



JÚLIA THEREZA XAVIER SILVA

**GERAÇÃO DE ENERGIA EM RODOVIAS –
PAVIMENTAÇÃO E NOVAS SOLUÇÕES TECNOLÓGICAS
PARA O DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL**

**LAVRAS - MG
2022**

JÚLIA THEREZA XAVIER SILVA

**GERAÇÃO DE ENERGIA EM RODOVIAS –
PAVIMENTAÇÃO E NOVAS SOLUÇÕES TECNOLÓGICAS
PARA O DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Univerisdade Federal de Lavras, como parte
das exigências do Curso de Engenharia Civil,
para a obtenção do título de Bacharel.

Prof. Dr. Paulo Roberto Borges
Orientador

**LAVRAS - MG
2022**

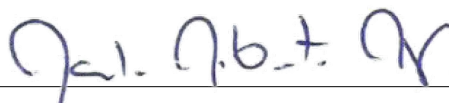
JÚLIA THEREZA XAVIER SILVA

**GERAÇÃO DE ENERGIA EM RODOVIAS –
PAVIMENTAÇÃO E NOVAS SOLUÇÕES TECNOLÓGICAS
PARA O DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL**

**ENERGY GENERATION ON ROADS – PAVEMENT AND
NEW TECHNOLOGICAL SOLUTIONS FOR SUSTAINABLE
DEVELOPMENT**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Univerisdade Federal de Lavras, como parte
das exigências do Curso de Engenharia Civil,
para a obtenção do título de Bacharel.

APROVADO em 19 de abril de 2022
Prof. Dr. Paulo Roberto Borges – UFLA
Ma. Marina Donato – UFRJ
Prof. Dr. Paulo Vítor Grillo de Souza – UFLA



Prof. Dr. Paulo Roberto Borges
Orientador

**LAVRAS - MG
2022**

AGRADECIMENTO

Chego ao fim de mais uma etapa da minha vida, esse é o último passo para a conclusão da graduação, e hoje só tenho a agradecer todos aqueles que estiveram presente e me ajudaram durante todo o curso, principalmente nessa reta final.

Agradeço primeiramente a Deus pela minha vida e por sempre me dar forças para conseguir alcançar meus objetivos.

Aos meus pais, por nunca terem medido esforços para me proporcionar um ensino de qualidade, por todo amor, incentivo e apoio.

Aos meus amigos pelo companheirismo e compreensão e ao meu namorado por ter me amparado em momentos difíceis.

Agradeço à Universidade Federal de Lavras pelos ensinamentos e por ter me proporcionado a chance de expandir os meus horizontes. E, por fim, ao professor Dr. Paulo Roberto Borges pela orientação, grande disposição e dedicação em me ajudar no desenvolvimento desse trabalho.

RESUMO

As energias limpas e renováveis são objetos de pesquisa em todo o mundo e estão sempre demandando o desenvolvimento de novas tecnologias. Além disso, o sistema rodoviário é considerado o principal meio de transporte em diversos países, incluindo o Brasil, garantindo a existência de milhões de quilômetros de rodovias e estradas que podem ser dispostos com uma finalidade além do transporte. O presente trabalho propõe a elaboração de uma revisão da literatura a respeito da captação e geração de energia através da pavimentação das rodovias. O objetivo principal dessa pesquisa é estudar algumas das inovações que estão sendo analisadas e implementadas no sistema inteligente de transporte rodoviário, apresentando a pavimentação nas rodovias como uma alternativa para reduzir o impacto ambiental causado pela produção de energia, contribuindo para o desenvolvimento sustentável do planeta. Dentre as fontes renováveis para a utilização na geração de energia, as escolhidas para a pesquisa são o sol e a energia mecânica. A luz solar que atinge a superfície das estradas pode ser convertida em energia elétrica com a instalação de sistemas fotovoltaicos nos pavimentos e, a pressão exercida pelos veículos ao trafegarem pelas vias garantem a geração da energia mecânica transformada em eletricidade mediante implementação do sistema piezoelétrico. Fontes essas que atestam a famosa expressão de Lavoisier – “Na natureza, nada se cria, nada se perde, tudo se transforma”. O trabalho apresentou dados e avaliações de muitos autores a respeito dos protótipos desenvolvidos. Com essa pesquisa, foi possível compreender a motivação da iniciativa no desenvolvimento dessa inovação, sua viabilidade e os fatores positivos e negativos da utilização do pavimento como instrumento de geração de energia.

Palavras-chave: Sustentabilidade. Pavimentos. Inovações. Fontes renováveis. Piezoeletricidade. Energia fotovoltaica.

ABSTRACT

Clean and renewable energies are objects of research around the world and are always demanding the development of new technologies. In addition, the road system is considered the main means of transport in several countries, including Brazil, ensuring the existence of millions of kilometers of highways and roads that can be arranged for a purpose other than transport. The present work proposes the elaboration of a review of the literature regarding the capture and generation of energy through the pavement of highways. The main objective of this research is to study some of the innovations that are being analyzed and implemented in the intelligent road transport system, presenting road pavement as an alternative to reduce the environmental impact caused by energy production, contributing to the sustainable development of the planet. Among the renewable sources for use in energy generation, the ones chosen for the search are the sun and mechanical energy. The sunlight that reaches the surface of the roads can be converted into electrical energy with the installation of photovoltaic systems on the pavements and the pressure exerted by vehicles when traveling on the roads guarantee the generation of mechanical energy transformed into electricity through the implementation of the piezoelectric system. These sources attest to Lavoisier's famous expression – “In nature, nothing is created, nothing is lost, everything is transformed”. The work presented data and evaluations of many authors regarding the developed prototypes. With this research, it was possible to understand the motivation of the initiative in the development of this innovation, its viability and the positive and negative factors of using the pavement as an energy generation instrument.

Keywords: Sustainability. Pavement. Innovations. Renewable sources. Piezoelectricity. Photovoltaics.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	7
1.1	Justificativa	8
1.2	Objetivos.....	9
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	10
2.1	Pavimentos rodoviários	10
2.1.1	Tipos de pavimentação em rodovias	10
2.1.2	Revestimento	12
2.1.3	Impactos das vias de transporte.....	14
2.2	Energia Solar e Piezoelétrica	15
2.2.1	Energia Solar.....	15
2.2.2	Energia Piezoelétrica	17
2.3	Pavimentos geradores de energia.....	18
2.3.1	Estrada Solar.....	18
2.3.1.1	Pavimentos com tecnologia fotovoltaica	19
2.3.1.1.1	Solar Roadways	19
2.3.1.1.2	TNO – SolaRoad	23
2.3.1.1.3	Wattway em Tourouvre, França:	27
2.3.1.1.4	Rodovia solar: China.....	31
2.3.1.1.5	Onyx Solar.....	35
2.3.1.1.6	Platio Solar: Piso solar	36
2.3.2	Pavimentos com energia piezoelétrica	38
2.3.2.1	Estudos de piezoelectricidade em pavimentos:.....	38
2.3.2.1.1	Protótipo desenvolvido por Roshani et al (2018)	38
2.3.2.1.2	Protótipo desenvolvido por Mota (2021)	44
3	DISCUSSÃO	51
3.1	Vantagens e desvantagens.....	51
3.1.1	Pavimento solar.....	51
3.1.2	Pavimento piezoelétrico	52
3.2	Análise de custo	53
4	CONCLUSÃO.....	54
	REFERÊNCIAS.....	56

1 INTRODUÇÃO

A sustentabilidade é a idealização de um equilíbrio entre o meio ambiente e sociedade, os recursos naturais e o modo como o homem os explora. O objetivo principal de projetos sustentáveis é garantir que gerações futuras tenham acesso às riquezas ambientais para sua sobrevivência.

Agir de acordo com a sustentabilidade ambiental significa fazer o uso dos bens naturais que são disponíveis para a sociedade sem a destruição dos mesmos, para que não ocorra a falta de recursos no futuro, pois o ser humano necessita da natureza para viver.

Discussões sobre o desenvolvimento sustentável aumentaram devido à percepção da sociedade com a poluição, degradação do meio ambiente e também a escassez de alguns recursos essenciais. Na atualidade, é perceptível que práticas sustentáveis têm sido foco de muitas empresas e governos, visando à diminuição da destruição da natureza e do que ela proporciona ao ser humano.

A geração de energia elétrica demonstra ser uma das áreas que melhor pode abordar critérios sustentáveis, apresentando meios de produção sem a interferência negativa no meio ambiente.

Os meios convencionais de geração de energia se dão através das usinas termelétricas e hidrelétricas. As usinas termelétricas são responsáveis pela produção de energia através do carvão, gás natural e óleo combustível. Boa parte da energia elétrica produzida no mundo ainda vem desse tipo de usina, gerando impactos ambientais como o lançamento de dióxido de carbono no meio ambiente.

A usina hidrelétrica gera energia através da força das águas. Apesar da utilização de um recurso limpo e renovável, as usinas hidrelétricas também provocam impactos ambientais devido à sua construção que acarreta na mudança dos cursos dos rios, desmatamento, alagamento de áreas vizinhas, prejudicando o habitat natural de muitas espécies e até mesmo destruindo ecossistema do local.

Atualmente, além da geração de energia de modo convencional, fontes renováveis estão sendo utilizadas para a produção de eletricidade, como por exemplo, sol, vento, materiais orgânicos, calor interno da Terra, dentre outras. Através de inovações tecnológicas a captação e geração de energia elétrica através de fontes limpas estão sendo cada vez mais utilizadas com menor risco de degradação ao meio ambiente. Com isso, diversos pesquisadores estudam tecnologias eficientes e locais para instalação sem a deterioração do ambiente.

As rodovias são o meio de transporte mais utilizado, principalmente no Brasil. Como todos os países possuem quilômetros de extensão de vias terrestres, responsáveis pelo tráfego dos veículos, iniciativas vêm sendo desenvolvidas para a construção de cidades inteligentes e melhoramento no sistema inteligente de transporte.

Com a utilização das vias de tráfego para a geração de energia elétrica de modo sustentável, quaisquer recursos renováveis podem ser explorados, como energia solar e eólica, e também é possível a transformação da pressão ocasionada pelo tráfego em eletricidade.

Os pavimentos rodoviários possuem grande potencial para se tornarem responsáveis pela captação e geração de energia de acordo com as tecnologias inovadoras que vêm sendo produzidas. A energia proporcionada por esse meio pode ser destinada para utilização pública, como iluminação das vias, para recargas de veículos elétricos e outros.

O presente artigo apresenta alguns estudos realizados referentes à captação de energia a partir da pavimentação das rodovias.

1.1 Justificativa

Nas últimas décadas a demanda por fontes de energia renováveis e que não agredam o meio ambiente tem incentivado a pesquisa por tecnologias mais limpas que propiciem a geração de energias. Isto se deve à preocupação com a escassez de recursos naturais, associados às condições incertas trazidas pelas mudanças climáticas, e a utilização de recursos não renováveis. Assim faz-se necessário a busca por matrizes energéticas mais sustentáveis, que priorizem o desenvolvimento de tecnologias viáveis para a geração, abastecimento e acesso à energia, possibilitando o crescimento econômico, social e ambiental.

Diante deste cenário, torna-se importante que sejam investigadas novas tecnologias que possam complementar a matriz energética mundial, inclusive utilizando-se de estruturas e recursos já existentes.

No caso do Brasil onde o transporte rodoviário é o principal sistema logístico do país, contando com uma rede de 1.720.700 quilômetros de estradas e rodovias nacionais (CNT, 2018), a sua utilização se mostra promissora para a geração de energia. O uso de energia solar (painéis fotovoltaicos) e energia mecânica, na concepção de rodovias, podem representar alternativas para a construção de estradas geradoras de energia, contribuindo para o desenvolvimento sustentável das cidades (Mota, 2021).

