

---

---

# PRODUÇÃO DE CALÇADA PIEZOELÉTRICA

---

---

**Caroline Valadão Pacheco**

**Amanda de Cássia Cardoso Martins**

**Bruna Niccoli Ramirez**

**Rogério Issamu Yamamoto**

**Antônio Hortêncio Munhoz Jr.**

**Universidade Presbiteriana Mackenzie (UPM)**

## **Resumo**

A necessidade de diversificação das fontes energéticas faz com que cientistas em todo o mundo busquem o emprego de materiais com propriedades inteligentes. Nessa categoria se enquadram os materiais utilizados nas células solares, por exemplo, mas também os materiais piezoelétricos, como o titanato zirconato de chumbo (PZT). Os piezoelétricos são capazes de gerar corrente elétrica (ou tensão) através de uma deformação a eles empregada. A proposta da presente pesquisa foi evidenciar um método de construção de calçada inteligente, com a expectativa de obter geração de energia elétrica por meio da movimentação de pedestres sobre sua superfície. Para essa finalidade foram construídos circuitos com tambores coletores de PZT capazes de acender um LED. Escolheu-se uma configuração mista de circuito com 36 tambores coletores. O circuito foi incorporado à construção de um piso intertravado drenante. O sistema mostrou-se positivo no acendimento de um LED, porém verificou-se a necessidade de vibração constante ou de sistemas de capacitores para armazenamento de energia.

**Palavras-chave:** Calçadas inteligentes. Geração de energia. PZT.

# 1 INTRODUÇÃO

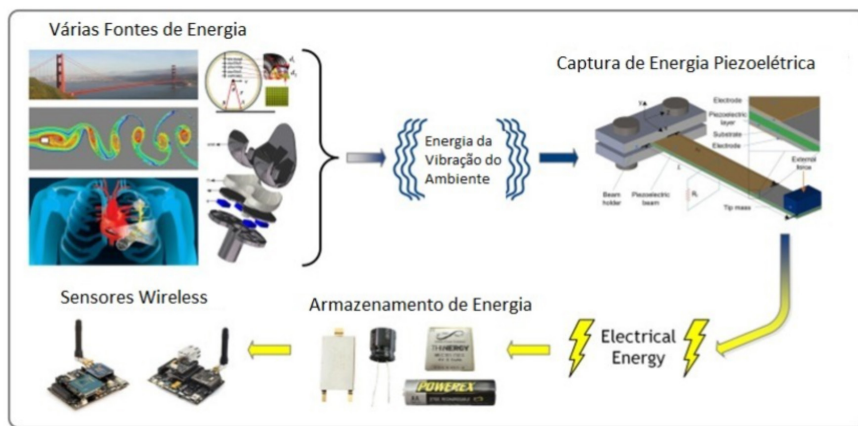
O ramo da construção civil, operação e demolição de edificações é responsável por causar grande impacto ambiental, visto que tais atividades consomem recursos naturais e utilizam energia de forma intensiva. Por essa razão, tal indústria tem papel estratégico na realização das metas e objetivos globais do desenvolvimento sustentável. A responsabilidade social e ambiental torna-se, nesse contexto, uma boa prática de mercado, havendo a expectativa de rentabilizar as tecnologias que disso derivem (Oliveira *et al.*, 2020).

Entre os principais avanços vinculados às construções sustentáveis, está o uso dos denominados *materiais inteligentes*, que são aqueles que, a partir de um estímulo externo, modificam suas propriedades e comportamento. Entende-se por estímulo externo qualquer alteração de campo magnético e/ou elétrico, temperatura, esforço aplicado, perturbação acústica, radiação nuclear ou alteração nas propriedades químicas (Addington; Schodek, 2005). Tal comportamento é explicado por modificações nas propriedades geométricas devido aos estímulos (materiais inteligentes ativos) ou pela própria capacidade da microestrutura dos materiais em transmitir energia, como ocorre com os compostos piezoelétricos e ferroelétricos, fibras ópticas, entre outros.

Materiais piezoelétricos são aqueles em que corrente elétrica pode ser produzida por meio da aplicação de esforços mecânicos externos, sendo também válida a definição inversa, ou seja, aqueles materiais que produzem deformações estruturais causadas pela passagem de corrente elétrica. Exemplos clássicos dessa família de materiais são o niobato de lítio ( $\text{LiNbO}_3$ ), o quartzo ( $\text{SiO}_2$ ) e o titanato de zircônio e chumbo [PZT] ( $\text{Pb}(\text{Zr}_{1-x}\text{Ti}_x)\text{O}_3$ ). O PZT destaca-se em relação aos demais compostos devido à sua elevada sensibilidade, baixo custo e elevada rigidez, sendo aplicado na confecção tanto de atuadores quanto de sensores (Shehata *et al.*, 2022).

O fenômeno conhecido como piezoelectricidade foi observado pela primeira vez em 1880 pelos irmãos franceses Pierre e Jacques Curie. Os cientistas constataram o surgimento de uma corrente elétrica na superfície de cristais naturais, sal Rochelle e quartzo, quando submetidos a um carregamento mecânico, fenômeno conhecido como efeito piezoelétrico direto. Alguns materiais também apresentam o efeito piezoelétrico inverso, no qual a aplicação de um potencial elétrico resulta em uma deformação mecânica. Diferentemente do acoplamento fraco entre os domínios elétrico e mecânico observados nos cristais naturais da pesquisa dos irmãos Curie, os compostos criados de forma sintética durante o século XX exibem acoplamento e desempenho excelentes, dentre os quais é incluído o PZT (Anton; Safae, 2022).

Os avanços tecnológicos em circuitos eletrônicos de potência do início do século XXI possibilitaram a exploração da ideia de captar energia elétrica produzida por transdutores piezoelétricos para sua posterior armazenagem. O termo em inglês para esse campo de pesquisa é *piezoelectric energy harvester*, ou seja, *colheita de energia derivada de sistemas piezoelétricos*. A Figura 1 apresenta esquematicamente as possíveis fontes de energia para esse tipo de sistema. Nota-se que a energia “colhida”, originada de vibrações a que estas estruturas estão sujeitas, é captada por um dispositivo piezoelétrico e posteriormente armazenada para uso em eletrônicos de baixa potência (Anton; Safae, 2022).



**Figura 1** Visão geral esquemática do processo de coleta de energia piezoelétrica para alimentar sensores sem fio de baixa potência

Fonte: Adaptada de Anton e Safae (2022).

Um ponto de atenção ao uso do PZT convencional é a toxicidade que o chumbo confere ao composto, representando riscos potenciais à saúde se em contato direto com o corpo humano, além das restrições ecológicas que limitam seu uso. Por essa razão, a comunidade científica vem tentando implementar composições piezoelétricas sem chumbo, em geral de microestrutura perovskita, como o titanato de bário (TB), o titanato de bismuto e sódio (BNT), o niobato de sódio e potássio (KNN) e alguns materiais à base de bismuto não à base de perovskita, ou seja, ferroelétricos estruturados em camada de bismuto (BLSF). Destaca-se que esses compostos foram desenvolvidos com o PZT, em meados da década de 1950, porém apresentaram desempenho inferior ao composto com chumbo, o que fez com que a maioria das pesquisas em piezoelétricos fossem direcionadas ao PZT. Apenas recentemente, com

o crescimento pela busca de fontes de energia sustentáveis, é que a comunidade científica tem focado seus esforços para alavancar o desempenho desses outros materiais (Anton; Safae, 2022).

Dessa forma, os dispositivos para captação de energia piezoelétrica tipicamente consistem em placas, anéis e discos formando um composto piezoelétrico, que será acoplado a um mecanismo de coleta, que permitam a conversão eficiente da corrente piezoelétrica a uma energia elétrica útil.

