1,9972}$ (Eq. 23)	1,00	
	14,2460	5	$y = 1,1528x^{1,9992}$ (Eq. 24)	1,00	
		10	$y = 3,0984x^{1,9972}$ (Eq. 25)	1,00	
		20	$y = 5,3424x^{1,9964}$ (Eq. 26)	1,00	
	7,1230	5	$y = 0,6591x^{1,9983}$ (Eq. 27)	1,00	
		10	$y = 2,3467x^{1,9874}$ (Eq. 28)	0,99	
		20	$y = 6,1976x^{1,9971}$ (Eq. 29)	1,00	
4+e	28,4919	5	$y = 1,552x^{1,9979}$ (Eq. 30)	1,00	
		10	$y = 2,7025x^{1,9921}$ (Eq. 31)	1,00	
		20	$y = 3,2501x^{1,9987}$ (Eq. 32)	1,00	
	14,2460	5	$y = 1,1632x^{1,997}$ (Eq. 33)	1,00	
		10	$y = 3,1061x^{1,9977}$ (Eq. 34)	1,00	
		20	$y = 5,3592x^{1,9961}$ (Eq. 35)	1,00	
	7,1230	5	$y = 0,6728x^{1,9905}$ (Eq. 36)	1,00	
		10	$y = 2,3264x^{1,9969}$ (Eq. 37)	1,00	
		20	$y = 6,1721x^{2,0023}$ (Eq. 38)	1,00	
8	14,2460	5	$y = 0,7787x^{2,0007}$ (Eq. 39)	1,00	
		10	$y = 1,3576x^{1,9948}$ (Eq. 40)	1,00	
		20	$y = 1,6502x^{1,9967}$ (Eq. 41)	1,00	
	7,1230	5	$y = 0,5938x^{1,9913}$ (Eq. 42)	1,00	
		10	$y = 1,5717x^{1,9964}$ (Eq. 43)	1,00	
		20	$y = 2,6992x^{1,9976}$ (Eq. 44)	1,00	
	16	3,5615	5	$y = 0,3426x^{1,9861}$ (Eq. 45)	1,00
			10	$y = 1,1725x^{1,9972}$ (Eq. 46)	1,00
			20	$y = 3,1462x^{1,996}$ (Eq. 47)	1,00
7,1230		5	$y = 0,4118x^{1,9885}$ (Eq. 48)	1,00	
		10	$y = 0,6937x^{1,9983}$ (Eq. 49)	1,00	
		20	$y = 0,8534x^{1,9943}$ (Eq. 50)	1,00	
3,5615		5	$y = 0,3047x^{1,9929}$ (Eq. 51)	1,00	
		10	$y = 0,8066x^{1,998}$ (Eq. 52)	1,00	
		20	$y = 1,3867x^{1,9987}$ (Eq. 53)	1,00	
1,7807	5	$y = 0,1756x^{1,9886}$ (Eq. 54)	1,00		
	10	$y = 0,6084x^{1,9939}$ (Eq. 55)	1,00		
	20	$y = 1,6114x^{1,9986}$ (Eq. 56)	1,00		

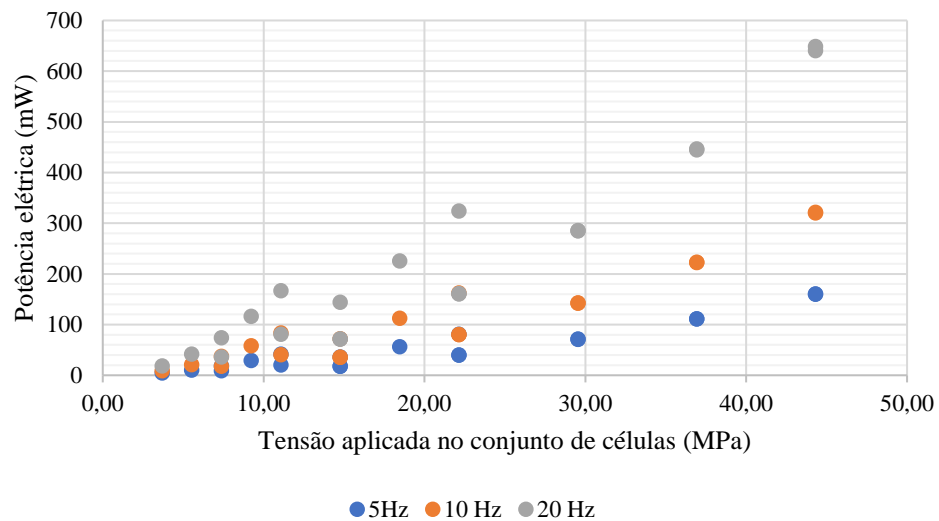
Fonte: O autor (2021)

É possível analisar os resultados de potência com base nas tensões aplicadas. Como relatado, as forças foram limitadas à 10,2 kN, contudo, aplicando-as em relação à área do corpo de prova de mistura asfálticas, obtiveram-se tensões variando de 0,43 MPa a 1,30



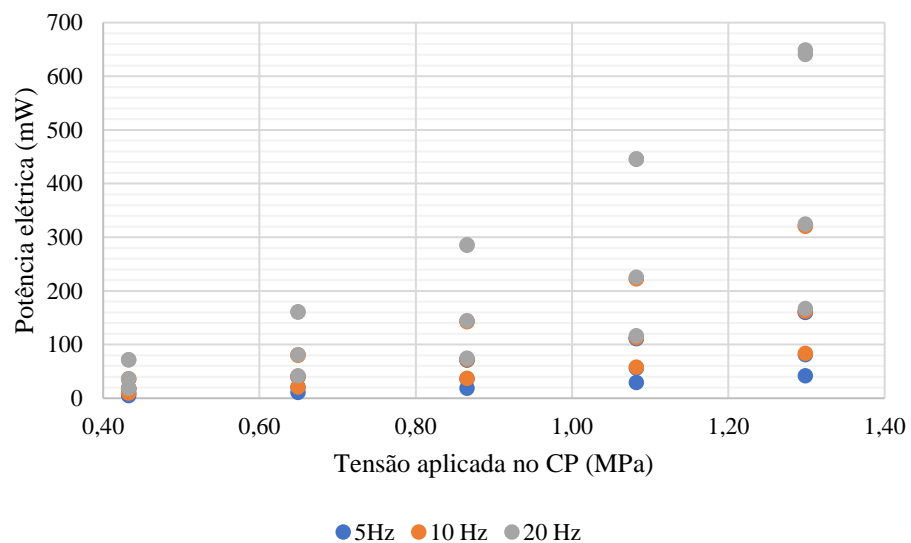
MPa. Yoder e Witczak (1975) e Medina e Motta (2015) destacam que a pressão dos pneumáticos varia entre 0,15 MPa a 0,70 MPa, no pavimento rodoviário. Essas mesmas forças, quando distribuídas sobre o somatório das áreas das células piezoelétricas, resultaram em tensões variando de 3,69 MPa até 44,31 MPa, conforme apresentado na Tabela 3 da seção 3.1.2. Assim, são apresentados os gráficos 29 e 30 com as respostas elétricas em função das tensões exercidas no somatório das áreas das células e na área do CP, respectivamente.

Gráfico 29 – Potência em função da tensão aplicada no conjunto de células



Fonte: O autor (2021)

Gráfico 30 – Potência em função da tensão aplicada no CP



Fonte: O autor (2021)

Os resultados apresentados nos gráficos 29 e 30 permitem a obtenção da potência elétrica obtida pelo sistema a partir da aplicação de qualquer tensão a qual o pavimento esteja submetido. Dessa forma, as tensões mecânicas às quais o protótipo foi submetido abrangem uma parcela da faixa de referência e valores superiores, principalmente quando considerado os somatórios das áreas das células. Tal análise permite considerar o efeito da sobrecarga dos veículos a trafegarem na rodovia e a verificar a resistência mecânica do elemento piezoelétrico. Ainda, para os casos em que haja irregularidade longitudinal, a tensão aplicada no ponto seguinte de contato do pneu-pavimento pode atingir o dobro da esperada, aumentando o impacto na estrutura do pavimento e nas células piezoelétricas.

#### 4.1.2 Tensão mecânica

As células piezoelétricas e o protótipo como um todo (corpo de prova e placas de cobre) foram submetidas às tensões apresentadas na Tabela 3 da seção 3.1.2. Assim, foi realizada no *software* COMSOL uma análise mecânica da tensão a qual esses elementos foram submetidos.

Essa tensão é calculada a partir da aplicação conjunta da resistência elétrica, da carga e da frequência aplicadas. Nos gráficos de 31 a 34 são apresentadas as tensões mecânicas para cada frequência (5 Hz, 10 Hz e 20 Hz), considerando a combinação de células 4, 4+e 8 e 16, respectivamente, para a menor resistência elétrica de cada bloco de células (7,123 M $\Omega$  para 4 e 4+e; 3,5615 M $\Omega$  para 8 e 1,7807 M $\Omega$  para 16 células) por apresentarem as maiores variações.

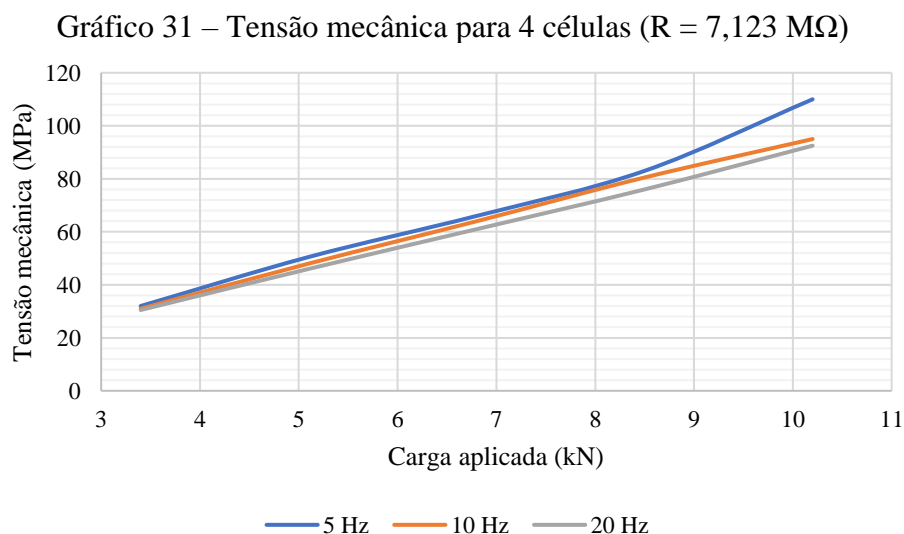
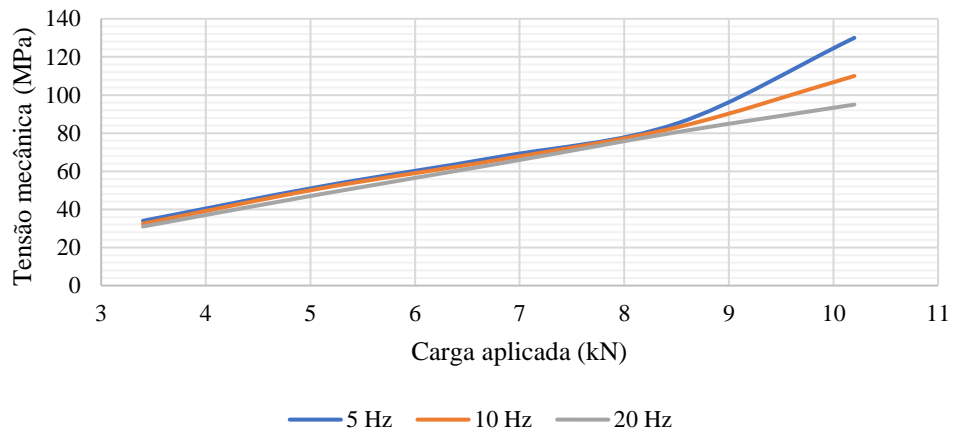
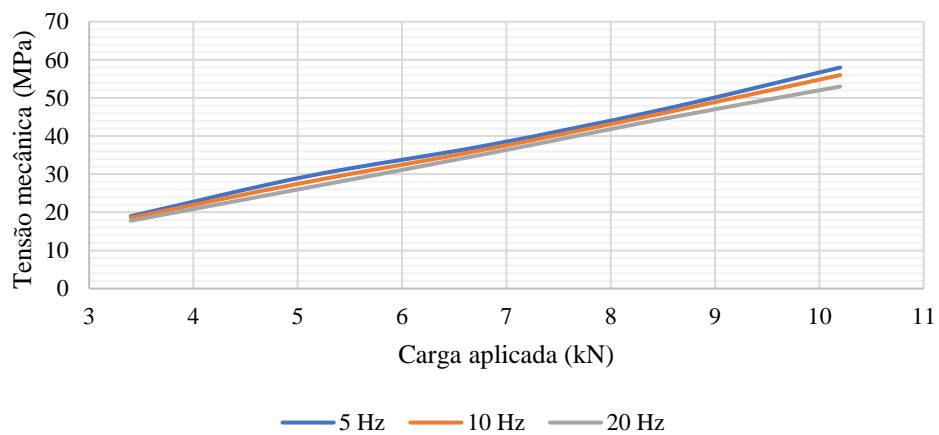
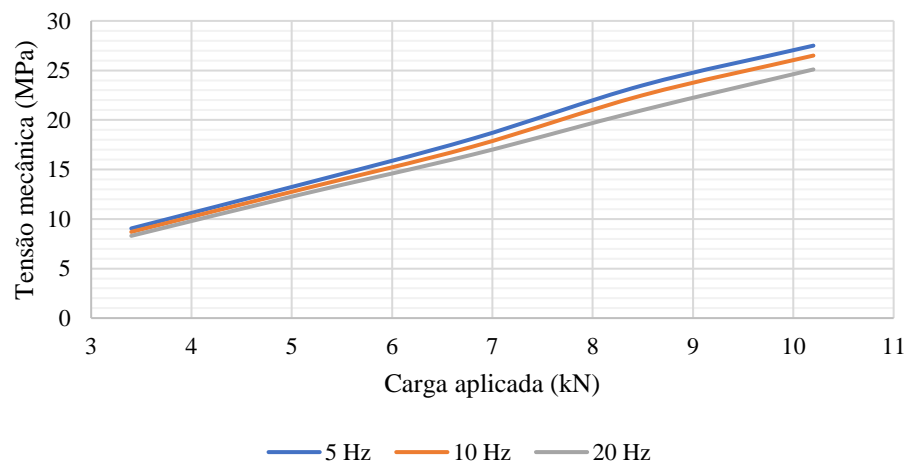


Gráfico 32 – Tensão mecânica para 4 células mais espaçadas ( $R = 7,123 \text{ M}\Omega$ )

Fonte: O autor (2021)

Gráfico 33 – Tensão mecânica para 8 células ( $R = 3,5615 \text{ M}\Omega$ )

Fonte: O autor (2021)

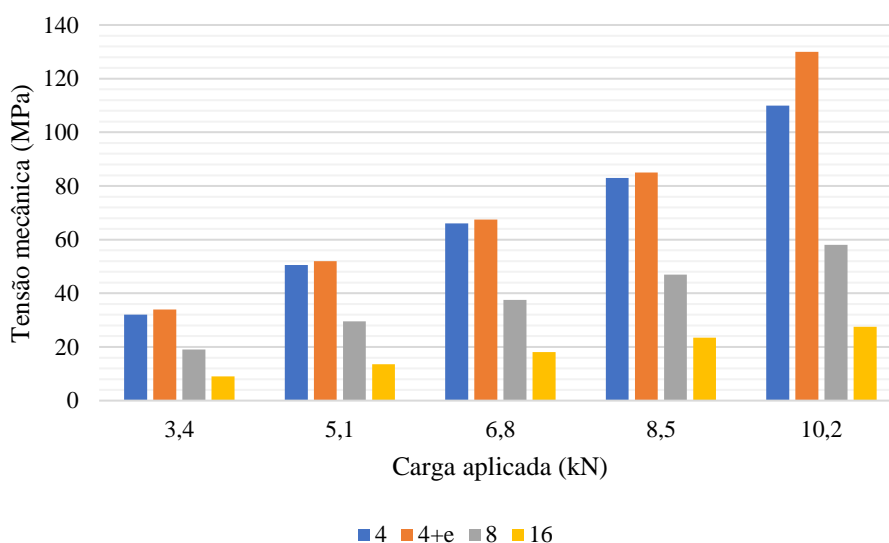
Gráfico 34 – Tensão mecânica para 16 células ( $R = 1,7807 \text{ M}\Omega$ )

Fonte: O autor (2021)

Com base na análise dos gráficos de 31 a 34, foi possível observar que a tensão mecânica é mais elevada para a frequência de 5 Hz, frente ao maior tempo de carregamento do veículo no pavimento, representando uma velocidade de 33 km/h, como exposto anteriormente. Também foi possível observar que a diferença entre os valores de 5 Hz, 10 Hz e 20 Hz distancia-se com o aumento da carga. O caso mais expressivo é observado no gráfico 28 para a situação de 4 células mais espaçadas, em que há um acréscimo de 37 % na tensão mecânica para 5 Hz quando comparado à situação de 20 Hz. Contudo, a elevação ficou igual a 10 %, em média, quando analisado para todos os casos simulados.