Porém o estudo deste tipo de energia e o desenvolvimento dessas tecnologias ainda são recentes e estão restritas ao âmbito das universidades e centros de pesquisa. Diante disto,

este trabalho justifica-se devido à necessidade de disseminação de conhecimento a cerca deste tema atrelado ao desenvolvimento de novos métodos de captação de energias renováveis, que possibilitem o desenvolvimento dos centros urbanos causando menos danos ambientais.

1.2 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho de conclusão de curso é apresentar utilização da pavimentação rodoviária como geradora de energia através da aplicação de sistemas captadores fotovoltaicos e piezoelétricos, priorizando o desenvolvimento tecnológico e a diminuição nos impactos ambientais.

Com o intuito de alcançar o objetivo geral foram traçados objetivos secundários, podendo ser divididos em:

- a) Contextualização da concepção de pavimentos rodoviários – pavimentos rígidos, flexíveis e semi-rígidos.
- b) Apresentação da energia solar e suas funcionalidades
- c) Explicação da piezoelectricidade.
- d) Apresentação de protótipos de pavimentação geradora de energia elétrica através de células fotovoltaicas; estudos e testes realizados.
- e) Apresentação de protótipos de pavimentação geradora de energia elétrica através do tráfego de veículos, usando elementos piezoelétricos.
- f) Discussão geral e análise dos projetos desenvolvidos por autores diversos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Pavimentos rodoviários

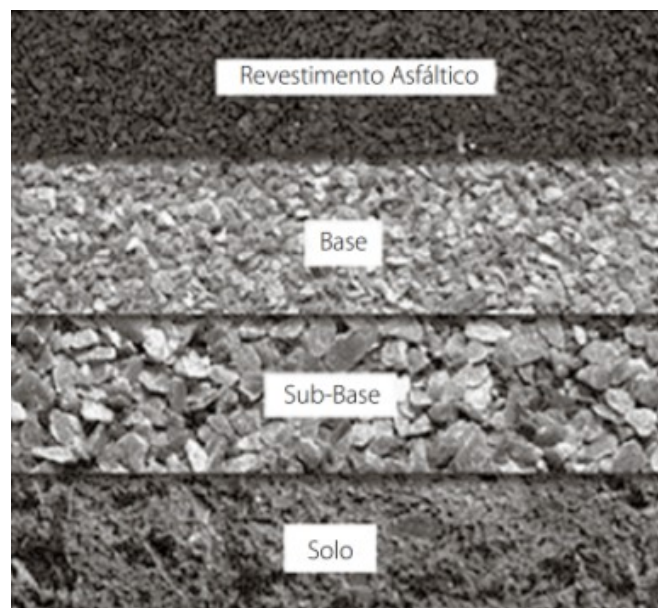
2.1.1 Tipos de pavimentação em rodovias

O pavimento rodoviário é composto por camadas estruturais que transferem para o terreno natural as cargas que são aplicadas pelos veículos, e o desempenho de cada componente interfere diretamente no desempenho da via rodoviária. Com isso, é necessário que cada parte seja projetada corretamente, assegurando tensões aplicadas adequadas para a estrutura (DRESCH, 2018).

De acordo com o DNIT (2006), os pavimentos podem ser classificados em flexíveis, rígidos e semi-rígidos.

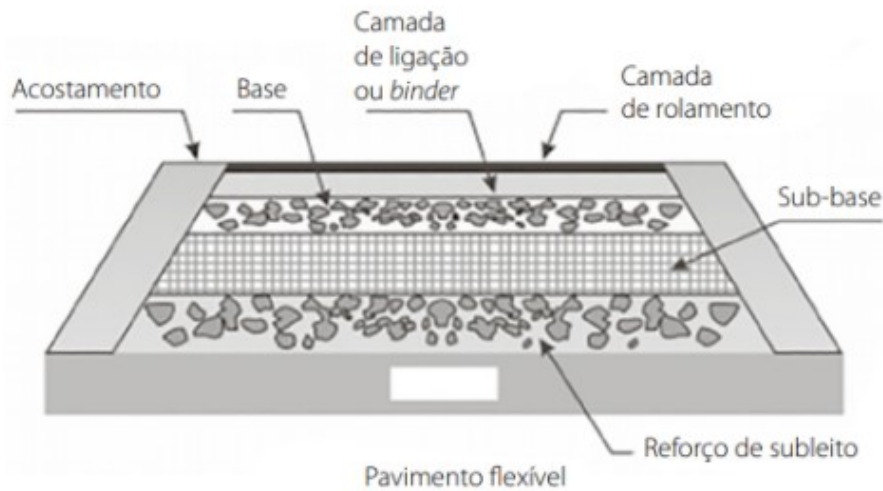
Os pavimentos flexíveis são aqueles que apresentam deformação elástica sob a força aplicada em todas as suas camadas, e a carga é distribuída proporcionalmente entre elas. Esse tipo de pavimento é constituído por camadas betuminosas assentadas sobre camadas granulares (DNIT, 2006). As camadas que compõem o pavimento flexível são o revestimento, camada que recebe diretamente o carregamento, a base, que é responsável por resistir e distribuir o carregamento, a sub-base, que complementa a base e também corrige a camada abaixo, e o subleito, terreno de fundação do pavimento. Além dessas camadas obrigatórias desse tipo de pavimento, pode apresentar também, ou não, outra camada inferior, denominada reforço do subleito (DRESCH, 2018). As figuras 1 e 2 apresentam a divisão das camadas.

Figura 1: Camadas de um pavimento flexível



Fonte: DNIT (2006)

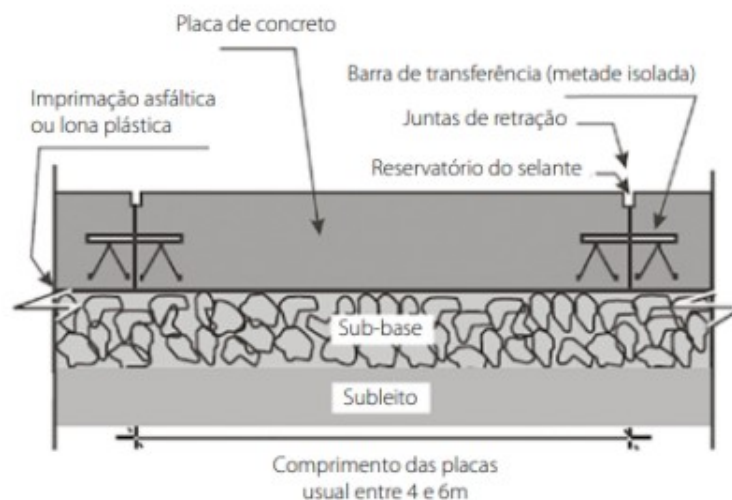
Figura 2: Pavimento asfáltico flexível



Fonte: BERNUCCI *et al.* (2008)

Diferente do pavimento flexível, no pavimento rígido o revestimento absorve quase todas as forças aplicadas sobre ele, por isso essa camada superior apresenta uma rigidez elevada, superior as camadas inferiores (DNIT, 2006). As camadas que compõem esse tipo de pavimento, conforme apresentado na figura 3, são o revestimento rígido, a sub-base, reforço do subleito e caso o subleito apresente baixa capacidade de suporte é preciso acrescentar uma camada de regularização de subleito. Em comparação com o pavimento flexível, essa estrutura aparenta uma maior simplicidade, pois nesse caso o revestimento rígido desempenha a mesma função da base, e apresenta menos divisão de camadas em sua concepção (DRESCH, 2018).

Figura 3: Pavimento rígido



Fonte: BERNUCCI *et al.* (2008)

O pavimento semi-rígido é um tipo de pavimento intermediário e caracteriza-se por apresentar uma camada de base solo cimento e o revestimento flexível. Esse pavimento geralmente é implementado em vias de tráfego pesado, no entanto, não são indicados em locais onde haja carga pontual (DRESCH, 2018; DNIT, 2006). Em comparação ao pavimento rígido, apresenta um custo menor e maior facilidade na execução.

A tabela 1 apresenta um comparativo entre as características dos três tipos de pavimentos estabelecidos pelo DNIT, pavimento flexível, rígido e semi-flexível (semi-rígido).

Tabela 1: Características dos pavimentos

	Pavimento rígido	Pavimento flexível	Pavimento semi-rígido
Material	<i>Concreto</i>	<i>Asfalto</i>	<i>Piso intetravado de concreto</i>
Tipo de Estrutura	Estruturas mais delgadas de pavimento	Estruturas mais espessas (requer maior escavação e movimento de terra) e camadas múltiplas.	Requer cuidados com a compactação do terreno. Espessura média do pavimento a partir de 4 cm (tráfego de pessoas) e 6 a 8 cm (para tráfego de veículos).
Resistência Química	Resiste a ataques químicos (óleos, graxas e combustíveis)	É fortemente afetado por produtos químicos	Resiste à ataques químicos
Manutenção	Pequena necessidade de manutenção e conservação, o que mantém o fluxo de veículos sem interrupções	Necessário que se façam várias manutenções e recuperações, com prejuízos ao tráfego e custos elevados	Manutenção baixa, sendo possível substituir peças
Segurança	Falta de aderência das demarcações viárias, devido ao baixo índice de porosidade. Necessário vassouramento para aumentar atrito	Melhor aderência das demarcações viárias, devido a textura rugosa e alta temperatura de aplicação. Maior possibilidade de a pista ficar escorregadia	Marcação viária feita com peças de outras cores, e, portanto não há necessidade de remarcações. Atrito alto com os pneus, aumentando a aderência.
Durabilidade	Vida útil mínima de 20 anos	Vida útil máxima de 10 anos (com manutenção)	Vida útil mínima de 15 anos
Custo Inicial	Elevado	Baixo	Intermediário
Tempo de execução	Mais demorado	Mais rápido	Não necessita de cura, e pode ser liberado no mesmo dia
Mão de obra	Mecanizada ou não	Uso de maquinário específico	Mecanizada ou não

Fonte: TETRACON (2019)

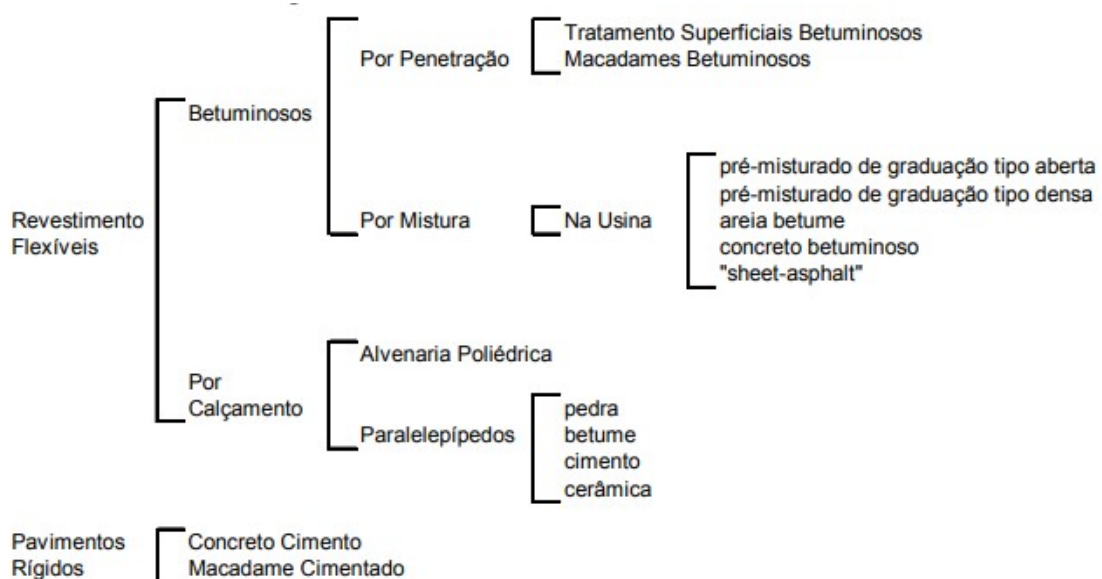
2.1.2 Revestimento

Para que as características ideais de cada pavimento se mantenham é preciso projetar uma estrutura que suporte aspectos como as variações climáticas e o volume de tráfego. Sabe-se que para a estrutura de um pavimento, rígido ou flexível, funcionar corretamente, suas camadas precisam estar adequadas para resistir aos esforços, sem que ocorram rupturas em seus materiais (DRESCH, 2018). Conhecer as propriedades dos materiais a serem empregados na construção do pavimento é fundamental para garantir a qualidade da via de transporte.

