



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE TRANSPORTES
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

BRUNO CAVALCANTE MOTA

**O PAVIMENTO COMO INSTRUMENTO DE GERAÇÃO DE ENERGIA PARA O
DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL DE CIDADES INTELIGENTES**

FORTALEZA

2019

BRUNO CAVALCANTE MOTA

O PAVIMENTO COMO INSTRUMENTO DE GERAÇÃO DE ENERGIA PARA O
DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL DE CIDADES INTELIGENTES

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Engenharia Civil do Centro de
Tecnologia da Universidade Federal do Ceará,
como requisito parcial à obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Civil.

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

FORTALEZA

2019

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)

M871p Mota, Bruno Cavalcante.

O pavimento como instrumento de geração de energia para o desenvolvimento sustentável de cidades inteligentes / Bruno Cavalcante Mota. – 2019.
103 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Civil, Fortaleza, 2019.

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

1. Sustentabilidade. 2. Energia elétrica no pavimento. 3. Piezoeletricidade. 4. Energia solar. I. Título.
CDD 620

BRUNO CAVALCANTE MOTA

O PAVIMENTO COMO INSTRUMENTO DE GERAÇÃO DE ENERGIA PARA O
DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL DE CIDADES INTELIGENTES

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Engenharia Civil do Centro de
Tecnologia da Universidade Federal do Ceará,
como requisito parcial à obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Civil.

Aprovado em: 26 / 11 / 2019 .

BANCA EXAMINADORA

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

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

Prof. Dr. Saulo Davi Soares e Reis
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Profa. Dra. Lilian Medeiros Gondim
Universidade Federal do Cariri (UFCA)

A Deus.

À minha mãe Rita Maria Cavalcante e ao meu
pai que deve estar cuidando de mim, Luiz
Cavalcante Mota.

AGRADECIMENTOS

Finais são tão importantes quanto seus começos, contudo, lembrar o caminho percorrido para concluí-lo é de fundamental importância. Tudo o que vivi, as ausências, cada aula, cada projeto desenvolvido, a vontade de estar perto daqueles que amo, tantas lembranças... Sei que é uma conquista para mim, mas sinto como se fosse uma vitória de todos, pois sem o apoio incondicional que recebi, não teria sido possível.

Por isso, hoje só tenho a agradecer a todos aqueles que me ajudaram durante todo o processo. Agradeço, primeiramente, a Deus, pela vida e por me fornecer forças para continuar, mesmo quando tudo parecia desabar. À minha orientadora, Professora Doutora Suelly Helena de Araújo Barroso, um muito obrigado especial, por despertar o meu interesse para novas possibilidades na Engenharia Civil, principalmente quanto a Infraestrutura de Transportes, pela dedicação e tempo a mim gasto. E, por durante esses dois anos sendo minha orientadora de iniciação à docência e pesquisa, ter sido minha inspiração e fonte de motivação a cada nova conversa.

Ao Professor Ph.D Jorge Barbosa Soares, ao Professor Doutor Saulo Davi Soares e Reis e à Professora Doutora Lilian Medeiros Gondim por terem aceitado participar da Banca Examinadora, pelo tempo e pelas valiosas colaborações e sugestões.

Ao Professor Doutor Francisco Heber Lacerda de Oliveira, por toda a orientação durante a iniciação à docência e por ser essa pessoa íntegra, a quem me espelho diariamente e um dia quero seguir os passos. Aos professores Áurea Holanda, Manoel Mendonça, Bruno Bertocini e Verônica Castelo Branco, por terem tornado essa caminhada mais prazerosa.

Aos meus amigos da graduação pelas conversas, motivações e parcerias em trabalhos e na vida em si, durante todo o período do curso, principalmente a Jackeline Almeida, Pedro Luiz, Tallys Gonçalves, Andrezza Almeida, Mateus Lira, David Harley, Renata Sales e Otávio Alves.

Aos meus colegas do grupo de Solos do Laboratório de Mecânica dos Pavimentos. Aos meus amigos do ensino médio, que foram meus pontos de fuga da graduação em vários momentos, Crysna, Filipe, Carlos, Alexandre, Vinícius e Andressa. Incluo também meu confidente e amigo que, mesmo distante, sempre se fez tão presente durante esse percurso, Kelven Figueiredo e minhas primas, Kallyne e Thais, por todo o apoio moral. E a todos que de alguma forma foram relevantes para a conclusão desta etapa tão importante em minha vida.

RESUMO

A sustentabilidade tem se tornado um conceito amplamente estudado e aplicado, sendo atrelada ao desenvolvimento sustentável, tornando-se possível apenas com a consideração conjunta das esferas social, econômica e ambiental. Partindo desse pressuposto, o pavimento rodoviário surge como uma alternativa sustentável de geração de energia que não depende do sistema natural. Ele é visto como o ponto de encontro de pessoas e veículos, obtendo-se energia elétrica por meio da transformação da energia mecânica transmitida pelo veículo ao pavimento, utilizando células piezoelétricas ou pela conversão de energia solar por meio de painéis fotovoltaicos ou sistemas permutadores de calor. Portanto, este trabalho foi desenvolvido com base na instigação das utilidades do pavimento como mecanismo de contribuição do desenvolvimento sustentável de cidades inteligentes, a fim de mostrar a possibilidade de sua utilização com o propósito de reduzir o impacto ambiental relativo às energias. A metodologia foi realizada por meio de um estudo exploratório e realização de simulações, com a proposição de um protótipo e simulação de aplicação em um trecho real. Com esta pesquisa, foi possível identificar as principais publicações acerca do pavimento como instrumento de geração de energia, elencando ainda suas vantagens e desvantagens. Além disso, foi possível mensurar quais as propriedades geométricas que têm influência direta no potencial elétrico, bem como sugerir locais de aplicação a partir das análises de frequência e carga submetidas nos discos piezoelétricos.

Palavras-chave: 1. Sustentabilidade. 2. Energia elétrica no pavimento. 3. Piezoeletricidade. 4. Energia solar.

ABSTRACT

Sustainability has become a concept widely studied and applied, being linked to sustainable development, becoming possible only with the joint consideration of the social, economic and environmental spheres. Based on this assumption, the road pavement emerges as a sustainable alternative for generating energy that does not depend on the natural system. It's seen as the meeting point of people and vehicles, obtaining electrical energy through the transformation of mechanical energy transmitted by the vehicle to the pavement, using piezoelectric cells or the conversion of solar energy through photovoltaic panels or heat exchanger systems. Therefore, this work was developed based on the instigation of pavement usefulness as a mechanism to contribute to the sustainable development of smart cities, in order to show the possibility of its use with the purpose of reducing the environmental impact related to energy. The methodology was carried out by means of an exploratory study and the realization of simulations, with the proposition of a prototype and simulation of application in a real section. It was possible to identify the main publications about pavement as an instrument of energy harvesting, also listing its advantages and disadvantages. In addition, it was possible to measure which geometric properties have a direct influence on the electrical potential, as well as suggest places of application from the analysis of frequency and load submitted to the piezoelectric discs.

Key-words: 1. Sustainability. 2. Electrical energy in the pavement. 3. Piezoelectricity. 4. Solar energy.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	– Estrutura de um pavimento flexível	18
Figura 2	– Tensões atuantes no pavimento	19
Figura 3	– Matriz energética do Brasil em 2017	23
Figura 4	– Matriz elétrica brasileira em 2017	23
Figura 5	– Instalação das placas do sistema <i>Solar Roadway</i>	25
Figura 6	– Trecho experimental do sistema <i>Solar Roadway</i>	25
Figura 7	– Vista do pavimento solar coletor	26
Figura 8	– Representação do pavimento solar coletor	26
Figura 9	– Esquema do protótipo 1 “painel solar”	27
Figura 10	– Esquema do protótipo 2 “pavimento solar”	27
Figura 11	– Representação do efeito piezoelétrico direto	29
Figura 12	– Representação do efeito piezoelétrico inverso	29
Figura 13	– Modelo do transdutor <i>Cymbal</i>	30
Figura 14	– Protótipo de rolamento montado com placas quadradas	31
Figura 15	– Seis células piezoelétricas de 2 mm em uma placa de rolamento	32
Figura 16	– Deformação na camada e sensor piezoelétrico associado	33
Figura 17	– Conceito de incorporação do transdutor PZT diretamente no pavimento	34
Figura 18	– Placa em fundação elástica sujeita a movimentação de cargas distribuídas	35
Figura 19	– Representação do Protótipo Retangular I	35
Figura 20	– Representação do Protótipo IV estruturado em camadas	36
Figura 21	– Protótipo testado com <i>Cymbal</i>	36
Figura 22	– Configurações dos modelos de PVDF testados	37
Figura 23	– Protótipo I para análise de carga e frequência	38
Figura 24	– Protótipo II para análise de velocidade	38

Figura 25 – Representação gráfica do protótipo instalado na praça de pedágio	39
Figura 26 – Local de instalação das caixas geradoras de energia na praça de pedágio	40
Figura 27 – Implementação em um trecho de ciclovia	40
Figura 28 – Etapas metodológicas	43
Figura 29 – Detalhamento de malha para a geometria circular 2	50
Figura 30 – Sonda pontual aplicada na geometria circular 2	50
Figura 31 – Detalhamento da malha para o protótipo com a geometria circular 2	51
Figura 32 – Vantagens e desvantagens da energia solar na área rodoviária	56
Figura 33 – Vantagens e desvantagens da energia mecânica no pavimento	56
Figura 34 – Deformação da geometria retangular 1	57
Figura 35 – Estresse gerado na geometria retangular 1 devido a carga aplicada	58
Figura 36 – Potencial elétrico gerado na geometria retangular 1	59
Figura 37 – Deformação da geometria retangular 2	60
Figura 38 – Estresse gerado na geometria retangular 2 devido a carga aplicada	61
Figura 39 – Potencial elétrico gerado na geometria retangular 2	62
Figura 40 – Deformação da geometria retangular 3	63
Figura 41 – Estresse gerado na geometria retangular 3 devido a carga aplicada	64
Figura 42 – Potencial elétrico gerado na geometria retangular 3	65
Figura 43 – Deformação da geometria retangular 4	66
Figura 44 – Estresse gerado na geometria retangular 4 devido a carga aplicada	67
Figura 45 – Potencial elétrico gerado na geometria retangular 4	68
Figura 46 – Deformação da geometria circular 1	69
Figura 47 – Estresse gerado na geometria circular 1 devido a carga aplicada	70
Figura 48 – Potencial elétrico gerado na geometria circular 1	71
Figura 49 – Deformação da geometria circular 2	72

Figura 50 – Estresse gerado na geometria circular 2 devido a carga aplicada	73
Figura 51 – Potencial elétrico gerado na geometria circular 2	74
Figura 52 – Estresse gerado na geometria circular 3 devido a carga aplicada	75
Figura 53 – Potencial elétrico gerado na geometria circular 3	76
Figura 54 – Deformação da geometria circular 3	77
Figura 55 – Arranjo das células de geometria retangular 1 e potencial elétrico para carga de 3 kN	80
Figura 56 – Arranjo das células de geometria retangular 4 e potencial elétrico para carga de 3 kN	80
Figura 57 – Arranjo das células de geometria circular 1 e potencial elétrico para carga de 3 kN	81
Figura 58 – Arranjo das células de geometria circular 2 e potencial elétrico para carga de 3 kN	81
Figura 59 – Representação do protótipo com células piezoelétricas circulares 2	94

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Cargas e frequências aplicadas na simulação	45
Tabela 2 – Geometrias das células piezoelétricas testadas	46
Tabela 3 – Parâmetros físicos e elétricos para a geometria retangular 1	47
Tabela 4 – Parâmetros físicos e elétricos para a geometria retangular 4	47
Tabela 5 – Parâmetros físicos e elétricos para a geometria circular 1	47
Tabela 6 – Parâmetros físicos e elétricos para a geometria circular 2	48
Tabela 7 – Principais características das tecnologias de geração de energia	53
Tabela 8 – Relação entre área e espessura	79
Tabela 9 – Produção de energia elétrica	95

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1	– Relação entre o potencial elétrico máximo e a carga aplicada da geometria retangular 1	60
Gráfico 2	– Relação entre o potencial elétrico máximo e a carga aplicada da geometria retangular 2	63
Gráfico 3	– Relação entre o potencial elétrico máximo e a carga aplicada da geometria retangular 3	66
Gráfico 4	– Relação entre o potencial elétrico máximo e a carga aplicada da geometria retangular 4	69
Gráfico 5	– Relação entre o potencial elétrico máximo e a carga aplicada da geometria circular 1	72
Gráfico 6	– Relação entre o potencial elétrico máximo e a carga aplicada da geometria circular 2	74
Gráfico 7	– Relação entre o potencial elétrico máximo e a carga aplicada da geometria circular 3	77
Gráfico 8	– Potenciais elétricos máximos com a aplicação das cargas	78
Gráfico 9	– Resposta de frequência da aplicação de 4 células de geometria retangular 1 para 1 kN	82
Gráfico 10	– Resposta de frequência da aplicação de 4 células de geometria retangular 1 para 2 kN	83
Gráfico 11	– Resposta de frequência da aplicação de 4 células de geometria retangular 1 para 3 kN	83
Gráfico 12	– Saída de energia elétrica em relação à carga e frequência para as células de geometria retangular 1	84
Gráfico 13	– Resposta de frequência da aplicação de 4 células de geometria retangular 4 para 1 kN	85
Gráfico 14	– Resposta de frequência da aplicação de 4 células de geometria retangular 4 para 2 kN	85

Gráfico 15 – Resposta de frequência da aplicação de 4 células de geometria retangular 4 para 3 kN	86
Gráfico 16 – Saída de energia elétrica em relação à carga e frequência para as células de geometria retangular 4	87
Gráfico 17 – Resposta de frequência da aplicação de 4 células de geometria circular 1 para 1 kN	87
Gráfico 18 – Resposta de frequência da aplicação de 4 células de geometria circular 1 para 2 kN	88
Gráfico 19 – Resposta de frequência da aplicação de 4 células de geometria circular 1 para 3 kN	88
Gráfico 20 – Saída de energia elétrica em relação à carga e frequência para as células de geometria circular 1	89
Gráfico 21 – Resposta de frequência da aplicação de 4 células de geometria circular 2 para 1 kN	89
Gráfico 22 – Resposta de frequência da aplicação de 4 células de geometria circular 2 para 2 kN	90
Gráfico 23 – Resposta de frequência da aplicação de 4 células de geometria circular 2 para 3 kN	90
Gráfico 24 – Saída de energia elétrica em relação à carga e frequência para as células de geometria circular 2	91
Gráfico 25 – Análise de sensibilidade da resistência externa para as células retangulares 1, com 3 kN	92
Gráfico 26 – Análise de sensibilidade da resistência externa para as células retangulares 4, com 3 kN	92
Gráfico 27 – Análise de sensibilidade da resistência externa para as células circulares 1, com 3 kN	93
Gráfico 28 – Análise de sensibilidade da resistência externa para as células circulares 2, com 3 kN	93

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANTT	Agência Nacional de Transportes Terrestres
BPT	<i>British Pendulum Tester</i>
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
FHWA	<i>Federal Highway Administration</i>
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
IPEG	<i>Innowattech Piezo Electric Generator</i>
LOCEM	Laboratório de Telecomunicações e Ciência e Engenharia de Materiais
LMP	Laboratório de Mecânica dos Pavimentos
PVDF	Polímero de Fluoreto de Polivinilideno
PZT	Titanato Zirconato de Chumbo
TIC	Tecnologias de Informação e Comunicação
UFC	Universidade Federal do Ceará

LISTA DE SÍMBOLOS

%	Porcentagem
°C	Celsius
cm	Centímetro
$E_{\text{máx}}$	Rendimento energético máximo
h	Hora
Hz	Hertz
J	Joules
K	Kelvin
km	Quilômetro
kN	Quilonewton
kW	Quilowatts
kWh	Quilowatts-hora
L	Litro
m	Metro
mA	Miliampère
mod	Módulo
mJ	Milijoules
mm	Milímetro
mW	Miliwatts
MWh	Megawatts-hora
N	Newton
Pb	Chumbo
s	Segundo
Ti	Titânio
V	Volts
veic	Veículos
W	Watts
Zr	Zircônio
μW	Microwatts

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	Problema de pesquisa	20
1.2	Justificativa	20
1.3	Questões motivadoras	20
1.4	Objetivos	21
<i>1.4.1</i>	<i>Objetivo geral</i>	21
<i>1.4.2</i>	<i>Objetivos específicos</i>	21
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
2.1	Considerações iniciais	22
2.2	Energia solar	22
2.3	Energia mecânica	28
2.4	Considerações finais	41
3	ETAPAS METODOLÓGICAS	42
3.1	Considerações iniciais	42
3.2	Métodos	42
<i>3.2.1</i>	<i>Etapa exploratória</i>	42
<i>3.2.2</i>	<i>Etapa de simulações</i>	43
<i>3.2.2.1</i>	<i>Análise estacionária</i>	44
<i>3.2.2.2</i>	<i>Análise dinâmica</i>	46
<i>3.2.3</i>	<i>O software COMSOL</i>	48
<i>3.2.3.1</i>	<i>Condições de contorno</i>	49
<i>3.2.3.2</i>	<i>Limitações das simulações</i>	52
3.3	Considerações finais	52
4	RESULTADOS	53
4.1	Análise exploratória	53
4.2	Simulações da célula piezoelétrica em software de análise multifísica	57
<i>4.2.1</i>	<i>Análise estacionária para geometria retangular</i>	57
<i>4.2.2</i>	<i>Análise estacionária para geometria circular</i>	69
<i>4.2.3</i>	<i>Comparação entre a análise estacionária para as geometrias retangular e circular</i>	78
<i>4.2.4</i>	<i>Análise dinâmica para as geometrias retangulares (1 e 4) e circulares (1 e 2) ..</i>	79

4.3	Levantamento prévio de oportunidades	94
4.4	Considerações finais	96
5	CONCLUSÕES, SUGESTÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	98
5.1	Principais contribuições do trabalho	98
5.2	Quanto à análise exploratória das informações	99
5.3	Quanto à análise estacionária para as diferentes geometrias testadas	99
5.4	Quanto à análise dinâmica para as diferentes geometrias testadas	99
5.5	Quanto ao levantamento prévio de oportunidades	100
5.6	Sugestões e recomendações para trabalhos futuros	100
	REFERÊNCIAS	101

1 INTRODUÇÃO

A sustentabilidade tem se tornado um conceito amplamente estudado e aplicado, sendo atrelada ao desenvolvimento sustentável e que de acordo com Elkington (1999), só é possível com a consideração conjunta das esferas social, econômica e ambiental. Vinculado a esse desenvolvimento sustentável, tem sido bastante difundida a necessidade de cidades inteligentes na esfera mundial, dado a ocorrência de desafios impostos com o crescimento da população mundial.

Para Dutta (2011), o conceito de cidades inteligentes é estruturado por meio de uma visão particular do desenvolvimento urbano moderno, reconhecendo a importância das Tecnologias de Informação e Comunicação (TIC) na condução da competitividade econômica, sustentabilidade ambiental e qualidade de vida em geral. Isso vai além de aspectos puramente tecnológicos, abrangendo a dinâmica social e ambiental.

Dentre os assuntos mais discutidos no plano de desenvolvimento sustentável, destaca-se o tema de energias e desperdício de recursos naturais com possibilidade de esgotamento de utilização desses recursos, como por exemplo, a água. A dependência de energia da sociedade atual torna essa temática estratégica para qualquer país. Além disso, a transversalidade do tema de energia faz com que esse apresente uma relação estreita com setores econômicos e sociais, evoluindo devido aos avanços da ciência e tecnologia (CEARÁ, 2018a).

Consoante com o Atlas Solarimétrico do Ceará (2010), o Estado do Ceará vive um processo de fortalecimento e diversificação de sua matriz energética com a inclusão de outras fontes renováveis, sendo a geração de energia a partir da radiação solar incidente um forte potencial. Todavia, ao considerar de forma fragmentada e com visão estritamente econômica a “geração de energia solar”, a “geração de energia eólica” e a “disponibilidade hídrica”, corre-se o sério risco de promover impactos ao sistema natural, bem como a perda de recursos de toda ordem, principalmente nas condições de incerteza trazidas pelas mudanças climáticas (CEARÁ, 2018b).

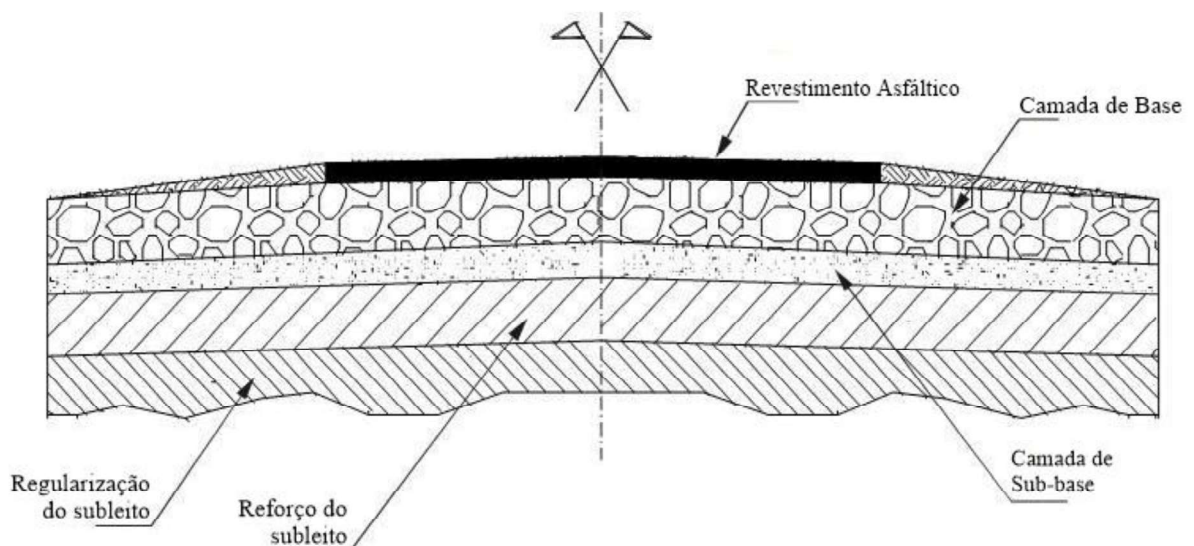
Existe um índice, medido desde 1970, que monitora até que ponto o planeta consegue repor os recursos naturais utilizados pela humanidade. Estudos realizados em 2019 mostraram que para manter o atual padrão de consumo seria necessário o equivalente a 1,75 planeta Terra, quase o dobro do que se dispõe (SOBRECARGA, 2019). Além disso, conforme estudos sobre o Cenário de Demandas para o Plano Nacional de Energias da Empresa de Pesquisa Energética (EPE) realizado em 2018, estima-se que o consumo de energia elétrica no Brasil triplicará até o ano de 2030, onde para atendê-lo com um sistema autossuficiente,

confiável e, principalmente, sustentável, se torna um desafio.

Quando se buscam alternativas sustentáveis de geração de energia, que não dependam do sistema natural, o pavimento passa a ser considerado. Ele é visto como o ponto de encontro de pessoas e veículos, um local ideal para a geração de energia renovável, possuindo como variável dependente apenas o movimento habitual sobre sua estrutura, permitindo a conversão dessa energia mecânica dissipada em energia elétrica, reduzindo as perdas pelo transporte.

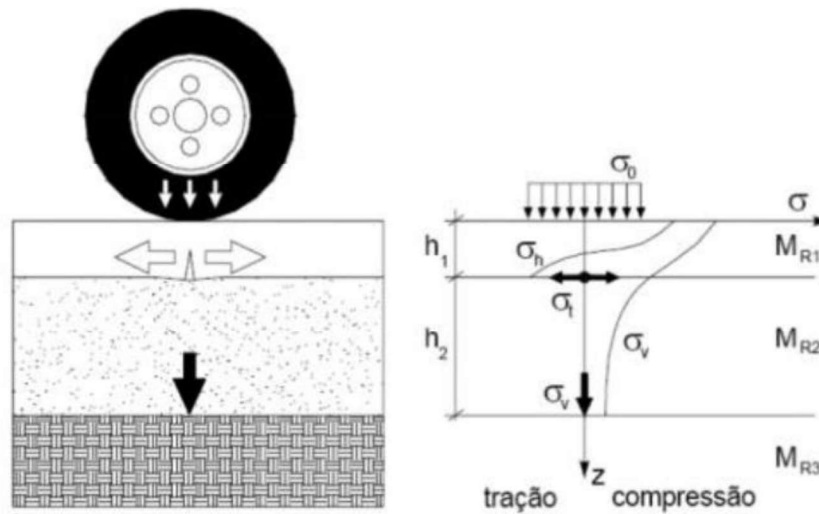
O pavimento pode ser rígido ou flexível, respectivamente quando composto por placas de concreto ou quando revestido com misturas asfálticas. A sua estrutura é formada por uma camada de revestimento, uma camada de base, uma camada de sub-base e, se necessário, uma camada de reforço do subleito. A Figura 1 representa a estrutura completa do pavimento flexível, sendo a camada de revestimento ideal para a instalação de painéis fotovoltaicos e o espaço entre as camadas de revestimento e base um local propício para as células piezoelétricas serem implementadas. É válido ressaltar que, ao se projetar um pavimento, deve-se determinar o estado de tensões e deformações aos quais a estrutura será submetida durante a vida de útil, de forma a dimensioná-lo para diminuir a possibilidade de ocorrência de defeitos. As tensões estão representadas na Figura 2.

Figura 1 – Estrutura de um pavimento flexível



Fonte: Adaptada de Tribunal Regional do Trabalho (2012).

Figura 2 – Tensões atuantes no pavimento



Fonte: Medina e Motta (2005)

Ainda considerando a estrutura do pavimento, a elevada temperatura do revestimento asfáltico também pode ser útil para sistemas sustentáveis de geração de energia, onde, a partir de sistemas com permutadores de calor, seriam possíveis o armazenamento e a conversão da energia solar atuantes em sua camada superior. Além da possibilidade de inserção de painéis fotovoltaicos na estrutura do pavimento para a captação e transformação da energia solar em energia elétrica.

Santos (2014) ressalta que o pavimento deixa de ser apenas funcional e estrutural para contribuir com o desenvolvimento sustentável por meio da produção e o armazenamento de energia elétrica. Essa energia pode vir a ser utilizada na própria infraestrutura rodoviária para sistemas de iluminação, gestão do tráfego e, ainda, na alimentação de redes elétricas de edifícios residenciais, comerciais e industriais que se situem próximo a via. Contudo, Roshani *et al.* (2018) evidenciam que o sistema de captação de energia não deve gerar impactos na integridade estrutural do pavimento e nem interromper o fluxo de veículos, visto a infraestrutura de transportes como uma área crítica para a economia do país.

Em decorrência do que foi apresentado, este trabalho tem como desafio motivador abordar o pavimento como um instrumento adequado e sustentável para o desenvolvimento de cidades inteligentes por meio da utilização do mesmo como fonte produtora de energia, reduzindo os impactos na estrutura do pavimento e maximizando a energia gerada.

1.1 Problema de pesquisa

A problemática de pesquisa se resume na crescente demanda por energia, relacionando-se diretamente com a urgente necessidade de alternativas sustentáveis de geração e a diminuição da interferência do tema no sistema natural.

1.2 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 geração de energia. Em contrapartida, nas cidades os veículos deslocam-se sobre pavimentos, liberando energia mecânica para os mesmos. Essa energia, normalmente, não é captada e nem utilizada, contudo, pode ser convertida em energia elétrica (DUARTE; FERREIRA, 2016).

Portanto, este trabalho foi desenvolvido com base na instigação das utilidades do pavimento como mecanismo de contribuição para o desenvolvimento sustentável de cidades inteligentes. O propósito é apresentar para a comunidade a possibilidade de sua utilização para reduzir o impacto ambiental relativo às energias, utilizando da sua elevada temperatura para compor um sistema de energia solar ou ainda a energia mecânica dissipada sobre sua estrutura, podendo ambas serem convertidas em energia elétrica.

1.3 Questões motivadoras

Este trabalho se dedica a responder algumas questões motivadoras relacionadas ao problema de pesquisa, a saber:

- a) como é possível empregar a energia solar na área rodoviária, de modo a não danificar o sistema?
- b) como é possível transformar a energia mecânica, advinda dos veículos na camada de rolamento do pavimento, em energia elétrica, de forma a maximizar a capacidade de fornecimento?
- c) qual a melhor alternativa para a geração de energia no pavimento e quais as suas vantagens e desvantagens em relação às demais?
- d) qual a forma mais viável de aplicar a alternativa mais eficiente em um trecho real?

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo geral

O objetivo geral desta pesquisa é investigar como o pavimento pode ser usado para o desenvolvimento sustentável de cidades inteligentes, abordando como esse pode ser útil na geração de energias limpas.

1.4.2 Objetivos específicos

- a) investigar acerca do emprego das energias solar e mecânica na área rodoviária;
- b) identificar as principais vantagens e desvantagens das energias solar e mecânica no pavimento;
- c) avaliar a capacidade de geração das energias solar e mecânica na área rodoviária;
- d) simular a geometria das células piezoelétricas, conforme aplicação de frequência e carga;
- e) simular a aplicação da melhor configuração da célula piezoelétrica no pavimento como gerador de energia em trecho real.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Considerações iniciais

Nesse capítulo foram abordadas duas formas de geração de energia que podem ser implementadas na estrutura do pavimento, a saber, a energia solar e a energia mecânica. Elas surgem como alternativas para a mitigação do problema relativo ao crescimento da demanda de energias, possuindo peculiaridades que podem tornar favorável sua aplicação na área rodoviária. Além disso, colaboram para um processo autossustentável, diminuindo os impactos no sistema natural.

Para Cravo (2014), gerar energia de forma sustentável é criar uma técnica de captura e exploração de energia não utilizada e inesgotável, com o intuito de torná-la reutilizável. Com a evolução de tecnologias inovadoras, qualquer tipo de energia pode ser explorado, desde a energia solar e eólica, do mesmo modo como a energia oriunda da pressão dos pneus dos veículos no pavimento, e a energia cinética atrelada aos mesmos. A captação de energia surge então como uma das mais propícias técnicas de abordagem para o problema de energia, reduzindo os impactos sobre os recursos naturais.

Conforme Cravo (2014) relata, os pavimentos rodoviários passam a contribuir diretamente para esse processo de captação de energia, podendo tanto utilizar a energia solar, bem como a energia proveniente da pressão dos pneus. Essas alternativas possibilitam que a energia venha a ser utilizada na própria manutenção da estrada, alimentando os semáforos e iluminação das vias, podendo ainda ser utilizada como fonte de energia para abastecer automóveis movidos a eletricidade ou uso doméstico, quando armazenada.

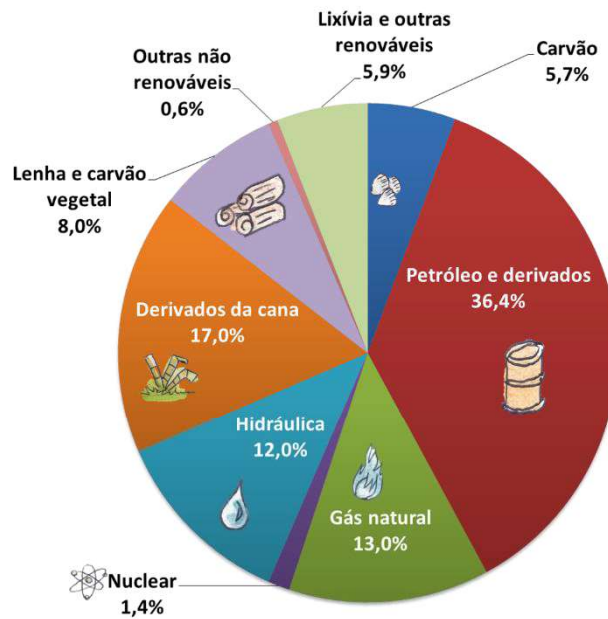
2.2 Energia solar

O aumento do consumo de energia no Brasil tem despertado no setor de energias uma preocupação com o tema, visto que esse aumento não está crescendo paralelamente ao fornecimento. De acordo com pesquisa realizada pela EPE (2018), a maior fatia da matriz energética do Brasil atualmente está com o petróleo e derivados, seguidos pelos derivados da cana, gás natural e hidráulica. A Figura 3 apresenta a porcentagem de contribuição de cada fonte na matriz energética nacional.

Ainda, com base nos dados da EPE (2018), a matriz elétrica do Brasil possui 65,2 % de sua energia elétrica proveniente de usinas hidrelétricas. Contudo, com os fatores climáticos

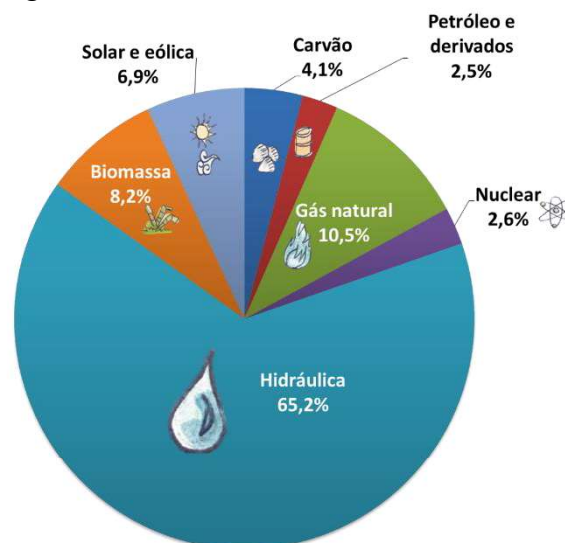
decorrentes do aquecimento global e do efeito estufa e as constantes secas que atrelam o país, principalmente o nordeste brasileiro, põem em risco o consumo de energia elétrica proveniente da água, visto a escassez a que esse recurso está submetido. A Figura 4 apresenta os percentuais de contribuição para a geração de energia elétrica no Brasil.

Figura 3 – Matriz energética do Brasil em 2017



Fonte: Empresa de Pesquisa Energética (2018)

Figura 4 – Matriz elétrica brasileira em 2017



Fonte: Empresa de Pesquisa Energética (2018)

Uma das soluções para esse problema é representada pelas usinas fotovoltaicas que, entre todas as fontes de energias renováveis, são as que apresentam o menor impacto ao ambiente e, além disso, a geração distribuída apresenta grandes vantagens econômicas. Pinho e Galdino (2014) relatam que no Brasil, as pesquisas relativas à energia fotovoltaica começaram em torno de 1950, buscando desenvolvimento de células de silício cristalino e, posteriormente, filmes finos. Contudo, somente a partir da década dos anos 90 a energia fotovoltaica começou a integrar a rede de abastecimento elétrico como parte da solução para o fornecimento de energia elétrica em localidades afastadas.