Também foi perceptível o aumento da tensão mecânica conforme a carga aplicada é elevada, acrescida em até 74 % para a carga de 10,2 kN quando comparada à de 3,4 kN para a situação de resistência elétrica igual a 7,123 M $\Omega$  e 4 células mais espaçadas. Esse acréscimo ficou igual a 68 %, em média, quando analisado todos os casos. Ainda, como esperado, essa tensão é reduzida com o aumento da quantidade de células piezoelétricas. Essa redução representa, em média, 46 % quando comparados os valores de 8 células com 4 mais espaçadas e 74 %, em média, quando analisados para 16 células frente a situação de 4 mais espaçadas. Pelo Gráfico 35 é possível observar essa tendência de redução da tensão mecânica em função da quantidade de células e o aumento com a variação das cargas. O Gráfico 35 foi elaborado para a situação de 5 Hz de frequência e as menores resistências elétricas de cada combinação de elementos piezoelétricos. As demais situações seguem o mesmo comportamento.

Gráfico 35 – Tensão mecânica para a situação de 5 Hz e menores resistências elétricas



Fonte: O autor (2021)

Na Tabela 12 foram apresentados todos os resultados da tensão mecânica referentes às aplicações de cargas, frequências e resistências. Assim, é possível constatar que a resistência elétrica também influencia na tensão mecânica das células piezoelétricas. Foi observado que com a sua diminuição, há um acréscimo na tensão máxima observada no protótipo. Em média, esse aumento da tensão mecânica representa 10 %.

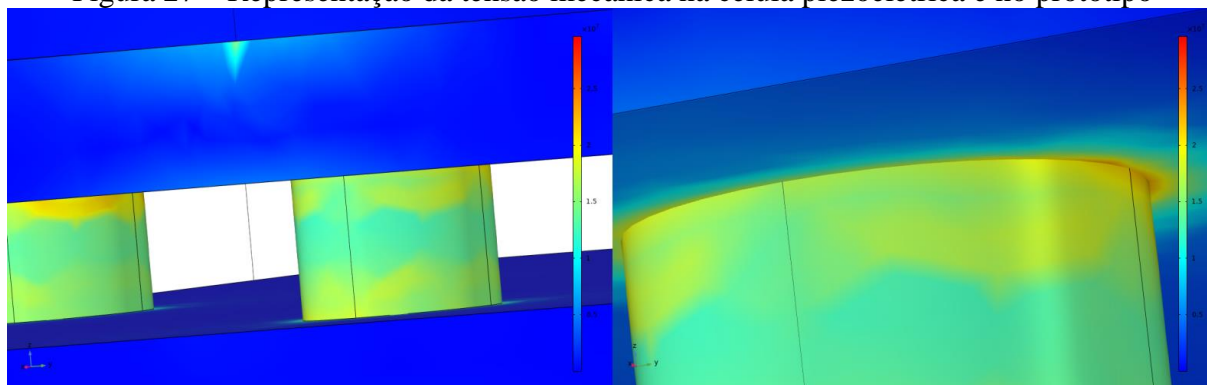
Tabela 12 – Tensão mecânica observada

Quantidade de células	Resistência (M $\Omega$ )	Frequência (Hz)	Forças (kN)				
			3,4	5,1	6,8	8,5	10,2
			Tensão mecânica (MPa)				
4	28,4919	5	30,5	46	61	76	92,5
		10	29	44	59	74	88
		20	27	41,5	57	69	82,5
	14,2460	5	31	48	64	80,5	95
		10	30,5	46	61	76	92,5
		20	29	42,5	59	74	86
	7,1230	5	32	50,5	66	83	110
		10	31	48	64	80,5	95
		20	30,5	46	61	76	92,5
4+e	28,4919	5	31	48	64	80,5	95
		10	30,5	45,5	61	76	92,5
		20	29	44	59	74	88
	14,2460	5	32	51	66	83	110
		10	31	48	64	80,5	95
		20	30,5	45,5	61	76	92,5
	7,1230	5	34	52	67,5	85	130
		10	32,5	51	66	83	110
		20	31	48	64	80,5	95
8	14,2460	5	17,8	26,5	35,3	44,5	53
		10	17,2	25,7	34,7	43	51,7
		20	16,8	25,3	34	42	50,5
	7,1230	5	18,6	28	36,5	46	56
		10	17,8	26,5	35,3	44,5	53
		20	17,2	25,7	34,7	43	51,7
	3,5615	5	19	29,5	37,5	47	58
		10	18,6	28	36,5	46	56
		20	17,8	26,5	35,3	44,5	53
16	7,1230	5	8,3	12,5	16,5	21	25,1
		10	7,7	11,8	15,3	19,5	24,5
		20	7,4	11,5	14,7	19	23
	3,5615	5	8,7	13	17,3	22,5	26,5
		10	8,3	12,5	16,5	21	25,1
		20	7,7	11,8	15,3	19,5	24,5
	1,7807	5	9,05	13,5	18,1	23,5	27,5
		10	8,7	13	17,3	22,5	26,5
		20	8,3	12,5	16,5	21	25,1

Fonte: O autor (2021)

Na Figura 27 é apresentado o diagrama de tensões, demonstrando quais os pontos da célula piezoelétrica e do protótipo estão mais submetidos à ruptura. Nela, é possível observar que as maiores tensões são observadas no topo (cores mais avermelhadas), enquanto que na parte média da célula há a predominância de menores tensões (cores mais claras como verde e azul turquesa).

Figura 27 – Representação da tensão mecânica na célula piezoelétrica e no protótipo



Fonte: O autor (2021)

Por fim, destaca-se a análise da tensão mecânica quanto ao espaçamento das células piezoelétricas. Apesar de retornarem potências elétricas maiores, um maior espaçamento entre os elementos também resulta em uma tensão mecânica mais elevada, chegando a atingir 18 % de diferença quando comparados os valores para 5 Hz e 10,2 kN entre as duas situações (4 células e 4 mais espaçadas). Contudo, esse aumento ficou igual a 6 %, em média.

## 4.2 Análise dos ensaios laboratoriais

### 4.2.1 Respostas elétricas

Os ensaios laboratoriais ocorreram conforme descrito na etapa 3.2.2 da seção de materiais e métodos e frente às limitações impostas, não foi analisada a influência da resistência elétrica, devido a impossibilidade de sua alteração. Os resultados foram apresentados conforme a mudança de variáveis como carga, frequência, quantidade de células e espaçamento.

Na Tabela 13 são apresentados os valores obtidos de tensão elétrica e corrente para a situação de 4 células. Também foram calculados os valores de potência elétrica, a partir

da Equação 19 e os de resistência, obtidos com a Equação 20, detalhadas nas seções 3.2.2.1 e 3.2.2.2, respectivamente. Ainda, foi destacado o valor unitário de potência por célula, considerando a quantidade utilizada.

Tabela 13 – Respostas elétricas para a situação de 4 células

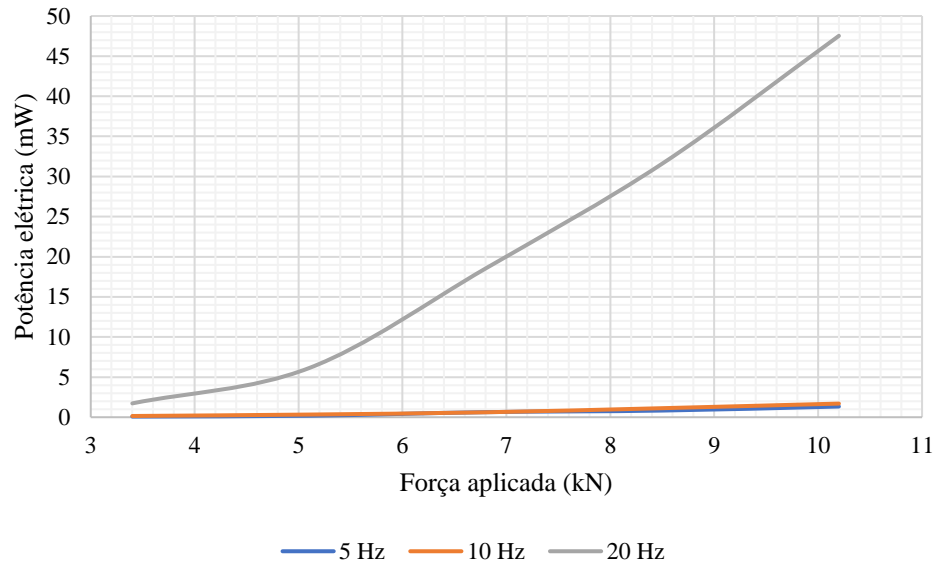
Quantidade de células	Frequência (Hz)	Força (kN)	Tensão Elétrica (mV)	Corrente Elétrica (mA)	Resistência (k $\Omega$ )	Potência (mW)	Potência por célula
4	5	3,4	203	0,0004	0,51	0,081	0,020
4	5	5,1	312	0,0006	0,52	0,187	0,047
4	5	6,8	574	0,0011	0,52	0,631	0,158
4	5	8,5	593	0,0014	0,42	0,830	0,208
4	5	10,2	741	0,0018	0,41	1,334	0,333
4	10	3,4	256	0,0006	0,43	0,154	0,038
4	10	5,1	371	0,0009	0,41	0,334	0,083
4	10	6,8	514	0,0012	0,43	0,617	0,154
4	10	8,5	664	0,0017	0,39	1,129	0,282
4	10	10,2	809	0,0021	0,39	1,699	0,425
4	20	3,4	1150	0,0015	0,77	1,725	0,431
4	20	5,1	2040	0,003	0,68	6,120	1,530
4	20	6,8	2990	0,0062	0,48	18,538	4,635
4	20	8,5	3950	0,008	0,49	31,600	7,900
4	20	10,2	4900	0,0097	0,51	47,530	11,883

Fonte: O autor (2021)

Percebe-se que o maior valor de tensão elétrica é obtido para a situação de aplicação de 10,2 kN e 20 Hz, retornando 4,90 V. Com a mesma combinação também é retornada a maior potência elétrica, igual a 47,53 mW, em que cada célula piezoelétrica seria responsável por gerar até 11,883 mW. As resistências elétricas variaram de 0,39 k $\Omega$  até 0,77 k $\Omega$ , resultando em 0,49 k $\Omega$ , em média. Os gráficos 36 e 37 representam o comportamento das potências e voltagens para essa situação.

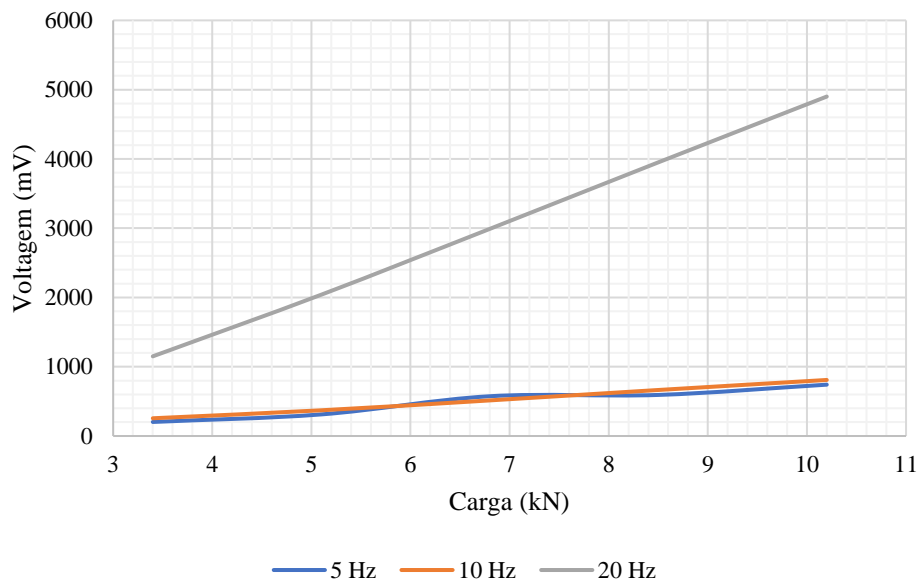
Observa-se, pelo Gráfico 36, que a potência segue uma tendência exponencial de crescimento. Devido à baixa resistência, os valores para a frequência de 20 Hz se distanciam das demais, demonstrando que um menor período de carregamento no elemento maximizaria os resultados. Pelo Gráfico 37 é possível identificar que a voltagem se comporta de forma linear com o aumento da carga. Uma das limitações do ensaio estava relacionada à irregularidade da placa de cobre, fazendo com que em alguns momentos as células não tivessem contato direto com a placa ou que algumas recebessem cargas maiores que as estimadas. Em decorrência disso, para a força de 6,8 kN, observa-se que a tensão elétrica foi maior para a frequência de 5 Hz.

Gráfico 36 – Potência elétrica para o conjunto de 4 células



Fonte: O autor (2021)

Gráfico 37 – Voltagem para o conjunto de 4 células



Fonte: O autor (2021)

Além da configuração de 4 células, também foi testada a análise para 4 células mais espaçadas, de forma a verificar se um distanciamento entre os elementos aumentaria ou reduziria a potência elétrica obtida. Na Tabela 14 foram expostas as respostas elétricas, podendo observar que as resistências elétricas para essa situação representam quase que o dobro das encontradas na situação de 4 células. Os valores variaram de 0,65 k $\Omega$  até 1,07 k $\Omega$ , resultando em uma média de 0,91 k $\Omega$ , um aumento de 46 % quando comparada a situação anterior (4 células).



Tabela 14 – Respostas elétricas para a situação de 4 células mais espaçadas

Quantidade de células	Frequência (Hz)	Força (kN)	Tensão Elétrica (mV)	Corrente Elétrica (mA)	Resistência (k $\Omega$ )	Potência (mW)	Potência por célula
4+e	5	3,4	476	0,0006	0,79	0,286	0,071
4+e	5	5,1	671	0,0008	0,84	0,537	0,134
4+e	5	6,8	898	0,0009	1,00	0,808	0,202
4+e	5	8,5	1168	0,0012	0,97	1,402	0,350
4+e	5	10,2	1299	0,0015	0,87	1,949	0,487
4+e	10	3,4	535	0,0005	1,07	0,268	0,067
4+e	10	5,1	853	0,0009	0,95	0,768	0,192
4+e	10	6,8	1098	0,0014	0,78	1,537	0,384
4+e	10	8,5	1359	0,0021	0,65	2,854	0,713
4+e	10	10,2	1591	0,0022	0,72	3,500	0,875
4+e	20	3,4	1820	0,0018	1,01	3,276	0,819
4+e	20	5,1	2770	0,0027	1,03	7,479	1,870
4+e	20	6,8	3750	0,0037	1,01	13,875	3,469
4+e	20	8,5	4650	0,0046	1,01	21,390	5,348
4+e	20	10,2	5770	0,0058	0,99	33,466	8,367

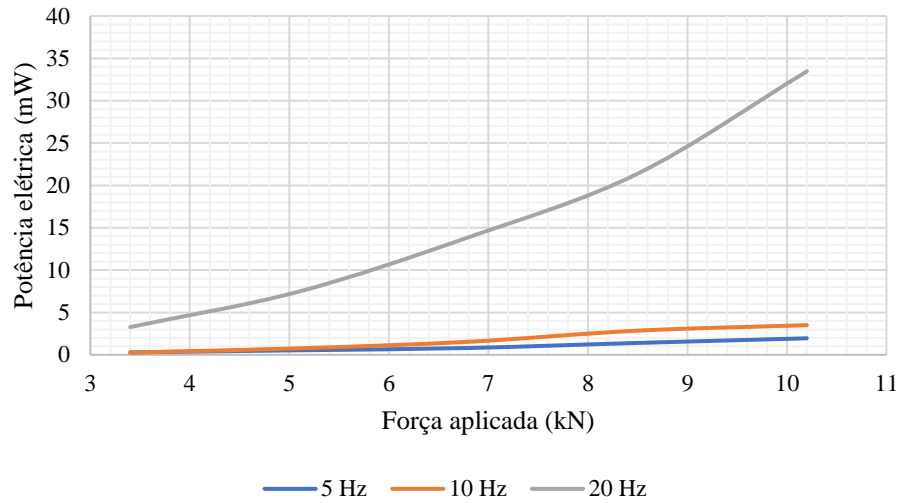
Fonte: O autor (2021)

As tensões elétricas para a situação de 4 células mais espaçadas ficaram superiores às encontradas para 4 células. Em quase todas as situações de frequência e carga, a potência elétrica também foi maior, contudo, para as situações de 20 Hz e cargas de 6,8 kN, 8,5 kN e 10,2 kN, a combinação de 4 células apresentou melhores resultados. Isso ocorre em função do fraturamento de alguns elementos e do mau contato entre a superfície das células com a placa de cobre.

A maior potência elétrica obtida para esse caso foi 33,466 mW para a situação de 20 Hz e 10,2 kN, sendo cada célula piezoelétrica responsável por gerar 8,367 mW. Com relação à voltagem, o valor máximo foi de 5,77 V para a mesma combinação de carga e frequência. Os gráficos 38 e 39 apresentam o comportamento da potência e da tensão elétrica para a situação.