Um dos pontos importantes a serem analisados na construção dessa infraestrutura, são os tipos de revestimentos que são utilizados. O revestimento em todos os pavimentos é a camada que recebe diretamente a carga proveniente do tráfego, no caso dos flexíveis, o revestimento normalmente é impermeável. Alguns tipos de revestimento nesse caso são o concreto betuminoso/asfáltico usinado a quente. Os revestimentos com material betuminoso são divididos em mais camadas por razões técnicas, de custo e questões construtivas também. No caso dos revestimentos rígidos, o tipo mais usual é o concreto de cimento portland por ser mais rígido e, a espessura é fixa de acordo com a flexão das placas de concreto e da resistência que as camadas inferiores apresentarem. Nesse revestimento, também são indicados o uso de barras estruturais para melhorar a característica estrutural (DRESCH, 2018).

O fluxograma abaixo apresenta a divisão dos tipos de revestimentos, os flexíveis e os rígidos.

Figura 4: Fluxograma – Tipos de revestimentos



2.1.3 Impactos das vias de transporte

Apesar de análises estruturais dos pavimentos rodoviários, aspectos como os impactos que a construção das vias de transporte causa na sociedade e no ambiente também deveriam ser avaliadas.

De acordo com Reis (1975), as obras de pavimentação podem promover o desmatamento em áreas ao entorno da via, com isso, vê-se necessário estabelecer algumas medidas que evitem o avanço do desmatamento.

Como exemplo de impactos socioambientais, positivos e negativos, que a construção de rodovias pode causar no ambiente, Fearnside e Graça (2009) apontam alguns efeitos, descritos na tabela 2, que a pavimentação da BR – 319 poderia causar no Amazonas.

Tabela 2: Impactos da BR-319 no estado do Amazonas

Vantagens	Desvantagens
Fortalecimento das Unidades de conservação	Alteração da qualidade da água
Facilitação do escoamento da produção	Processos erosivos
Ampliação de alternativos rodoviários	Alteração nas propriedades do solo
Conhecimento da região	Perda ou redução de Habitat
Aumento da integração regional	Atropelamento da fauna silvestre
Maior proteção de habitats aquáticos	Desmatamento
Criação de expectativas na população	Ocupação desordenada nas áreas do entorno
Maior segurança viária	Incidência dos casos de doenças de veiculação hídrica

Fonte: FEARNSIDE e GRAÇA (2009); PAIVA e FERREIRA (2021)

Com esses impactos, é necessário apresentar medidas mitigatórias, que são medidas que tem como principal função reduzir os efeitos dos impactos, podendo ser preventivas ou corretivas. Em relação às vantagens e desvantagens da BR-319, Fearnside e Graça (2009) também apresentaram algumas atitudes para minimizar os impactos negativos.

Tabela 3: Indicação de medidas mitigatórias

Medidas mitigatórias
Restringir ao mínimo o desmatamento de vegetação ciliar
Implantar o Programa de Recuperação de Áreas Degradadas
Selecionar locais adequados para o material de descarte e áreas de empréstimos
Priorizar as vias de acesso existentes à faixa de servidão no traçado, evitando-se a abertura de novas
Estabelecer zonas ou áreas protegidas, considerando a qualidade dos ecossistemas através da ocupação faunística e diversidade que estes possuam
Recobrir imediatamente o solo através do plantio de gramíneas e espécies arbóreas e herbáceas, preferencialmente nativas
Implantar o Programa de Fauna e Bioindicadores
Estimular a regularização fundiária
Implantar placas sinalizadoras alertando sobre a travessia de fauna

Fonte: FEARNSIDE e GRAÇA (2009); PAIVA e FERREIRA (2021)

Outro fator que poderia ser uma medida para auxiliar a diminuição dos impactos, ou utilizar dessas vias de transporte para gerar impactos socioambientais positivos é a utilização das rodovias como geradoras de energia. É perceptível a existência de vários estudos e várias tecnologias que estão sendo avaliadas e implementadas que visam utilizar os pavimentos rodoviários em geradores de energia.

2.2 Energia Solar e Piezoelétrica

2.2.1 Energia Solar

Considerada uma energia limpa, renovável e sustentável, a energia solar é a energia produzida a partir dos raios solares, através de um sistema fotovoltaico responsável por fazer a conversão entre luz e energia. (INTELBRÁS, 2020).

Sobre a radiação solar, Philippi e Reis (2016) descrevem que o nível sobre um plano horizontal é variável de acordo com as estações do ano, isso se dá por causa da inclinação do eixo de rotação da Terra. Essas variações também ocorrem de formas diferentes em cada região, por mudanças de latitude e altitude. Conhecer o desempenho da radiação solar que atinge o local é relevante para poder realizar um melhor aproveitamento da energia solar.

Segundo Philippi e Reis (2016), ainda existem diversas limitações que devem ser superadas em relação ao rendimento, custos e armazenamento de energia dos sistemas baseados na utilização da energia solar, sistemas esses que possuem um enorme potencial

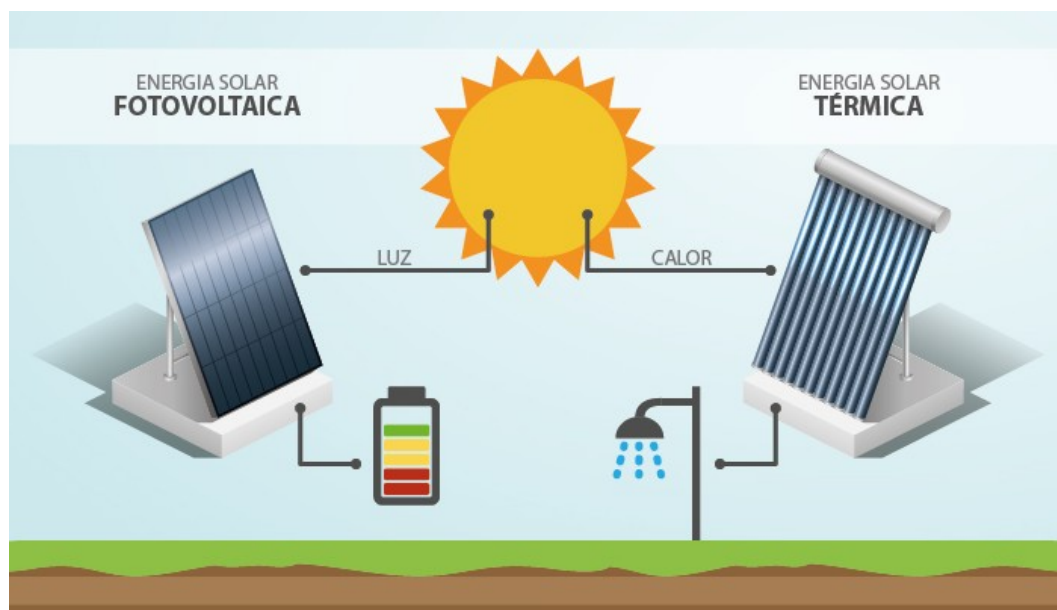
para atender as necessidades de energia de todo o planeta. É notório que os avanços tecnológicos buscam superar esses problemas, visto que a admissão de sistemas solares em massa beneficia o planeta.

O Brasil, principalmente o nordeste do país, apresenta um ótimo índice da radiação do sol. Com valores de 200 a 250 W/m, equivalente à 1752 a 2190 kWh/m² por ano, faz com que a região esteja entre os locais com maior potencial de energia solar do mundo (PHILIPPI e REIS, 2016).

As características de clima, geografia e a facilidade de achar terrenos que possam ser instalados os captores da energia fotovoltaica são fatores que beneficiam o Brasil e auxiliam no despertar de interesse nesse tipo de energia (VIAN et al., 2021).

Utilizando várias tecnologias, a radiação solar pode ser transformada em energia útil para o ser humano. Como ilustrado na figura 5, algumas dessas tecnologias são os coletores solares de aquecimento de ambiente e de água, e células fotovoltaicas que convertem a radiação em eletricidade (PHILIPPI e REIS, 2016).

Figura 5: Energia Solar



Fonte: OCA SOLAR ENGENHARIA (2016)

Em relação à transformação de energia solar em energia elétrica o processo de captação e de armazenamento da energia precisam se adequar a tecnologia utilizada. A tecnologia fotovoltaica, mais comum, transforma diretamente a radiação solar em energia elétrica, e também existem tecnologias que utilizam do calor gerado pela energia térmica do sol, chamados de sistemas termossolares (PHILIPPI e REIS, 2016).

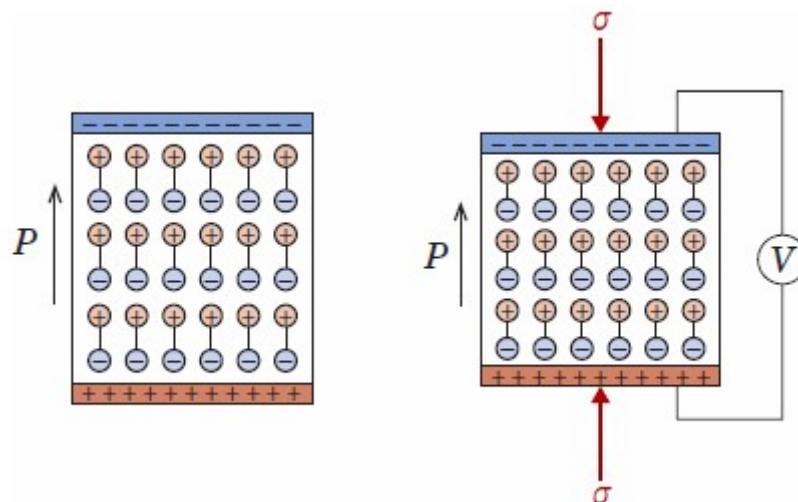
A tecnologia fotovoltaica funciona como coletora, absorvendo a radiação do sol e transformando em eletricidade através do efeito fotovoltaico, que ocorre quando certos materiais em exposição à luz solar, gera eletricidade. Cada módulo dessa tecnologia é composto por células fotovoltaicas que são fabricadas com materiais semicondutores. Para que ocorra o efeito fotovoltaico, são adicionados componentes químicos (fósforo, boro) nos materiais semicondutores. A maioria das células que são comercializadas no mundo é fabricada principalmente com silício monocristalino, policristalino e amorfo (SANTOS, 2013).

A análise da composição das placas fotovoltaicas é importante para verificação e estudo de materiais mais resistentes que não interfiram na eficácia da geração de energia.

2.2.2 Energia Piezoelétrica

A Piezoelectricidade é a eletricidade obtida através da pressão mecânica, mas apenas alguns materiais apresentam a capacidade de gerar esse tipo de energia. Dentre os materiais estão os titanatos de bário e chumbo (BaTiO_3 e PbTiO_3), o niobato de potássio (KNb_3), o zirconato de chumbo (PbZrO_3) e o zirconato-titanato de chumbo (PZT). A propriedade piezoelétrica é um aspecto de elementos com estruturas cristalinas não simétricas e complexas. A deformação que ocorre, devido à uma força externa aplicada no material, resulta na indução da polarização elétrica no cristal piezoelétrico (CALLISTER, 2020). Gaiotto (2012) esclarece que essa polarização acontece por causa do deslocamento do centro de cargas negativas, como mostra a figura 6.