Com relação à localização, o Brasil situa-se quase que totalmente na região limitada pelos Trópicos de Câncer e Capricórnio, de incidência mais vertical dos raios solares, o que favorece elevados índices de incidência da radiação solar em quase todo o território brasileiro, inclusive no inverno, conferindo condições vantajosas para o aproveitamento energético da energia solar (TOLMASQUIM, 2016). A geração de energia solar conta com diversas vantagens frente a outras fontes, porém como uma das desvantagens aparece a problemática da necessidade de ocupação de grandes áreas que poderiam ser produtivas com potencial agrícola, por exemplo. Diante disso a instalação de painéis solares em áreas já desapropriadas pelo poder público e de uso comum, como taludes de rodovias, barragens, ferrovias e canais, é de grande vantagem para os estudos em energia solar.

Scott e Julie propuseram um sistema de geração de energia elétrica através de placas fotovoltaicas para substituir as primeiras camadas dos pavimentos rodoviários, possibilitando a geração de energia solar na área rodoviária. Esse sistema é intitulado *Solar Roadway*. Os pesquisadores firmaram um contrato com a *Federal Highway Administration* (FHWA) para construir o primeiro protótipo de painel solar aplicado em um pavimento rodoviário. O sistema é capaz de gerar até 302,50 MWh por ano, por milha de pista, a ser distribuído às residências e empresas do entorno ou usado para carregar veículos elétricos (SOLAR ROADWAY, 2019).

O sistema *Solar Roadway* é constituído por uma série de painéis solares estruturalmente dimensionados para suportar as cargas dos veículos. Essas placas entram como substitutas das camadas do pavimento rodoviário, sendo cada uma composta de três camadas: a superfície em contato direto com os veículos, uma camada eletrônica e uma camada de base. A primeira camada, translúcida e de alta resistência, passa a fornecer a aderência pneu-pavimento necessária para a segurança na rodovia. De acordo com a Administração de Informações sobre Energia dos EUA: em 2012, o consumo médio anual de eletricidade para um cliente de utilidade residencial dos EUA era de 10.837 kWh. Usando esse número, aproximadamente 30 casas por milha de pista podem ser retiradas da rede com uma *Solar*

Roadway. As Figuras 5 e 6 mostram o processo de instalação das placas em um trecho experimental (SOLAR ROADWAY, 2019).

Figuras 5 – Instalação das placas do sistema *Solar Roadway*



Fonte: Solar Roadway (2019).

Figura 6 – Trecho experimental do sistema *Solar Roadway*



Fonte: Solar Roadway (2019).

Guldentops *et al.* (2016), partindo do fato de que os materiais do pavimento tendem a absorver grandes quantidades de radiação solar, desenvolveram um sistema que colhe energia através do fluxo de água utilizando um permutador de calor embutido na estrutura do

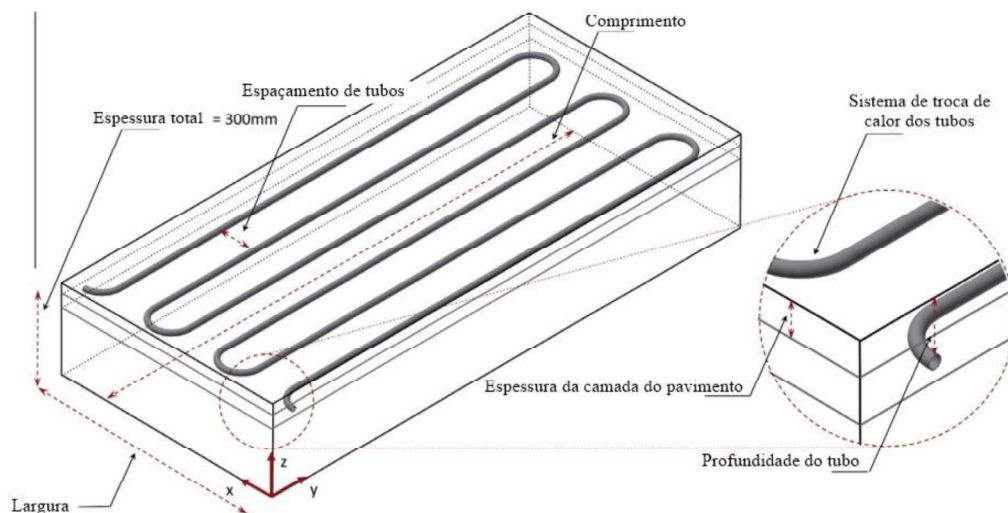
pavimento. O protótipo é representado nas Figuras 7 e 8. Como resultados, puderam observar que em um período de aproximadamente 110 horas, a uma temperatura de 45 °C, é capaz de gerar até 165 kWh, supondo um sistema ininterrupto.

Figura 7 – Vista do pavimento solar coletor



Fonte: Guldentops *et al.* (2016).

Figura 8 – Representação do pavimento solar coletor



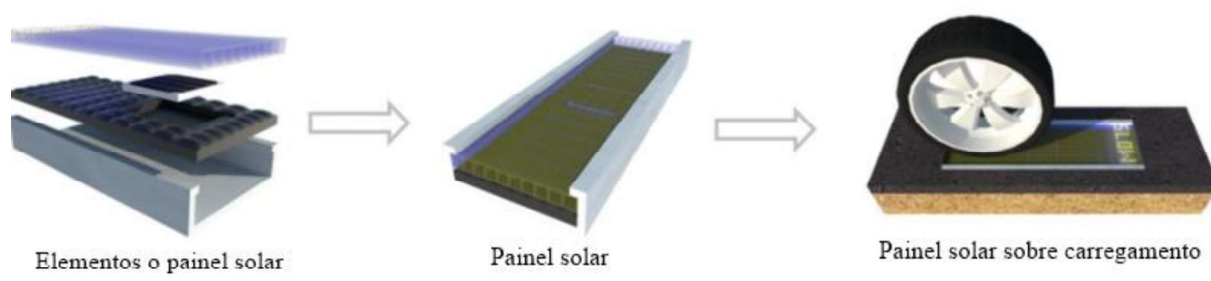
Fonte: Guldentops *et al.* (2016).

É válido ressaltar que a temperatura da superfície do pavimento asfáltico pode alcançar até 70 °C no verão, induzindo a um aumento na temperatura do ambiente, fenômeno conhecido como ilha de calor. Sendo assim, além da técnica apresentada por Guldentops, tem surgido outras de mitigação para que as consequências do fenômeno da temperatura sejam equilibradas, entrando o pavimento solar como uma dessas formas.

Efthymiou *et al.* (2016) testaram como o pavimento fotovoltaico poderia influenciar na redução desse fenômeno. Foram realizadas medidas de temperatura durante o inverno e o verão, e os resultados indicaram que as temperaturas mais baixas foram medidas no pavimento fotovoltaico quando comparadas com as medidas no pavimento convencional (solo, asfalto). O resultado do experimento provou que a incorporação do pavimento fotovoltaico pode alcançar uma redução da temperatura superficial de 5 °K, bem como uma diminuição na temperatura ambiente de quase 1 °K, podendo essa energia ser convertida em energia elétrica por meio dos painéis fotovoltaicos.

Dezfooli *et al.* (2017) avaliaram a viabilidade do uso de painéis solares em pavimentos rodoviários como produtores de energia sustentável para fornecer energia elétrica. Para tanto, desenvolveram dois protótipos construídos com células solares, sendo o primeiro embutido, em asfalto e acrílico, e o outro entre duas camadas de asfalto poroso. Nos ensaios, mediram as propriedades de atrito superficial e determinaram a propriedade dinâmica do pavimento solar, verificando ainda a questão da drenagem em ambos os protótipos. Os protótipos 1 e 2 podem ser conferidos nas Figuras 9 e 10.

Figura 9 – Esquema do protótipo 1 “painel solar”



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

Figura 10 – Esquema do protótipo 2 “pavimento solar”



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

Com relação aos resultados do trabalho de Dezfooli *et al.* (2017), foi medido o decréscimo de energia quando o pneu de um veículo passasse pelo pavimento por meio do *British Pendulum Tester* (BPT), chegando a valores de perda de energia iguais a 42 e 47,8 para os protótipos 1 e 2, representando as propriedades de atrito obtidas com o aparelho. De acordo com Aps (2006), esses valores caracterizam o atrito como insuficientemente rugoso e medianamente rugoso, respectivamente. Além disso, no teste de drenagem, as vazões volumétricas médias dos dois protótipos foram de 0,018 e 0,042 L/s, respectivamente. Esses autores constataram ainda que, em um dia ensolarado, o sistema fotovoltaico apresenta uma corrente máxima de aproximadamente 40 mA, contudo, na ausência de luz solar, a célula não tem eficiência.

2.3 Energia mecânica

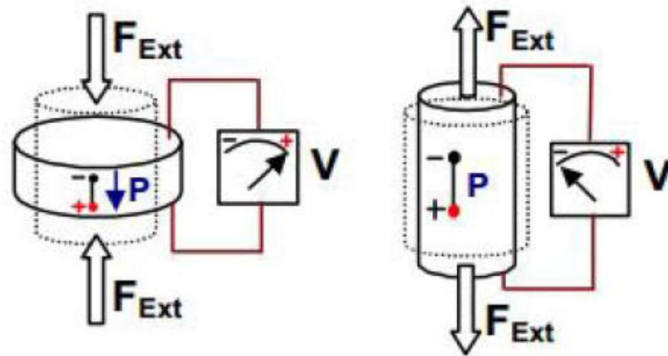
A energia mecânica pode contribuir como uma saída possível para a questão das energias renováveis e a preocupação com o esgotamento e desgaste do meio ambiente, oriunda da instalação de grandes usinas hidrelétricas. A excessiva quantidade de água necessária para o funcionamento de hidrelétricas, bem como a extensa área necessária para a implementação de parques eólicos e solares são fatores que contribuem para a utilização da energia mecânica, visto que os sistemas de transformação da mesma em energia elétrica podem ser implementados nas camadas do pavimento.

Perante a isso, nas cidades, principalmente nos grandes centros urbanos, o fluxo veicular é bastante intenso, sendo composto de veículos de pequeno e grande porte. Esses veículos, ao trafegarem sobre o pavimento, liberam energia mecânica, que geralmente não é captada e nem usada, podendo então ser convertida em energia elétrica por meio da piezoelectricidade.

A piezoelectricidade funciona por meio de sensores piezoelétricos que, ao sofrerem alterações dimensionais, devido às tensões mecânicas aplicadas, geram energia. Isso acontece, porque os cristais piezoelétricos são compostos de átomos eletricamente neutros em seu interior, sem arranjo simétrico e com cargas elétricas perfeitamente balanceadas, ou seja, uma carga positiva anula uma negativa em seu entorno, cancelando momentos de dipolos elétricos. Ao aplicar uma pressão mecânica nesses cristais, ocorre uma deformação de sua estrutura fazendo com que alguns átomos fiquem mais próximos e outros mais distantes, perturbando o balanço entre cargas positivas e negativas, criando uma diferença de potencial (ANTUNES; SOUSA; SCHERTEL, 2014).

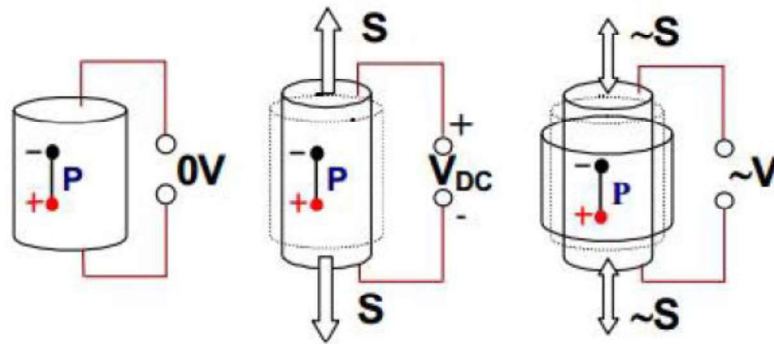
Os materiais com essa característica possuem dois efeitos piezoelétricos, onde ao serem submetidos a uma pressão ou tensão mecânica geram cargas elétricas em sua superfície, configurando o efeito direto e ao serem submetidos a um campo elétrico, apresentam deformação em sua forma geométrica, representando o efeito inverso. Nas Figuras 11 e 12 são representadas as duas formas (BEZERRA JÚNIOR, 2015).

Figura 11 – Representação do efeito piezoelétrico direto



Fonte: Carazo (2000 *apud* Bezerra Júnior, 2015).

Figura 12 – Representação do efeito piezoelétrico inverso



Fonte: Carazo (2000 *apud* Bezerra Júnior, 2015).

O efeito direto é implementado quando se aplica uma força externa (F) e devido ao efeito piezo gera-se uma tensão (V). Em seguida, há uma capacitância (C) que é realmente a forma que ocorre a tensão. A voltagem cresce linearmente com a aplicação de uma força externa (F). Contudo, a quantidade de energia elétrica não é linear. A equação 1 apresenta como é calculada a tensão (V) na célula piezoelétrica.

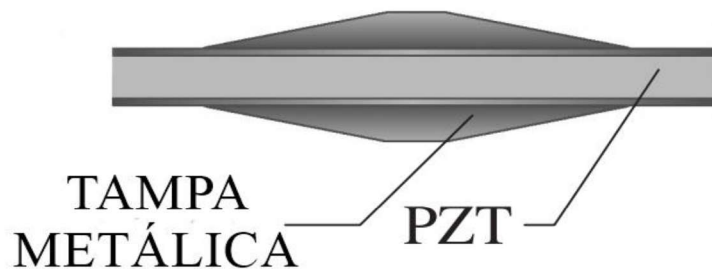
$$V = \frac{dFt}{\epsilon_r \epsilon_0 A} \quad (1)$$

onde d é a constante piezoelétrica, t é a espessura da célula, A é a área, ϵ_r é a constante de permissividade relativa e ϵ_0 é a constante de permissividade no vácuo. É válido ressaltar que d e ϵ_r dependem do material utilizado.

Os pavimentos rodoviários são capazes de suportar, ao longo de sua vida útil, uma ampla variedade de cargas, provocando fadiga, tensão, deformação e vibração nas suas camadas, devido à energia transferida da aplicação das cargas dos veículos ao longo de seu deslocamento, fator que contribui diretamente para a perturbação das cargas de sensores piezoelétricos (ZHAO *et al.*, 2010). Esses autores citam que o trabalho externo proveniente da atuação das cargas no pavimento, em alguns casos, chega a ser superior a 1 J, sendo dissipado no ambiente do pavimento como energia térmica residual, o que leva um risco mais elevado à deformação do pavimento, devido ao acúmulo de energia. Contudo, se transdutores piezoelétricos estivessem embutidos no pavimento, parte dessas energias poderiam ser colhidas e transformadas em energia elétrica.

Dentre os possíveis transdutores a serem utilizados, para converter energia mecânica em energia elétrica, encontra-se o *Cymbal*. Ele é um exemplo de transdutor piezoelétrico, cuja estrutura pode ser observada na Figura 13. O equipamento é composto de um disco de titanato zirconato de chumbo (PZT) e tampa metálica em ambos os lados. Gera-se um potencial elétrico na superfície do eletrodo devido os efeitos piezoelétricos do PZT quando a carga está sendo aplicada na extremidade da tampa de metal na direção vertical, fato sujeito também a polarização aplicada na direção da espessura (ZHAO *et al.*, 2010).

Figura 13 – Modelo do transdutor *Cymbal*



Fonte: Zhao *et al.* (2010).

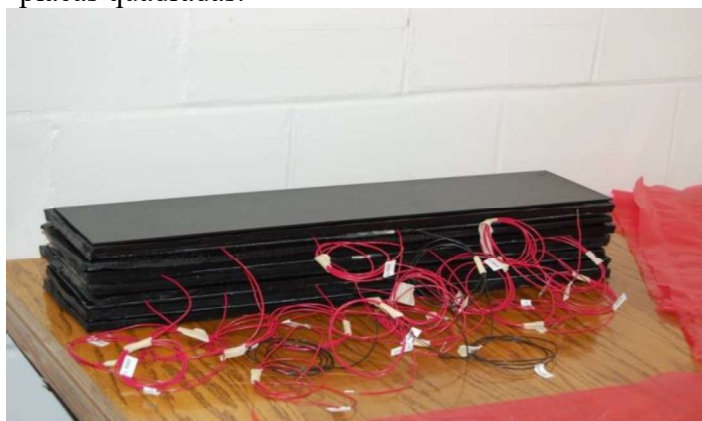
Zhao *et al.* (2010) chegaram ao modelo geométrico ideal do transdutor a ser inserido na parte inferior da camada de revestimento, de modo que o mesmo chegaria a gerar 97,33 V de potencial elétrico, com capacidade de saída máxima em cerca de 0,06 mJ e, ao assumir que

a frequência de carga de um veículo de grande porte é de 20 Hz, a energia elétrica máxima obtida a partir do pavimento chegaria a 1,2 mW. Também foi avaliada a questão do deslocamento da superfície do pavimento com a instalação do *Cymbal*, sendo encontrado um aumento de 0,07%, que é similar ao já existente no pavimento normal.

Baldwin *et al.* (2011) desenvolveram um protótipo para analisar os ciclos de carga em materiais piezoelétricos, no intuito de verificar sua capacidade de geração de energia. Na prática, eles conseguiram usar forças médias na faixa de 27 a 53 kN, amplitudes na faixa de 9 a 36 kN e frequências na faixa de 0,5 a 2,0 Hz, o que corresponde a uma faixa de velocidade de 3 a 13 km/h. Durante os testes, os pesquisadores descobriram que um perfil de ondas quadradas produzia uma resposta mais resistente das células piezoelétricas na camada de rolamento.

Para todos os testes realizados pelos pesquisadores Baldwin *et al.* (2011), a maior produção de energia observada em períodos de 5 minutos foi de $1,670 \times 10^{-4}$ W·s, o que equivale a $5,567 \times 10^{-7}$ W·h. Ao escalar essa produção para uma instalação completa de 36 placas piezoelétricas, seria esperado um rendimento energético máximo ($E_{\text{máx}}$) de aproximadamente $1,253 \times 10^{-6}$ W·h. Como essa produção máxima de energia estimada é baseada em ciclos contínuos, o que se opõe à natureza do tráfego de veículos, os autores concluíram a partir dos dados, que em sua forma atual o protótipo testado não gerará energia suficiente para operar uma carga elétrica adequada. As Figuras 14 e 15 representam o protótipo testado pelos pesquisadores.

Figura 14 – Protótipo de rolamento montado com placas quadradas.



Fonte: Baldwin *et al.* (2011).

Figura 15 – Células piezoelétricas de 2 mm em uma placa de rolamento



Fonte: Baldwin *et al.* (2011).

É abordada por Xiong *et al.* (2012) a utilização de dois modos de acoplamento para a utilização de transdutores piezoelétricos, intitulados modo 31 e modo 33 devido a sua constante piezoelétrica, o primeiro referente a aplicação do efeito horizontalmente e o segundo a aplicação verticalmente. O primeiro gera energia a partir do deslocamento transversal, onde o material é excitado pela deflexão vertical do pavimento, iniciando a vibração. No segundo, a potência do sistema aumenta linearmente com a deflexão do pavimento.

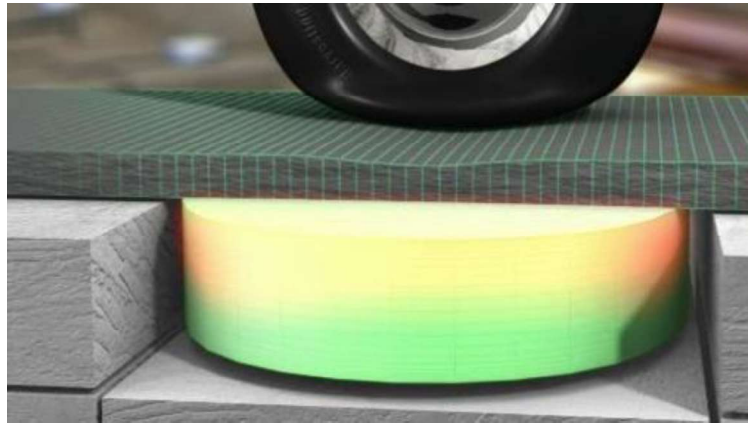
É afirmado por Xiong *et al.* (2012) que a densidade de energia é inferior apenas à captação de energia fotovoltaica. De acordo com a necessidade de energia investigada, ela é adequada para alimentar instalações de infraestrutura de transporte, como sensores, equipamentos eletrônicos de monitoramento de integridade de pequena e microescala. Os autores afirmam que a capacidade usual de geração de energia de sistemas transdutores é de cerca de $300 \mu\text{W}/\text{cm}^3$.

Os autores Cravo (2014), Santos (2014), Duarte e Ferreira (2016) e Papagiannakis *et al.* (2016) citam a experiência da empresa israelense *Innowattech*, que desenvolveu três sistemas piezoelétricos, materializados em protótipos, para converter a energia mecânica liberada pelos veículos no pavimento em energia elétrica. O sistema que apresentou os melhores resultados foi aplicado em ambiente real no ano de 2010.

O protótipo que resultou na aplicação em ambiente real foi patenteado por Abramovich *et al.* (2010a). Além disso, também foi patenteado por Abromovich *et al.* (2010b, 2012) os outros dois protótipos, contudo, nunca divulgaram os resultados científicos de ambos, impossibilitando o avanço no mercado. De acordo com Santos (2014), a tecnologia empregada pela empresa é designada por *Innowattech Piezo Electric Generator* (IPEG). Em decorrência

do movimento do veículo, a energia produzida na combustão é gasta, principalmente, para superar a resistência ao rolamento sobre o pavimento, sendo a outra usufruída quando ocorre uma pressão vertical no pavimento, originando uma deformação, sendo essa proporcional ao peso do veículo e à rigidez da camada, como pode ser verificado na Figura 16. Eles apresentam uma geração de energia por módulo, por veículo, de 5,76 J.

Figura 16 – Deformação na camada e sensor piezoelétrico associado

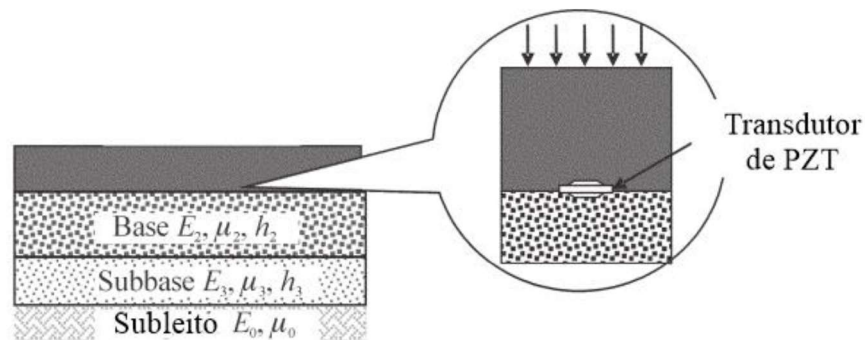


Fonte: Innowattech (2010 *apud* Santos, 2014).

Zhao *et al.* (2014) analisaram a influência da forma geométrica do elemento piezoelétrico de PZT, verificando qual delas geraria o melhor desempenho para uma unidade de captação de energia. Consoante à pesquisa anterior, utilizaram o material em pilhas com seções transversais circulares, quadradas e hexagonais, bem como elementos em forma de prato e de ponte. Os resultados da análise revelaram que as pilhas de seção transversal circular são preferíveis para maximizar a produção de energia.

Zhao *et al.* (2014) obtiveram um protótipo da estrutura do gerador de pavimento e baseado nas pilhas de PZT, e concluíram que se pode ampliar o carregamento aplicado no material para obter mais energia. Estima-se que mais de 50 kW de energia pode ser colhido a partir de um pavimento asfáltico. A Figura 17 apresenta onde essas células de PZT seriam aplicadas.

Figura 17 – Conceito de incorporação do transdutor PZT diretamente no pavimento



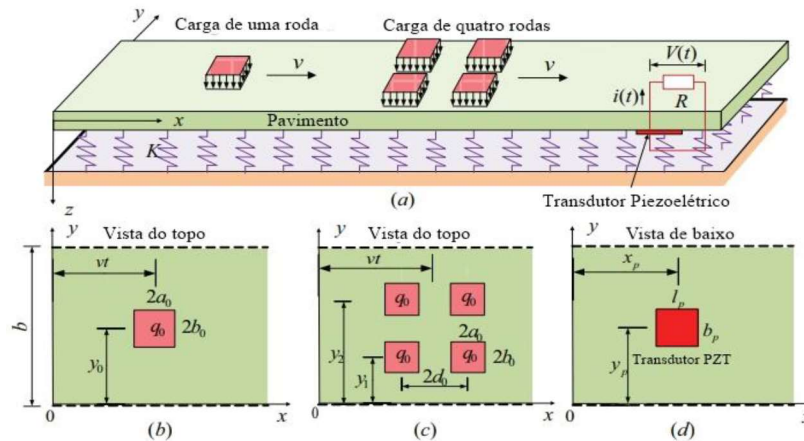
Fonte: Zhao *et al.* (2014).

Xiong (2014) desenvolveu um sistema de captação de energia composto por múltiplos elementos piezoelétricos cilíndricos, que são ativados por forças compressivas de cargas de tráfego. Esse autor verificou que a potência média de saída do captador de energia por veículo é de cerca de 3,1 mW. Com um volume de tráfego de 3300 veículos por dia esse sistema geraria cerca de 0.36 kWh por ano.

Kim, Shen e Ahad (2015) testaram duas unidades de captação de energia piezoelétrica comercialmente disponíveis sob a ação da carga de roda simulada usando um simulador de tráfego. Foram aplicados três níveis de carga a cada coleta de energia (222 N, 445 N e 890 N), que resultou em tensões variando de 5 a 20 V. Esse experimento foi realizado sob a hipótese de 600 veículos por hora a 72 km/h, resultando em uma energia de 2,67 mWh.

Zhang, Xiang e Shi (2015) estudaram a captação de energia piezoelétrica a partir da deformação em pavimentos causada por veículos em movimento descrevendo o comportamento do pavimento por uma placa apoiada em uma fundação de Winkler. Dois tipos de movimentação de cargas distribuídas foram considerados, sendo a carga em uma única roda e a carga nas quatro rodas. Chegaram então em duas soluções explícitas para a resposta dinâmica do pavimento. As saídas de tensão e potência de um transdutor piezocerâmico embutidos no pavimento foram obtidos pelo efeito piezoelétrico direto. A Figura 18 mostra a placa, a situação de apenas uma roda com carga, a de carga nas quatro rodas e a posição do transdutor. Os resultados mostraram que, comparados com um modelo de viga estudada, o modelo de placa é mais adequado para prever a energia captada de pavimentos sobre o subleito. Com a realização de uma simulação, a potência gerada chegou a 0,6 W.

Figura 18 – Placa em fundação elástica sujeita a movimentação de cargas distribuídas

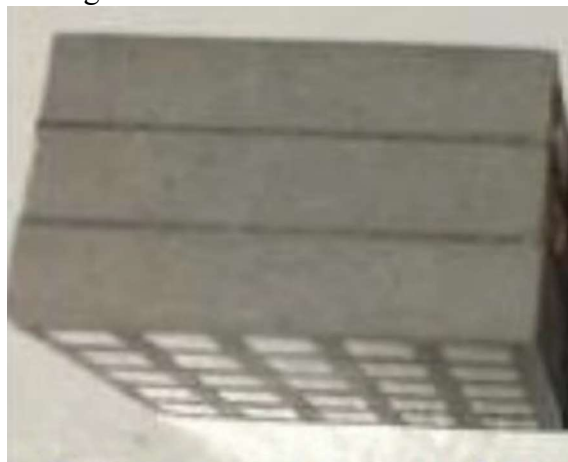


Fonte: Zhang, Xiang e Shi (2015).

(a) placa na fundação Winkler, (b) caso de carga A: carga em roda única, (c) caso de carga B: carga nas quatro rodas, e (d) posição do transdutor PZT.

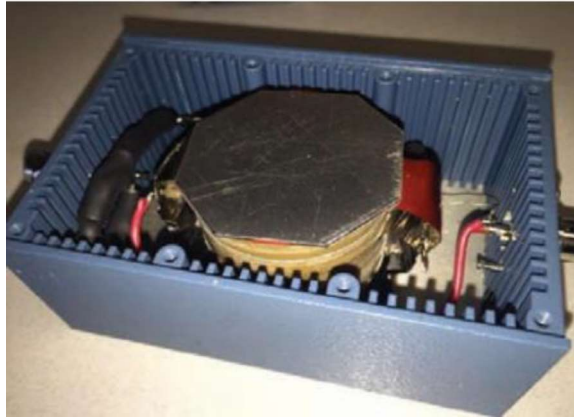
Papagiannakis *et al.* (2016) iniciaram o desenvolvimento de um sistema de coleta de energia baseado em elementos piezoelétricos embutidos na estrutura do pavimento. Foram testados dois protótipos em laboratório, intitulados Protótipo I e Protótipo IV, sendo que o primeiro protótipo gerou até 3,5 mW e o outro até 2 mW. As Figuras 19 e 20 representam os dois protótipos em sua fase de teste, respectivamente.

Figura 19 – Representação do Protótipo I Retangular



Fonte: Papagiannakis *et al.* (2016)

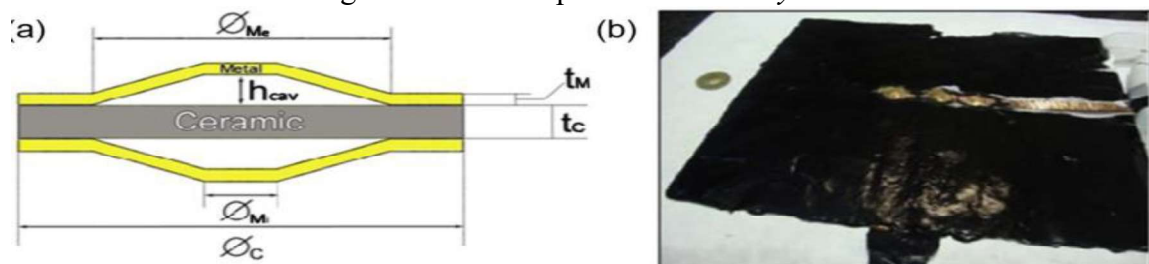
Figura 20 – Representação do Protótipo IV estruturado em camadas



Fonte: Papagiannakis *et al.* (2016)

Moure *et al.* (2016) testaram algumas cerâmicas piezoelétricas e com os resultados decidiram empregar o *Cymbal* integrado em segmentos de asfalto, permitindo avaliar a energia elétrica obtida. Cada elemento piezocerâmico recupera até $16 \mu\text{W}$ com a passagem de uma roda de veículo pesado. Esses autores simularam a utilização dos elementos em estradas com alta densidade de veículos, onde é identificado que densidades de energia na faixa de 40-50 MWh/m^2 podem ser obtidas em 100 m de estrada com a utilização de 30.000 elementos piezoelétricos, o que poderia representar mais de 65 MWh em um ano, o que para um consumo residencial anual médio de 12.861 kWh representaria o abastecimento de aproximadamente 5 residências. A Figura 21 apresenta o protótipo desenvolvido.

Figura 21 – Protótipo testado com *Cymbal*



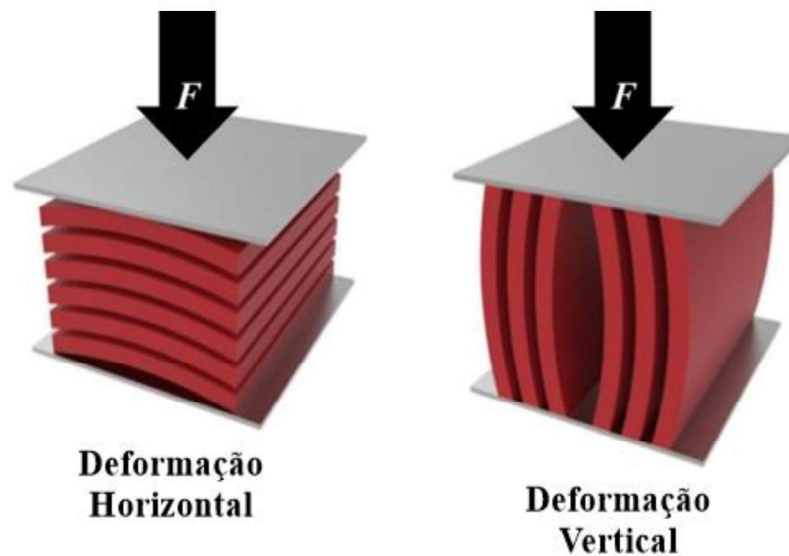
Fonte: Moure *et al.* (2016).

(a) Representação esquemática de um composto cerâmico-metal do *Cymbal*. (b) *Cymbals* embutidos em uma camada de 3 cm de espessura feita de asfalto e sílica.

A partir da crescente demanda de estudos mais avançados de materiais piezoelétricos, foi elaborado por Jung *et al.* (2017) um modelo de captação de energia piezoelétrica baseado em polímero de fluoreto de polivinilideno (PVDF) para aplicações

rodoviárias. Para otimizar estruturalmente o modelo, foram realizadas análises de elementos finitos para duas configurações, uma com o PVDF em posição horizontal e outra em posição vertical, que podem ser visualizadas na Figura 22. O módulo foi testado com um sistema de carga móvel modelo (MMLS3) e exibiu até 200 mW de potência. Foi observado que a configuração de deformação vertical apresentava resultados mais elevados de saída de potência, chegando a ser 4 vezes maior que a configuração horizontal.

