

Um estudo preliminar da piezoelectricidade como fonte renovável de energia aplicada aos pavimentos do Colégio Militar de Fortaleza

A preliminary study of piezoelectricity as a renewable energy source applied to the pavements of the Fortaleza Military School in Ceará State- Brazil

Un estudio preliminar de piezoelectricidad como fuente renovable de energía aplicada a los pavimentos del Colegio Militar de Fortaleza

Resumo


A demanda crescente por energia elétrica na sociedade atual torna o tema universal para o desenvolvimento econômico, social e ambiental. Dessa forma, são necessárias alternativas de produção e geração de energia que possibilitem uma redução de danos ambientais e seja capaz de suprir o sistema. A energia piezoelétrica representa uma excelente alternativa de energia limpa, visto que não depende do clima ou de grandes áreas para sua aplicação. O estudo aqui apresentado visa investigar o potencial e a viabilidade da energia piezoelétrica como uma alternativa de energia limpa para utilização em projetos autossustentáveis de pavimentos. Para isso, foram abordadas as características e propriedades dos materiais piezoelétricos, identificados os benefícios do emprego desse tipo de energia e foram identificados os diversos espaços onde a piezoelectricidade pode ser usada, além de ter sido proposto o seu uso no Colégio Militar de Fortaleza e no Ceará. No intuito da realização de testes físicos, foi elaborado um tapete piezoelétrico, ao qual foi submetido a passagem de alunos e professores do colégio. Foi observado que as células acendem com uma maior facilidade quanto maior o peso e maior a velocidade utilizada pelo pedestre. Por meio de experimentos com um protótipo de revestimento de tratamento superficial foi possível também verificar a eficiência de células piezoelétricas quando utilizadas para iluminação de lâmpadas leds.


Palavras-chave: Sustentabilidade. Célula piezoelétrica. Tratamento superficial duplo.

Abstract


The growing demand for electricity in today's society makes it a universal theme for economic, social, and environmental development. Thus, there is a need for alternatives for the production and generation of energy that make it possible to reduce environmental damage and supply the system. Piezoelectric energy represents an excellent clean energy alternative as it does not depend on climate or large areas for its application. The study presented here aims to investigate the potential and feasibility of piezoelectric energy as a clean energy alternative for use in self-sustainable projects of pavements. To this end, the characteristics and properties of piezoelectric materials were addressed, the benefits of using this type of energy were identified, and the different spaces where piezoelectricity can be used, in addition to its use at the Colégio Militar de Fortaleza (CMF) and in Ceará. A piezoelectric mat was designed to carry out physical tests, which were submitted to the passage of students and teachers from the college. It was observed that the cells lit more ease when the weight was higher, and the speed used by the pedestrian was higher. Through experiments with a surface treatment coating prototype, it was also possible to verify the efficiency of piezoelectric cells when used for lighting LED lamps.

Keywords: Sustainability. Piezoelectric cell. Double surface treatment.

Bruno Cavalcante Mota 
brunomota@det.ufc.br
Universidade Federal do
Ceará

Bruno Albuquerque Neto 
brunoalbuq1045@gmail.com
Colégio Militar de Fortaleza

Samuel Goersch Fontenele de Almeida 
samuelgoersch@gmail.com
Colégio Militar de Fortaleza

Thiago Frota Maranhão 
thiagofm.br@gmail.com
Colégio Militar de Fortaleza

Francisca das Chagas Soares Reis 
proffranciscareis@gmail.com
Colégio Militar de Fortaleza

Suely Helena de Araújo Barroso 
suely@det.ufc.br
Universidade Federal do
Ceará

Resumen

La creciente demanda por energía eléctrica en la sociedad actual haz del tema universal para el desarrollo económico, social y ambiental. De esta manera, son necesarias alternativas de producción y generación de energía que permitan una reducción de daños ambientales y sea capaz de suplir el sistema. La energía piezoeléctrica representa una excelente alternativa de energía limpia, ya que no depende de clima o de grandes áreas para su aplicación. Este estudio objetivó investigar el potencial y la viabilidad de la energía piezoeléctrica como una alternativa de energía limpia para utilización en proyectos sostenibles de pavimentos. Para esto, fueron enfocadas las características y propiedades de los materiales piezoeléctricos, identificados los beneficios de emplear este tipo de energía y los diversos espacios dónde la piezoelectricidad puede ser utilizada, además de haber sido propuesto su uso en el Colegio Militar de Fortaleza y en Ceará. Con objetivo de realizar testes físicos, fue creado un tapete piezoeléctrico, lo cual fue sometido al paso de alumnos y profesores del colegio. Fue observado que las células encendían con mayor facilidad cuanto mayor el peso y mayor la velocidad utilizado por el peatón. Utilizando un prototipo de revestimiento de tratamiento superficial para realizar experimentos, fue posible también verificar la eficiencia de células de células piezoeléctricas cuando utilizadas para iluminación de bombillas LED.

Palabras-clave: Sostenibilidad; Célula piezoeléctrica; Tratamiento superficial duplo.

1 Introdução

Com o progresso da humanidade e a busca pelo desenvolvimento econômico e sustentável, presencia-se uma crescente demanda por energia elétrica, algo cada vez mais essencial na sociedade atual. Essa, por sua vez, é obtida principalmente através de usinas hidrelétricas que, de acordo com a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), representou 66,6 % da produção total. As produções de energia elétrica por gás natural e biomassa aparecem logo em seguida com 8,6 % e 8,5 %, respectivamente. Contudo, ao analisar a produção interna total de energia, a maior parcela é decorrente do petróleo e seus derivados com 34,5 %, englobando altos teores de poluição do ar (EPE, 2019a).