Figura 6: Dipolos e tensão gerada em um material piezoelétrico



Fonte: CALLISTER (2020)

De acordo com Farias (2013), a organização de alguns materiais apresenta o centro de simetria com as cargas elétricas positivas posicionado de forma aleatória com o centro de simetria das cargas negativas, e essa estrutura faz com que haja um dipolo elétrico. Quando esse material é deformado, em presença de um campo elétrico, ocorre a geração de corrente elétrica.

Segundo Callister (2020), os materiais piezoelétricos podem ser usados como conversores de energia mecânica para energia elétrica. Atualmente a utilização de dispositivos piezoelétricos teve um aumento considerável devido ao aumento do consumo de tecnologia e automação.

O PZT (Titanato Zircônio de Chumbo), cerâmica piezoelétrica, é um dos principais materiais que vem sendo estudados e utilizados por pesquisadores em função da coleta de energia em pavimentos. Apesar das piezocerâmicas serem consideradas materiais que apresentam alta conversão elétrica, são também materiais com rigidez alta, podendo se tornar frágil e propenso à fadiga (XIONG *et al.*, 2014; WANG *et al.*, 2018)

Outro material piezoelétrico é o PVDF (fluoreto de polivinidileno), que possui vantagens como maior flexibilidade e resistência à deformabilidade e ao carregamento. Em comparação ao PZT, esse material é um pouco menos rígido e apresenta uma vida de fadiga maior. (LEE *et al.*, 2005; HELLER, 2019)

Quando adicionadas em estradas, os transdutores piezoelétricos podem ser aplicados nos pavimentos para que convertam a energia mecânica, resultante das deformações e as vibrações que o tráfego de veículos causa na via, em energia elétrica. (HELLER, 2019)

2.3 Pavimentos geradores de energia

2.3.1 Estrada Solar

De acordo com Northmore e Tighe (2012) projetos com soluções sustentáveis são necessários devido ao uso dos recursos naturais em excesso. Um exemplo de solução que pode beneficiar a sociedade são os projetos com a utilização de painéis solares.

O excesso de raios solares que incidem nas rodovias de todo o planeta pode ser transformado em energia útil com métodos de conversão de energia solar para energia elétrica, como a tecnologia fotovoltaica. (LEE *et al.*, 2014).

Em 2010, pesquisadores do Korea Institute avaliaram a viabilidade de captar energia solar através de pavimentos rodoviários utilizando células fotovoltaicas introduzidas no pavimento. As células que estavam sendo utilizadas na pesquisa, de película fina, não

suportaram as cargas mecânicas e as condições ambientais. Desde então, diversos pesquisadores desenvolvem células fotovoltaicas que sejam capazes de atender as condições técnicas para implementação em estradas. (KANG-WON, 2010)

O objetivo da criação das estradas solares é substituir os pavimentos convencionais de asfaltos por painéis solares para converter a luz solar em energia elétrica, visando economia e sustentabilidade, pois se utiliza de fonte de energia limpa e renovável.

O pavimento solar vem sendo desenvolvido e instalado por várias empresas e em várias localidades. Em 2009 a Solar Roadways recebeu um investimento de Pesquisa Inovadora para Pequenas Empresas dos EUA para apresentar a viabilidade de criar um protótipo de um pavimento solar (SOLAR ROADWAYS, s.d.). No entanto, em 2014 a Holanda implementou a primeira estrada solar no mundo real, a Sola Road, e logo após esse lançamento novos projetos pilotos foram sendo testados em larga escala.

2.3.1.1 Pavimentos com tecnologia fotovoltaica

2.3.1.1.1 Solar Roadways

A Solar Roadways é uma empresa que tem como objetivo gerar energia sustentável em estradas, estacionamentos, calçadas, praças, ciclovias e outros similares. O propósito do projeto é integralizar uma infraestrutura moderna com uma rede elétrica inteligente. (SOLAR ROADWAYS, s.d.)

Os protótipos que foram testados e fabricados pela Solar Roadways para serem utilizados em pavimentos precisaram atender sete requisitos principais:

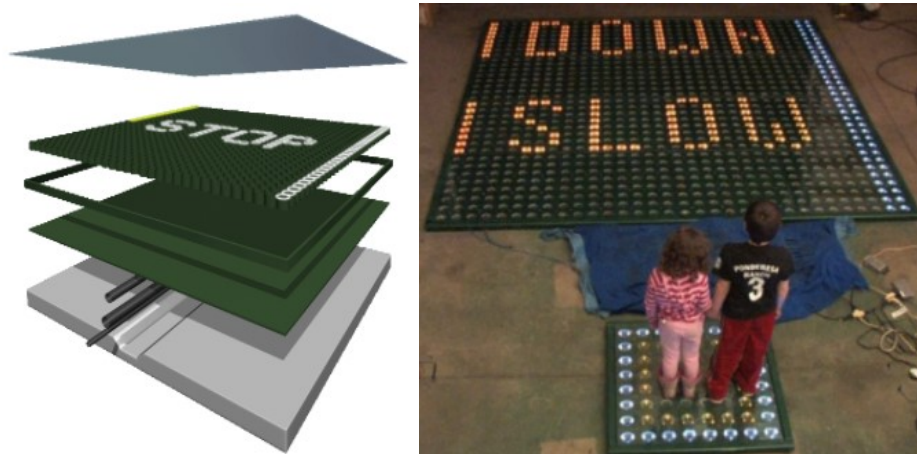
- capacidade de geração de energia através da incidência solar, pela luz do sol ou o calor emitido, ou mesmo a vibração do veículo.
- facilidade em armazenar, distribuir e transferir a energia de forma efetiva
- utilizar materiais recicláveis e sustentáveis em sua composição
- design que favoreça a manutenção
- resistência as cargas do tráfego de veículos e boa durabilidade.
- reter a água escoada no pavimento
- economicamente viável durante a vida útil.

O projeto foi dividido em três fases. Na primeira etapa a Solar Roadways construiu um protótipo de painel solar com área de 13,38 m², nomeado SR1. Pensando na capacidade de suportar cargas muito altas de veículos pesados que pudessem passar pelos painéis foi preciso construir uma caixa para proteger as células fotovoltaicas e os componentes eletrônicos que

seriam responsáveis pela geração da energia solar. Como o material da caixa precisava ser de um material transparente para permitir a captação da luz do sol, institutos como Instituto de pesquisa de materiais da Penn State e o Instituto de pesquisa da Universidade de Dayton recomendaram a utilização de vidro, por apresentar melhores propriedades ópticas contra a solarização quando comparado ao plástico, e preferencialmente o vidro float por causa do custo e a disponibilidade comercial. O SR1 apresenta também, além das células fotovoltaicas, circuitos de LED e microprocessador com o intuito de simular sinalizações da estrada. (BRUSAW *et al.*, 2020)

O protótipo, conforme figuras 7 e 8, foi desenvolvido e construído mas não exposto à testes comuns da engenharia. Apesar do material do pavimento ser transparente para a captação da luz solar, é necessário também que apresente aderência que evite deslizamento dos veículos na superfície, principalmente quando molhada. (BRUSAW *et al.*, 2020)

Figura 7 e 8: Protótipo I Solar Roadways

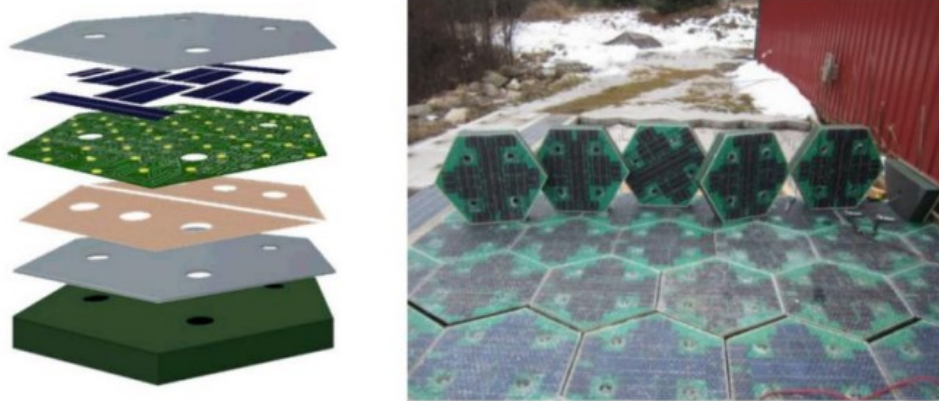


Fonte: BRUSAW *et al.* (2020)

Na segunda fase do projeto, a Solar Roadways avaliou o SR1 como sendo inviável devido ao tamanho e seu formato quadrado que não seria capaz de ser instalado em uma curva. Um novo protótipo foi desenvolvido e definido como SR2, representado na figura 9, apresentando área de aproximadamente 1,25 m², peso de 49,90 kg e a forma em hexágono, novo modelo que facilita o transporte e instalações em colinas e caminhos curvos. Outra alteração também foi o material invólucro do painel, agora em vidro aquecido, material utilizado também em vidros traseiros de carros. A Solar Roadways realizou testes de cargas no SR2, utilizando o método de elementos finitos, que mostraram resultados favoráveis para o protótipo, suportando uma carga estática de 113.398 kg. Testes de tração do vidro, pelo

método British Pendulum, apresentando a superfície desse protótipo permitia a parada de um veículo trafegando a 64,37 km/h, infelizmente um valor que não se adéqua para uso em rodovia. (BRUSAW *et al.*, 2020)

Figura 9: Protótipo II – segunda fase Solar Roadways



Fonte: BRUSAW *et al.* (2020)

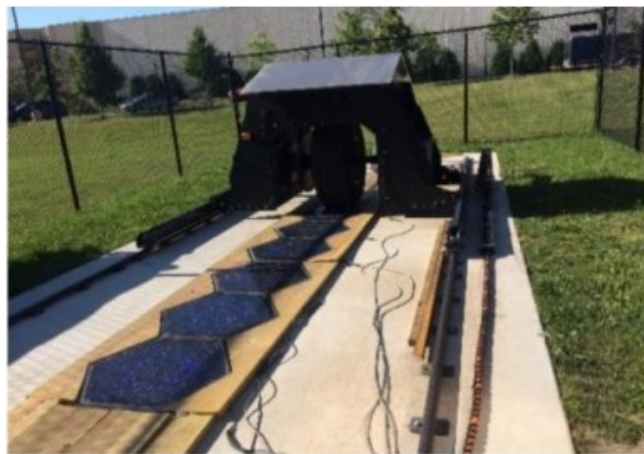
Em relação à captação de energia, Brusaw *et al.* (2020) apresenta dados de coleta em painéis solares disponíveis no mercado posicionados no plano, diferente do que é recomendado, para acompanhar a pavimentação e analisar a viabilidade da geração de energia nesse projeto. Quatro painéis do SR2 podem produzir 52.397 kWh de energia solar a cada seis meses e, considerando que uma via de 3,70 m de largura e 1,61 km de extensão (12 pés x 1 milha) acomoda aproximadamente 15.840 painéis, a energia produzida estimada é de 414.984 MWh por ano por milha de pista. O protótipo SR2 é composto por células fotovoltaicas que contemplam apenas 69% da área da placa, e para o protótipo SR3 que ainda está em desenvolvimento, esse valor será modificado para quase 100% pensando no aumento da geração de energia.

O protótipo de pavimento solar da Solar Roadways passou por diversos tipos de testes. Para avaliar sua funcionalidade mecânica e operacional em diversas condições ambientais foram realizados testes de umidade. Esse teste mede primeiramente a água que foi absorvida pelo material polimérico das placas, e conseqüentemente as alterações ou degradações sofridas nos componentes elétricos. O nível de umidade afeta o teor de água do polímero e a condutividade elétrica, resistência mecânica, dimensão e aparência física. Após sete dias de teste de condicionamento de umidade, um dos painéis apresentou um ganho de peso de 9,07 g, no entanto manteve-se a geração de energia esperada em cada painel. (BRUSAW *et al.*, 2020)

Teste de extremo de temperatura também foi realizado no protótipo, consistindo em 10 ciclos de congelamento/descongelamento dos painéis solares. Finalizando os ciclos, as placas não apresentaram ganho de peso além do mensurado no teste de umidade, e nenhum defeito ou dano foi observado.