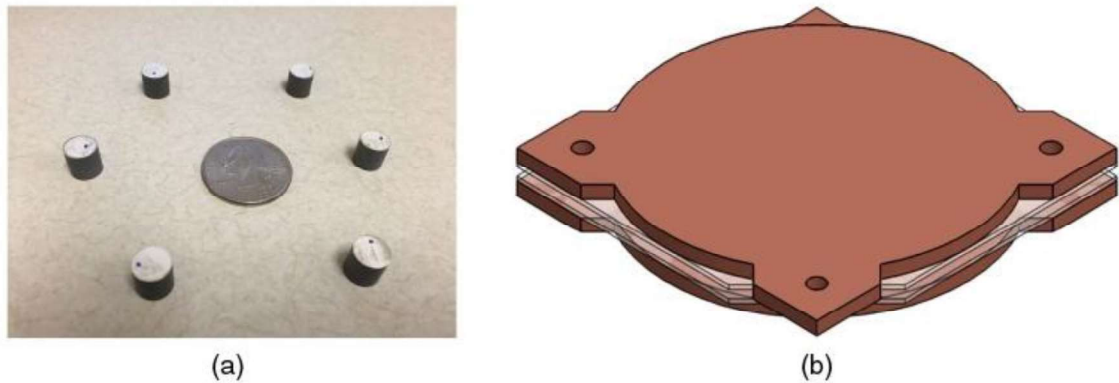
Figura 22 – Configurações dos modelos de PVDF testados



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

Roshani *et al.* (2018) desenvolveram dois protótipos com materiais piezoelétricos para analisar as variáveis influenciadoras na geração de energia por meio deles. O Protótipo I, presente na Figura 23, foi testado com a combinação de algumas condições, como a aplicação de cargas axiais de compressão do tipo senoidal (*haversine*) com valores de pico variando de 1 kN a 3 kN, a quantidade de elementos piezoelétricos com 4, 8 ou 16 elementos, três frequências de carregamento (5 Hz, 10 Hz e 20 Hz), correspondendo praticamente às velocidades dos veículos de 32 km/h, 65 km/h e 129 km/h, assumindo um comprimento de influência da carga de 1.8 m e as temperaturas de 4 °C, 22 °C e 40 °C.

Figura 23 – Protótipo I para análise de carga e frequência

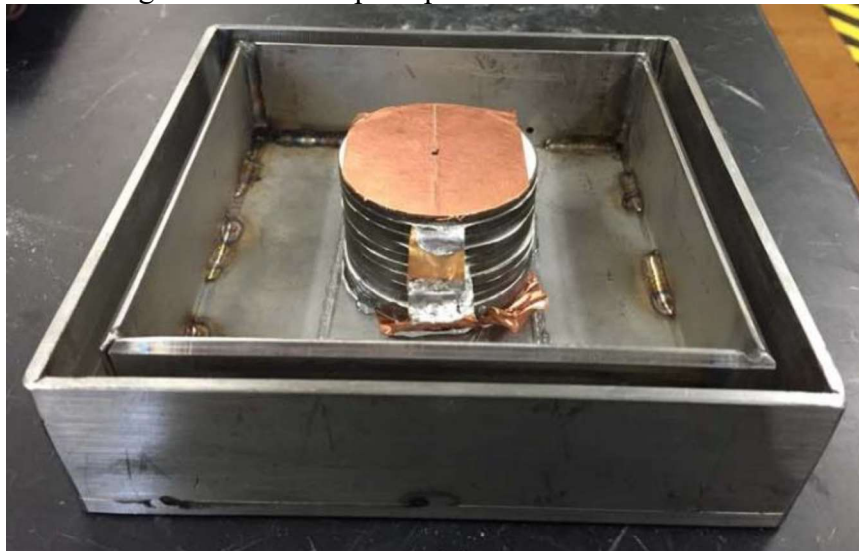


Fonte: Roshani *et al.* (2018).

(a) Células piezoelétricas. (b) Protótipo I montado.

O Protótipo II, desenvolvido por Roshani *et al.* (2018), tinha o objetivo de avaliar o efeito da roda móvel na geração de energia elétrica em relação à velocidade do tráfego. Além disso, também foram avaliadas as mesmas características do protótipo anterior, com a diferença na temperatura, sendo utilizada apenas a de 22 °C e na quantidade de células piezoelétricas (foram usadas 11) em configuração empilhada. O Protótipo II pode ser observado na Figura 24.

Figura 24 – Protótipo II para análise de velocidade



Fonte: Roshani *et al.* (2018).

Os Protótipos I e II chegaram a gerar uma potência de 1.487 mW e 64,12 mW, respectivamente, quando houve caminhões trafegando a 65 km/h. Quanto aos carros de passeio,

a potência gerada se reduz a 33 mW e 1,36 mW para os Protótipos I e II, respectivamente (ROSHANI *et al.*, 2018).

Como resultados, Roshani *et al.* (2018) concluíram que, em uma condição de carga igual, um sistema coletor de energia com um número reduzido de elementos piezelétricos produzirá uma maior potência. O aumento do número de elementos piezelétricos reduz a tensão aplicada e, conseqüentemente, reduz a potência gerada por cada elemento individual. Também foi possível constatar que a potência de saída exibe uma correlação positiva com a frequência de carga e velocidade do veículo. Além disso, a potência de saída foi consistente sob carga repetitiva, indicando um baixo risco de deterioração prematura.

A Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT, 2018), por meio de pesquisas realizadas em parceria com a concessionária Triunfo Concepa, propuseram a implantação de um sistema piloto que utilizasse transdutores piezoelétricos para o abastecimento de sinalização viária em uma praça de pedágio em Gravataí, município do Rio Grande do Sul. Esse sistema é composto por tachas com lâmpadas *LEDs* formando um efeito estroboscópico. Foi utilizado um transdutor do tipo PZT-5H que apresentava uma melhor performance comparada a cerâmica PZT-5A, comumente utilizada. Para armazenar a energia gerada foram utilizados capacitores de alto valor de armazenamento. A Figura 25 apresenta uma representação gráfica do protótipo instalado. Em seguida, a Figura 26 mostra o local de instalação dessas caixas.

Figura 25 – Representação gráfica do protótipo instalado na praça de pedágio

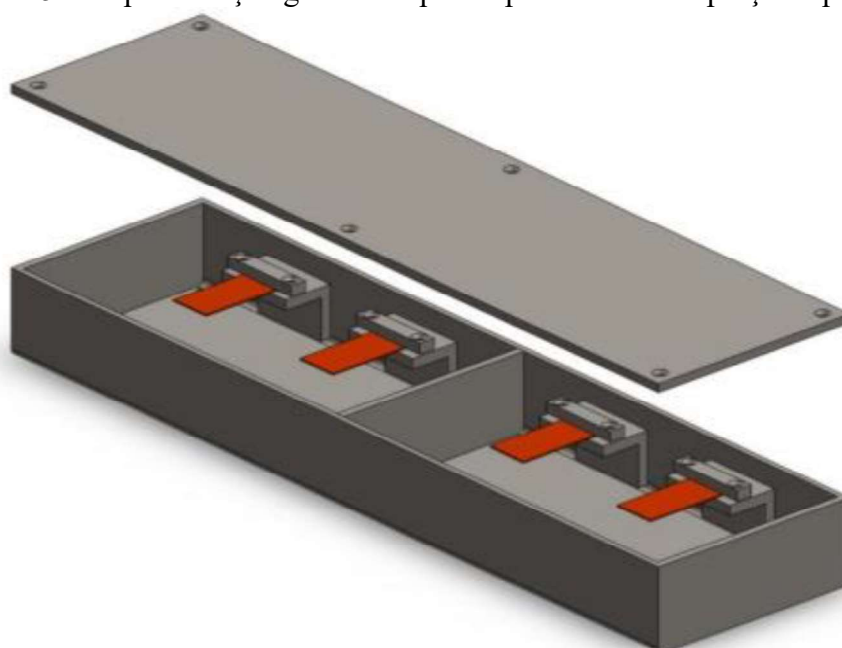
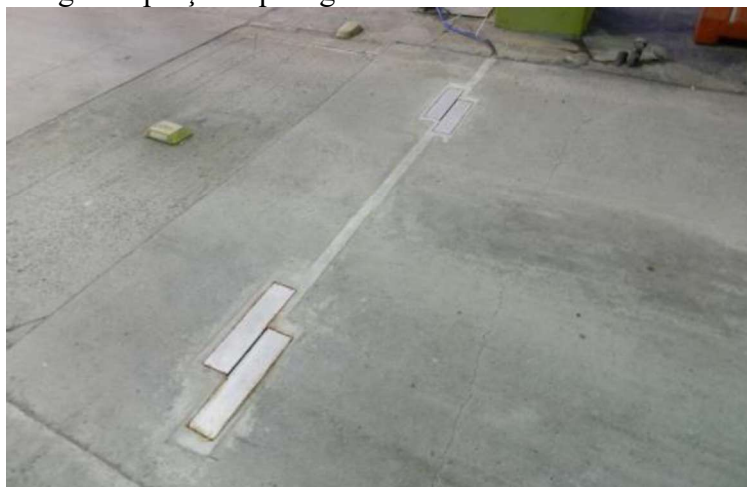


Figura 26 – Local de instalação das caixas geradoras de energia na praça de pedágio

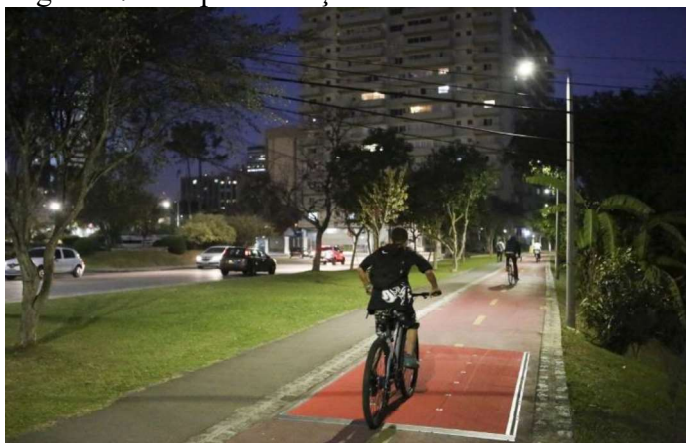


Fonte: ANTT (2018)

O sistema aplicado proveniente da pesquisa realizada pela ANTT (2018) foi de pequena escala, utilizando apenas 16 transdutores no total. Com o aumento da quantidade desses sensores seria permitido um aumento da energia gerada. A questão da geração de energia encontra um empecilho no preço do material, fazendo com que a priori, a alternativa não seja economicamente viável. A potência máxima gerada foi de $36.1 \mu\text{W}$.

Um projeto entre a prefeitura de Curitiba e uma empresa japonesa, iniciaram os testes relativos a implementação de um piso gerador de energia elétrica em um trecho de ciclovia no Centro Cívico da cidade. A tecnologia utiliza sistemas piezoelétricos e tem como objetivo iluminar a ciclovia, a partir do tráfego de bicicletas, propiciando um aumento da segurança para os ciclistas. A Figura 27 mostra o trecho de implementação desse sistema (CURITIBA, 2018).

Figura 27 – Implementação em um trecho de ciclovia



Fonte: Cesar Brustolin/Curitiba (2018).

2.4 Considerações finais

Percebe-se que a maioria das pesquisas apresentadas está em fase de validação em laboratório ou com testes realizados em trechos de pequena área. Inclui-se ainda a observação de que no Brasil não há estudos suficientes de aplicações em pavimentos para embasar uma aplicação direta em trecho experimental. Dessa forma, com base em todo o material exposto nesse capítulo, abrem-se oportunidades de análises dos dados apresentados. Torna-se possível a utilização do seu conteúdo para a formulação das etapas metodológicas no capítulo que se segue.

3 ETAPAS METODOLÓGICAS

3.1 Considerações iniciais

Nessa seção serão apresentados os tipos de estudo e métodos aplicados na pesquisa, bem como o cronograma de atividades de forma a atingir os objetivos previamente definidos. O trabalho foi desenvolvido com um estudo exploratório por meio de uma revisão bibliográfica dos temas aqui trabalhados presentes em livros, teses, dissertações e artigos, visando oferecer informações acerca do objeto em estudo e orientar a formulação de hipóteses sobre o sistema mais viável para a utilidade do pavimento exposta.

Em seguida, foi conduzido um estudo com a realização de simulações acerca do material em um *software* de análise multifísica. Nessa análise foram incluídos valores de carga para simular o peso dos veículos e valores de frequência para simular a velocidade de tráfego, permitindo assim verificar o potencial de geração de energia do material.

3.2 Métodos

A etapa metodológica foi dividida entre a exploratória e a de simulações.

3.2.1 Etapa exploratória

Gil (2008) desenvolve uma proposta de metodologia para o estudo exploratório, tendo sido adaptada de forma a serem realizadas pesquisas nas bases de dados da CAPES, da Scielo e do Google Acadêmico, com os operadores *booleanos and* e *or*. Foram usadas as palavras “sustentabilidade”, “pavimento”, “energia”, “solar” e “piezoelectricidade”. As pesquisas possibilitaram o acesso dos temas em livros, dissertações, vários artigos científicos, tanto nacionais como internacionais e patentes de pesquisas relatadas nos artigos pesquisados. Também foram consultados arquivos do plano Ceará 2050 do Governo do Estado do Ceará

Para a seleção das fontes foram consideradas, como critério de inclusão, as bibliografias que abordassem a transformação das energias solar e mecânica em energia elétrica. Além disso, foi definido um período de busca de 10 anos, devido ao fato de períodos anteriores possuírem dados defasados, abrangendo os anos de 2009 a 2019. Após esse procedimento, partiu-se para a coleta de dados, seguindo a seguinte premissa:

- a) leitura exploratória de todo o material selecionado (leitura rápida que objetiva verificar se a obra consultada é de interesse para o trabalho);
- b) leitura seletiva (leitura mais aprofundada das partes que realmente interessam);
- c) registro das informações extraídas das fontes em instrumento específico (autores, ano, método, resultados e conclusões).

O passo seguinte foi a análise e interpretação dos resultados provenientes da pesquisa exploratória, sendo realizada uma leitura analítica com a finalidade de ordenar e resumir as informações contidas nas fontes, de forma que essas possibilitassem a obtenção de hipóteses de respostas ao problema da pesquisa. Efetuou-se a discussão dos resultados a partir das categorias que emergiram da etapa anterior, sendo analisadas e discutidas com base no referencial teórico da temática de estudo, abordando eficiência, disponibilidade e instalação. Essa fase final da pesquisa exploratória emerge na pesquisa experimental, permitindo a execução do sistema mais viável.

Por fim, foi realizado um levantamento de oportunidades para a aplicação em trecho real. As etapas metodológicas adotadas são apresentadas conforme o fluxograma da Figura 28.

Figura 28 – Etapas metodológicas



Fonte: O autor (2019).

3.2.2 Etapa de simulações

Nessa etapa foram realizadas análises multifísicas na célula piezoelétrica utilizando o *software* comercial COMSOL *Multiphysics*, que analisa elementos finitos, com licença disponível no Laboratório de Telecomunicações e Ciência e Engenharia de Materiais (LOCEM) da Universidade Federal do Ceará (UFC).

Os métodos utilizados para a realização de simulação em sistemas piezoelétricos foram os de autofrequência e de análise estacionária. A análise de autofrequência é aquela utilizada para encontrar os modos de frequência do feixe *cantilever* e sua forma correspondente de deformação. A partir dessa análise foi obtida a frequência de excitação, atuando como frequência de ressonância, que forneceu o máximo potencial elétrico.

A justificativa quanto ao teste de frequência se fundamenta devido ao potencial elétrico diminuir sensivelmente quando o coletor de energia não estiver em sua frequência de ressonância. Esse captador produzirá sua máxima tensão quando estiver operando em sua frequência ressonante, portanto, ela deve ser calculada para obter o potencial máximo de saída. Contudo, tal frequência dificilmente será obtida em tráfego de rodovias, devido aos limites de velocidade. Logo, é necessário verificar qual o potencial elétrico obtido por valores distintos de velocidade encontrados em campo, para possibilitar a estimativa de potencial total gerado.

3.2.2.1 *Análise estacionária*

No tocante à análise estacionária, esta foi realizada para deslocamentos estacionários ou para uma condição de estado estacionário. Todas as cargas e restrições são constantes. A estrutura do *cantilever* é composta de células piezoelétricas de PZT-5H imprensadas entre as camadas de cobre que servem como eletrodo superior e inferior, respectivamente. A dimensão da estrutura é 100 mm de largura por 100 mm de comprimento e 6 mm de espessura para cada camada de cobre.

Na realização dessas simulações foram testadas inicialmente as geometrias para a célula piezoelétrica a ser aplicada no pavimento, definindo a partir do potencial elétrico máximo gerado, nas comercialmente disponíveis, a melhor geometria. Neste trabalho, as cargas utilizadas serviram para estabelecer uma relação entre a com a quantidade de energia elétrica gerada. Apesar dos seus valores baixos, essas foram utilizadas para futuramente serem replicadas em experimentos laboratoriais. As frequências foram adotadas para simular as velocidades dos veículos, no que tange a análise dinâmica. Os valores adotados estão expostos na Tabela 1.

Tabela 1 – Cargas e frequências aplicadas na simulação

Cargas aplicadas (kN)	Frequências aplicadas (Hz)	Equivalência de velocidade para 10 Hz (km/h)
1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0	1 a 50	65

Fonte: O autor (2019).

As relações obtidas entre a carga e a quantidade de energia elétrica gerada permitiram a substituição das cargas reais atuantes no pavimento rodoviário. Essas cargas são definidas por Roshani *et al.* (2018) como 6,7 kN para uma roda de veículo normal e 44,5 kN para uma roda de veículo pesado.

De acordo com a Roshani *et al.* (2018), a frequência de 10 Hz é a mais frequente na estrutura do pavimento. Essa frequência representa uma velocidade de aproximadamente 65 km/h quando considerado um comprimento de influência da carga aplicada igual a 1,8 m. Tais valores são aplicados na Equação 2.

$$V = \lambda f \quad (2)$$

onde V é a velocidade, em m/s, λ é o comprimento de influência da carga em m e f é a frequência em Hz. Quando V é multiplicado por 3,6, obtém-se o valor da velocidade correspondente em km/h.

Quanto às células piezoelétricas testadas, as suas dimensões são justificadas da seguinte forma:

- a) a geometria retangular 1 foi abstraída de um produto já disponível no mercado. As demais geometrias retangulares foram definidas com variações de 100 % na área e na espessura, para mais ou para menos;
- b) a geometria circular 1 foi definida com base numa conversão da retangular 1, para meios de comparação do formato. As demais geometrias circulares foram definidas com base na variação de 100 % nos valores de área e espessura, a partir da circular 2, disponível em mercado.

Ressalta-se que as células piezoelétricas podem vir a serem fabricadas com dimensões pré-estabelecidas. O material testado foi o PZT-5H, devido a sua maior eficiência quando comparado ao PZT-5A, mais comumente utilizado.

É válido considerar que com base no teorema da transferência de potência máxima, a resistência externa (R_L) no circuito deve ser igual à resistência interna (R_S) do protótipo para

obter a potência máxima, definida como correspondência de impedância. A resistência interna do protótipo é calculada pela Equação 3.

$$R_s = \frac{1}{2\pi c f} \quad (3)$$

onde c é a capacitância interna do protótipo e f é a carga de pulsos por segundo (frequência). A capacitância interna do protótipo depende do número de discos piezoelétricos. A resistência teórica calculada é aproximada. A Tabela 2 apresenta os valores de suas geometrias simuladas.

Tabela 2 – Geometrias das células piezoelétricas testadas

Geometria	Dimensões			
	Largura (mm)	Comprimento (mm)	Raio (mm)	Espessura (mm)
Retangular 1	3,0	1,5	-	0,4
Retangular 2	4,0	2,25	-	0,4
Retangular 3	3,0	1,5	-	0,8
Retangular 4	4,0	2,25	-	0,8
Circular 1	-	-	1,2	0,4
Circular 2	-	-	4,28	6,2
Circular 3	-	-	6,05	3,1

Fonte: O autor (2019).

3.2.2.2 Análise dinâmica

Para a análise dinâmica foram consideradas apenas quatro geometrias (retangulares 1 e 4; circulares 1 e 2), com o intuito de verificar se as mesmas propriedades da fase estacionária são válidas quanto à sua geometria. Elas também foram escolhidas em razão de comparação entre a saída elétrica no tangente à mudança de forma e de composição de elementos.

A análise dinâmica é realizada de forma a simular a atuação do veículo em movimento, devido as frequências de carga emitidas com a velocidade e o seu peso distribuído linearmente. Nessa análise é considerada que a carga se distribui por toda a área da chapa de cobre. Foi simulada a influência de 4 células piezoelétricas na composição do *cantilever*. Após as análises, foi proposto um protótipo de geração de energia piezoelétrica aplicado diretamente no pavimento.

Dessa forma, as Tabelas 3 a 6 apresentam os valores para a resistência interna aplicada na simulação do *software*, conforme as geometrias testadas. Na possível realização de um experimento físico, a resistência externa deve ser igual a determinada teoricamente.

Tabela 3 – Parâmetros físicos e elétricos para a geometria retangular 1

Quantidade de células	1	4	8
Espessura [m]	0,0004	0,0004	0,0004
d33 [C/N]	5,93E-10	5,93E-10	5,93E-10
Área [m ²]	0,0000045	0,000018	0,000036
Er [F]	3400	3400	3400
E0 [F]	8,85E-12	8,85E-12	8,85E-12
Capacitância [F]	3,38513E-10	1,35405E-09	2,7081E-09
Frequência [Hz]	10	10	10
Resistência [MΩ]	47,01597226	11,75399306	5,876996532

Fonte: O autor (2019).

Tabela 4 – Parâmetros físicos e elétricos para a geometria retangular 4

Quantidade de células	1	4	8
Espessura [m]	0,0008	0,0008	0,0008
d33 [C/N]	5,93E-10	5,93E-10	5,93E-10
Área [m ²]	0,000009	0,000036	0,000072
Er [F]	3400	3400	3400
E0 [F]	8,85E-12	8,85E-12	8,85E-12
Capacitância [F]	3,38513E-10	1,35405E-09	2,7081E-09
Frequência [Hz]	10	10	10
Resistência [MΩ]	47,01597226	11,75399306	5,876996532

Fonte: O autor (2019).

Tabela 5 – Parâmetros físicos e elétricos para a geometria circular 1

Quantidade de células	1	4	8
Espessura [m]	0,0004	0,0004	0,0004
d33 [C/N]	5,93E-10	5,93E-10	5,93E-10
Área [m ²]	4,50002E-06	1,8E-05	3,6E-05
Er [F]	3400	3400	3400
E0 [F]	8,85E-12	8,85E-12	8,85E-12
Capacitância [F]	3,38514E-10	1,354E-09	2,708E-09
Frequência [Hz]	10	10	10
Resistência [MΩ]	47,01572408	11,753931	5,8769655

Fonte: O autor (2019).

Tabela 6 – Parâmetros físicos e elétricos para a geometria circular 2

Quantidade de células	1	4	8
Espessura [m]	0,0062	0,0062	0,0062
d33 [C/N]	5,93E-10	5,93E-10	5,93E-10
Área [m²]	5,755E-05	0,0002302	0,0004604
Er [F]	3400	3400	3400
E0 [F]	8,85E-12	8,85E-12	8,85E-12
Capacitância [F]	2,793E-10	1,117E-09	2,234E-09
Frequência [Hz]	10	10	10
Resistência [MΩ]	56,983907	14,245977	7,1229884

Fonte: O autor (2019).

3.2.3 O software COMSOL

O COMSOL *Multiphysics* é um ambiente interativo para modelamento e simulação de problemas científicos e de engenharia. Ele engloba todas as etapas do fluxo de trabalho de modelagem – desde a definição de geometrias, propriedades de materiais e físicas que descrevem fenômenos específicos até solução e pós-processamento de modelos para produzir 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 e engenharia química.

Os modelos multifísicos precisos desenvolvidos no *software* consideram uma ampla gama de possíveis condições de operação e efeitos físicos. Dessa forma, torna-se possível o uso de modelos para entender, projetar e otimizar processos e dispositivos para condições reais de operação, como o caso da aplicação de células piezoelétricas no pavimento rodoviário. As geometrias, por exemplo, são definidas por sequências de operações, onde cada uma delas é capaz de receber parâmetros de entrada para facilitar edições e estudos paramétricos em modelos multifísicos. A conexão entre a definição da geometria e as configurações físicas definidas é totalmente associativa, ou seja, qualquer alteração na geometria propaga automaticamente as alterações relacionadas em todas as configurações do modelo associado.

O *software* sugere 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 métodos de discretização predominantes são baseados em elementos finitos. Dessa forma, o algoritmo de criação de malha cria uma malha com os tipos de elemento 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.

3.2.3.1 Condições de contorno

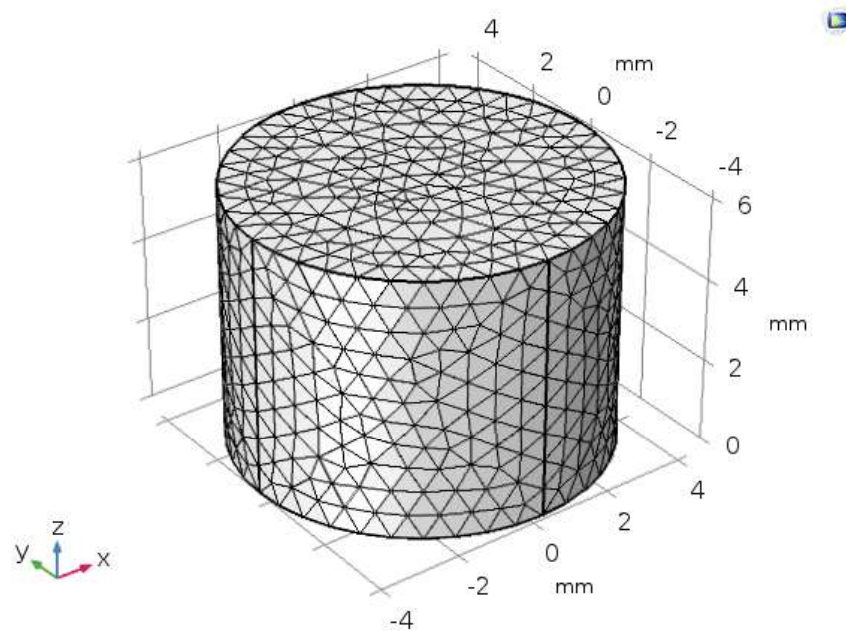
Na análise desenvolvida neste trabalho foi utilizado o assistente de modelo (*Model Wizard*), a dimensão espacial em 3D, as interfaces físicas com dispositivos piezoelétricos (*Piezoelectric Devices*) e com circuito elétrico (*Electrical Circuit*). Os tipos de estudo foram o estacionário (*Stationary*) para a análise estacionária e o domínio da frequência (*Frequency Domain*) para a análise dinâmica. As placas de cobre são consideradas materiais com comportamento linear elástico, enquanto as células são consideradas apenas materiais piezoelétricos.

Para a análise estacionária, inicia-se o procedimento com a definição da geometria da célula e o seu desenho, com todas as unidades em mm. Adiciona-se o material em toda a estrutura, no caso o PZT-5H. Após isso, é fixada uma face da célula, sendo escolhida a inferior, para que seja simulado a fixação da célula com a camada do pavimento. A face superior é selecionada para a aplicação das forças, por meio da função *Boundary Load*. Toda a face é selecionada e a força se aplicada igualmente em todos os pontos da malha, como um carregamento distribuído.

No tangente ao módulo eletrostático, define-se a face de baixo como fio terra e a face superior como a face limitante para o potencial flutuante. Isso permite que seja simulado dois eletrodos medindo a diferença de potencial entre o terra e o eletrodo da face superior. A malha utilizada foi a triangular fina, controlada pelo próprio *software*. É definida uma sonda pontual para a análise do potencial elétrico e uma sonda de contorno na face superior para análise do potencial elétrico. Na Figura 29 é mostrado o detalhamento dessa malha para a célula de geometria circular 2 e na Figura 30 onde é aplicada a sonda pontual. Foi constatado que o

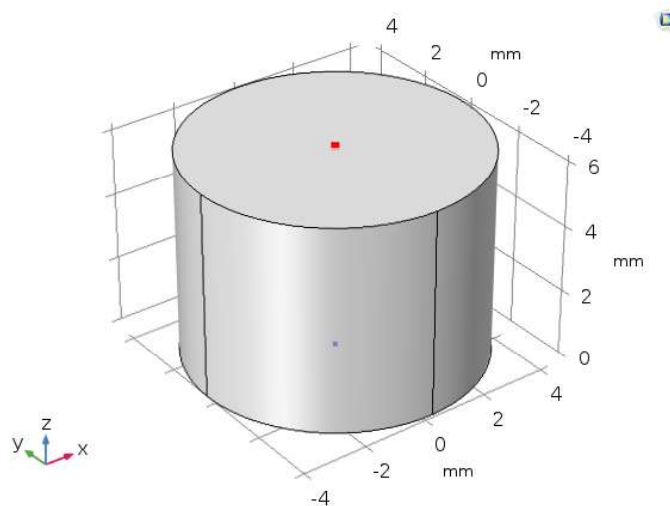
potencial não varia com a mudança de localização da sonda. Ambas as situações foram replicadas para as demais geometrias simuladas.

Figura 29 – Detalhamento de malha para a geometria circular 2



Fonte: O autor (2019).

Figura 30 – Sonda pontual aplicada na geometria circular 2



Fonte: O autor (2019).

Para a análise dinâmica – assim intitulada devido aplicação de frequência simulando o veículo em movimento – é definido um parâmetro inicial para cada uma das células simuladas: a resistência interna da célula, exposta nas Tabelas 3 a 6 no item anterior deste

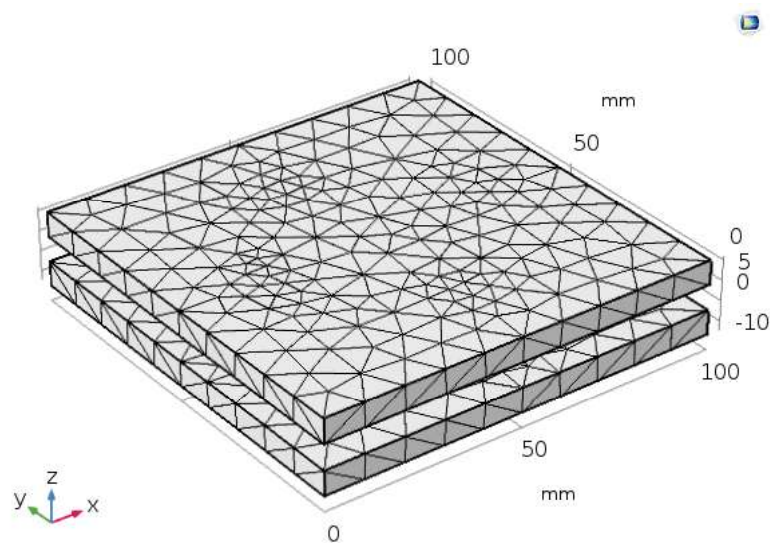
trabalho. Após essa atribuição, são desenhadas as quatro células entre as duas placas de cobre, adicionando-se o material de cobre e o PZT-5H. Na aba de geometria, é demarcada a união das placas com as células, mantendo limites internos. Para todos os materiais é considerado um fator de íon isotrópico igual a 0,001. Semelhante à análise estacionária, é selecionada a face superior da placa de cobre para aplicação da força distribuída e é fixada a parte inferior da placa de cobre que fica em contato com a camada de base do pavimento. O mesmo procedimento de fio terra e potencial flutuante são adotados nessa análise. Por fim, para o incremento da resposta elétrica é adicionado um resistor, que funciona com a resistência adotada como parâmetro inicial. A malha foi definida como triangular, de tamanho normal, controlada pelo *software*. Para ser fornecida a voltagem e a resposta elétrica de acordo com a variação da frequência, foram adotadas as seguintes equações na plotagem dos gráficos, ambas em função do circuito adotado com o resistor e fornecidas pelo tutorial do COMSOL para *Energy Harvesting*. Todo o sistema é submetido à integração de ordem 4, realizada pelo próprio *software*. Na Figura 31 é exposta a configuração da malha para o protótipo com utilização da geometria circular 2.

$$0.5*\text{realdot}(\text{cir.R1_i},\text{cir.R1_v}) \quad (4)$$

$$\text{abs}(\text{cir.R1_v}) \quad (5)$$

onde *cir* representa o circuito gerado, *i* a corrente, *R1* é o resistor, *v* é a voltagem, *abs* é o valor absoluto e a *realdot* é o operador para retornar apenas um resultado.

Figura 31 – Detalhamento da malha para o protótipo com a geometria circular 2



Fonte: O autor (2019).

3.2.3.2 Limitações das simulações

Para as simulações serem realizadas são necessárias imposições de condições de contorno para as estruturas piezoelétricas – tanto na análise estacionária quanto na dinâmica – e para as estruturas de cobre. Também são necessárias algumas considerações para aplicação da carga e das condições eletrostáticas. Todas elas são descritas no item anterior.

Contudo, em razão do processador do notebook que continha o *software* utilizado para as análises não ser potente o suficiente para rodar elevadas geometrias e elevadas cargas, a análise acaba se restringindo a apenas 7 geometrias. Além disso, a adoção de fio terra apenas na parte inferior da célula e o potencial flutuante na face superior da célula pode limitar a análise bem como a fixação de uma face. É válido ressaltar que a aplicação das cargas foi realizada diretamente na placa de cobre ou na célula piezoelétrica, o que não ocorreria em campo, devido a essas estruturas precisarem ser implementadas a uma determinada espessura abaixo do revestimento. Então, dessa forma o corpo de asfalto que protegeria a célula piezoelétrica não foi considerado na simulação, o que também pode ocasionar mudanças nos resultados quando realizados em laboratório ou em campo.

3.3 Considerações finais

As etapas metodológicas possibilitaram o desenvolvimento deste trabalho, de forma clara e objetiva, corroborando para o cumprimento dos objetivos propostos no Capítulo 1. Diante do exposto nesse capítulo, levando em consideração as limitações apresentadas, permite-se o seguimento do trabalho para a execução dos estudos e simulações propostos.

4 RESULTADOS

4.1 Análise exploratória

A análise exploratória possui um caráter técnico e avaliativo das tecnologias de geração de energia abordadas no presente trabalho, sendo utilizadas variáveis como a energia captada, a densidade de potência, a eficiência de conversão e como funciona a geração de energia da tecnologia em condições ambientes de operação.

É necessário também classificar as tecnologias abordadas quanto ao método de instalação, permitindo assim uma possível identificação de custo final da solução, condições de condução, procedimentos de instalação e manutenção. Seguindo a análise das duas tecnologias apresentadas neste trabalho, as principais características de cada uma são apresentadas na Tabela 7.

