

UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS - UNISINOS
UNIDADE ACADÊMICA DE GRADUAÇÃO
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

FLÁVIA RENATA PRESTES CARVALHO

**Estudo de Caso: Uso da Piezoelectricidade em pavimentos, mantendo
suas características de geração de energia**

Porto Alegre
2023

FLÁVIA RENATA PRESTES CARVALHO

Estudo de Caso: Uso da Piezoelectricidade em pavimentos, mantendo suas características de geração de energia

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil, pelo Curso de Engenharia Civil da Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS).

Orientador(a): Professor Me. Fabiano da Silva Jorge

Porto Alegre

2023

Dedicatória

Dedico esse trabalho a minha mãe e meu padrasto que me apoiaram e me ajudaram a chegar até aqui e meu pai (In Memoriam), pois sei que teria muito orgulho em ver sua filha se formar como Engenheira Civil.

AGRADECIMENTOS

Ao Senhor Jesus Cristo em primeiro lugar, pois Ele que me deu forças e fé para continuar. Mesmo quando tudo parecia tão difícil, me apresentou pessoas, lugares e situações que me fizeram crescer pessoal e profissionalmente durante essa jornada.

A minha mãe Sara Pires e meu padrasto João Pires, embora minha falta de tempo muitas vezes, sempre acreditaram em mim, me apoiaram e me ouviram com paciência. Esses momentos foram imprescindíveis para me incentivar a construir e buscar algo maior e melhor para nossa família.

A meu pai Cidiomar Carvalho, que mesmo não estando mais aqui, me trouxe força para continuar, alegria e inspiração para seguir nesse caminho, pois seu exemplo de vida sempre foi de um cara que se divertia em tudo, mesmo com as preocupações diárias.

A todos meus amigos, colegas de trabalho e aula pela compreensão e ajuda nos momentos difíceis. Obrigada pelos momentos de diversões e até em minhas frustrações no qual vocês se fizeram ouvintes e resolutivos.

Ao meu professor que aceitou esse tema inovador escolhido por mim e, mesmo com dúvidas no assunto, não hesitou em ser solícito e me dar as informações necessárias, sempre com muita paciência diante de minhas dúvidas e informações questionadas.

Ao longo desse processo e ano, fui surpreendida com muitos parceiros: antigos colegas de trabalho, empreiteiros, os colegas dos laboratórios da Civil, Elétrica e Mecânica da Universidade. Muitos deles não me conheciam, mas me ajudaram e sou muito grata, pois construímos juntos esse trabalho.

“Combati o bom combate, completei a carreira, guardei a fé”
(II Timóteo Capítulo 4).

RESUMO

Diversas rodovias no país contêm um grande fluxo de veículos. Estes, com sua velocidade e peso, geram calor e atrito nos pavimentos. Atualmente, essa energia mecânica é desperdiçada. Com o objetivo de converter a energia de vibração dos veículos em energia elétrica, este trabalho estuda a incorporação de materiais piezoelétricos para tornar as vias mais energeticamente eficientes. A piezoeletricidade é o efeito de cristais que, ao sofrerem pressão externa, deformam seu campo magnético, gerando uma diferença de potencial que resulta em corrente elétrica. O propósito deste trabalho foi analisar pastilhas piezoelétricas de 20mm de diâmetro abaixo da camada de revestimento do pavimento flexível, por meio de ensaios de laboratório e campo. No laboratório, foram realizados ensaios para avaliar a rigidez e o desempenho do sistema sob as cargas de 10Kg, 50Kg, 150Kg, 250Kg e 350Kg, mantendo as características da geração de energia e visando a durabilidade do sistema durante a sucessão de aplicação das cargas. No campo, foram avaliadas as diferenças entre as cargas de veículos do tipo passeio e SUV, assim como o efeito das velocidades de 10Km/h, 20Km/h e 30Km/h, com o intuito de manter o fornecimento da microgeração de energia e permitir uma geração considerável de energia, mesmo sob condições adversas externas que o material foi aplicado. Observou-se uma contribuição positiva no comportamento mecânico em laboratório e campo em relação ao efeito das cargas. Confirmando estudos anteriores, quanto maior a aplicação de pesos, maiores foram os efeitos da corrente elétrica no sistema. Assim, nos ensaios realizados, foi possível validar as características de geração de energia e as emissões geradas estiveram conforme o esperado. Dessa forma, este trabalho propõe uma alternativa de energia renovável em locais de grande movimentação de pessoas e veículos e o sistema é favorável por sua integridade para ter continuidade em estudos futuros.

Palavras-chave: Piezoeletricidade; Microgeração de Energia; Vibração de Pavimentos; Eficiência Energética; Captura de Energia;

ABSTRACT

Several highways in the country contain a large flow of vehicles. These, with their speed and weight, generate heat and friction on the pavements. Currently, this mechanical energy is wasted. With the aim of converting the vibration energy of vehicles into electrical energy, this work studies the incorporation of piezoelectric materials to make roads more energy efficient. Piezoelectricity is the effect of crystals that, when subjected to external pressure, deform their magnetic field, generating a potential difference that results in electric current. The purpose of this work was to analyze 20mm diameter piezoelectric tablets below the flexible pavement coating layer, through laboratory and field tests. In the laboratory, tests were carried out to evaluate the rigidity and performance of the system under loads of 10Kg, 50Kg, 150Kg, 250Kg and 350Kg, maintaining the characteristics of energy generation and aiming at the durability of the system during the succession of loads. In the field, the differences between the loads of passenger and SUV vehicles were evaluated, as well as the effect of speeds of 10Km/h, 20Km/h and 30Km/h, with the aim of maintaining the supply of energy microgeneration and allowing a considerable energy generation, even under adverse external conditions in which the material was applied. A positive contribution to the mechanical behavior in the laboratory and field was observed in relation to the effect of loads. Confirming previous studies, the greater the application of weights, the greater the effects of the electric current on the system. Thus, in the tests carried out, it was possible to validate the energy generation characteristics and the emissions generated were as expected. Therefore, this work proposes a renewable energy alternative in places with large movement of people and vehicles and the system is favorable for its integrity to be continued in future studies.

Keywords: Piezoelectricity; Energy Microgeneration; Road Vibration; Energy Efficiency; Energy Harvesting;

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Matriz Energética ano 2020	18
Figura 2 - Tipos de Energy Harvesting	19
Figura 3 - Fontes de energia no Brasil	19
Figura 4 - Emissões GEE Globais por Setor	21
Figura 5 - Consumo asfalto no Brasil	22
Figura 6 - Ciclovía na França com painéis Fotovoltaicos	23
Figura 7 - Desgaste em ciclovía	24
Figura 8 (a, b, c) - Comportamento Piezoelétrico na molécula.....	25
Figura 9 - Cristais piezoelétricos naturais	26
Figura 10 - Dispositivo piezoelétrico do tipo PVDF	27
Figura 11 - Pastilha PZT soldada	27
Figura 12 - Componentes pastilha PZT.....	28
Figura 13 - Tipos de revestimento com misturas asfálticas.....	30
Figura 14 - Pavimento flexível	31
Figura 15 - Pavimento Semirrígido.....	32
Figura 16 - Pavimento rígido	33
Figura 17 - Esforços nas camadas dos pavimentos flexível e semirrígido.	34
Figura 18 - Absorção dos carregamentos no pavimento flexível e rígido.....	34
Figura 19 - Deslocamentos das peças de concreto na pavimentação intertravada ..	35
Figura 20 – Peças Tipo I	36
Figura 21 - Peças Tipo II	36
Figura 22 - Peças Tipo III	36
Figura 23 - Peças Tipo IV.....	37
Figura 24 - Faixas granulométricas para PMF	37
Figura 25 – Fluxograma de etapas.....	38
Figura 26 - Geração de acordo com tamanho pastilhas.....	41
Figura 27 - Tensões no material provocada por veículos.....	47
Figura 28 - Previsão de após instalação do kit de campo	Erro! Indicador não definido.

LISTA DE FOTOGRAFIAS

Fotografia 1 - Laboratório de soldas da elétrica	39
Fotografia 2 - Laboratório de Construção Civil	40
Fotografia 3 - Cancela do Estacionamento Unisinos São Leopoldo.....	41
Fotografia 4 - Pastilhas sendo soldadas	42
Fotografia 5 - Pastilhas já soldadas	43
Fotografia 6 - Ligação mista das pastilhas	43
Fotografia 7 - Pastilhas fixadas na manta	43
Fotografia 8 - Fixação das pastilhas na manta.....	45
Fotografia 9 - kit laboratório finalizado	45
Fotografia 10 - Tamanho bloco da amostra em laboratório.....	47
Fotografia 11 - Prensa Laboratório Civil.....	47
Fotografia 12 - Local para incorporação do kit em campo	48
Fotografia 13 - Multímetro utilizado para as aferições.....	49
Fotografia 14 - Prensa laboratório de construção Civil.....	50
Fotografia 15 - Prensa laboratório de mecânica.....	50
Fotografia 16 - Aferição geração de energia no laboratório de elétrica.....	51
Fotografia 17 - Aferição geração de energia no laboratório da civil	52
Fotografia 18 - Aferição de energia em campo	52
Fotografia 19 - Ensaio de campo após chuvas	60

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Comportamento das cargas x potência geral média.....	57
Gráfico 2 - Comportamento das cargas x tensão geral média	57
Gráfico 3 - Comportamento das cargas x corrente geral média.....	58
Gráfico 4 - Velocidades x tensão geral média	61
Gráfico 5 - Velocidades x corrente geral média.....	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores investimento Kits	46
Tabela 2 – Resumo da tensão, corrente e potência média das aplicações	56
Tabela 3 – Aplicações de 50Kg/s de carga	58
Tabela 4 - Resumo da tensão e corrente média nas passadas	61
Tabela 5 - Resumo da tensão e corrente média nas passadas	63

LISTA DE SIGLAS

ADP	Asfalto diluído de petróleo
AEEE	Anuário Estatístico de Energia Elétrica
CA	Corrente alternada
CO2	Gás Carbônico
EAP	Emulsão asfáltica de petróleo
GEE	Gases de Efeito Estufa
PMF	Pré Misturado a Frio
PVDF	Polyvinilidene Fluoride
PZT	Titanato de Zirconato de Chumbo
SUV	Sport Utility Vehicle
UNISINOS	Universidade do Vale do Rio dos Sinos
V	Volt

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 TEMA	15
1.2 DELIMITAÇÃO DO TEMA	15
1.3 PROBLEMA	15
1.4 OBJETIVOS	16
1.4.1 Objetivo geral	16
1.4.2 Objetivos específicos	16
1.5 JUSTIFICATIVA	17
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
2.1 MATRIZES ENERGÉTICAS	18
2.2 COLHEITA DE ENERGIA (ENERGY HARVESTING)	19
2.2.1 Fontes Renováveis	19
2.2.2 Fontes Não Renováveis	21
2.3 PAVIMENTOS FOTOVOLTAICOS	23
2.4 PIEZOELETRICIDADE	25
2.4.1 Tipos de Cristais Piezoelétricos	26
2.4.2 Material PVDF	27
2.4.3 Material PZT	27
2.4.4 Restrições dos materiais piezoelétricos	28
2.4.5 Capacidade Energética	29
2.5 PAVIMENTOS	29
2.5.1 Camadas dos Pavimentos	29
2.5.2 Tipos de Pavimentos	30
2.5.2.1 Pavimento Flexível	31
2.5.2.2 Pavimento Semirrígido	31
2.5.2.3 Pavimento Rígido	32
2.5.3 Esforços presentes nos Pavimentos	33
2.5.4 Revestimento com Blocos de Concreto	35
2.5.5 Revestimento Pré-Misturado a Frio (PMF)	37
3 METODOLOGIA	38
3.1 FLUXOGRAMA	38
3.2 – DEFINIÇÃO DA FORMA DE ENSAIO (LABORATÓRIO E CAMPO)	39

3.3 – MONTAGEM DOS KITS	41
3.4 – IMPLANTAÇÃO DOS KITS	46
3.5 – PREPARO DOS EQUIPAMENTOS PARA AFERIÇÃO	48
3.6 – VERIFICAÇÃO DO SISTEMA GERADOR DE ENERGIA	51
3.7 – ENSAIO MECÂNICO COM AFERIÇÃO DOS PARÂMETROS	53
4 – ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	55
4.1 - ENSAIOS EM LABORATÓRIO	55
4.1.1 – Ensaio de cargas no laboratório da civil	55
4.1.2 – Ensaio de cargas no laboratório da mecânica.....	56
4.1.3 – Resultados obtidos em laboratórios	56
4.2 - ENSAIOS EM CAMPO	59
4.2.1 – Resultados com velocidades 10Km/h, 20Km/h e 30Km/h	60
4.2.2 – Resultados nas passagens de veículos	63
5 - CONCLUSÕES.....	64
5.1 – SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	65
REFERÊNCIAS.....	66
APÊNDICE A - CARGAS APLICADAS 10KG, 50KG, 150KG, 250KG E 350KG	69
APÊNDICE B – VELOCIDADES 10KM/H, 20KM/H E 30KM/H.....	70
APÊNDICE C – VEÍCULOS PASSANTES SUV E PASSEIO.....	71

1 INTRODUÇÃO

As estradas são historicamente construídas para facilitar o acesso entre comunidades, promovendo o intercâmbio comercial e cultural em virtude do crescimento e desenvolvimento. Com o contínuo crescimento populacional, observa-se a expansão das zonas urbanas e o aumento dos gastos energéticos nas proximidades das vias.

Entretanto, visando reduzir esse elevado consumo, estão sendo estudadas novas alternativas para a colheita de energia gerada pelos fluxos circundantes, termo conhecido em inglês como "Energy Harvesting". Apesar de ser um conceito já reconhecido, encontra-se ainda em estágios iniciais de pesquisa, uma vez que a coleta de energia é uma área promissora para a sustentabilidade em infraestrutura. Um dos métodos de obtenção energética explorados é a piezoelectricidade (HELLER, 2019).

Os piezoelétricos são materiais que, ao serem submetidos a pressão mecânica, alteram seu campo elétrico, gerando energia. O efeito inverso também é observado: quando recebem energia, modificam seu campo e sofrem deformações. Essa propriedade está presente apenas em alguns cristais, devido à sua estrutura molecular simétrica, que apresenta um padrão de repetição em sua composição (SILVA, 2019).

No contexto das estradas, é crucial considerar o fluxo de veículos e a temperatura, uma vez que fatores como peso, alto volume de carros por pista, atrito dos pneus, elevadas temperaturas e a absorção de radiação no asfalto impactam na elasticidade das vias para a aplicação de geração de energia. Locais mais propícios para a colocação desses dispositivos são nas paradas, pois além dos fatores mencionados, o ato de frear deforma a pista e gera vibrações favoráveis para o dispositivo piezoelétrico incorporado (VALENTE, 2019).

1.1 TEMA

Neste trabalho, abordou-se o uso da Piezoelectricidade em pavimentação, detalhando seu sistema construtivo e o desempenho como coletores de energia elétrica. Essa análise foi realizada com base nos resultados obtidos nos ensaios de laboratório e campo.

1.2 DELIMITAÇÃO DO TEMA

O presente trabalho tem como objetivo compreender o potencial da piezoelectricidade para a geração de energia quando incorporada em pavimentos. Isso foi realizado por meio de simulações de aplicação de carga no material, conduzidas em ensaios tanto em laboratório quanto em campo.

Os ensaios laboratoriais foram conduzidos nas prensas dos departamentos de Engenharia Civil e Mecânica, enquanto os ensaios de campo foram realizados no estacionamento da Universidade. Em ambas as instâncias, as cargas foram aplicadas com o conjunto posicionado abaixo do bloco intertravado.

Este estudo se propõe a desenvolver um método construtivo e avaliar a geração de energia, seguindo o padrão de trabalhos já realizados anteriormente. Os ensaios foram projetados para avaliar a resposta do sistema sob diversas cargas de aplicação, considerando a passagem de diferentes meios de transporte, como bicicletas, motos e carros dos tipos Passeio e Sport Utility Vehicle (SUV).

Os ensaios foram conduzidos no período de 30/10/2023 a 10/11/2023, abrangendo a análise da integridade do sistema, a emissão de energia e aspectos econômicos. Vale ressaltar que não foram consideradas aplicações em pavimento rígido de concreto, tampouco a representação da influência da temperatura no conjunto estudado.

1.3 PROBLEMA

Para reduzir as emissões atmosféricas de carbono, é necessário reavaliar a forma de geração de energia e buscar, dentro da engenharia, construções energeticamente mais sustentáveis e eficientes.

Diante da escassez dos recursos naturais, tem-se buscado cada vez mais fontes renováveis de energia, como a eólica, solar e térmica. Além disso, com o avanço nos estudos das tecnologias de materiais inteligentes, está sendo explorada a possibilidade de transformar vibração mecânica em energia.

A motivação para o desenvolvimento deste trabalho surge ao considerar que o setor de transporte é responsável por 23% das emissões globais. Nesse contexto, investigou-se o estudo da piezoelectricidade em vias movimentadas como uma forma de transformar essas áreas em fontes limpas de energia elétrica.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo geral

O presente trabalho tem como objetivo avaliar o desempenho mecânico dos materiais piezoelétricos quando integrados aos pavimentos. Busca-se assegurar a funcionalidade do sistema construtivo e verificar o desempenho na colheita de energia dos cristais cerâmicos utilizados.