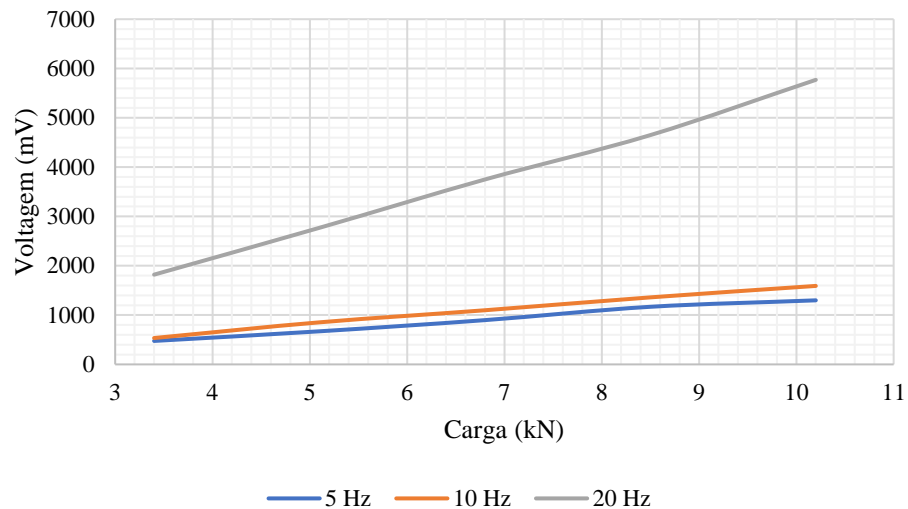
Pelos gráficos é possível identificar um afastamento entre as curvas de potência e voltagem de 5 Hz e 10 Hz. Isso ocorre devido a resistência ser relativamente maior que a apresentada na situação de 4 células, tornando as curvas quase sobrepostas. Ainda, contudo, a inclinação da curva de 20 Hz é mais elevado, seguindo tendência exponencial para a potência e linear para a voltagem.

Gráfico 38 – Potência elétrica para o conjunto de 4 células mais espaçadas



Fonte: O autor (2021)

Gráfico 39 – Voltagem para o conjunto de 4 células mais espaçadas



Fonte: O autor (2021)

Pelos gráficos é possível identificar um afastamento entre as curvas de potência e voltagem de 5 Hz e 10 Hz. Isso ocorre devido a resistência ser relativamente maior que a apresentada na situação de 4 células, tornando as curvas quase sobrepostas. Ainda, contudo, a inclinação da curva de 20 Hz é mais elevada, seguindo tendência exponencial para a potência e linear para a voltagem.

A Tabela 15 apresenta os resultados para a combinação de 8 células piezoelétricas. Nesse ponto é interessante destacar que tanto as voltagens quanto as potências elétricas foram superiores às situações de 4 células e 4 células mais espaçadas. Esse

comportamento não era esperado, em função de que há a sobreposição do efeito piezoelétrico e da dissipação da tensão mecânica para uma área maior, devido a soma dos 8 elementos.

Tabela 15 – Respostas elétricas para a situação de 8 células

Quantidade de células	Frequência (Hz)	Força (kN)	Tensão Elétrica (mV)	Corrente Elétrica (mA)	Resistência (k $\Omega$ )	Potência (mW)	Potência por célula
8	5	3,4	770	0,0013	0,59	1,001	0,125
8	5	5,1	1220	0,0024	0,51	2,928	0,366
8	5	6,8	1550	0,0027	0,57	4,185	0,523
8	5	8,5	1780	0,003	0,59	5,340	0,668
8	5	10,2	2000	0,0034	0,59	6,800	0,850
8	10	3,4	1100	0,0016	0,69	1,760	0,220
8	10	5,1	1290	0,0023	0,56	2,967	0,371
8	10	6,8	1950	0,0032	0,61	6,240	0,780
8	10	8,5	2250	0,0038	0,59	8,550	1,069
8	10	10,2	2360	0,004	0,59	9,440	1,180
8	20	3,4	10660	0,0074	1,44	78,884	9,861
8	20	5,1	11840	0,0094	1,26	111,296	13,912
8	20	6,8	12190	0,0125	0,98	152,375	19,047
8	20	8,5	12990	0,0146	0,89	189,654	23,707
8	20	10,2	13590	0,0167	0,81	226,953	28,369

Fonte: O autor (2021)

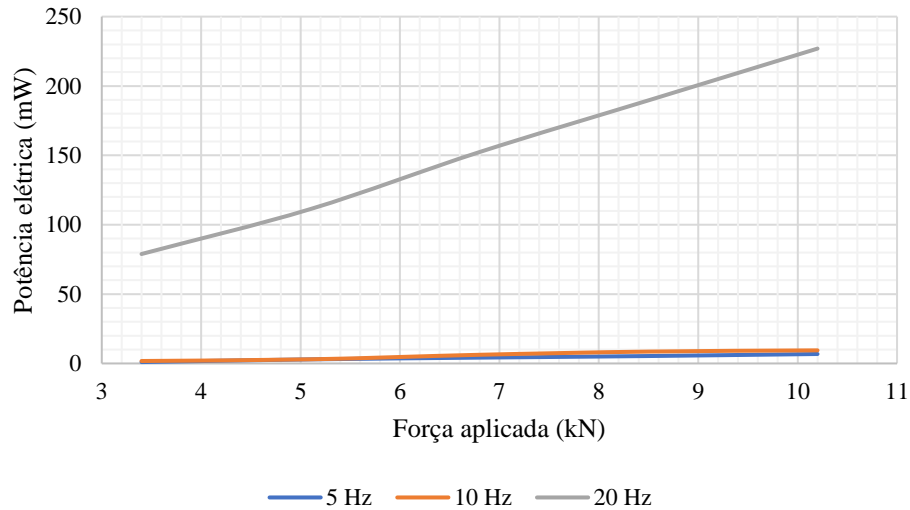
Contudo, o que justifica esses valores mais altos é a irregularidade da placa de cobre. Para a situação de 4 células piezoelétricas, há uma menor probabilidade de todas as células entrarem em contato direto com a placa de cobre. Quando são utilizadas 8 células, essa chance aumenta, fazendo com que tenham mais elementos exercendo o efeito piezoelétrico. Além de que, conforme apresentado pela Tabela 4, a existência de mais células diminui a resistência elétrica ótima do protótipo. Como não foi possível controlar a resistência externa, ela tornou-se muito baixa, ficando igual a 0,75 k $\Omega$ , em média, para a situação.

Outro detalhe que colabora para a obtenção de valores superiores na fase laboratorial para a combinação de 8 células é a baixa incidência de fraturamento dos elementos piezoelétricos. Durante os 30 testes realizados (15 para voltagem e 15 para corrente), apenas 2 elementos chegaram à ruptura. Enquanto que, para a situação de 4 células e 4 células mais espaçadas, esse número atingiu 8 elementos, precisando haver uma substituição entre as mudanças de carga e frequência aplicadas.

Com relação à tensão elétrica, o maior valor foi obtido para a combinação de 20 Hz e 10,2 kN aplicados, resultando em 13,59 V. A potência elétrica foi a melhor observada, gerando 226,95 mW, em que cada elemento seria responsável por 28,369 mW.

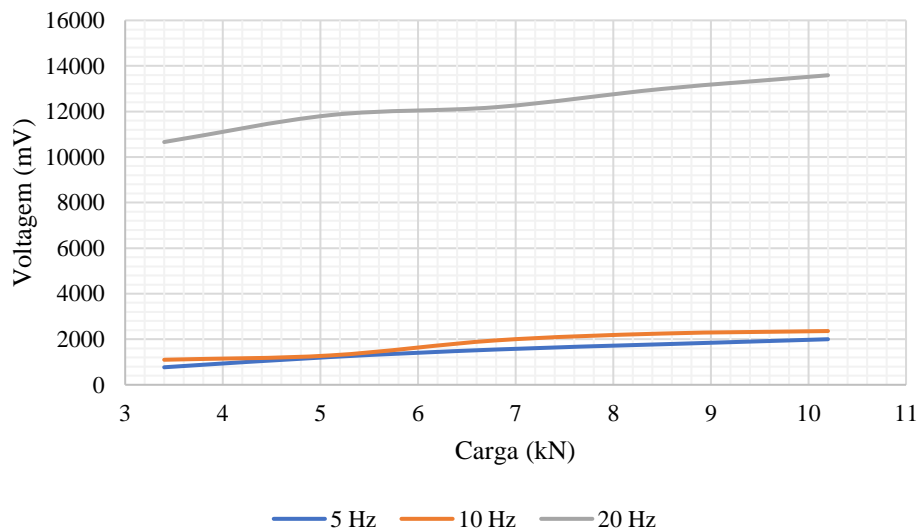
Nos gráficos 40 e 41 são plotados os comportamentos da potência e da voltagem para a situação de 8 células.

Gráfico 40 – Potência elétrica para o conjunto de 8 células



Fonte: O autor (2021)

Gráfico 41 – Voltagem para o conjunto de 8 células



Fonte: O autor (2021)

Nos gráficos 40 e 41 observa-se uma pequena mudança de comportamento das curvas. Enquanto que nas situações anteriores existia uma tendência mais forte para a exponencial, no caso da potência em 8 células não há esse acréscimo elevado a partir da carga de 5,1 kN. Outro detalhe é que a inclinação da curva de tensão elétrica é menor para a combinação apresentada, diminuindo o intervalo entre a menor e a maior voltagem observada. Isso pode ser justificado pelo funcionamento do multímetro, que registra as tensões como

médias dos cinco valores mais próximos, impossibilitando identificar os valores máximos reais.

Quando comparados os valores de potência entre a situação de 8 células e 4 células, há um acréscimo de 377,5 % para a situação de 20 Hz e 10,2 kN. Ao analisar a mesma combinação de carga e frequência para a voltagem, o aumento é de 177,3 %, demonstrando a potencialidade de utilização do protótipo com 8 células, inclusive, sem danos elevados ao material.

Por fim, na Tabela 16 são apresentadas as respostas elétricas para a situação de 16 células piezoelétricas. Como esperado, as respostas elétricas são menores que as obtidas para a combinação de 8 células, representando uma redução de 69,5 % quando analisada a potência e de 27,4 % para a voltagem, aplicando 20 Hz e 10,2 kN. A influência desses resultados está diretamente ligada a resistência externa do protótipo que, por não ser diretamente equivalente a interna, gera diferenças de voltagem, corrente e potência com relação a proporção esperada pela inclusão de mais elementos. No caso, como foram introduzidas mais 8 células piezoelétricas, esperava-se uma redução na faixa de 50 % para ambas as propriedades.

Tabela 16 – Respostas elétricas para a situação de 16 células

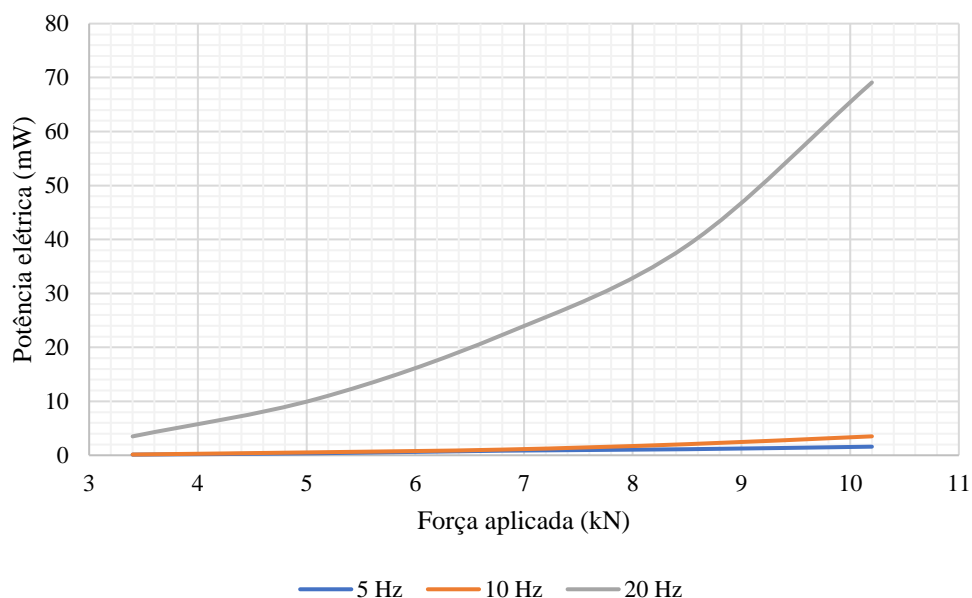
Quantidade de células	Frequência (Hz)	Força (kN)	Tensão Elétrica (mV)	Corrente Elétrica (mA)	Resistência (k $\Omega$ )	Potência (mW)	Potência por célula
16	5	3,4	383	0,0003	1,28	0,1149	0,0072
16	5	5,1	752	0,0005	1,50	0,3760	0,0235
16	5	6,8	945	0,0009	1,05	0,8505	0,0532
16	5	8,5	1017	0,0011	0,92	1,1187	0,0699
16	5	10,2	1138	0,0014	0,81	1,5932	0,0996
16	10	3,4	450	0,0003	1,50	0,1350	0,0084
16	10	5,1	920	0,0006	1,53	0,5520	0,0345
16	10	6,8	1050	0,0010	1,05	1,0500	0,0656
16	10	8,5	1580	0,0013	1,22	2,0540	0,1284
16	10	10,2	2340	0,0015	1,56	3,5100	0,2194
16	20	3,4	2500	0,0014	1,79	3,5000	0,2188
16	20	5,1	4190	0,0025	1,68	10,4750	0,6547
16	20	6,8	5440	0,0041	1,33	22,3040	1,3940
16	20	8,5	6940	0,0056	1,24	38,8640	2,4290
16	20	10,2	9870	0,0070	1,41	69,0900	4,3181

Fonte: O autor (2021)

O maior valor de tensão elétrica foi de 9,87 V, que resultou em uma potência elétrica de 69,09 mW. Dessa forma, a resistência elétrica variou de 0,81 k $\Omega$  até 1,79 k $\Omega$ ,

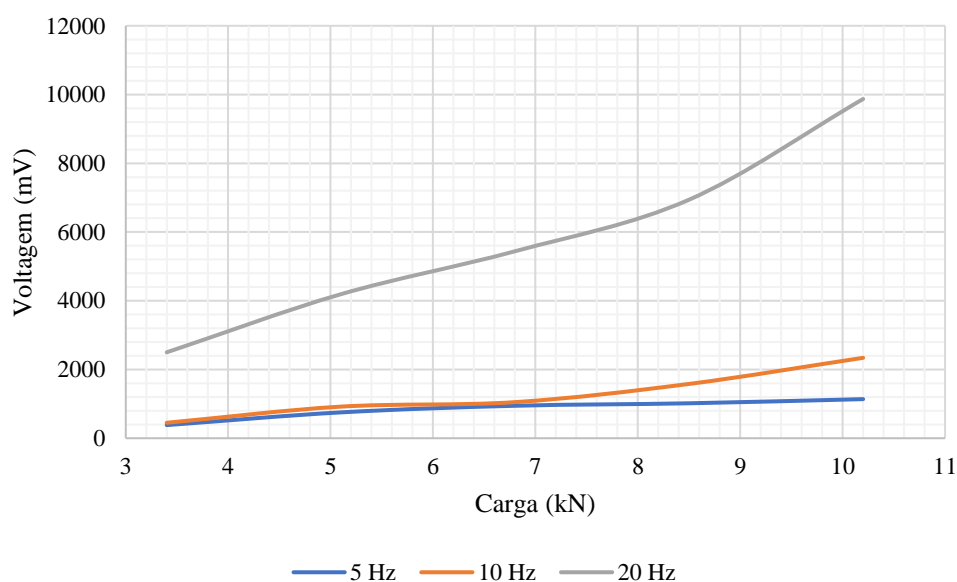
resultando em uma média de 1,32 k $\Omega$ , a maior dentre as combinações das células testadas. Os gráficos 42 e 43 apresentam o comportamento das duas propriedades analisadas.