Dessa forma, tem-se buscado novas fontes de energias renováveis para diminuir os impactos ao meio ambiente. De acordo com exposto no Plano Decenal de Expansão de Energia de 2029, a parcela relativa à produção de energia renovável chegará a 48 %, contribuindo diretamente para um desenvolvimento sustentável mais efetivo (EPE, 2019b). Segundo Vilani e Machado (2009, p.53), “a demanda por alternativas tecnológicas voltadas para o melhor aproveitamento da energia gerada no país é um dos principais focos de trabalho a ser desenvolvido na busca por um desenvolvimento sustentável”. Após uma vasta pesquisa acerca da política ambiental brasileira, os pesquisadores reforçam a necessidade da “elaboração de políticas públicas de incentivo e financiamento para o desenvolvimento e a utilização de fontes alternativas de energia” (VILANI; MACHADO, 2009, p.55).

Pesquisas na área da *Energy Harvesting* (em português, Captação de Energia) têm sido mais frequentes nos últimos 10 anos. Essa é uma área da engenharia que aborda a captação, a conversão e o armazenamento de energias renováveis. Gomes *et al.* (2019) mapearam o potencial solar para microgeração de energia elétrica do centro urbano de uma cidade no sul da Bahia. Segundo os autores, estima-se que o potencial de geração de energia elétrica é compatível com o de uma usina de médio porte, gerando 27,44 MW de potência. Logo, a energia elétrica produzida é capaz de suprir a demanda da cidade a partir da distribuição de sistemas de microgeração.

Contudo, Franco (2019) ressalta que a capacidade de carga do planeta não seria capaz de atender permanentemente os fluxos de matéria e energia solicitados pela expansão do sistema capitalista. Sendo assim, além das fontes de energia já conhecidas – como a hídrica, eólica, solar, térmica e energia dos oceanos, algumas pesquisas, recentemente, vêm utilizando o pavimento rodoviário como uma fonte geradora de energia, principalmente por esse sistema não depender de fatores climáticos, como seria o caso das energias solar e eólica.

Tendo em vista a motivação de contribuir no tema de *captação de energia*, os autores do presente trabalho iniciaram os primeiros estudos desse tema em 2016. Assim, o estudo aqui apresentado tem o objetivo geral de investigar o potencial e a viabilidade da energia piezoeléctrica como uma alternativa de energia limpa para

utilização em projetos rodoviários autossustentáveis. Essa energia piezoelétrica ocorre devido a obtenção de uma diferença de potencial elétrico a partir da deformação ou vibração exercida em materiais específicos. Para tanto, foram estabelecidos alguns objetivos específicos, tais como: (i) realizar uma revisão bibliográfica acerca da piezoelectricidade, tendo em vista que o assunto é novo na área de pavimentação; (ii) abordar as características e propriedades dos materiais piezoelétricos, identificados os benefícios do emprego desse tipo de energia e os diversos espaços onde a piezoelectricidade pode ser usada; e (iii) desenvolver protótipos para geração de energia piezoelétrica.

2 Revisão bibliográfica

A energia piezoelétrica é uma fonte alternativa, limpa e renovável de energia. O efeito *piezo* foi descoberto pelos irmãos Currie que observaram que a polarização elétrica era proporcional à tensão (pressão, força) aplicada no material estudado. O material, por sua vez, ao ser deformado, tem seus centros de simetria das cargas negativas e positivas diferindo. Assim, essa diferença de cargas é captada na superfície do material, ou através de condutores, gerando, dessa maneira, energia elétrica (ANTUNES *et al.*, 2014).

Existem duas formas de ocorrência do efeito piezoelectrico, sendo tanto no sentido direto como no sentido inverso. O efeito direto ocorre devido à conversão de energia mecânica em elétrica, através do deslocamento da posição relativa dos íons do material. Quando isso ocorre, há um deslocamento dos dipolos elétricos de suas posições de equilíbrio, gerando uma alteração no diferencial de carga ao longo do cristal. Enquanto que no efeito inverso há a transformação de energia elétrica em mecânica por meio da aplicação de uma diferença de potencial no material piezoelétrico (VAN VLACK, 1970).

Os materiais utilizados para a produção da energia piezoelétrica são geralmente alguns tipos de cerâmicas sintetizadas em laboratório e muito raramente cristais, sendo o quartzo o mais utilizado. A energia piezoelétrica representa uma excelente alternativa de energia limpa sem que sejam causados danos ao meio ambiente, visto que não depende do clima ou de grandes áreas para sua aplicação.

Foi investigado, por Xiang *et al.* (2013), a captação de energia a partir de deformações do pavimento sob tráfego em movimento utilizando um gerador piezoelétrico. Por meio de uma viga infinita de Euler-Bernoulli assente (firmado) numa fundação Winkler, verificou-se que a velocidade do veículo, o módulo de elasticidade da fundação e o amortecimento do sistema foram determinados analiticamente como sendo os fatores mais influentes no desempenho do gerador de energia. Para um veículo com velocidade de 108 km/h, a potência máxima gerada por uma célula piezoelétrica com dimensão de $1 \times 1 \times 0,1 \text{ cm}^3$ foi de 0,501 W, obtido através de uma carga resistiva correspondente de 500 k Ω .