1.4.2 Objetivos específicos

- a) Testar a montagem dos kits com as cápsulas piezoelétricas do tipo cerâmica de Titanato de Zirconato de Chumbo (PZT) em ensaios com cargas mecânicas de laboratório e campo;
- b) Medir as emissões de geração de energia e avaliar a integridade dos sistemas;
- c) Analisar os resultados obtidos de corrente e tensão em relação à quantidade de ensaios realizados;
- d) Avaliar e comparar os resultados obtidos com os aspectos mecânicos do sistema para geração de energia.

1.5 JUSTIFICATIVA

A alta demanda e a escassez de energia crescem à medida que a população aumenta, e esses fatores estão interligados a outros recursos que também são afetados, como as fontes hídricas e o aumento de temperatura. São os problemas ambientais que motivam os pesquisadores a buscar medidas sustentáveis e alternativas para minimizar os impactos futuros (VIEIRA, 2021).

Fontes de energia renováveis, como solar, térmica e eólica, representam soluções promissoras para a geração de energia e desempenham um papel crucial na mitigação para a economia de baixo carbono. No entanto, devido à sua natureza proveniente de fontes naturais, essas fontes frequentemente apresentam oscilações, o que pode impedir a obtenção de um sistema de geração contínua de energia.

É fundamental investigar o uso da piezoelectricidade em pavimentação não apenas em ambientes laboratoriais, uma vez que esses sistemas, mesmo sendo mais acessíveis e gerando uma quantidade menor de energia, podem ser mais eficazes em uma aplicação em larga escala (HELLER, 2019).

Dessa forma, o presente trabalho se justifica ao abordar a questão da energia renovável e sustentável, apresentando a possibilidade de aplicação prática em pavimentos.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesta fase do trabalho, para aprimorar o entendimento do que será abordado, é necessário realizar um estudo mais minucioso das matrizes energéticas, pavimentos fotovoltaicos, piezoeletricidade e pavimentação. Estes temas foram abordados por outros autores e merecem uma análise detalhada para enriquecer o contexto em questão.

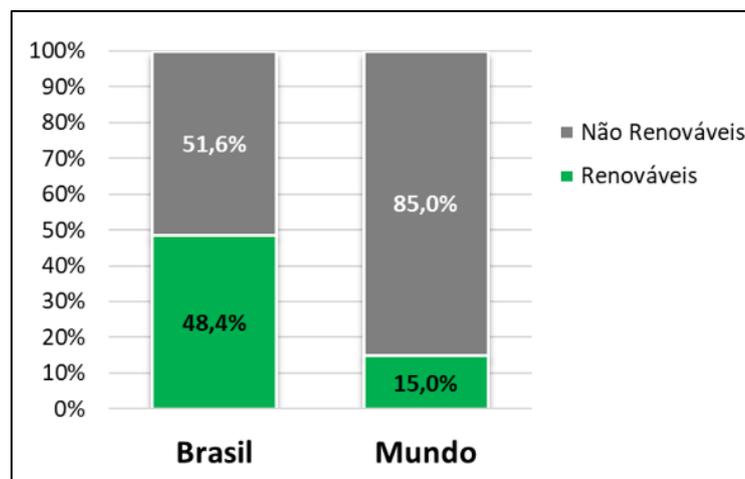
2.1 MATRIZES ENERGÉTICAS

As fontes de energia podem ser classificadas em renováveis, que não se esgotam com a utilização humana, e não renováveis, que se esgotam à medida que seus recursos limitados são consumidos (REZENDE, 2020).

No contexto brasileiro, o país tem se destacado pelo significativo uso de fontes renováveis de energia. Dentre as principais, destacam-se a hidrelétrica, eólica, solar e biomassa. A matriz energética brasileira é notavelmente caracterizada pela presença expressiva de fontes limpas e renováveis, sendo que a energia hidrelétrica, proveniente dos abundantes recursos hídricos, representa uma parcela considerável da produção nacional de eletricidade.

A Figura 01, apresentada abaixo, ilustra a distribuição e o uso das diferentes matrizes energéticas tanto no Brasil quanto no cenário global.

Figura 1 - Matriz Energética ano 2020



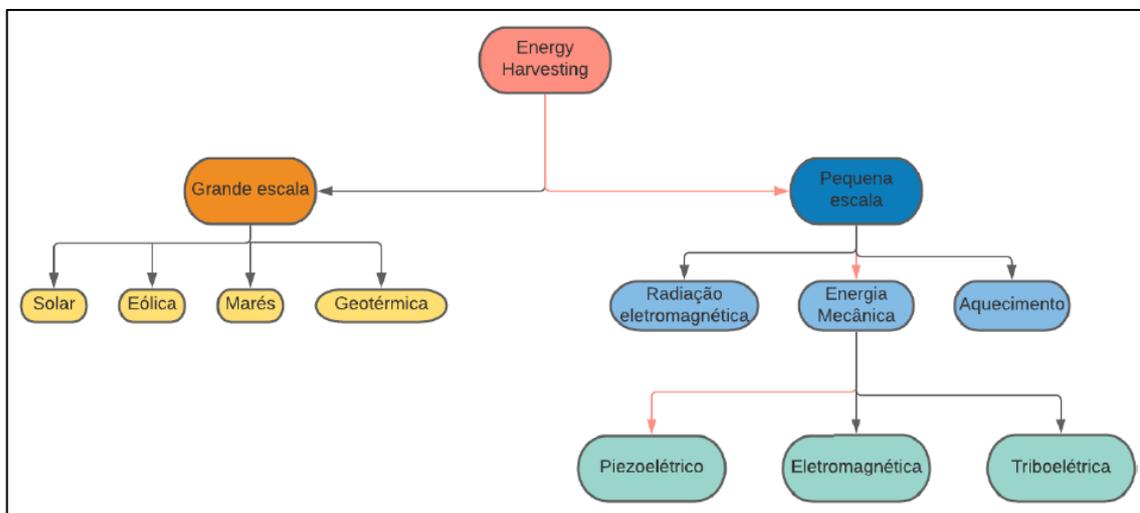
Fonte: EPE (2023).

O Brasil tem investido em fontes renováveis como parte de sua estratégia para promover a sustentabilidade e reduzir as emissões de carbono. A diversificação da matriz energética, aliada ao aproveitamento de recursos naturais favoráveis, contribui para uma abordagem mais equilibrada e ambientalmente amigável na geração de energia. Essa tendência reflete o comprometimento do país em buscar soluções sustentáveis e atender à crescente demanda energética de maneira responsável.

2.2 COLHEITA DE ENERGIA (ENERGY HARVESTING)

O termo "Colheita de Energia", conhecido em inglês como "Energy Harvesting", refere-se à prática de armazenar a energia proveniente de fontes externas e reutilizá-la para fins específicos. Essas fontes têm origem renovável, como solar, térmica, eólica, eletromagnética e cinética (vibrações). Essa energia, conforme figura 02, é captada e armazenada para viabilizar a posterior conversão em eletricidade (MOREIRA, 2021).

Figura 2 - Tipos de Energy Harvesting



Fonte: Moreira (2021).

2.2.1 Fontes Renováveis

As fontes renováveis de energia são aquelas que se regeneram a curto prazo pela natureza, resultando em uma menor emissão de poluentes em comparação com as fontes convencionais.

De acordo com Ferreira (2017, p.13), "O Brasil é um dos países que mais utiliza energias renováveis para a produção de energia elétrica. As fontes de energia renováveis mais empregadas no Brasil são: hidrelétrica, eólica, solar e biomassa/biocombustíveis".

A Figura 03, apresentada abaixo, ilustra o indicativo mencionado para os tipos de fontes renováveis utilizadas no Brasil.

Figura 3 - Fontes de energia no Brasil



Fonte: AEEE (2023).

O Brasil destaca-se pelo expressivo uso de energias renováveis, sendo a matriz energética do país amplamente baseada em fontes limpas. A diversificação dessas fontes contribui para a sustentabilidade ambiental e reflete o compromisso do Brasil em buscar alternativas mais ecológicas na geração de energia.

O sol é uma fonte de energia renovável, sendo inesgotável, e sua radiação converte-se em outros tipos de energia, como fototérmica e fotovoltaica. No entanto, fatores locais como incidência solar, período noturno, ventos, tempestades de granizo, neve, entre outros, ainda afetam sua utilização (LIMA, 2017).

De acordo com Villalva (2015, p.12), "Os ventos também são inesgotáveis e constituem uma fonte de energia renovável, pois vão sempre soprar enquanto existir o calor do Sol para aquecer a atmosfera".

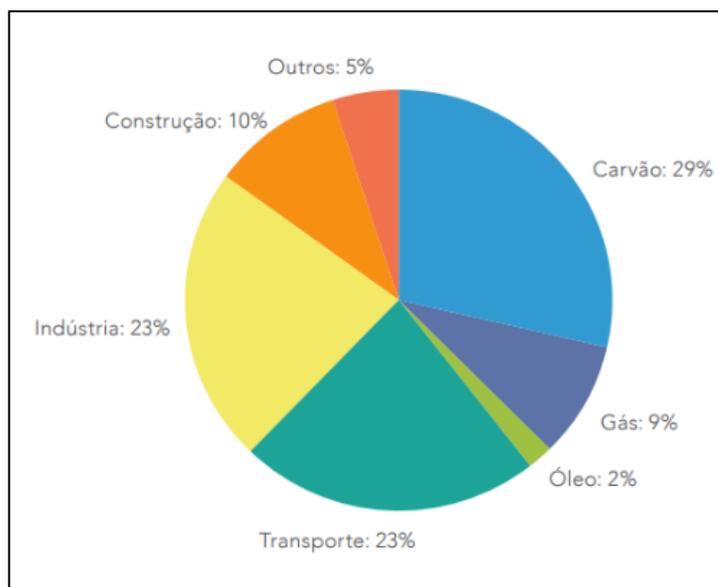
Dentre as fontes de energia renováveis, destaca-se a piezoelectricidade, que ainda é pouco conhecida e explorada. Certos cristais encontrados na natureza têm a capacidade, por meio de meios específicos, de gerar energia elétrica limpa.

2.2.2 Fontes Não Renováveis

As fontes não renováveis são as principais emissoras de gases de efeito estufa (GEE), resultantes da queima de combustíveis fósseis, o que as torna mais poluentes. As emissões de GEE são cruciais para o equilíbrio térmico na Terra, porém, devido à rapidez com que essas emissões ocorrem, buscam-se alternativas para minimizar o impacto do aumento das temperaturas (ARAGÃO, 2019).

Vale ressaltar, conforme figura 04, que o setor de transporte desempenha um papel significativo nessas emissões globais, contribuindo com aproximadamente 23% do total. As emissões provenientes do setor de transporte, muitas vezes associadas à queima de combustíveis fósseis em veículos, desempenham um papel considerável nas mudanças climáticas e nas crescentes preocupações ambientais. Reduzir a dependência de combustíveis não renováveis e buscar alternativas mais sustentáveis são estratégias essenciais para mitigar os impactos negativos das emissões do setor de transporte.

Figura 4 - Emissões GEE Globais por Setor



Fonte: IEA (2023).

O asfalto, derivado do petróleo, um combustível fóssil encontrado em bacias sedimentares marinhas ou terrestres, é formado ao longo de milhões de anos pela deposição de restos orgânicos de animais e vegetais. Essa substância é uma das principais fontes de energia não renovável do mundo (VALENTE, 2019). Outros recursos não renováveis, ainda amplamente utilizados, incluem o gás natural, encontrado nos mesmos locais do petróleo, porém, menos poluente, e o carvão mineral, que é mais poluente (VALENTE, 2019).

Conforme a Revista FGV Energia, ano 9, nº 15 (2022, p.24), "O setor de transportes é responsável por quase um quarto das emissões globais de gás carbônico (CO₂) relacionadas à energia. Para atingir os cortes profundos necessários na redução das emissões de gases de efeito estufa até 2050, conforme o Acordo de Paris, este setor deve realizar mudanças significativas."

A Figura 05, apresentada abaixo, ilustra o consumo de asfaltos produzidos no Brasil.

Figura 5 - Consumo asfalto no Brasil



Fonte: ABEDA (2023).

O processo de produção de asfalto, como derivado do petróleo, está intrinsecamente ligado ao contexto das fontes não renováveis. A discussão sobre o consumo desses materiais no Brasil é pertinente, considerando não apenas a relevância do setor de transporte nas emissões globais de CO₂, mas também o papel desse tipo de infraestrutura na busca por alternativas mais sustentáveis e na transição para fontes de energia mais limpas e renováveis.

2.3 PAVIMENTOS FOTOVOLTAICOS

Painéis fotovoltaicos são empregados em pavimentos como fonte de energia, encontrando aplicações não apenas em coberturas e usinas, mas também em extensões vastas de vias pavimentadas, estacionamentos e ciclovias.

Na França, foi lançado um produto inovador que pode ser aplicado diretamente sobre as rodovias, consistindo em uma mistura de concreto asfáltico, borracha e painéis solares. Essa solução, destacada na Figura 6, assegura que a última camada permita a passagem da radiação solar. A empresa responsável pela criação do produto garante sua segurança, mantendo o atrito necessário para evitar derrapagens e proporcionando resistência a grandes cargas (HELLER, 2019).

Entretanto, é importante notar que ainda são necessários avanços na robustez dos painéis, especialmente em condições de tráfego e em climas mais desafiadores. O estudo indica que a passagem de veículos pode reduzir a geração de energia e ainda apresenta o risco de danificar os cabos de transmissão (HELLER, 2019).

Figura 6 - Ciclovía na França com painéis Fotovoltaicos



Fonte: Heller (2019).

Com a exposição prolongada, as placas solares estão sujeitas a danos mais significativos. A vulnerabilidade dessas placas pode resultar em reparos mais complexos e onerosos ao longo do tempo. Esse desafio fica evidente ao analisar o caso da ciclovía de Amsterdã, conforme ilustrado na Figura 7. Nesse exemplo, a sensibilidade técnica das placas solares destaca a importância de considerar a durabilidade e a resistência desses componentes em ambientes sujeitos a condições adversas. Isso é crucial para garantir a sustentabilidade e eficácia a longo prazo, minimizando a necessidade de intervenções dispendiosas no futuro.

Figura 7 - Desgaste em ciclovia



Fonte: Heller (2019).

2.4 PIEZOELETRICIDADE

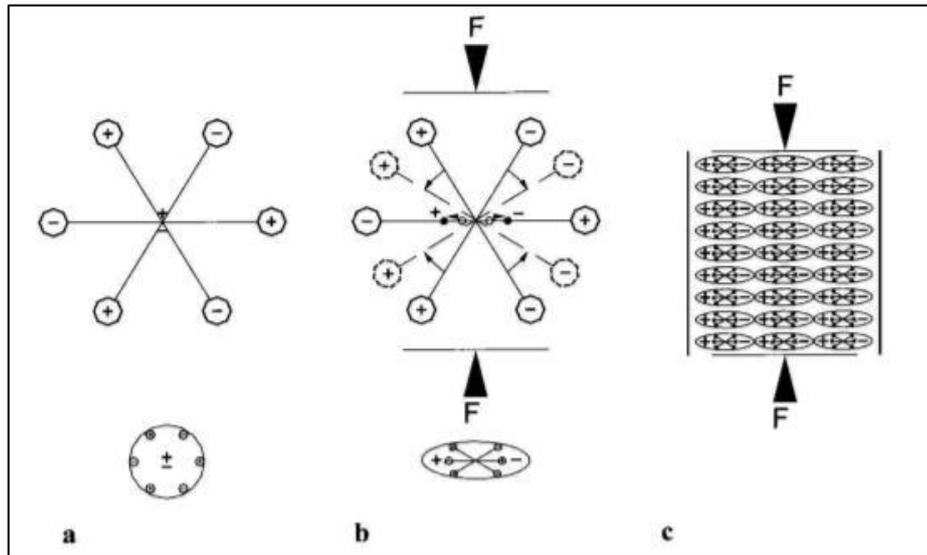
A Piezoelectricidade é o fenômeno presente em alguns cristais que, ao serem submetidos a uma tensão mecânica, seja ela compressão ou tração, alteram seu campo elétrico e geram correntes elétricas, caracterizado como o efeito direto. De maneira inversa, o efeito contrário também ocorre: se o material for submetido a uma queda de tensão, ou seja, a uma diferença de potencial elétrico aplicado a todos os seus eletrodos, há uma deformação mecânica, conhecida como efeito inverso (DIDONÉ, 2022).

O efeito piezoelétrico foi descoberto pelos físicos franceses Pierre e Jacques Curie em 1880. Nas décadas de 40 e 50, a então URSS e o Japão iniciaram o desenvolvimento de materiais piezoelétricos sintéticos, seguidos pelo desenvolvimento de cerâmicas piezoelétricas pelos Estados Unidos (SILVA, 2017).

Para que um material apresente o efeito piezoelétrico, é necessário que ele seja polarizado, ou seja, que suas moléculas tenham as cargas alinhadas, com um lado positivo e outro negativo, e que a estrutura interna não possua centro de simetria. Inicialmente, em uma molécula neutra e sem perturbações, as cargas positivas e negativas estão alinhadas, conforme ilustrado na Figura 8.a. Ao sofrer pressão, sua estrutura se deforma, resultando na separação dos centros gravitacionais e na geração de diferença de potencial, como demonstrado na Figura 8.b. Com o material

polarizado, suas cargas internas geram um campo magnético que transforma a tensão mecânica em energia elétrica, conforme ilustrado na Figura 8.c (MOREIRA, 2021).