Tabela 7 – Principais características das tecnologias de geração de energia (continua)

Tecnologia	Empresa ou instituição de pesquisa	Eficiência ou energia dissipada	Quantidade de energia gerada	Método de instalação	Observações
Energia solar	Solar Roadway	Sem informação	302,50 MWh por ano	Substituindo a camada de revestimento	Utilizando equipamentos fotovoltaicos
	Instituto Politécnico de Worcester	Sem informação	165 kWh em um período ininterrupto de 110 horas	Embutido na estrutura do pavimento	Utilizando um permutador de calor através do fluxo de água
	Universidade de Atenas	Redução de 5 K na temperatura do pavimento	Sem informação	Na estrutura do pavimento	—
	Universidade Islâmica Azad	Perda de 42 e 47.8 BPT pelo atrito	40 mA	Embutido na camada de revestimento	Utilizando sistema fotovoltaico
Energia mecânica	Universidade de Tongji	1J dissipado no pavimento	1,20 mW	Parte inferior da camada de revestimento do pavimento	Transdutor piezoelétrico (PZT)
	Universidade de Oklahoma	Sem informação	$5,567 \times 10^{-7}$ W.h	Na estrutura do pavimento	Placas piezoelétricas

Tabela 7 – Principais características das tecnologias de geração de energia (conclusão)

Tecnologia	Empresa ou instituição de pesquisa	Eficiência ou energia dissipada	Quantidade de energia gerada	Método de instalação	Observações
Energia mecânica	Instituto Politécnico da Virgínia	Sem informação	300 $\mu\text{W}/\text{cm}^3$	Sem informação	—
	Innowattech	Sem informação	5,76 J/veic.mod	Na camada superior, coberta por revestimento asfáltico	Aplicado em trecho experimental
	Universidade de Tongji	Sem informação	50 kW	Entre a camada de revestimento e a de base	Evolução da pesquisa com PZT
	Instituto Politécnico da Virgínia	Sem informação	3,2 mW/veic	Na estrutura do pavimento	Com elementos piezoelétricos cilíndricos
	Universidade do Sul da Geórgia	Sem informação	2,67 mWh com um tráfego de 600 veic/h a 72 km/h	Na estrutura do pavimento	Células piezoelétricas comercialmente disponíveis
	Universidade de Pequim	Sem informação	0,6 W	Entre o revestimento e a camada de base	Mostrar o efeito do módulo de Winkler
	Universidade do Texas	Sem informação	3,5 mW	Embutidos na estrutura do pavimento	Utilizando PZT
	Instituto de Cerâmica e Vidro	Recupera até 16 μW por roda de veículo pesado	65 MWh por ano para um fluxo veicular de 6.565 veic/h	No revestimento	Utilização do <i>Cymbal</i>
	Instituto Coreano de Ciência e Tecnologia	Sem informação	200 mW ou 8,9 W/m ² , de acordo com a configuração do protótipo	Instalado de forma vertical na estrutura do pavimento	Utilizando PVDF
	Universidade do Texas	Sem informação	1.487 mW por um veículo pesado trafegando a 65 km/h	Embutidos na estrutura do pavimento	Evolução da pesquisa de Papagiannakis

Fonte: O autor (2019).

Para essa análise, todas as pesquisas abordadas foram consideradas, mesmo que a grande maioria esteja ainda em fase de validação em laboratório. Na Tabela 7, pode-se observar que a maioria dos estudos não possui todos os parâmetros necessários para realizar uma avaliação técnica completa, dificultando uma comparação mais detalhada e direta de todas as tecnologias e as pesquisas desenvolvidas que as utilizam.

A maioria dos estudos apresenta apenas a capacidade de geração de energia e onde os dispositivos serão instalados. Poucos pesquisadores ou empresas expõem os dados de eficiência de conversão ou de energia captada.

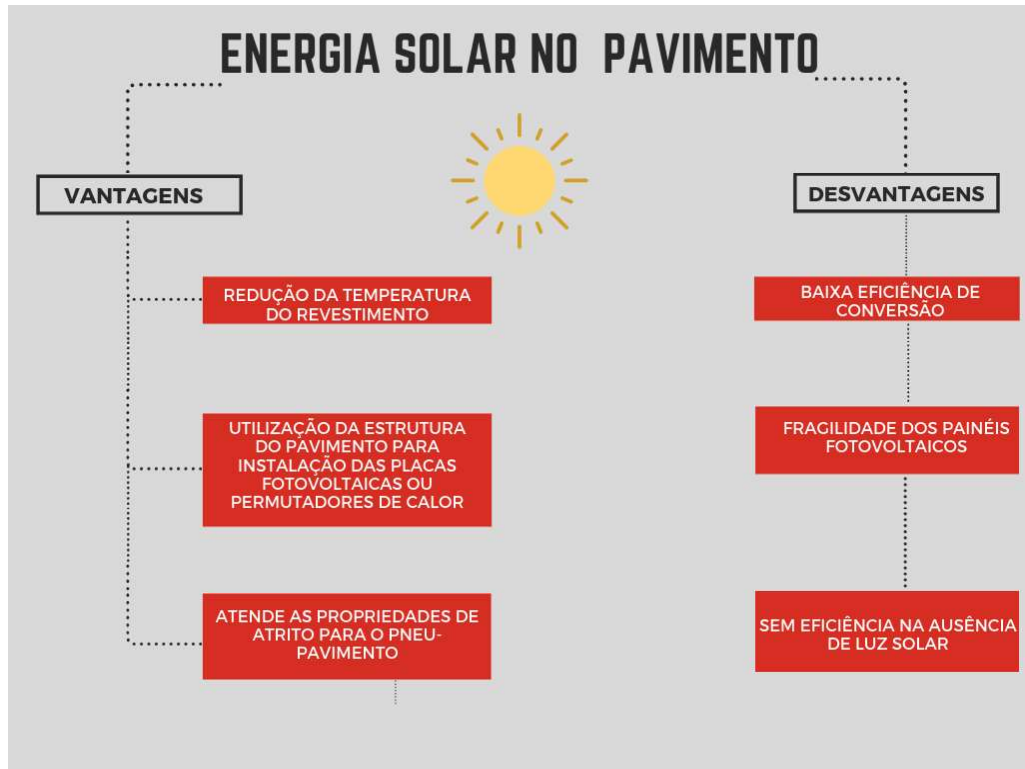
Ainda é possível observar que os dados referentes às potências geradas são para velocidades específicas, como o caso da pesquisa desenvolvida pela Universidade do Texas, bem como para pesos de veículos específicos. Outra variável bastante importante é a do fluxo veicular, onde para a o Instituto de Cerâmica e Vidro são necessários 6.565 veic/h para gerar o máximo potencial estimado. Algumas pesquisas impossibilitam ainda a reprodução e simulação de quanta energia seria gerada se aplicada em um trecho real, apresentando apenas a quantidade de energia gerada no protótipo testado.

Dessa forma, por meio dos dados apresentados, pode-se dizer que o sistema que utiliza a energia mecânica por meio de células piezoelétricas tem uma quantidade mais elevada de resultados, apesar da geração relativamente baixa de potência do material quando comparada a aplicação da energia solar no pavimento, tanto pelo uso de permutadores de calor quanto pelo uso de painéis fotovoltaicos.

Quanto à instalação dos equipamentos, a maioria é embutida no pavimento, contudo, não há dados de a que profundidade são instaladas, entre a camada de revestimento e a camada de base. Dessa forma, a influência da carga nos sistemas de captação de energia não maximiza a energia gerada, fato que ocorre apenas quando o sistema é implementado diretamente na superfície do pavimento.

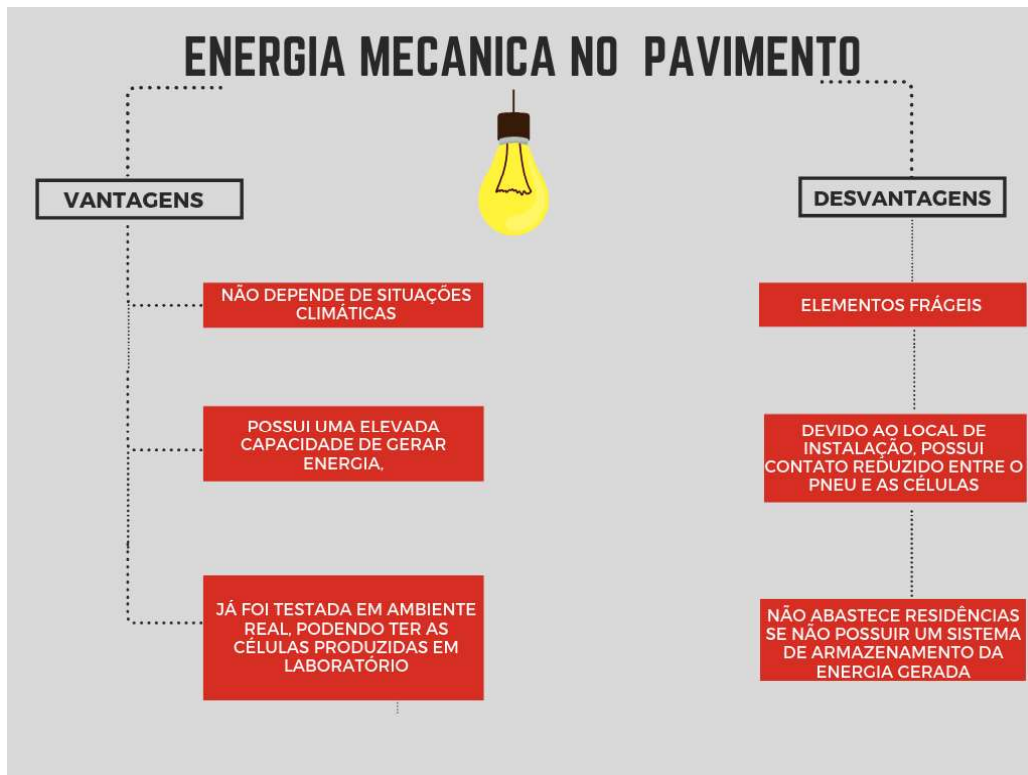
Para possibilitar qual a alternativa correta é necessária uma análise econômica acerca dos sistemas abordados. Em tal análise, o fator mais importante é o custo da eletricidade, que determina o custo por *watt* produzido, relacionando a alternativa de geração de energia com o custo de energia produzido. Contudo, nenhuma das tecnologias tratadas neste trabalho encontra-se totalmente desenvolvida e aplicada, além de disponível no mercado. Com base nos dados apresentados na Tabela 7 e na revisão bibliográfica, foi possível identificar algumas vantagens e desvantagens dos instrumentos de geração de energia, ambas apresentadas nas Figuras 32 e 33.

Figura 32 – Vantagens e desvantagens da energia solar na área rodoviária



Fonte: O autor (2019).

Figura 33 – Vantagens e desvantagens da energia mecânica no pavimento



Fonte: O autor (2019).

Posto isso, percebe-se que ambas as alternativas de geração de energia possuem pontos positivos e negativos a seu favor. Contudo, por razões de dados mais consistentes e satisfatórios, além de não depender de fatores climáticos, a energia mecânica como meio de geração de energia elétrica foi a escolhida para ser abordada na análise experimental. Para corroborar essa escolha, no item a seguir são realizadas algumas simulações com o material estudado, utilizando um *software* de análise multifísica.

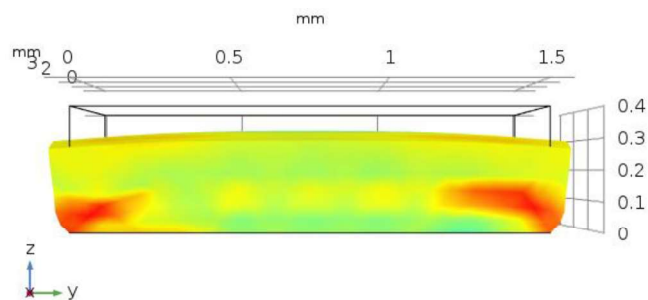
4.2 Simulações da célula piezoelétrica em software de análise multifísica

4.2.1 Análise estacionária para a geometria retangular

São apresentados e discutidos nessa seção os gráficos e imagens geradas no *software* comercial COMSOL para cada geometria testada. Toda estrutura simulada gerou o estresse devido ao carregamento em N/m^2 , o potencial elétrico de toda a célula em V e um gráfico relacionando a carga aplicada com o potencial elétrico máximo. As geometrias seguem sequencialmente iguais as expostas na Tabela 2, presente na seção 3 deste trabalho.

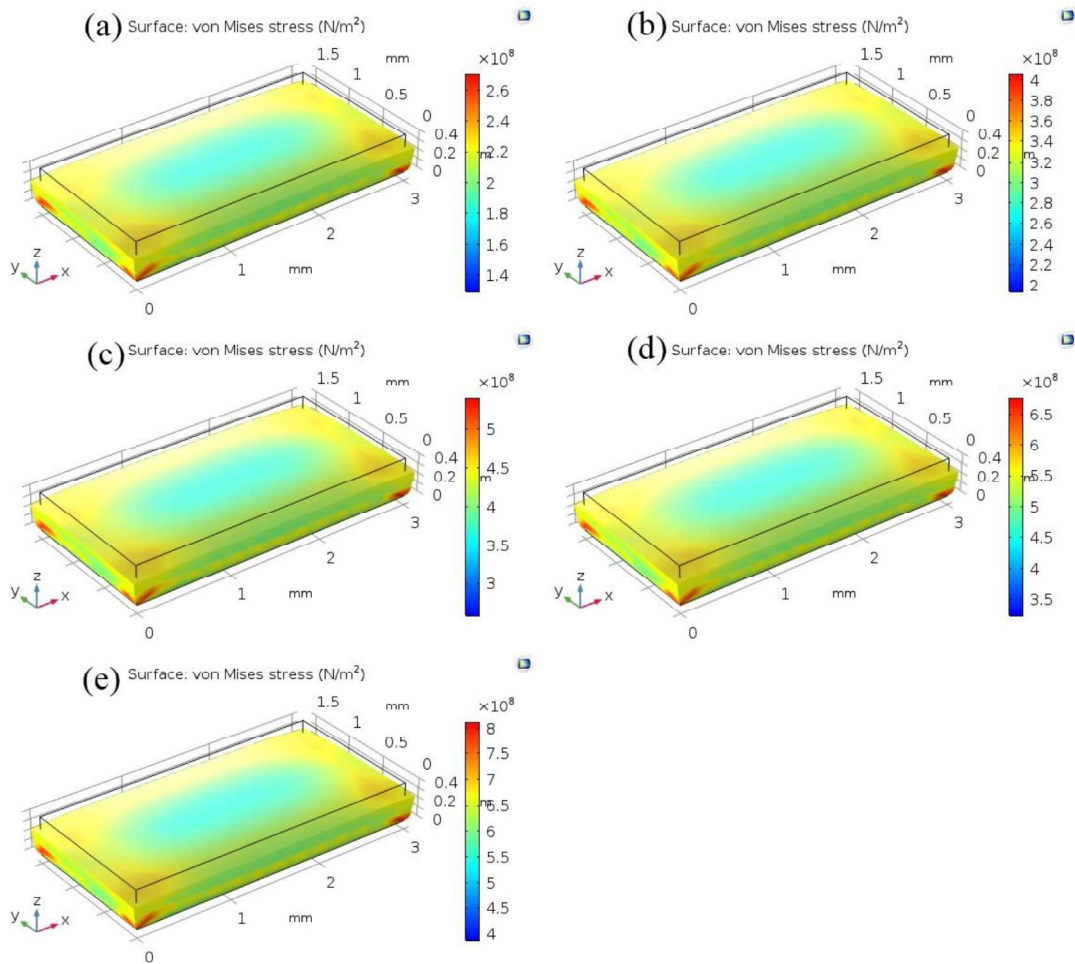
A primeira geometria testada é uma célula comercialmente distribuída e possui dimensões de largura, comprimento e espessura iguais a 3,0 mm, 1,5 mm e 0,4 mm, respectivamente. A deformação da célula foi a mesma para todos os carregamentos e pode ser observada na Figura 34 e a Figura 35 apresenta o estresse gerado na célula devido as cargas aplicadas.

Figura 34 – Deformação da geometria retangular 1



Fonte: O autor (2019).

Figura 35 – Estresse gerado na geometria retangular 1 devido a carga aplicada



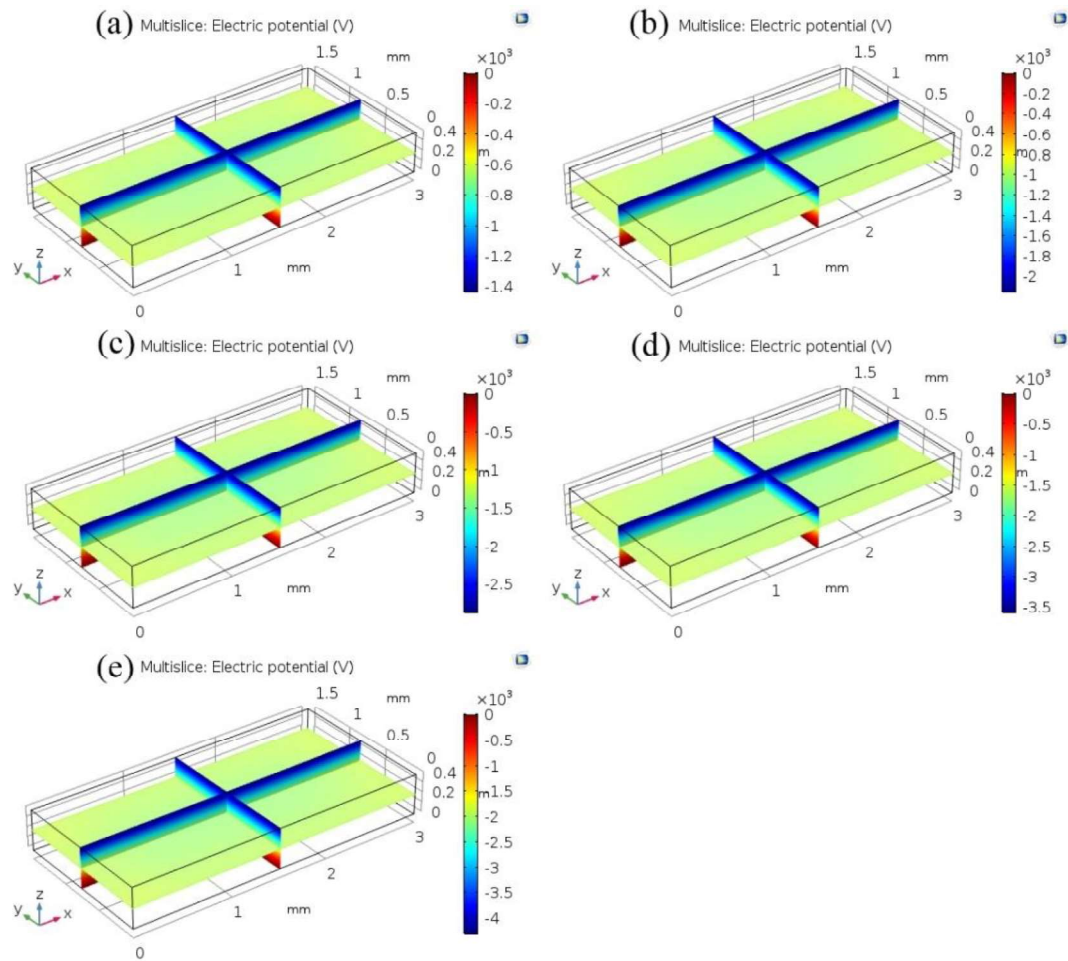
Fonte: O autor (2019).

(a) Estresse devido a carga de 1,0 kN. (b) Estresse devido a carga de 1,5 kN. (c) Estresse devido a carga de 2,0 kN. (d) Estresse devido a carga de 2,5 kN. (e) Estresse devido a carga de 3,0 kN.

De acordo com o apresentado nas Figuras 34 e 35, percebe-se a deformação da estrutura devido ao carregamento aplicado na faixa de 0,1 mm para os cinco casos de carregamento apresentados. Além disso, observa-se que o estresse evolui linearmente conforme a carga aplicada aumenta. É visível também que as máximas pressões são exercidas nos cantos inferiores e nas regiões de contorno da célula.

Na Figura 36 expõe-se o potencial elétrico presente na estrutura. O *software* apresenta-o por meio da divisão do material em feixes e camadas, considerando a distribuição uniforme nos elementos gerados.

Figura 36 – Potencial elétrico gerado na geometria retangular 1



Fonte: O autor (2019).

(a) Potencial elétrico devido a carga de 1,0 kN. (b) Potencial elétrico devido a carga de 1,5 kN.

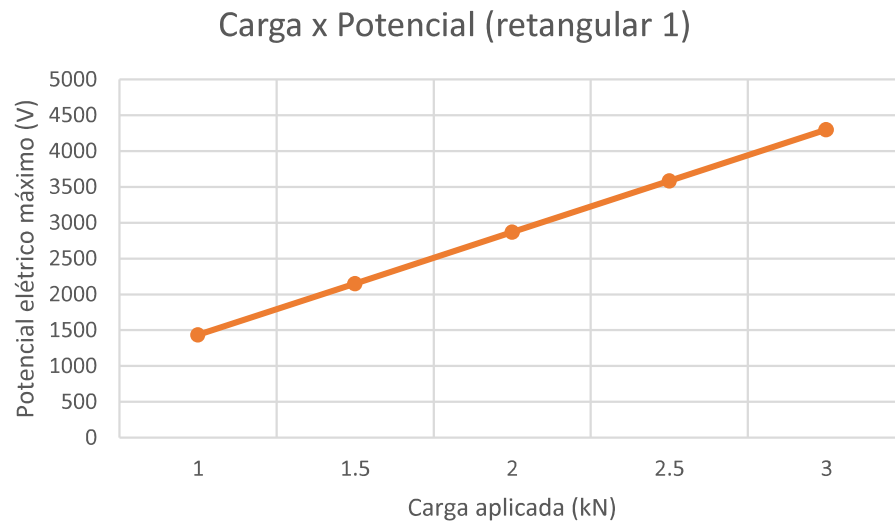
(c) Potencial elétrico devido a carga de 2,0 kN. (d) Potencial elétrico devido a carga de 2,5 kN.

(e) Potencial elétrico devido a carga de 3,0 kN.

Percebe-se pela Figura 36 que o potencial elétrico também aumenta linearmente com a carga aplicada. Com a análise do potencial, percebe-se que a camada superior da célula é a que mais contribui para a geração de energia. Os valores apresentados encontram-se negativos devido as condições impostas no *software* para a real representação do potencial, com seus valores de maior escala em contato mais próximo com o tráfego.

Ainda para a geometria 1 é exposta uma relação entre o potencial elétrico máximo gerado e a carga aplicada. Ela pode ser observada no Gráfico 1. Como visível, percebe-se a correspondência linear entre a força aplicada e o potencial elétrico máximo gerado, onde a variação desse para o incremento de 500 N no carregamento é da ordem de 717 V.

Gráfico 1 – Relação entre o potencial elétrico máximo e a carga aplicada da geometria retangular 1

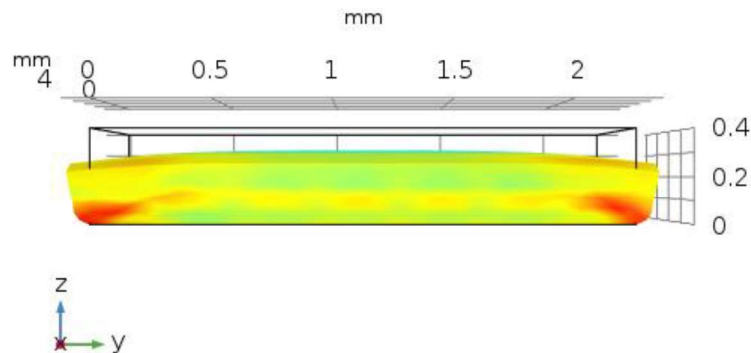


Fonte: O autor (2019).

Com isso, foi testada a geometria retangular 2, onde foi variada a área da célula piezoelétrica em 100 % para verificar a influência dessa variável no estresse da célula e no potencial elétrico gerado, tanto na distribuição dele na célula quanto no seu máximo.

Foi verificada a deformação na geometria retangular 2. Na Figura 37 pode-se observar a estrutura deformada devido a aplicação das cargas. A variação de carga não influenciou na deformação da estrutura, permanecendo a mesma para ambas as cargas aplicadas.

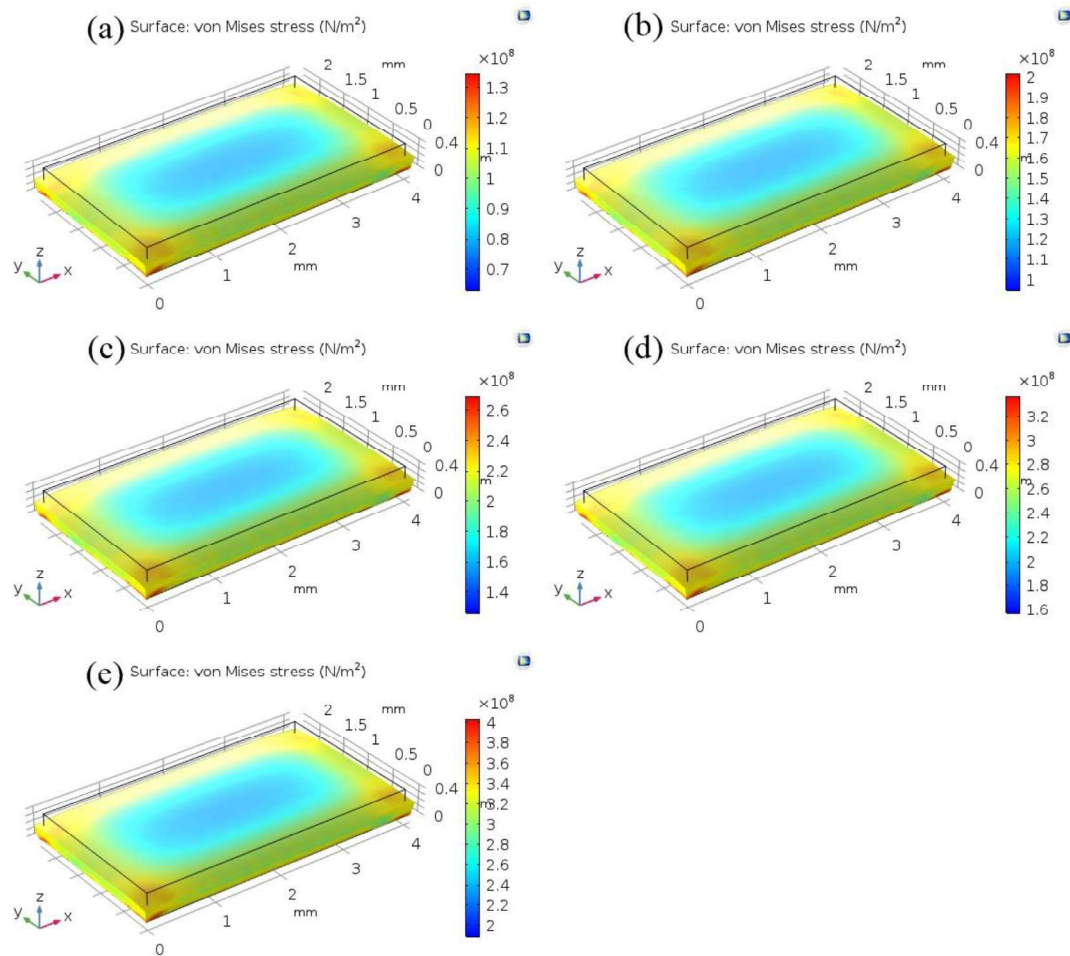
Figura 37 – Deformação da geometria retangular 2



Fonte: O autor (2019).

Percebe-se que a estrutura retangular 2 deforma-se mais que a estrutura retangular 1, reduzindo cerca de 0,15 mm de sua espessura nas laterais, enquanto a estrutura de área menor reduziu em torno de 0,10 mm. A Figura 38 apresenta o estresse gerado na célula.

Figura 38 – Estresse gerado na geometria retangular 2 devido a carga aplicada

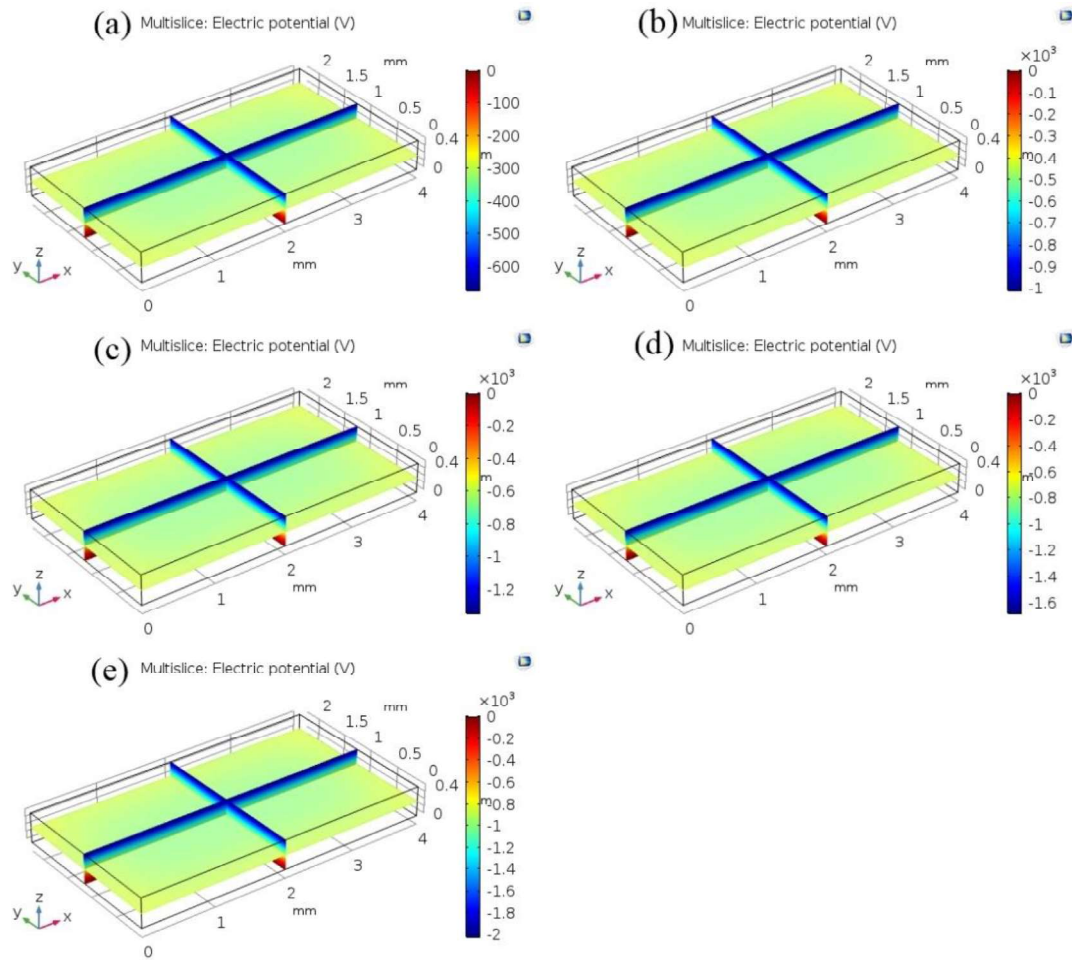


Fonte: O autor (2019).

(a) Estresse devido a carga de 1,0 kN. (b) Estresse devido a carga de 1,5 kN. (c) Estresse devido a carga de 2,0 kN. (d) Estresse devido a carga de 2,5 kN. (e) Estresse devido a carga de 3,0 kN.

Como já esperado pelas propriedades geométricas e mecânicas, com o incremento de 100 % da área da estrutura retangular 1 na retangular 2, o estresse na célula reduz pela metade. O potencial elétrico também foi analisado com essa variação de área. A Figura 39 apresenta a distribuição do potencial nas áreas da célula piezoelétrica por meio de feixes.

Figura 39 – Potencial elétrico gerado na geometria retangular 2

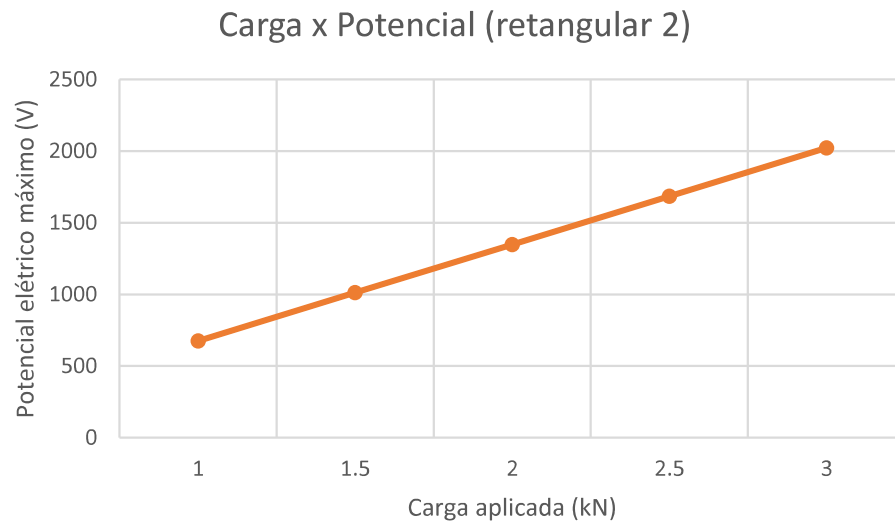


Fonte: O autor (2019).

- (a) Potencial elétrico devido a carga de 1,0 kN. (b) Potencial elétrico devido a carga de 1,5 kN.
 (c) Potencial elétrico devido a carga de 2,0 kN. (d) Potencial elétrico devido a carga de 2,5 kN.
 (e) Potencial elétrico devido a carga de 3,0 kN.

A partir da variação da área, o potencial elétrico diminuiu 52,98 % quando comparado ao potencial gerado pela estrutura retangular 1, com metade da área. Dessa forma, percebe-se que o incremento da área não diminui proporcionalmente o potencial elétrico gerado. O Gráfico 2 plota os resultados dos potenciais elétricos máximos gerados com a aplicação de cada uma das cargas. Nele é perceptível que o potencial elétrico cresce linearmente com a carga aplicada na estrutura. O incremento de 500 N gera um adicional de 337,1 V na estrutura.

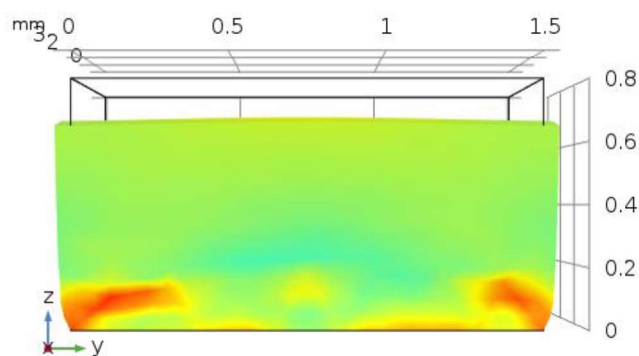
Gráfico 2 – Relação entre o potencial elétrico máximo e a carga aplicada da geometria retangular 2



Fonte: O autor (2019).