Gráfico 42 – Potência elétrica para o conjunto de 16 células



Fonte: O autor (2021)

Gráfico 43 – Voltagem para o conjunto de 16 células

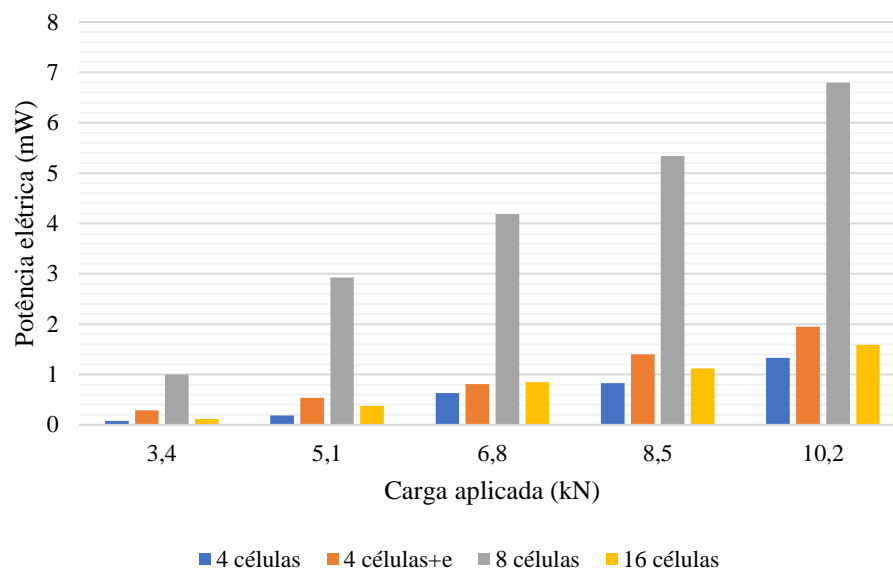


Fonte: O autor (2021)

O comportamento das curvas de potência segue uma tendência exponencial, o que era esperado e, ainda, devido à resistência mais elevada quando comparada às demais situações, há um maior distanciamento entre as curvas de 5 Hz e 10 Hz, conforme já relatado

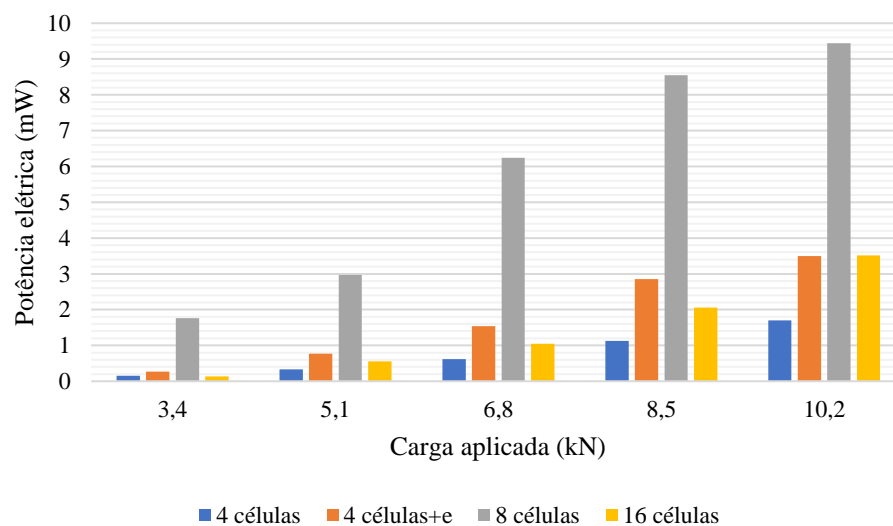
na etapa anterior. O mesmo acontece com as curvas de voltagem, que seguem uma tendência linear, com uma inclinação mais elevada. Nos gráficos de 44 a 46 foi apresentada a potência em função da carga aplicada, para cada situação de células considerando as frequências de 5 Hz, 10 Hz e 20 Hz, respectivamente.

Gráfico 44 – Potência gerada para a aplicação de 5 Hz em laboratório



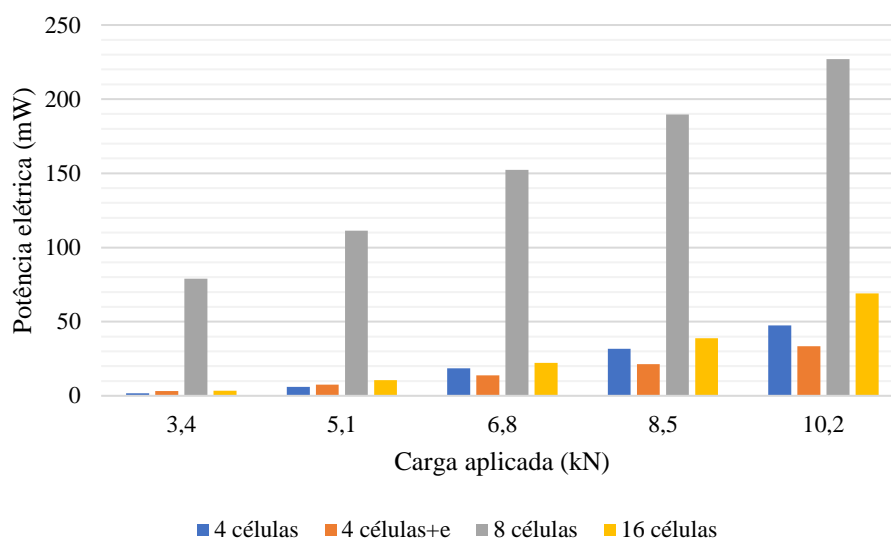
Fonte: O autor (2021)

Gráfico 45 – Potência gerada para a aplicação de 10 Hz em laboratório



Fonte: O autor (2021)

Gráfico 46 – Potência gerada para a aplicação de 20 Hz em laboratório



Fonte: O autor (2021)

Diante do exposto nos gráficos 44 a 46, pode-se observar a variação de potência considerando as diferentes combinações de elementos piezoelétricos. Para a situação de laboratório, considerando as limitações de não-controle da resistência elétrica e a irregularidade da placa de cobre, o protótipo com 8 células foi o que apresentou as potências elétricas mais elevadas. Durante quase todos os testes, com exceção das três últimas forças para a frequência de 20 Hz, a combinação de 4 células mais espaçadas foi a que representou o segundo lugar em resposta elétrica.

De forma análoga a realizada na etapa de simulações, foram geradas as equações para obtenção da potência elétrica em função da variação da carga. Considerando a complexidade de formulação e análise das demais variáveis, essas foram fixadas (resistência elétrica e frequência). Na Tabela 17 estão apresentadas as equações obtidas a partir dos ensaios laboratoriais. A constante da Equação 65 é elevada em função dos altos valores de potência obtidos para essa situação, sendo a mais próxima dos resultados observados na etapa de simulações multifísicas.

Como foram obtidas resistências distintas para cada força aplicada em laboratório, a fim de padronizar, foram calculadas as resistências médias para cada frequência (5 Hz, 10 Hz e 20 Hz), adotando que elas resultariam em valores próximos de potência. Além disso, foi adotado que o comportamento seria de potência, conforme os obtidos em simulação.



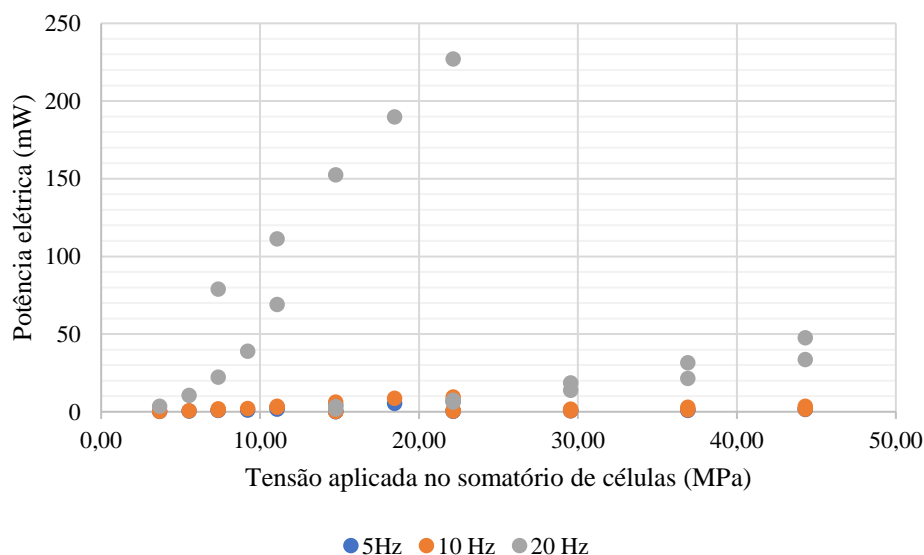
Tabela 17 – Equações para obtenção da potência elétrica (laboratório)

Quantidade de células	Resistência (kΩ)	Frequência (Hz)	Equações (y = potência elétrica, em mW; x = força aplicada, em kN)	R <sup>2</sup>
4	0,89	5	$y = 0,0031x^{2,6276}$ (Eq. 57)	0,97
	0,83	10	$y = 0,0098x^{2,2039}$ (Eq. 58)	0,99
	1,01	20	$y = 0,0414x^{3,0881}$ (Eq. 59)	0,98
4+e	0,48	5	$y = 0,0318x^{1,75}$ (Eq. 60)	0,99
	0,41	10	$y = 0,0147x^{2,4089}$ (Eq. 61)	0,96
	0,59	20	$y = 0,2481x^{2,0983}$ (Eq. 62)	0,99
8	0,57	5	$y = 0,1498x^{1,6887}$ (Eq. 63)	0,96
	0,61	10	$y = 0,231x^{1,6465}$ (Eq. 64)	0,94
	1,08	20	$y = 23,551x^{0,9727}$ (Eq. 65)	0,99
16	1,11	5	$y = 0,007x^{2,3957}$ (Eq. 66)	0,97
	1,37	10	$y = 0,0042x^{2,9077}$ (Eq. 67)	0,99
	1,49	20	$y = 0,1311x^{2,6821}$ (Eq. 68)	0,99

Fonte: O autor (2021)

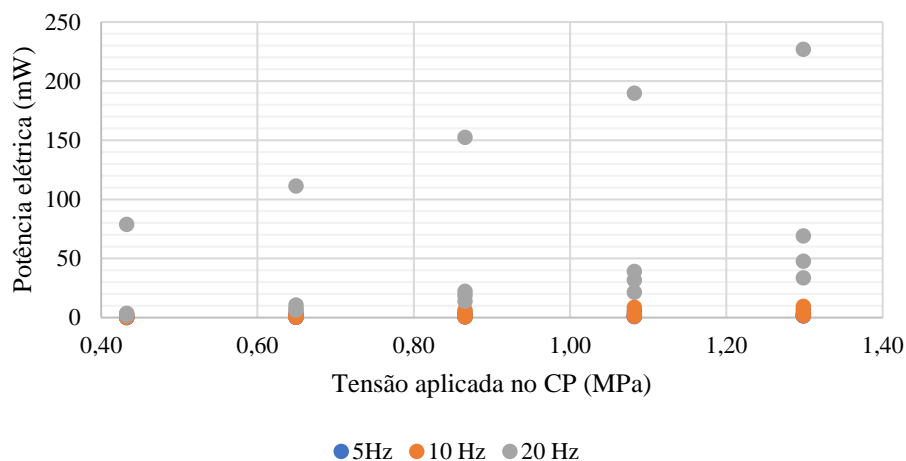
Devido às cargas não representarem fielmente às observadas no pavimento rodoviário, foi realizada a mesma análise para as tensões aplicadas. Os gráficos 47 e 48 apresentam as potências elétricas em função das tensões mecânicas no somatório das áreas das células piezoelétricas e na área do corpo de prova de mistura asfáltica, respectivamente.

Gráfico 47 – Potência gerada em laboratório a partir das tensões nas células



Fonte: O autor (2021)

Gráfico 48 – Potência gerada em laboratório a partir das tensões no CP



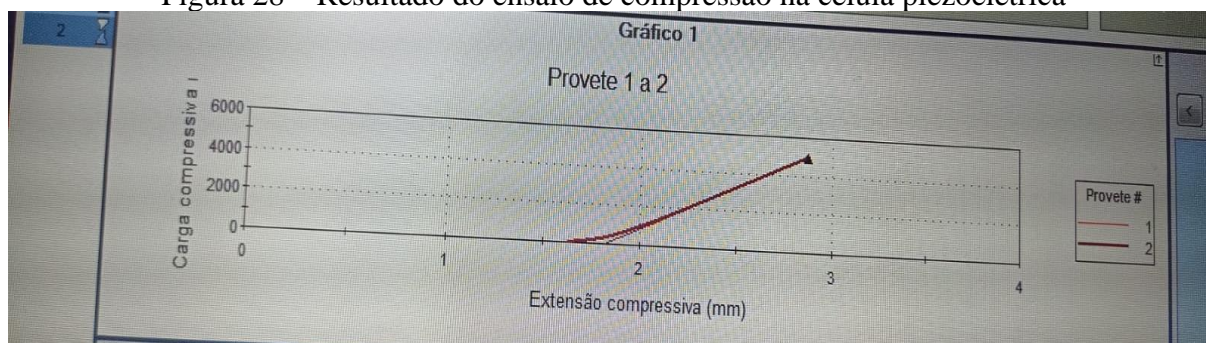
Fonte: O autor (2021)

Observa-se, então que para tensões comuns atuantes no pavimento rodoviário (até 0,70 MPa), a melhor alternativa seria com a utilização de 8 células piezoelétricas e a aplicação de uma frequência de 20 Hz, com velocidade equivalente a 115 km/h, retornando até 120 mW de potência para a passagem de uma roda de veículo em um protótipo.

#### 4.2.2 Compressão mecânica na célula piezoelétrica

Em razão do fraturamento precoce de alguns elementos piezoelétricos durante a execução dos ensaios laboratoriais para obtenção das respostas elétricas (principalmente na sequência de 4 células e 4 células mais espaçadas), foi realizado um ensaio de compressão mecânica para obter a tensão máxima suportada pela célula (ver Figura 28).

Figura 28 – Resultado do ensaio de compressão na célula piezoelétrica



Fonte: O autor (2021)

O ensaio ocorreu no Laboratório Multidisciplinar em Pesquisa Odontológica (LAMPO) da Universidade Federal do Ceará, em razão de ser o único encontrado com o

equipamento de ensaio universal Instron, visto a semelhança de tamanho da célula piezoelétrica (6,2 mm de altura e 8,56 mm de diâmetro) com um dente. Essa semelhança permitiu a realização do ensaio de compressão no equipamento, sem danificá-lo. Um teste de fadiga foi solicitado, contudo, como o elemento não rompeu na fase de compressão, o mesmo não pode ser realizado.

Para o rompimento da célula piezoelétrica foi aplicada a célula de carga de 5,0 kN, aplicada a cada 0,1 mm de deslocamento, até atingir o valor limite de parada do *software* (aproximadamente 4,9 kN) ou o elemento romper. Assim, o controlador do equipamento atingiu o limite de parada e a célula piezoelétrica não rompeu, atingindo uma tensão de 46,229 MPa, superior a todas as simuladas em laboratório na fase de respostas elétricas. Esse resultado é importante para demonstrar que a célula piezoelétrica é resistente e o problema ocorrido em laboratório na UTM-25 foi a irregularidade das placas, distribuindo a tensão de forma desuniforme para os elementos, os levando a fraturar (ver Figura 29).

Figura 29 – Célula piezoelétrica fraturada



Fonte: O autor (2021)

Ainda, conforme a Figura 29, é possível observar que o fraturamento do elemento ocorre justamente onde há a concentração máxima de tensões elétricas e tensões mecânicas, apresentada na Figura 27, na seção 4.1.2. Então, a partir dos resultados apresentados, torna-se possível escolher a combinação que diminua os impactos da fadiga no elemento, resultando em uma potência elétrica satisfatória para aplicação em campo.

### 4.3 Análise comparativa entre as simulações computacionais e os ensaios laboratoriais

Apesar das limitações interpostas pela não disponibilidade dos equipamentos como osciloscópio, caixa de resistência e placas de cobre planas, os resultados laboratoriais seguiram o mesmo padrão de comportamento quando analisados em função da carga e da frequência aplicadas. A maior divergência foi relacionada à potência elétrica obtida em

função da quantidade de células. Era esperado que com o aumento da quantidade de elementos piezoelétricos, a potência elétrica e a voltagem fossem reduzidas.

Contudo, na fase laboratorial, os melhores resultados foram observados para a aplicação de 8 células piezoelétricas, resultando em uma potência de 226,953 mW para 20 Hz e 10,2 kN de carga aplicada. Quando observada a potência elétrica máxima obtida para a mesma combinação na etapa de simulação computacional, esperava-se obter 324,4 mW. A redução para esse caso foi de 30 %, considerada baixa quando analisada a diferença entre as resistências, sendo 0,81 k $\Omega$  no ensaio na UTM-25 e 3,5615 M $\Omega$ , calculada com base na Equação 16, como sendo a resistência ótima. Essa redução da resistência é equivalente a 99,98 %.

Outra observação importante está relacionada ao acréscimo de potência com a variação do espaçamento entre as células piezoelétricas. Para a etapa de simulações computacionais, um maior espaçamento entre os elementos piezoelétricos representou um acréscimo, em média, de 0,39 % na potência elétrica. Contudo, na etapa laboratorial, esse aumento foi de 30 %, em média, mesmo considerando que as três últimas aplicações de força para a frequência de 20 Hz resultou em potências maiores para a situação de 4 células.

Nas simulações multifísicas, a combinação de 4 células mais espaçadas resultou nos melhores resultados de potência, chegando a responder com 648,8 mW para 20 Hz e 10,2 kN. Ao comparar a mesma aplicação com o ensaio laboratorial, o valor obtido foi de 33,466 mW, uma redução de 94,84 %. Novamente, ressalta-se que a diferença está diretamente relacionada à questão da resistência elétrica, em que para o caso computacional, a ótima foi igual a 7,123 M $\Omega$  e em laboratório obteve-se apenas 0,99 k $\Omega$ , uma redução de 99,99 %.