Figura 8 (a, b, c) - Comportamento Piezoelétrico na molécula

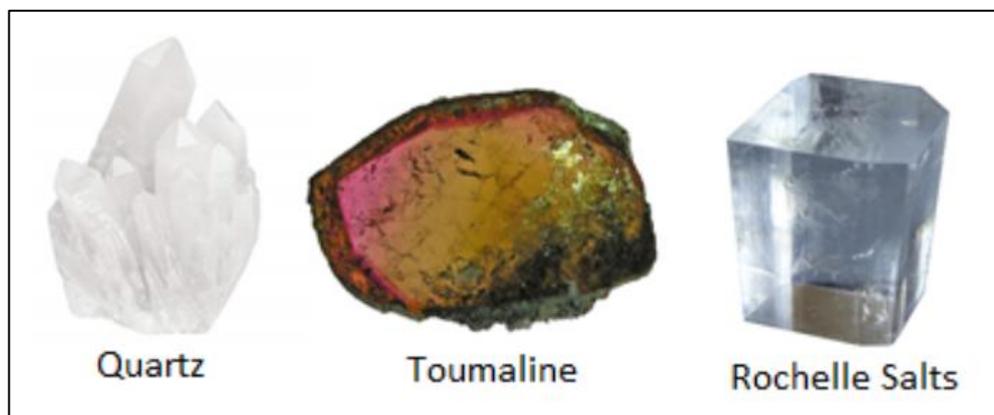


Fonte: Moreira (2021).

2.4.1 Tipos de Cristais Piezoelétricos

A piezoeletricidade pode ser encontrada tanto de forma natural quanto artificial. Naturalmente, esse fenômeno está presente em vários cristais monocristalinos, como quartzo, turmalina, topázio, cana-de-açúcar, tartarato de sódio e o potássio conhecido como sal Rochelle, alguns dos quais são indicados na Figura 09 (COELHO, 2015).

Figura 9 - Cristais piezoelétricos naturais



Fonte: ONSCALE (2023).

De forma artificial, encontramos materiais policristalinos, como a cerâmica PZT, cuja fórmula molecular é PbTiO_3 , os compósitos piezoelétricos de Titanato de Bário, com fórmula molecular BaTiO_3 , e os polímeros de fluoreto de polivinilideno (PVDF). Esses materiais podem ser fabricados para exibir propriedades piezoelétricas significativas, sendo de fácil produção e apresentando fortes domínios elétricos e mecânicos (SILVA, 2017).

2.4.2 Material PVDF

O PVDF é um polímero piezoelétrico robusto e maleável, podendo ser produzido em geometrias complexas e extremamente delgadas (SILVA, 2018).

Sua flexibilidade se manifesta na resistência às cargas aplicadas, nos níveis de deformação e em uma vida útil de fadiga maior, devido à sua natureza menos rígida (HELLER, 2019).

Figura 10 - Dispositivo piezelétrico do tipo PVDF



Fonte: Silva (2018).

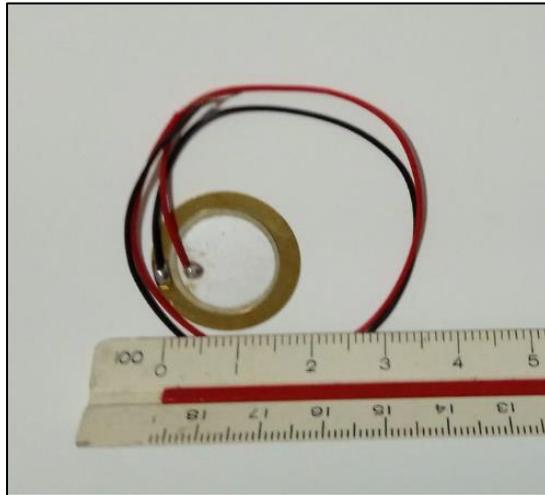
2.4.3 Material PZT

O PZT é uma cerâmica piezoelétrica amplamente utilizada pelos pesquisadores, composta por óxido de chumbo, zircônio e titânio. Sua extrema rigidez torna o material mais frágil e suscetível à fadiga. No entanto, uma das vantagens dessa rigidez reside no fato de apresentar uma resistência na ordem de 70 GPa (SILVA, 2018).

A cerâmica PZT deve ser utilizada em sua parte central como eletrodo positivo e a parte externa como eletrodo negativo. Devido ao ponto de Curie desse material

ser baixo, ultrapassá-lo pode resultar na perda de suas propriedades piezoelétricas (REZENDE, 2020).

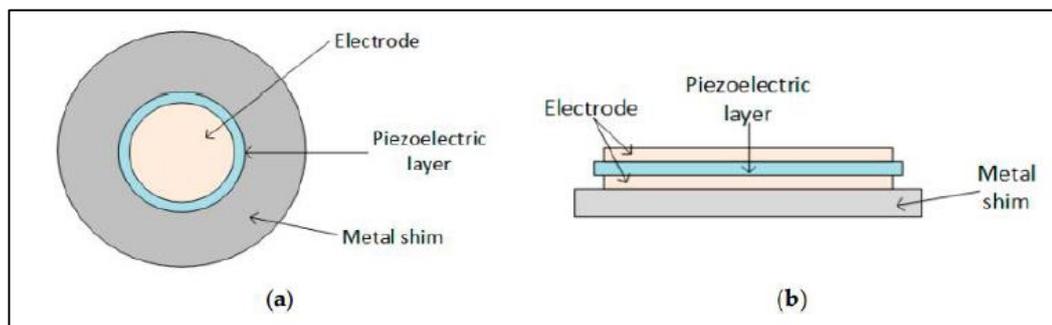
Figura 11 - Pastilha PZT



Fonte: Registrada pelo(a) autor(a)

O eletrodo central tem a função de potencializar o desempenho nas operações de baixa frequência e aprimorar a potência de saída do conjunto, com suas bordas revestidas por uma camada de metal (MORREIRA, 2021).

Figura 12 - Componentes pastilha PZT



Fonte: Moreira (2021).

2.4.4 Restrições dos materiais piezoelétricos

Para garantir a durabilidade das placas, é essencial que elas possam se deformar e retornar ao seu estado inicial após a aplicação de tensão. Deve-se também estar atento à temperatura limite de Curie, ou ponto Curie, que representa a temperatura na qual o material passa por uma mudança de fase. Isso é crucial para

evitar a perda da polarização remanescente induzida e das propriedades piezoelétricas do material (REZENDE, 2020).

2.4.5 Capacidade Energética

Os materiais piezoelétricos possuem um potencial relativamente baixo de geração de energia, uma vez que dependem do fluxo da passagem de veículos e do peso das cargas. A energia coletada é ideal para pequenas demandas em que não é necessário armazenamento, sendo voltada para um consumo momentâneo e descontínuo (HELLER, 2019).

Em 2010, a empresa Innowattech desenvolveu um protótipo em uma estrada com 10 metros de comprimento, equipada com geradores piezoelétricos de 5,5 cm de espessura, posicionados a 6 cm do nível superior da estrada. Concluíram que até 20 carros por minuto transitam na via expressa, gerando cerca de 200 KW/H, quantidade suficiente para abastecer uma casa por mês (SILVA, 2018).

2.5 PAVIMENTOS

Para ser capaz de receber e resistir às cargas de compressão vertical provenientes de pessoas, veículos, ônibus, entre outros, independentemente de seus pesos, a estrutura do pavimento nas vias é construída. Além de desempenhar uma função estrutural, o pavimento proporciona maior qualidade, conforto e segurança aos usuários durante seus deslocamentos (ROSSI, 2017).

2.5.1 Camadas dos Pavimentos

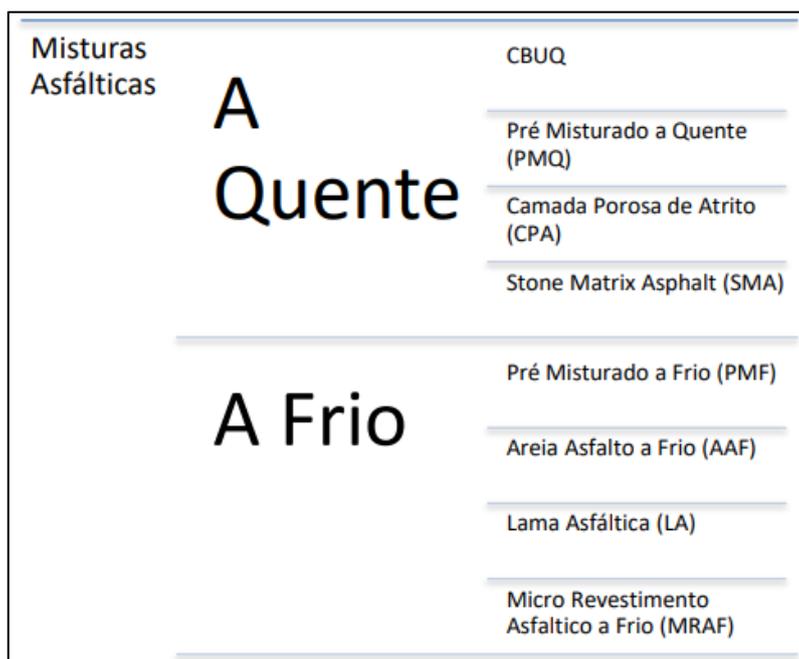
Todo pavimento possui camadas e cada uma delas com determinada função, sendo possível até cinco camadas, que são:

- a) Camada de Revestimento: responsável pela impermeabilização, por receber, resistir e transmitir as cargas para as outras camadas. Ela que fornece o acabamento e traz segurança ao atrito e conforto ao trafegar;
- b) Base: situada imediatamente abaixo da camada de revestimento, é a principal camada do pavimento, será encarregada de oferecer o suporte

estrutural do pavimento, além de ter que dissipar as cargas para as próximas camadas, diminuindo seu impacto;

- c) Sub-base: é a camada complementar à base, executada quando não for recomendável construir a base diretamente sobre a regularização do subleito ou reforço de subleito;
- d) Reforço do subleito: não é sempre necessário, apenas se o subleito não tiver a capacidade de suporte necessária daí é preciso incluir reforço ou substituição do subleito para estabilizar;
- e) Subleito: é o terreno natural que servirá de apoio para todas camadas, ele exerce a função de uma fundação, pois será essa camada a receber todas as cargas atuantes acima dele.

Figura 13 - Tipos de revestimento com misturas asfálticas



Fonte: Hirata (2018).

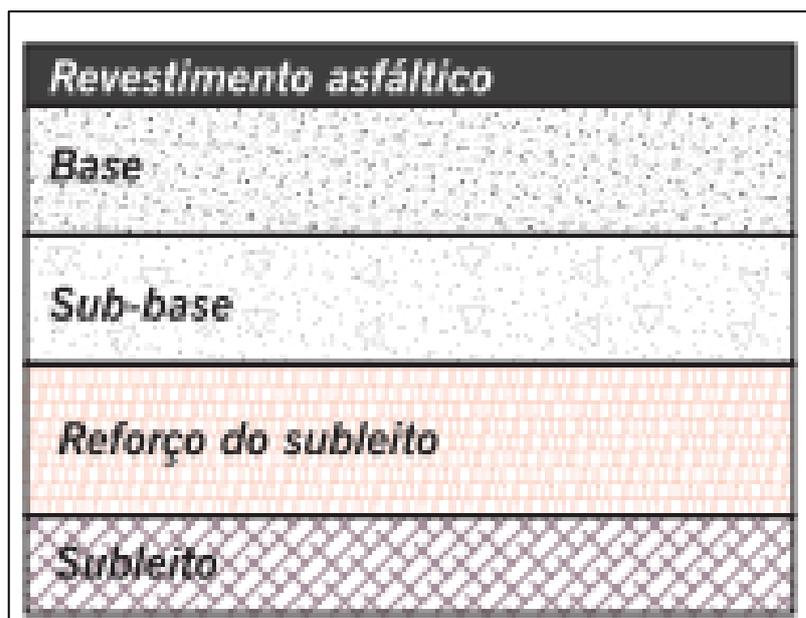
2.5.2 Tipos de Pavimentos

Existem três formas de execução dos pavimentos e a diferença entre os tipos é como eles irão distribuir as cargas do volume de tráfego recebidas para o subleito existente.

2.5.2.1 Pavimento Flexível

Com material asfáltico na camada de revestimento e este de espessura e conseqüentemente resistência variável, pode ainda conter as camadas de base, sub-base e reforço do subleito (ROSSI, 2017).

Figura 14 - Pavimento flexível

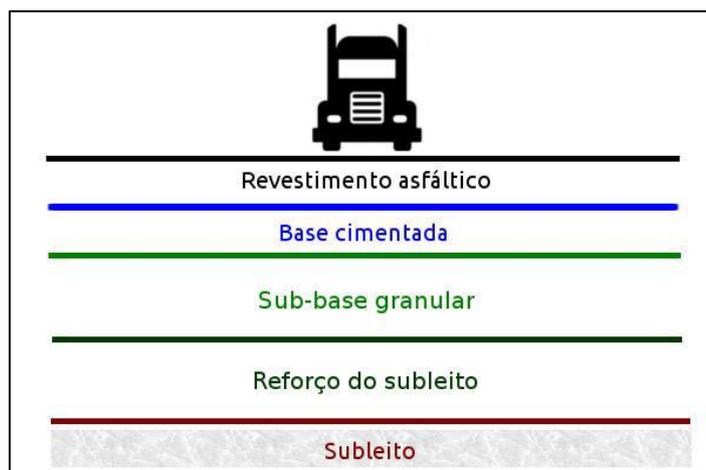


Fonte: Tomazelli (2019).

2.5.2.2 Pavimento Semirrígido

Possui as camadas de base ou sub base reforçadas com cimento de alta rigidez, excluída a camada de concreto. Representação na Figura 15.

Figura 15 - Pavimento Semirrígido



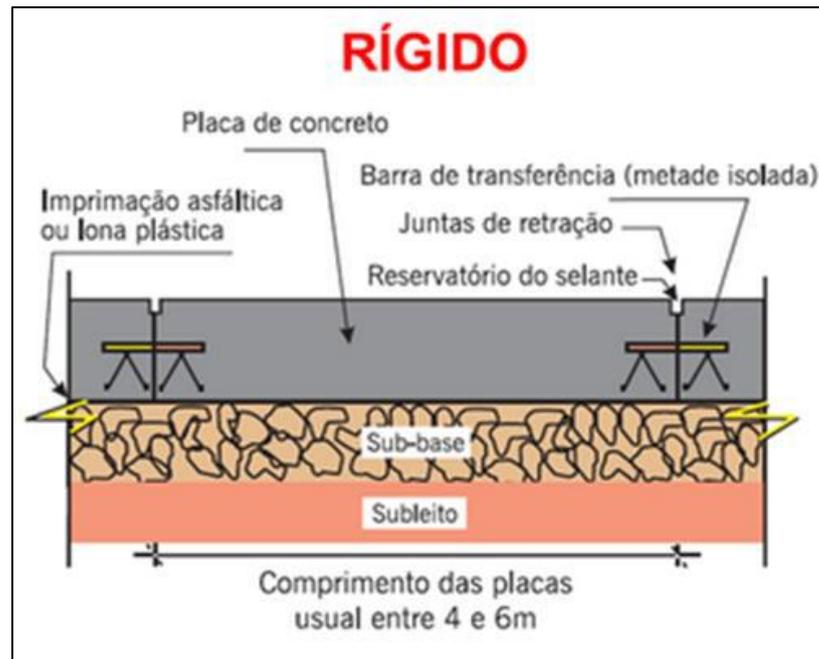
Fonte: Rossi (2017).

2.5.2.3 Pavimento Rígido

Sua camada de revestimento é em concreto e tem elevada rigidez, pode apresentar ou não uma camada de sub-base entre o revestimento e o subleito, pois a camada rígida absorve praticamente todas as tensões do carregamento externo (ROSSI, 2017).

Conforme Batista (2021, p.27), “O pavimento rígido tem como característica a absorção da maior parte dos momentos impostos pelo carregamento, o que possibilita transmitir à fundação esforços de baixa intensidade, não exigindo, portanto, grande capacidade de suporte do subleito”.

Figura 16 - Pavimento rígido



Fonte: Rossi (2017).

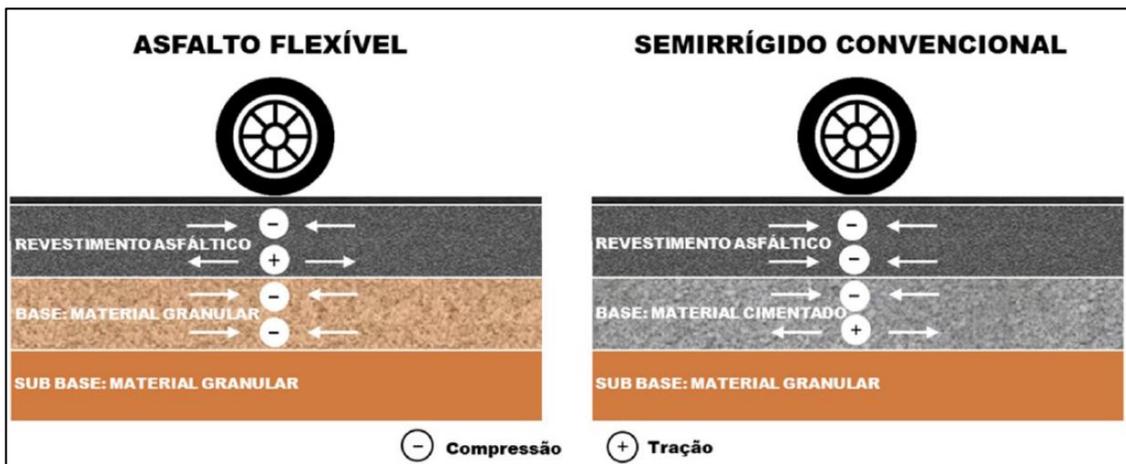
2.5.3 Esforços presentes nos Pavimentos

Os esforços nos pavimentos podem resultar de ações diretas e/ou indiretas. As ações diretas ocorrem devido às pressões aplicadas à estrutura pelo tráfego de veículos, enquanto as ações indiretas são causadas por deformações impostas à estrutura (BATISTA, 2021).