A geometria retangular 3 foi simulada para testar o acréscimo de espessura quando comparada com a geometria retangular 1. A mesma tinha as seguintes dimensões de largura, comprimento e espessura: 3 mm, 1,5 mm e 0,8 mm, respectivamente. Quanto à deformação, a estrutura retangular 3 apresentou uma redução de 0,13 mm na sua espessura devido a aplicação das cargas. A Figura 40 mostra a célula piezoelétrica deformada.

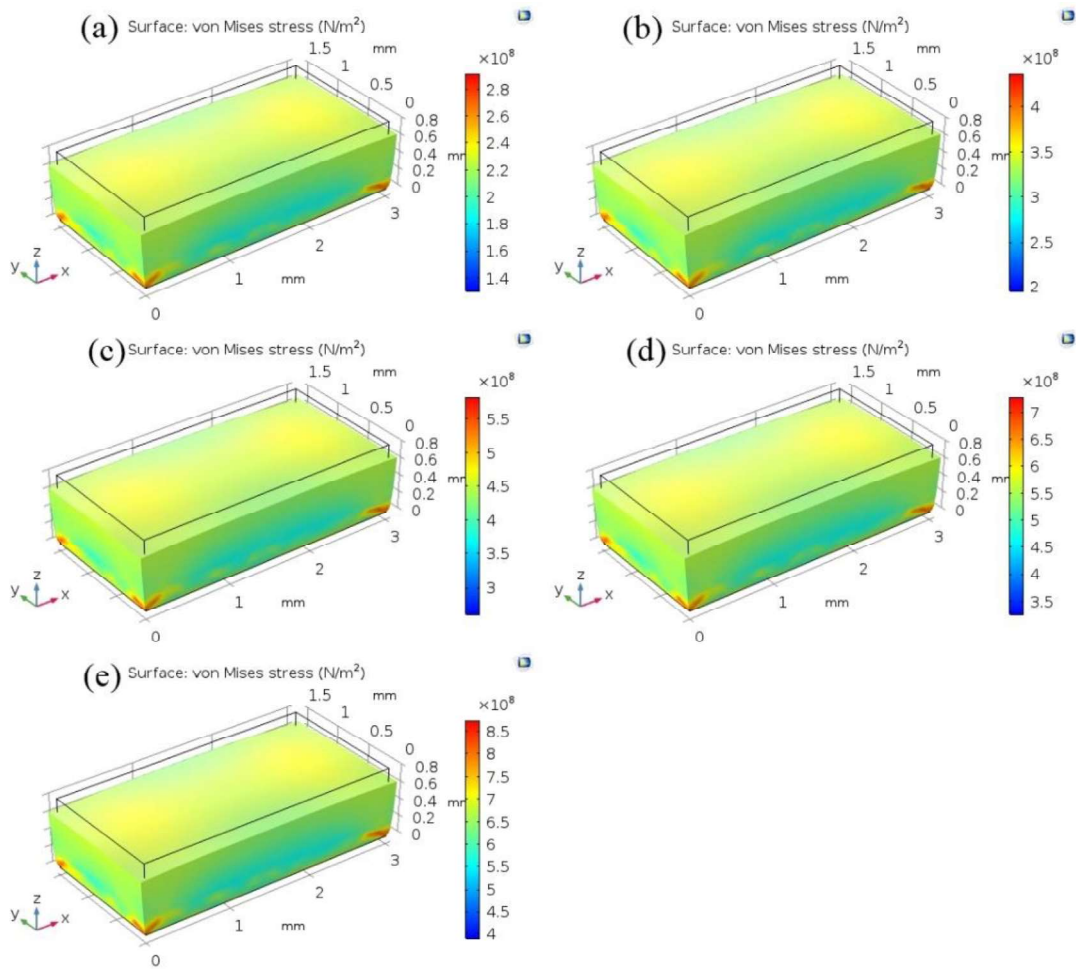
Figura 40 – Deformação da geometria retangular 3



Fonte: O autor (2019).

Com o dobro da espessura e mesma área da estrutura retangular 1, na retangular 3 o estresse ficou maior na face superior, contudo, o valor máximo em N/m^2 cresceu apenas 7,14 %. A Figura 41 mostra a distribuição desse estresse no corpo da estrutura retangular 3 devido as cargas aplicadas.

Figura 41 – Estresse gerado na geometria retangular 3 devido a carga aplicada

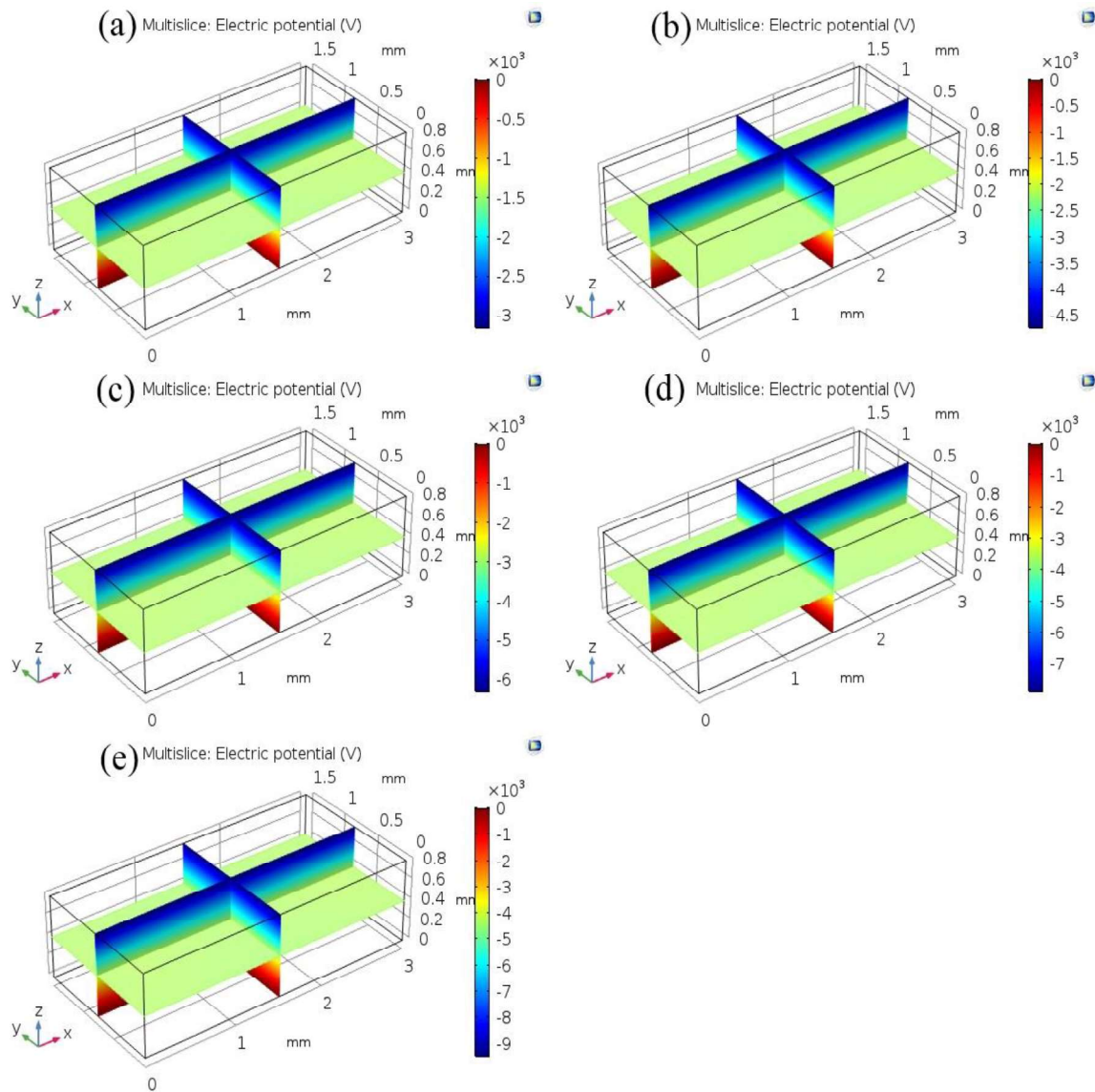


Fonte: O autor (2019).

(a) Estresse devido a carga de 1.0 kN. (b) Estresse devido a carga de 1.5 kN. (c) Estresse devido a carga de 2.0 kN. (d) Estresse devido a carga de 2.5 kN. (e) Estresse devido a carga de 3.0 kN.

Quanto ao potencial elétrico, com o aumento da espessura, esse cresceu na faixa de 120 % quando comparado ao da geometria retangular 1. Isso evidencia que o potencial elétrico não cresce proporcionalmente com o aumento de espessura, que foi de 100 %. A Figura 42 mostra a distribuição desse potencial na célula.

Figura 42 – Potencial elétrico gerado na geometria retangular 3

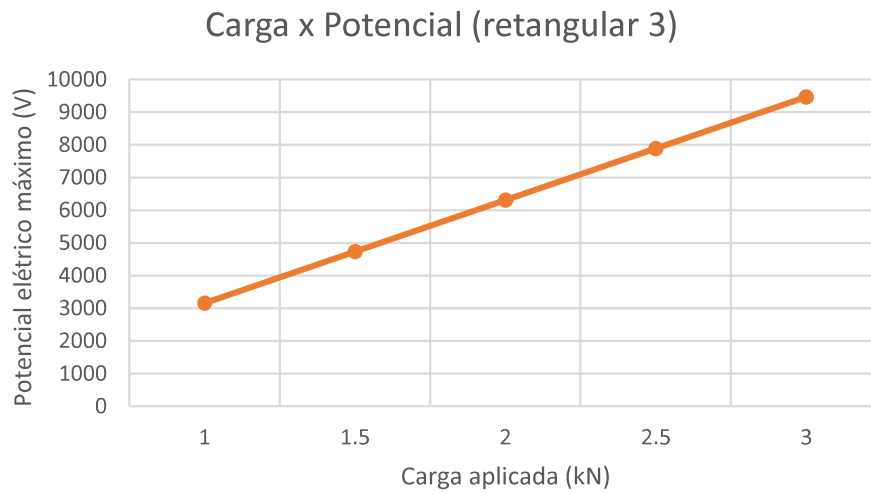


Fonte: O autor (2019).

(a) Potencial elétrico devido a carga de 1,0 kN. (b) Potencial elétrico devido a carga de 1,5 kN. (c) Potencial elétrico devido a carga de 2,0 kN. (d) Potencial elétrico devido a carga de 2,5 kN. (e) Potencial elétrico devido a carga de 3,0 kN.

Com a variação de 500 N na força aplicada, o potencial elétrico máximo foi elevado em 1.577,4 V. O Gráfico 3 plota a relação de linearidade entre o potencial elétrico e a força aplicada.

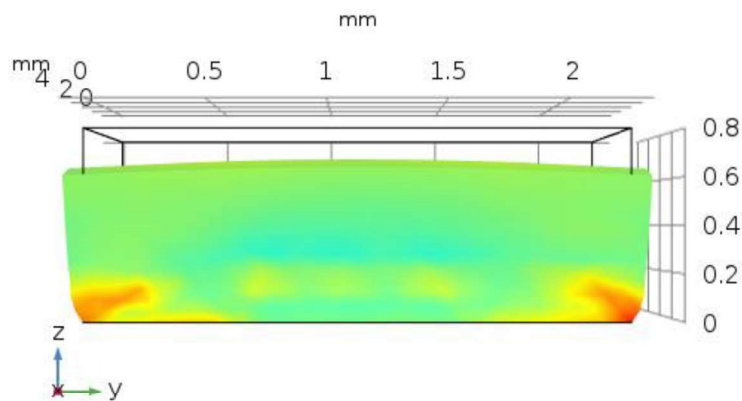
Gráfico 3 – Relação entre o potencial elétrico máximo e a carga aplicada da geometria retangular 3



Fonte: O autor (2019).

Por fim, para a geometria retangular 4 foi testada a variação da área e da espessura da célula piezoelétrica, sendo ambas elevadas ao dobro da estrutura retangular 1. As dimensões de largura, comprimento e espessura foram 4, 2,25 e 0,8, respectivamente. A Figura 43 apresenta a estrutura retangular 4 deformada quando submetida as cargas aplicadas.

Figura 43 – Deformação da geometria retangular 4

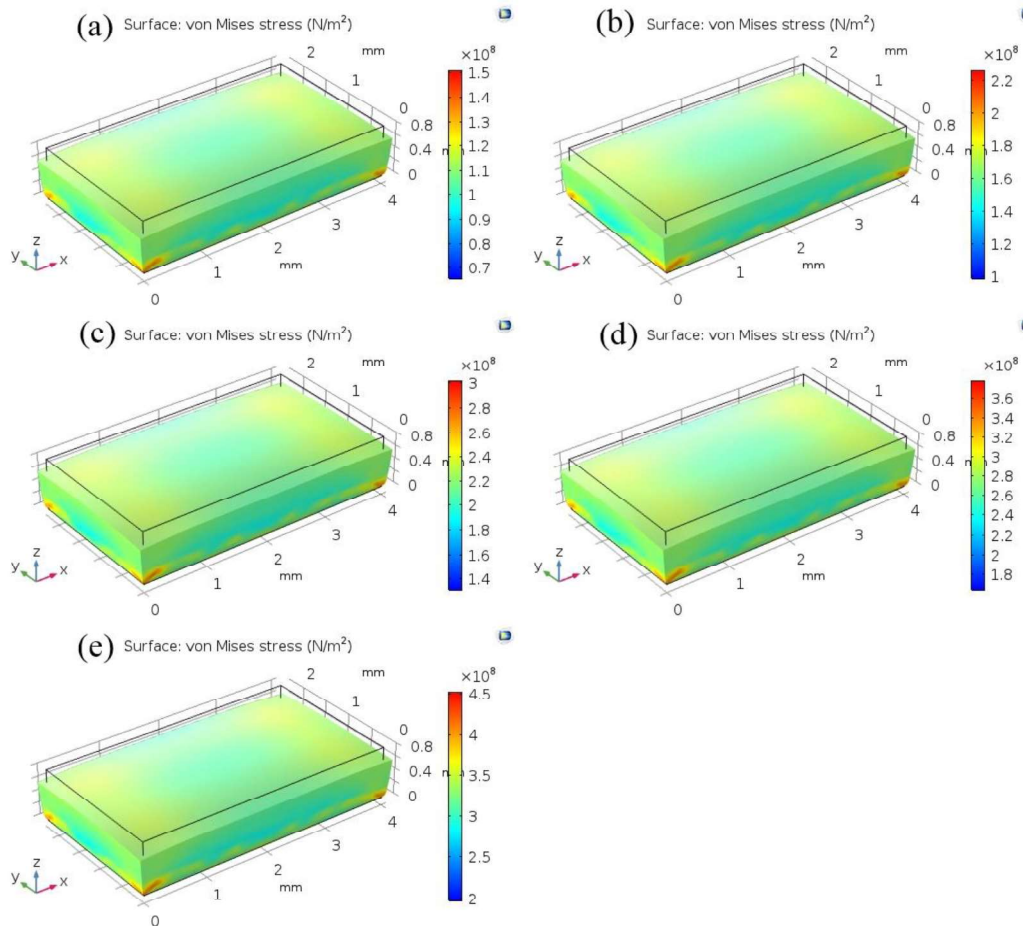


Fonte: O autor (2019).

Percebe-se que a espessura da geometria retangular 4 foi reduzida em torno de 0,15 mm, um crescimento de 50 % quando comparada com a geometria retangular 1, sendo aplicadas as mesmas cargas.

Quando ao estresse, a estrutura retangular 4 apresentou uma redução de aproximadamente 45 % quando comparado ao da estrutura retangular 1. A Figura 44 mostra o estresse ao qual a geometria retangular 4 ficou submetida.

Figura 44 – Estresse gerado na geometria retangular 4 devido a carga aplicada

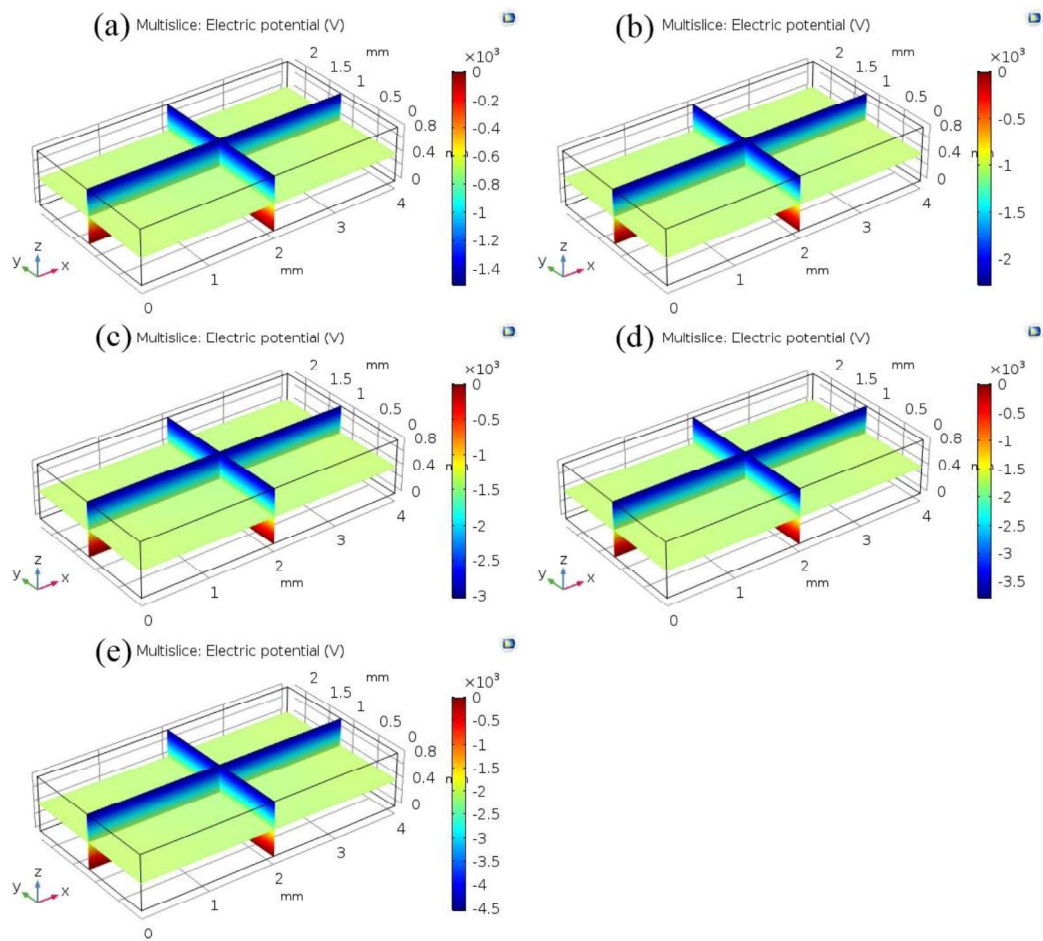


Fonte: O autor (2019).

(a) Estresse devido a carga de 1,0 kN. (b) Estresse devido a carga de 1,5 kN. (c) Estresse devido a carga de 2,0 kN. (d) Estresse devido a carga de 2,5 kN. (e) Estresse devido a carga de 3,0 kN.

O estresse na geometria retangular 4 se apresenta de forma mais uniforme na região central, variando igualmente em suas laterais. Quanto ao potencial elétrico, o mesmo cresceu da ordem de 5,6 % quando comparado ao da geometria retangular 1. Esse crescimento se explica em razão da densidade de carga superficial. A Figura 45 mostra a distribuição desse potencial elétrico na estrutura retangular 4.

Figura 45 – Potencial elétrico gerado na geometria retangular 4



Fonte: O autor (2019).

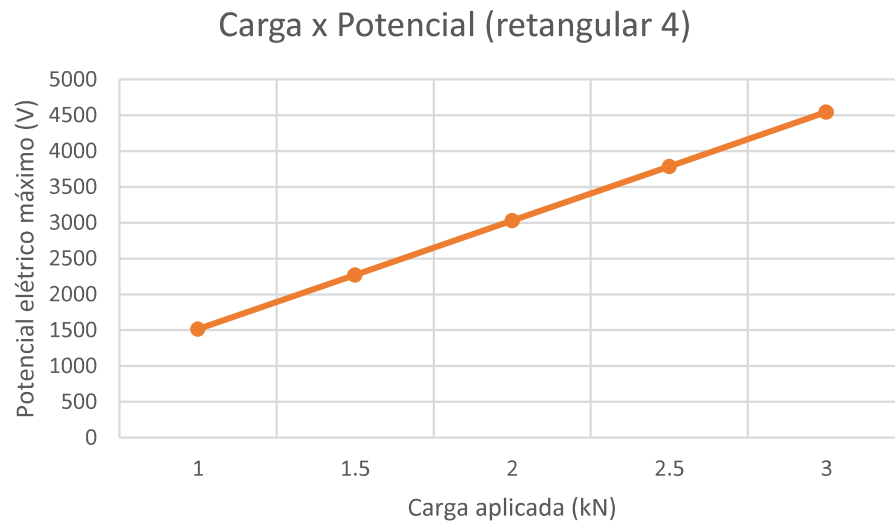
(a) Potencial elétrico devido a carga de 1,0 kN. (b) Potencial elétrico devido a carga de 1,5 kN. (c) Potencial elétrico devido a carga de 2,0 kN. (d) Potencial elétrico devido a carga de 2,5 kN. (e) Potencial elétrico devido a carga de 3,0 kN.

Quanto a diferença de potencial elétrico gerado, o mesmo foi de 757,4 V com o incremento de 500 N na carga aplicada. O Gráfico 4 plota a relação de linearidade entre a carga aplicada e o potencial elétrico máximo.

Com as estruturas retangulares simuladas, nota-se que o potencial elétrico não cresce proporcionalmente ao aumento ou diminuição das propriedades geométricas como área e espessura. Percebe-se também que o estresse na célula aumenta proporcionalmente a carga aplicada e proporcionalmente ao incremento ou redução da área.

Ainda é possível constatar que quanto maior a espessura, maior o potencial elétrico gerado e quanto maior a área, menor é essa propriedade elétrica. Contudo, constata-se que a espessura tem um efeito maior que a variação da área, quando acrescentadas em mesmas proporções.

Gráfico 4 – Relação entre o potencial elétrico máximo e a carga aplicada da geometria retangular 4



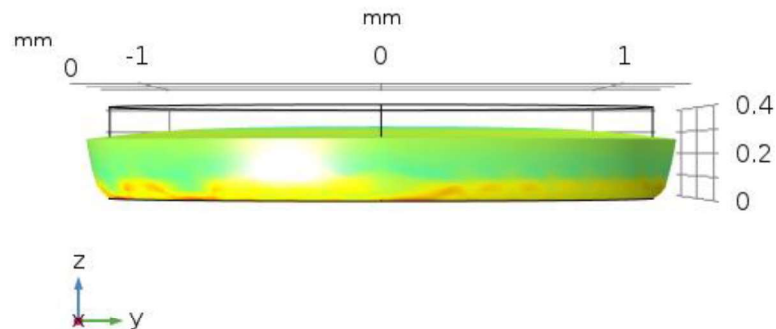
Fonte: O autor (2019).

4.2.2 Análise estacionária para a geometria circular

Após as simulações realizadas com as células piezoelétricas retangulares, foram realizados testes com geometrias circulares no intuito de verificar se há algum ganho ou perda de potencial. A primeira geometria circular foi dimensionada para possuir área e espessura iguais as da geometria retangular 1, com um raio de 1,197 cm e 0,4 mm de altura.

Por limitações de quantidade de casas decimais no software, a área não ficou 100 % equivalente, apresentando uma diferença de 0,0005 %, o que acabou influenciando no potencial elétrico gerado. A Figura 46 apresenta a deformação da geometria circular 1.

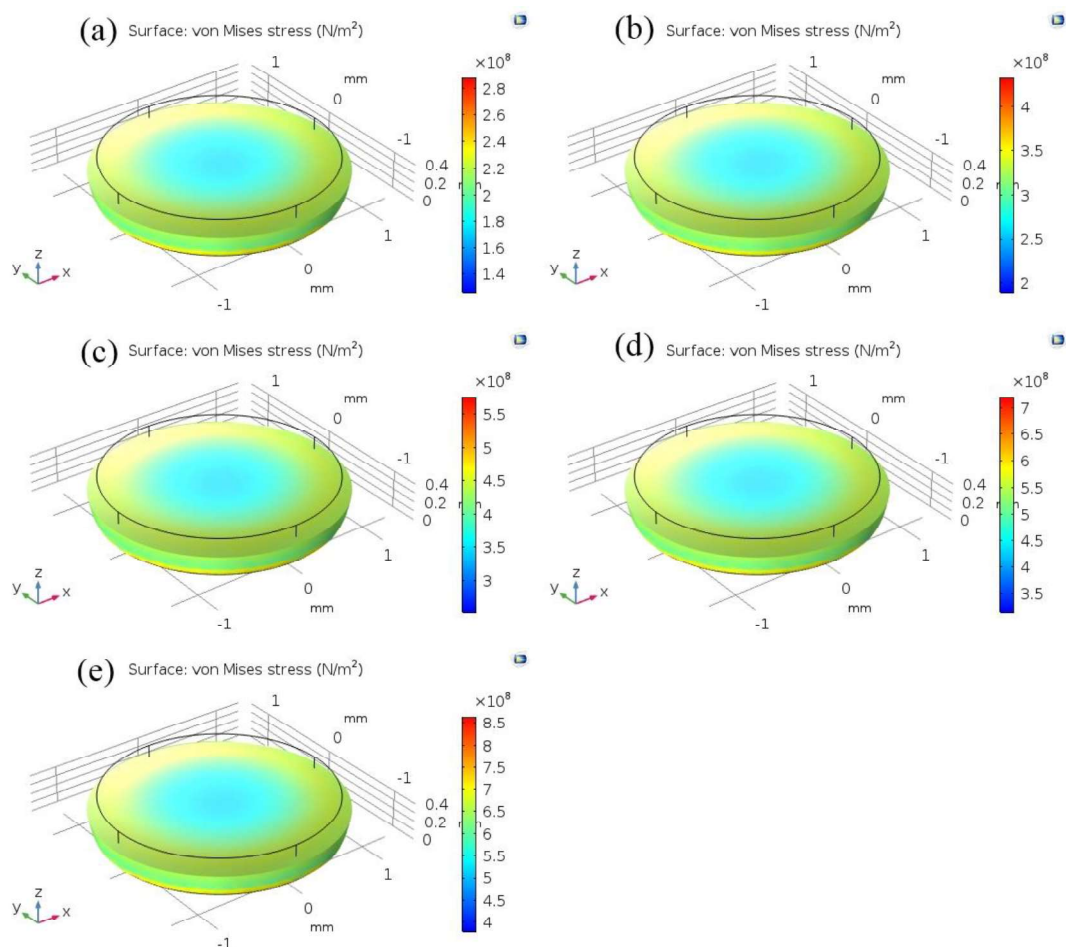
Figura 46 – Deformação da geometria circular 1



Fonte: O autor (2019).

Como é perceptível, a espessura da célula piezoelétrica foi reduzida em torno de 0,13 mm, permanecendo próxima da computada na geometria retangular 1. Quanto ao estresse desenvolvido na estrutura, esse ficou elevado em torno de 8 % quando comparado ao da estrutura retangular 1. O acréscimo se deve ao fato de que na estrutura retangular 1 o comprimento era o dobro da largura, dissipando esse estresse longitudinalmente, enquanto na geometria circular 1 a estrutura é totalmente uniforme. A Figura 47 mostra o estresse sofrido pela célula.

Figura 47 – Estresse gerado na geometria circular 1 devido a carga aplicada



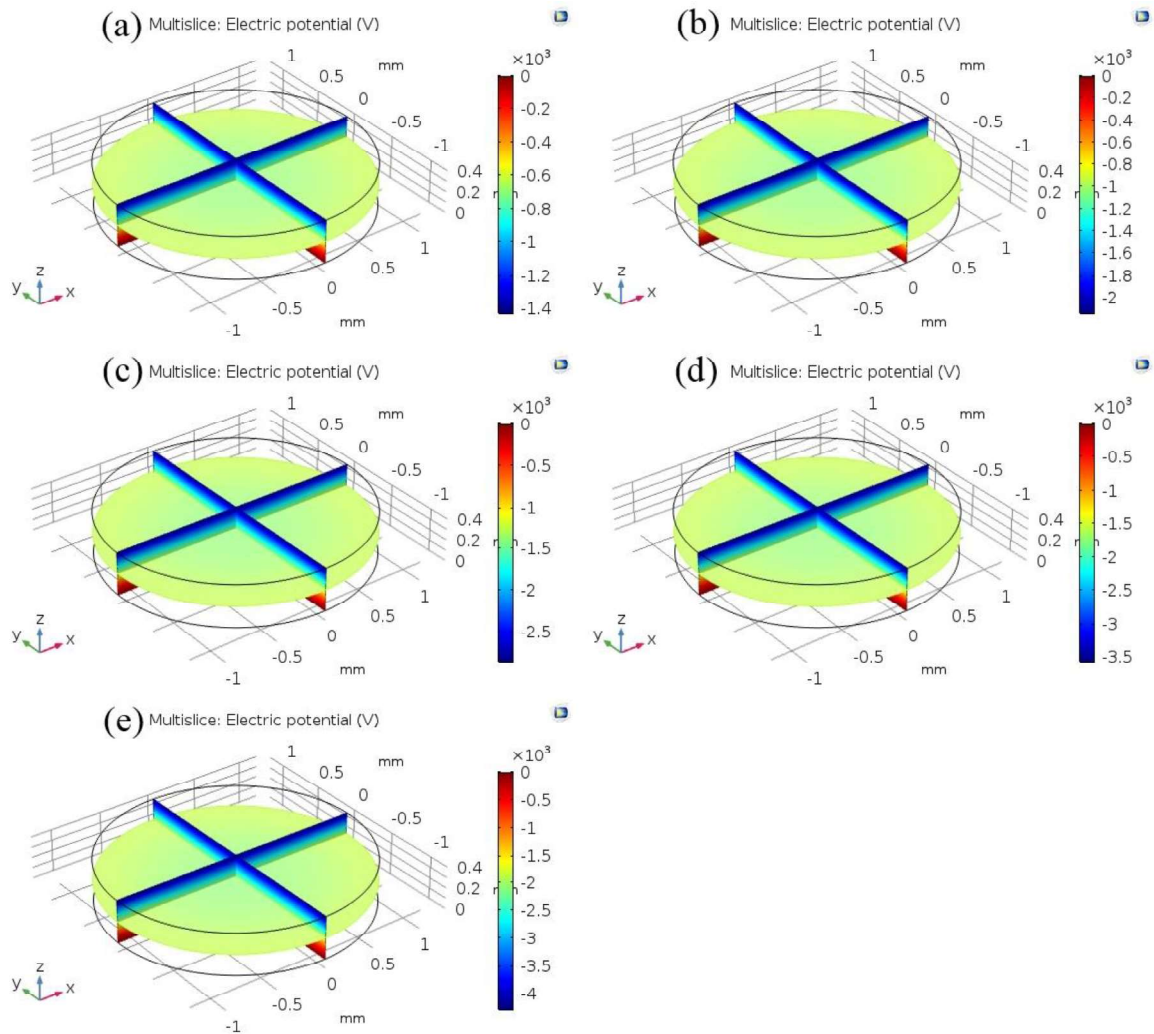
Fonte: O autor (2019).

(a) Estresse devido a carga de 1,0 kN. (b) Estresse devido a carga de 1,5 kN. (c) Estresse devido a carga de 2,0 kN. (d) Estresse devido a carga de 2,5 kN. (e) Estresse devido a carga de 3,0 kN.

O potencial elétrico gerado resultou em uma diferença de 0,33 % quando comparado ao gerado pela estrutura retangular 1. Essa diferença se explica por as áreas não serem exatamente iguais e a sensibilidade do *software* identificar essa variação. A Figura 48

apresenta a distribuição de potencial na estrutura da célula. Em seguida, o Gráfico 5 plota a relação entre o potencial elétrico máximo e a carga aplicada.

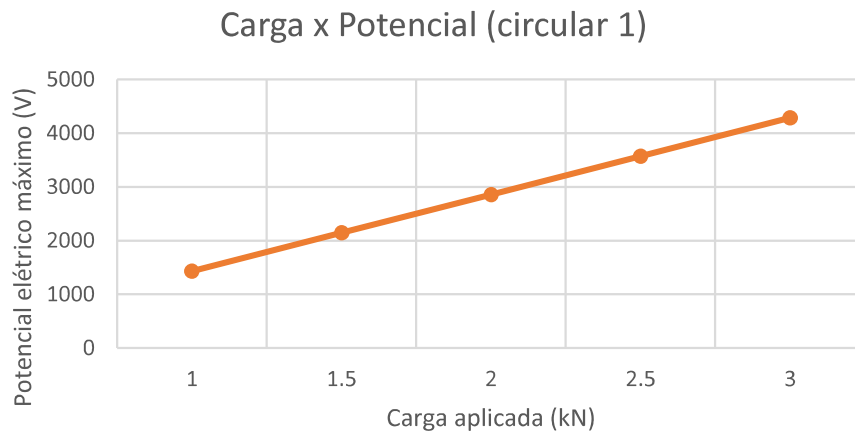
Figura 48 – Potencial elétrico gerado na geometria circular 1



Fonte: O autor (2019).

(a) Potencial elétrico devido a carga de 1,0 kN. (b) Potencial elétrico devido a carga de 1,5 kN. (c) Potencial elétrico devido a carga de 2,0 kN. (d) Potencial elétrico devido a carga de 2,5 kN. (e) Potencial elétrico devido a carga de 3,0 kN.

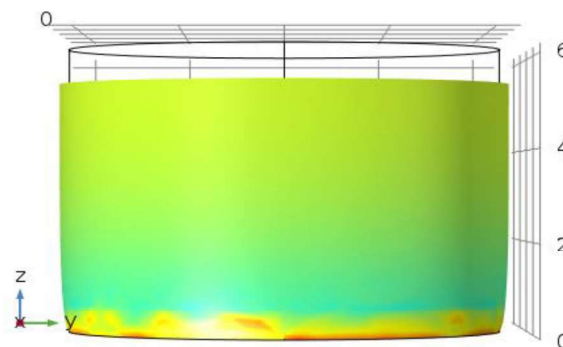
Gráfico 5 – Relação entre o potencial elétrico máximo e a carga aplicada da geometria circular 1



Fonte: O autor (2019).