Nesse contexto, a ideia de calçadas e pavimentos inteligentes torna-se viável como meio de colheita de energia renovável. Trata-se da confecção de estruturas providas de sensores e lâmpadas LED em que o carregamento, seja de veículos, seja de pessoas, estimula os sensores, permitindo a captação energética (Wang; Zhao, 2019). Tendo em vista a importância da construção de sistemas que promovam soluções e coeficientes para a construção civil, esta pesquisa dedica-se à discussão sobre pavimentos inteligentes.

Portanto, o objetivo do presente trabalho é produzir um sistema de calçada intertravada em que entre a base e os blocos de concreto será colocado um circuito misto composto de placas de piezoelétricos. Ao final do estudo, será esclarecido se o sistema foi capaz de gerar eletricidade, mesmo com o uso de blocos de concreto por cima do circuito captador, e a quantidade de eletricidade gerada com a intenção de promover uma nova frente de pesquisa para viabilidade deste sistema.

---

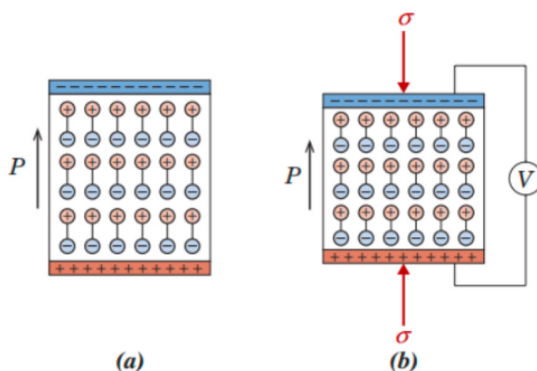
## 2 REVISÃO DA LITERATURA

### 2.1 Piezoeletricidade

A piezoeletricidade é uma propriedade pouco usual nos materiais, porém pode ser identificada em alguns compostos cerâmicos e poliméricos. Trata-se da capacidade de gerar eletricidade pela pressão e é explicada pela indução mecânica da polarização de cargas elétricas e o consequente estabelecimento de um campo elétrico (Callister, 2006).

A existência ou não da piezoeletricidade em um material está relacionada com a ausência de um centro de simetria na célula cristalina do composto. Entende-se que um cristal tem centro de simetria quando uma linha imaginária pode ser passada de um ponto qualquer sobre sua superfície através de seu centro, encontrando-se, sobre ela, um ponto semelhante a uma distância igual além do centro (Ebert, 2022). Das 32 classes cristalográficas em que os materiais cristalinos estão divididos, 21 delas

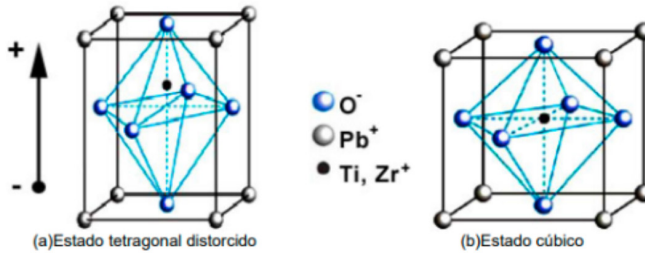
correspondem a cristais que não apresentam centro de simetria, sendo 20 dessas classes materiais que apresentam piezoelectricidade (Moulson, 2003). A Figura 2 ilustra o fenômeno da piezoelectricidade, em que íons são distribuídos assimetricamente no interior do cristal, causando dipolos permanentes.



**Figura 2** Representação esquemática de um material piezoelétrico com distribuição assimétrica de cargas, ocasionando momento dipolar: (a) quando em deformação, (b) quando em imposição de um campo elétrico

Fonte: Callister (2016).

Nos materiais piezoelétricos, o momento dipolar é formado a partir de um deslocamento do centro elétrico de carga quando o cristal for submetido a esforços que resultará na geração de cargas sobre a superfície do cristal (Bengisu, 2001), conforme ilustra a Figura 3. Assim, pode-se dizer que a origem microscópica do efeito piezoelétrico é o deslocamento de cargas iônicas dentro da estrutura cristalina. Na ausência de uma tensão mecânica externa, há a distribuição simétrica de cargas dentro do cristal, anulando o momento de dipolo resultante. A aplicação de tensão externa, por sua vez, desloca cargas e as distribui de forma não simétrica no cristal (Siqueira *et al.*, 2018).



**Figura 3** Deslocamento do centro elétrico em um cristal piezoelétrico

Fonte: Siqueira et al. (2018).

A Figura 3 também retrata a estrutura cristalina de um composto *perovskita*, que em temperatura ambiente apresenta plano de simetria tetragonal, romboédrica ou cúbica simples, mas que, abaixo da temperatura de Currie, tem os centros de cargas positivas e negativas não coincidentes. Essa é a estrutura típica das cerâmicas piezoelétricas e, em particular, do titanato zirconato de chumbo (PZT ou  $\text{Pb}[\text{Zr}_x\text{Ti}_{1-x}]\text{O}_3$ ), que é um dos materiais com excelentes propriedades piezoelétricas (veja a Tabela 1). O PZT é uma solução sólida entre o zirconato de chumbo e o titanato de chumbo, apresentando comportamento ferroelétrico além do piezoelétrico.

**TABELA 1**

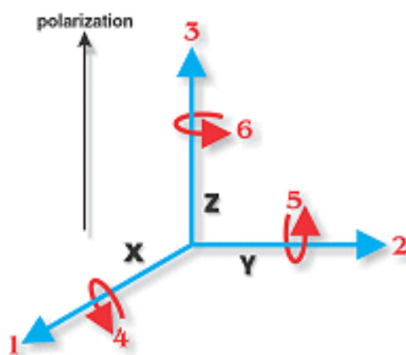
Propriedades do PZT

Parâmetro	Propriedade
Constante de carga piezoelétrica $d_{33}$ ( $\times 10^{-12}$ C/N)	470
Fator de "voltagem" piezoelétrica $g_{33}$ ( $\times 10^{-3}$ V-m/N)	24
Módulo elástico $E_{33}$ ( $\text{N/m}^2$ )	$5,2 \times 10^{10}$

Fonte: Hsing, Dung-Hung e Yang (2016).

As cerâmicas piezoelétricas são em geral anisotrópicas e, portanto, suas propriedades físicas não são necessariamente iguais em todas as direções. Para mensurar as características piezoelétricas desses materiais, empregam-se constantes físicas que se refiram tanto à direção da força mecânica ou elétrica aplicada quanto às direções perpendiculares à força aplicada. Assim, cada constante deve apresentar dois índices subscritos, que indicam as direções das duas quantidades relacionadas, como tensão (força no elemento cerâmico/área superficial do elemento) e deformação (mudança

no comprimento do elemento/comprimento original do elemento). A direção da polarização positiva geralmente é feita para coincidir com o eixo Z de um sistema retangular de eixos X, Y e Z, conforme Figura 4. A direção X, Y ou Z é representada pelo subscrito 1, 2 ou 3, respectivamente, e o cisalhamento sobre um desses eixos é representado pelo subscrito 4, 5 ou 6, respectivamente. Há três principais constantes que servem para caracterizar o desempenho de materiais piezoelétricos: a constante de carga piezoelétrica “ $d$ ”, a constante de tensão piezoelétrica “ $g$ ” e a permissividade “ $\epsilon$ ”; todas elas são dependentes da temperatura (APC Internacional, [s.d.]).



**Figura 4** Direções das forças que afetam o elemento piezoelétrico

Fonte: APC Internacional [s.d.].