- a) No pavimento rígido: as ações diretas são relacionadas à pressão aplicada pelos pneus ao pavimento através da passagem dos veículos. As tensões verticais que são aplicadas solicitam esforços de tração e compressão, já as ações indiretas têm-se a retração, a dilatação térmica e o empenamento.
- b) No pavimento flexível: as tensões verticais se dão através de um bulbo de tensões e se dissipam através de camadas em parcelas equivalentes entre cada camada. A resistência à tração acontece nas tensões horizontais, ocasionadas pela frenagem dos veículos, e no tracionamento das fibras inferiores ocasionadas pela flexão da camada, por aplicação da carga vertical.

- c) No pavimento semirrígido: os pavimentos sofrem tensões de compressão nas fibras superiores e de tração nas fibras inferiores. Quando há a presença de agente cimentante na base, verifica-se diminuição das tensões de tração no revestimento asfáltico que passa a resistir, principalmente, às tensões de compressão, ficando a camada cimentada responsável por resistir às tensões de tração.

Figura 17 - Esforços nas camadas dos pavimentos flexível e semirrígido.

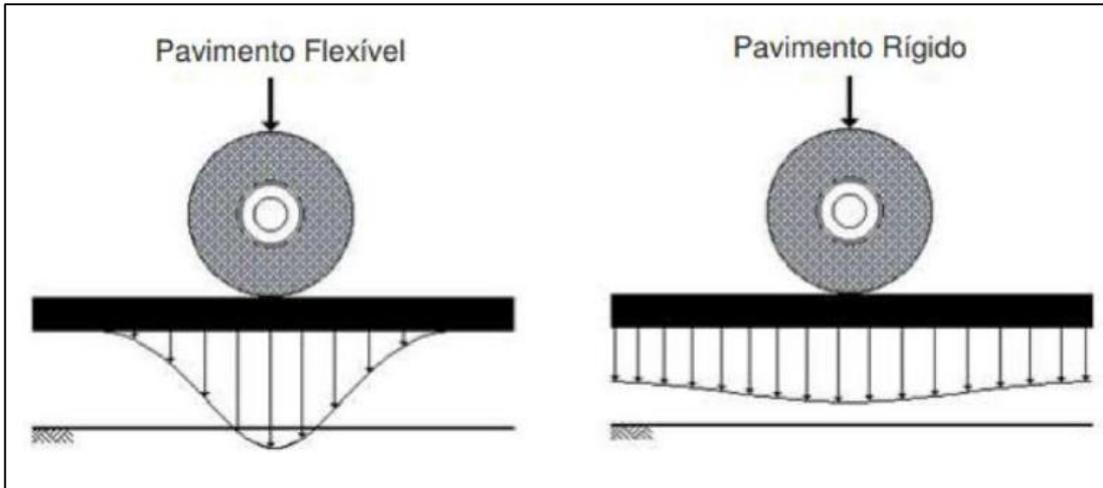


Fonte: Batista (2021).

Ao analisar as situações apresentadas na Figura 17, é possível perceber uma condição mais favorável no pavimento semirrígido, pois as camadas cimentadas apresentam resistência à tração e uma distribuição mais apropriada de cargas, quando comparadas com os pavimentos flexíveis (PRADO, 2018).

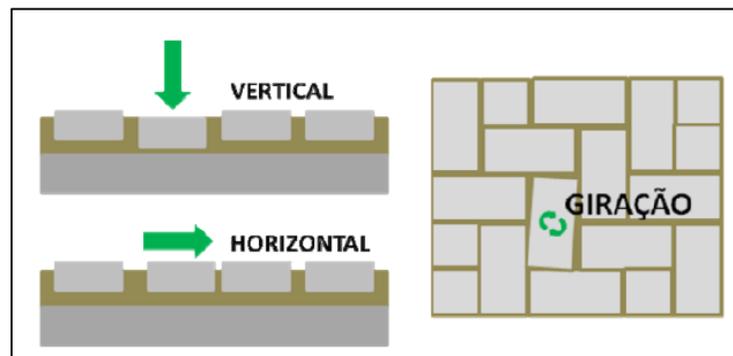
Já ao examinar a Figura 18 abaixo, no carregamento de pavimentos rígidos, as placas de concreto absorvem a maior parte do carregamento com uma distribuição dos esforços por toda a placa, tornando o subleito estruturalmente menos sujeito a deformações (ROCHA, 2018).

Figura 18 - Absorção dos carregamentos no pavimento flexível e rígido



Fonte: Batista (2021).

Figura 19 - Deslocamentos das peças de concreto na pavimentação intertravada



Fonte: Andrade (2019).

2.5.4 Revestimento com Blocos de Concreto

A normativa brasileira NBR 9781 (ABNT, 2013) define pavimento intertravado como:

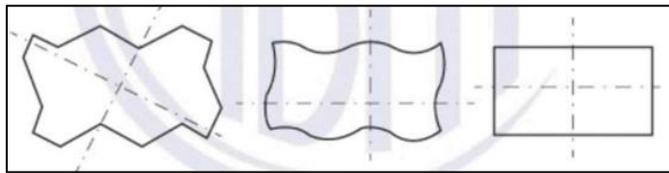
Um pavimento flexível cuja estrutura é composta por uma camada de base (ou base e sub-base), seguida por camada de revestimento constituída por peças de concreto justapostas em uma camada de assentamento e cujas juntas entre as peças são preenchidas por material de rejuntamento e o intertravamento do sistema é proporcionado pela contenção. (ABNT, 2013, p. 2).

A NBR 9781/13 (ABNT, 2011, p.3) define intertravamento como “A capacidade das peças de concreto de resistirem a deslocamentos individuais, sejam eles verticais, horizontais, de rotação ou giração, em relação às peças adjacentes.”

No Brasil, a norma NBR 9781 (ABNT, 2013) divide os blocos intertravados, também chamados de pavers, em quatro tipos, em relação à sua forma (BAULÉ, 2018).

- a) Tipo I: Peças de concreto com formato próximo ao retangular, com relação comprimento/largura igual a dois, que se arranjam entre si nos quatro lados e podem ser assentadas em fileiras ou em espinha de peixe;

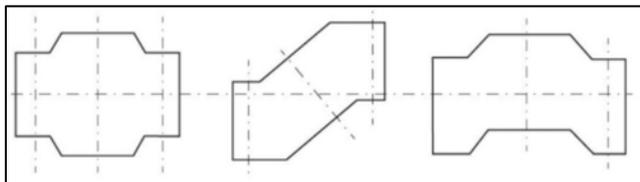
Figura 20 – Peças Tipo I



Fonte: Gomes (2022).

- b) Tipo II: Peças de concreto com formato único, diferente do retangular, e que só podem ser assentadas em fileiras;

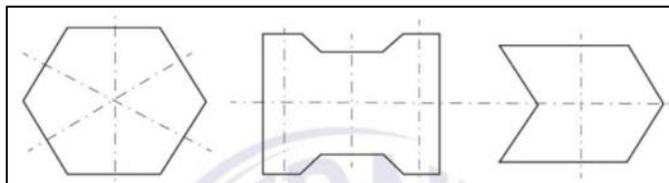
Figura 21 - Peças Tipo II



Fonte: Gomes (2022).

- c) Tipo III: Peças de concreto com formatos geométricos característicos, como trapézios, hexágonos, triédros etc., com pesos superiores a 4 kg;

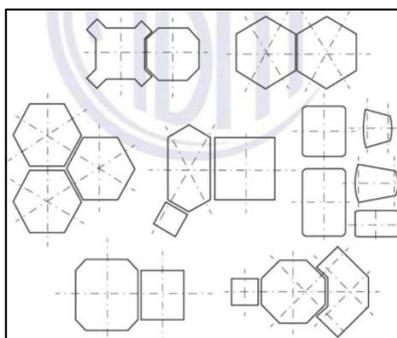
Figura 22 - Peças Tipo III



Fonte: Gomes (2022).

- d) Tipo IV: Conjunto de peças de concreto de diferentes tamanhos, ou uma única peça com juntas falsas, que podem ser utilizadas com um ou mais padrões de assentamento.

Figura 23 - Peças Tipo IV



Fonte: Gomes (2022).

2.5.5 Revestimento Pré-Misturado a Frio (PMF)

Preparado à temperatura ambiente, o pavimento semirrígido é composto por agregado graúdo, material de enchimento (filler) e misturas com Asfalto Diluído de Petróleo (ADP) ou Emulsão Asfáltica de Petróleo (EAP), sendo espalhado e comprimido a frio. Seu agregado pode conter diferentes distribuições granulométricas. Este tipo de pavimento pode ser utilizado como base, regularização, reforço de pavimentos ou revestimento de ruas e estradas com médio e baixo volume de tráfego. Suas camadas podem variar entre 3 a 7 cm de espessura compactada e devem ser espalhadas à temperatura ambiente em dias não chuvosos. No cenário internacional, esse material tem ganhado destaque na reciclagem de antigos revestimentos asfálticos fresados (BROCHADO, 2014).

Figura 24 - Faixas granulométricas para PMF

Faixas granulométricas para pré misturados a frio							
Peneira de malha quadrada		Porcentagem passando, em peso					Tolerâncias da faixa de projeto
ABNT	Abertura, mm	A	B	C	D	E	
1"	25,4	100	-	100	-	-	± 7
3/4"	19,1	75-100	100	95-100	100	100	± 7
1/2"	12,7	-	75-100	-	95-100	85-100	± 7
3/8"	9,5	30-60	35-70	40-70	45-80	70-90	± 7
nº 4	4,8	10-35	20-40	20-40	25-45	30-60	± 5
nº 10	2,00	5-20	10-20	10-25	15-30	20-45	± 5
nº 200	0,074	0-2	0-2	0-5	0-5	2-6	± 2
Tipo PMF		PMFA		PMSD		PMFD	

Fonte: Hirata (2018).

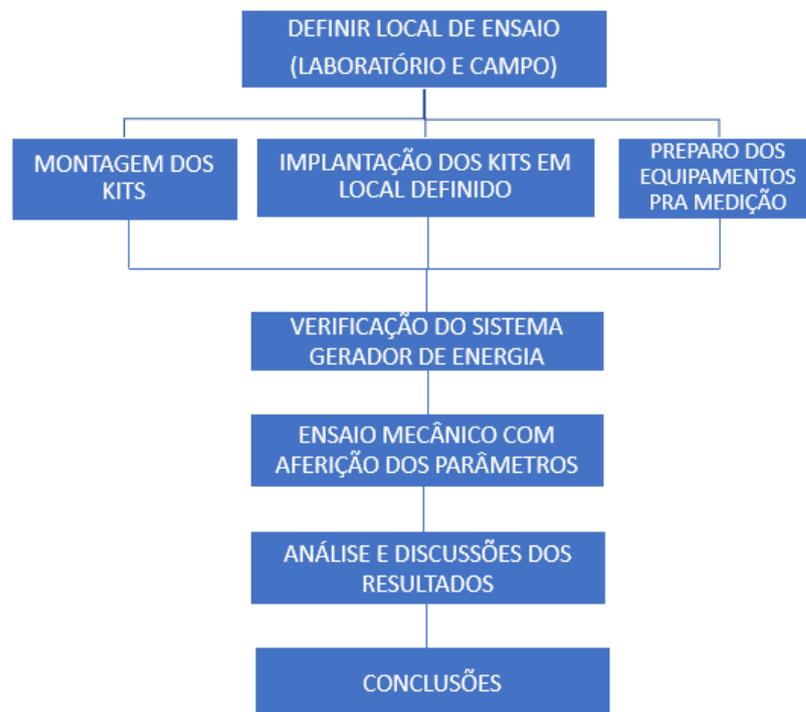
3 METODOLOGIA

O presente capítulo aborda os métodos utilizados para obter os dados do estudo proposto, com o objetivo de verificar o comportamento mecânico da piezoelectricidade aplicada no pavimento com revestimento de bloco de concreto, mantendo suas características de geração de energia. O desenvolvimento dos ensaios desta pesquisa experimental foi orientado pela literatura disponível, com base em pesquisas bibliográficas abordadas e no referencial teórico pesquisado.

3.1 FLUXOGRAMA

A Figura 25 representa o fluxograma identificando os itens abordados na metodologia e na análise de resultados.

Figura 25 – Fluxograma de etapas



Fonte: Elaborada pelo(a) autor(a)

3.2 – DEFINIÇÃO DA FORMA DE ENSAIO (LABORATÓRIO E CAMPO)

Os ensaios foram planejados para serem realizados em laboratório e em campo. A seleção inicial ocorreu em laboratório, visando verificar a geração de energia em comparação com outras referências abordadas e testar a resposta a cargas pontualmente aplicadas. No campo, o objetivo foi avaliar o sistema construtivo adotado e as proporções de energias geradas, analisando a estabilidade dos sistemas sob cargas e velocidades reais de veículos, considerando também as condições externas adversas.

No laboratório, os locais escolhidos foram os setores de elétrica e materiais de construção civil e mecânica da Universidade do Vale dos Sinos (Unisinos). Esses locais foram utilizados, respectivamente, para montar os kits, medir a geração de energia e preparar as cargas que seriam testadas no pavimento em campo. As fotografias 01 e 02 apresentam os locais de laboratório utilizados.

Fotografia 1 - Laboratório de soldas da elétrica



Fonte: Registrada pelo(a) autor(a)

Fotografia 2 - Laboratório de Construção Civil



Fonte: Unisinos (2023).

Em campo, o local escolhido foi a cancela central do estacionamento da Unisinos, situado no setor C, conforme a Fotografia 03. Nesse local, as pastilhas foram incorporadas abaixo dos blocos intertravados, próximas ao encontro do pavimento rígido, visando aumentar as vibrações entre esses sistemas. Optou-se por utilizar os mesmos blocos já instalados no estacionamento, realizando a retirada e reposição dos mesmos. A escolha desse ponto foi motivada pelo tráfego central de veículos, proporcionando melhor acesso aos sensores e segurança para os fios do ponto de espera das leituras subsequentes, em comparação com outros locais. Os cabos foram fixados junto ao canteiro central durante as aferições.

Toda a aplicação dos sistemas foi conduzida com o auxílio de um empreiteiro especializado em pavimentos, além das equipes de laboratório, coordenação e aprovação da Safepark, empresa responsável pela administração do estacionamento.

Fotografia 3 - Cancela do Estacionamento Unisinos São Leopoldo



Fonte: Registrada pelo(a) autor(a)

3.3 – MONTAGEM DOS KITS

As cápsulas disponíveis no mercado apresentam tamanhos de 15 mm, 20 mm, 27 mm e 35 mm. Quanto maior a área das pastilhas, maior a quantidade de energia que podem gerar. As pastilhas com áreas menores, no entanto, são as mais resistentes (Ferreira, 2017).

Conforme Ferreira (2017, p.62), “Para realizar essa verificação, foram montados quatro conjuntos com 10 pastilhas cada, nas seguintes circunferências: 15 milímetros, 20 milímetros, 27 milímetros e 35 milímetros. Aplicando pesos de 8 kg, 10 kg, 12 kg e 14 kg, foi possível verificar as seguintes tensões”.

Figura 26 - Geração de acordo com tamanho pastilhas

	Pastilhas 15mm	Pastilhas 20mm	Pastilhas 27mm	Pastilhas 35mm
8 Kg	1.21 Volts	1.44 Volts	2.97 Volts	4.18 Volts
10 Kg	1.44 Volts	1.73 Volts	3.21 Volts	4.44 Volts
12 Kg	1.64 Volts	1.88 Volts	3.44 Volts	4.75 Volts
14 Kg	1.82 Volts	2.12 Volts	3.55 Volts	4.85 Volts

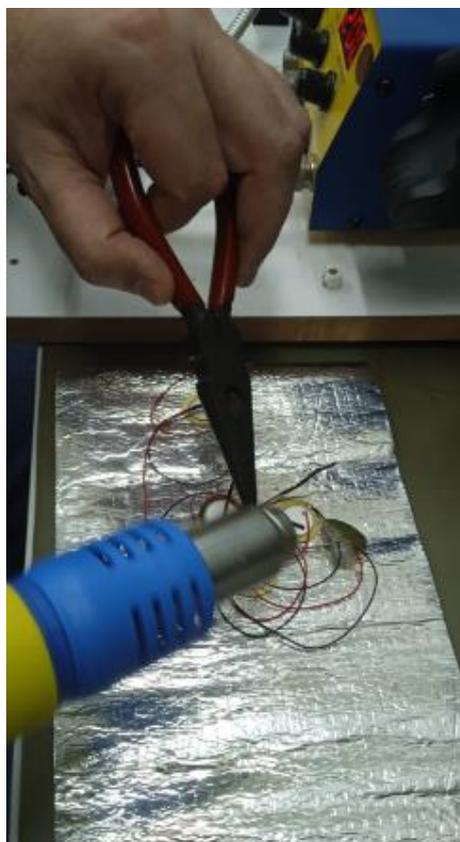
Fonte: Ferreira (2017).