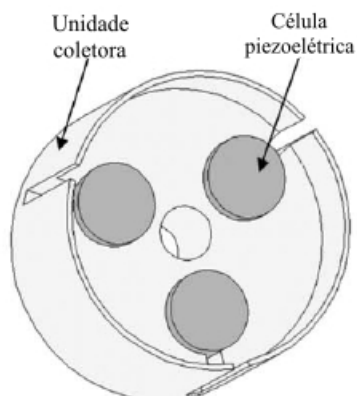
Uma análise do efeito piezoelectrico – em campo – foi realizada em quatro locais de pedágio com grande fluxo de veículos para estimar a produção de kWh. Nesse experimento, as placas foram instaladas exatamente sob as faixas de rodagem, uma vez que as faixas de pedágio já estavam projetadas para receber veículos com um determinado tamanho de eixo entre rodas. Isso permitiu uma redução dos custos de instalação do projeto. Durante um ano, foi medida, através de uma calculadora de energia veicular, a produção de 25.505.670,18 kWh considerando a soma de três cenários analisados em pontos distintos da Grécia: (i) quatro praças de pedágio nas cidades de Katechaki, Koropi, Roupaki e Metamorfoosi; (ii) rota fechada entre Kimis-Kifissias e Athinon-Lamias-Iraklio e (iii) estações de pedágio em Metamorfoosi e rota fechada entre Kimis-Kifissias (KOKKINOPOULOS *et al.*, 2014).

A captação de energia elétrica através do mecanismo piezoelectrico tem mostrado vantagens quando comparada aos outros métodos de obtenção de energia limpa como a energia eólica, solar e a térmica. Kokkinopoulos *et al.* (2014) também compararam alguns aspectos ambientais e diferentes tecnologias para a obtenção de energia e foi observado que a piezoelectricidade apresentou grandes vantagens em comparação às outras alternativas de obtenção de energia por combustíveis fósseis e por energias renováveis.

Um sistema de energia piezoelétrica foi apresentado por Jiang *et al.* (2014) para coletar energia de rodovias por meio do tráfego. O coletor consiste numa plataforma equipada com três unidades de células piezoelétricas. Os veículos passam por cima da plataforma que fica integrada ao pavimento. Cada protótipo é composto por três células piezoelétricas com multicamadas, localizadas num arranjo circular, como apresentado na Figura 1. Um protótipo de escala laboratorial foi fabricado e testado com uma mesa de agitação para verificar o modelo

desenvolvido para o sistema. Utilizando o modelo verificado, uma potência máxima de 2000 Wh^{-1} foi estimada para a colheita do tráfego rodoviário com 2000 veículos/h com 100 km/h de velocidade média.

Figura 1 - Coletor de energia



Fonte: Adaptado de Jiang et al. (2014).

Com o objetivo de investigar a geração de energia elétrica utilizando o sistema piezoelétrico através de sensores de pressão, Kim et al. (2015) testaram em laboratório diversos fabricantes de placas piezoelétricas com o *Loaded Wheel Test* (LWT), submetendo três diferentes tipos de revestimentos (asfáltico, de concreto típico e um outro nomeado de Engenharia de Concreto Cimentício – ECC) com peso de 50 lbs, 100 lbs e 150 lbs na frequência de 1 Hz, 10 Hz, 30 Hz e 60 Hz. Com o aumento da frequência, foi observado que a voltagem produzida também aumentava, de tal forma que a produção em uma frequência de 60 Hz chegou a 116,58 mV, onde os autores admitiram que a frequência de 60 Hz equivale ao tráfego de 600 veículos por hora a 72,5 km/h. Foi constatado também que os sensores de pressão piezoelétricos geraram mais tensão elétrica quando colocados em corpos de prova de concreto, se comparados aos de asfalto. Já o ECC gerou mais tensão quando comparado ao revestimento de concreto típico e ao asfáltico, respectivamente.

Um supermercado localizado em Gloucester, na Inglaterra, instalou placas piezoelétricas na entrada de seu estacionamento, sendo capaz de produzir até 30 kWh com o fluxo de veículos. Em Tóquio, a empresa JR East instalou placas piezoelétricas em uma estação de metrô e com elas foi possível alimentar letreiros luminosos e catracas eletrônicas. Além disso, a empresa israelense *Innowattech* fez testes com materiais piezoelétricos em estradas, trilhos de trem, pistas de aeroportos e estações de metrô. De acordo com os resultados obtidos pela empresa de Israel, foi possível gerar 200 kWh com um fluxo de 20 carros por hora, capaz de abastecer uma residência comum por um mês (CIGOGNINI et al. 2016).

Com base em transdutores de Cymbal tradicionais, foi sugerida uma nova configuração de transdutores de ponte para captação de energia de veículos em movimento nas estradas. Eles projetaram um novo padrão de polarização e configuração de eletrodos, a fim de utilizar o coeficiente piezoelétrico axial sob tensão axial aplicada, incluindo sete seções de células piezoelétricas conectadas em paralelo. Um protótipo foi obtido utilizando simulação numérica multifísica, considerando os riscos entre o desempenho do coletor de energia e o potencial de falha mecânica. Os resultados dos ensaios laboratoriais demonstraram que o transdutor de ponte gerou quatro vezes mais energia e eficiência energética em comparação com um transdutor habitual, devido a ter a tensão aplicada em direção a polarização. Uma potência máxima de 2,1 mW foi obtida com uma resistência de carga de 400 k Ω a 5 Hz de excitação e abaixo de 70 kPa de pressão aplicada para 64 transdutores de ponte. Contudo, observou-se ainda que são necessários ensaios em rodovias para se obter a pressão de desempenho do sistema (JASIM et al., 2017).