Segundo Brusaw *et al.* (2020), para a avaliação das propriedades elétricas e mecânicas em condições reais de tráfego, o projeto da Solar Roadways foi exposto à simulação de veículos pesados, como mostra a figura 10, pois devido à carga alta de veículos e a repetição dessa carga, pode ser que ocorram falhas no material do pavimento, como fissuras e depressões que ocorrem nos pavimentos asfálticos. Esse teste avaliou o desempenho do pavimento solar em condições de veículos com baixa velocidade e com cargas altas trafegando repetidas vezes. A carga que os painéis foram submetidos foi de 42,22 kN em uma velocidade de 0,57 m/s. A duração foi de quase três meses, concluindo em nenhum dano físico identificado nos protótipos SR. O vidro temperado rígido e o polímero laminado que compõem o protótipo não apresentaram deformações ou quaisquer outros tipos de danos.

Figura 10: Simulação de carga alta de veículos



Fonte: BRUSAW *et al* (2020).

Um último teste realizado pela Solar Roadways e apresentado por Brusaw *et al.* (2020) foi o teste de cisalhamento. Inicialmente realizando o teste preliminar, usou-se uma amostra dos materiais do protótipo do SR, apontando resultados que revelaram que seriam necessários aproximadamente $5,8 \times 10^3$ kN para o teste de cisalhamento plano de um pavimento solar de tamanho normal. Um dispositivo de aço para o teste de cisalhamento rotacional foi projetado para os painéis hexagonais, conforme Figura 11. O menor valor de tensão de cisalhamento encontrado no teste foi de 1643 kPa.

Figura 11: Teste de cisalhamento



Fonte: BRUSAW *et al.* (2020).

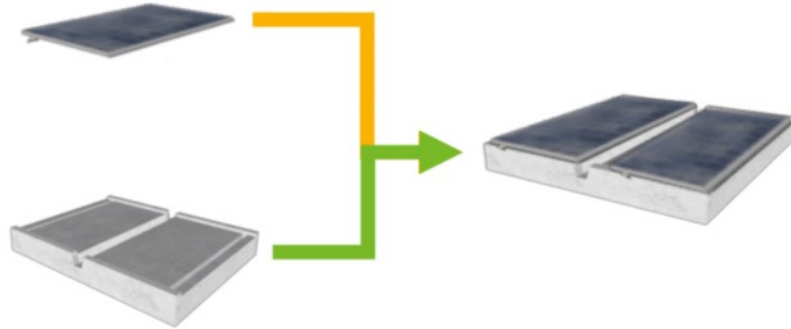
Devido à inovação que é o projeto desenvolvido pela Solar Roadways, utilizando de materiais não convencionais, não há comparação direta com o concreto, asfalto ou demais materiais que podem ser feitos em relação à pavimentação. Mas, avaliando os resultados dos testes apresentados, os protótipos SR atuais são resilientes, adequados e robustos quando sujeitos as condições reais de utilização. (BRUSAW *et al.*, 2020)

2.3.1.1.2 TNO – SolaRoad

SolaRoad é um projeto fruto da parceria entre a Organização Holandesa de Pesquisa Científica Aplicada (TNO) e Imtech, empresa de tecnologia. Essa inovação desenvolve elementos voltados para a pavimentação de rodovias com a implementação de painéis solares, sendo responsáveis por produzir energia elétrica e com uma estrutura forte o suficiente para lidar com o intenso tráfego.

Os painéis possuem revestimento translúcido e antiderrapante, montados em laje de concreto que permite melhor suporte e capacidade de carga, detalhamento apresentado na Figura 12. Os componentes do pavimento solar geram energia elétrica através da captação da luz do sol e o revestimento garante segurança para as células fotovoltaicas e apresenta para os veículos resistência à derrapagem.

Figura 12: Estrutura SolaRoad



Fonte: SOLAROAD (s.d)

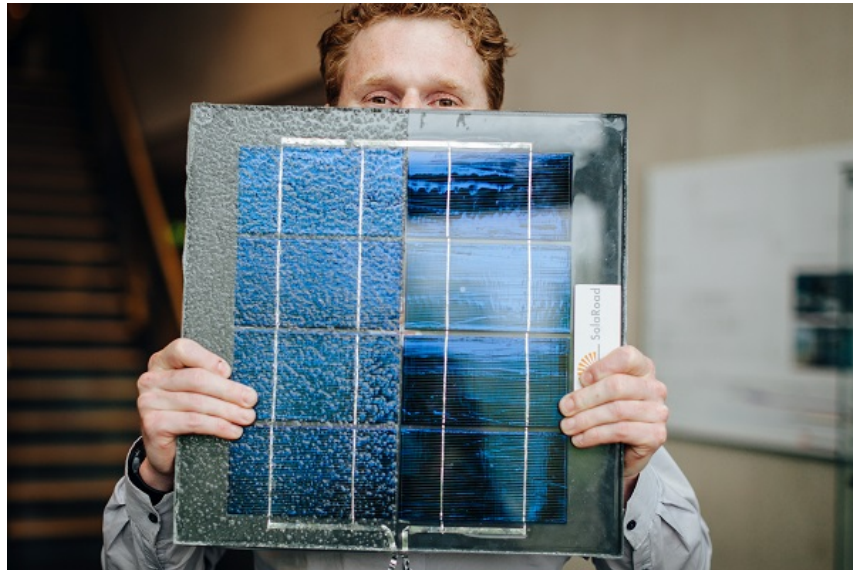
Em 2014 instalaram o primeiro protótipo do projeto em Krommenie, cidade na Holanda. O teste foi realizado em uma estrada de 100 m com as placas do SolaRoad e apresentaram resultados superiores aos que haviam sido estimados. No primeiro ano foram gerados 9.800 kWh de energia, valor necessário para fornecer energia elétrica para cerca de três casas.

Durante o tempo de duração do projeto piloto em Krommenie, foram aplicadas e testadas várias versões de superfície para a estrada solar. Realizaram experimentos com composições que poderiam ser incorporadas à camada superior, diferentes designs para os painéis e diversos tipos de tecnologias fotovoltaicas, resultando em três versões finais testadas. (SOLAROAD, s.d.)

Em 2016 ampliaram em cerca de 20 metros o trecho experimental da SolaRoad no local, consistindo em aprimoramento de tecnologia e alteração de novos elementos. O vidro que compunha os painéis foi alterado para plásticos e alguns modelos foram equipados com células fotovoltaicas de filme fino, Figura 13. (SOLAROAD, s.d.)

Os resultados obtidos no piloto da SolaRoad deram confiança para a instalação de mais projetos e testes de estradas solares, valorizando o uso de energia sustentável e a geração através de modos não convencionais. (SOLAROAD, s.d.)

Figura 13: Protótipo SolaRoad



Fonte: SOLAROAD (s.d.)

Desde 2017 mais projetos pilotos estão sendo instalados e acompanhados em diversos locais na Holanda e também na França. E os principais objetivos de desenvolvimento desse produto é que ele tenha uma durabilidade comparada à de uma estrada com pavimentação convencional, produção de energia à 130 kWh/m^2 por ano (75% de eficiência de uma placa solar instalada em telhado), fácil instalação e um custo benefício que seja equivalente as estradas comuns.

Figura 14: Montagem SolaRoad



Fonte: SOLAROAD (s.d.)

Figura 15: Pavimento com placas SolaRoad



Fonte: SOLAROAD (s.d.)

Segundo Boss (2021), a SolaRoad em colaboração com Strukton Civiel, implementaram um projeto piloto em Maartensdijk, uma vila em Utrecht, Holanda. Esse projeto é considerado a ciclovia solar mais longa do mundo, contemplando 330 metros de comprimento.

Os painéis que foram instalados na ciclovia solar, retratados na Figura 16, apresentam uma estrutura com cinco componentes: concreto, células solares, vidro, resina epóxi e granulado de vidro. (Jansen, 2021) Em sua composição estão as placas de concreto pré-fabricadas com medidas de 2,8 m x 3,5 m, apresentando um revestimento com plástico translúcido com espessura de 0,5 cm, que, segundo Jansen (2021) é a resina epóxi lixada, resistente à sujeira e garante propriedades antiderrapantes. Abaixo dessa camada encontram-se as células fotovoltaicas, entre placas de vidros para a proteção contra perturbações mecânicas e variações climáticas. (BOSS, 2021)

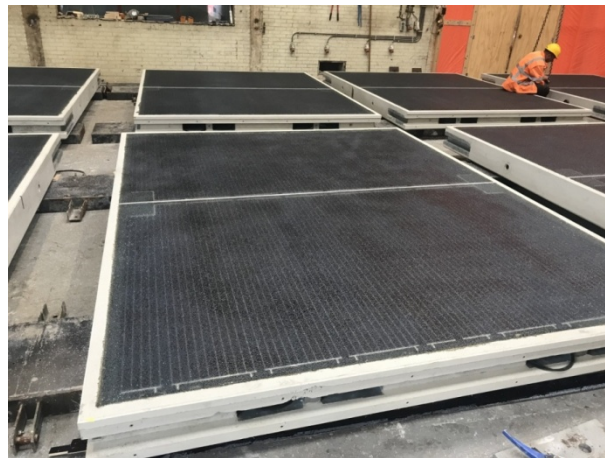
Boss (2021) informa que a energia solar gerada na ciclovia, após transformada em energia elétrica, é destinada à rede elétrica de Maartensdijk, e também pode ser destinada à iluminação pública.

Kuypers (2021) relata que esses testes que estão sendo realizados na ciclovia solar são destinados para avaliar rendimentos para apresentar soluções de melhoria, e analisar casos de manutenção durante sete anos.

De acordo com Sinke (2019), no sul da Holanda os pavimentos de painéis solares estão sendo instalados no parque empresarial Halfweg-Molenwatering, por onde trafegam ônibus. Na Holanda do Norte a instalação está sendo feita em uma estrada com tráfego de caminhões. Em ambas as localidades o objetivo principal da implementação das estradas solares é avaliar a gestão e manutenção dessa inovação. Os projetos serão monitorados por três anos, e serão analisados também a diferença entre eles na questão do rendimento de energia e em relação ao tráfego com cargas diferentes.

As pesquisas estão sendo feitas de maneira constantes utilizando sensores que estão localizados na superfície e arredores das estradas. Há também estações meteorológicas nos locais para avaliar a influência das mudanças climáticas. Caso o projeto atenda às expectativas, serão feitas avaliações de partes das estradas que poderão ser instaladas a SolaRoad e também apresentar em quais momentos os pavimentos solares superam os convencionais em relação à custos e receitas. (SINKE, 2019)

Figura 16: Pavimento SolaRoad



Fonte: SOLAROAD (s.d.)