Com base no estudo de referência e nas pastilhas disponíveis no mercado, optou-se por montar kits com cápsulas piezoelétricas de 20 mm de diâmetro, organizadas em 5 conjuntos de 10 unidades cada. Essa escolha foi motivada pela pequena área de contato, aliada à boa durabilidade do material, apesar de sua estrutura rígida. Além disso, essa configuração permite uma geração significativa de energia ao submeter as pastilhas ao processo de aplicação e retirada de peso, em comparação com as pastilhas menores de 15 mm.

No laboratório de elétrica, as pastilhas foram soldadas, e para a interconexão delas, foi utilizado o sistema misto, combinando ligações em série e em paralelo, conforme ilustrado nas fotos 04 até 06.

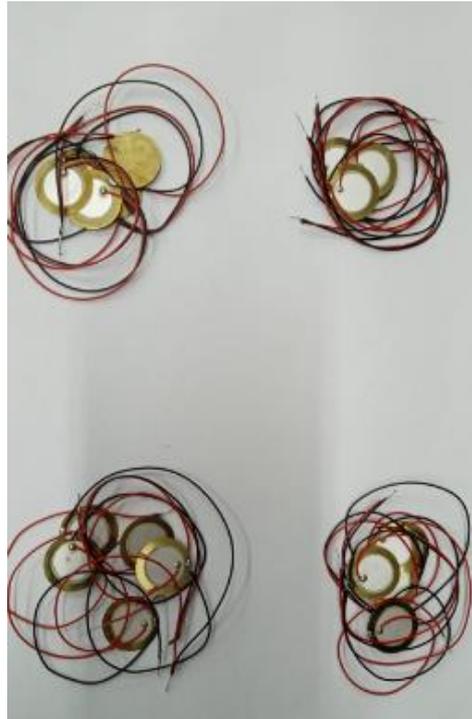
A utilização desse tipo de ligação possibilita a soma tanto da corrente quanto da tensão, otimizando o aproveitamento da energia gerada (FERREIRA, 2017). Segundo Moreira (2021), a ligação mista tem como finalidade aumentar tanto a corrente quanto a tensão capturada pelo sistema.

Fotografia 4 - Pastilhas sendo soldadas



Fonte: Registrada pelo(a) autor(a)

Fotografia 5 - Pastilhas já soldadas



Fonte: Registrada pelo(a) autor(a)

Fotografia 6 - Ligação mista das pastilhas



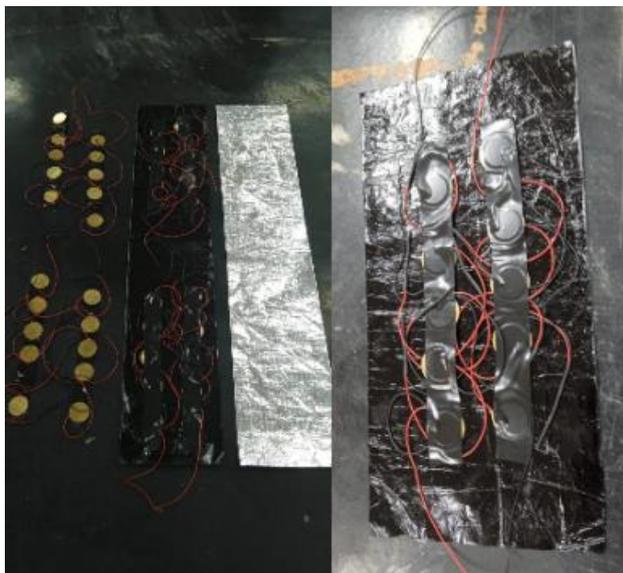
Fonte: Registrada pelo(a) autor(a)

Para fixar as pastilhas, simulou-se um tapete composto por duas camadas de manta asfáltica auto protegida aluminizada. Essas camadas desempenham principalmente a função de impermeabilização das pastilhas, que foram incorporadas no centro delas. A camada aluminizada, por sua vez, tem o objetivo de dissipar a temperatura externa. No laboratório, foi definido um tamanho de 10 cm x 22 cm para

um pack de 10 unidades, projetado para se encaixar abaixo do bloco intertravado que receberá as cargas na prensa de compressão. Em campo, foram utilizados 2 packs de 20 unidades de pastilhas, com um tapete de 10 cm x 50 cm, simulando o tamanho do pneu de um carro popular, como mostrado na fotografia 07.

Conforme Araújo e Joffily (2014, p.25), é importante destacar que essas mantas dispensam proteção mecânica, embora sejam recomendadas para locais com tráfego eventual, como em situações de manutenção.

Fotografia 7 - Pastilhas fixadas na manta



Fonte: Registrada pelo(a) autor(a)

Para fixação interior na manta asfáltica, as pastilhas foram presas internamente nas mantas com fita isolante e fita impermeabilizante Silver Tape para maior proteção delas, conforme indicação da fotografia 08.

Fotografia 8 - Fixação das pastilhas na manta



Fonte: Registrada pelo(a) autor(a)

Devido à manta asfáltica não ser recomendada para áreas de alto tráfego, optou-se por utilizar borracha de 3mm como proteção mecânica em ambos os lados das camadas. Para isolar as laterais do conjunto, empregou-se fita Silver Tape, conhecida por sua adesão robusta e resistência à água e à ruptura. A instalação do kit concluída, conforme ilustrado na Fotografia 09.

Fotografia 9 - kit laboratório finalizado



Fonte: Registrada pelo(a) autor(a)

O investimento realizado nos materiais encontra-se detalhado na Tabela 1, apresentando os respectivos valores comerciais. Dessa forma, o montante total investido para a montagem dos kits é de R\$ 250,50, considerando os valores levantados em outubro de 2023.

Tabela 1 – Valores investimento Kits

Item	Quantidade	Unidade	Valor Unitário (R\$)	Valor Total (R\$)
Pastilhas Piezoelétricas	50	unidade	R\$ 2,99	R\$ 149,50
Fita isolante	1	unidade	R\$ 6	R\$ 6,0
Manta asfáltica	2	metro	R\$ 6	R\$ 12,0
Fita impermeabilizante	2	unidade	R\$ 12	R\$ 24,0
Cano corrugado	5	metro	R\$ 2	R\$ 10,0
Bloco intertravado	1	m ²	R\$ 49	R\$ 49,0
			TOTAL	R\$ 250,50

Fonte: Elaborada pelo(a) autor(a)

A montagem apresentou um custo reduzido, conforme evidenciado pelos equipamentos listados na Tabela 1. É importante destacar que o valor investido na construção e instalação pode ser diminuído em até 25%, uma vez que foram utilizados blocos intertravados já existentes, permitindo seu reaproveitamento.

Para estudos de mercado futuros, pode-se considerar a adoção da unidade em metros quadrados (m²) para a precificação do conjunto.

3.4 – IMPLANTAÇÃO DOS KITS

Em laboratório, para o teste de cargas, foi utilizado um bloco intertravado com as medidas de 10x22cm, seguindo as dimensões usuais do bloco intertravado do tipo I, que possui 16 faces. Esse bloco já estava inserido no estacionamento, simulando seu peso antes da aplicação das cargas axiais em laboratório. O peso do bloco intertravado utilizado nos ensaios foi de 4,49 kg, conforme mostram as fotografias 10 e 11.

Fotografia 10 - Tamanho bloco da amostra em laboratório



Fonte: Registrada pelo(a) autor(a)

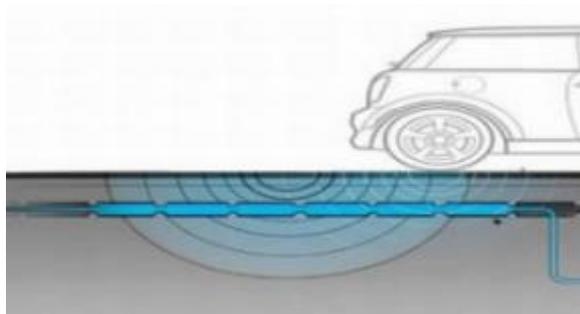
Fotografia 11 - Prensa Laboratório Civil



Fonte: Registrada pelo(a) autor(a)

Para o ensaio de campo, a manta foi cortada em duas fitas com as medidas de 10cm x 50cm, correspondendo à projeção da passagem do pneu do veículo. A Figura 27 apresenta a projeção das tensões geradas pelo veículo, justificando a estratégia de utilizar a manta em tiras apenas na área de projeção da roda.

Figura 27 - Tensões no material provocada por veículos



Fonte: General Eletronics (2023).

Fotografia 12 - Local para incorporação do kit em campo



Fonte: Registrada pelo(a) autor(a)

3.5 – PREPARO DOS EQUIPAMENTOS PARA AFERIÇÃO

Para gerar eletricidade, é necessário que ocorra uma corrente elétrica, na qual um fluxo de elétrons se desloca do lado com excesso de partículas para o lado com uma quantidade menor de elétrons dentro de um material condutor.

A diferença de potencial elétrico entre as duas extremidades, que realiza o movimento das partículas eletricamente carregadas, é denominada tensão elétrica e é medida em Volt (V). Além disso, existe uma propriedade física dos materiais condutores que se opõem à passagem de corrente elétrica, mesmo quando há uma diferença de potencial aplicada, chamada de resistência elétrica.

Para medir as propriedades de corrente e tensão na geração de energia, foi utilizado um multímetro Digital da marca Minipa do Brasil, modelo ET1639A, com precisão de 0,5% de leitura para as aferições de laboratório e campo (ver fotografia 13).

Todas as aferições foram realizadas em corrente alternada (CA), pois apresenta perdas de energia muito menores do que a corrente contínua. Além disso, a transmissão da corrente alternada é mais eficiente do que a contínua, uma vez que capta os dois sentidos de deslocamento dos elétrons.

Fotografia 13 - Multímetro utilizado para as aferições



Fonte: Registrada pelo(a) autor(a)

No laboratório de Construção Civil, o equipamento utilizado para a preparação das aferições das cargas foi a prensa de compressão da marca Instron, modelo 34TM-30, sem informações de precisão disponíveis no manual do fabricante. Já no laboratório de Mecânica, o equipamento utilizado para a preparação das aferições das cargas foi a prensa de compressão da marca MTS, modelo 370 Load Frame, com precisão de 0,1 a 180 kg e capacidade máxima de 250 KN.

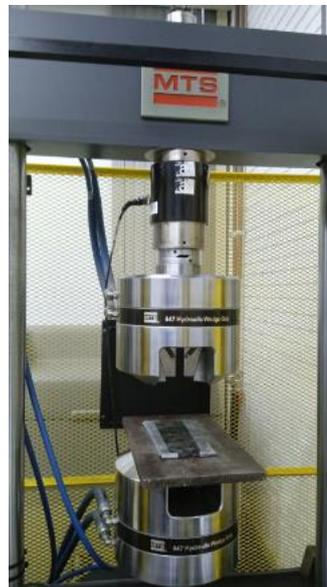
Foram usadas duas prensas, devido a da Civil ter ficado inoperante. Assim, os demais testes seguiram na prensa do laboratório da mecânica.

Fotografia 14 - Prensa laboratório de construção Civil



Fonte: Registrada pelo(a) autor(a)

Fotografia 15 - Prensa laboratório de mecânica



Fonte: Registrada pelo(a) autor(a)

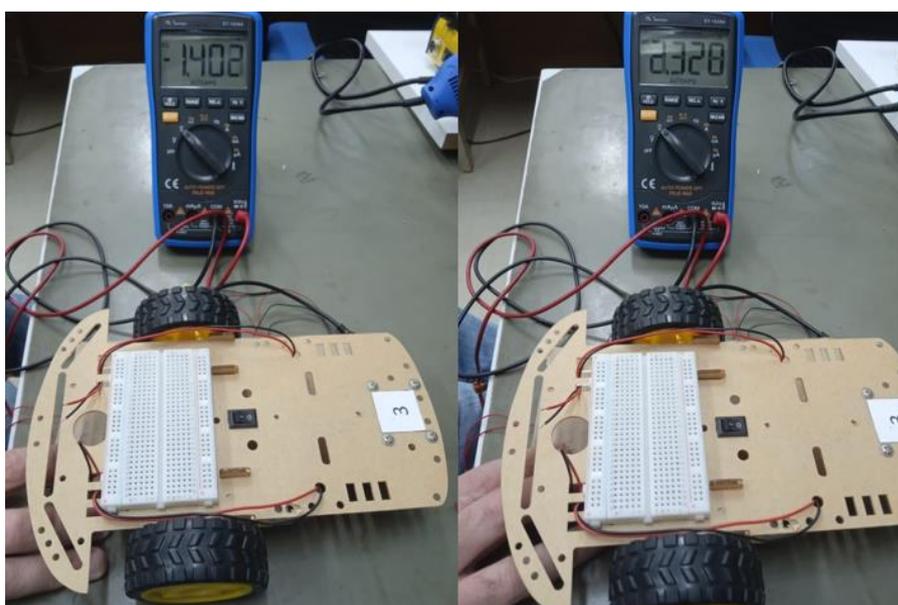
3.6 – VERIFICAÇÃO DO SISTEMA GERADOR DE ENERGIA

No laboratório de elétrica, verificou-se empiricamente a geração de energia através de pressão manual, resultando em no máximo 2 Volts. Esse processo foi determinante para prosseguir com as soldagens das pastilhas e o ensaio em laboratório da área de construção civil para a aplicação de cargas.

Conforme Rezende (2020, p.27), "Ao pressionar a cerâmica, a energia é gerada na forma de pulsos, isto é, energia de pico, e devido à velocidade desse pulso, não seria possível a obtenção de dados através do multímetro".

No entanto, foi possível verificar a geração sob a forma de tensão elétrica de energia por meio do multímetro utilizado.

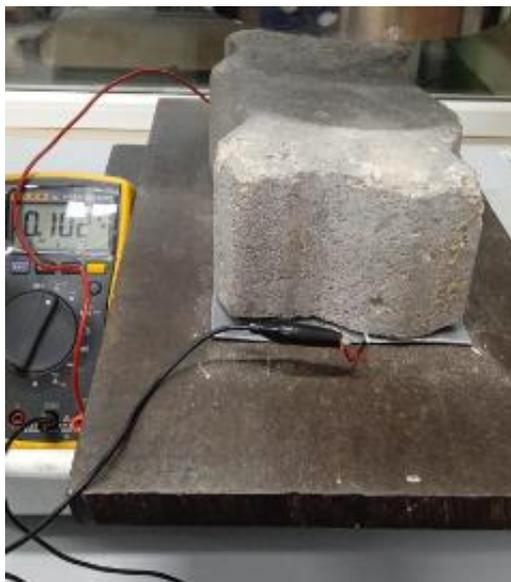
Fotografia 16 - Aferição geração de energia no laboratório de elétrica



Fonte: Registrada pelo(a) autor(a)

No laboratório de construção civil e mecânica, constatou-se que mesmo com o bloco intertravado sobre o conjunto, não houve interferência na geração de energia com a aplicação de carga. A tensão gerada variou conforme o peso aplicado ou retirado e o tempo de aplicação.

Fotografia 17 - Aferição geração de energia no laboratório da civil



Fonte: Registrada pelo(a) autor(a)

Em campo fotografia 18, já pode-se avaliar além das cargas, a velocidade dos veículos passantes que era o fator determinante para o estudo.

Fotografia 18 - Aferição de energia em campo



Fonte: Registrada pelo(a) autor(a)

3.7 – ENSAIO MECÂNICO COM AFERIÇÃO DOS PARÂMETROS

Em laboratório, após a conclusão dos kits, foram aplicadas cargas de 10 kg, 50 kg, 150 kg, 250 kg e 350 kg utilizando a prensa de compressão e o bloco intertravado do tipo I, o mesmo modelo presente no estacionamento da universidade, utilizado para o ensaio de campo. A escolha de cargas variadas teve como objetivo avaliar a capacidade de geração de energia diante de diferentes meios de transporte, desde bicicletas e motos até a avaliação do eixo de carros de passeio e SUV.

Dado o tamanho pequeno da área de contato e a rápida retirada da pressão, o material precisa ter boa durabilidade, além de permitir uma geração considerável durante o processo de aplicação e remoção de peso sobre ele. A quantidade de testes foi baseada em cargas utilizadas em estudos anteriores, considerando também o parâmetro do eixo de um veículo como carga máxima, pesando em uma roda 350 kg ou até a ocorrência de desintegração de algum item do conjunto que pudesse impossibilitar a continuidade da aplicação de cargas.

Em cada aplicação de carga, foram registrados o peso aplicado, o deslocamento da prensa e os dados de tensão e corrente elétrica. Quanto ao ensaio de campo, foram monitorados os parâmetros relacionados aos tipos de veículos que passavam, distinguindo entre carros de passeio e SUV, e as velocidades de 10, 20 e 30 km/h.

Todas as análises foram realizadas em intervalos de quatro ensaios, com períodos de duas semanas entre eles, para monitoramento e avaliação da integridade do sistema em relação ao tempo de exposição após chuvas.

Os ensaios de campo foram impactados pelas datas, visto que o tempo de amostragem estava sujeito ao intervalo liberado pela empresa Safepark para ensaios, que ocorriam entre 14h e 17h. Além disso, dependiam da disponibilidade de veículos e de motoristas condutores voluntários que passavam para realizar as aferições. O período liberado correspondia a momentos de menor fluxo de veículos no estacionamento, reduzindo assim o número de entradas de veículos para amostragens.

A avaliação estendeu-se por duas semanas para testar o sistema após as chuvas previstas (Figura 28), e toda a análise de velocidade foi conduzida com o apoio dos condutores voluntários durante as passagens. Portanto, as velocidades avaliadas

são confiáveis e creditáveis aos dados fornecidos pelos condutores quando solicitados.