Ao variar a frequência de 5 Hz para 10 Hz, na fase computacional, houve um incremento de 72 %, 167 % e 249 %, em média, na potência elétrica para as três faixas de resistência simulada em cada frequência e combinação de células da maior para a menor, respectivamente. Quando analisados o mesmo intervalo, na fase laboratorial o aumento foi de 44 %, em média. Apenas para as aplicações de 4 células e 8 células que esse percentual ficou acima de 72 %, representando 89,2 % e 75,8 %, respectivamente.

Realizando a mesma análise para a variação de 5 Hz a 20 Hz, na etapa de simulações, ocorreu um aumento de 110 %, 359 % e 832 %, em média, para as mesmas faixas de resistência. Em laboratório, esse acréscimo foi, em média, de 3.450 %, principalmente em decorrência do distanciamento da curva de 20 Hz em relação as demais.

A outra investigação foi relacionada à variação da frequência de 10 Hz para 20 Hz, resultando em uma elevação de 22 %, 72 % e 167 % na potência elétrica, para as mesmas

resistências, em ordem decrescente. Os resultados obtidos na UTM-25 demonstraram um incremento de 2.256 % no valor da potência, em média, para a duplicação de frequência adotada. Na Tabela 18 foram expostos os valores percentuais de variação da potência elétrica, considerando os resultados ótimos esperados com a aplicação das resistências calculadas e apresentadas na Tabela 4, com relação aos números obtidos em laboratório.

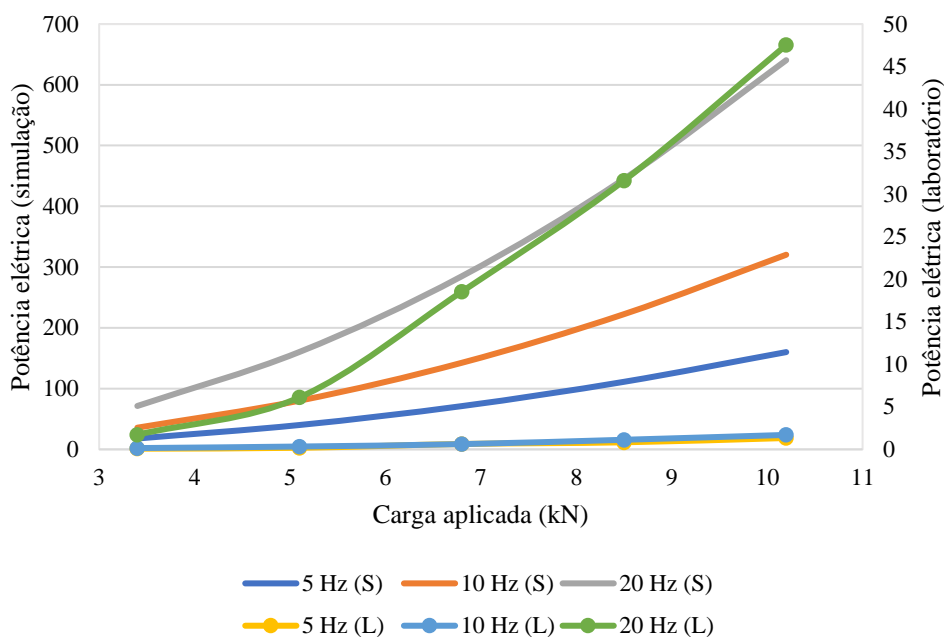
Tabela 18 – Percentuais de variação entre as simulações e o laboratório

Quantidade de células	Frequência (Hz)	Situação	Carga (kN)				
			3,4	5,1	6,8	8,5	10,2
			Potência elétrica (mW)				
4	5	Simulação	17,9	40,1	71,2	111,2	160,1
		Laboratório	0,0812	0,1872	0,6314	0,8302	1,3338
		Diferença %	-99,55	-99,53	-99,11	-99,25	-99,17
	10	Simulação	35,7	80,2	142,5	222,5	320,3
		Laboratório	0,1536	0,3339	0,6168	1,1288	1,6989
		Diferença %	-99,57	-99,58	-99,57	-99,49	-99,47
	20	Simulação	71,4	160,4	284,9	445	640,5
		Laboratório	1,725	6,12	18,538	31,6	47,53
		Diferença %	-97,58	-96,18	-93,49	-92,90	-92,58
4+e	5	Simulação	17,9	40,2	71,5	111,6	160,7
		Laboratório	0,2856	0,5368	0,8082	1,4016	1,9485
		Diferença %	-98,40	-98,66	-98,87	-98,74	-98,79
	10	Simulação	35,8	80,5	143	223,3	321,4
		Laboratório	0,2675	0,7677	1,5372	2,8539	3,5002
		Diferença %	-99,25	-99,05	-98,93	-98,72	-98,91
	20	Simulação	71,7	161	285,9	446,5	648,8
		Laboratório	3,276	7,479	13,875	21,39	33,466
		Diferença %	-95,43	-95,35	-95,15	-95,21	-94,84
8	5	Simulação	9	20,3	36,1	56,3	81,1
		Laboratório	1,001	2,928	4,185	5,34	6,8
		Diferença %	-88,88	-85,58	-88,41	-90,52	-91,62
	10	Simulação	18,1	40,6	72,2	112,7	162,2
		Laboratório	1,76	2,967	6,24	8,55	9,44
		Diferença %	-90,28	-92,69	-91,36	-92,41	-94,18
	20	Simulação	36,2	81,3	144,3	225,4	324,4
		Laboratório	78,884	111,296	152,375	189,654	226,953
		Diferença %	117,91	36,90	5,60	-15,86	-30,04
16	5	Simulação	4,7	10,5	18,6	29	41,8
		Laboratório	0,1149	0,376	0,8505	1,1187	1,5932
		Diferença %	-97,56	-96,42	-95,43	-96,14	-96,19
	10	Simulação	9,3	20,9	37,2	58	83,5
		Laboratório	0,135	0,552	1,05	2,054	3,51
		Diferença %	-98,55	-97,36	-97,18	-96,46	-95,80
	20	Simulação	18,6	41,8	74,3	116,1	167,1
		Laboratório	3,5	10,475	22,304	38,864	69,09
		Diferença %	-81,18	-74,94	-69,98	-66,53	-58,65

Fonte: O autor (2021)

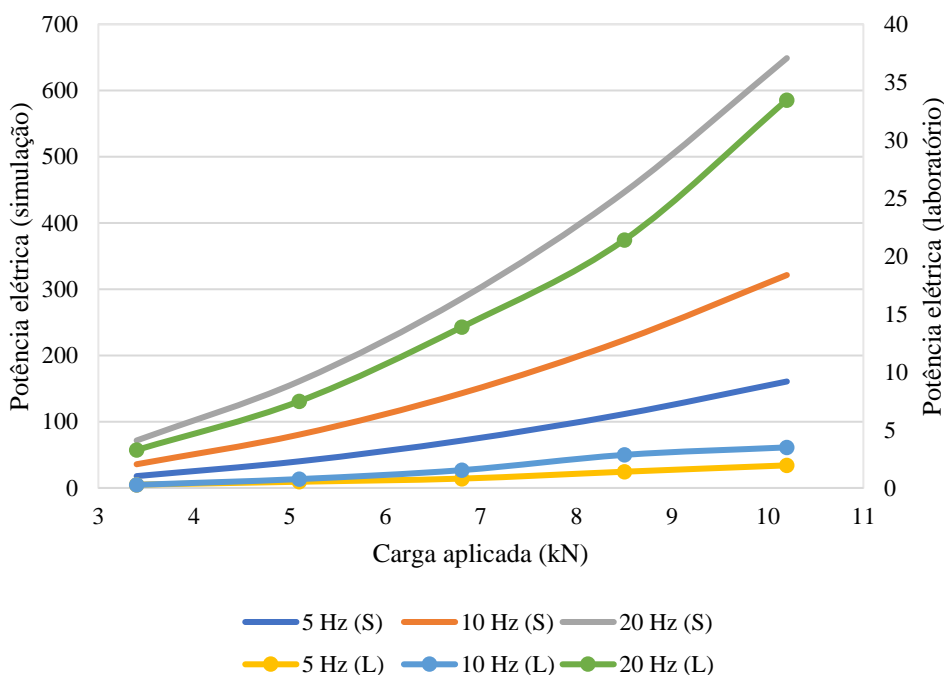
O sinal negativo apresenta uma redução da potência, enquanto que o valor positivo significa um aumento com relação ao esperado, de acordo com as simulações. Os gráficos 49 a 52 representam esses valores de forma visual, para a quantidade de 4, 4+, 8 e 16 células, respectivamente.

Gráfico 49 – Comparação entre as potências elétricas para 4 células



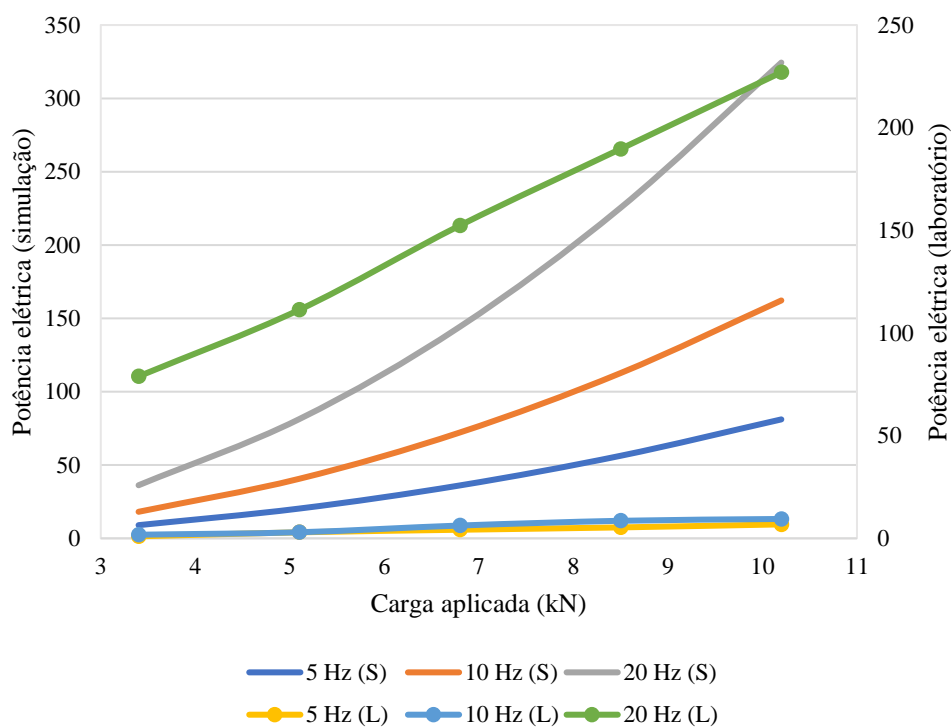
Fonte: O autor (2021)

Gráfico 50 – Comparação entre as potências elétricas para 4 células+



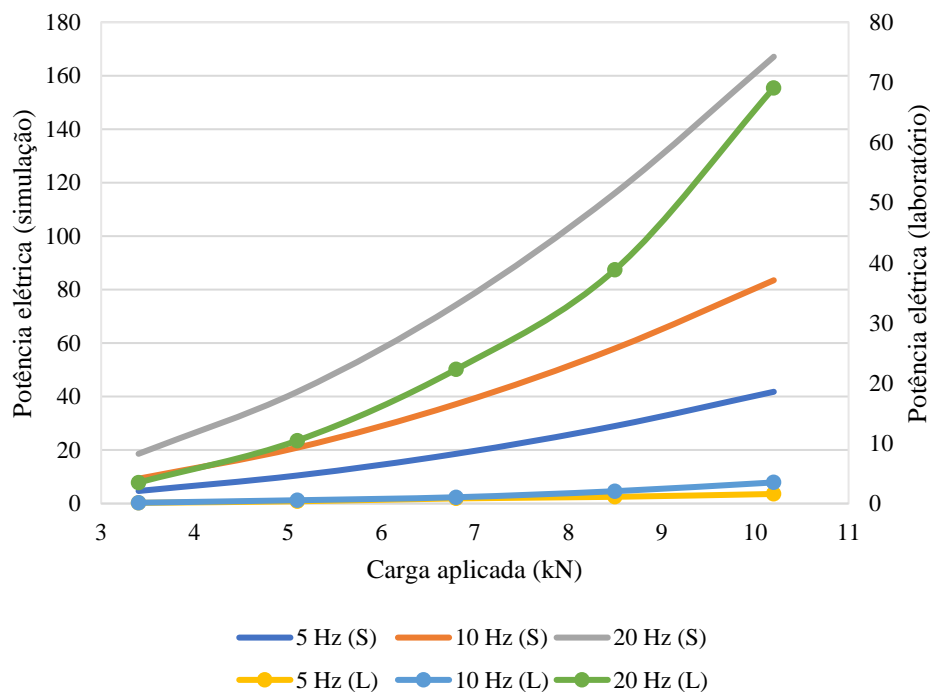
Fonte: O autor (2021)

Gráfico 51 – Comparação entre as potências elétricas para 8 células



Fonte: O autor (2021)

Gráfico 52 – Comparação entre as potências elétricas para 16 células



Fonte: O autor (2021)

Dessa forma, é possível observar que para as situações de 4 células e 4 células mais espaçadas, a redução ficou na faixa de 97 %. Foi perceptível que a diminuição ocorre

com um percentual mais reduzido para a frequência de 20 Hz. Na combinação de 16 células, inclusive, a diferença percentual também reduz com o aumento da força aplicada. Nas demais frequências também há esse comportamento, contudo, não ocorre de forma proporcional, havendo algumas inferências. Pelos Gráficos 49, 50 e 52 é possível identificar que as curvas apresentam comportamento semelhante, principalmente quando observada a de 20 Hz, como já exposto anteriormente.

Para a combinação de 8 células, os resultados se comportaram de forma inversa. A diferença percentual aumentou com o acréscimo da força aplicada. Entretanto, foram menores quando comparadas as outras três situações. Com a frequência de 20 Hz, a menor diferença foi obtida com a aplicação de 8,5 kN, resultando em 15,86 % de redução. Nessa sequência apareceram resultados positivos para as cargas de 3,4 kN, 5,1 kN e 6,8 kN, mostrando que estavam sendo obtidos valores de potência acima dos ótimos encontrados pelo *software*. Isso pode ocorrer em função de que, mesmo aplicando a mesma carga no topo do corpo de prova, essa força pode se distribuir de maneira distinta para as células piezoelétricas, resultando em tensões maiores e, assim, aumentando a voltagem e conseqüentemente a potência elétrica. Ainda, pelo Gráfico 51 é possível observar que a curva de 20 Hz se comporta com tendência linear, diferentemente das demais combinações de células. Isso pode ser explicado pela apresentação dos resultados no multímetro, visto que é retornada a média de 5 valores do intervalo de onda.

Ressalta-se que, apesar das diferenças percentuais elevadas, os valores de potência e de tensão elétrica seguem o mesmo comportamento dos obtidos em simulação computacional, permitindo a realização da comparação, mesmo com resistências elétricas diferentes. Esse problema seria sanado com a adoção de uma caixa de resistência para igualar as resistências externas e internas, o auxílio de um osciloscópio para medição das voltagens e placas de cobre planas para o contato integral com a célula piezoelétrica.

#### **4.4 Análise da simulação em ambiente real para o protótipo simulado**

Com a realização da análise comparativa, pode-se determinar quais as combinações ideais de aplicação do protótipo em campo. Assim, foram considerados dois cenários: (i) aplicação em condições ideais, conforme simulação multifísica e (ii) aplicação com as limitações do protótipo, conforme laboratório.

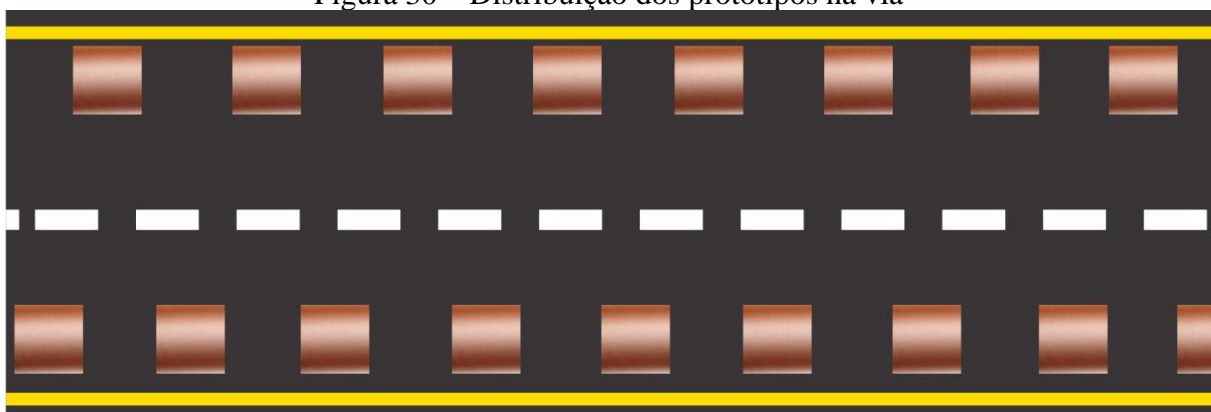
Para a primeira análise, simulação multifísica, foi considerado que o pavimento da BR-222 possuía baixa ou nenhuma irregularidade longitudinal, que a resistência elétrica foi



controlada por caixas de resistência inseridas próximas aos bordos da rodovia, no acostamento. A resistência adotada foi a equivalente a resultar o máximo de potência para a situação de 10 Hz, correspondente a velocidade máxima permitida no local, de 60 km/h.