A constante de carga piezoelétrica ( $d$ ) representa a polarização gerada por unidade de tensão mecânica aplicada a um material piezoelétrico ou, alternativamente, é a deformação mecânica experimentada por um material piezoelétrico por unidade de campo elétrico aplicado. O índice “ $i$ ” subscrito para  $d_{ij}$  indica a direção da polarização gerada no material quando é aplicado o campo elétrico no material. Se esse número for zero, o campo elétrico será nulo ou, alternativamente, quando for 1, 2 ou 3, indicará a direção da intensidade do campo aplicado. O segundo subscrito é a direção da tensão aplicada ou da deformação induzida, respectivamente. Como a deformação induzida em um material piezoelétrico por um campo elétrico aplicado é o produto do valor do campo elétrico e o valor de  $d$ , este coeficiente indica a adequação de um material para aplicações dependentes de deformação, o que representa seu papel como atuador. Na caracterização de piezoelétricos, em geral, são empregados os seguintes coeficientes de carga piezoelétrica (APC Internacional, [s.d.]):

- $d_{33}$ : polarização induzida na direção 3 (paralela à direção na qual o elemento cerâmico é polarizado) por unidade de tensão aplicada na direção 3 ou deformação induzida na direção 3 por unidade de campo elétrico aplicado na direção 3;
- $d_{31}$ : polarização induzida na direção 3 (paralela à direção na qual o elemento cerâmico é polarizado) por unidade de tensão aplicada na direção 1 (perpendicular à direção na qual o elemento cerâmico é polarizado);
- $d_{15}$ : polarização induzida na direção 1 (perpendicular à direção na qual o elemento cerâmico é polarizado) por unidade de tensão de cisalhamento aplicada na direção 2 (perpendicular à direção na qual o elemento cerâmico é polarizado) ou tensão de cisalhamento induzida na direção 2 por unidade de campo elétrico aplicado na direção 1.

A constante de tensão piezoelétrica  $g$  representa o campo elétrico gerado pelo material por unidade de tensão mecânica aplicada ou, alternativamente, é a tensão mecânica experimentada pelo piezoelétrico por unidade de deslocamento elétrico aplicado. O primeiro subscrito de  $g$  indica a direção do campo elétrico gerado no material, ou a direção do deslocamento elétrico aplicado. O segundo subscrito é a direção da tensão aplicada ou da deformação induzida, respectivamente. Esse coeficiente é importante para avaliar a adequação do material como um sensor, isto é, em sua capacidade de detecção de sinais, uma vez que mensura a intensidade do campo elétrico induzido, produzido por um material piezoelétrico em resposta a uma tensão física aplicada (APC International, [s.d.]).

A permissividade, ou constante dielétrica,  $\epsilon$ , para um material cerâmico piezoelétrico é o deslocamento dielétrico por unidade de campo elétrico. A constante dielétrica pode ser expressa em função de um valor médio a tensão mecânica constante ( $\epsilon^T$ ) ou pode ser expressa em função da deformação constante ( $\epsilon^S$ ). O índice “i” de  $\epsilon_{ij}$  indica a direção do deslocamento dielétrico; e o índice “j” indica a direção do campo elétrico (APC International, [s.d.]). É importante lembrar que materiais dielétricos são isolantes, que permitem o fluxo de corrente elétrica a partir da extrapolação de um valor limite do fluxo de cargas elétricas, portanto a permissividade dielétrica é a propriedade que representa a capacidade do material de permitir o adensamento de um fluxo de campo elétrico.

## 2.2 Mecanismos para construção de calçadas inteligentes

Muito presentes nas paisagens urbanas, as calçadas costumam ser uma faixa de argamassa, ladrilhos ou qualquer outro material que distancia a rua, por onde passam



os veículos, dos edifícios e casas. A calçada é o mediador entre as zonas públicas e privadas, sendo uma zona de passagem e interação pública.

Por sua vocação de servir à sociedade, as calçadas podem assumir maior função do que ser apenas um espaço de passagem. A incorporação da tecnologia de materiais piezoelétricos (Yangsen Cao, 2022) e termoeletrônicos (Yuan *et al.*, 2022) às ruas possibilita, por exemplo, que energia possa ser gerada e coletada pela movimentação de pessoas por essas vias urbanas ou pelo calor gerado pelo atrito e exposição solar, respectivamente.

Em 2008, a empresa israelense Innowatech trouxe a tecnologia de piezoelétricos à engenharia rodoviária, enterrando transdutores piezoelétricos embutidos em um pavimento com a intenção de captar energia elétrica por veículos que rolam sobre aquele sistema (Abramovich *et al.*, 2009; Gholikhani *et al.*, 2020). A partir disso, surgiram alguns diferentes métodos de colheita de energia: a junção de materiais piezoelétricos com materiais de pavimentação com o intuito de criar compósitos; e o encapsulamento de transdutores piezoelétricos, que estão embutidos na estrutura do pavimento como um centro de conversão de energia para coleta de energia distribuída.

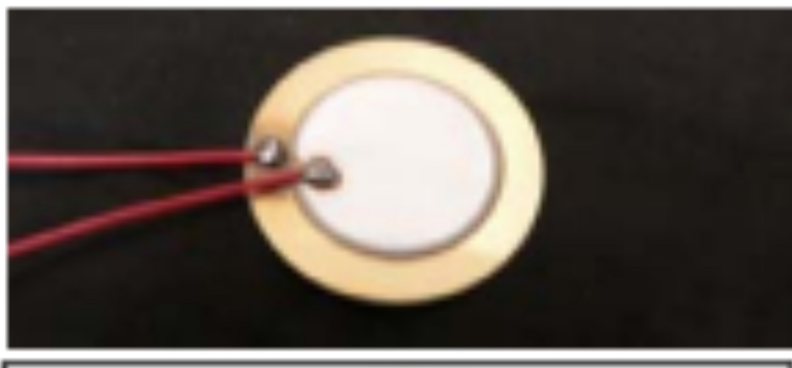
Sobre o primeiro método, podem ser citados os trabalhos de Mao *et al.* (2016) e Zhang (2020), que prepararam compósitos piezoelétricos à base de asfalto e à base de cimento, respectivamente. É, portanto, um método que integra o pavimento e materiais piezoelétricos e aparenta ser um facilitador na construção do pavimento e utilização de toda a sua área para captação de energia. No entanto, esse novo material formado não é ferroelétrico, isto é, não tem polarização espontânea, e muitas vezes torna o processo de captação de energia insatisfatório. Outro problema é que converte todo o pavimento em uma estação de conversão de energia, e o tratamento de isolamento do pavimento também é uma dificuldade (Yangsen Cao, 2022).

O segundo método, em que os transdutores são encapsulados no pavimento, apresenta alta eficiência de conversão de energia e forte operacionalidade (Wang *et al.*, 2022; Cao *et al.*, 2021), sendo hoje o mais empregado na coleta de energia rodoviária. Nesse caso, podem ser utilizados transdutores piezoelétricos em forma de disco (Zhao, 2012), com geração de energia de 0,06 mJ (97,33 V de tensão gerada) por transdutor, mas cuja geometria pode levar a concentrações de tensões mecânicas em virtude de seu formato. Outra geometria estudada de transdutor foi em ponte laminada, que pode gerar uma tensão de aproximadamente 150 V sob uma carga de 0,7 MPa (Zhao, 2016). Como visto, a potência fornecida é relativamente baixa, e na busca de aumento de energia convertida, diferentes pesquisas também têm buscado a otimização dessas propriedades por meio de modificações geométricas dos transdutores.

Diante dessas possibilidades, diferentes tipos de pisos inteligentes foram desenvolvidos por empresas. Elhalwagy, Ghoneen e Elhadidi (2017) apresentaram uma compilação sobre eles, considerando a relevância quanto às variadas geometrias e op-

ções de revestimentos para os sistemas piezoelétricos. Os autores classificaram os pisos de acordo com tamanho, potência, preço, durabilidade, tipo de material empregado e se o sistema poderia ser utilizado em ambientes internos ou externos.

Elhalwagy, Ghoneen e Elhadidi (2017) destacam também em seu artigo o uso de pastilhas cerâmicas de PZT (“usadas em campainhas”), como mostra a Figura 5. Esses dispositivos geram baixa potência (variam em torno de 2,463 mW), porém são capazes de alimentar dispositivos microeletrônicos como Bluetooth, GPS, módulos, microcontroladores e sensores de baixa potência usando vibrações ambientais de várias fontes. As principais justificativas para se utilizar esse tipo de material em um piso inteligente são o preço e a facilidade de obtenção/fabricação de colhedeiros do tipo tambor. Além disso, o dispositivo é tido como robusto e resistente, podendo ser incorporado a uma grande variedade de estruturas, pisos, estradas, entre outros.