Figura 28 - Previsão de após instalação do kit de campo

Data	Clima	Max.	Min.	Chuva	Umidade	Vento
Quinta-feira 02/11/2023	 chuva moderada	19°C	17°C	100%	97%	19km/h
Sexta-feira 03/11/2023	 chuva forte	22°C	14°C	100%	95%	24km/h
Sábado 04/11/2023	 nublado	20°C	13°C	15%	72%	23km/h
Domingo 05/11/2023	 nublado	24°C	12°C	0%	49%	13km/h
Segunda 06/11/2023	 céu limpo	28°C	13°C	0%	46%	12km/h
Terça-feira 07/11/2023	 céu limpo	34°C	16°C	0%	35%	8km/h
Quarta-feira 08/11/2023	 chuva leve	33°C	20°C	52%	40%	6km/h
Quinta-feira 09/11/2023	 nublado	22°C	19°C	2%	75%	17km/h

Fonte: IRGA (2023).

4 – ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo, apresentam-se os resultados e as análises dos ensaios realizados em laboratório e campo, comparando-os com os parâmetros dos referenciais teóricos pesquisados. As informações descritas derivam da análise dos dados coletados pelos equipamentos de aferição mencionados anteriormente e da análise do comportamento mecânico do conjunto estudado, destacando as mudanças, alterações que os sistemas geraram e os problemas enfrentados.

4.1 - ENSAIOS EM LABORATÓRIO

Como não seria possível simular a velocidade ideal de campo em laboratório, o deslocamento inserido nas prensas foi de 1 mm/segundo na aplicação das cargas. Esse valor foi escolhido para que as cargas pudessem atingir o kit de amostra, junto ao bloco intertravado e com o conjunto de 10 células piezoelétricas abaixo dele, da forma mais rápida possível.

Os ensaios foram realizados em cada data, com três amostragens para cada carga de 10 kg, 50 kg, 150 kg, 250 kg e 350 kg, buscando uma melhor verificação das aplicações. As variações de cargas foram definidas com o intuito de avaliar a passagem de diversos meios de transporte, como bicicletas, motos e carros.

4.1.1 – Ensaio de cargas no laboratório da civil

Na prensa da construção civil, o deslocamento ocorre apenas na inserção das cargas. Após atingir o peso desejado, a prensa é zerada de valores para retornar à posição original, preparando-se para novas aplicações de cargas. Dessa forma, não se possui precisão sobre o valor de deslocamento no qual a prensa retorna à carga zero e a sua velocidade para essa posição original.

Os ensaios no laboratório da construção civil foram realizados nos dias 30/10/2023 e 03/11/2023. Como mencionado anteriormente na metodologia, devido à inoperância da prensa da construção civil, o mesmo kit de aplicação foi ensaiado na prensa da mecânica para dar continuidade nas análises de geração de energia e verificar a integridade dos sistemas.

4.1.2 – Ensaio de cargas no laboratório da mecânica

No laboratório de mecânica, o kit e o deslocamento de 1mm/segundo foram os mesmos utilizados anteriormente na prensa da construção civil. O que se diferenciou na sequência desse ensaio é a precisão da prensa, pois o deslocamento da prensa ocorre tanto na inserção das cargas quanto na retirada delas. Este movimento mais próximo do ambiente real, uma vez que os carros também passam pelo conjunto, aplicando e retirando o seu peso próprio.

Os ensaios no laboratório de mecânica ocorreram nos dias 07/11/2023 a 10/11/2023, de forma sucessiva.

4.1.3 – Resultados obtidos em laboratórios

Os valores obtidos na partida e no retorno da prensa da mecânica foram mantidos para efeito de cálculo, uma vez que esses parâmetros podem ser somados se houver um banco de capacitores para armazenamento de energia. Essa é a mesma simulação de campo, onde as cargas ocorrem desde a chegada até a saída dos veículos após encostarem nas pastilhas.

Para analisar o potencial da geração de energia, é necessário calcular a potência elétrica, utilizando a Lei de Ohm com a equação $P = U \times i$, onde P representa a Potência Elétrica, U é a Tensão e i é a Corrente Elétrica. Utilizando o programa computacional Excel, a potência foi calculada, e as unidades foram mantidas com a corrente em microampères (μA) e a potência em microwatts (μW).

Dessa forma, para avaliar o comportamento geral das aplicações, foi realizado um resumo na tabela 02, onde estão as médias gerais das tensões, correntes e potências para cada carga ensaiada. Os resultados individuais de cada data encontram-se no Apêndice A ao final deste trabalho.

Tabela 2 – Resumo da tensão, corrente e potência média das aplicações

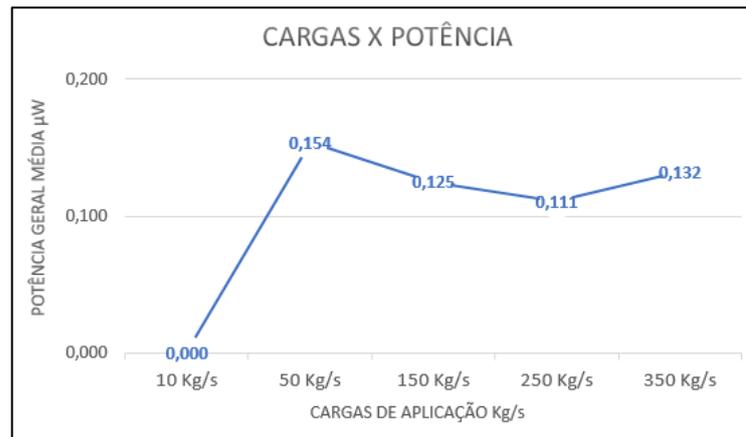
CARGA	TENSÃO GERAL MÉDIA (V)	CORRENTE GERAL MÉDIA (μA)	POTÊNCIA (μW)
10 Kg/s	0,594	0,000	0,000
50 Kg/s	2,570	0,060	0,154
150 Kg/s	1,389	0,090	0,125
250 Kg/s	1,238	0,090	0,111
350 Kg/s	1,209	0,110	0,132

Fonte: Elaborada pelo(a) autor(a)

Na aplicação da carga de 10 kg, não foi obtida, em todas as amostragens de aplicação de carga, a tensão conforme a literatura estudada, assim como a média geral, que ficou abaixo de 1,73V, o parâmetro de referência.

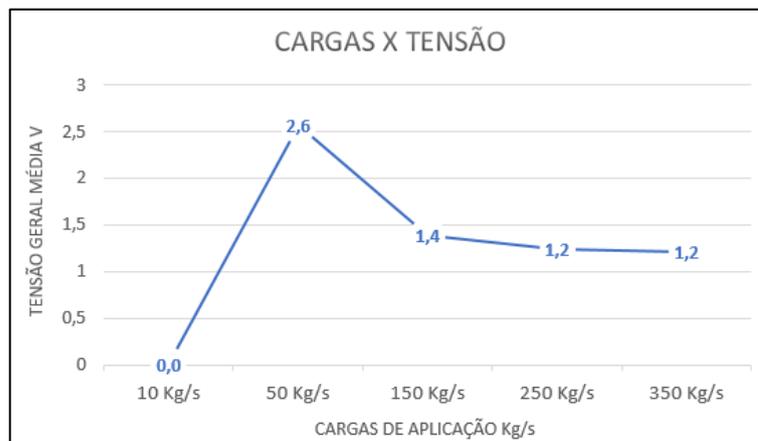
Para as demais cargas, é possível verificar o comportamento em relação à potência e tensão por meio dos gráficos 01 e 02.

Gráfico 1 - Comportamento das cargas x potência geral média



Fonte: Elaborado pelo(a) autor(a)

Gráfico 2 - Comportamento das cargas x tensão geral média



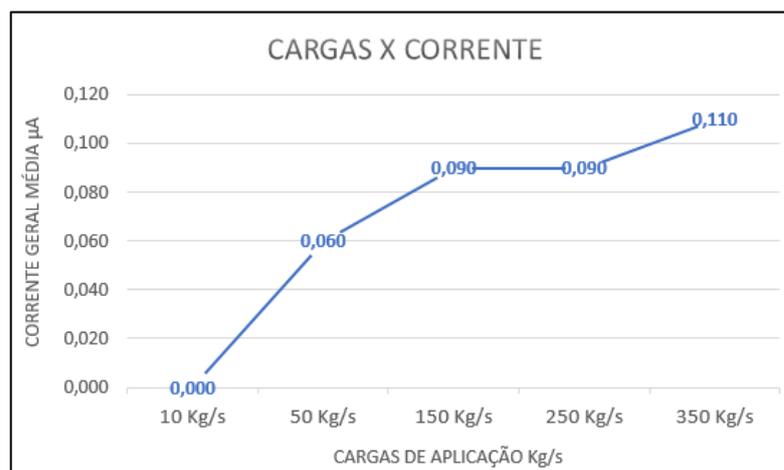
Fonte: Elaborado pelo(a) autor(a)

Após a aplicação da carga de 10 kg, as tensões e potências tornaram-se mais expressivas, mas diminuíram após a aplicação da carga de 50 kg, como já era esperado. O valor de potência gerado é baixo, pois a piezoelectricidade trata-se de microgeração de energia.

Segundo Ferreira (2017), ao aumentar a pressão exercida sobre as pastilhas, ocorre um aumento na tensão, corrente e, conseqüentemente, na potência. No entanto, em determinado ponto, as tensões aumentam com dificuldade, enquanto a corrente continua aumentando.

Assim, mesmo que o padrão de crescimento não seja idêntico aos estudos anteriores em relação às tensões e potências, para a corrente (conforme gráfico 03), essa confirmação já se evidencia. Essa peculiaridade na razão de crescimento entre tensão e corrente nos estudos anteriores pode ocorrer devido ao fato de as pastilhas não terem sido estudadas ainda com aplicações de cargas sucessivas e abaixo do revestimento, sob a influência de carga contínua, como no caso do bloco intertravado.

Gráfico 3 - Comportamento das cargas x corrente geral média



Fonte: Elaborado pelo(a) autor(a)

Além da análise da geração de energia, outro objetivo deste trabalho é o estudo do comportamento mecânico do conjunto, avaliando sua integridade. Em todas as cargas e amostragens, houve momentos em que as tensões e as correntes ficaram zeradas, apresentando uma variação muito discrepante. Não se sabe se isso ocorreu devido à deformação mecânica da borracha na aplicação axial da prensa ou se parte do circuito em ligação mista foi danificada no interior do Kit com o aumento dos pesos.

De qualquer forma, após outras simulações de cargas, os kits voltaram a apresentar oscilações com parâmetros positivos. Assim, mesmo que parte das pastilhas esteja danificada e zere os resultados, ao longo dos demais ensaios o sistema ainda é capaz de gerar energia. Um exemplo disso está na tabela 03, que demonstra esse fenômeno nas cargas de 50kg.

Tabela 3 – Aplicações de 50Kg/s de carga

DATA	LABORATÓRIO	APLICAÇÃO	CARGA	COLETA	1ª AMOSTRA	2ª AMOSTRA	3ª AMOSTRA	MÉDIA	MÉDIA GERAL
30/10/2023	CIVIL	PARTIDA	50 Kg/s	Corrente µA	0,000	0,000	0,000	0,000	0,056
03/11/2023	CIVIL	PARTIDA	50 Kg/s	Corrente µA	0,100	0,100	0,100	0,100	0,056
07/11/2023	MECÂNICA	PARTIDA	50 Kg/s	Corrente µA	0,000	0,000	0,100	0,033	0,056
08/11/2023	MECÂNICA	PARTIDA	50 Kg/s	Corrente µA	0,100	0,100	0,100	0,100	0,056
08/11/2023	MECÂNICA	RETORNO	50 Kg/s	Corrente µA	0,000	0,000	0,000	0,000	0,056
09/11/2023	MECÂNICA	PARTIDA	50 Kg/s	Corrente µA	0,100	0,100	0,100	0,100	0,056
09/11/2023	MECÂNICA	RETORNO	50 Kg/s	Corrente µA	0,000	0,100	0,100	0,067	0,056
10/11/2023	MECÂNICA	PARTIDA	50 Kg/s	Corrente µA	0,000	0,000	0,000	0,000	0,056
10/11/2023	MECÂNICA	RETORNO	50 Kg/s	Corrente µA	0,100	0,100	0,100	0,100	0,056
30/10/2023	CIVIL	PARTIDA	50 Kg/s	Tensão V	2,743	1,775	1,914	2,144	2,570
03/11/2023	CIVIL	PARTIDA	50 Kg/s	Tensão V	0,827	4,227	6,086	3,438	2,570
07/11/2023	MECÂNICA	PARTIDA	50 Kg/s	Tensão V	5,915	4,277	5,380	5,191	2,570
08/11/2023	MECÂNICA	PARTIDA	50 Kg/s	Tensão V	0,640	0,824	0,605	0,690	2,570
08/11/2023	MECÂNICA	RETORNO	50 Kg/s	Tensão V	5,930	5,499	5,117	5,515	2,570
09/11/2023	MECÂNICA	PARTIDA	50 Kg/s	Tensão V	0,752	0,756	0,552	0,687	2,570
09/11/2023	MECÂNICA	RETORNO	50 Kg/s	Tensão V	4,198	0,078	2,104	2,101	2,570
10/11/2023	MECÂNICA	PARTIDA	50 Kg/s	Tensão V	0,454	0,415	0,470	0,446	2,570
10/11/2023	MECÂNICA	RETORNO	50 Kg/s	Tensão V	4,790	4,321	5,127	4,746	2,570

Fonte: Elaborada pelo(a) autor(a)

4.2 - ENSAIOS EM CAMPO

Em campo, pôde-se observar o quesito velocidade junto com as cargas. Os resultados foram obtidos com os blocos intertravados existentes no estacionamento e, abaixo do conjunto, os dois packs de 20 células piezoelétricas cada. Multiplicou-se a quantidade de pastilhas em campo para verificar se aumentariam as proporções na geração de energia e para proporcionar uma maior área de contato com os pneus dos carros.

A instalação dos Kits em campo ocorreu em 30/10/2023, no período das 14h às 15h, o mesmo intervalo de horário liberado pela empresa Safepark para as avaliações, por ser o momento com menos fluxo de entradas e saídas na Universidade.

Durante o período de análise, os veículos passantes foram caracterizados como Passeio e SUV, para melhor mensuração dos resultados avaliados e evitar a necessidade de incluir cada marca e modelo de veículo.

As verificações foram realizadas em duas semanas, nas datas de 30/10/2023 e 03/11/2023, e na outra semana nas datas de 07/11/23 e 09/11/2023, com os seguintes critérios:

- a) Avaliações das tensões e correntes com as velocidades nos veículos tipo Passeio com 10Km/h, 20Km/h e 30Km/h;

- b) Avaliações de tensão e corrente nas passadas dos veículos dos tipos Passeio e SUV, mas sem considerar as velocidades, durante um intervalo de 30min para cada parâmetro.

Na segunda data de ensaio, dia 03/11/2023, encontrou-se uma poça d'água bem acima do protótipo instalado, conforme mostra a fotografia 19.

Fotografia 19 - Ensaio de campo após chuvas



Fonte: Registrada pelo(a) autor(a)

4.2.1 – Resultados com velocidades 10Km/h, 20Km/h e 30Km/h

Os carros passavam pelo kit instalado, aplicando e retirando o seu peso próprio. Assim, as análises foram coletadas na primeira aplicação da carga da roda dianteira e na segunda carga, quando ocorria a saída da roda traseira.

A velocidade máxima que foi possível atingir no estacionamento foi de 30 km/h, sendo essa a faixa máxima na experimentação.

Outro fator considerado foi o tempo em que os veículos passavam pelo protótipo, pois era muito rápido para possibilitar a aferição visual no multímetro. Portanto, para as leituras de tensão, foi considerada apenas uma casa decimal.

Houve variações na amostragem de veículos devido ao fluxo na entrada do estacionamento e à dependência de condutores voluntários para as aplicações de velocidades.

Como foram avaliados apenas veículos do tipo passeio e considerando o eixo deles com aproximadamente 350 kg, comparou-se os resultados gerados com os de laboratório para a mesma carga. No laboratório, eram utilizadas 10 pastilhas, e a tensão ficou em 1,209 V, enquanto a corrente atingiu 0,11 μA . Assim, para os resultados de campo, esses valores deverão ser multiplicados por quatro, uma vez que os kits de campo contêm 40 unidades no total.

Para avaliar o comportamento geral das aplicações de campo, foi realizado um resumo na tabela 04, onde estão as médias gerais das tensões, correntes e potências. Os resultados individuais de cada data encontram-se no Apêndice B ao final desse trabalho.

Tabela 4 - Resumo da tensão e corrente média nas passadas

VELOCIDADE	TENSÃO GERAL MÉDIA (V)	CORRENTE GERAL MÉDIA (μA)	POTÊNCIA (μW)
10 Km/h	2,063	0,025	0,052
20 Km/h	3,400	0,050	0,170
30 Km/h	2,700	0,044	0,120

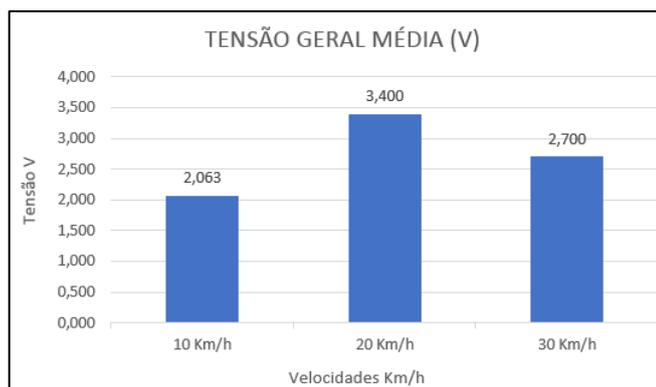
Fonte: Elaborada pelo(a) autor(a)

Nesse experimento, em comparação aos resultados de laboratório, nenhum dos valores médios ficou em torno de 4,8 V de tensão e 0,44 μA para corrente em nenhuma das velocidades. Porém, em campo, as cargas são de passagem e não axiais. Segundo Valente (2019), quanto maior a velocidade e o peso do veículo, maior será a quantidade de energia captada. Essa consideração é crucial ao selecionar a estrada e o sistema a ser instalado. Optar por uma via com um elevado fluxo de tráfego pode ser uma decisão vantajosa.