No Brasil, um dos maiores projetos que envolveram a piezoelectricidade foi desenvolvido na Universidade Estadual Paulista (UNESP). Os pesquisadores criaram um material mais flexível e econômico, capaz de aproveitar a força mecânica (para obter eletricidade) gerada pelo tráfego de veículos em uma rua. O compósito polímero-cerâmica desenvolvido é um material composto de polímeros e titanato zirconato de chumbo (PZT), produzido em placas de 2 por 1 cm. Sua matriz polimérica misturada à cerâmica ganhou em resistência ao choque mecânico, em flexibilidade e em deformabilidade, permitindo que se possa dar a forma que queira ao

compósito. Destaque-se que a capacidade de gerar energia desse compósito foi comprovada somente em laboratório (MALMONGE *et al.* 2008).

Para usar a piezoelectricidade em larga escala ainda é necessário superar um obstáculo: o do armazenamento da energia. Não existe dificuldade em utilizar a energia à medida que é gerada, mas sim em armazená-la para usos futuros. Atualmente, o armazenamento só é possível com grandes capacitores (equipamentos que armazenam energia) que ainda são de elevados custos e ocupam muito espaço (MALMONGE *et al.* 2008).

A praça de pedágio do município de Gravataí/RS, na BR-290, recebeu a instalação de um gerador piezoelétrico de energia, além de terem sido utilizados transdutores piezoelétricos em vibração livre. O objetivo da instalação foi servir de subsídio para futuras aplicações em larga escala, servindo como sistema de microgeração no abastecimento de coletores de dados de tráfego e pavimento. A potência máxima foi de 19,2 μ W para uma caixa com quatro transdutores. Apesar de a energia gerada ser relativamente baixa, utilizando um sistema com vida longa útil, os custos de energia podem ser dissipados, diminuindo os valores de geração. Na Figura 2 é ilustrado o sistema aplicado na praça de pedágio (HELLER *et al.*, 2019).

Figura 2 - Sensores piezoelétricos instalados na praça de pedágio



Fonte: Heller et al. (2019).

Mota (2019) observou, por meio de simulações multifísicas, que a espessura da célula piezoelétrica é a propriedade geométrica que mais influencia na quantidade de energia gerada. Foram simuladas sete geometrias, com duas formas geométricas, em um arranjo de quatro células entre duas placas de cobre. A energia máxima gerada foi de 23 mW para uma velocidade de 65 km/h e de 40 mW para uma velocidade de 130 km/h. O autor simulou a aplicação em um trecho ideal, no qual com a instalação de 40 mil células piezoelétricas, ao longo de 1 km de rodovia, com um fluxo de 600 veículos por dia, seria possível gerar 2,514 GW por ano. Tal autor ressaltou também que os investimentos de instalação podem ser compensados ao longo do tempo com a economia devido a energia limpa gerada.

Nesse cenário, em função da revisão bibliográfica realizada, observou-se que a criação de sistemas autossustentáveis no quesito energia tem ganhado força e precisa ser incentivado para que o Brasil esteja melhor conectado e preparado para demandas energéticas futuras mais limpas. A produção de energia a partir das placas piezoelétricas que, ao serem pressionadas, produzem energia elétrica sem gerar impactos ao meio ambiente, tem se tornado uma opção na área viária. Acredita-se que a geração de energia elétrica por meio de células piezoelétricas, no futuro, pode servir principalmente para o abastecimento de iluminação pública da própria via, além de poder ser utilizada para fornecimento em residências, caso armazenado.

3 Materiais e métodos

Além da etapa bibliográfica, procurou-se também desenvolver uma pesquisa experimental preliminar para que outros estudos experimentais possam ser incentivados. Assim, o trabalho foi dividido em três etapas. A primeira etapa constou de uma pesquisa bibliográfica. A segunda etapa foi experimental e constou da produção de um protótipo simples para compreender como se dava o processo de geração de energia para áreas do Colégio Militar de Fortaleza (CMF). Já a terceira etapa, também experimental, constou da introdução de células piezoelétricas em corpos de provas (produzidos em laboratório) com revestimentos asfálticos do tipo Tratamento Superficial Duplo (TSD).

3.1 Primeira etapa – Fase bibliográfica

A pesquisa teórica desenvolveu-se a partir de um estudo da arte sobre o assunto e a execução de experimentos, com o intuito de se compreender e demonstrar o processo de produção de energia por intermédio das células piezoelétricas. Como base de dados, utilizou-se o Portal de Periódicos da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), a Biblioteca Digital de Teses e Dissertações (BDTD), o Repositório Científico de Acesso Aberto de Portugal (RCAAP) e o Google Acadêmico.

3.2 Segunda etapa – Fase experimental 1

A segunda etapa foi experimental e constou da construção de um primeiro protótipo em forma de tapete, construído com células piezoelétricas, para simular a geração de energia com as passadas dos pedestres e dos veículos. Esse tapete foi confeccionado para ser usado em duas áreas do CMF submetidas a um maior tráfego. Essas áreas (ver Figura 3) foram definidas a partir de maior tráfego de pessoas na entrada do colégio, bem como maior tráfego de veículos na entrada do estacionamento desse estabelecimento. Destaque-se que na construção desses tapetes foram utilizados fios flexíveis 0,32 mm nas cores preta e vermelha, células piezoelétricas de 35 mm, diodos 1N4007, capacitor eletrolítico de 100 uF 50 v, placa de *Medium Density Fiberboard* (MDF), cola de silicone, *Ethylene Vinyl Acetate* (EVA), ferro de solda e estanho.

Figura 3 - Áreas de instalação do tapete piezoelétrico no CMF



Fonte: Adaptado de Google Maps (2020).