Os protótipos foram aplicados a 5 cm abaixo do topo da camada de revestimento, entre ela e a camada de *binder*. Também foi considerado que as placas de cobre não possuíam irregularidades, fornecendo contato total com as células piezoelétricas. A Figura 30 demonstra a aplicação do protótipo em campo, considerando 1 km de extensão, conforme apresentado na seção 3.3.

Figura 30 – Distribuição dos protótipos na via



Fonte: O autor (2021)

Assim, considerando as dimensões de  $10 \times 10$  cm do protótipo, ele seria instalado nos dois bordos da rodovia, a uma distância de 10 cm da borda da rodovia, espaçados entre si com a mesma distância de 10 cm. Para fins de simulação máxima, foi adotado que todos os veículos passarão com, pelo menos, uma das rodas por cada um dos protótipos instalados na via. Dessa forma, na extensão de 1 km seriam instalados 10.000 protótipos, sendo 5.000 em cada bordo da rodovia.

Conforme adotado na seção 3.3, o tráfego considerado foi de 296 veic/h do tipo carro de passeio, com carga de roda igual a 1,98 kN e 47 veic/h do tipo ônibus e caminhões de 2 eixos, com carga de roda igual a 24,5 kN. Esse tráfego é o total, sendo considerada a distribuição de 50% - 50% para cada pista, com todos os veículos trafegando na velocidade máxima de 60 km/h.

Logo, para esse caso, foi utilizada a condição de 4 células mais espaçadas, com frequência de 10 Hz e resistência de 14,246 M $\Omega$ . Sendo assim, a potência elétrica seria obtida pela Equação 25, em que  $y = 3,0984x^{1,9972}$ , sendo x a carga aplicada. As cargas inteiras dos pneus de carro foram transmitidas aos elementos piezoelétricos. Para os caminhões e ônibus,

com a área de contato do pneu de aproximadamente 355 cm<sup>2</sup>, foi realizada uma proporção de absorção da energia gerada por protótipo, igual a 28,17 % da carga aplicada, visto a área de 100 cm<sup>2</sup> das placas de cobre. Na Tabela 19 são apresentadas as potências obtidas para a situação simulada nesta etapa.

Tabela 19 – Potência simulada para trecho da BR-222 na situação ideal

Tipo	Potência	Unidade
Pneu de carro/módulo	0,01212	W
Pneu de ônibus e caminhão/módulo	0,14679	W
Pneu de carros/dia/módulo	86,12717	Wh
Pneu de ônibus e caminhões/dia/módulo	165,57828	Wh
Pneu de carros/ano/módulo	31,43642	kWh
Pneu de ônibus e caminhões/ano/módulo	60,43607	kWh

Fonte: O autor (2021)

Assim, considerando que foram aplicados 10.000 protótipos no trecho, em um ano seria possível gerar até 918,76 MWh. De acordo com dados da EPE (2020a), o consumo médio mensal de energia elétrica, em 2019, na região nordeste foi de 125,2 kWh por residência. Dividindo o total anual de energia por mês, seria possível gerar até 76,56 MWh por mês e em 1 km de rodovia seria possível abastecer até 611 residências.

Com relação à situação 2, simulação de laboratório, foram considerados os mesmos parâmetros de instalação em pista, tráfego e carga. Contudo, as limitações exercem impacto nessa análise. As irregularidades da placa de cobre servem para simular uma situação de irregularidade longitudinal no pavimento. Sendo assim, os melhores resultados para a aplicação do protótipo utilizado em laboratório foram para a situação de 8 células piezoelétricas. Dessa forma, a equação utilizada para obtenção da potência foi a Equação 64, em que  $y$  é igual a  $0,231x^{1,6465}$ . Nessa situação, a resistência adotada foi de 0,61 k $\Omega$ . Os resultados dessa análise foram apresentados na Tabela 20.

Tabela 20 – Potência simulada para trecho da BR-222 na situação com limitações

Tipo	Potência	Unidade
Pneu de carro/módulo	0,00071	W
Pneu de ônibus e caminhão/módulo	0,00556	W
Pneu de carros/dia/módulo	5,05329	Wh
Pneu de ônibus e caminhões/dia/módulo	6,26985	Wh
Pneu de carros/ano/módulo	1,84445	kWh
Pneu de ônibus e caminhões/ano/módulo	2,28849	kWh

Fonte: O autor (2021)

Portanto, considerando que foram aplicados 10.000 protótipos no trecho, em um ano seria possível gerar até 41,33 MWh. De acordo com dados da EPE (2020a), o consumo médio mensal de energia elétrica, em 2019, na região nordeste foi de 125,2 kWh por residência. Dividindo o total anual de energia por mês, seria possível gerar até 3,44 MWh por mês e em 1 km de rodovia seria possível abastecer até 27 residências.

#### 4.5 Análise dos custos de aplicação do protótipo simulado

A análise dos custos foi realizada de forma simples, considerando apenas os custos com aquisição de material para a instalação da situação ideal do protótipo: (i) 10.000 caixas de resistência; (ii) 20.000 placas de cobre e (iii) 40.000 células piezoelétricas. Os valores obtidos foram consultados diretamente com empresas especializadas no tipo de produto requerido. A Tabela 21 apresenta os preços unitários e totais de cada elemento, consultados em agosto de 2021.

Tabela 21 – Preços dos equipamentos

Material	Especificação	Preço unitário	Preço total
Caixa de resistência	Caixa de Resistência Padrão; Megabras CPR-15G	R\$ 2.000,00	R\$ 20.000.000,00
Placa de cobre	Chapa cobre M/D CH 6,35 × 100 mm × 100 mm	R\$ 250,00	R\$ 5.000.000,00
Células piezoelétricas	Ultrasonic Piezoelectric Ceramic Cylinder 8,56×6,2mm - PZT5H	R\$ 12,86	R\$ 514.400,00

Fonte: O autor (2021)

Logo, apenas com material para otimização do protótipo seriam gastos R\$ 25.514.400,00. Ainda, considerando alguns procedimentos de execução de obras rodoviárias, estimam-se alguns custos para instalação dos protótipos entre as camadas de revestimento e *binder* no trecho da BR-222. Na Tabela 22 estão atribuídos os preços dos serviços de pavimentação, conforme a SEINFRA (2021). Assim, como o trecho considerado possui 7,20 metros de largura, com 1,0 km de extensão e 5,0 cm de espessura de revestimento, o volume total da camada é de 360 m<sup>3</sup>. Excluindo-se os volumes provenientes do protótipo, a inserção da nova camada de revestimento possuiria 358,11 m<sup>3</sup> de volume. Com serviços básicos de pavimentação seriam gastos R\$ 87.277,02, que somados aos custos com equipamentos do protótipo resultaria em R\$ 25.601.677,02.

Tabela 22 – Serviços de pavimentação

Serviço	Especificação	Unidade	Preço unitário	Preço total
Concreto Asfáltico (CA)	Considerados equipamentos, mão de obra, serviços e materiais, com encargos inclusos.	m <sup>3</sup>	R\$ 177,70	R\$ 63.636,15
Fresagem contínua de revestimento betuminoso	Considerados equipamentos, materiais e mão de obra, com encargos inclusos.	m <sup>3</sup>	R\$ 38,97	R\$ 14.029,20
Espalhamento e compactação de mistura betuminosa pré misturada à quente	Considerados equipamentos, materiais e mão de obra, com encargos inclusos.	m <sup>3</sup>	R\$ 26,84	R\$ 9.611,67

Fonte: SEINFRA (2021)

Para a análise de comparação dos custos, foram consideradas as duas situações simuladas de geração de energia na seção 4.4, que resultaria em 76,56 MWh/mês e 3,44 MWh/mês para a situação ideal e com limitações, respectivamente. Esses valores gerados de energia seriam capazes de abastecer até 611 e 27 residências, em ordem. O preço médio do kWh no Ceará é R\$ 0,68, considerando o adicional da bandeira vermelha (ENEL, 2021). Dessa forma, com a inserção dos protótipos em rodovia seria possível economizar R\$ 52.060,80 e R\$ 2.341,92, em sequência. Então, para suprir os gastos com material e execução do revestimento, seriam necessários 41 anos, no mínimo, para a situação 1 e 218 anos para a situação 2, tornando-se inviáveis do ponto de vista econômico.

Ao considerar outras fontes de energia existentes no Ceará como a eólica que produz 523,25 GWh/mês e a solar com 39,08 GWh/mês, a energia produzida em 1 km de rodovia por intermédio da piezoeletricidade representaria 0,015% do total da energia eólica e 0,19 % do total de energia solar produzidas no estado. Contudo, caso fosse instalada em uma extensão maior, poderia ter chances de expandir a parcela de contribuição na matriz elétrica.

Os custos com aerogeradores de energia eólica podem chegar a R\$ 4,64 milhões por MWh instalados, enquanto que para a energia solar esse valor fica na faixa de R\$ 3,4 milhões (BLUESOL, 2021). Esses valores tornaram-se viáveis com a instalação de equipamentos durante o passar dos anos, permitindo que o retorno do investimento ocorresse de forma mais acelerada.

O mesmo pode acontecer com a energia piezoelétrica. Apesar dos custos serem elevados e até difíceis de estimar, como é o caso deste trabalho, com o avanço das pesquisas na área e da fabricação de tecnologia local, como elementos piezoelétricos otimizados, a alternativa pode se tornar viável e contribuir para a matriz elétrica brasileira de forma efetiva, permitindo que chegue luz a qualquer ponto do país de forma também sustentável.

## **5 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Neste capítulo são apresentadas as principais contribuições do trabalho, além das principais constatações, obtidas a partir da análise dos resultados e da relação com as pesquisas relatadas na revisão bibliográfica. Ainda, devido ao tema estar em estágios iniciais no Brasil, apresentaram-se sugestões para trabalhos futuros.

### **5.1 Principais contribuições**

A principal contribuição desta pesquisa foi a análise comparativa de ensaios laboratoriais e simulações computacionais relativas à captação e geração de energia no pavimento rodoviário, por meio da piezoelectricidade. De forma pioneira, foram realizados ensaios laboratoriais no Brasil com elementos piezoelétricos inseridos em um corpo de prova de mistura asfáltica, com elevado módulo de elasticidade, em que foram obtidas potências elétricas a partir da aplicação de cargas, frequências e distintas combinações de células. Os resultados permitiram concluir que a resistência elétrica, a carga, a tensão mecânica, a frequência, o arranjo e a quantidade de células piezoelétricas interferem diretamente na resposta elétrica do protótipo. A partir da simulação de aplicação do protótipo em trecho real de rodovia foi possível estimar a geração de 76,56 MWh de energia elétrica por mês para a situação ideal e de 3,44 MWh mensais para aplicação com limitação de controle de resistência e em locais que possuam irregularidade longitudinal no pavimento.

### **5.2 Principais constatações**

As principais constatações do estudo estão relacionadas às propriedades analisadas durante as simulações computacionais e os ensaios laboratoriais: (i) carga; (ii) frequência; (iii) resistência elétrica; (iv) quantidade de elementos piezoelétricos e (v) espaçamento das células no protótipo. Assim, são descritas as percepções obtidas a partir das análises dos resultados, conforme as etapas metodológicas.

#### ***5.2.1 Principais resultados com relação às simulações multifísicas***

A partir da primeira etapa (simulações multifísicas) foi possível constatar que a potência elétrica cresce com o aumento da carga e da frequência aplicadas, apresentando um

crescimento com tendência exponencial. O mesmo acontece com a tensão elétrica, contudo, observou-se que a sua curva possui tendência linear.

Ainda considerando os resultados obtidos pelas simulações computacionais, constatou-se que a resistência está inversamente proporcional à potência elétrica para a situação de 20 Hz, em que as maiores respostas elétricas ocorreram para a menor resistência calculada. Quando a frequência é igual a 5 Hz, as potências máximas são obtidas para os valores máximos de resistência. Enquanto que a frequência de 10 Hz passou por um ponto de máximo com relação à potência para a resistência intermediária testada. Dessa forma, para obter os valores máximos de resposta elétrica é necessário igualar as resistências externa e interna do protótipo, conforme exposto nos gráficos 22 a 25 da seção de resultados, que demonstram que ao variar a resistência para mais ou menos que a calculada pela Equação 16, reduz substancialmente a potência elétrica obtida.

Com relação à quantidade de células, na primeira etapa observou-se que a potência e a tensão elétrica diminuem com o aumento do número de elementos piezoelétricos. Isso acontece em função da tensão mecânica que é dissipada em menor quantidade para as células, além de que há uma ampliação da área de contato, diminuindo a voltagem e, conseqüentemente, a potência elétrica, demonstrado pela Equação 14.

Devido à elevada rigidez da mistura asfáltica, não houve uma adição considerável na potência elétrica com a adoção de um espaçamento maior entre as células, ficando esse acréscimo em 0,39 %. Contudo, quando analisada a tensão mecânica, houve um aumento para a situação de 4 células mais espaçadas, ressaltando a importância de ponderar entre maximização da potência e a ruptura do elemento piezoelétrico.

A tensão mecânica nas células também foi influenciada pela resistência elétrica, sendo elevada com a redução delas. Também foi possível identificar a relação direta das frequências com as velocidades dos veículos, visto que a frequência de 5 Hz resultou em valores mais altos de tensão mecânica, representando um tempo de carregamento maior sobre o protótipo. Essa frequência, conforme a Equação 15, representa a velocidade de 33 km/h. Para a frequência de 20 Hz foram encontrados os menores valores de tensão, configurando um menor tempo de carregamento e, conseqüentemente, sendo relacionada a velocidade de 115 km/h, em que a influência seria instantânea e logo cessaria o esforço mecânico nos elementos. Isso ocorre devido a consideração do material com comportamento linear elástico da mistura asfáltica e das placas de cobre. Silva (2009) destaca que esse comportamento é inverso quando o material é considerado como viscoelástico.

### 5.2.2 Principais resultados com relação aos ensaios de laboratório

Com a segunda etapa (ensaios laboratoriais) foi possível relacionar a irregularidade das placas de cobre com a irregularidade longitudinal do pavimento rodoviário, em que certos pontos não haverá o contato direto da roda do veículo com a estrutura, sendo exercida uma tensão mais elevada na situação seguinte de toque com a camada de revestimento. Assim, sugere-se que o protótipo seja aplicado em vias com baixa irregularidade longitudinal (IRI).

Outro detalhe importante foi que, a partir dos ensaios laboratoriais, constatou-se que a distribuição desuniforme de tensão mecânica pode resultar no fraturamento precoce dos elementos piezoelétricos, mesmo eles possuindo elevada resistência à compressão (superior a 46 MPa para a célula testada). Essa distribuição também ocasionou valores de potência superiores aos simulados no *software* na situação de 8 células e 20 Hz, mesmo com a resistência baixa e sem controle. Isso ocorre em função do não-contato direto das células com a placa, reduzindo a quantidade delas transformando a tensão mecânica em voltagem elétrica, conforme demonstrado pelas simulações multifísicas de que menos células piezoelétricas elevam os valores de potência elétrica.

Os ensaios laboratoriais também contribuíram para confirmar o comportamento exponencial da potência elétrica e o linear da voltagem, estando a curva de 20 Hz sempre mais distante graficamente das demais. A combinação de 8 células apresentou os melhores resultados para a potência elétrica, contudo, se tornaria inviável a sua aplicação com as mesmas condições utilizadas em laboratório.

Os resultados demonstram, então, que o protótipo piezoelétrico elétrico responderá de forma eficaz e eficiente para situações em que a velocidade da via seja a mais elevada possível, sem deixar de considerar questões relacionadas à segurança viária e para aplicações de carga mais elevadas, como caminhões. Ainda, com o controle da resistência elétrica, torna-se possível obter os valores otimizados de potência para qualquer situação de aplicação de carga.

As tensões aplicadas foram superiores às observadas no pavimento rodoviário (de até 0,70 MPa), contudo, elas auxiliaram a descobrir que a célula piezoelétrica consegue atingir até 46 MPa de compressão mecânica, sem romper. A proteção de 5 cm (posição simulada de inserção no pavimento) da mistura asfáltica e a sua rigidez também colabora para a diminuição da tensão mecânica captada pelos elementos piezoelétricos.



### ***5.2.3 Principais resultados com relação à simulação do protótipo em ambiente real***

Com a simulação realizada para o tráfego da BR-222, na terceira etapa, observou-se que para a combinação de 4 células mais espaçadas é possível obter até 918,76 MWh de energia em um ano, considerando 296 veic/h de carros de passeio e 47 veic/h de ônibus e caminhões. Essa quantidade de energia seria capaz de abastecer até 611 residências no entorno da rodovia.