**Figura 5** Colhedeira piezoelétrica do tipo tambor

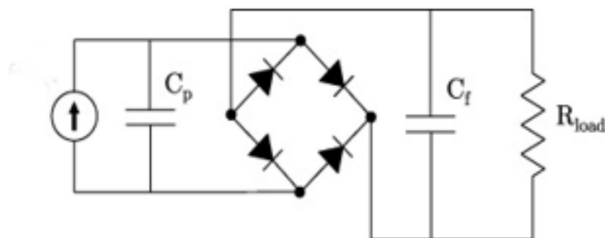
Fonte: Elhalwagy, Ghoneen e Elhadidi (2017).

Apesar das variações entre os diferentes dispositivos piezoelétricos passíveis de serem utilizados em calçadas, todos têm em comum o mecanismo para colheita da energia cinética por meio da caminhada. No entanto, o simples uso de pressões no solo para gerar energia elétrica considerável já representa grande dificuldade da incorporação desses sistemas, pois são necessárias deflexões relativamente grandes no piso, até 10 mm (no caso de piezopolímeros). Algumas vezes são construídas estruturas complicadas que permitam tal movimentação, mas que impõem altos custos de montagem. Esse problema é reduzido com o uso de colhedeiros piezocerâmicos, visto que, por terem seu funcionamento baseado no efeito piezoelétrico, não há necessidade de deflexão do solo. A eficiência dos dispositivos piezocerâmicos baseia-se nas proprieda-

des do material, espessura e na força que atua em sua superfície. No geral, maiores espessuras e maiores forças geram maior quantidade de cargas de superfície (Nia *et al.*, 2017).

Mishra *et al.* (2015) elaboraram um estudo sobre o desempenho de coletores tipo tambor (ou diafragma circular piezoelétrico) sob condições de baixa tensão e baixa frequência. Eles obtiveram uma potência de corrente contínua máxima de 2,463 mW em um tambor de 27 mm, montado dentro de um anel de aço de 24 mm em uma resistência de carga de 27,4 k $\Omega$ , a uma frequência ressonante de 213 Hz. O trabalho possibilitou carregar um supercapacitor capaz de alimentar uma placa de microcontrolador Arduino, ou seja, um dispositivo microeletrônico de baixa potência.

No trabalho de Mishra *et al.* (2015), a saída de tensão AC da colhedeira do tipo tambor foi monitorada e registrada usando um osciloscópio digital, e a tensão AC (corrente alternada) foi convertida em DC (corrente contínua) por meio de um circuito retificador de ponte convencional empregando diodos schottky 1N5819 através dos quais um capacitor de 470  $\mu$ F foi adicionado. A capacidade de entrega de energia do tambor foi medida conectando-se uma fonte de corrente (fonte de corrente contínua e alternada Keithley 6221) trabalhando no modo dissipador, atuando como uma carga resistiva em paralelo com o capacitor de saída. O sistema é representado na Figura 6.

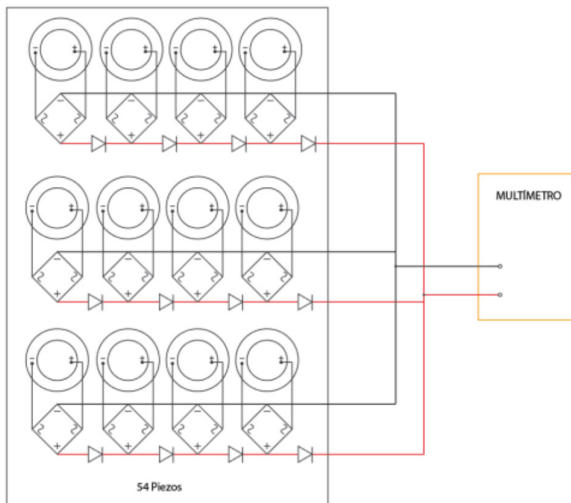


**Figura 6** Circuito esquemático da ponte de diodos

Fonte: Mishra *et al.* (2015).

Mishra *et al.* (2015) utilizaram um nanovoltímetro para medir a tensão desenvolvida através do capacitor de saída. Para acionamento do capacitor, os pesquisadores utilizaram coletores de tambor operados em ressonância por meio de um equipamento que mede a polarização induzida na direção 3 (“medidor d33” – Piezotest PM300). Esse equipamento usou uma força dinâmica senoidal máxima de 0,5 N, gerando uma frequência na faixa de 30 a 300 Hz.

Ilha e Santos (2020) conseguiram obter resultados promissores na elaboração de plataformas de MDF, discos piezoelétricos e placa de acrílico. Para confecção do sistema, utilizaram 54 discos piezoelétricos de 35 mm de diâmetro externo e montaram conforme ilustrado na Figura 7; os tambores foram conectados, um a um, a uma ponte retificadora que tem por função transformar qualquer corrente alternada em corrente contínua, e na saída positiva de cada ponte foi conectado um diodo. Colocaram-se pontes e diodos para que não ocorresse o efeito de piezoeletricidade indireta, em que o material piezoelétrico transforma energia elétrica em energia mecânica quando submetido a uma corrente. Nesse sistema aplicou-se um impacto de 9,8 N que produziu uma média de tensão e corrente de 0,06 V e 0,31  $\mu\text{A}$ , respectivamente.



**Figura 7** Sistema piezoelétrico de Ilha e Santos

Fonte: Ilha e Santos (2020).

Apesar dos avanços no desenvolvimento de calçadas inteligentes, o uso de colhedoras piezoelétricas em tambor ainda precisa ser otimizado, pois a potência gerada é baixa (da ordem de microwatt para alguns watts) e são dependentes das características do movimento sobre elas e da localização dos sistemas. Em geral, exige-se um movimento de vibração constante para apresentação de bons resultados. Apesar dessas questões, ainda se justificam estudos sobre o tema, uma vez que as colhedoras do tipo tambor são de fácil obtenção e de baixo custo.

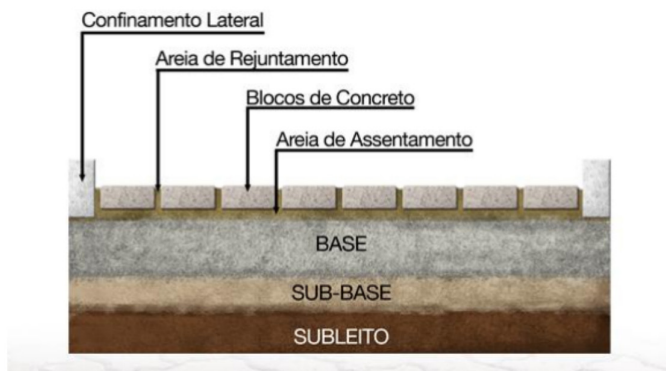
## 2.3 Pisos intertravados

Áreas muito urbanizadas costumam apresentar problemas com seus sistemas de drenagem, os quais são extremamente necessários para a redução do risco de enchentes. Muitas construções, poucas áreas verdes e acúmulo de lixo em locais por onde a água deveria escoar são alguns dos fatores que contribuem para agravar inundações. Além disso, cidades como São Paulo também padecem de outro problema urbanístico, que é o mau estado de conservação das calçadas. Sem um padrão, a cidade foi sendo construída sobre ladeiras, com estruturas de passeio irregulares em que se veem degraus e outros obstáculos que dificultam a acessibilidade. Ou ainda, as calçadas são inexistentes, fazendo com que os pedestres precisem disputar lugar com os veículos motorizados. Dito isso, diversas gestões da Prefeitura de São Paulo têm buscado padronizar a construção de calçadas. Em 2012, definiu-se um novo padrão arquitetônico e recomendou-se o uso de piso intertravado de concreto na construção dessas estruturas (Prefeitura de São Paulo, 2012). O mesmo ocorreu recentemente em Campo Grande, quando a Câmara de Vereadores lançou um projeto para o uso de tais pavimentos (Neves, 2023).