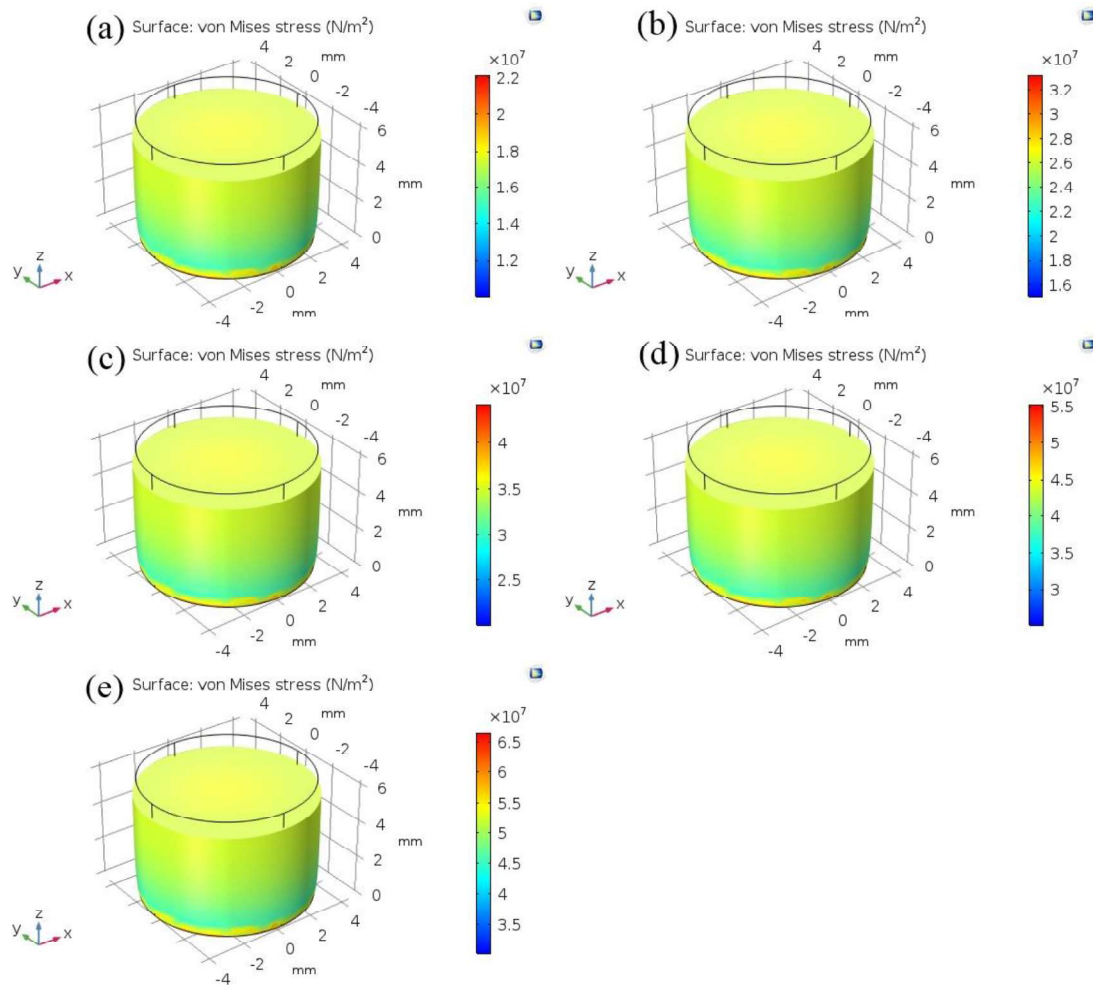
Uma segunda célula piezoelétrica comercial foi testada. A geometria circular 2, com diâmetro de 8,56 mm e espessura de 6,2 mm, foi submetida a testes de estresse e potencial elétrico. A estrutura sofre uma deformação de aproximadamente 0,7 mm, representando 11,29 % do seu tamanho total. Um percentual menor de perda quando comparado as outras geometrias simuladas. O material constituinte também é o PZT-5H. A Figura 49 mostra a geometria circular 2 deformada. A Figura 50 apresenta como a carga se distribui na estrutura, em N/m².

Figura 49 – Deformação da geometria circular 2



Fonte: O autor (2019).

Figura 50 – Estresse gerado na geometria circular 2 devido a carga aplicada

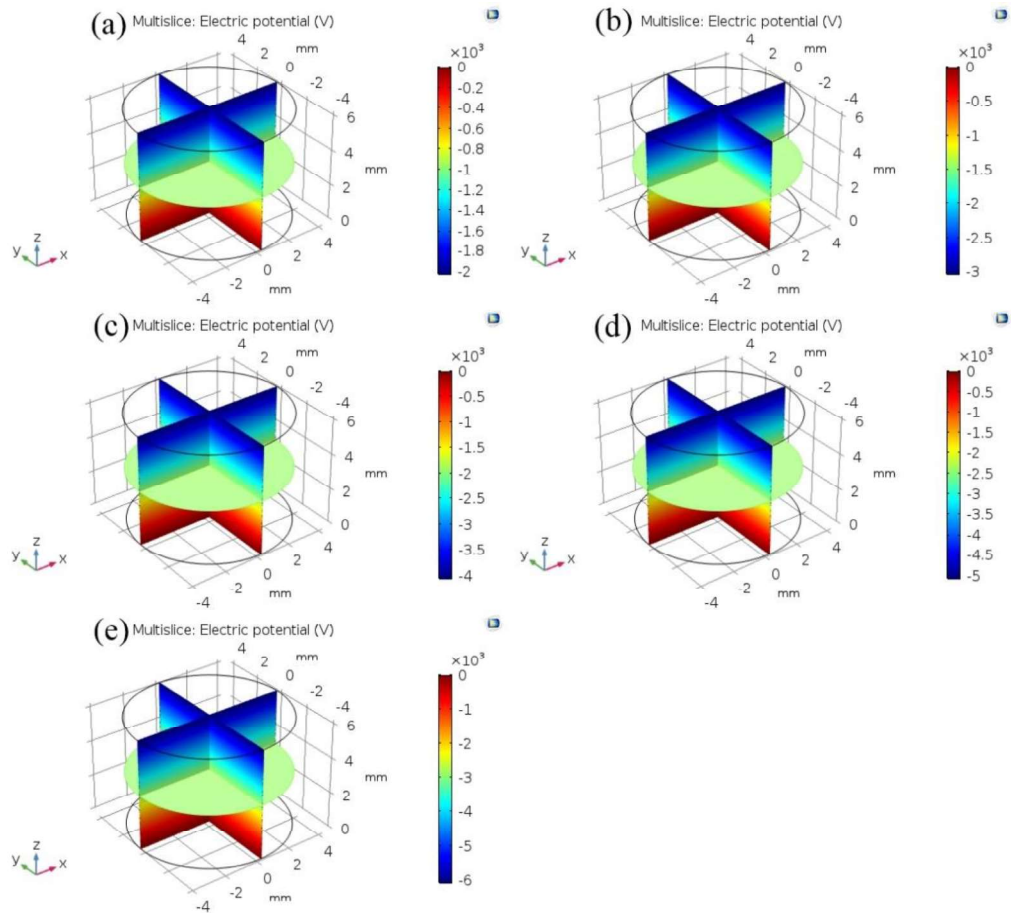


Fonte: O autor (2019).

(a) Estresse devido a carga de 1,0 kN. (b) Estresse devido a carga de 1,5 kN. (c) Estresse devido a carga de 2,0 kN. (d) Estresse devido a carga de 2,5 kN. (e) Estresse devido a carga de 3,0 kN.

Percebe-se um estresse uniformemente distribuído no topo da estrutura, bem como uma faixa de valores menor quando comparada a estruturas de espessuras mais esbeltas. Quanto ao potencial elétrico gerado, esse apresentou uma distribuição elevada em seu topo, com valores variando de 0 a 2.025,7 V para a menor carga e variando de 0 a 6.071,1 V para a maior carga aplicada. A Figura 51 apresenta a distribuição do potencial na célula. A linearidade entre a carga aplicada e o potencial elétrico máximo é plotada no Gráfico 6. A diferença de potencial com o acréscimo de 500 N foi de 1.012,8 V.

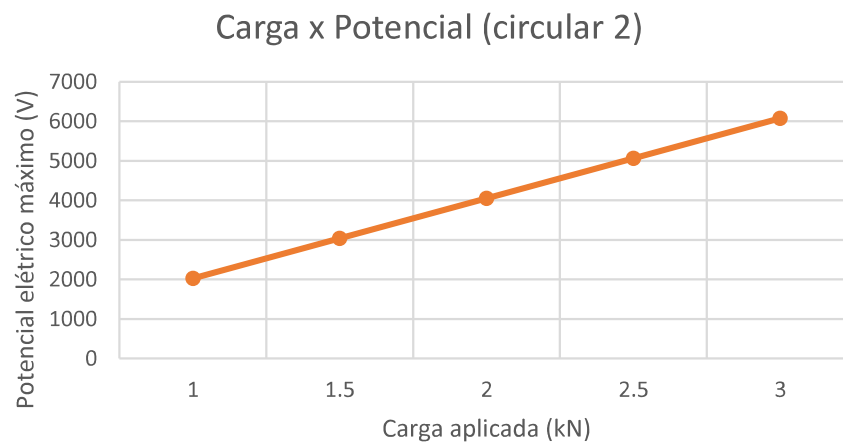
Figura 51 – Potencial elétrico gerado na geometria circular 2



Fonte: O autor (2019).

(a) Potencial elétrico devido a carga de 1,0 kN. (b) Potencial elétrico devido a carga de 1,5 kN. (c) Potencial elétrico devido a carga de 2,0 kN. (d) Potencial elétrico devido a carga de 2,5 kN. (e) Potencial elétrico devido a carga de 3,0 kN.

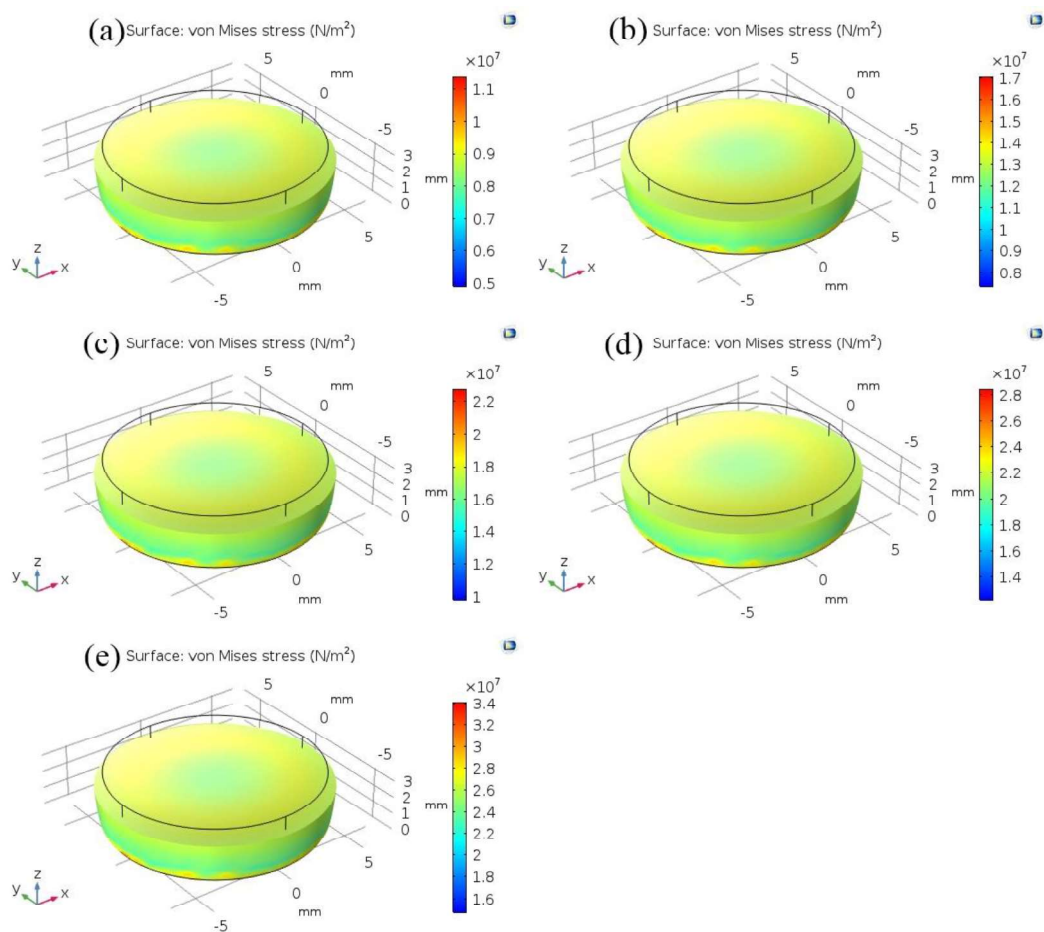
Gráfico 6 – Relação entre o potencial elétrico máximo e a carga aplicada da geometria circular 2



Fonte: O autor (2019)

Para concluir a análise estacionária foi realizada uma simulação com a estrutura circular 3, possuindo o dobro da área da estrutura circular 2 e a metade da sua espessura. O procedimento foi realizado a fim de verificar se as mesmas considerações das geometrias retangulares são válidas para as circulares, visto que as células circulares possuem geometria simétrica. O diâmetro da geometria circular 3 é de 12,1 mm e sua espessura de 3,1 mm. O estresse imposto na estrutura devido às cargas também foi analisado. A Figura 52 apresenta a distribuição dele geometria circular 3.

Figura 52 – Estresse gerado na geometria circular 3 devido a carga aplicada



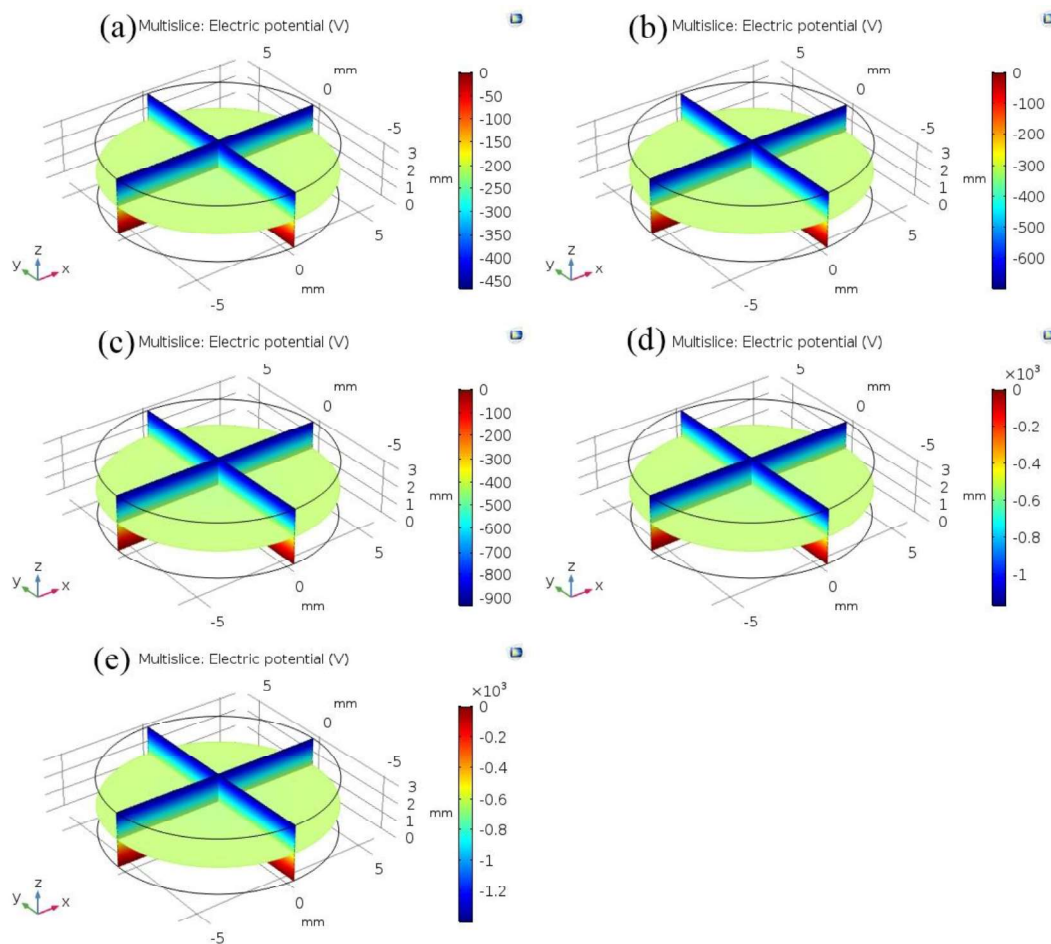
Fonte: O autor (2019).

(a) Estresse devido a carga de 1,0 kN. (b) Estresse devido a carga de 1,5 kN. (c) Estresse devido a carga de 2,0 kN. (d) Estresse devido a carga de 2,5 kN. (e) Estresse devido a carga de 3,0 kN

Percebe-se uma redução de aproximadamente 53 % no estresse ocasionado pela aplicação das cargas. Essa redução se justifica pelo aumento da área e pela redução da espessura, que combinadas, conseguem reduzir o estresse em mais da metade.

No tocante ao potencial elétrico, esse sofreu uma redução brusca quando comparado ao da estrutura circular 2. A redução em larga escala era esperada devido ao fato de as duas variáveis influenciadoras do processo terem sido reduzidas (espessura) e ampliadas (área) de forma a reduzir o potencial elétrico. A Figura 53 mostra a distribuição do potencial elétrico para a célula circular 3.

Figura 53 – Potencial elétrico gerado na geometria circular 3

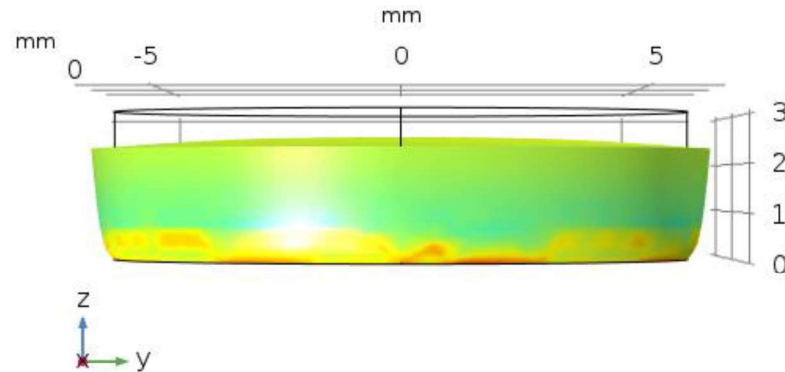


Fonte: O autor (2019).

(a) Potencial elétrico devido a carga de 1,0 kN. (b) Potencial elétrico devido a carga de 1,5 kN. (c) Potencial elétrico devido a carga de 2,0 kN. (d) Potencial elétrico devido a carga de 2,5 kN. (e) Potencial elétrico devido a carga de 3,0 kN.

A deformação da estrutura também é analisada. A Figura 54 apresenta a deformação da estrutura circular 3. Percebe-se uma redução de aproximadamente 0,8 mm, reduzindo em cerca de 26 % a espessura total da estrutura. Isso afirma a hipótese de que quanto maior a área e quanto menor a espessura, maiores as deformações sofridas pela estrutura devido a carga estacionária

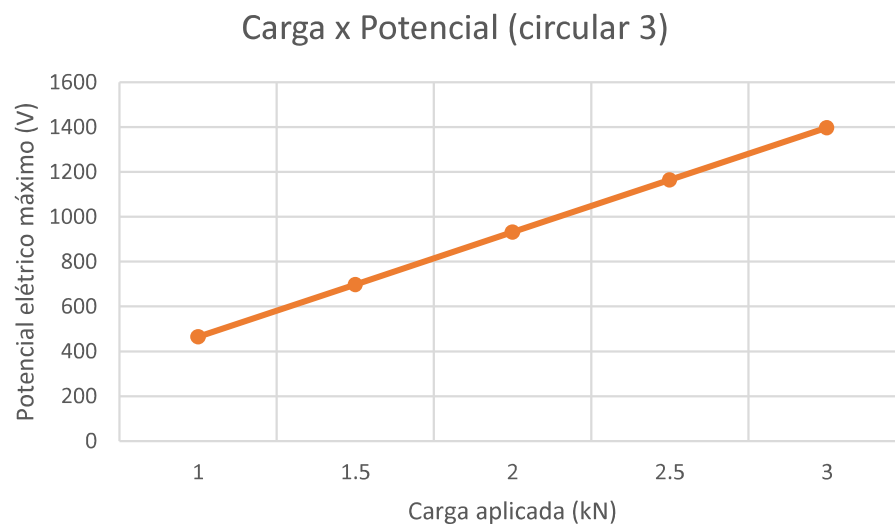
Figura 54 – Deformação da geometria circular 3



Fonte: O autor (2019).

É possível perceber que as mesmas propriedades das geometrias retangulares são válidas para a circular, onde com a redução em 50 % da espessura da estrutura e o aumento de 100 % da área, o potencial elétrico sofre alteração proporcional a influência dessas variáveis. No caso, era esperada uma redução de 75 %, contudo, devido a maior contribuição da espessura, essa redução cresce para 77,01 %. O Gráfico 7 traça a relação entre a carga aplicada e o potencial elétrico máximo, validando a linearidade entre essas propriedades. Percebe-se que o potencial aumenta 232,8 V com o acréscimo de 500 N na carga.

Gráfico 7 – Relação entre o potencial elétrico máximo e a carga aplicada da geometria circular 3

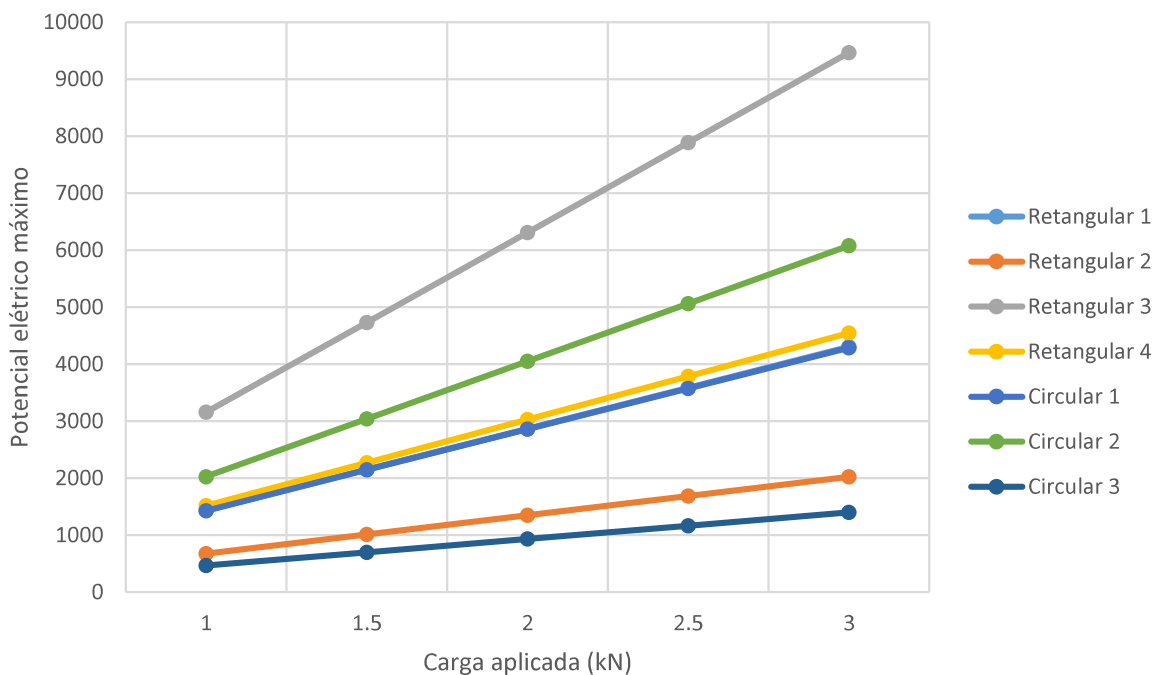


Fonte: O autor (2019).

4.2.3 Comparação entre a análise estacionária para as geometrias retangular e circular

Percebe-se, diante dos gráficos e imagens mostrados, que a geometria que responde com maior potencial elétrico é a retangular 3, devido ao acréscimo de 100% em sua espessura. Contudo, apenas a geometria retangular 1 e a circular 2 são encontradas comercialmente. Dentre elas, a que responde com um potencial mais elevado é a célula circular 2. No Gráfico 8 é realizada uma comparação entre as 7 geometrias testadas.

Gráfico 8 – Potenciais elétricos máximos com a aplicação das cargas



Fonte: O autor (2019).

Por meio do Gráfico 8, percebe-se a sobreposição das retas de potencial das geometrias retangular 1 e circular 1, visto que as áreas e espessuras são as mesmas. Contudo, como já explanado, por limitações do *software*, a circular 1 ficou com área relativamente maior, apresentando redução do seu potencial elétrico. Também é possível perceber que o coeficiente angular da reta varia para todas as geometrias testadas, mostrando que quanto maior a relação entre área e espessura, maior a inclinação da reta. A única exceção é para a geometria circular 2, que pode ser explicada pela elevada espessura em relação as demais. A Tabela 8 apresenta as relações entre as áreas e as espessuras das células testadas.

Tabela 8 – Relação entre área e espessura

Geometria	Área (mm²)	Espessura (mm)	Relação entre área e espessura (mm)
Retangular 1	4,50	0,40	11,25
Retangular 2	9,00	0,40	22,40
Retangular 3	4,50	0,80	5,62
Retangular 4	9,00	0,80	7,20
Circular 1	4,50	0,40	11,25
Circular 2	57,55	6,20	9,28
Circular 3	114,99	3,10	37,09

Fonte: O autor (2019).

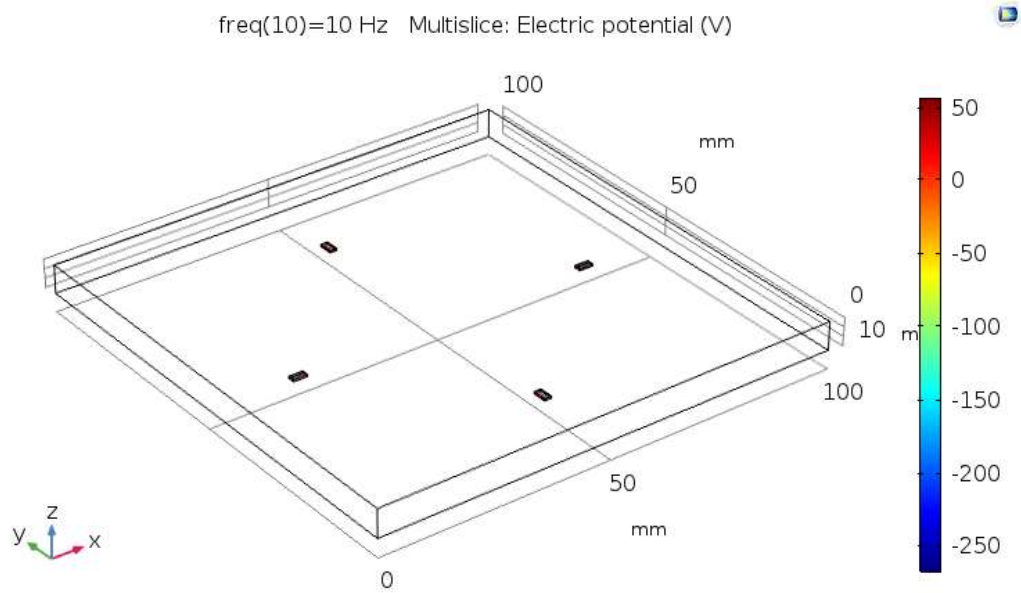
Pelo presente na Tabela 8 e nos gráficos de potencial elétrico máximo, percebe-se que quanto menor essa relação, maior é o potencial elétrico gerado. Contudo, há ressalvas quando comparadas as relações entre as estruturas circular e retangular, o que se justifica pela não-simetria entre as dimensões nas células retangulares, dissipando esse potencial em maior quantidade na direção do comprimento.

4.2.4 Análise dinâmica para as geometrias retangulares (1 e 4) e circulares (1 e 2)

Para a análise dinâmica foram analisadas quatro geometrias, sendo duas disponíveis comercialmente (retangular 1 e circular 2), para verificar a possibilidade de implementação em um trecho. As outras duas geometrias (retangular 4 e circular 1) são derivadas dessas existentes no mercado, para comprovar se as relações apresentadas de potencial elétrico se aplicam para as respostas elétricas das células agrupadas.

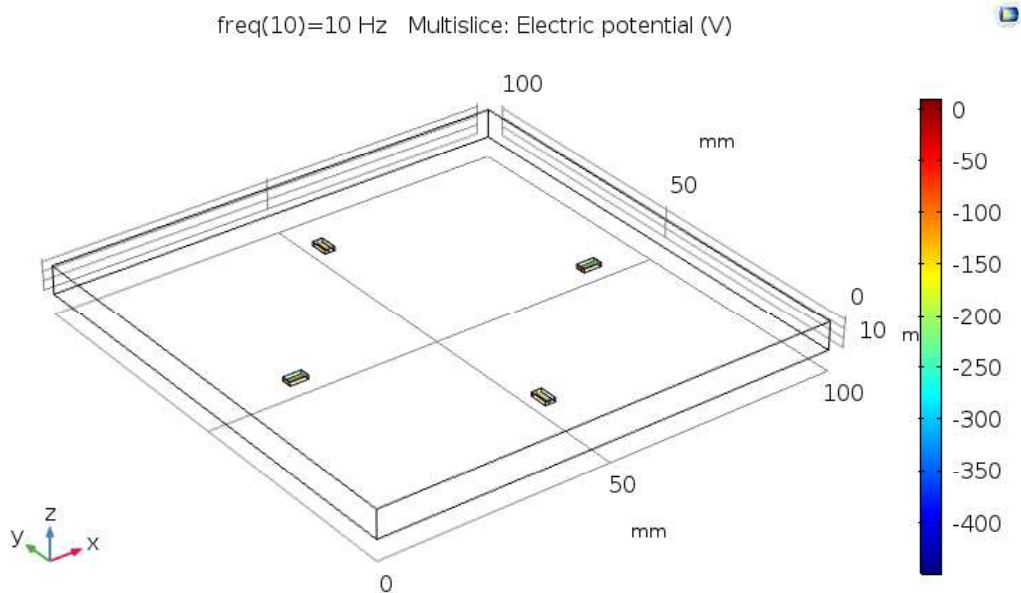
As Figuras 55 a 58 representam o arranjo das células entre as placas de cobre e o potencial elétrico para a aplicação da carga de 3 kN, com a frequência de 10 Hz, considerada a mais influente quanto à fadiga no revestimento, camada de implementação das células.

Figura 55 – Arranjo das células de geometria retangular 1 e potencial eléctrico para carga de 3 kN



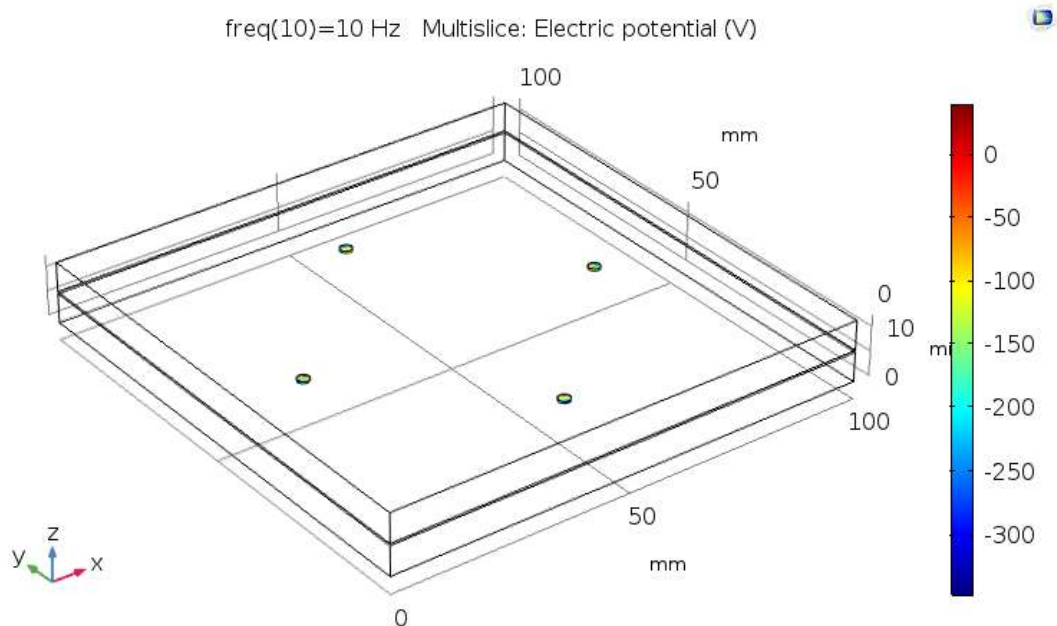
Fonte: O autor (2019)

Figura 56 – Arranjo das células de geometria retangular 4 e potencial eléctrico para carga de 3 kN



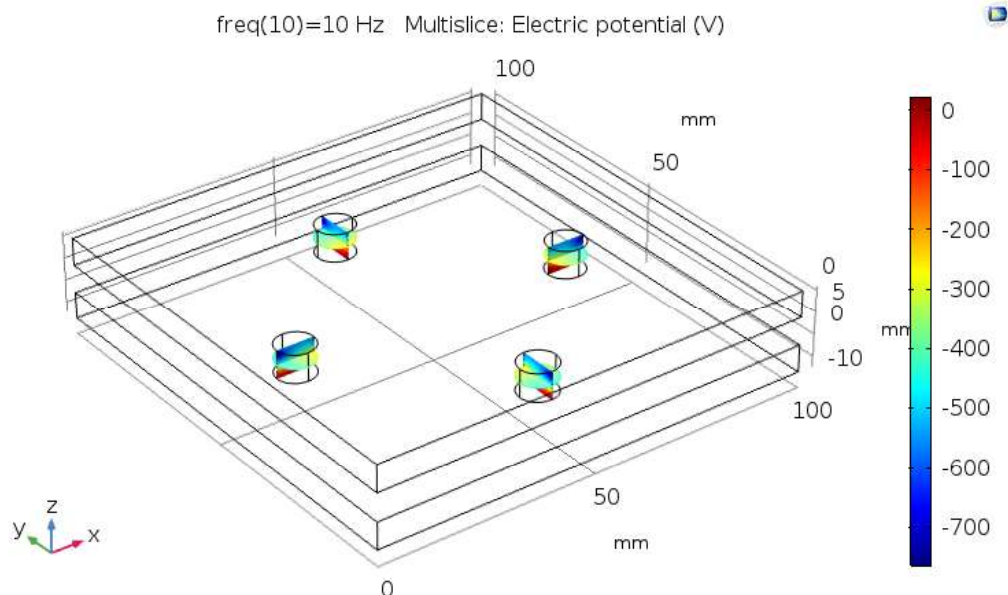
Fonte: O autor (2019).