2.3.1.1.3 Wattway em Tourouvre, França:

Em 2016, em Tourouvre França foi inaugurada a primeira estrada solar do mundo, apresentada na Figura 17. A estrada foi construída com painéis solares, denominados Wattway, desenvolvidos pela empresa Colas em colaboração com o INES, para fornecer energia destinada à iluminação pública da cidade. (HIGA, 2017)

O tráfego estimado no local era de mais de 2000 motoristas por dia, auxiliando na verificação da resistência das placas. Os painéis solares, que compõem o trecho de um

quilômetro, são revestidos de resina e folhas finas de silício, possibilitando, na teoria, a passagem de caminhões com peso de 3500 kg. (HIGA, 2017)

Figura 17: Estrada de painéis solares em Touruvre, França

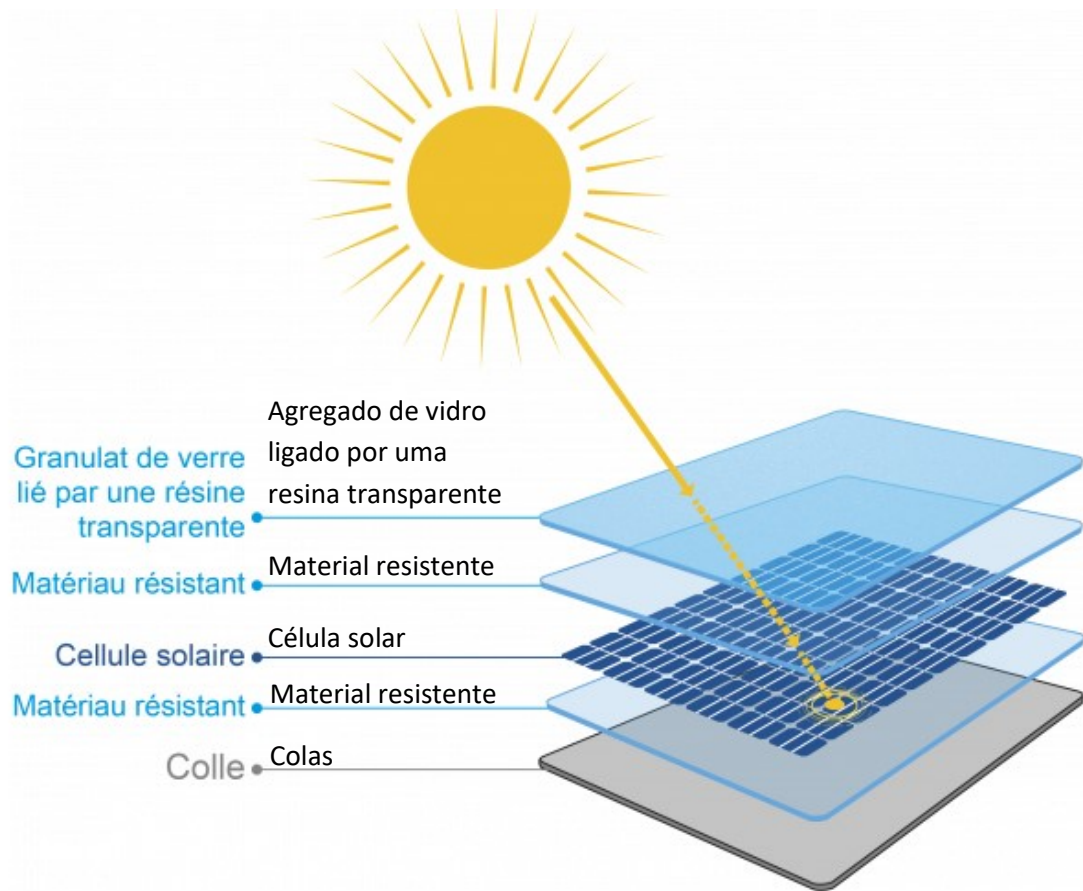


Fonte: WELLE (2016)

Segundo Arnauld De Sainte Maria em 2021, diretor comercial da Wattway, uma das maiores vantagens do desenvolvimento dos painéis solares é não exigir a destruição das estradas já existentes, visto que a inovação da Wattway é composta por lajes finas que precisam apenas ser inseridas em uma estrada, desde que esteja em bom estado físico. (WATTWAY, s.d.)

A Wattway, conforme mostra a Figura 18, é composta por convencionais células fotovoltaicas que são as responsáveis por converter a energia do sol em energia elétrica. Devido à fragilidade desses componentes, são revestidos por multicamadas constituídas de polímeros e resinas que suportam o tráfego no local, e permitem a passagem de luz necessária para captar a luz do sol. A Wattway também passa por um tratamento da superfície para gerar a aderência necessária de contato entre painéis solares e pneus dos veículos. (WATTWAY, s.d.)

Figura 18: Estrutural pavimento solar Wattway



Fonte: WATTWAY (s.d.)

A fase de projetos pilotos da Wattway, implantada em cerca de quarenta locais, incluindo cidades da França e outros locais no exterior, permitiu com que os painéis fossem expostos a diversos tipos de variações climáticas e de tráfego, e demonstrou a capacidade de produção de energia para possíveis modificações e melhorias. (WATTWAY, s.d.)

Desde o primeiro lançamento do projeto Wattway em 2015, as placas evoluíram significativamente devido aos feedbacks que foram coletados. As atualizações do projeto permitiram um aumento de desempenho energético de 21% por metro quadrado, uma maior durabilidade das placas graças à mudança da resina utilizada, redução de fiação e otimização dos equipamentos elétricos necessários. (WATTWAY, s.d.)

A Figura 19 apresenta algumas vantagens do Pack Wattway.

Figura 19: Vantagens do Wattway Pack

CHAVES NA MÃO
Tudo incluído, configuração rápida e fácil



VERSÁTIL
Aplicável em todos os pisos



PERCORRÍVEL
Suporta qualquer tipo de tráfego



AUTÔNOMO
Fonte solar ilimitada, a energia é armazenada por uma bateria



REMOVÍVEL
Versão pré-montada em microestrutura . Em desenvolvimento

OPTION



RESISTENTE
À prova de vento, à prova d'água



VERDE
Energia renovável



EXCELENTE INTEGRAÇÃO
Integra-se bem em todos os contextos arquitetônicos e paisagísticos



MODULAR E EXPANSÍVEL



SEGURO
À prova de vandalismo e à prova de roubo



Fonte: WATTWAY (s.d.)

Figura 20: Ciclovía com pavimentos Wattway em Grave, Holanda



Fonte: WATTWAY (s.d.)

2.3.1.1.4 Rodovia solar: China

Em um artigo publicado na NY Times, Bradsher (2018) anuncia a China como produtora de cerca de 75% dos painéis solares que são vendidos no mundo. O experimento de pavimentação geradora de energia solar é uma das mais recentes inovações e demonstra a vontade do país em dominar esse mercado que está cada vez mais lucrativo.

A geração de energia elétrica através de rodovias, ciclovias, ruas e calçadas apresentam um conceito melhor ao invés da implantação de estruturas com painéis solares em campos e montanhas, preservando as terras. Um projeto nesse quesito é de grande importância para a China, principalmente por ser um país populoso onde a demanda por energia está sempre aumentando. (BRADSHER, 2018)

Segundo Bradsher (2018), a eletricidade produzida por pavimentos solares pode ser destinada para locais próximos de onde está sendo gerada a energia, visto que as estradas contornam e percorrem as cidades, considerando que a perda de energia na transmissão seja baixa ou quase nula, como aconteceria se a utilização da eletricidade fosse a locais afastados. Como as estradas são necessárias e já existentes a implantação dessa inovação não geraria custos de compras de terrenos.

Painéis solares duráveis podem diminuir o custo de manutenção das estradas convencionais, pois elas precisam ser recapeadas em poucos anos. As tiras de aquecimento elétrico que compõem as placas podem ser capazes de derreter a neve que cai e fica acumulada na pista e diodos que emitem luz, embutidos na superfície do pavimento solar, podem servir como iluminação de sinalização. (BRADSHER, 2018)

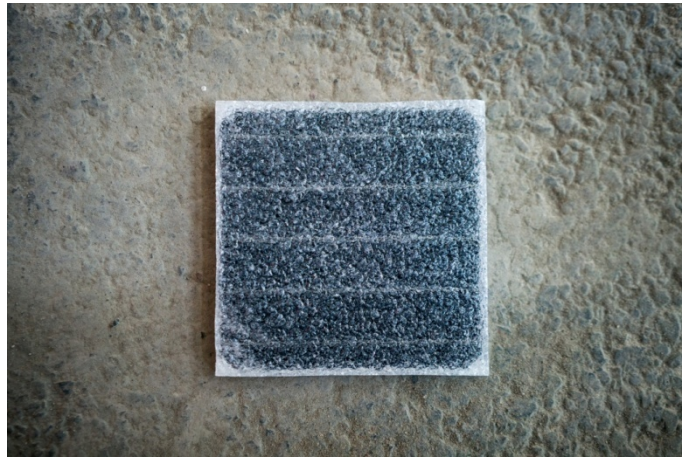
Devido à queda de preço dos painéis solares, muito graças ao aumento da produção na China, as estradas solares estão se tornando cada vez mais viáveis. Um futuro projeto inovador em vista no país é projetar estradas solar capaz de recarregar os carros elétricos que trafegam por elas sem a utilização de fios.

De acordo com Bradsher (2018), existem duas empresas na China que estão sendo responsáveis pelo desenvolvimento e implementação das estradas solares, a Pavenergy e a Qilu Transportation, que trabalham juntos em Jinan.

No final de 2017 foi inaugurada em Jinan uma rodovia que gera eletricidade a partir do sol com extensão de pouco mais de 1 km. Huang (2017) informa que o trecho é composto por camadas de concreto transparente na parte superior, permitindo a captação da luz solar, painéis solares que ficam no meio e uma camada de isolamento na parte inferior do pavimento para evitar que a umidade chegue aos dispositivos fotovoltaicos da camada acima.

A camada superior dos painéis é feita de um polímero que se assimila ao plástico, e apresenta um pouco mais de atrito do que uma estrada de asfalto convencional, conforme Figuras 21 e 22. Zhang Hongchao, o especialista em engenharia de transporte da Universidade de Tongji que auxiliou no desenvolvimento do pavimento solar juntamente com a Pavenergy, explicou que o atrito da superfície pode ser ajustado durante a fabricação caso seja necessário, visando à aderência semelhante à do pneu no asfalto. (BRADSHER, 2018)

Figura 21: Superfície do painel solar da estrada na China



Fonte: BRADSHER (2018)

Figura 22: Silício azul, componente gerador de eletricidade dos painéis solares



Fonte: BRADSHER (2018)

Figura 23: Instalação dos dispositivos fotovoltaicos em Jinan, China.



Fonte: CHINADAILY.COM.CN, (2017)

A camada superior dos painéis solares possui espaço interno que acomodam fios de recarga e sensores, estes que monitoram o fluxo e carga do tráfego e a temperatura também. Essas placas foram instaladas em duas pistas e a área total da estrada solar é de 5.875 m².

Figura 24: Pista com painéis solares.

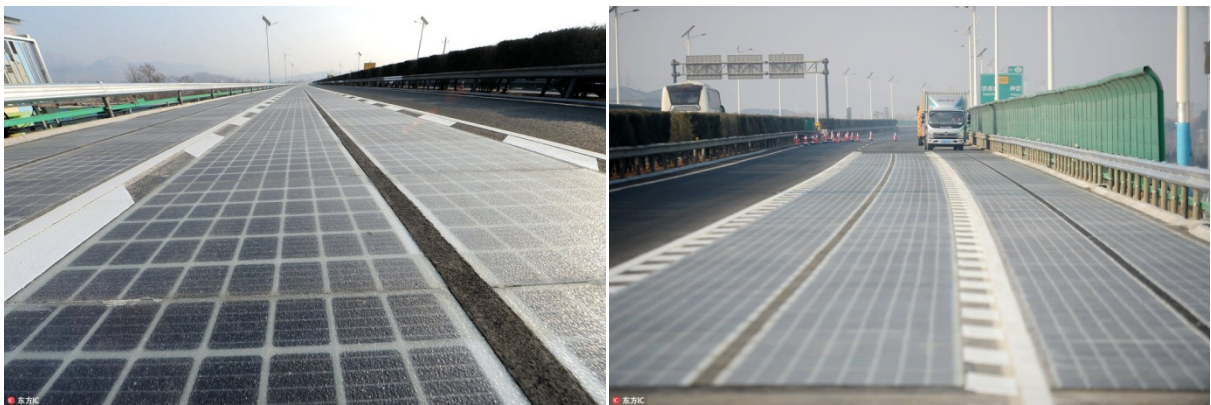


Fonte: BLOOMBERG NEWS (2018)

Conforme relatado por Ventura (2017), em entrevista à mídia chinesa, Zhang Hongchao disse que a via é capaz de suportar uma pressão de 10 vezes mais do que uma estrada convencional de asfalto. Pelegi (2018) diz que a estimativa é de que em um ano ela poderia gerar um milhão de kWh, energia que estava programada para ser utilizada na iluminação pública e também destinada ao sistema de derretimento de neve e postos de cargas de carros elétricos.