Por fim, foi possível observar que a alternativa da energia piezoelétrica ainda é onerosa quando comparada aos valores de investimento de parque eólicos e painéis fotovoltaicos, demorando cerca de 40 anos para retornar o investimento inicial (analisado ainda de forma simples e direta, com apenas três materiais e alguns serviços de pavimentação). Contudo, a aplicação tem eficiência energética e, a partir de investimentos para reduzir os custos com material, pode ser uma alternativa viável para complementar a matriz elétrica brasileira, permitindo chegar energia a qualquer lugar do território brasileiro.

### **5.3 Sugestões para trabalhos futuros**

Devido a ser um tema recente de pesquisa no Brasil, ainda há muito a ser investigado em nível computacional, laboratorial e, principalmente, em campo. Destacam-se algumas sugestões para trabalhos futuros:

- a) simulação computacional e laboratorial da variação do módulo dinâmico da mistura asfáltica;
- b) verificação da influência da temperatura da mistura asfáltica em nível laboratorial e em campo;
- c) elaboração de modelos matemáticos com o auxílio de redes neurais para a obtenção da potência elétrica, considerando a variação de todas os parâmetros analisados, sem fixar valores;
- d) realização de testes de fadiga nos elementos piezoelétricos;
- e) mudança de material piezoelétrico e fabricação de elemento otimizado para maximizar a resistência elétrica e diminuir o risco de fraturamento do mesmo;
- f) investigação do ponto ótimo entre a vibração livre e a compressão por carga máxima dos elementos piezoelétricos;

- g) construção de um trecho experimental para teste das variáveis simuladas computacionalmente e laboratorialmente, verificando se há correlação entre os resultados das distintas etapas;
- h) análise da irregularidade longitudinal do trecho de aplicação do protótipo para verificar o nível de influência e impacto da resposta elétrica e na integridade dos elementos piezoelétricos.

## REFERÊNCIAS

- ABRACE. **Relatório Técnico de Energia Elétrica**. Associação Brasileira de Grandes Consumidores Industriais de Energia e de Consumidores Livres, Brasília, 2018. Disponível em: <[https://abrace.org.br/wp-content/uploads/2019/01/RT\\_EE\\_dez18.pdf](https://abrace.org.br/wp-content/uploads/2019/01/RT_EE_dez18.pdf)>. Acesso em 25 mai. 2021.
- ABRACE. **Relatório Técnico Mensal de Energia Elétrica – Setembro de 2020**. Associação Brasileira de Grandes Consumidores Industriais de Energia e de Consumidores Livres, Brasília, 2020. Disponível em: <<https://abrace.org.br/noticia/relatorio-tecnico-mensal-de-energia-eletrica-setembro-de-2020/>>. Acesso em 25 mai. 2021.
- AGÊNCIA SENADO. **Aneel aumenta em 52% a taxa da bandeira vermelha na conta de luz**. 2021. Disponível em: <<https://www12.senado.leg.br/noticias/audios/2021/06/aneel-aumenta-em-52-a-taxa-da-bandeira-vermelha-na-conta-de-luz>>. Acesso em: 05 jul. 2021.
- AGUIAR, M. B. **Modelos de negócio para inovações sustentáveis: uma abordagem para as tecnologias de recolha de energia em pavimentos rodoviários**. 2020. Relatório de Estágio (Mestrado em Economia e Gestão do Ambiente) – Universidade do Porto, Porto, 2020.
- AHMAD, S.; MUJEEBU, M. A.; FAROOQI, M. A. Energy harvesting from pavements and roadways: a comprehensive review of technologies, materials, and challenges. **International Journal of Energy Research**, [S.L.], v. 43, n. 6, p. 1974-2015, 3 fev. 2019.
- ALBANO, J. F. Área e pressão de contato dos pneus com a superfície de um pavimento. *In*: Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte, 14º, 2000, Gramado/RS. **Anais [...]**. Rio de Janeiro: ANPET, 2000. p. 497-505.
- ALMEIDA, L. C.; OLIVEIRA, F. H. L.; CHAVES, J. W. R. Análise da alteração no valor limite do IRI na qualidade funcional em pistas de pouso e decolagem de aeroportos brasileiros. **Revista Tecnologia**, [S.L.], v. 40, n. 1, p. 1-11, 19 jun. 2019.
- AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE. IEEE Standard on Piezoelectricity. *In*: **ANSI/IEEE Std 176-1978**, pp.1-58, 1978.
- ANFAVEA. **Estatísticas**. Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores, 2021. Disponível em: <<http://anfavea.com.br/estatisticas>>. Acesso em: 12 jan. 2021.
- ARAÚJO, Eliete de Pinho; GUERREIRO, Laura de Castro Oliveira. Piezoelectricidade: a energia sob os pés e rodas em três estudos de casos/piezoelectricity. **Brazilian Journal of Development**, [S.L.], v. 6, n. 10, p. 76627-76648, 2020.
- BALDWIN, J. D.; ROSWURM, S.; NOLAN, J.; HOLLIDAY, S. Energy harvesting on highway bridges. Planning & Research Div., **Oklahoma DOT**, n. 2224, p. 1-26, 2011.
- BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. **Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros**. 1. ed. Rio de Janeiro: Abeda, 2008.

BEZERRA JÚNIOR, M. H. **Estudo de aplicabilidade de uma cerâmica PZT como sensor de correntes para monitoramento de linha de transmissão de energia**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Telecomunicações) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, Fortaleza, 2015.

BEZERRA JÚNIOR, M. H.; MAGALHÃES, A. L.; BASTOS, A. M.; SALES, A. J. M.; GOUVEIA, D. X.; KAMSHILIN, A. A.; FERREIRA, A. C.; GUIMARÃES, G. de F.; SOMBRA, A. S. B.; MENEZES, J. W. M. Piezoelectric ceramic sensor (PZT) applied to electric current measurements. **Microsystem Technologies**, [S.L.], v. 25, n. 2, p. 705-710, 15 jun. 2018.

BHALLA, S.; MOHARANA, S.; TALAKOKULA, V.; KAUR, N. **Piezoelectric Materials: Applications in SHM, Energy Harvesting & Biomechanics**. London: Athena Academic, 2017.

BLUESOL. **Energia Solar e Eólica: Preço, Diferenças e Melhores Locais**. 2021. Disponível em: <<https://blog.bluesol.com.br/energia-solar-e-eolica/>>. Acesso em: 19 ago. 2021.

BRASIL. **Estatísticas - Frota de Veículos – DENATRAN**. Ministério da Infraestrutura, 2021. Disponível em: <<https://www.gov.br/infraestrutura/pt-br/assuntos/transito/conteudo-denatran/estatisticas-frota-de-veiculos-denatran>>. Acesso em: 12 jan. 2021.

CAFISO, S.; CUOMO, M.; GRAZIANO, A. di; VECCHIO, C. Experimental Analysis for Piezoelectric Transducers Applications into Roads Pavements. **Advanced Materials Research**, [S.L.], v. 684, p. 253-257, abr. 2013.

CALLISTER, W. D. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. Tradução: Sergio Murilo Stamile Soares. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

CAO, Y.; SHA, A.; LIU, Z.; LI, J.; JIANG, W. Energy output of piezoelectric transducers and pavements under simulated traffic load. **Journal of Cleaner Production**, [S.L.], v. 279, p. 123508, jan. 2021.

CCEE. **Consumo de energia no SIN**. São Paulo, 2021. Disponível em: <[https://www.ccee.org.br/portal/faces/pages\\_publico/o-que-fazemos/infomercado](https://www.ccee.org.br/portal/faces/pages_publico/o-que-fazemos/infomercado)>. Acesso em: 25 mai. 2021.

CIGOGNINI, T. A.; GUIALIS, L.; MALLMANN, A. V. F.; SANTOS, L. G. F.; GONZATTI, S. E. M. Caminho da Energia. **Revista Destaques Acadêmicos**, [S.L.], v. 8, n. 4, p. 253-266, 29 dez. 2016.

CNN BRASIL. **Tarifa da bandeira vermelha 2 terá reajuste de 52%, para R\$ 9,49 por 100 kWh**. 2021. Disponível em: <<https://www.cnnbrasil.com.br/business/2021/06/29/tarifa-da-bandeira-2-vermelha-tera-reajuste-de-52-para-r-9-49-por-100-kw-hora>>. Acesso em: 05 jul. 2021.

COMSOL. **Optimizing the Power of a Piezoelectric Energy Harvester**. 2015. Disponível em: <<https://br.comsol.com/blogs/optimizing-the-power-of-a-piezoelectric-energy-harvester/>>. Acesso em 30 mai. 2021.

CONTRAN. **Resolução nº 210: limites de peso e dimensões para veículos que transitem por vias terrestres**. Ministério das Cidades. 2006. Disponível em: <<https://www.gov.br/dnit/pt-br/rodovias/operacoes-rodoviaras/sistema-de-gerenciamento-de-autorizacao-especial-de-transito-siaet/RESOLUCAO2102006CONTRANCONSOLIDADA.pdf>>. Acesso em 18 mar. 2021.

CORREIO BRAZILIENSE. **Conta de luz vai subir: Anel aprova aumento de 52% na bandeira vermelha 2**. 2021. Disponível em: <<https://www.correiobraziliense.com.br/economia/2021/06/4934357-conta-de-luz-vai-subir-anel-aprova-aumento-de-52-na-bandeira-vermelha-2.html>>. Acesso em: 05 jul. 2021.

CPTEC. **Dados Observacionais**. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos, 2021. Disponível em: <<http://bancodedados.cptec.inpe.br/>>. Acesso em: 25 mai. 2021.

DING, G.; ZHAO, X.; SUN, F.; WANG, J. Effect of subgrade on piezoelectric energy harvesting under traffic loads. **International J. of Pavement Engineering**, [S.L.], v. 19, n. 8, p. 661–674, 2018.

DNER. **DNER-PRO 164/94**. Calibração e controle de sistemas medidores de irregularidade de superfície de pavimento (Sistema Integradores IPR/USP e Maysmeter). 18 p. Brasília, 1994. Disponível em: <[https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-normas/coletanea-de-normas/procedimento-pro/DNER\\_PRO\\_164\\_94.pdf](https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-normas/coletanea-de-normas/procedimento-pro/DNER_PRO_164_94.pdf)>. Acesso em: 02 ago. 2021.

DNIT. **Manual de Gerência de Pavimentos**. Diretoria Executiva. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Rio de Janeiro: IPR, 2011.

DNIT. **Volume médio diário por tipo de dia da semana – VMDds**. 2019. Disponível em: <<https://servicos.dnit.gov.br/dadospnct/ContagemContinua>>. Acesso em: 07 jun. 2021

DUARTE, F.; CASIMIRO, F.; CORREIA, D.; MENDES, R.; FERREIRA, A. Waynergy people: a new pavement energy harvest system. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Municipal Engineer**, [S.L.], v. 166, n. 4, p. 250-256, dez. 2013.

DUARTE, F.; FERREIRA, A. Energy harvesting on road pavements: state of the art. **Proceedings of The Institution of Civil Engineers - Energy**, [S.L.], v. 169, n. 2, p. 79-90, 2016.

DUARTE, F.; CHAMPALIMAUD, J. P.; FERREIRA, A. Waynergy Vehicles: an innovative pavement energy harvest system. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Municipal Engineer**, [S.L.], v. 169, n. 1, p. 13-18, mar. 2016.

DUARTE, F.; FERREIRA, A.; FAEL, P. Software tool for simulation of vehicle – road interaction. **Engineering Computations**, [S.L.], v. 34, n. 5, p. 1501-1526, 3 jul. 2017.

DUARTE, F.; FERREIRA, A.; CHAMPALIMAUD, J. P. Waynergy vehicles: system prototype demonstration in an operational environment. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Municipal Engineer**, [S.L.], v. 172, n. 2, p. 106-113, jun. 2019.

DUARTE, F.; FERREIRA, A.; FAEL, P. Road pavement energy harvesting: experimental validation of an electromechanical system. In: Transport Research Arena, 8th, 2020, Helsinki. **Proceedings [...]**. TRA, 2020.

DUTOIT, N. E.; WARDLE, B. L.; KIM, S. Design Considerations for Mems-Scale Piezoelectric Mechanical Vibration Energy Harvesters. **Integrated Ferroelectrics**, [S.L.], v. 71, n. 1, p. 121-160, jul. 2005.

ENEL. **Taxas, Tarifas e Impostos**. 2021. Disponível em: <[https://www.enel.com.br/pt-ceara/Tarifas\\_Enel.html](https://www.enel.com.br/pt-ceara/Tarifas_Enel.html)>. Acesso em 19 ago. 2021.

EPE. **Balço Energético Nacional 2020**: ano base 2019. Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética, São Paulo, 2020a. Disponível em: <[https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-479/topico-528/BEN2020\\_sp.pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-479/topico-528/BEN2020_sp.pdf)>. Acesso em: 25 mai. 2021.

EPE. Demanda de Energia. In: **Plano decenal de expansão de energia 2029**. Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética, 2020b. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-423/topico-481/02%20Demandada%20de%20Energia.pdf>>. Acesso em: 28 dez. 2020.

FERNANDES JÚNIOR, J. L. **Investigação dos efeitos das solicitações do tráfego sobre o desempenho de pavimentos**. 1994. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1994.

FERNANDES JÚNIOR, J. L.; BARBOSA, R. E. Estimativa das cargas dinâmicas dos veículos rodoviários que atuam sobre os pavimentos e pontes. **Transportes**, [S.L.], v. 8, n. 2, p. 32-50, 2 jul. 2000.

G1. **Conta de luz**: Aneel reajusta valor da bandeira tarifária vermelha 2 em 52%. 2021a. Disponível em: <<https://g1.globo.com/economia/noticia/2021/06/29/conta-de-luz-aneel-reajusta-valor-da-bandeira-tarifaria-vermelha-2-em-52percent.ghtml>>. Acesso em: 05 jul. 2021.

G1. **Geração de energia solar cresce 130% no Ceará em 2020, e número de unidades geradoras chega a 10 mil**. 2021b. Disponível em: <<https://g1.globo.com/ce/ceara/noticia/2021/01/08/geracao-de-energia-solar-cresce-130percent-no-ceara-em-2020-e-numero-de-unidades-geradoras-chega-a-10-mil.ghtml>>. Acesso em: 25 mai. 2021.

GAIOTTO, F. J. **Design de transformadores cerâmicos piezoelétricos e aplicações**. 2012. Dissertação de Mestrado (Física) – Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2012.

GANNOUM, E. S. O desenvolvimento da indústria de energia eólica no Brasil: aspectos de inserção, consolidação e sustentabilidade. **Cadernos Adenauer**, n. 3, p. 57-71, 2014. Disponível em: <<http://www.kas.de/wf/doc/15613-1442-5-30.pdf>>. Acesso em: 27 mai. 2021.

GAREH, S.; KOK, B. C.; UTTRAPHAN, C.; THONG, K. T.; BORHANA, A. A. Evaluation of piezoelectric energy harvester outcomes in road traffic applications. In: Clean Energy and Technology Conference, 4<sup>th</sup>, 2016, Kuala Lumpur. **Proceedings [...]**. IET, 2016.

GASKILL, J. D. **Linear Systems, Fourier Transforms, and Optics**. New York: John Wiley & Sons, Inc, 1978.

GUEDES, K. G.; OLIVEIRA, F. H. L. Análise comparativa entre índices de medida de conforto ao rolamento no anel viário de Fortaleza. **Revista Tecnologia**, [S.L.], v. 39, n. 1, p. 1, 29 jun. 2018.

HARB, A. Energy harvesting: state-of-the-art. **Renewable Energy**, [S.L.], v. 36, n. 10, p. 2641-2654, out. 2011

HELLER, L.; BRITO, L.; JOHNSTON, M.; NUNEZ, W. Microgeração de energia em pavimentos: um estudo de caso em uma rodovia em serviço. **Estradas**, Porto Alegre, v. 24, n. 1, p. 20-25, 2019.

HEYWANG, W.; THOMANN, H. Tailoring of Piezoelectric Ceramics. **Ann. Rev. Mater. Sci.**, [S.L.], v. 14, p. 27-47, 1984.

HUANG, Y. H. **Pavement Analysis and Design**. 2<sup>a</sup> edição. United States of America: Prentice Hall, 2003.

JASIM, A.; WANG, H.; YESNER, G.; SAFARI, A.; MAHER, A. Optimized design of layered bridge transducer for piezoelectric energy harvesting from roadway. **Energy**, [S.L.], v. 141, p. 1133-1145, dez. 2017.

JASIM, A.; YESNER, G.; WANG, H.; SAFARI, A.; MAHER, A.; BASILY, B. Laboratory testing and numerical simulation of piezoelectric energy harvester for roadway applications. **Applied Energy**, [S.L.], v. 224, p. 438-447, 2018.

KANG, M. G.; JUNG, W. S.; KANG, C. Y.; YOON, S. J. Recent Progress on PZT Based Piezoelectric Energy Harvesting Technologies. **Actuators**, [S.L.], v. 5, n. 1, p. 1-17, 22 fev. 2016.