Fica evidente, portanto, que o uso de pisos intertravados em calçadas tornou-se comum, principalmente por suas vantagens em relação aos materiais tradicionais, como de argamassa ou concreto moldados no local. Os pisos intertravados de concreto apresentam elevada durabilidade (cerca de 20 anos), resistência à abrasão, fácil instalação e capacidade de escoamento. Essa última característica é possível porque neste tipo de piso há fissuras entre as peças. Além disso, quando em cores claras, o piso reflete cerca de 30% da luz que nele incide, havendo menores gastos energéticos em iluminação pública (Tetracon, 2021).

A NBR 15953 estabelece diretrizes para a construção desses sistemas (2011). A seção tipo dessas calçadas é apresentada na Figura 8. A norma define o piso intertravado como “pavimento flexível cuja estrutura é composta por uma camada de base (ou base e sub-base), seguida por uma camada de revestimento constituída de peças de concreto sobrepostas em uma camada de assentamento e cujas juntas entre as peças são preenchidas por material de rejuntamento e o intertravamento do sistema é proporcionado pela contenção”.

A NBR 15953:2011 também estabelece alguns requisitos para a construção do sistema, como as características dos blocos de concreto (de acordo com a ABNT NBR 9781), do subleito (de acordo com a ABNT NBR 12307) e da base e sub-base. O subleito deve ser constituído de solo natural e a sub-base e a base devem ser de materiais pétreos ou misturas estabilizadas de cimento. Além disso, a norma estabelece que deve ser respeitada a espessura das juntas uniformes com espaçamento de 2 mm a 5 mm.



**Figura 8** Seção tipo de piso intertravado com blocos de concreto

Fonte: ABCP (2016).

## 3 METODOLOGIA

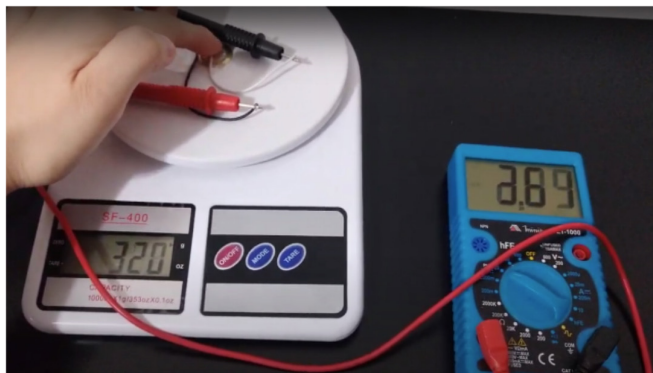
O presente trabalho contou com a pesquisa de artigos referentes à geração de eletricidade com o uso de placas piezoelétricas e consulta às normas ABNT NBR: 15953, ABNT NBR: 11798 e ABNT NBR: 11803. Estas tratam de pavimentos intertravados com peças de concreto e especificações para o uso de diferentes materiais para sub-base ou base do piso intertravado. Os materiais empregados tanto para confecção do circuito quanto da calçada foram escolhidos pela grande disponibilidade no mercado brasileiro e preço. Os detalhes serão apresentados nas seções subseqüentes.

### 3.1 Elaboração do sistema piezoelétrico

Algumas configurações de sistemas de colheita com dispositivos piezoelétricos foram testadas com a finalidade de obter o melhor resultado na obtenção de energia elétrica. Para todas as configurações de circuito, empregaram-se colhedoras piezoelétricas do tipo tambor com 20 mm de diâmetro externo, constituído de uma base de tambor de aço SS304, e 13,5 mm de diâmetro interno, constituído da placa de PZT.

Antes da execução dos circuitos, verificou-se a voltagem gerada por cada uma das placas de PZT, utilizando um sistema composto por um multímetro, uma balança, uma placa piezoelétrica com dois fios soldados e fita adesiva. A investigação foi realizada fixando a placa de PZT à balança eletrônica (Casambiente, capacidade 10.000 g x 1 g) com auxílio da fita adesiva; em seguida, ligaram-se os cabos da placa aos fios do multímetro (Minipa ET-1000) e verificou-se a voltagem gerada quando aplicada carga na placa.

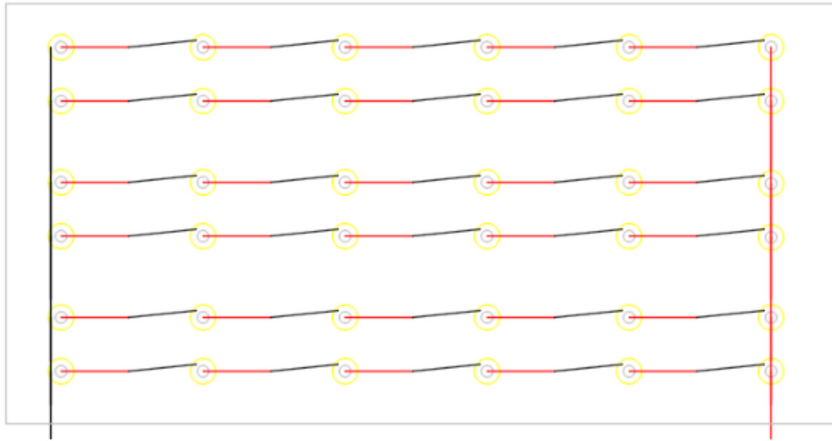
Os testes para verificação da geração de tensão pela pastilha piezoelétrica foram feitos por meio da fixação do tambor coletor na balança com auxílio da fita adesiva. Os fios soldados no tambor foram conectados ao multímetro e este configurado para medir tensão de até 20 V. Aplicou-se uma carga de 300 g sobre a pastilha, conforme mostra a Figura 9:



**Figura 9** Testes de produção de tensão pelo tambor piezoelétrico

Fonte: Elaborada pelos autores.

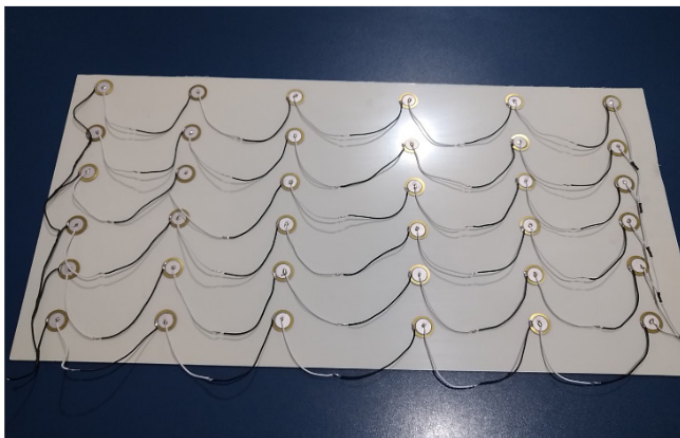
Executou-se o circuito inicialmente por meio de ligações em série entre os transdutores piezoelétricos e, depois, estas foram conectadas entre si em paralelo conforme Figura 10. O sistema foi composto de 36 transdutores piezoelétricos com fios já soldados, e a fixação das pastilhas ocorreu em uma placa de poliestireno de dimensões de 60 cm por 30 cm e espessura de 2 mm, com o auxílio de uma fita dupla face para facilitar o trabalho para ligação do circuito.



**Figura 10** Circuito em série

Fonte: Elaborada pelos autores.

Em seguida, foram feitas as devidas conexões e isolamentos (Figura 11). Em testes preliminares, verificou-se que o circuito não era eficiente para o acendimento de um LED, pois a eletricidade possivelmente gerada por uma das pastilhas seria consumida pela pastilha piezoelétrica seguinte, gerando uma deformação nesta, o que é chamado de efeito piezoelétrico reverso.