As Figuras 24, 25 e 26 retratam a rodovia solar instalada na China.

Figuras 25 e 26: Rodovia solar no leste da China



Fonte: PEOPLE'S DAILY, CHINA (2017)

Conforme Bradsher (2018) os painéis são menos eficientes na captação da luz do sol quando instalados nas estradas do que quando instalados nos telhados, pois eles ficam planos e geralmente estão cobertos pelos veículos que trafegam pela via, produzindo apenas 50% do que produz as placas na angulação recomendada.

Os pavimentos fotovoltaicos também possuem um alto custo em comparação ao asfalto, mas possuem uma vida útil estimada de 15 anos. Com uma produção em massa as empresas responsáveis por esse projeto inovador pretendem diminuir o custo operacional das estradas solares. (BRADSHER, 2018)

Além da novidade que é a estrada geradora de energia, a Qilu Transportation pretende fazer com que as estradas recarreguem os carros elétricos ainda em movimento. O desenvolvimento acontece para auxiliar o país a atingir o título de potência industrial. No entanto, a estrada de teste ainda é composta por um trecho curto não sendo capaz de fornecer a recarga dos veículos no modo sem fio. (BUSINESS STANDARD, 2018)

2.3.1.1.5 Onyx Solar

A empresa espanhola Onyx Solar, especializada em pesquisa e desenvolvimento de construção com energia solar, em colaboração com a Universidade George Washington instalaram o primeiro piso fotovoltaico do mundo, ilustrado na Figura 27. Esse projeto, que está localizado no Campus de Ciência e tecnologia no estado da Virgínia (EAU), é um sistema que integra células fotovoltaicas responsáveis pela geração da energia, implementado como pavimento em vias de passagem de pedestres.

Dentre os componentes que formam a estrutura do piso encontram-se as telhas semitransparentes que além de converter a energia do sol em energia elétrica por meio de semicondutores, são antiderrapantes, pensando na segurança dos que passam pelo local, e conforme testes de cargas momentâneas realizados, suportam 400 kg.

Figura 27: Piso fotovoltaico Onyx Solar



Fonte: ONYX SOLAR (s.d.)

O piso fotovoltaico possui uma área total de 10 m² e, estudos estipulam dados de eficiência para 35 anos, como a geração de energia de 22.659 kWh que evita a emissão de 15 toneladas de CO₂.

Foram instaladas 27 placas do pavimento solar no trecho da via, conforme Figura 28, produzindo um total de 405 Wp, valor esse que é o suficiente para alimentar 450 luzes de LED que são aplicadas na iluminação do local.

Figura 28: Calçada de energia solar na Universidade George Washington



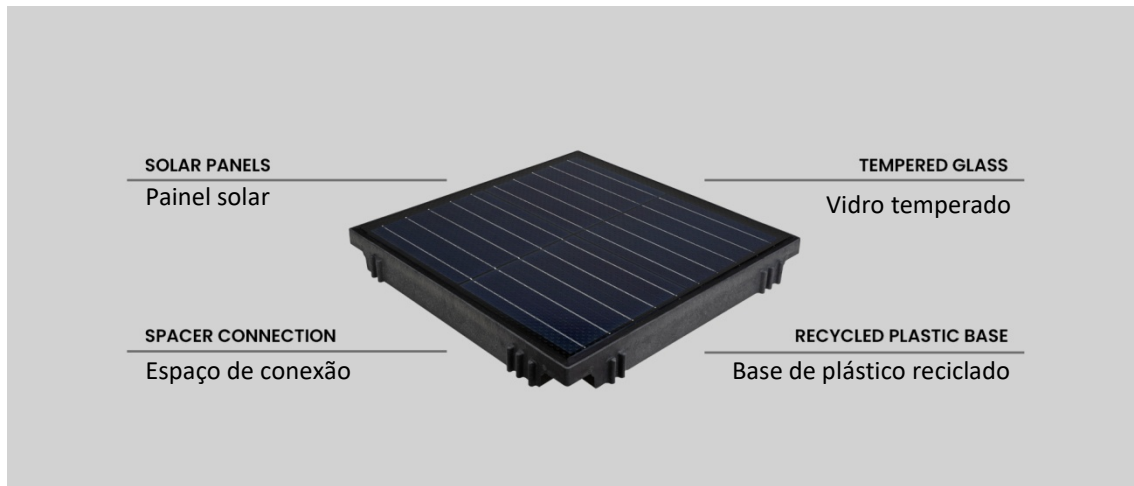
Fonte: ROSA (2013)

2.3.1.1.6 Platio Solar: Piso solar

Uma Startup de desenvolvimento de pisos solares desenvolveu a Platio Pavimento Solar que é um material utilizado em construções sustentáveis. O pavimento, como apresentado na Figura 29, é composto por células fotovoltaicas com desempenho alto que captam a luz do sol que atinge à superfície do piso. Essas células são protegidas por placas de vidro com características antiderrapantes e bem resistentes. Sua capacidade de carga é o suficiente para ser instalada em locais de fluxo de pessoas. (PLATIO SOLAR, s.d.)

Os materiais utilizados na estrutura do projeto são resíduos plásticos reciclados, gerando uma estrutura durável. Produto desenvolvido para que no final do ciclo de vida útil possa ser reciclado em 95%.

Figura 29: Estrutura do piso Platío Solar



Fonte: PLATIO SOLAR (s.d.)

A vantagem da utilização desse material é as propriedades físicas que apresenta, aumentando a durabilidade e a vida útil do piso solar. Esse material pode durar mais do que um concreto de alto desempenho que possui a vida útil de 50 anos, pois absorve menos água e possui resistência à compressão e à tração muito superior.

A aplicação desse projeto é recomendada principalmente para áreas que não podem ser instalados as placas fotovoltaicas convencionais, como por exemplo, locais propensos à tornados, infraestrutura portuária e pisos para “cidades inteligentes”.

A Figura 30 apresenta o piso instalado na cidade de Barcelona, na Espanha.

Figura 30: 56 m² de pavimento solar Platío no parque Glories em Barcelona, Espanha



Fonte: PLATIO SOLAR (s.d.)

2.3.2 Pavimentos com energia piezoelétrica

A energia mecânica no pavimento asfáltico das rodovias é resultado das cargas dos veículos. A carga que um veículo possui e o tráfego dele pela via podem estimar a quantidade de energia que é gerada. (ZHAO *et al.*, 2014)

Para uma escolha mais precisa do transdutor piezoelétrico a ser utilizado na captação da energia mecânica, é preciso avaliar as propriedades e as respostas que o tipo de pavimento apresenta quando submetidos à carga de veículos. Geralmente, os veículos são divididos em dois grupos específicos, como os pequenos, veículos de até quatro rodas, e os grandes que são os caminhões e ônibus. Os dados de cargas nos pavimentos são causados pelo contato do pneu com o pavimento. A pressão média dos pneus, quando em veículos de pequeno porte, está entre 0,2 e 0,25 MPa e quando em veículos grandes, entre 0,5 e 1,0 MPa. (ZHAO *et al.*, 2012)

Em um estudo apresentado por Zhao *et al.* (2012), a localização ideal para a instalação de transdutores piezoelétricos nos pavimentos é o mais próximo possível da superfície, para uma melhor captação da energia mecânica gerada. Porém, inserir esse material logo na superfície é complexo, e o ponto mais próximo e cabível de adicioná-los é na camada abaixo do revestimento.

Segundo Zhao *et al.* (2012), a frequência da carga no material piezoelétrico instalado no pavimento depende diretamente da velocidade, do tipo do veículo e do volume do tráfego no local. Considerando que um caminhão com volume de 600 v/h trafegue em uma faixa de uma rodovia com comprimento de 1 km, é possível que seja gerado até 150 kW em uma hora. (ZHAO *et al.*, 2014).

2.3.2.1 Estudos de piezoelectricidade em pavimentos:

2.3.2.1.1 Protótipo desenvolvido por Roshani *et al.* (2018)

Em seu estudo, Roshani *et al.* (2018) apresentou a análise de dois protótipos baseados em materiais piezoelétricos inseridos dentro da estrutura de um pavimento.

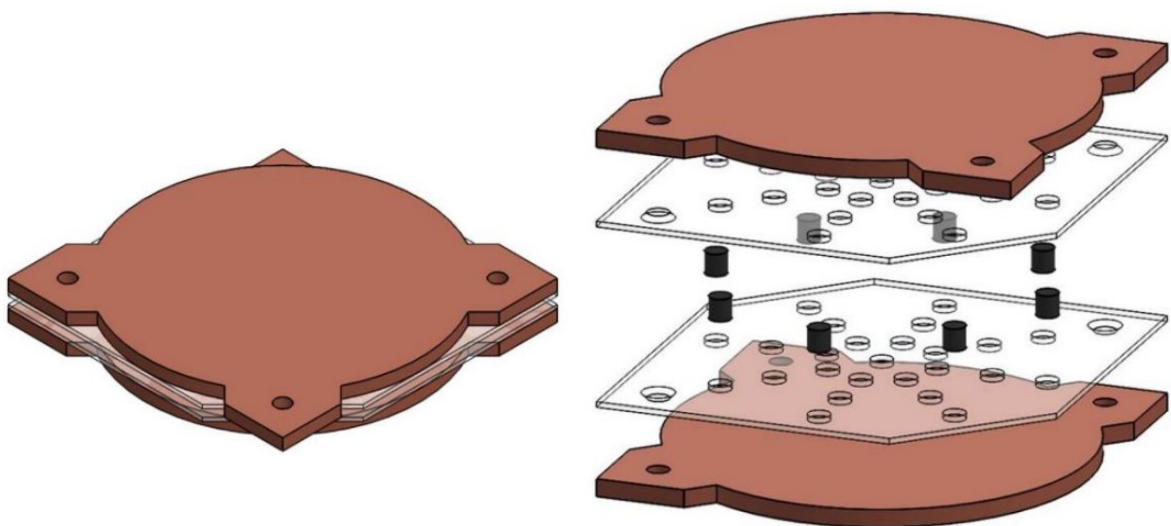
O primeiro protótipo, apresentado nas Figuras 31,32 e 33, é a conexão entre duas placas de cobre com fios, duas folhas de poliestireno e elementos piezoelétricos, no máximo oito, no formato cilíndrico. As placas de cobre que atuam como eletrodos conectados aos elementos piezoelétricos em paralelo, apresentam 6,35 cm de espessura e 152 mm de diâmetro. As folhas possuem 2 mm de espessura. São materiais leves que possuem a capacidade para manter os transdutores piezoelétricos no lugar. (ROSHANI *et al.*, 2018)

Figura 31: Elementos piezoelétricos



Fonte: ROSHANI *et al.* (2018)

Figuras 32 e 33: (32) Vista esquemática do protótipo montado; (33) Vista esquemática do protótipo desmontado incluindo as placas de cobre, folhas de poliestireno e elementos piezoelétricos.



Fonte: ROSHANI *et al.* (2018)

Epóxi eletricamente condutor foi usado para gerar um contato entre as placas de cobre e os elementos piezoelétricos. Os elementos piezoelétricos apresentam 8 mm de diâmetro e 8 mm de altura. (ROSHANI *et al.*, 2018)

O material piezoelétrico utilizado é o PZT, contendo chumbo, zircônio e titânio. Esse material apresenta maior rigidez quando comparados à outras cerâmicas piezoelétricas, e apresenta uma maior dificuldade em atingir a despolarização e menores perdas dielétricas. Características assim são consideradas ideais para a aplicação nos pavimentos rodoviários. As propriedades do material estão descritas na tabela 4.