3.3 Terceira etapa – Fase experimental 2

Na terceira etapa, constituída da segunda fase experimental realizada em laboratório, construiu-se o segundo protótipo que foi executado em uma manta asfáltica circular usada para a realização do ensaio WTAT (*Wet Track Abrasion Test*), normatizado pela Associação Brasileira de Normas e Técnicas (ABNT) e pela Norma Brasileira (NBR) 14746 (2014), que vem sendo usada para construção de revestimentos asfálticos, do tipo TSD, conforme procedimento recomendado por Silva et al. (2018). Na manta asfáltica foi construído o revestimento Tratamento Superficial Duplo (TSD) com duas aplicações de emulsão asfáltica do tipo RR-2C e duas camadas de agregado do tipo granítico. Para cada aplicação de ligante e agregado foi realizada uma compactação com um compactador de laboratório com peso de 60 kg. O próximo passo foi a aplicação do banho diluído em emulsão e água e a secagem em estufa. Foram realizadas também as etapas de imersão do revestimento, ensaio WTAT (abrasão) e a lavagem após o ensaio.

Após a preparação do revestimento TSD, foram introduzidas células piezoelétricas para cada unidade de lâmpada de led (do inglês *Light Emitting Diode* – LED) de alto brilho, possuindo 1,5 V, sendo capazes de acenderem a partir da aplicação de determinada pressão exercida, simbolizando o efeito piezoelétrico direto. Dessa forma, com a implementação das células, o corpo de prova de TSD foi submetido ao compactador concretado de 60 kg para verificar se as lâmpadas e as células piezoelétricas resistem e funcionam quando

aplicada uma velocidade constante. O arranjo adotado no protótipo do TSD está mostrado nas Figuras 4 e 5. Destarte, é válido ressaltar que foi testado o TSD para a produção de energia por ser o tipo de revestimento mais utilizado nas rodovias estaduais do estado do Ceará (SILVA, 2016).

Figura 4 - Ligação das células piezoelétricas com o corpo de prova do tipo TSD



Fonte: Os autores (2020).

Figura 5 - Colocação do corpo de prova de TSD sob as células e as leds



Fonte: Os autores (2020).

4 Resultados e discussões

4.1 Primeira etapa – Fase bibliográfica

Os resultados da pesquisa bibliográfica foram apresentados no item 2 do presente trabalho. Para tanto, foram utilizados como descritores os termos *piezoelectricidade*, *produção de energia* e *células piezoelétricas* e *aplicações da energia piezoelétrica*. Partiu-se da busca pelo segundo descritor, bem como pelo título e resumo (em alguns casos) para a seleção de trabalhos que mais se aproximavam do objetivo, além do uso para produção de energia em passagens de transeunte e/ou pavimentação de estradas. A Tabela 1 apresenta o resultado da pesquisa nas bases de dados.

Foi estabelecido um recorte temporal de 15 anos (2005 – 2020). No Portal de Periódicos da CAPES procurou-se na base Scielo, a partir de periódicos revisados por pares. Foram encontrados apenas cinco trabalhos com o descritor piezoelectricidade, três ligados à caracterização e processamento dos compósitos com propriedade piezoelétrica e quatro aplicações da energia piezoelétrica, bem como com aproximação com

o objetivo da pesquisa. Na BDTD, a busca envolveu teses e dissertações e dos 287 trabalhos encontrados, 120 trabalhos abordavam a caracterização e propriedades da piezoelectricidade e criação de novos elementos piezoelétricos, além de cinco trabalhos com aplicação na medicina, na aeronáutica e na produção de energia.

Tabela 1 - Trabalhos que versam sobre o tema de estudo

Base de dados	Total de trabalhos com o descritor piezoelectricidade	1º Filtro: produção de energia com células piezoelétricas	2º Filtro: aplicações da energia piezoelétrica	3º Filtro: aproximação com o objetivo da pesquisa
Periódicos CAPES	5	3	4	4
BDTD	287	120	5	0
RCAAP	73	1	4	1
Google Acadêmico	4170	1900	3600	5

Fonte: Os autores (2020)

No RCAAP, com o descritor piezoelectricidade, foram retornados 73 trabalhos sobre características, formação, estrutura e composição dos cristais piezoelétricos, tendo vários abordando nanotecnologia. Apenas um trabalho investigava a produção de energia, três abordavam aplicação da energia piezoelétrica nas áreas de medicina, ortodontia e aeronáutica e 1 contemplava tema aderente ao estudo aqui apresentado, pois versava sobre produção de energia em um pavimento rodoviário. No Google Acadêmico foi encontrado um número maior de trabalhos, com um total de 4.170. Desses, 1.900 tinham como objeto de estudo a produção de energia elétrica com células piezoelétricas, 3.960 traziam pesquisa acerca da aplicação da energia piezoelétrica e cinco se aproximavam do interesse desta pesquisa.

Percebe-se, assim, que estudos bibliográficos são também imprescindíveis para que esse tema, energia versus pavimentação, seja melhor explorado e desenvolvido. Além disso, é fundamental que estudos mais práticos também possam ser incentivados para que testes sejam realizados e possivelmente possam culminar na construção de rodovias inteligentes e autossustentáveis.

4.2 Segunda etapa – Fase experimental 1

Pelo fato de o Colégio Militar de Fortaleza (CMF) ser um estabelecimento de ensino relativamente movimentado, as placas piezoelétricas seriam utilizadas como mais uma alternativa para produzir a energia necessária para o referido abastecimento elétrico. E, ao serem pressionadas, essas placas têm a capacidade de produzir energia limpa, não causando assim impactos ambientais.