KÁZMIERSKI, T. J.; BEEBY, S. **Energy Harvesting Systems: principles, modeling and applications**. New York: Springer, 2011.

KHALIGH A.; ONAR, O. G. **Energy harvesting: solar, wind, and ocean energy conversion systems**. Boca Raton: CRC Press Inc, 2010.

KIM, S.; STERNB, I.; SHENC, J.; AHAD, M.; BAI, Y. Energy Harvesting Assessment Using PZT Sensors and Roadway Materials. **International Journal of Thermal and Environmental Engineering**, [S.L.], v. 16, n. 1, p. 19-25, 9 ago. 2018

KOKKINOPOULOS, A.; VOKAS, G.; PAPAGEORGAS, P. Energy harvesting implementing embedded piezoelectric generators - The potential for the AttikiOdos traffic grid. **Energy Procedia**, Suécia, v. 50, p. 1070-1085, 2014.

LEE, C. S.; JOO, J.; HAN, S.; LEE, J. H.; KOH, S. K. Poly (vinylidene fluoride) transducers with highly conducting poly (3,4-ethylenedioxythiophene) electrodes. **Synthetic Metals**, [S.L.], v. 152, n. 1-3, p. 49-52, set. 2005.

MEDINA, J. de; MOTTA, L. M. G. da. **Mecânica dos Pavimentos**. 3 ed., 638 p. Rio de Janeiro: Interciência, 2015.

MINISTÉRIO DA INFRAESTRUTURA. **Frota de Veículos – 2021**. Brasília, 2021. Disponível em: <<https://www.gov.br/infraestrutura/pt-br/assuntos/transito/conteudo-denatran/frota-de-veiculos-2021>>. Acesso em: 31 mar. 2021.

MITCHESON, P. D.; YEATMAN, E. M.; RAO, G. K.; HOLMES, A.s.; GREEN, T. C. Energy Harvesting from Human and Machine Motion for Wireless Electronic Devices. **Proceedings of the IEEE**, [S.L.], v. 96, n. 9, p. 1457-1486, set. 2008.

MOTA, B. C. **O pavimento como instrumento de geração de energia para o desenvolvimento sustentável de cidades inteligentes**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2019.

MOTA, B. C.; BARROSO, S. H. A. O uso do pavimento para geração de energia e desenvolvimento sustentável de cidades inteligentes. **Transportes**, [S.L.], v. 29, n. 2, p. 1-15, 2021.

MOURE, A.; RODRÍGUEZ, M.; RUEDA, S.; GONZALO, A.; RUBIO-MARCOS, F.; CUADROS, D.; FERNANDEZ, J. Feasible integration in asphalt of piezoelectric cymbals for vibration energy harvesting. **Energy Conversion and Management**, [S.L.], v. 112, p. 246–253, 2016.

NAJINI, H.; MUTHUKUMARASWAMY, S. A. Piezoelectric Energy Generation from Vehicle Traffic with Technoeconomic Analysis. **Journal of Renewable Energy**, [S.L.], v. 2017, p. 1-16, 2017

NIASAR, E. H. A.; DAHMARDEH, M.; GOOGARCHIN, H. S. Roadway piezoelectric energy harvester design considering electrical and mechanical performances. **Journal of Mechanical Engineering Science**, [S.L.], v. 234, n. 1, p. 32-48, 2019.

OLIVEIRA, A. H.; SOARES, J. B. Avaliação de diferentes formas de captação de energia para pavimentos do estado do Ceará. *In*: Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, 32º, Gramado. **Anais [...]**. Rio de Janeiro: ANPET, 2018. p. 1917–1920.

PAPAGIANNAKIS, A.T.; DESSOUKY, S.; MONTOYA, A.; ROSHANI, H. Energy Harvesting from Roadways. **Procedia Computer Science**, [S.L.], v. 83, p. 758-765, 2016.

PAPAGIANNAKIS, A. T.; MONTOYA, A.; DESSOUKY, S.; HELFFRICH, J. Development and Evaluation of Piezoelectric Prototypes for Roadway Energy Harvesting. **Journal of Energy Engineering**, [S.L.], v. 143, n. 5, p. 04017034, out. 2017.

PEREIRA, A. M. **Análise Crítica dos Fatores de Equivalência adotado pelo DNER e sua adequação às Rodovias de Tráfego Pesado**. 1985. Tese (Concurso professor titular do



Departamento de Transportes, Setor de Tecnologia), Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1985.

PINTO, P. C. Simulation of piezoelectric energy device in the pavement of urban crossroad. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, Santa Maria, v. 24, e. 39, p. 1-16, 2020.

PINTO, R. J.; SANTOS, V. M. L. dos. Energia Eólica no Brasil: evolução, desafios e perspectivas. **Journal on Innovation and Sustainability**. Risus ISSN 2179-3565, [S.L.], v. 10, n. 1, p. 124-142, 12 mar. 2019.

RAMADASS, Y. K.; CHANDRAKASAN, A. P. An Efficient Piezoelectric Energy Harvesting Interface Circuit Using a Bias-Flip Rectifier and Shared Inductor. **IEEE Journal of Solid-State Circuits**, [S.L.], v. 45, n. 1, p. 189-204, jan. 2010.

RANGEL, R. F. **Caracterização de uma célula tubular piezoelétrica para geração de energia elétrica**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2014.

RICOSTI, J. F. C. **Inserção da energia eólica no sistema hidrométrico brasileiro**. 2011. Dissertação (Mestrado em Energia) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

RODRIGUES, S. R. **Análise experimental do efeito piezoelétrico para geração de energia elétrica**. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) – Rede DOCTUM de Ensino, Instituto Tecnológico de Caratinga, Caratinga, 2016.

ROSA, A. V. da. **Fundamentals of Renewable Energy Processes**. Oxford: Elsevier, 2005.

ROSHANI, H.; DESSOUKY, S.; MONTOYA, A.; PAPAGIANNAKIS, A.T. Energy harvesting from asphalt pavement roadways vehicle-induced stresses: a feasibility study. **Applied Energy**, [S.L.], v. 182, p. 210-218, nov. 2016.

ROSHANI, H.; DESSOUKY, S.; PAPAGIANNAKIS, A. T.; MONTOYA, A. Experimental and finite element assessment of three energy harvesting prototypes for roadways. **Innovative Infrastructure Solutions**, [S.L.], v. 2, n. 1, p. 1-12, 30 mar. 2017

ROSHANI, H.; JAGTAP, P.; DESSOUKY, S.; MONTOYA, A.; PAPAGIANNAKIS, A. Theoretical and Experimental Evaluation of Two Roadway Piezoelectric-Based Energy Harvesting Prototypes. **J. of Materials in Civil Engineering**, [S.L.], v. 30, n.2, p. 04017264, 2018.

SAKAMOTO, J. M. S. **Sensor em fibra óptica aplicado à caracterização de atuadores piezoelétricos flexionais**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2006.

SEINFRA. **Tabela de Custos**. Governo do Estado do Ceará, 2021. Disponível em: <<https://www.seinfra.ce.gov.br/tabela-de-custos/>>. Acesso em 18 ago. 2021.

SILVA, H. N. **Caracterização viscoelástica linear de misturas asfálticas: operacionalização computacional e análise pelo método dos elementos finitos**. 2009. 191 f. Dissertação (mestrado)-Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, 2009.

SODANO, H. A.; INMAN, D. J.; PARK, G. Comparison of Piezoelectric Energy Harvesting Devices for Recharging Batteries. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, [S.L.], v. 16, n. 10, p. 799-807, out. 2005.

SOARPIEZO. **Ultrasonic Piezoelectric Ceramic Cylinder 8.56x6.2mm-PZT5 Piezo Disc PZT Crystals Sensor Elements Ignition Stone Transmitters**. 2020. Disponível em: <<https://www.aliexpress.com/snapshot/0.html?spm=a2g0s.9042647.0.0.103f4c4dyhLbRJ&orDerId=8129844959600126&productId=32863055182>>. Acesso em 20 jul. 2020.

SONG, Y.; YANG, C. H.; HONG, S. K.; HWANG, S. J.; KIM, J. H.; CHOI, J. Y.; RYU, S. K.; SUNG, T. H. Road energy harvester designed as a macro-power source using the piezoelectric effect. **International Journal of Hydrogen Energy**, [S.L.], v. 41, n. 29, p. 12563-12568, ago. 2016.

SOUSA, L. C.; COSTA, M. F.; ANDRADE, G. A.; PAURA, E. N. C. Estudo sobre o potencial de geração de energia elétrica para semáforos a partir de placas piezoelétricas na MA 006. **Revista Brasileira de Iniciação Científica**, Itapetininga, v. 3, n. 3, 2016.

SUN, C.; WANG, H. LIU, J.; SHANG, G. Finite Element Analysis of Vehicle Load Effect on Harvesting Energy Properties of a Piezoelectric Unit. **Energy and Power Engineering**, [S.L.], v. 07, n. 10, p. 500-508, 2015.

TORQUATO E SILVA, S. A.; BASTOS, J. B. S.; SOARES, J. B. Influência da aderência na análise de pavimentos asfálticos. In: Reunião Anual de Pavimentação, 44 ed., 2015, Foz do Iguaçu/PR. **Anais [...]**. Rio de Janeiro: ABPv, 2015.

TRIUNFO CONCEPA. **Estratégias de eficiência energética em praças de pedágio rodoviários**. Porto Alegre: ANTT, 2018.

UCHINO, K. **Ferroelectric Devices**. New York: Marcel Dekker, Inc, 2000.

VALE, A. C. F. **Analysys of the Evolution of Permanent Deformation of Asphalt Mixtures Using the Stress Sweep Rutting (SSR) Test Methodology**. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2020.

VÁZQUEZ-RODRÍGUEZ, M.; JIMÉNEZ, F.; PARDO, L.; OCHOA, P.; GONZÁLEZ, A.; FRUTOS, J. A New Prospect in Road Traffic Energy Harvesting Using Lead-Free Piezoceramics. **Materials**, [S.L.], v.12, n. 22, p. 3725, 2019.

WANG, C.; WANG, S.; LI, Q. J.; WANG, X.; GAO, Z.; ZHANG, L. Fabrication and performance of a power generation device based on stacked piezoelectric energy-harvesting units for pavements. **Energy Conversion and Management**, [S.L.], v. 163, p. 196-207, maio 2018a.

- WANG, C.; ZHAO, J.; LI, Q.; LI, Y. Optimization design and experimental investigation of piezoelectric energy harvesting devices for pavement. **Applied Energy**, [S.L.], v. 229, p. 18-30, nov. 2018b.
- WANG, H.; SUN, C. Finite Element Analysis on a Square Canister Piezoelectric Energy Harvester in Asphalt Pavement. **World Journal of Engineering and Technology**, [S.L.], v. 04, n. 02, p. 361-373, 2016.
- WANG, H.; JASIM, A.; CHEN, X. Energy harvesting technologies in roadway and bridge for different applications: a comprehensive review. **Applied Energy**, [S.L.], v. 212, p. 1083–1094, 2018.
- WANG, S.; WANG, C.; YU, G.; GAO, Z. Development and performance of a piezoelectric energy conversion structure applied in pavement. **Energy Conversion and Management**, [S.L.], v. 207, p. 112571, mar. 2020.
- XIANG, H.; WANG, J.; SHI, Z.; ZHANG, Z. Theoretical analysis of piezoelectric energy harvesting from traffic induced deformation of pavements. **Smart Materials and Structures**, [S.L.], v. 22, p. 095024, 2013.
- XIAO, J.; ZOU, X.; XU, W. EPave: a self-powered wireless sensor for smart and autonomous pavement. **Sensors**, [S.L.], v. 17, n. 10, p. 2207, 26 set. 2017.
- XU, X.; CAO, D.; YANG, H.; HE, M. Application of piezoelectric transducer in energy harvesting in pavement. **International Journal of Pavement Research and Technology**, [S.L.], v. 11, n. 4, p. 388-395, jul. 2018.
- YAO, L.; ZHAO, H. D.; DONG, Z. Y.; SUN, Y. F.; GAO, Y. F. Laboratory Testing of Piezoelectric Bridge Transducers for Asphalt Pavement Energy Harvesting. **Key Engineering Materials**, [S.L.], v. 492, p. 172-175, set. 2011.
- YODER, E. J.; WITCZAK, M. W. **Principles of Pavement Design**. 2 ed., 711 p. New York: John Wiley and Sons, 1975.
- ZHANG, Z.; XIANG, H.; SHI, Z. Modeling on piezoelectric energy harvesting from pavements under traffic loads. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, v. 27, n. 4, p. 567–578, 2016.
- ZHANG, Y.; ZHANG, H.; LÜ, C.; CHEN, Y.; WANG, J. Piezoelectric energy harvesting from roadway deformation under various traffic flow conditions. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, [S.L.], v. 31, n. 15, p. 1751-1762, 26 jun. 2020.
- ZHAO, H.; LING, J.; YU, J. A comparative analysis of piezoelectric transducers for harvesting energy from asphalt pavement. **Journal of the Ceramic Society of Japan**, [S.L.], v. 120, n. 8, p. 317-323, 2012.
- ZHU, L.; CHEN, R.; LIU, X. Theoretical analyses of the electronic breaker switching method for nonlinear energy harvesting interfaces. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, [S.L.], v. 23, n. 4, p. 441-451, 2012.

## APÊNDICE I – MANUAL DE EXECUÇÃO DAS SIMULAÇÕES

- 1) **Seleção do modelo:** Model Wizard;
- 2) **Dimensão espacial do modelo:** 3D;
- 3) Escolha do recurso Structural Mechanics;
- 4) Escolha do recurso Piezoelectric Devices e Electrical Circuit no sub-menu de Structural Mechanics;
- 5) Selecionar a adição dos recursos;
- 6) **Definir o tipo de estudo:** Frequency Domain;
- 7) Selecionar a adição do estudo;
- 8) **Adicionar as definições globais, seguindo a sequência:** Model Builder > Global Definitions > Parameters;
- 9) Configurar os parâmetros globais, seguindo a sequência: Settings > Parameters > Parameters section;
- 10) Configurar os parâmetros de acordo com a Tabela I;

Tabela I – Parâmetros Globais

Name	Expression	Value	Description
acc	1	1	Acceleration (g)
R load	Valor definido pela $R_I$ (Equação 16) [ohm]	valor	Load resistance

- 11) Definir e desenhar a geometria das células e demais elementos do protótipo, utilizando das coordenadas disponíveis na interface do software;
- 12) **Adicionar o tipo de material:** PZT-5H para as células, asphalt para a mistura asfáltica e cobre para as placas (mudar os parâmetros do material como massa, módulo, constantes e afins, a partir dos materiais a serem adotados nos ensaios laboratoriais);
- 13) **Unir os elementos:** Geometry > Booleans and Positions > Union
- 14) Adicionar o amortecimento para os materiais, seguindo a sequência de menus e submenus: Linear Elastic Material > Damping 1 > Solid Model > Isotropic > Electric Potential > Boundary Probe (expressão:  $1[V]/(es.n)*0,005[m]*es.omega$ )
- 15) Adicionar o fator isotrópico do amortecimento para as estruturas sólidas de mistura e placa de cobre: Physics > Attributes > Damping > Damping Settings > Damping type > Isotropic loss fator >  $N_s$  > Used defined > 0,001
- 16) Repetir o passo 15 para o material piezoelétrico;

- 17) Fixar a face inferior do protótipo (para o caso específico desta dissertação foi a face inferior da placa de cobre situada abaixo das células piezoelétricas) utilizando o recurso Fixed Constraint no menu de Solid Mechanics;
- 18) Fixar a face de aplicação do carregamento (para o caso específico desta dissertação foi a face superior da mistura asfáltica) utilizando o recurso Boundary Load no menu de Solid Mechanics, no eixo z; Obs.: essa força precisará ser modificada a cada nova rodada de aplicação de força distinta no protótipo;
- 19) **Adicionar o recurso de terminal e potencial flutuante nas células piezoelétricas:** Physics > Boundaries > Ground > Terminal > type: circuit na face inferior da célula piezoelétrica. Em Electrostatics, adicionar também o Floating Potential na face do topo da célula piezoelétrica;
- 20) **Adicionar o ponto de sondagem do potencial flutuante:** Definitions > Probes > Domain Point Probe, selecionando a face superior das células.
- 21) Adicionar a expressão do ponto de sondagem do potencial flutuante: Definitions > Domain Point Probe 1 > Point Probe Expression 1; Em seguida, seleciona o menu Electrostatics > Floating Potential e escolhe a expressão es.fp1.v0\_FloatingPotential com um clique duplo;
- 22) Adicionar a expressão do ponto de sondagem da Boundary Probe: Electrostatics > Currents and charge > Clique duplo em es.nD\_SurfaceChargeDensity; Ainda, selecionar em Probe type a opção Integral;
- 23) Adicionar a malha no protótipo (recomendação: triangular);
- 24) Adicionar o resistor: Electrical Circuit > Resistor. Nas configurações: Node connections > n > 0; Segue para Devices Parameters > R\_type: R\_load;
- 25) Adiciona o Terminal Externo: External Terminal > Node name > 1 : V : Terminal Voltage (es/termI).