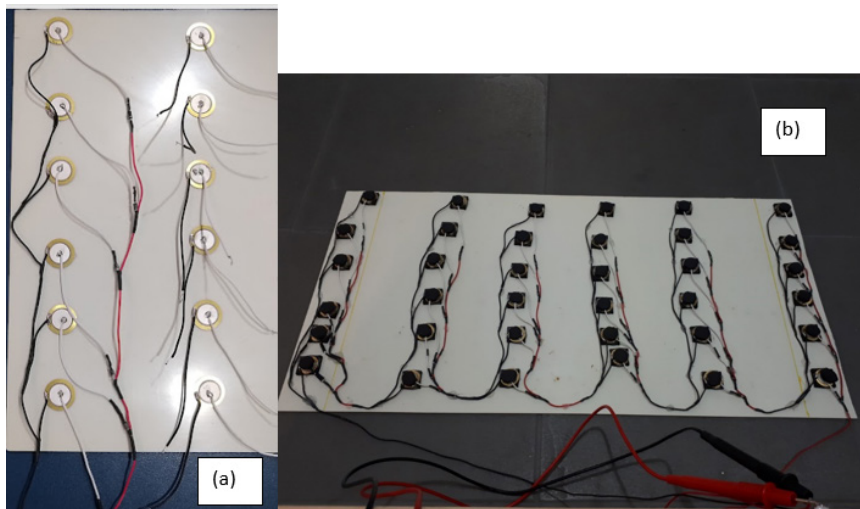


**Figura 11** Circuito misto

Fonte: Elaborada pelos autores.



A alternativa viável a esse circuito misto foi a introdução de diodos em todos os polos positivos da pastilha, para que a corrente pudesse fluir em apenas uma direção. O sistema foi configurado de forma que cada fio positivo da primeira fileira de transdutores fosse ligado a um diodo (1N5818). Em seguida, foram feitas ligações dos terminais positivos entre si. A cada ligação, aplicou-se o isolante termorretrátil. Dessa forma, o circuito resultante constituiu-se por seis transdutores piezoelétricos ligados entre si (Figura 12a). Com auxílio de um multímetro, realizaram-se testes de geração de tensão após a finalização de cada fileira.

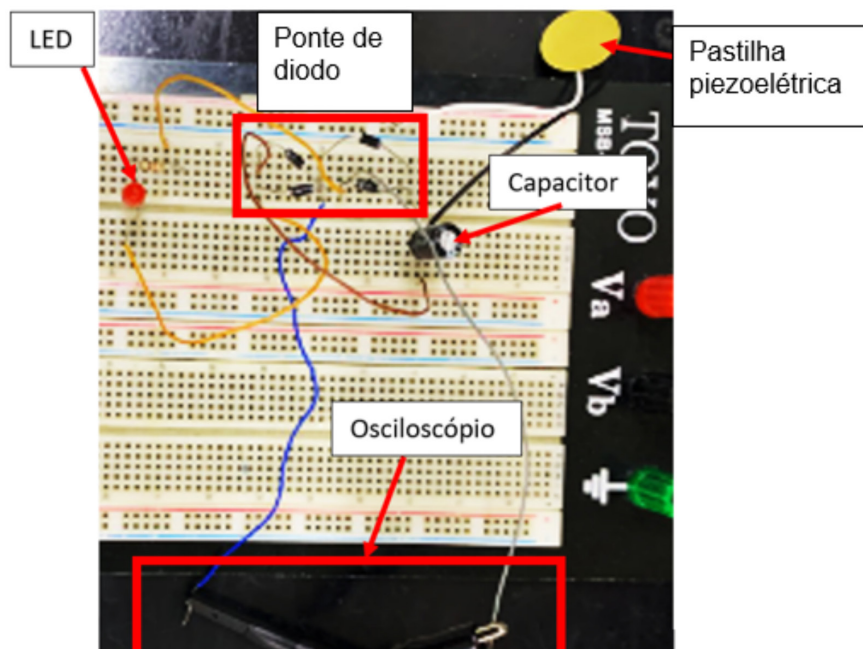


**Figura 12** À esquerda (a), detalhe do circuito misto com ligação de diodos; à direita (b), circuito completo

Fonte: Elaborada pelos autores.

Portanto, a configuração final do circuito baseia-se no circuito misto, em que se utilizaram pedaços de neoprene adesivo para colar as placas de forma a permitir sua deformação, mas sem que o material frágil das placas fosse danificado, conforme Figura 12b.

Buscou-se conectar o sistema com um circuito baseado no trabalho de Mishra *et al.* (2015) (veja a Figura 6) em uma placa *proto-board* (Toyo MSB 300A), com o uso de um capacitor (470  $\mu$ F) com o intuito de armazenar energia para manter o LED aceso. Foram feitos testes com um tambor coletor (Figura 13) e com o circuito completo.



**Figura 13** Protoboard com a configuração de Mishra *et al.* (2015) conectado a um tambor coletor (garras jacarés conectadas a um osciloscópio)

Fonte: Elaborada pelos autores.

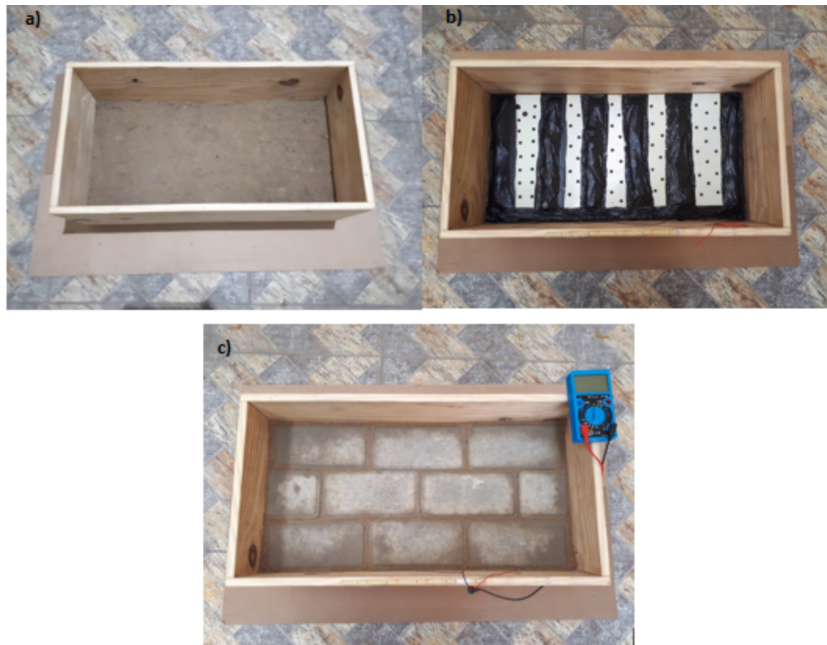
### 3.2 Elaboração da calçada intertravada

Escolhido o tamanho das placas de sensores piezoelétricos a serem usados e o tipo de calçada a ser executada no sistema, decidiu-se que seria feito um protótipo de calçada com 30 cm de largura e 60 cm de comprimento. A partir dessas dimensões, pesquisaram-se tipos de blocos de concreto para piso intertravado possíveis de serem utilizados e optou-se pelo uso dos blocos tradicionais retangulares com 20 cm de comprimento, 10 cm de largura e 6 cm de altura.

Considerando todas as camadas de um piso intertravado, optou-se por serem feitas apenas as camadas de assentamento e dos blocos de concreto, já que o piso seria executado dentro de uma fôrma. Assim, o protótipo de piso intertravado consistiu em uma camada de assentamento, executada em agregado miúdo, no circuito piezoelétrico impermeabilizado com faixas de lona fina e com a placa de base do circuito furada para permitir a drenagem da água e, por fim, nos blocos de concreto intertravados.

O piso foi executado de acordo com as seguintes etapas:

- 1) Execução de uma camada de assentamento com espessura de 5 cm constituída de agregados miúdos dentro da fôrma de madeira (Figura 14a).
- 2) Colocação da placa onde foi executado o circuito, devidamente impermeabilizado, e a placa com furos para auxiliar na drenagem da água (Figura 14b).
- 3) Colocação dos blocos de concreto e acabamento (Figura 14c).