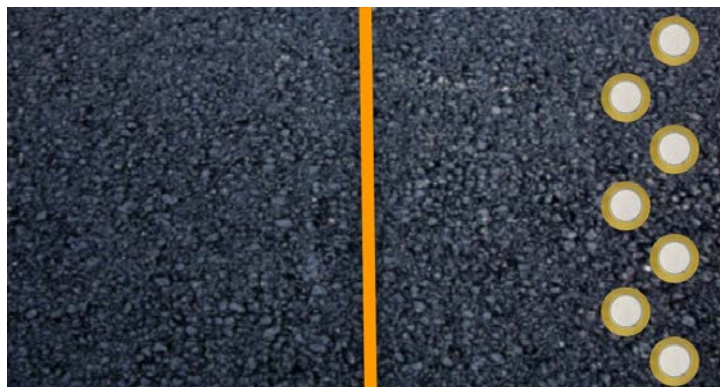
Transitam pelo CMF uma média diária de 1032 pessoas, tráfego de áreas indicadas na sessão de materiais e métodos (Figura 3). Para a implementação do projeto foi realizado um levantamento métrico, onde foi constatado que o espaço relatado abrange uma área de cerca de 1.500 m². Assim, supondo-se que o peso médio de uma pessoa seja de 70 kg, e seu pé atinja 14 células por passada, cada uma com capacidade de gerar 0,03 mA, chega-se à conclusão de que 0,42 mA serão gerados, aproximadamente, por passada.

Inicialmente, foram realizados os cálculos com as células disponíveis no mercado, possibilitando se ter uma ideia diante da opção de sua utilização. Levando em consideração que cada sensor piezoelétrico tem 35 mm de diâmetro (0,0009614 m²), ou seja, permitindo a instalação de 28 células piezoelétricas em zigue-zague, uma seguida da outra, como ilustrado na Figura 6.

Com relação ao aspecto financeiro do projeto, foi verificado, através de pesquisas de mercado, que o custo para a aquisição de todas as placas piezoelétricas necessárias, cerca de 42.000 unidades, seria de R\$ 126.000,00. Nesta pesquisa, então, o preço unitário médio da placa piezoelétrica girou em torno de R\$ 3,00. Além disso, seriam gastos com a implantação das placas, além de outros equipamentos necessários, como

um capacitor eletrolítico, pois tendo em vista que há dificuldade de armazenamento dessa energia, ela teria que ser utilizada de imediato.

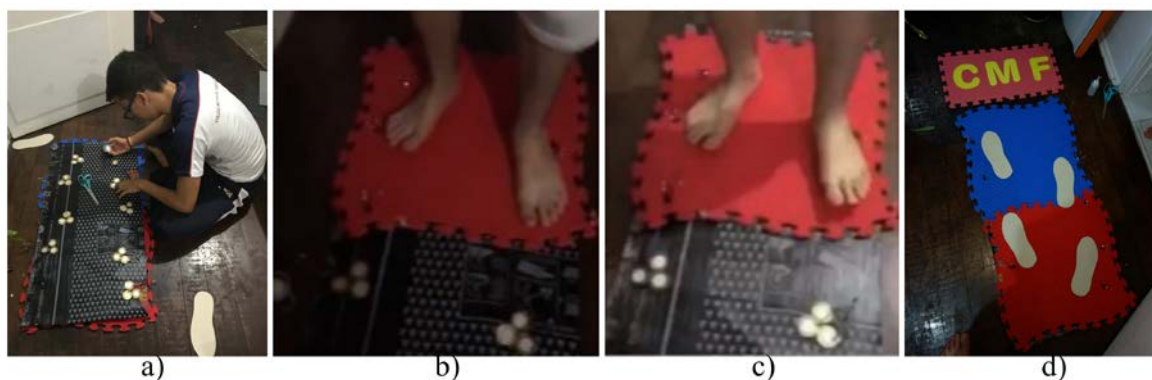
Figura 6 - Configuração das células no pavimento



Fonte: Os autores (2020).

Porém, ainda assim continuaria vantajoso do ponto de vista econômico, pois, apenas no mês de março, a conta de energia do CMF foi de R\$ 24.854,00. Desse modo, então, tem-se a ideia do uso de placas piezoelétricas na entrada de pedestres e na entrada de carros da escola. Essa alternativa, aliada a um projeto de energia solar, poderia beneficiar o CMF na questão energética. A Figura 7 apresenta o tapete desenvolvido experimentalmente.

Figura 7 - Colocação do corpo de prova de TSD sob as células e as leds



a) tapete piezoelétrico sendo desenvolvido; b) detalhe do tapete piezoelétrico com as leds apagadas; c) detalhe do tapete piezoelétrico com as leds acesas; d) modelo final do tapete piezoelétrico desenvolvido.

Fonte: Os autores (2020).

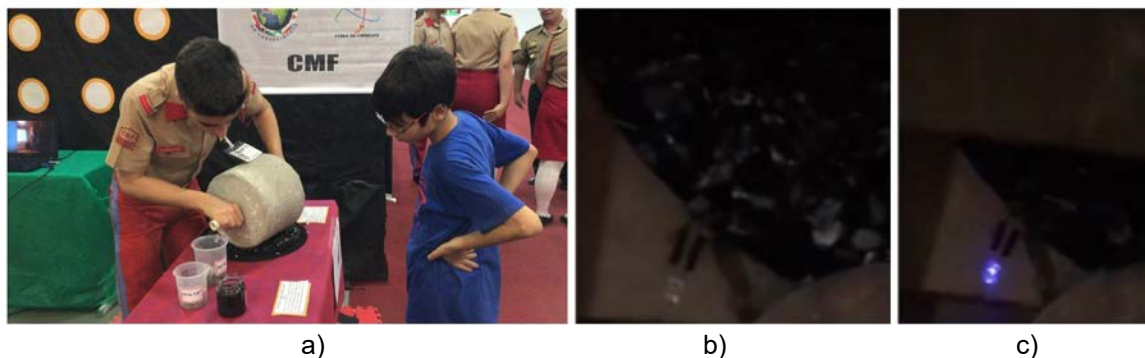
Os resultados de laboratório mostraram que o tapete pode ser instalado na entrada do colégio, onde ao ser pressionado pela passada dos alunos, as luzes de led acendiam. Os experimentos realizados comprovaram a eficiência do material piezoelétrico para o tráfego de veículos e pessoas no CMF. Foi observado que as células piezoelétricas acendiam com uma maior facilidade quando o peso e a velocidade dos pedestres eram maiores. Contudo, reconhece-se que esses resultados são ainda bem preliminares e precisam ser validados através de testes em campo, para que se possa entender outros aspectos aqui não pesquisados, como, por exemplo, os custos de manutenção.