Assim, é possível validar que pesos de veículos iguais, mesmo em diferentes velocidades, não aumentam a quantidade de energia gerada. Conforme os gráficos 04 e 05, é possível notar esse comportamento. Inclusive, na amostragem foram realizados os testes de mesmas velocidades com mesmos modelos de carros.

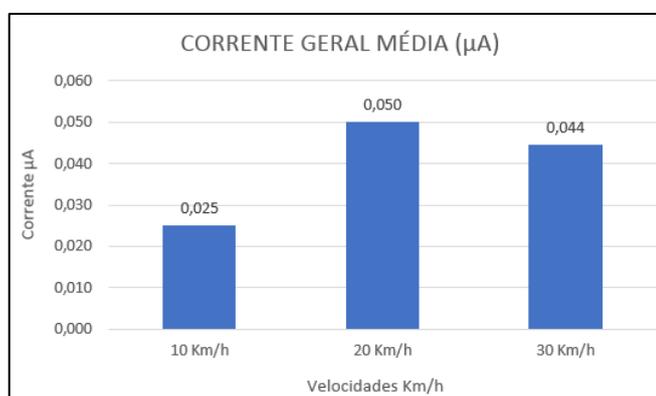
Podemos também avaliar a proporção da geração de energia, já que teve o aumento do número de pastilhas em campo. Comparando os resultados da velocidade de 20 Km/h, que teve mais eficácia com a carga de 350 Kg de laboratório, foi possível perceber um aumento de 70% na tensão gerada. No entanto, para a corrente, não se obteve a mesma relação, pois ficou com 0,05 μA , abaixo de 0,11 μA , que era o valor de laboratório.

Gráfico 4 - Velocidades x tensão geral média



Fonte: Elaborado pelo(a) autor(a)

Gráfico 5 - Velocidades x corrente geral média



Fonte: Elaborado pelo(a) autor(a)

Verificou-se que, com as velocidades de 30 km/h, as relações energéticas foram menores do que as de 20 km/h. Isso pode ser atribuído à área de estudo ser pequena (20 cm x 50 cm) ou ao fato de os veículos passarem mais rapidamente na área de contato. No entanto, em todas as simulações, visto que geram corrente, mesmo que baixa, há potencial energético devido à tensão alta gerada.

Em futuros trabalhos, pode-se explorar o comportamento de velocidades em veículos do tipo SUV, motocicletas, o comportamento ao frear, entre outros, para realizar mais verificações. Uma outra sugestão de modificação é o distanciamento entre os kits para aprimorar o impacto ou a utilização de protótipos maiores em cada trilho de rodas.

4.2.2 – Resultados nas passagens de veículos

Para as mesmas datas de estudo das velocidades, foi realizada a amostragem dos veículos de passeio e SUV que passaram pelo estacionamento. O objetivo dessa análise não era a velocidade, mas sim a diferença de peso entre os tipos, para gerar mais dados e análises no estudo.

Foram dedicados os primeiros 30 minutos para avaliar as tensões e os outros 30 minutos para a leitura da corrente, uma vez que o intervalo de tempo era curto para coletar todos os dados. O número de amostragens entre os tipos de veículos variou devido ao fluxo na entrada do estacionamento e ao maior número de veículos do tipo passeio no acesso ao estacionamento.

Na maioria das passagens, os veículos entravam com um condutor de estatura média de 80 kg. Para avaliar o comportamento geral das passagens, foi realizado um resumo na tabela 05 com as médias gerais das tensões e correntes coletadas. Os resultados individuais de cada data encontram-se no Apêndice C ao final deste trabalho.

Tabela 5 - Resumo da tensão e corrente média nas passadas

TIPO VEÍCULO	TENSÃO MÉDIA (V)	CORRENTE MÉDIA (μA)
SUV	1,350	0,070
PASSEIO	1,548	0,054

Fonte: Elaborada pelo(a) autor(a)

Na análise de laboratório, foi possível perceber que quanto maior a carga, maior a corrente gerada, confirmando as conclusões dos autores estudados. A mesma afirmação pode ser estendida para os diferentes tipos de veículos, pois mesmo em menor quantidade, os SUVs causaram uma alteração maior na relação de corrente em comparação aos veículos do tipo passeio.

Quanto à integridade do conjunto de campo, devido ao estacionamento ser operante o tempo todo após a instalação do kit, além das características de geração de energia, o sistema manteve-se funcional, sem interferências causadas pelos veículos passantes fora do período de estudo.

5 - CONCLUSÕES

Diante dos objetivos delineados para este estudo, os resultados obtidos contribuem significativamente para a compreensão e viabilidade do uso de cápsulas piezoelétricas do tipo cerâmica de Titanato de Zirconato de Chumbo (PZT) em pavimentos. A avaliação da montagem dos kits, tanto em ensaios de laboratório quanto em condições reais de campo, permitiu verificar a robustez e eficácia do sistema.

No âmbito dos testes laboratoriais, a carga axial de 50Kg demonstrou-se como a mais eficiente em termos de geração de energia, fornecendo subsídios para recomendar a aplicação dessas cápsulas em calçadas, onde o fluxo constante de cargas sucessivas pode aumentar a eficiência da absorção de energia.

A medição das emissões de geração de energia e a avaliação da integridade dos sistemas em campo confirmaram a viabilidade prática do projeto. A velocidade de 20Km/h com as 40 unidades de pastilhas instaladas mostrou-se como o parâmetro mais eficaz, indicando um potencial de aplicação real em ambientes urbanos.

A análise dos resultados de corrente e tensão, em relação à quantidade de ensaios realizados, proporcionou uma compreensão mais profunda do comportamento desses sistemas sob diferentes condições. A constatação de que a piezoelectricidade em pavimentos pode gerar microenergia de forma eficiente é um avanço significativo.

Ao comparar os resultados obtidos com os aspectos mecânicos do sistema para geração de energia, foi possível verificar a coesão entre os objetivos propostos. A eficiência energética não comprometeu a integridade do conjunto, confirmando a viabilidade de sua aplicação prática.

Diante do exposto, concluí-se que este estudo proporcionou insights valiosos sobre a utilização de cápsulas piezoelétricas em pavimentos como fonte de geração de energia. Os resultados positivos abrem caminho para futuras pesquisas e aplicações práticas, consolidando a piezoelectricidade como uma alternativa promissora na busca por soluções sustentáveis em infraestrutura urbana.

5.1 – SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A fim de propor algumas sugestões para trabalhos futuros e dar continuidade a linha de pesquisa e análise deste trabalho, sugere-se:

- a) Incorporar as pastilhas piezoelétricas em concreto betuminoso usinado à quente, para assim verificar a faixa de temperatura e oscilações energéticas que podem ocasionar dentro da temperatura Curie do material;
- b) Incorporar as pastilhas piezoelétricas em estrutura de pavimento com camada rígida em concreto, para assim verificar se as diferentes tensões que apresentam podem proporcionar melhor eficiência energética;
- c) Incorporar as pastilhas piezoelétricas abaixo dos revestimentos de calçadas, para medir com fluxo de pedestres a intensidade da geração de energia;
- d) Verificar o efeito de diferença de potencial externo aplicado no sistema para verificar possíveis deformações do conjunto;
- e) Analisar a proporção de geração para pastilhas adjacentes fora a área de contato axial dos pneus;
- f) Avaliar a utilização de programas computacionais para a identificação automática dos veículos passantes sobre o sistema, permitindo uma contagem e categorização para controle em rodovias;
- g) Aumentar o número de pastilhas em um nível de escala real para verificar o desempenho em solo e a melhor forma de armazenar a energia;
- h) Controle de possíveis fatores de influência tais como: temperatura e interferências da rede elétrica próxima;
- i) Avaliar a vida útil do sistema, após quantas passagens se inicia o processo de perda ou não na geração de energia.

REFERÊNCIAS

ABEDA. Disponível em: <http://abeda.org.br/mercado/>. Acesso em: 22 jun. 2023.

AEEE, Disponível em: <https://dashboard.epe.gov.br/apps/anuario-livro/>. Acesso em: 12 maio 2023.

BATISTA, Enzo Rebouças. **Pavimentos de concreto com e sem armadura estrutural: Cotejamento de atributos relativos a projeto, dimensionamento, construção e custos de implantação.** Monografia de conclusão de curso. Curso de Engenharia Civil. Universidade Federal de Sergipe. São Cristóvão, 2021.

BAULE, Sofia de Souza. **Avaliação do uso de blocos de concreto para emprego em pavimentação intertravada: análise da fabricação, execução e dimensionamento.** Monografia de conclusão de curso. Curso de Engenharia Civil. Centro Tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2018.

BROCHADO, Matheus Matos Lepesqueur. **Estudo da viabilidade do asfalto pré-misturado a frio em rodovias de médio e baixo tráfego.** Monografia de conclusão de curso. Curso de Engenharia Civil. UniCEUB - Centro Universitário de Brasília. Brasília, 2014.

COELHO, Marcos Antônio Jeremias. **Avaliação de análise de um sistema de micro geração de energia baseado no efeito piezoelétrico.** Tese (Mestrado em Engenharia Elétrica). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

COSTA, João Gustavo Leite. **Avaliação das propriedades elétrica, dielétrica e piezoelétrica do compósito com conectividade 1-3 de poliuretano de óleo de mamona com bastões de pzt e mwcnt.** Tese (Mestrado em Ciência dos Materiais). Faculdade de Engenharia – UNESP – Campus de Ilha Solteira, 2022.

DIDONE, Alekson Torman. **Microgeracao de energia por meio do efeito piezoelétrico.** Monografia de conclusão de curso. Curso de Engenharia de Controle e Automação. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2022.

EPE, Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>. Acesso em: 12 maio 2023.

FERREIRA, Luiz Fernando Suzarte Silva. **Sistema de geração de energia via sensores piezoelétricos.** Monografia de conclusão de curso. Curso de Engenharia elétrica. Centro Universitário de Brasília. Brasília, 2017.

FREITAS, Ricardo Luiz Barros de. **Fabricação, caracterização e aplicações do compósito pzt/pvdf.** Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica). Faculdade de Engenharia – UNESP – Campus de Ilha Solteira, 2012.

GOMES, Clécia Naiara Freitas. **Análise de blocos de concreto intertravado para pavimentação com a utilização de resíduo de cerâmica vermelha.** Monografia de conclusão de curso. Curso de Engenharia Civil. Universidade Federal do Ceará. Russas, 2022.

HELLER, Lucas Fraporti. **Microgeração de energia em pavimentos: Estudo de caso de um gerador piezoelétrico Instalado em um pavimento rodoviário.** Tese (Mestrado em Engenharia Civil). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.

HIRATA, Felipe Takao Ricieri. **Avaliação comparativa dos parâmetros de dosagem de misturas asfálticas do tipo pmf e cbuq.** Monografia de conclusão de curso. Curso de Engenharia Civil e Infraestrutura, Centro Tecnológico de Joinville da Universidade Federal de Santa Catarina. Joenvile, 2018.

IEA. Disponível em: <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/global-energy-related-co2-emissions-by-sector>. Acesso em: 12 maio 2023.

MOREIRA, Beatriz Lanna. **Utilização de sensores piezoelétricos para geração de energia elétrica a partir da vibração de motores.** Monografia de conclusão de curso. Curso de Engenharia elétrica. Campo Grande, 2021.

ONSCALE: Uma história do efeito piezoelétrico. Disponível em: <https://onscale.com/piezoelectricity/history-of-piezoelectricity/>. Acesso em: 23 jun. 2023

REZENDE, Ludmila Mecias de. **Geração de energia através da piezoeletricidade.** Monografia de conclusão de curso. Curso de Engenharia mecânica. Varginha, 2020.

ROCHA, Rodrigo Tumolin. **Colheita de energia usando dispositivos baseados em materiais piezoelétrico.** Monografia de conclusão de curso. Curso de Bacharel em Física. Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, 2012.

ROSSI, Anna Carolina. **Etapas de uma obra de pavimentação e dimensionamento de pavimento para uma via na ilha do fundão.** Monografia de conclusão de curso. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2017.

SANTOS, Josiane Alexandrino dos. **Desenvolvimento e caracterização de compósitos piezoelétricos de pzt com matriz cimentícia e borracha natural.** Tese (Mestrado em Ciência dos Materiais). Faculdade de Engenharia – UNESP – Campus de Ilha Solteira, 2018.

SILVA, Larissa Pereira da. **Estimativa de geração de energia por tapete piezoelétrico em múltiplas camadas.** Monografia de conclusão de curso. Curso de Engenharia elétrica. Faculdades Doctum de Caratinga. Caratinga, 2019.

SILVA, Patrick Kazmierczak da. **Geração de energia através do efeito piezoelétrico inserido no concreto translúcido aplicado em faixas de segurança.** Monografia de conclusão de curso. Curso de Engenharia elétrica. Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul. Ijuí, 2017.

SILVA, Robson Pereira da. **Piezoelétricidade como fonte de energia alternativa.** Monografia de conclusão de curso. Curso de Engenharia elétrica. Faculdades Santo Agostinho. Montes Claros, 2018.

TOMAZELLI, Cristiano. **Produção de concreto asfáltico com adição de resíduos plásticos.** Monografia de conclusão de curso. Curso de Engenharia Civil. Unisinos. São Leopoldo, 2019.

VALENTE, Mike Pessanha. **Projeto de dispositivo piezoelétrico para geração de energia.** Monografia de conclusão de curso. Curso de Engenharia Mecânica. PUC- RJ, 2019.

APÊNDICE A - CARGAS APLICADAS 10KG, 50KG, 150KG, 250KG E 350KG

DATA	LABORATÓRIO	APLICAÇÃO	CARGA	COLETA	1ª AMOSTRA	2ª AMOSTRA	3ª AMOSTRA	MÉDIA	MÉDIA GERAL
30/10/2023	CIVIL	PARTIDA	10 Kg/s	Corrente µA	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
03/11/2023	CIVIL	PARTIDA	10 Kg/s	Corrente µA	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
07/11/2023	MECÂNICA	PARTIDA	10 Kg/s	Corrente µA	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
08/11/2023	MECÂNICA	PARTIDA	10 Kg/s	Corrente µA	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
08/11/2023	MECÂNICA	RETORNO	10 Kg/s	Corrente µA	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
09/11/2023	MECÂNICA	PARTIDA	10 Kg/s	Corrente µA	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
09/11/2023	MECÂNICA	RETORNO	10 Kg/s	Corrente µA	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
10/11/2023	MECÂNICA	PARTIDA	10 Kg/s	Corrente µA	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
10/11/2023	MECÂNICA	RETORNO	10 Kg/s	Corrente µA	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
30/10/2023	CIVIL	PARTIDA CARGA	10 Kg/s	Tensão V	1,807	1,840	2,281	1,976	0,523
03/11/2023	CIVIL	PARTIDA CARGA	10 Kg/s	Tensão V	1,255	1,167	1,188	1,203	0,523
07/11/2023	MECÂNICA	PARTIDA CARGA	10 Kg/s	Tensão V	0,520	0,800	0,680	0,667	0,523
08/11/2023	MECÂNICA	PARTIDA CARGA	10 Kg/s	Tensão V	0,347	0,374	0,444	0,388	0,523
08/11/2023	MECÂNICA	RETORNO CARGA	10 Kg/s	Tensão V	0,658	0,575	0,466	0,566	0,523
09/11/2023	MECÂNICA	PARTIDA CARGA	10 Kg/s	Tensão V	0,470	0,402	0,467	0,446	0,523
09/11/2023	MECÂNICA	RETORNO CARGA	10 Kg/s	Tensão V	1,525	1,689	1,368	1,527	0,523
10/11/2023	MECÂNICA	PARTIDA CARGA	10 Kg/s	Tensão V	0,483	0,544	0,544	0,524	0,523
10/11/2023	MECÂNICA	RETORNO CARGA	10 Kg/s	Tensão V	0,496	0,488	0,397	0,460	0,523