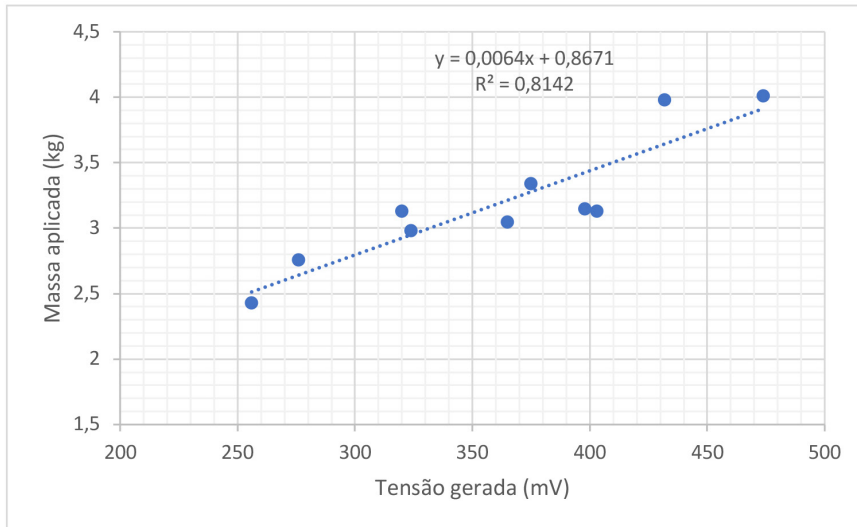
**Figura 14** Ilustrações a, b e c, representando, respectivamente, as etapas 1, 2 e 3 da execução do piso

Fonte: Elaborada pelos autores.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os testes de geração de tensão nas pastilhas piezoelétricas resultaram nas medidas de tensão apresentadas na Figura 15, indicando uma relação linear entre a carga aplicada sobre os tambores piezoelétricos e a tensão gerada. Os testes foram realizados

colocando-se a carga sobre uma pastilha e medindo a tensão elétrica com o multímetro; a experiência aconteceu antes da conclusão da montagem apresentada na Figura 14.



**Figura 15** Massa sobre o tambor coletor versus tensão gerada

Fonte: Elaborada pelos autores.

Durante as medições, foi possível observar que o transdutor piezoelétrico gera valores positivos de tensão na compressão e negativos na descompressão. Diante disso, chegou-se à conclusão da possibilidade de produzir energia em calçadas utilizando cerâmicas piezoelétricas, porém elas geram uma corrente alternada e a intensidade dependerá da carga aplicada à pastilha. Também se observou que a forma como a pastilha é pressionada ou deformada afeta a quantidade de tensão gerada. Os resultados indicam a necessidade de uma constância na aplicação de carga no circuito montado.

Nos testes preliminares com o circuito misto, sem a colocação do pavimento, verificou-se, com auxílio do multímetro, que as pastilhas, quando pressionadas com uma carga de 1 kg, foram capazes de gerar até 6,23 V. Ao testar a corrente elétrica gerada, o sistema conseguiu produzir apenas 2  $\mu\text{A}$ . Os testes simulando caminhada sobre o piso intertravado mostraram que o circuito foi capaz de gerar até 8 V, porém manteve-se em torno de 2 V. Em relação à corrente, o piso foi capaz de gerar até 3  $\mu\text{A}$  e manteve-se apenas 1  $\mu\text{A}$ . Embora esse resultado indique uma pequena geração de

energia, ele pode ser considerado próximo aos encontrados na literatura (Ilha; Santos, 2020; Mishra *et al.*, 2015).

As tentativas de conexão do circuito com capacitores ou ligação em fonte não se mostraram satisfatórias, embora tenha sido realizado o circuito proposto por Mishra *et al.* (2015). Estes autores conseguiram resultados satisfatórios para geração contínua de energia porque havia um sistema de vibração constante para excitação do sistema, contudo esse dispositivo não está disponível na Universidade Presbiteriana Mackenzie. Além disso, os autores usaram um tipo de capacitor que armazena carga em pequenas frações, enquanto no presente trabalho o capacitor tinha de receber uma tensão mínima para carregar, a qual nunca foi alcançada.

A mesma lógica pode ser entendida para o circuito com acionador de fonte para ligar o LED. Embora em testes de bancada a tensão de 5 V fosse alcançada com um único disco coletor, como o piezoelétrico necessita de excitação constante, o LED acendia por um período muito curto. De fato, os dispositivos coletores em forma de tambor funcionam melhor com vibrações constantes, o que ainda indica que são promissores para uso em calçadas com grande circulação de pessoas.

Por fim, em relação ao sistema de drenagem, verificou-se que após molhar o pavimento, o circuito não foi danificado, indicando suficiência deste sistema. Testes com carga mostraram resultados similares ao circuito misto, sem o pavimento, descrito anteriormente.

---

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Circuitos de colheita de energia elétrica foram construídos através de dispositivos piezoelétricos de PZT em forma de tambor com 20 mm de diâmetro externo. Testaram-se diferentes configurações de circuitos, sendo o circuito misto com inserção de diodos o que melhor possibilitou a transmissão de energia entre os 36 discos que compõem o sistema. Verificou-se que há proporcionalidade linear entre a carga aplicada nos tambores piezoelétricos e a tensão gerada, indicando também que uma maior quantidade de pastilhas recebendo o mesmo valor de carga de forma constante pode favorecer o sistema. Os valores de tensão e corrente gerados são semelhantes aos encontrados na literatura, embora não indiquem grande geração de energia elétrica.

O sistema criado pode ser melhorado se houver circuitos eletrônicos, como banco de capacitores, capazes de armazenar picos de energia, ou pulso de energia; vale ressaltar que para testar essa solução seria necessária uma grande quantidade de sensores

piezoelétricos e mesmo uma área grande da calçada, para gerar a tensão necessária para ativar o banco de capacitores. Além disso, é preciso testar o sistema em um local com aplicação de carga cíclica. A calçada intertravada foi montada com sucesso e permitiu transmitir carga para o circuito. Em trabalhos futuros acredita-se que o sistema possa ser otimizado com os dispositivos eletrônicos e de testes adequados em calçadas reais (passos de pessoas) simulando carga cíclica.

## PRODUCTION OF PIEZOELECTRIC SIDEWALK

### Abstract

The need to diversify energy sources makes scientists around the world seek the use of materials with intelligent properties. This category includes materials used in solar cells, for example, but also piezoelectric materials, such as lead zirconate titanate (PZT). Piezoelectrics are capable of generating electric current (or voltage) through a strain applied to them. The purpose of this research was to demonstrate a method of building an intelligent sidewalk, with the expectation of obtaining power generation through the movement of pedestrians on its surface. For this purpose, circuits were built with PZT collector drums capable of lighting an LED. A mixed circuit configuration with 36 collector drums was chosen. The circuit was incorporated into the construction of an interlocking draining floor. The system proved to be positive in the lighting of an LED, but there was a need for constant vibration or capacitor systems for energy storage.

**Keywords:** Smart sidewalk. Power generation. PZT.

---

## REFERÊNCIAS

- ABRAMOVICH, H. H. E. *et al.* Power harvesting from railway; apparatus, system and method. *US Patent 7*, Nº 812, c. 508, 2009.
- ADDINGTON, M.; SCHODEK, D. L. Smart materials and new technologies for the architecture and design professions. *Architectural Press*, Boston, 2005.
- ANTON, S. R.; SAFAE, M. Piezoelectric energy harvesting. *Encyclopedia of Smart Materials*, v. 4, p. 104-116, 2022.