4.3 Terceira etapa – Fase experimental 2

Com base no protótipo utilizando TSD, foi possível verificar que com a aplicação do rolo compactador houve produção de energia piezoelétrica. Assim, a pressão exercida pelo compactador sobre as células foi capaz de acendê-las, gerando ao todo 9 Volts relativos à soma energética das células piezoelétricas. Essa observação, portanto, permite considerar a resistência das células piezoelétricas mediante o tráfego atuante na rodovia. Compreende-se que, ao comparar o tráfego de pessoas com a passagem do compactador, foi

possível identificar que variáveis como velocidade e peso influenciam diretamente na energia gerada. Na Figura 8 é possível observar o corpo de prova de TSD submetido ao rolo compactador.

Figura 8 - Corpo de prova de TSD submetido ao rolo compactador



a) rolo compactador a ser aplicado no TSD para produção de energia piezoelétrica; b) detalhe da led apagada no TSD antes da compactação; c) detalhe da led acesa no TSD depois da compactação.

Fonte: Os autores (2020).

5 Considerações finais

A partir do estudo aqui apresentado, foi possível constatar a possibilidade de utilização da energia piezoelétrica como alternativa de contribuição para a autossustentabilidade do ambiente em que estiver inserida. Essa contribuição, em conjunto com outras fontes de energia sustentável, principalmente a solar, pode permitir o suprimento da demanda de energia elétrica a que o país está submetido.

Verificou-se um custo de R\$ 126.000,00 para a aquisição de todas as placas piezoelétricas necessárias para instalação na área de pedestre e estacionamento do CMF. Identificou-se que, apenas no mês de março, a conta de energia do CMF foi de R\$ 24.854,00. Contudo, reconhece-se que esses resultados são ainda bem preliminares e precisam ser validados através de testes em campo para compreensão de outros aspectos aqui não pesquisados, como, por exemplo, os custos de manutenção. À luz da análise dos custos financeiros, acredita-se que o uso da energia piezoelétrica, aliada a um projeto de energia solar, poderia beneficiar o CMF na questão energética.

Assim, com os testes realizados no protótipo de revestimento do tipo TSD – cujo se apresentou que as células piezoelétricas foram capazes de acender lâmpadas leds de baixa potência, quando associadas diretamente – se verificou a possibilidade de gerar energia mais limpa em pavimentos do Estado do Ceará, contribuindo para a construção das chamadas *Smart Roads*.

Contudo, é necessário um estudo mais amplo relativo ao material a ser utilizado, principalmente no que se refere a geometria e local de instalação no pavimento. Conforme foi relatado por Mota (2019), as células piezoelétricas podem ser aplicadas em locais de alto volume de tráfego, além da não necessidade de mais simulações para definir a geometria como ótima. Dessa forma, se tornam indispensáveis os estudos em laboratório e campo com simuladores de tráfego para reproduzirem as variáveis que mais influenciam na quantidade de energia gerada, sendo elas a velocidade e o peso do veículo.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Rede Tecnológica de Asfaltos, financiada pela Petrobras, e ao CNPq pela bolsa de estudos do primeiro autor.

Referências

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 14746**: microrrevestimentos a frio e lama asfáltica: determinação de perda por abrasão úmida. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