Figura 57 – Arranjo das células de geometria circular 1 e potencial elétrico para carga de 3 kN



Fonte: O autor (2019).

Figura 58 – Arranjo das células de geometria circular 2 e potencial elétrico para carga de 3 kN



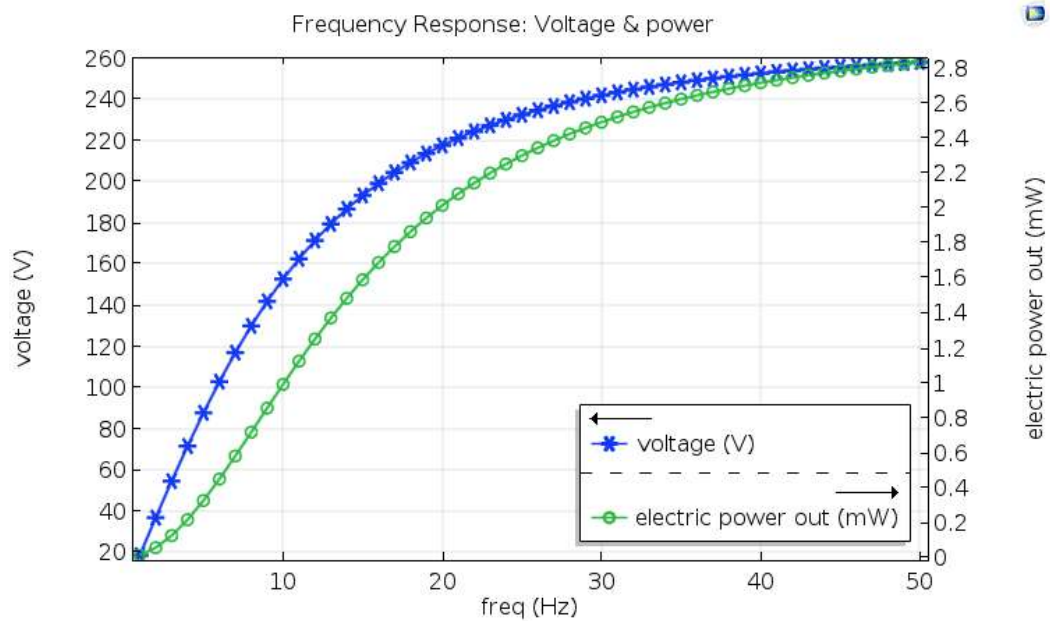
Fonte: O autor (2019).

Ao agrupar as células piezoelétricas em um protótipo, o potencial elétrico do sistema é reduzido, devido ao aumento da área de atuação da carga. Além disso, há a influência da frequência de 10 Hz combinada com a atuação da carga e o fato de a mesma não ser aplicada diretamente na célula. No protótipo, o cobre atua como condutor da propriedade dielétrica

pertencente ao material piezoelétrico para o sistema de captação de energia a ser implantado no pavimento.

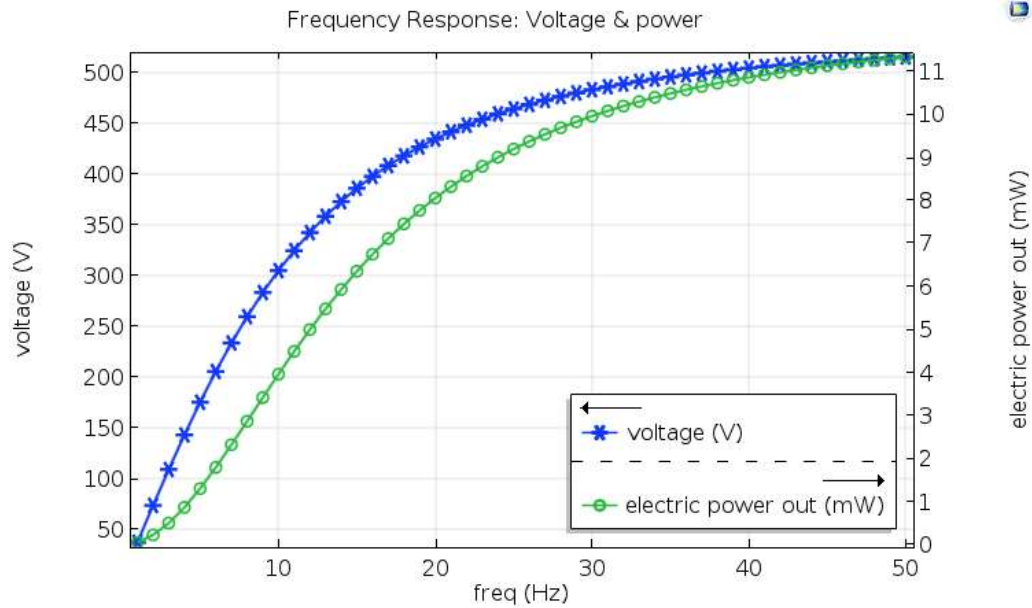
Contudo, a resposta de potencial elétrico não é a considerada para alimentação da rede elétrica. Dessa forma é necessário realizar uma análise dinâmica para verificar a saída de energia elétrica em mW. Essa análise foi realizada para as células de geometria retangular 1 e 4 e para as células de geometria circular 1 e 2. Os Gráficos 9 a 11 plotam a relação da aplicação de diversas frequências com o potencial elétrico e a saída de energia elétrica para a combinação de 4 células de geometria retangular 1. Cada gráfico corresponde a aplicação de carga de 1 kN, 2 kN e 3 kN.

Gráfico 9 – Resposta de frequência da aplicação de 4 células de geometria retangular 1 para 1 kN



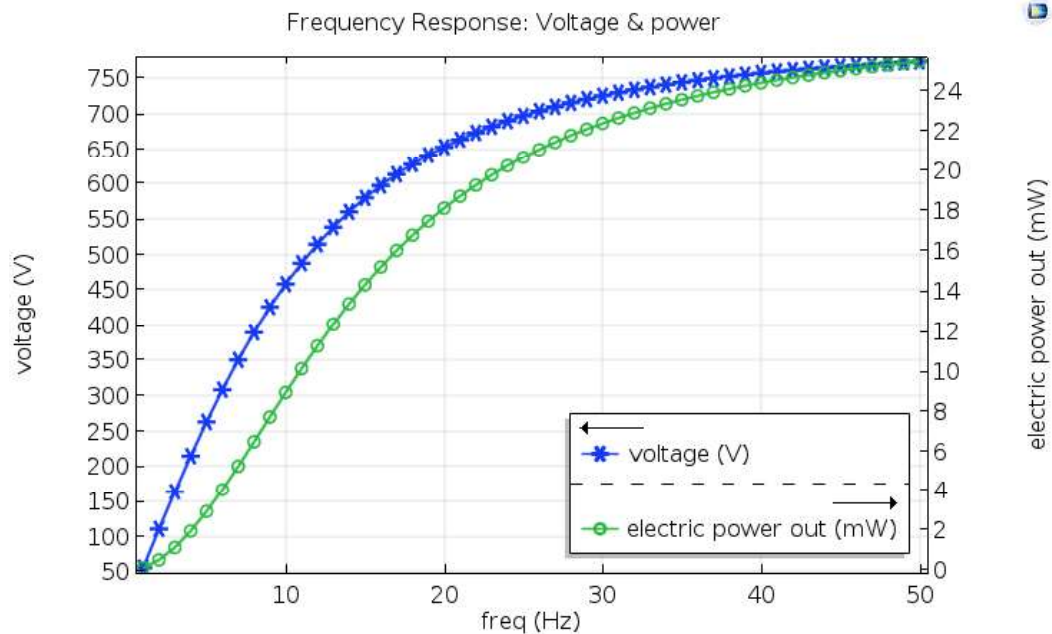
Fonte: O autor (2019).

Gráfico 10 – Resposta de frequência da aplicação de 4 células de geometria retangular 1 para 2 kN



Fonte: O autor (2019).

Gráfico 11 – Resposta de frequência da aplicação de 4 células de geometria retangular 1 para 3 kN



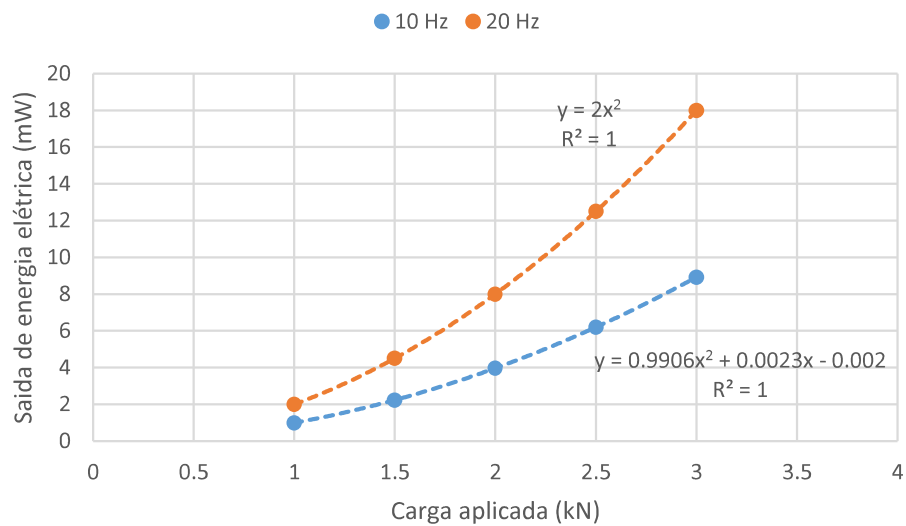
Fonte: O autor (2019).

Com a variação da aplicação das frequências é notado um incremento, tanto na voltagem, quanto na saída de energia elétrica. Esse incremento também é verificado quando a carga aplicada é aumentada. É visível pelos gráficos que a frequência ao se aproximar de 50 Hz

começa a estabilizar os valores de saída. Contudo, no pavimento rodoviário as frequências mais influentes são as de 10 Hz e 20 Hz.

Essa análise permite avaliar que as células piezoelétricas têm uma resposta elétrica maior com frequências elevadas, pois o aumento da frequência reduz o tempo de carregamento nas células piezoelétricas. Os resultados ajudam a determinar os locais em potencial para a instalação desses tipos de módulos de captação de energia nas estradas. O Gráfico 12 mostra a saída de energia elétrica, em mW.

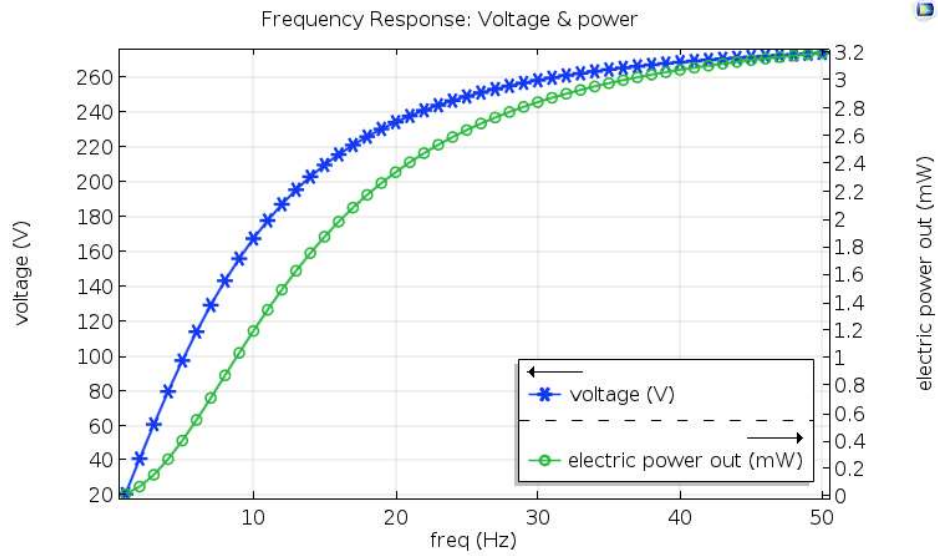
Gráfico 12 – Saída de energia elétrica em relação à carga e frequência para as células de geometria retangular 1



Fonte: O autor (2019).

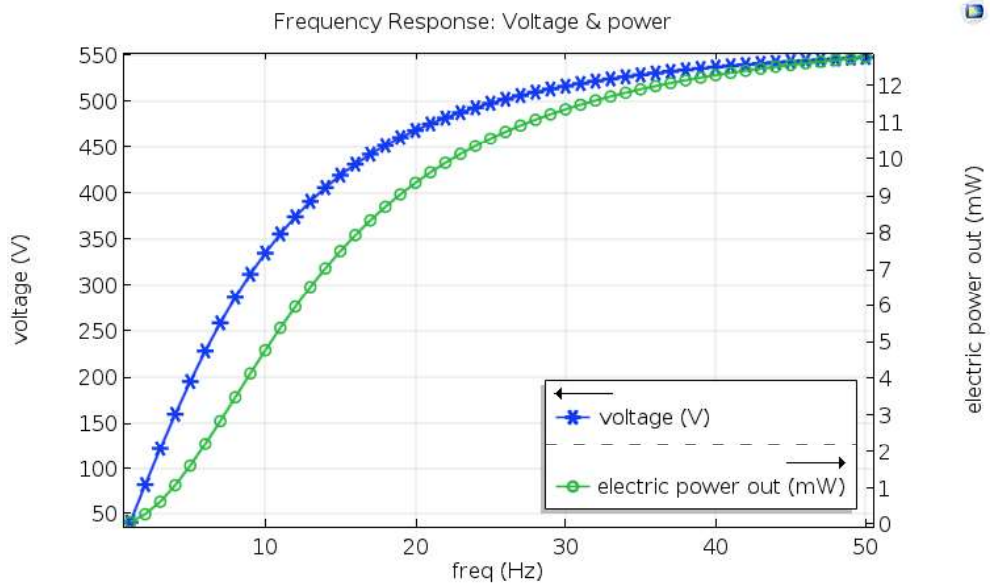
Pelo Gráfico 12 é perceptível que a relação entre carga e saída de energia elétrica é representada por uma função de grau 2. Também é perceptível que aplicada uma frequência maior, a defasagem entre frequências acontece de forma exponencial, conforme a variação de carga. Quanto ao arranjo de células de geometria retangular 4, os Gráficos 13 a 15 mostram as saídas de potencial elétrico e de energia elétrica para as cargas de 1 kN, 2 kN e 3 kN, com a variação de 1 a 50 Hz.

Gráfico 13 – Resposta de frequência da aplicação de 4 células de geometria retangular 4 para 1 kN



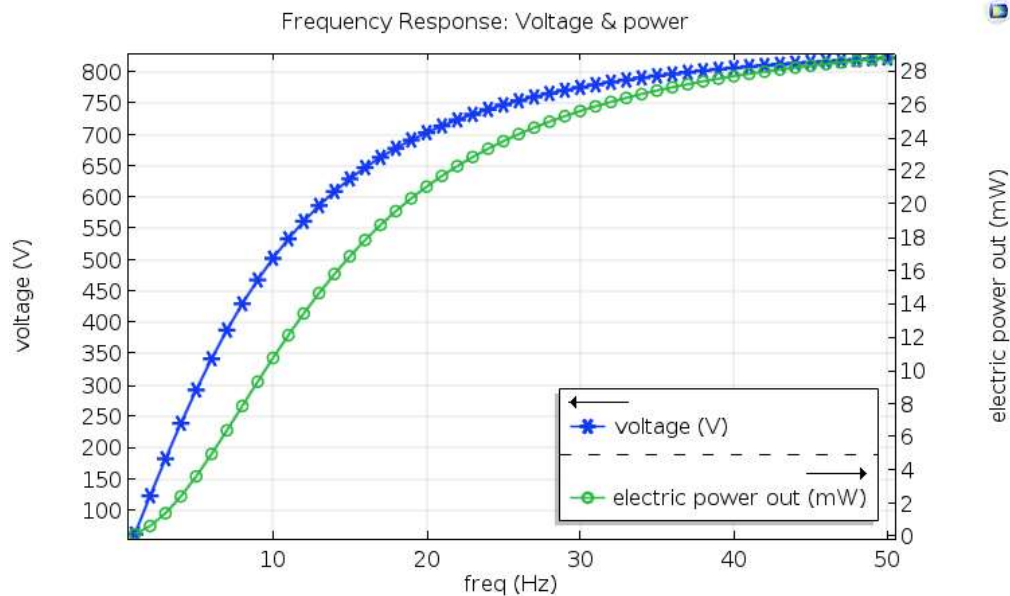
Fonte: O autor (2019).

Gráfico 14 – Resposta de frequência da aplicação de 4 células de geometria retangular 4 para 2 kN



Fonte: O autor (2019).

Gráfico 15 – Resposta de frequência da aplicação de 4 células de geometria retangular 4 para 3 kN

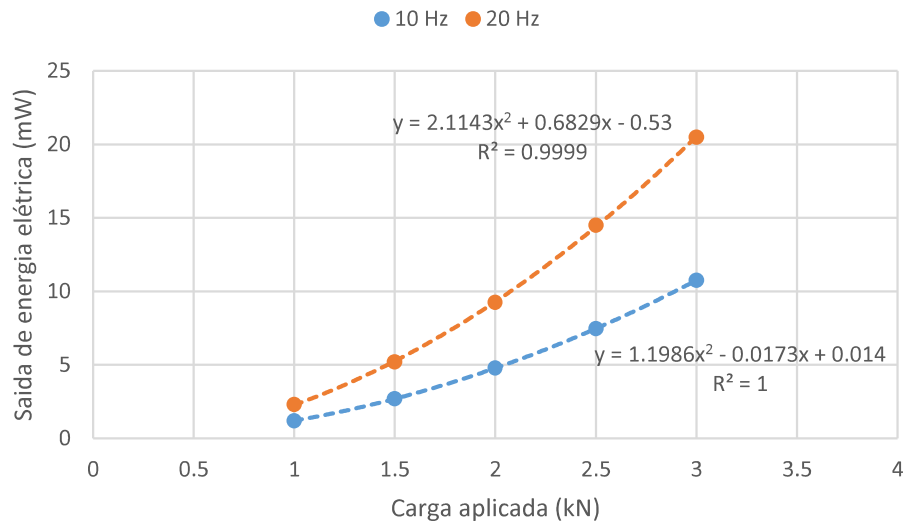


Fonte: O autor (2019).

Como citado, o arranjo de células de geometria retangular 4 foi simulado para verificar se os padrões de incremento de potencial elétrico para a célula unitária são válidos e se eles se aplicam também à saída de energia elétrica. Quanto ao incremento de potencial, esse aumentou em torno de 9 % quando comparadas as geometrias retangulares 1 e 2, o que se assemelha ao observado nas comparações de células unitárias. Esse percentual é superior ao observado nas células unitárias, o que pode ser justificado pelo arranjo das mesmas entre as placas de cobre. Quando comparada a saída de energia elétrica, há um crescimento de 20,6 %, bastante superior em relação ao potencial, mostrando que o aumento de espessura da célula tem influência ainda mais significativa na resposta elétrica.

Da mesma forma que para as células retangulares 1, foi gerado um gráfico para verificar a tendência de geração de energia elétrica, relacionando-as com as frequências de 10 Hz e 20 Hz e as cargas. O Gráfico 16 plota essa relação. Percebe-se, pela sua análise, que as observações relativas as células retangulares 1 se aplicam para as retangulares 4. A simulação seguinte foi relativa ao arranjo das células de geometria circular 1 para verificar se há alguma diferença com relação a geometria, visto que elas possuem mesma área e espessura das células de geometria retangular 1.

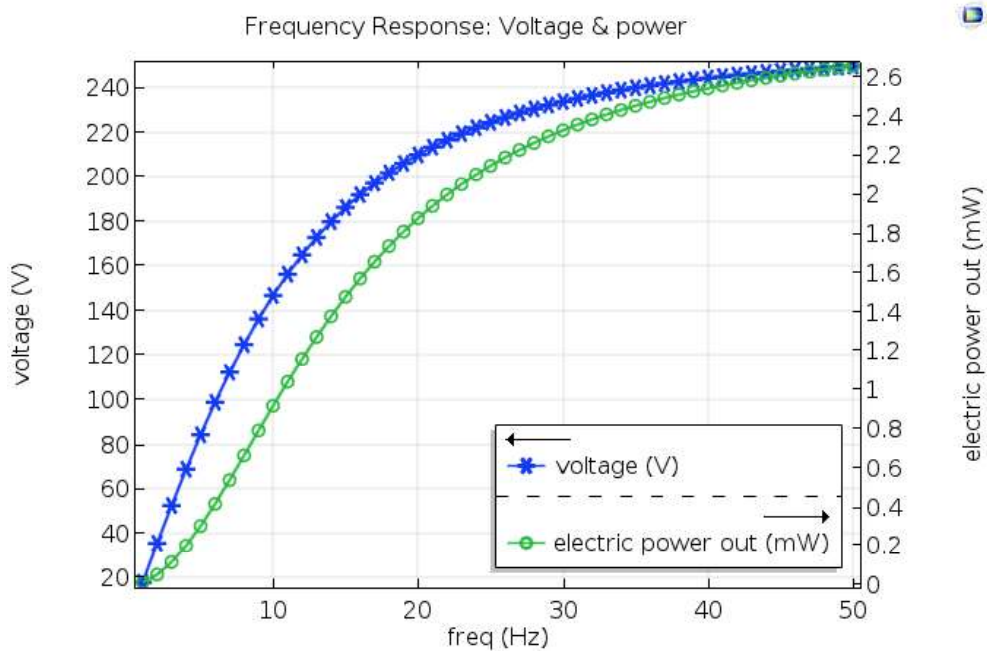
Gráfico 16 – Saída de energia elétrica em relação à carga e frequência para as células de geometria retangular 4



Fonte: O autor (2019).

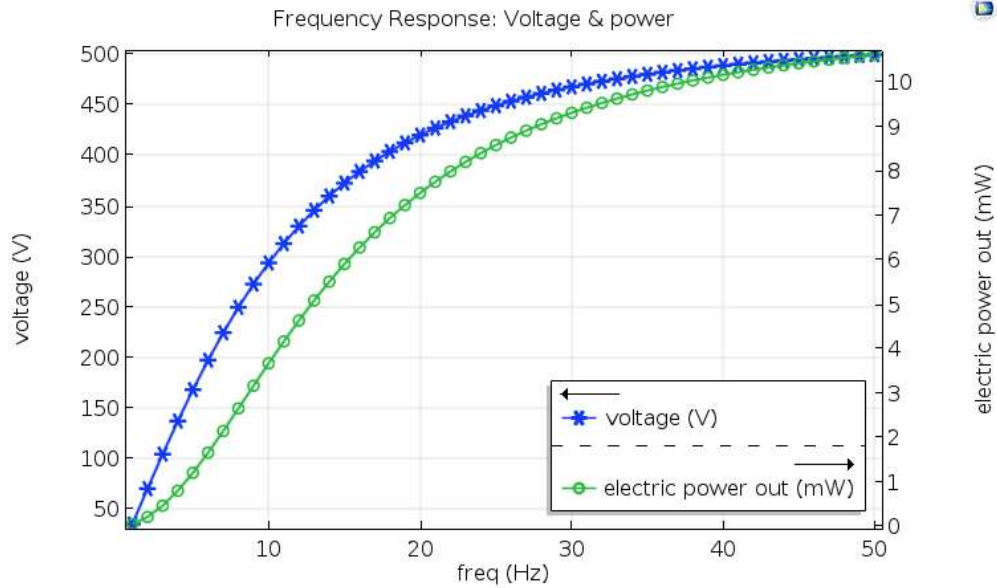
Nos Gráficos 17 a 19 são plotadas as respostas de potencial elétrico e de energia elétrica com a variação das frequências de 1 a 50 Hz e a aplicação das cargas de 1 kN, 2 kN e 3 kN.

Gráfico 17 – Resposta de frequência da aplicação de 4 células de geometria circular 1 para 1 kN



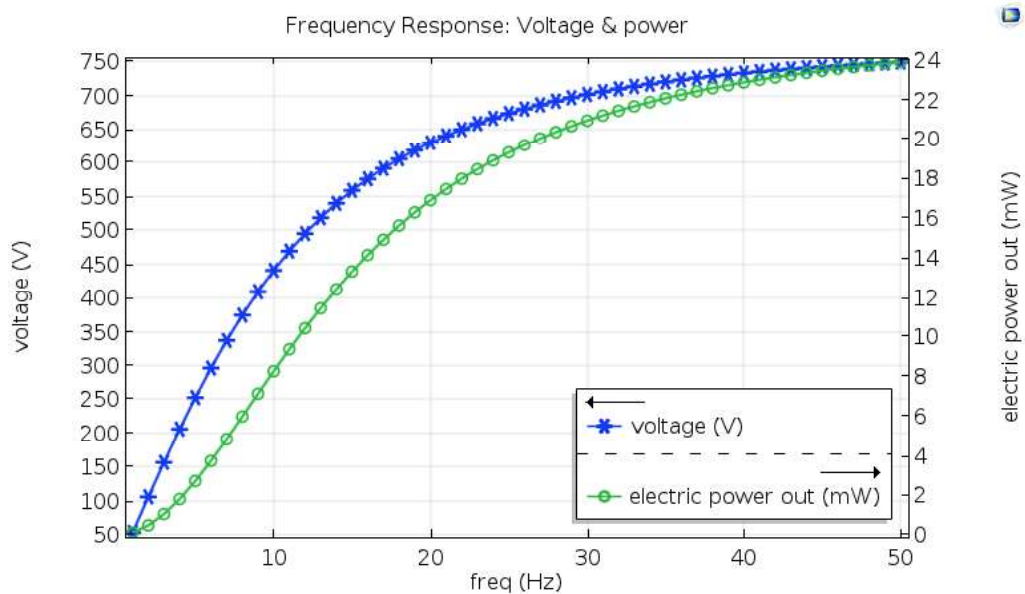
Fonte: O autor (2019).

Gráfico 18 – Resposta de frequência da aplicação de 4 células de geometria circular 1 para 2 kN



Fonte: O autor (2019).

Gráfico 19 – Resposta de frequência da aplicação de 4 células de geometria circular 1 para 3 kN

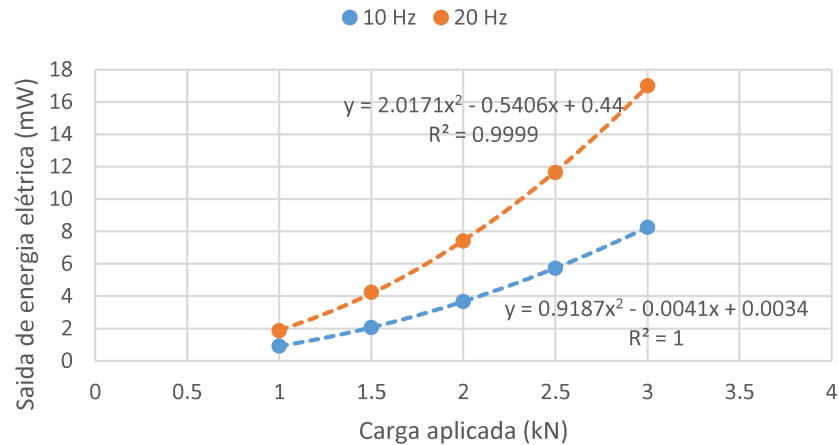


Fonte: O autor (2019).

Pelos gráficos apresentados do arranjo das geometrias circulares 1 em comparação ao das geometrias retangulares 1, nota-se que o potencial elétrico sofreu uma redução em torno de 3,65 % e a energia elétrica uma redução de aproximadamente 7,4 %. Ambas se justificam, como já mencionado, pela limitação de casas decimais do software, onde a área circular 1 ficou

0,0005 % maior quando comparada a área retangular 1. O Gráfico 20 mostra a relação entre as frequências, cargas aplicadas e a saída de energia elétrica.

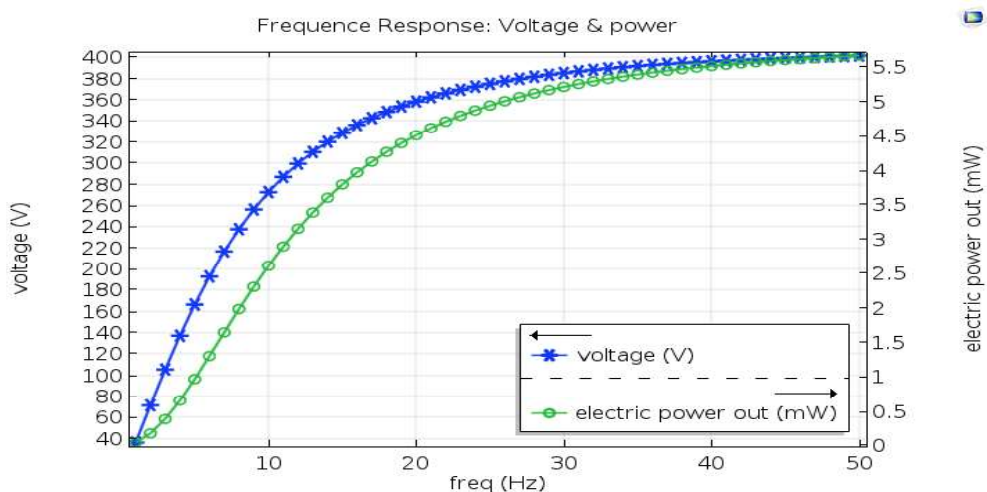
Gráfico 20 – Saída de energia elétrica em relação à carga e frequência para as células de geometria circular 1



Fonte: O autor (2019).

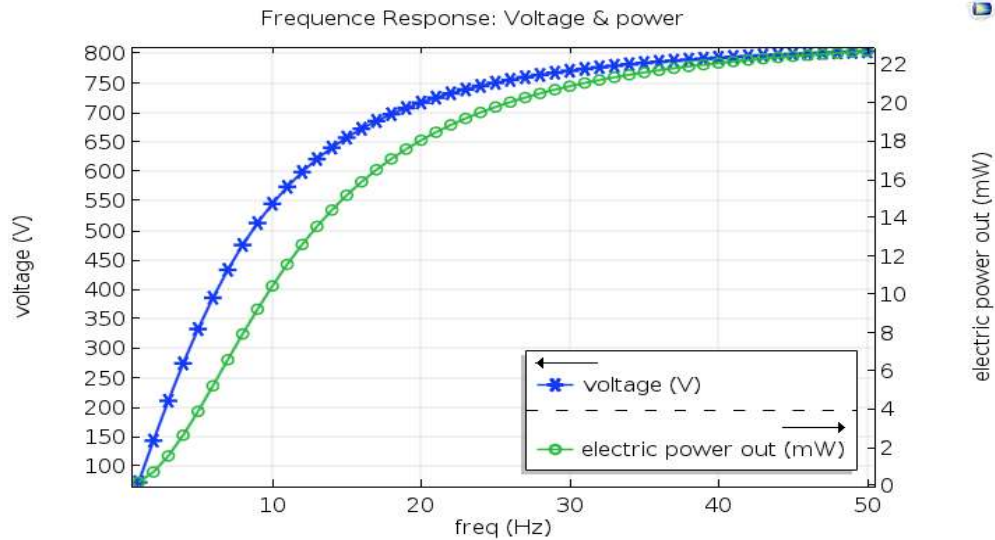
As mesmas considerações referentes aos arranjos das células retangulares 1 e 4 se tornam válidas para o arranjo das células circulares 1, apresentando alto coeficiente de correlação. Por fim, foi simulada a geometria circular 2, por haver disponibilidade em mercado, o que facilitaria o processo de implementação em experimento laboratorial e em campo. Os Gráficos 21 a 23 mostram as respostas de potencial elétrico e energia elétrica com base na aplicação das frequências de 1 a 50 Hz e das cargas de 1 kN, 2 kN e 3 kN.

Gráfico 21 – Resposta de frequência da aplicação de 4 células de geometria circular 2 para 1 kN



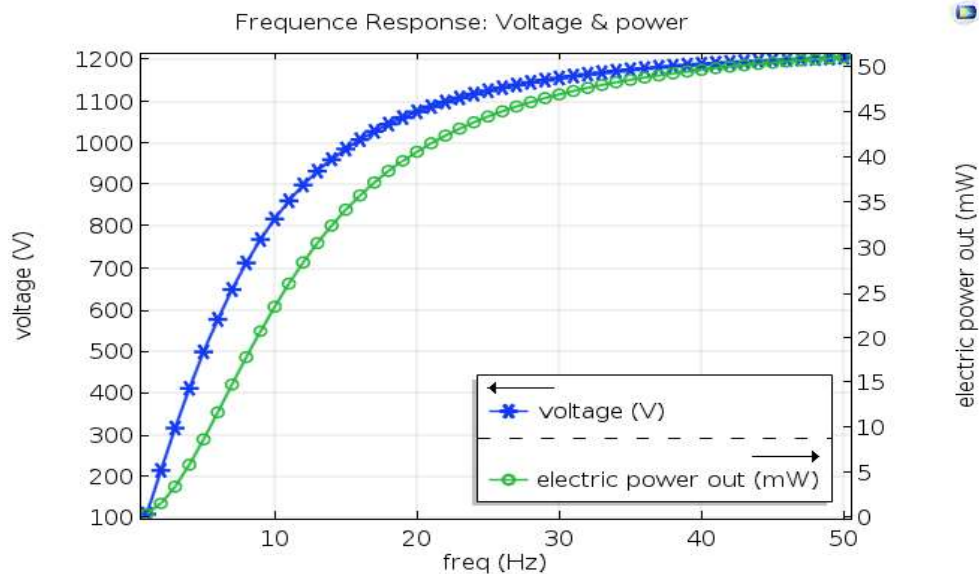
Fonte: O autor (2019).