DATA	LABORATÓRIO	APLICAÇÃO	CARGA	COLETA	1ª AMOSTRA	2ª AMOSTRA	3ª AMOSTRA	MÉDIA	MÉDIA GERAL
30/10/2023	CIVIL	PARTIDA	50 Kg/s	Corrente µA	0,000	0,000	0,000	0,000	0,056
03/11/2023	CIVIL	PARTIDA	50 Kg/s	Corrente µA	0,100	0,100	0,100	0,100	0,056
07/11/2023	MECÂNICA	PARTIDA	50 Kg/s	Corrente µA	0,000	0,000	0,100	0,033	0,056
08/11/2023	MECÂNICA	PARTIDA	50 Kg/s	Corrente µA	0,100	0,100	0,100	0,100	0,056
08/11/2023	MECÂNICA	RETORNO	50 Kg/s	Corrente µA	0,000	0,000	0,000	0,000	0,056
09/11/2023	MECÂNICA	PARTIDA	50 Kg/s	Corrente µA	0,100	0,100	0,100	0,100	0,056
09/11/2023	MECÂNICA	RETORNO	50 Kg/s	Corrente µA	0,000	0,100	0,100	0,067	0,056
10/11/2023	MECÂNICA	PARTIDA	50 Kg/s	Corrente µA	0,000	0,000	0,000	0,000	0,056
10/11/2023	MECÂNICA	RETORNO	50 Kg/s	Corrente µA	0,100	0,100	0,100	0,100	0,056
30/10/2023	CIVIL	PARTIDA	50 Kg/s	Tensão V	2,743	1,775	1,914	2,144	2,570
03/11/2023	CIVIL	PARTIDA	50 Kg/s	Tensão V	0,827	4,227	6,086	3,438	2,570
07/11/2023	MECÂNICA	PARTIDA	50 Kg/s	Tensão V	5,915	4,277	5,380	5,191	2,570
08/11/2023	MECÂNICA	PARTIDA	50 Kg/s	Tensão V	0,640	0,824	0,605	0,690	2,570
08/11/2023	MECÂNICA	RETORNO	50 Kg/s	Tensão V	5,930	5,499	5,117	5,515	2,570
09/11/2023	MECÂNICA	PARTIDA	50 Kg/s	Tensão V	0,752	0,756	0,552	0,687	2,570
09/11/2023	MECÂNICA	RETORNO	50 Kg/s	Tensão V	4,198	0,078	2,104	2,101	2,570
10/11/2023	MECÂNICA	PARTIDA	50 Kg/s	Tensão V	0,454	0,415	0,470	0,446	2,570
10/11/2023	MECÂNICA	RETORNO	50 Kg/s	Tensão V	4,790	4,321	5,127	4,746	2,570

DATA	LABORATÓRIO	APLICAÇÃO	CARGA	COLETA	1ª AMOSTRA	2ª AMOSTRA	3ª AMOSTRA	MÉDIA	MÉDIA GERAL
30/10/2023	CIVIL	PARTIDA	150 Kg/s	Corrente µA	0,100	0,000	0,000	0,033	0,085
03/11/2023	CIVIL	PARTIDA	150 Kg/s	Corrente µA	0,300	0,100	0,300	0,233	0,085
07/11/2023	MECÂNICA	PARTIDA	150 Kg/s	Corrente µA	0,000	0,100	0,100	0,067	0,085
08/11/2023	MECÂNICA	PARTIDA	150 Kg/s	Corrente µA	0,100	0,100	0,100	0,100	0,085
08/11/2023	MECÂNICA	RETORNO	150 Kg/s	Corrente µA	0,000	0,000	0,200	0,067	0,085
09/11/2023	MECÂNICA	PARTIDA	150 Kg/s	Corrente µA	0,100	0,100	0,100	0,100	0,085
09/11/2023	MECÂNICA	RETORNO	150 Kg/s	Corrente µA	0,100	0,000	0,000	0,033	0,085
10/11/2023	MECÂNICA	PARTIDA	150 Kg/s	Corrente µA	0,000	0,000	0,000	0,000	0,085
10/11/2023	MECÂNICA	RETORNO	150 Kg/s	Corrente µA	0,100	0,100	0,200	0,133	0,085
30/10/2023	CIVIL	PARTIDA	150 Kg/s	Tensão V	5,621	4,425	1,914	3,987	1,389
03/11/2023	CIVIL	PARTIDA	150 Kg/s	Tensão V	1,244	2,430	1,249	1,641	1,389
07/11/2023	MECÂNICA	PARTIDA	150 Kg/s	Tensão V	1,179	0,552	0,473	0,393	1,389
08/11/2023	MECÂNICA	PARTIDA	150 Kg/s	Tensão V	0,870	0,782	0,876	0,843	1,389
08/11/2023	MECÂNICA	RETORNO	150 Kg/s	Tensão V	0,437	3,603	0,566	1,201	1,389
09/11/2023	MECÂNICA	PARTIDA	150 Kg/s	Tensão V	0,763	0,789	0,808	0,787	1,389
09/11/2023	MECÂNICA	RETORNO	150 Kg/s	Tensão V	1,270	0,100	0,102	423,40	1,389
10/11/2023	MECÂNICA	PARTIDA	150 Kg/s	Tensão V	0,432	0,481	0,433	0,449	1,389
10/11/2023	MECÂNICA	RETORNO	150 Kg/s	Tensão V	4,908	4,649	5,004	4,854	1,389

DATA	LABORATÓRIO	APLICAÇÃO	CARGA	COLETA	1ª AMOSTRA	2ª AMOSTRA	3ª AMOSTRA	MÉDIA	MÉDIA GERAL
30/10/2023	CIVIL	PARTIDA	250 Kg/s	Corrente µA	0,000	0,000	0,000	0,000	0,090
03/11/2023	CIVIL	PARTIDA	250 Kg/s	Corrente µA	0,200	0,300	0,300	0,267	0,090
07/11/2023	MECÂNICA	PARTIDA	250 Kg/s	Corrente µA	0,100	0,100	0,000	0,067	0,090
08/11/2023	MECÂNICA	PARTIDA	250 Kg/s	Corrente µA	0,100	0,100	0,100	0,100	0,090
08/11/2023	MECÂNICA	RETORNO	250 Kg/s	Corrente µA	0,000	0,200	0,200	0,133	0,090
09/11/2023	MECÂNICA	PARTIDA	250 Kg/s	Corrente µA	0,100	0,100	0,100	0,100	0,090
09/11/2023	MECÂNICA	RETORNO	250 Kg/s	Corrente µA	0,000	0,100	0,000	0,033	0,090
10/11/2023	MECÂNICA	PARTIDA	250 Kg/s	Corrente µA	0,000	0,000	0,000	0,000	0,090
10/11/2023	MECÂNICA	RETORNO	250 Kg/s	Corrente µA	0,100	0,200	0,100	0,133	0,090
30/10/2023	CIVIL	PARTIDA	250 Kg/s	Tensão V	2,557	2,261	1,487	2,102	1,238
03/11/2023	CIVIL	PARTIDA	250 Kg/s	Tensão V	0,521	0,989	0,217	0,576	1,238
07/11/2023	MECÂNICA	PARTIDA	250 Kg/s	Tensão V	5,127	3,123	0,407	2,750	1,238
08/11/2023	MECÂNICA	PARTIDA	250 Kg/s	Tensão V	0,558	0,580	0,605	0,581	1,238
08/11/2023	MECÂNICA	RETORNO	250 Kg/s	Tensão V	0,146	1,979	1,902	1,294	1,238
09/11/2023	MECÂNICA	PARTIDA	250 Kg/s	Tensão V	0,670	0,664	0,669	0,668	1,238
09/11/2023	MECÂNICA	RETORNO	250 Kg/s	Tensão V	6,189	0,102	0,113	2,063	1,238
10/11/2023	MECÂNICA	PARTIDA	250 Kg/s	Tensão V	0,857	0,848	0,894	0,866	1,238
10/11/2023	MECÂNICA	RETORNO	250 Kg/s	Tensão V	6,110	0,752	2,688	2,933	1,238

DATA	LABORATÓRIO	APLICAÇÃO	CARGA	COLETA	1ª AMOSTRA	2ª AMOSTRA	3ª AMOSTRA	MÉDIA	MÉDIA GERAL
30/10/2023	CIVIL	PARTIDA	350 Kg/s	Corrente µA	0,000	0,100	0,000	0,033	0,115
03/11/2023	CIVIL	PARTIDA	350 Kg/s	Corrente µA	0,200	0,200	0,400	0,267	0,115
07/11/2023	MECÂNICA	PARTIDA	350 Kg/s	Corrente µA	0,100	0,200	0,100	0,133	0,115
08/11/2023	MECÂNICA	PARTIDA	350 Kg/s	Corrente µA	0,100	0,100	0,100	0,100	0,115
08/11/2023	MECÂNICA	RETORNO CARGA	350 Kg/s	Corrente µA	0,200	0,100	0,100	0,133	0,115
09/11/2023	MECÂNICA	PARTIDA	350 Kg/s	Corrente µA	0,100	0,100	0,100	0,100	0,115
09/11/2023	MECÂNICA	RETORNO	350 Kg/s	Corrente µA	0,100	0,000	0,100	0,067	0,115
10/11/2023	MECÂNICA	PARTIDA	350 Kg/s	Corrente µA	0,000	0,000	0,000	0,000	0,115
10/11/2023	MECÂNICA	RETORNO	350 Kg/s	Corrente µA	0,200	0,100	0,300	0,200	0,115
30/10/2023	CIVIL	PARTIDA	350 Kg/s	Tensão V	4,213	3,050	3,896	3,720	1,209
03/11/2023	CIVIL	PARTIDA	350 Kg/s	Tensão V	0,900	1,400	0,900	0,467	1,209
07/11/2023	MECÂNICA	PARTIDA	350 Kg/s	Tensão V	3,025	5,540	4,320	4,295	1,209
08/11/2023	MECÂNICA	PARTIDA	350 Kg/s	Tensão V	0,621	0,525	0,572	0,573	1,209
08/11/2023	MECÂNICA	RETORNO	350 Kg/s	Tensão V	0,652	0,508	0,213	0,458	1,209
09/11/2023	MECÂNICA	PARTIDA	350 Kg/s	Tensão V	0,374	0,377	0,363	0,371	1,209
09/11/2023	MECÂNICA	RETORNO	350 Kg/s	Tensão V	2,146	0,161	0,167	0,715	1,209
10/11/2023	MECÂNICA	PARTIDA	350 Kg/s	Tensão V	0,774	0,700	0,778	0,751	1,209
10/11/2023	MECÂNICA	RETORNO	350 Kg/s	Tensão V	5,046	0,162	0,146	1,682	1,209

APÊNDICE B – VELOCIDADES 10KM/H, 20KM/H E 30KM/H

DATA	VELOCIDADE	COLETA	TIPO VEÍCULO	1ª DIANTEIRA	2ª TRASSEIRA	MÉDIA GERAL
30/10/2023	10 Km/h	Corrente	passeio	0,000	0,000	0,025
03/11/2023	10 Km/h	Corrente	passeio	0,000	0,000	0,025
07/11/2023	10 Km/h	Corrente	passeio	0,000	0,000	0,025
09/11/2023	10 Km/h	Corrente	passeio	0,100	0,100	0,025
30/10/2023	10 Km/h	Tensão V	passeio	4,000	2,000	2,063
03/11/2023	10 Km/h	Tensão V	passeio	3,000	2,000	2,063
03/11/2023	10 Km/h	Tensão V	passeio	0,000	0,000	2,063
03/11/2023	10 Km/h	Tensão V	passeio	2,000	4,000	2,063
07/11/2023	10 Km/h	Tensão V	passeio	1,000	2,000	2,063
07/11/2023	10 Km/h	Tensão V	passeio	2,000	2,000	2,063
09/11/2023	10 Km/h	Tensão V	passeio	3,000	2,000	2,063
09/11/2023	10 Km/h	Tensão V	passeio	3,000	1,000	2,063

DATA	VELOCIDADE	COLETA	TIPO VEÍCULO	1ª DIANTEIRA	2ª TRASSEIRA	MÉDIA GERAL
30/10/2023	20 Km/h	Corrente	passeio	0,000	0,000	0,050
03/11/2023	20 Km/h	Corrente	passeio	0,000	0,100	0,050
07/11/2023	20 Km/h	Corrente	passeio	0,000	0,000	0,050
07/11/2023	20 Km/h	Corrente	passeio	0,000	0,000	0,050
09/11/2023	20 Km/h	Corrente	passeio	0,200	0,200	0,050
30/10/2023	20 Km/h	Tensão V	passeio	4,000	3,000	3,400
03/11/2023	20 Km/h	Tensão V	passeio	3,000	2,000	3,400
03/11/2023	20 Km/h	Tensão V	passeio	4,000	3,000	3,400
07/11/2023	20 Km/h	Tensão V	passeio	5,000	3,000	3,400
09/11/2023	20 Km/h	Tensão V	passeio	4,000	3,000	3,400

DATA	VELOCIDADE	COLETA	TIPO VEÍCULO	1ª DIANTEIRA	2ª TRASSEIRA	MÉDIA GERAL
30/10/2023	30 Km/h	Corrente	passeio	0,000	0,100	0,070
03/11/2023	30 Km/h	Corrente	passeio	0,000	0,000	0,070
07/11/2023	30 Km/h	Corrente	passeio	0,300	0,300	0,070
07/11/2023	30 Km/h	Corrente	passeio	0,000	0,000	0,070
09/11/2023	30 Km/h	Corrente	passeio	0,000	0,000	0,070
30/10/2023	30 Km/h	Tensão V	passeio	0,000	2,000	2,700
03/11/2023	30 Km/h	Tensão V	passeio	4,000	2,000	2,700
03/11/2023	30 Km/h	Tensão V	passeio	3,000	2,000	2,700
07/11/2023	30 Km/h	Tensão V	passeio	4,000	3,000	2,700
09/11/2023	30 Km/h	Tensão V	passeio	4,000	3,000	2,700

APÊNDICE C – VEÍCULOS PASSANTES SUV E PASSEIO

DATA	VELOCIDADE	COLETA	TIPO VEÍCULO	1ª DIANTEIRA	2ª TRASSEIRA	MÉDIA
30/10/2023	não avaliada	Corrente	SUV	0,100	0,200	0,070
03/11/2023	não avaliada	Corrente	SUV	0,100	0,100	0,070
07/11/2023	não avaliada	Corrente	SUV	0,100	0,100	0,070
07/11/2023	não avaliada	Corrente	SUV	0,000	0,000	0,070
07/11/2023	não avaliada	Corrente	SUV	0,000	0,000	0,070
07/11/2023	não avaliada	Corrente	SUV	0,100	0,200	0,070
09/11/2023	não avaliada	Corrente	SUV	0,100	0,100	0,070
09/11/2023	não avaliada	Corrente	SUV	0,000	0,000	0,070
09/11/2023	não avaliada	Corrente	SUV	0,100	0,100	0,070
09/11/2023	não avaliada	Corrente	SUV	0,000	0,000	0,070
07/11/2023	não avaliada	Tensão V	SUV	0,201	0,000	1,350
09/11/2023	não avaliada	Tensão V	SUV	0,500	0,500	1,350
09/11/2023	não avaliada	Tensão V	SUV	2,000	2,000	1,350
09/11/2023	não avaliada	Tensão V	SUV	1,000	2,000	1,350
09/11/2023	não avaliada	Tensão V	SUV	4,000	2,000	1,350
09/11/2023	não avaliada	Tensão V	SUV	1,000	1,000	1,350

DATA	VELOCIDADE	COLETA	TIPO VEÍCULO	1ª DIANTEIRA	2ª TRASSEIRA	MÉDIA GERAL
30/10/2023	não avaliada	Corrente	passseio	0,000	0,000	0,054
30/10/2023	não avaliada	Corrente	passseio	0,000	0,000	0,054
03/11/2023	não avaliada	Corrente	passseio	0,000	0,000	0,054
03/11/2023	não avaliada	Corrente	passseio	0,000	0,000	0,054
07/11/2023	não avaliada	Corrente	passseio	0,200	0,000	0,054
09/11/2023	não avaliada	Corrente	passseio	0,000	0,000	0,054
09/11/2023	não avaliada	Corrente	passseio	0,000	0,000	0,054
09/11/2023	não avaliada	Corrente	passseio	0,100	0,100	0,054
09/11/2023	não avaliada	Corrente	passseio	0,100	0,100	0,054
09/11/2023	não avaliada	Corrente	passseio	0,100	0,100	0,054
09/11/2023	não avaliada	Corrente	passseio	0,100	0,100	0,054
09/11/2023	não avaliada	Corrente	passseio	0,100	0,100	0,054
30/10/2023	não avaliada	Tensão V	passseio	0,800	0,000	1,548
30/10/2023	não avaliada	Tensão V	passseio	1,30,0	0,000	1,548
30/10/2023	não avaliada	Tensão V	passseio	0,103	0,000	1,548
03/11/2023	não avaliada	Tensão V	passseio	0,200	0,000	1,548
07/11/2023	não avaliada	Tensão V	passseio	1,000	0,000	1,548
09/11/2023	não avaliada	Tensão V	passseio	6,000	3,000	1,548
09/11/2023	não avaliada	Tensão V	passseio	4,000	4,000	1,548
09/11/2023	não avaliada	Tensão V	passseio	5,000	3,000	1,548
09/11/2023	não avaliada	Tensão V	passseio	0,300	0,000	1,548
09/11/2023	não avaliada	Tensão V	passseio	2,000	1,000	1,548
09/11/2023	não avaliada	Tensão V	passseio	5,000	3,000	1,548
09/11/2023	não avaliada	Tensão V	passseio	0,600	0,000	1,548
09/11/2023	não avaliada	Tensão V	passseio	1,000	1,000	1,548
09/11/2023	não avaliada	Tensão V	passseio	1,800	1,000	1,548
09/11/2023	não avaliada	Tensão V	passseio	0,400	0,000	1,548
09/11/2023	não avaliada	Tensão V	passseio	1,000	2,000	1,548
09/11/2023	não avaliada	Tensão V	passseio	0,400	0,200	1,548
09/11/2023	não avaliada	Tensão V	passseio	2,000	3,000	1,548
09/11/2023	não avaliada	Tensão V	passseio	0,400	0,400	1,548
09/11/2023	não avaliada	Tensão V	passseio	3,000	4,000	1,548