- ANTUNES, E. de G.; SOUSA, M. N. de; SCHERTEL, M. N. da C. **Piso que transforma energia mecânica em eletricidade**. Projeto em Energia III. Rio Grande do Sul: UFRGS, 2014.
- CIGOGNINI, T. A. *et al.* Caminho da energia. **Revista Destaques Acadêmicos**, Lajeado, v. 8, n. 4, p.253-266, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.22410/issn.2176-3070.v8i4a2016.1200>. Acesso em: 12 fev. 2020.
- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE. **Balanco Energético Nacional 2019**: Relatório Síntese / ano base 2018. Rio de Janeiro: MME/EPE, 2019a.
- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2029**. Rio de Janeiro: MME/EPE, 2019b
- FRANCO, M. P. V. Uma questão de poder: consumo sustentável e suficiência ecológica como discursos alternativos em prol da sustentabilidade. **Sociedade & Natureza**, Uberlândia - MG, v. 31, p. 1-22, 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.14393/sn-v31n1-2019-41072>. Acesso em: 12 fev. 2020.
- GOMES, R. L. *et al.* Mapeamento do potencial solar para microgeração de energia elétrica: o caso da cidade de Ilhéus. **Sociedade & Natureza**, Uberlândia – MG, v. 31, p. 1-22, 2019. DOI: 10.14393/SN-v31n1-2019-42302. Acesso em: 12 fev. 2020.
- COLÉGIO MILITAR DE FORTALEZA. **CMF**, Fortaleza, fev. [2020]. Disponível em: <https://www.cmf.eb.mil.br/>. Acesso em: 20 fev. 2020.
- HELLER, L. F. *et al.* Microgeração de energia em pavimentos: um estudo de caso em uma rodovia em serviço. **Revista Estradas**, Porto Alegre/RS, n. 24, p. 20-25, 2019.
- JASIM, A. *et al.* A. Optimized design of layered bridge transducer for piezoelectric energy harvesting from roadway. **Energy**, [s. l.], v. 141, p. 1133-1145, Dec. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.10.005> . Acesso em : 20 fev. 2020.
- JIANG, X. *et al.* Piezoelectric energy harvesting from traffic-induced pavement vibrations. **Journal of Renewable and Sustainable Energy**, [s. l.], v. 6, n. 4, p. 043110, Jul. 2014. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4891169>. Acesso em : 20 fev. 2020.
- KIM, S.; SHEN, J.; AHAD, M. Piezoelectric-based energy harvesting technology for roadway sustainability. **International Journal of Applied Science and Technology**, [s. l.], v. 5, p. 20-25, 2015. Disponível em: <https://www.semanticscholar.org/paper/Piezoelectric-Based-Energy-Harvesting-Technology-Kim-Shen/280e4ed6cd9fea684050a496ac3265241779a88f>. Acesso em: 12 fev. 2020.
- KOKKINOPOULOS, A.; VOKAS, G.; PAPAGEORGAS, P. Energy harvesting implementing embedded piezoelectric generators: the potential for the Attikiodos traffic grid. **Energy Procedia**, [s. l.], v. 50, p. 1070-1085, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.06.126>. Acesso em: 12 fev. 2020.
- MALMONGE, J. A. *et al.* Piezo and dielectric properties of PHB-PZT composite. **PolymerComposites**, [s. l.], v. 30, n.9, p. 1.333-1337, 2009. DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/pc.20719>. Acesso em: 12 fev. 2020.
- MOTA, B. C. **O pavimento como instrumento de geração de energia para o desenvolvimento sustentável de cidades inteligentes**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2019.
- SILVA, R. C. **Introdução de um novo coeficiente para análise de desempenho dos tratamentos superficiais a partir dos estudos desenvolvidos nos Estados do Ceará/Brasil e Carolina do Norte**. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2016.
- SILVA, R. C.; BARROSO, S, H. A.; KIM, Y. R. Introdução do coeficiente de uniformidade para avaliação de revestimentos asfálticos do tipo tratamentos superficiais. **Revista Transportes**, São Paulo, v. 26, n. 1, p. 42-53, 2018. DOI: <https://doi.org/10.14295/transportes.v26i1.1371>. Acesso em: 12 fev. 2020.
- VAN VLACK, L. H. **Princípios de ciência dos materiais**. São Paulo, Edgard Blucher LTDA, 1970.

VILANI, R.; MACHADO, C. S. A questão energética e a consolidação da política ambiental brasileira: caminhando em direção a um desenvolvimento sustentável. **Ingepro**, Santa Maria, v. 1, p. 47-55, 2009. Disponível em: <https://www.arca.fiocruz.br/handle/icict/1265>. Acesso em: 10 fev. 2020.

XIANG, H. J. *et al.* Theoretical analysis of piezoelectric energy harvesting from traffic induced deformation of pavements. **Smart Materials and Structures**, [s. l.], v. 22, n. 9, p. 1-9, Oct. 2013. DOI: <https://doi.org/10.1088/0964-1726/22/9/095024>. Acesso em: 10 fev. 2020.

Sobre os autores

Bruno Cavalcante Mota

Mestrando em Engenharia de Transportes pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes da Universidade Federal do Ceará. Engenheiro Civil pela Universidade Federal do Ceará. Técnico em Edificações pela Escola Estadual de Educação Profissional Doutor José Alves da Silveira. Bolsista do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico.

Bruno Albuquerque Neto

Estudante do Colégio Militar de Fortaleza.

Samuel Goersch Fontenele de Almeida

Estudante do Colégio Militar de Fortaleza.

Thiago Frota Maranhão

Estudante do Colégio Militar de Fortaleza.

Francisca das Chagas Soares Reis

Doutorado em Educação (PPGE-UECE/2020). Mestrado em Educação pela Universidade Estadual do Ceará (2013). Especialização em Dinâmicas Grupais (CDG-PE), Psicodrama Aplicado (UECE) e Língua Portuguesa na perspectiva dos multiletramentos (UGF/RJ). Formação em Pedagogia pela Universidade Federal do Ceará (1977). Tem experiência na área de Educação, atuando principalmente nos seguintes temas: formação de professores, aprendizagem mediada, letramento digital, informática educativa, práticas inclusivas, avaliação da aprendizagem e dinâmicas grupais. Participou do Grupo de Pesquisa HIPERGED do PPGL/UFC (2008 a 2010). Atualmente é Assessora Pedagógica da Divisão de Ensino do Colégio Militar de Fortaleza. Integrante do Grupo de Pesquisa Educação, Cultura Escolar e Sociedade (EDUCAS). ORCID: 0000-0003-2487-2869.

Suelly Helena de Araújo Barroso

Engenheira Civil e Professora Titular da UFC. Pós-Doutora pela NCSU/USA. Mestre e Doutora em Engenharia pela USP. Atua na área de pavimentação com ênfase em solos, imprimação, revestimentos delgados, bioligantes e uso de resíduos. É orientadora de mestrado e doutorado no Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes da UFC. É coordenadora e membro de equipe de vários projetos financiados pela Petrobras, Finep, CNPq, FUNCAP, dentre outros, na área de pavimentação. Possui diversas publicações nos principais periódicos e congressos técnicos/científicos nacionais e internacionais na área de pavimentação.

Avaliado em: 30.08.2020

Aceito em: 28.10.2021