Gráfico 22 – Resposta de frequência da aplicação de 4 células de geometria circular 2 para 2 kN



Fonte: O autor (2019).

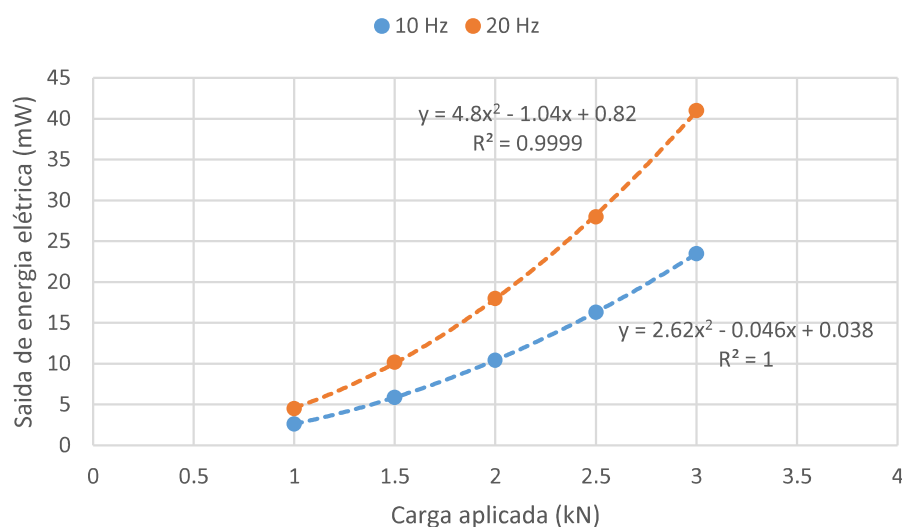
Gráfico 23 – Resposta de frequência da aplicação de 4 células de geometria circular 2 para 3 kN



Fonte: O autor (2019).

A célula circular 2 foi escolhida em detrimento de ter sido a de maior espessura encontrada no mercado. Dessa forma, pelos gráficos plotados acima, é notória a capacidade de resposta, tanto de potencial elétrico como de energia elétrica gerada. Para uma roda de veículo com 3 kN de carga e uma frequência de 20 Hz, a combinação das quatro células chegam a responder mais de 40 mW. O Gráfico 24 mostra a relação entre carga, frequência e resposta elétrica para a combinação exposta.

Gráfico 24 – Saída de energia elétrica em relação à carga e frequência para as células de geometria circular 2



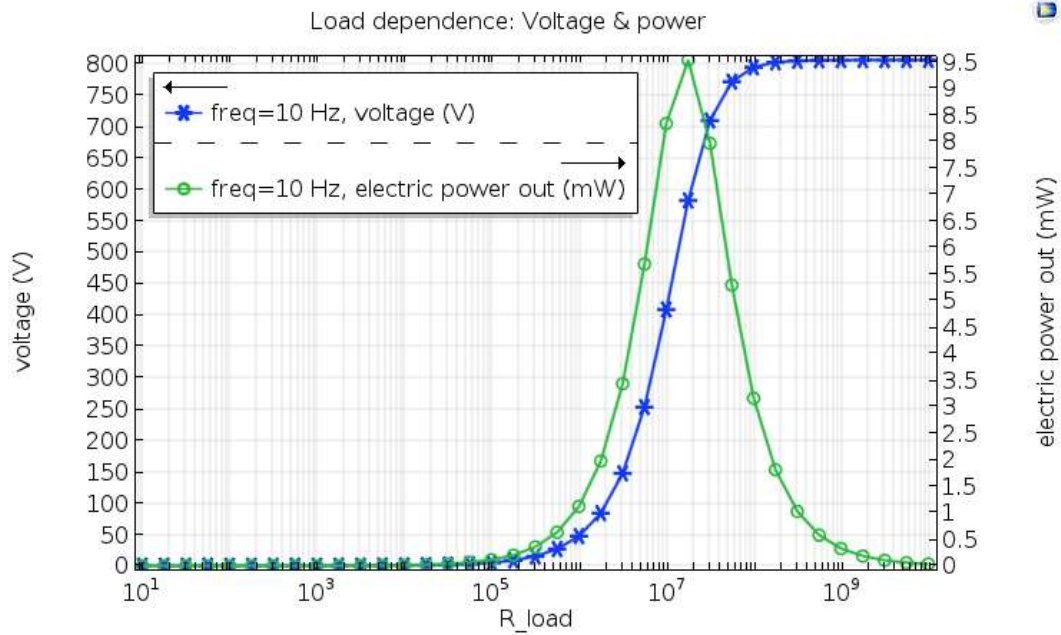
Fonte: O autor (2019).

Os gráficos de saída de energia elétrica permitem realizar a análise de carga para as duas frequências mais atuantes no pavimento rodoviário, de 10 Hz e 20 Hz, devido ao elevado coeficiente de correlação em todas as simulações testadas. Conforme sugerido neles, aumentar a magnitude da carga está associado ao aumento da potência de saída de energia elétrica.

Esses resultados auxiliam na determinação de potenciais locais para instalação desses protótipos com células piezoelétricas. Pode-se sugerir, desse modo, que trechos de rodovias interestaduais com alta velocidade e volume de tráfego, bem como vias expressas, possam ser bons candidatos. Contudo, se implementado em locais com grande fluxo de carros, mas com elevados índices de congestionamento, acrescentando ainda áreas de estacionamento e cruzamentos controlados por sinais de trânsito, essa eficiência pode ser reduzida, visto que os veículos estarão com velocidade tendendo a zero, aliado ainda ao maior tempo de carregamento.

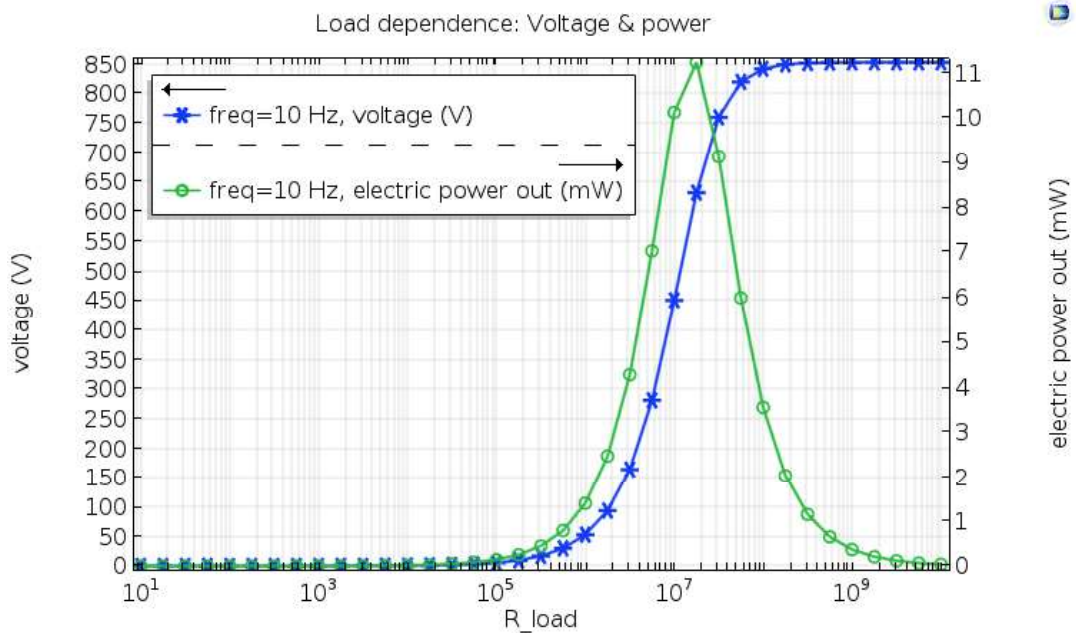
Também é necessária uma avaliação da resistência externa do protótipo. Para isso, foram gerados os Gráficos 25 a 28 que mostram para cada um dos quatro arranjos testados nessa etapa, com frequência de 10 Hz e para a carga de 3 kN, a variação da resposta elétrica em detrimento da variação da resistência externa do protótipo.

Gráfico 25 – Análise de sensibilidade da resistência externa para as células retangulares 1, com 3 kN



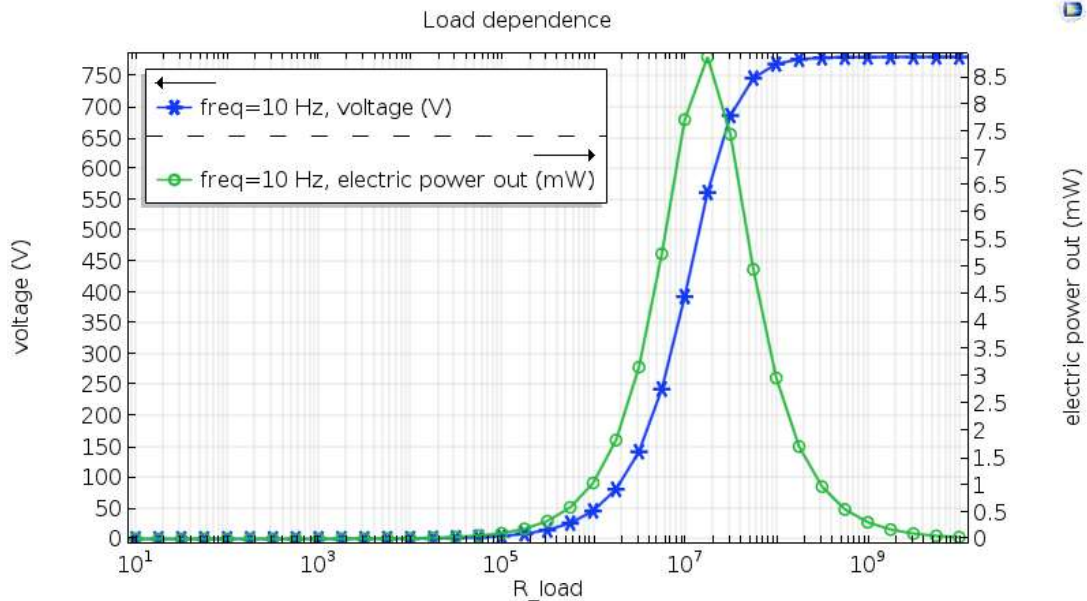
Fonte: O autor (2019)

Gráfico 26 – Análise de sensibilidade da resistência externa para as células retangulares 4, com 3 kN



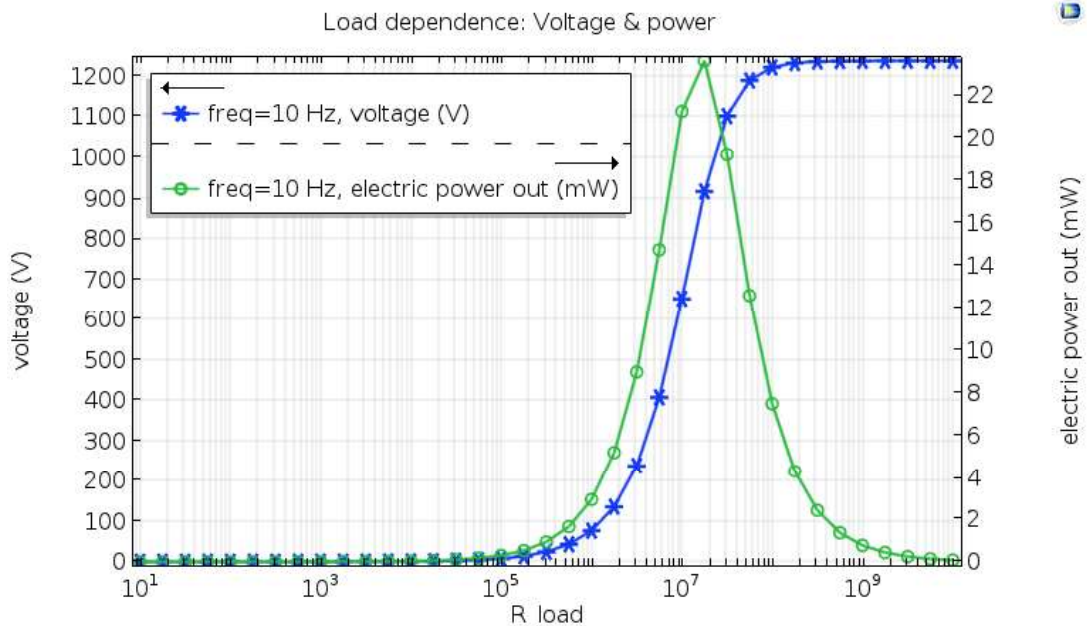
Fonte: O autor (2019)

Gráfico 27 – Análise de sensibilidade da resistência externa para as células circulares 1, com 3 kN



Fonte: O autor (2019)

Gráfico 28 – Análise de sensibilidade da resistência externa para as células circulares 2, com 3 kN



Fonte: O autor (2019)

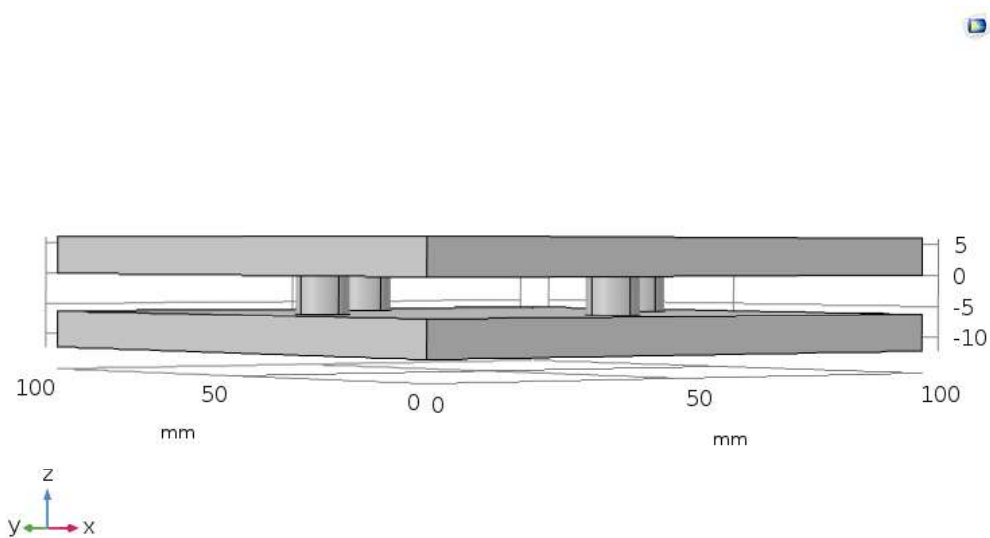
Com as análises dos gráficos, nota-se a necessidade de equiparar as resistências interna e externa. Percebe-se que quando a resistência é igual a interna (calculada teoricamente nas tabelas 3 a 6), a resposta elétrica é máxima. Contudo, na medida que essa resistência é diminuída ou aumentada, a saída de energia elétrica é minimizada.

Diante de todo o exposto nessa seção, permite-se escolher as células de geometria circular 2, tanto pela sua disponibilidade em mercado quanto pela sua resposta elétrica elevada, para simulação de aplicação em trecho teórico de 1 km de extensão, realizando um levantamento de oportunidades.

4.3 Levantamento prévio de oportunidades

O protótipo de captação de energia deve ser construído com placas de cobre, folhas de poliestireno e quatro células piezoelétricas. O procedimento consiste na moldagem das placas de cobre e das folhas de poliestireno, bem como na montagem do protótipo com o auxílio dos parafusos e dos fios elétricos para a ligação com o multímetro, aparelho no qual será medida e monitorada a corrente de saída gerada pelo protótipo. A Figura 59 mostra uma simulação desse protótipo.

Figura 59 – Representação do protótipo com células piezoelétricas circulares 2



Fonte: O autor (2019).

A análise realizada baseou-se na efetuada por Roshani *et al.* (2018), onde analisou-se a capacidade de produção de energia elétrica a partir do protótipo proposto. Foi estudada usando o modelo estatístico presente no Gráfico 24, para a frequência de 10 Hz. Para os cálculos gerais de produção de energia em trânsito, considerou-se que cada módulo de captação de energia media $0,01 \text{ m}^2$ (ou seja, $10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$) e que era instalado apenas no caminho da roda direita da pista do lado direito de cada sentido. Essa análise de instalação parte de observações

em campo, que mostram a maioria dos veículos trafegando próximo aos bordos da rodovia. A composição do volume de tráfego utilizada como entrada na análise de produção de energia foi a seguinte:

- a) extensão da via: 1 km;
- b) velocidade de tráfego: 65 km/h;
- c) volume médio diário (VMD): 600 veículos/dia;
- d) número de faixas: 4;
- e) divisão direcional: 50/50;
- f) caminhões no fluxo do tráfego: 30%;
- g) carros na faixa direita: 50%;
- h) caminhões na faixa direita: 70%;
- i) pneus de carros e caminhões pesando 6,7 kN e 44,5 kN, respectivamente;
- j) cargas inteiras dos pneus foram transmitidas aos elementos piezoelétricos.

A Tabela 9 mostra as etapas de cálculo para a produção de energia elétrica e energia do protótipo para o número de pneus de carros e pneus de caminhão que devem passar por um módulo coletor de energia para a composição de tráfego assumida anteriormente. É válido ressaltar que todos os valores encontrados são em watt, sendo necessária uma análise de dependência do tempo para verificar a produção em watt-hora.

Tabela 9 – Produção de energia elétrica

Veículo	Energia elétrica	Unidade
Pneu de carro/módulo	0,11734	W
Pneu de caminhão/módulo	5,18625	W
Pneu de carros/dia/módulo	35,20200	W
Pneu de caminhões/dia/módulo	653,46700	W
Pneu de carros/ano/módulo	12,84900	kW
Pneu de caminhões/ano/módulo	238,51500	kW

Fonte: O autor (2019).

Para uma rodovia de 1 km, poderiam ser instalados 10.000 módulos de 10 cm × 10 cm, permitindo um espaçamento de 10 cm entre eles, nas bordas da rodovia. Para essa implementação, seriam necessárias 40.000 células piezoelétricas da geometria circular 2. O custo de fabricação desses módulos, por consultas de preços de materiais disponíveis, foram cerca de R\$ 460,60/módulo, considerando apenas as placas de cobre e as células piezoelétricas. Para 1 km de rodovia, esse valor seria estimado em R\$ 4.606.000,00, sendo considerado apenas o valor das células e das placas de cobre, considerando a implementação em toda a extensão da borda na rodovia.

A priori, o custo pode ser elevado, contudo, com a resposta elétrica que pode vir a ser gerada e armazenada, o mesmo pode ser compensado. Essa análise deve ser realizada com minuciosidade, verificando ainda como se daria o processo de instalação, manutenção e reparação desse sistema quando integrado no pavimento.

Pode-se observar que o módulo com 4 elementos piezoelétricos, poderia produzir 251,36 kW de energia por ano, resultando em 2,514 GW com a instalação dos 10.000 módulos, que durante uma vida útil de 10 anos se traduz em 25,514 GW. É evidente o potencial elétrico, podendo ser utilizado para a alimentação da iluminação na própria via ou de instrumentos de controle de tráfego, como semáforos. Além disso, caso armazenada, essa energia pode ser capaz de alimentar residências, sendo necessário um estudo mais aprofundado de como essa rede funcionaria.

Nessa última consideração, ao adotar que a produção de energia se mantém constante com o tempo e que o consumo de uma residência, por dados da EPE de 2018 é de aproximadamente 1.915,80 kWh e que existem 71 milhões de residências, de acordo com projeções relativas ao censo de 2010, seria possível abastecer mais de 1.300 domicílios, dispostos nos dois bordos da rodovia.

No Ceará, de acordo com dados da companhia de distribuição de energia elétrica, o preço do kWh médio é de R\$0,597. Logo, em um ano, cada domicílio gasta, aproximadamente, em média R\$1.500,00. Dessa forma, com a quantidade possível de domicílios em 1 km, o custo de energia seria de aproximadamente R\$ 1.950.000,00, o que em aproximadamente 2 anos e meio já traria retorno financeiro, considerando o investimento apontado.

4.4 Considerações finais

Diante do exposto, verifica-se pelas simulações, com resposta de 100 % da potência elétrica gerada, que em menos de 3 anos, já haveria um retorno para a população quanto a gastos

com energia elétrica. Contudo, é necessário ressaltar que todas as análises foram apenas simulações, requerendo análises laboratoriais e em campo do comportamento da célula estudada. O capítulo seguinte apresenta as principais conclusões deste trabalho.

5 CONCLUSÕES, SUGESTÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

5.1 Principais contribuições do trabalho

Para investigar o sistema mais adequado de geração de energia e os materiais essenciais para sua composição, foram realizadas análises exploratórias em pesquisas sobre os tipos que podem ser aplicados no pavimento. Foram realizadas sete simulações com geometrias distintas para verificar o grau de influência das propriedades geométricas do material. Além disso, foi analisada a resposta elétrica de quatro dessas células combinadas em um protótipo com base no mecanismo de materiais piezoelétricos.

Diversas variáveis simuladas em campo, como magnitude de carga causada por diferentes tipos de veículos e frequência de carga que dependem da velocidade e volume de tráfego, bem como a disposição dos discos piezoelétricos foram examinadas através das etapas metodológicas. Os testes foram conduzidos por simulação no *software* de análises multifísicas, COMSOL.

Apesar de não terem sido realizados experimentos em laboratório, este trabalho contribui com avaliações exploratórias, fornecendo instrumentos que permitam a sociedade conhecer e analisar a possibilidade de implementação de sistemas piezoelétricos ou de painéis solares, aliados a permutadores de calor na estrutura do pavimento. Além disso, as simulações realizadas fornecem parâmetros para identificação da propriedade geométrica que mais influencia na resposta elétrica, permitindo uma concepção de estrutura da célula piezoelétrica mais ideal.

O levantamento de oportunidades realizado é um mecanismo que consegue mostrar a sociedade a influência do sistema no tocante às energias, onde foi realizada uma projeção de todo o potencial elétrico que pode ser gerado em 1 km de rodovia. Contudo, é válido ressaltar que este trabalho possui limitações, onde o *software* pode não responder em conformidade com experimentos de laboratório e de campo, sendo necessárias análises desses cunhos. Inclui-se ainda a questão das premissas adotadas no programa, que podem não representar a aplicação real em campo, visto o incremento das placas de cobre, bem como a adoção dos terminais elétricos.

5.2 Quanto à análise exploratória de informações

A análise exploratória de informações realizada permitiu a identificação do sistema mais propício a ser instalado na estrutura do pavimento, onde dentre os investigados, a energia mecânica foi a escolhida, podendo ser convertida em energia elétrica por meio da piezoelectricidade. Tal escolha se justifica pela maior amplitude de pesquisas, mesmo que a maioria ainda estejam em fases de laboratório, pela vantagem de não depender de fatores climáticos e por seus elementos não precisarem estar em contato direto com o tráfego, como seria o caso dos painéis para a absorção da energia solar.

5.3 Quanto à análise estacionária para as diferentes geometrias testadas

Por meio da análise estática, foi constatado que a espessura das células piezoelétricas exercem mais influência que a área para o aumento do potencial elétrico e da energia elétrica gerada, o que possibilita definir uma geometria que forneça uma resposta elétrica mais elevada. Também foi possível constatar que a geometria circular gera uma redução do potencial elétrico quando comparada a geometria retangular, o que contrapõe o exposto por Roshani *et al.* (2018), onde dizem que a circular fornece uma resposta elétrica maior. Já Baldwin *et al.* (2011) relatam que a geometria retangular é mais resistente quanto a resposta da carga aplicada no pavimento. É válido ressaltar que a geometria circular não ficou com área exatamente igual a geometria retangular, devido limitação de casas decimais do *software*, o que pode ter influenciado na resposta de potencial elétrico.

5.4 Quanto à análise dinâmica para as diferentes geometrias testadas

Foi possível verificar, por meio da análise dinâmica, que a potência exibe uma correlação positiva com a carga e a frequência/velocidade do veículo, onde com o aumento da frequência, o tempo de carregamento nos discos piezoelétricos é reduzido, aumentando os ciclos de carga por segundo, resultando no aumento da potência gerada. Além disso, também foi possível observar que o incremento de células reduz o potencial elétrico, concluindo que o módulo proposto, no caso com 4 células piezoelétricas entre duas placas de cobre, deve possuir a menor quantidade de células por área quadrada, de modo que a carga aplicada não se divida para mais elementos, diminuindo a resposta unitária deles devido à baixa carga aplicada.

Recomenda-se ainda a implementação do módulo proposto em locais com alto volume de tráfego e limites de velocidade elevados, sendo vias expressas e rodovias interestaduais candidatas propícias. É necessária que a resistência interna do módulo seja igual a resistência externa, de forma que não haja perdas relativas a resposta elétrica do material.

5.5 Quanto ao levantamento prévio de oportunidades

A partir do levantamento prévio de oportunidades foi possível constatar que, para a análise realizada, o retorno do investimento seria efetuado em menos de três anos, considerando um número de 1.300 domicílios no entorno dos 1 km de rodovia, produzindo durante a vida útil de projeto, um total de 25,514 GW. Dessa forma, conclui-se que a piezoelectricidade pode ser aplicada em pavimentos, a priori com custos elevados, visto a não disponibilidade em grande escala do material utilizado e ausência de estudos específicos relativos a aplicação em rodovias de alto volume de tráfego.

5.6 Sugestões e recomendações para trabalhos futuros

Por meio do apresentado neste trabalho, recomenda-se a realização de testes laboratoriais para a verificação de toda a análise multifísica realizada nesse trabalho, que como apresentado no item 3.2.3 possui suas limitações. Após os testes em laboratório, é sugerida a análise em ambiente real para verificar a influência do tráfego, bem como uma análise detalhada sobre o melhor local de aplicação desse instrumento na rodovia.

Também sugere-se modificar a estrutura do módulo proposto, com diferentes arranjos e diversas quantidades de células com variadas geometrias, de modo a ter um banco de dados que possibilite a escolha da melhor geometria para uma determinada região. Além disso, são necessários estudos de como e onde armazenar toda essa energia produzida, visto que a carga estacionária não produz resposta elétrica, sendo necessário um fluxo ininterrupto de veículos, situação irreal, para a geração de toda a energia projetada.

REFERÊNCIAS

ABRAMOVICH, H. *et al.* **Multi-Layermodular Energy Harvestingapparatus, Systemand Method.** USA nº US2010/0045111A1. 2010a.

ABRAMOVICH, H. *et al.* **Modular Piezoelectric Generators.** IL nº WO2010116348A1. 2010b.

ABRAMOVICH, H. *et al.* **Piezoelectric-Based Weigh-In-Motion System and Method for Moving Vehicles.** IL nº WO2012/038955A1. 2012.

Agência Nacional de Transportes Terrestres – ANTT. **Estratégias de eficiência energética em praças de pedágio rodoviário.** Relatório Final de Pesquisa RDT – ANTT, Triunfo | CONCEPA. [s.l.]. 2018. Disponível em: http://www.antt.gov.br/backend/galeria/arquivos/2018/08/22/Relatorio_Final.pdf. Acesso em: 10 out. 2019

ANTUNES, Evelise de Godoy; SOUSA, Máira Nunes de; SCHERTEL, Marina Neubauer da Costa. **Piso que transforma energia mecânica em eletricidade.** Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

APS, M. **Classificação da Aderência Pneu-Pavimento pelo Índice Combinado IFI – International Friction Index para Revestimentos Asfálticos.** 2006. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

BALDWIN, J. D. *et al.* Energy harvesting on highway bridges. **Oklahoma Department Of Transportation**, Oklahoma, v. 1, n. 1, p. 01-26, jan. 2011.

BEZERRA JÚNIOR, Manoel Henrique. **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) – Departamento de Telemática, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, Fortaleza, 2015.

CEARÁ. Eduardo Sávio Passos Rodrigues Martins. Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos - Funceme (Org.). **Atlas Solarimétrico do Ceará.** Fortaleza: S.i., 2010. Disponível em: http://www.adece.ce.gov.br/phocadownload/Energia/atlas_solarimetrico%20ceara_2011.pdf. Acesso em: 05 mar. 2019.

CEARÁ. Estudos de Megatendências da Ey. Governo do Estado do Ceará (Ed.). **Estudo de Tendências de Longo Prazo: Ceará 2050.** 2018a. Disponível em: http://www.ceara2050.ce.gov.br/api/wp-content/uploads/2019/01/ceara-2050-astef_produto-2-2_estudo-de-tendencias_v-5-0.pdf. Acesso em: 20 fev. 2019.

CEARÁ. Magda Helena de Araújo Maia. Governo do Estado do Ceará. **Projeto Ceará 2050 estudo setorial especial: recursos naturais e ecologia.** 2018b. Disponível em: <http://www.ceara2050.ce.gov.br/api/wp-content/uploads/2018/10/ceara-2050-estudo-setorial-especial-recursos-naturais-e-ecologia.pdf>. Acesso em: 20 fev. 2019.

CRAVO, Leandro da Silva. **Geração de Energia nos Pavimentos Rodoviários**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil na Especialidade de Urbanismo, Transportes e Vias de Comunicação) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Coimbra, Coimbra, 2014.

CURITIBA testa ‘ciclovía do futuro’ no Centro Cívico. *Tribuna PR*, Curitiba, 21 julho 2018. Disponível em: <https://www.tribunapr.com.br/noticias/curitiba-regiao/curitiba-testa-cicloviao-do-futuro-no-centro-civico/>. Acesso em 8 out. 2019.

DEZFOOLI, A. S. *et al.* Solar pavement: A new emerging technology. **Elsevier**. Tehran, v. 149, n.1, p. 272-284. jun. 2017.

DUARTE, Francisco; FERREIRA, Adelino. Parque . Sistema de geração de energia elétrica nos pavimentos rodoviários. *In: CONGRESSO RODOVIÁRIO PORTUGUÊS*, 8., 2016, Lisboa. **Anais**. Lisboa: CRP, 2016. p. 1-10.

DUTTA, Soumitra. **The Global Innovation Index 2011: Accelerating Growth and Development**. Fontainebleau: INSEAD, 2011.

EFTHYMIOU, Chrysanthi *et al.* Development and testing of photovoltaic pavement for heat island mitigation. **Solar Energy**, [s.l.], v. 130, p.148-160, jun. 2016. Elsevier BV.

ELKINGTON, J. **Cannibals with forks**. Canada: New Society, 1999.

Empresa de Pesquisa Energética – EPE. **Cenários de Demanda para o PNE 2050**. 2. ed. Rio de Janeiro: s.i., 2018. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-227/topico-202/Cen%C3%A1rios%20de%20Demanda.pdf>. Acesso em: 05 mar. 2019.

GIL, A. C. **Métodos e Técnicas de Pesquisa Social**. 6ª ed. São Paulo: Atlas, 2008.

GULDENTOPS, G. *et al.* Performance of a pavement solar energy collector: Model development and validation. **Applied Energy**, [s.l.], v. 163, p.180-189, fev. 2016. Elsevier BV.

JUNG, I. *et al.* Flexible piezoelectric polymer-based energy harvesting system for roadway applications. **Applied Energy**, [s.l.], v. 197, p.222-229, jul. 2017. Elsevier BV.

KIM, S.; SHEN, J.; AHAD, M.. Piezoelectric-Based Energy Harvesting Technology for Roadway Sustainability. **International Journal of Applied Science and Technology**, New York, v. 5, n. 1, p.20-25, fev. 2015.

MEDINA, J. e MOTTA, L.M.G. **Mecânica dos Pavimentos**. 2ª ed. Rio de Janeiro: Edição dos autores, 2005.

MOURE, A. *et al.* Feasible integration in asphalt of piezoelectric cymbals for vibration energy harvesting. **Energy Conversion and Management**, [s.l.], v. 112, p.246-253, mar. 2016. Elsevier BV.

NASIR, D. S.; HUGHES, B. R.; CALAUTIT, J. K. A CFD analysis of several design parameters of a road pavement solar collector (RPSC) for urban application. **Applied Energy**, [s.l.], v. 186, p.436-449, jan. 2017. Elsevier BV.

PAPAGIANNAKIS, A. *et al.* Energy Harvesting from Roadways. **Procedia Computer Science**, [s.l.], v. 83, p.758-765, 2016. Elsevier BV.

PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. [s.l: s.n.], 2014.

ROSHANI, H. *et al.* Theoretical and Experimental Evaluation of Two Roadway Piezoelectric-Based Energy Harvesting Prototypes. **Journal Of Materials In Civil Engineering**, [s.l.], v. 30, n. 2, p.04017264-04017264, fev. 2018. American Society of Civil Engineers (ASCE).

SANTOS, Vanessa Carvalho. **Aplicação de Sistemas de Geração de Energia nos Pavimentos Rodoviários** 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil na Especialidade de Urbanismo, Transportes e Vias de Comunicação) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Coimbra, Coimbra, 2014.

SOBRECARGA da Terra 2019: Planeta atinge esgotamento de recursos naturais mais cedo em toda a série histórica. 2019. **Portal de notícias G1**. Disponível em: <https://g1.globo.com/natureza/noticia/2019/07/29/sobrecarga-da-terra-2019-planeta-atinge-esgotamento-de-recursos-naturais-mais-cedo-em-toda-a-serie-historica.ghtml>. Acesso em: 01 ago. 2019.

SOLAR ROADWAY: A real solution. **Solar Roadway**. Disponível em: <https://solarroadways.com/research/funding/>. Acesso em: 04 de mar. 2019.

TOLMASQUIM, Maurício Tiomno. **Energia Renovável: Hidráulica, Biomassa, Eólica, Solar, Oceânica**. Rio de Janeiro: EPE, 2016. 452 p.

XIONG, H. *et al.* Piezoelectric Energy Harvesting from Traffic Induced Deformation of Pavements. **International Journal of Pavement Research and Technology**, Virginia Tech, v. 5, n. 5, p.333-337, set. 2012.

XIONG, Haocheng. **Piezoelectric Energy Harvesting for Public Roadways**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, 2014.

ZHANG, Z.; XIANG, H.; SHI, Z.. Modeling on piezoelectric energy harvesting from pavements under traffic loads. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, [s.l.], v. 27, n. 4, p.567-578, 17 mar. 2015. SAGE Publications.

ZHAO, H.; YU, J.; LING, J. Finite element analysis of Cymbal piezoelectric transducers for harvesting energy from asphalt pavement. **Journal of the Ceramic Society of Japan**. Tokyo, p. 909-915. ago. 2010.

ZHAO, H. *et al.* Harvesting energy from asphalt pavement by piezoelectric generator. **Journal of Wuhan University of Technology-mater. Sci. Ed.**, [s.l.], v. 29, n. 5, p.933-937, out. 2014. Springer Science and Business Media LLC.