- APC INTERNATIONAL. *What are piezoelectric constants*. [s.d]. Disponível em: <https://www.americanpiezo.com/knowledge-center/piezo-theory/piezoelectric-constants.html>. Acesso em: 16 nov. 2022.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 15953: pavimento intertravado com peças de concreto: execução*. Rio de Janeiro, 2011.
- BENGISU, M. *Engineering Ceramics*. Springer. 2001. Disponível em: [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-662-04350-9\\_5](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-662-04350-9_5). Acesso: 1º maio 2023.
- CALLISTER, W. D. *Ciência e engenharia de materiais: uma introdução*. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016. p. 708.
- CALLISTER, W. D. *Fundamentos da ciência e engenharia de materiais: uma abordagem integrada*. Rio de Janeiro: LTC, 2006.
- CAO, Y. *et al.* Energy conversion models and characteristics under various inner connections of a novel packaged piezoelectric transducer for pavements. *Energy Conversion and Management*, v. 245, p. 114563, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0196890421007391>. Acesso em: 1º maio 2023.
- EBERT, M. H. *Simetria externa dos cristais*. Museu de Minerais, Minérios e Rochas Heinz Ebert, 2022. Disponível em: <https://museuhe.com.br/minerais/cristais-e-cristalografia/simetria-externa-dos-cristais/>. Acesso em: 16 nov. 2022.
- ELHALWAGY, A. M.; GHONEEN, M. Y.; ELHADIDI, M. *Feasibility study for using piezoelectric energy harvesting floor in buildings' interior spaces*. 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.05.012>. Acesso em: 1º maio 2023.
- FARACO, B. S. *Fibras nanoestruturadas de titanato de bário e estrôncio: síntese por electrospinning e caracterização microestrutural*. Tese (Doutorado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/134884>. Acesso em: 1º maio 2023.
- GHOLIKHANI, M. *et al.* A critical review of roadway energy harvesting technologies. *Applied Energy*, v. 261, p. 114388, 2020.
- HSING, H.; DUNG-HUNG, P.; YANG, L. R.-H. High piezoelectric and dielectric properties of 0e3 PZT/cement. *Cement and Concrete Composites*, v. 72, p. 1-8, 2016. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0958946516302050>. Acesso em: 1º maio 2023.
- ILHA, M.; SANTOS, N. *Sistema de discos piezoelétricos para geração de energia em pavimentos*. São Paulo: Universidade São Judas, 2020.
- MAO, J. *et al.* Piezoelectric and dielectric behavior of 0-3 asphalt-based composites. *Ceramics International*, v. 42, p. 16131-16137, 2016. Disponível em: [https://hero.epa.gov/hero/index.cfm/reference/details/reference\\_id/7093243](https://hero.epa.gov/hero/index.cfm/reference/details/reference_id/7093243). Acesso em: 1º maio 2023.
- MISHRA, R. *et al.* Vibration energy harvesting using drum harvesters. *International Journal of Applied Engineering Research*, v. 10, n. 14 p. 34995-35001, 2015. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/282936734\\_Vibration\\_energy\\_harvesting\\_using\\_drum\\_harvesters#fullTextFileContent](https://www.researchgate.net/publication/282936734_Vibration_energy_harvesting_using_drum_harvesters#fullTextFileContent). Acesso em: 1º maio 2023.

MOULSON, J. M. *Electroceramics: materials, properties, applications*. Hoboken: John Wiley & Sons, 2003. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/0470867965>. Acesso em: 1º maio 2023.

NEVES, G. *Projeto busca obrigatoriedade de ruas com piso intertravado em Campo Grande*. Portal UOL de Notícias, 2023. Disponível em: <https://midiamax.uol.com.br/politica/2023/projeto-busca-obrigatoriedade-de-ruas-com-piso-intertravado-em-campo-grande/>. Acesso em: 10 maio 2023.

NIA, E. M. *et al.* A review of walking energy harvesting using piezoelectric materials. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, n. 291, 012026, 2017. Disponível em: doi:10.1088/1757-899X/291/1/012026. Acesso em: 2 maio 2023.

OLIVEIRA, N. D. *et al.* Práticas sustentáveis aplicadas ao setor da construção civil: importância, perspectivas e benefícios. *European Academic Research*, p. 2353-2385, 2020. Disponível em: <https://engemasp.submissao.com.br/22/arquivos/569.pdf>. Acesso em: 1º maio 2023.

PREFEITURA DE SÃO PAULO. *Conheça as regras para arrumar a sua calçada*. São Paulo, 2012. Disponível em: [https://www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/upload/subprefeituras/calçadas/arquivos/cartilha\\_-\\_draft\\_10.pdf](https://www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/upload/subprefeituras/calçadas/arquivos/cartilha_-_draft_10.pdf). Acesso em: 10 maio 2023.

SHEHATA, N. *et al.* Smart materials: the next Generation. *Encyclopedia of Smart Materials*, p. 288-299, 2022. Disponível em: doi:10.1016/B978-0-12-815732-9.00062-0. Acesso em: 1º maio 2023.

SIQUEIRA, I. *et al.* *Materiais piezelétricos: uma análise de seu potencial como energy harvesting*. In: ENCONTRO NACIONAL DE ESTUDANTES DE ENGENHARIA METALÚRGICA, DE MATERIAIS E DE MINAS, 18, 2018, São Paulo. *Proceedings* [...]. São Paulo: ABM, 2018. Disponível em: <https://abmproceedings.com.br/ptbr/article/materiais-piezetrlicos-uma-anlise-de-seu-potencial-como-energy-harvesting>. Doi: 10.5151/2594-4711-32079

SOCIETY FOR EXPERIENTIAL GRAPHIC DESIGN. *Smarter sidewalks*. 2022. Disponível em <https://segd.org/>: <https://segd.org/smarter-sidewalks-0>. Acesso em: 10 nov. 2022.

TETRACON. Site, 2021. Disponível em: <https://tetraconind.com.br/pisos-intertravados/piso-intertravado-uma-tendencia-economica-duradoura-e-sustentavel/>. Acesso em: 16 dez. 2024.

YANGSEN CAO, F. Z. Energy harvesting performance of a full-pressure piezoelectric transducer applied in pavement structures. *Energy and Buildings*, v. 266, 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378778822003140>. Acesso em: 1º maio 2023.

YUAN, D. *et al.* Energy output and pavement performance of road thermoelectric generator system. *Renewable Energy*, 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960148122016974>. Acesso em: 1º maio 2023.

WANG, C. *et al.* Basic performance and asphalt smoke absorption effect of environment-friendly asphalt to improve pavement construction environment. *Journal of Cleaner Production*, v. 3333, p.130142, 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652621043079>. Acesso em: 1º maio 2023.

WANG, H.; ZHAO, J. *Piezoelectric energy harvesting in airport pavement*. CAIT-UTC-NC17, 2019. Disponível em: <https://cait.rutgers.edu/wp-content/uploads/2018/05/cait-utc-nc17-final.pdf>. Acesso em: 1º maio 2023.



ZHAO, H. J. L. A comparative analysis of piezoelectric transducers for harvesting energy from asphalt pavement. *Journal of the Ceramic Society of Japan*, v. 120, p. 317-323, 2012. Disponível em: [https://www.jstage.jst.go.jp/article/jcersj2/120/1404/120\\_JCSJ-P12069/\\_article](https://www.jstage.jst.go.jp/article/jcersj2/120/1404/120_JCSJ-P12069/_article). Acesso em: 1º maio 2023.

ZHAO, H. C. Q. Analysis on performance of piezoelectric transducer in multilayer arcuate bridge structure. *Piezoelectrics Acoustooptics*, v. 38, p. 367-371, 2016. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/305159438\\_Analysis\\_on\\_performance\\_of\\_piezoelectric\\_transducer\\_in\\_multilayer\\_arcuate\\_bridge\\_structure](https://www.researchgate.net/publication/305159438_Analysis_on_performance_of_piezoelectric_transducer_in_multilayer_arcuate_bridge_structure). Acesso em: 1º maio 2023.

ZHANG, Y. X. C. Study on induction polarization process of carbon nanotube modified 0-3-1 type cement-based piezoelectric composites. *New Building Materials*, v. 6, p. 6-8, 2020.

#### **Contato**

Caroline Valadão Pacheco  
caroline.pacheco@mackenzie.br

#### **Tramitação**

Recebido em: 15/02/2024  
Aprovado em: 16/09/2024