O protótipo foi submetido à ensaios de compressão uniaxial, através da máquina de ensaio universal (UTM), simulando assim as variáveis passíveis de validação da viabilidade do protótipo. (ROSHANI *et al.*, 2018)

Tabela 4: Propriedades dos materiais piezoelétricos usados para o primeiro protótipo

Propriedade do material piezoelétrico	Valor da propriedade
Densidade	7,6 g/cm ³
Módulo de Young	6,8 x 10 ¹⁰ N/m ²
Constante de carga piezoelétrica d₃₃	290 x 10 ⁻¹² C/N
Constante de carga piezoelétrica d₃₁	-125 x 10 ⁻¹² C/N
Constante de tensão piezoelétrica 9₃₃	26,5 x 10 ⁻³ Vm/N

Fonte: ROSHANI *et al.* (2018)

Conforme descrito por Roshani *et al.* (2018), o segundo protótipo foi desenvolvido para avaliar dados em relação à velocidade do tráfego, através do movimento das rodas na geração de energia elétrica. O protótipo II foi construído usando pilha de material piezoelétrico para captar uma maior quantidade de energia. A pilha consiste em 11 cilindros de PZT-4, ideal para ser aplicado em alta potência, com espessura de 3 mm e diâmetro de 50 mm, ligados de forma paralela, como mostram as Figuras 34 a 36. Os cilindros são adicionados alterando a direção da polaridade, com folhas de índio entre eles, servindo como fios condutores.

Envolvendo os elementos piezoelétricos fabricaram uma caixa metálica de 152 mm x 152 mm e altura de 47 mm.

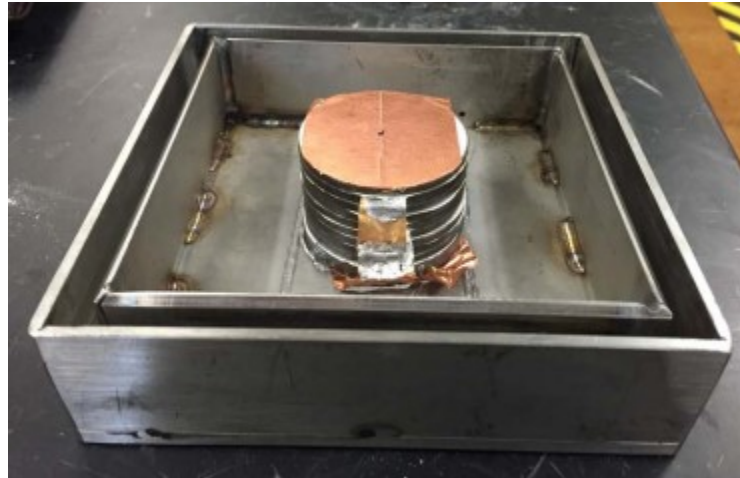
Na tabela 5 encontra-se a descrição das características do material escolhido para ser implementado no protótipo II.

Tabela 5: Propriedades do Material Piezoelétrico Utilizado no Protótipo II

Propriedade do material piezoelétrico	Valor da propriedade
Densidade	7,9 g/cm ³
Módulo de Young	7,3 x 10 ¹⁰ N/m ²
Constante de carga piezoelétrica d₃₃	320 x 10 ⁻¹² C/N
Constante de carga piezoelétrica d₃₁	-140 x 10 ⁻¹² C/N
Constante de tensão piezoelétrica 9₃₃	25 x 10 ⁻³ Vm/N

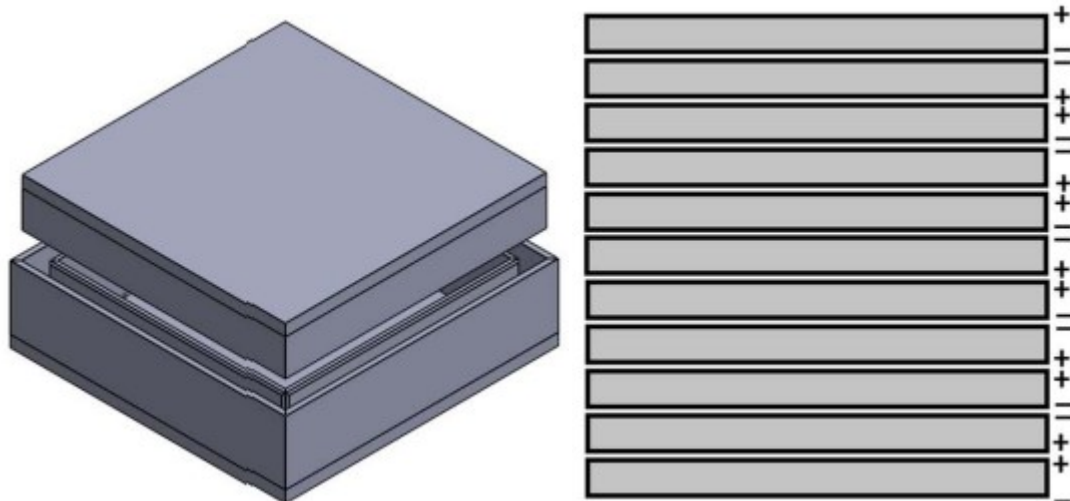
Fonte: ROSHANI *et al.* (2018)

Figura 34: Empilhamento de elementos piezoelétricos em caixa



Fonte: ROSHANI et al. (2018)

Figuras 35 e 36: (35) Vista 3D do projeto de montagem do Protótipo II; (36) Vista esquemática do arranjo de elementos piezoelétricos na pilha



Fonte: ROSHANI et al. (2018)

O protótipo de número 1 foi colocado entre duas partes de uma estrutura de concreto asfáltico contendo 152 mm de diâmetro para teste conforme apresentada na Figura 37. Foram realizados testes com carregamento de Haversine, com valores de pico variando entre 1,0 e 3,0 kN, três valores de frequência de carregamento de 5, 10 e 20 Hz, dados que correspondem às velocidades dos veículos, sendo 32, 65 e 129 km/h respectivamente e três temperaturas diferentes na câmara ambiental UTM, 4, 22 e 40°C. (ROSHANI et al., 2018)

Além dessas características para testes, para o protótipo I foram consideradas as alterações na quantidade de elementos piezoelétricos utilizados.

Os resultados obtidos nos testes revelaram que a tensão no elemento piezoelétrico diminui com a diminuição da quantidade desses elementos empregados, mesmo com o aumento da potência. A troca de quantidade de elementos piezoelétricos de 4 para 8, diminuindo o estresse do material, acarreta também a diminuição da produção geral do protótipo em aproximadamente 50% , apesar de haver mais componentes contribuindo para a geração de energia. (ROSHANI *et al.*, 2018)

Admitindo cargas de pneus de um carro pequeno de 6,67 kN e um caminhão de 44,5 kN, e considerando que o transporte da carga para os transdutores piezoelétricos ocorra com 100% de eficiência, as tenões aplicadas em cada um dos elementos são de 33 e 221 MPa, respectivamente. (ROSHANI *et al.*, 2018)

Os resultados levaram Roshani *et al.* (2018) a concluir que uma seção transversal com área menor para transporte de carga, apresenta maior potencial de geração de energia.

Figura 37: Teste do protótipo I



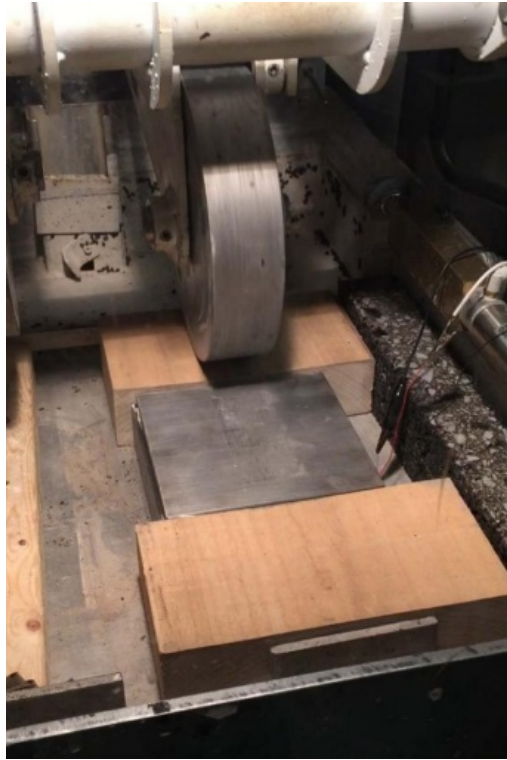
Fonte: ROSHANI *et al.* (2018)

O protótipo II foi submetido à testes uniaxiais com o UTM, assim como o protótipo I, mantendo igual quase todos os aspectos, alterando apenas a temperatura na qual o teste foi conduzindo, 22°C. (ROSHANI *et al.*, 2018)

Os resultados dos testes apresentaram que a potência gerada pela pilha de elementos piezoelétricos é de 1,36 mW para carros pequenos e 64,12 mW para caminhões, correspondente a cada pneu do veículo passando a 64 km/h. (ROSHANI *et al.*, 2018)

O segundo protótipo também foi testado na APA máquina para verificação de sua durabilidade, conforme Figura 38. O teste utilizando uma carga de roda com 702 N (carga vertical) e velocidades variadas, crescente de 7,2 a 43,2 cm/s. (ROSHANI *et al.*, 2018)

Figura 38: Máquina APA e protótipo II em teste.



Fonte: ROSHANI *et al.* (2018)

Com o aumento da frequência de carregamento houve um aumento na potência de saída. Apesar do aumento, de acordo com o tempo de carregamento do módulo, ocorre uma redução da energia geral gerada. (ROSHANI *et al.*, 2018)

O protótipo II foi submetido a contínuos ciclos de repetições de teste durante 12 horas para verificar a durabilidade de sua estrutura. Em uma velocidade da roda de 21,6 cm/s foram aplicados 43.200 ciclos. A potência de saída nesse caso se manteve constante, sugerindo uma estabilidade mediante a carga aplicada. (ROSHANI *et al.*, 2018)

Além dos testes, Roshani *et al.* (2018) realizaram simulações em 3D de um sistema de pavimento para ser possível a determinação do local de instalação dos protótipos de captação de energia com os elementos piezoelétricos. Sabe-se que é necessária a implantação em uma profundidade que potencialize a produção de energia, e que ao mesmo tempo auxilie na vida útil dos elementos. As simulações foram feitas pelo software ABAQUS, considerando

propriedades do concreto asfáltico e permite que a simulação seja mais realista, apresentando a resposta da estrutura do pavimento em relação à carga móvel.

Roshani *et al.* (2018) apresentam um módulo de 30,48 x 30,48 x 5,08 cm, embutido a uma profundidade de 5 cm em relação a superfície, no qual as tensões verticais apresentam valores máximos quando o pneu está exatamente em cima do módulo e as tensões diminuem quando o pneu se afasta.

Para a profundidade de 5,08 cm testada na simulação, a tensão máxima de energia é de 0,2 J. Já para a profundidade de 10,16 cm é de 0,14 J, valor 33% menor que o apresentado primeiramente. A simulação também apresentou a coleta de energia, que irá ocorrer antes que o pneu atinja o módulo, resultando em um processo contínuo de captação de energia. (ROSHANI *et al.*, 2018)

2.3.2.1.2 Protótipo desenvolvido por Mota (2021)

O protótipo, ilustrado nas Figuras 39 e 40, desenvolvido por Mota (2021) é composto por um corpo de prova de mistura asfáltica padrão com 100 mm de diâmetro e altura de 50 mm, placas de cobre medindo 100 x 100 x 100 mm e células piezoelétricas, material PZT-5H (material mais utilizado em projetos similares, obtendo melhores resultados dielétricos), com diâmetro de 8,56 mm e altura 6,20 mm. As propriedades do material piezoelétrico utilizados nesse protótipo estão descritas na tabela 6.

Tabela 6 – Propriedades da célula piezoelétrica

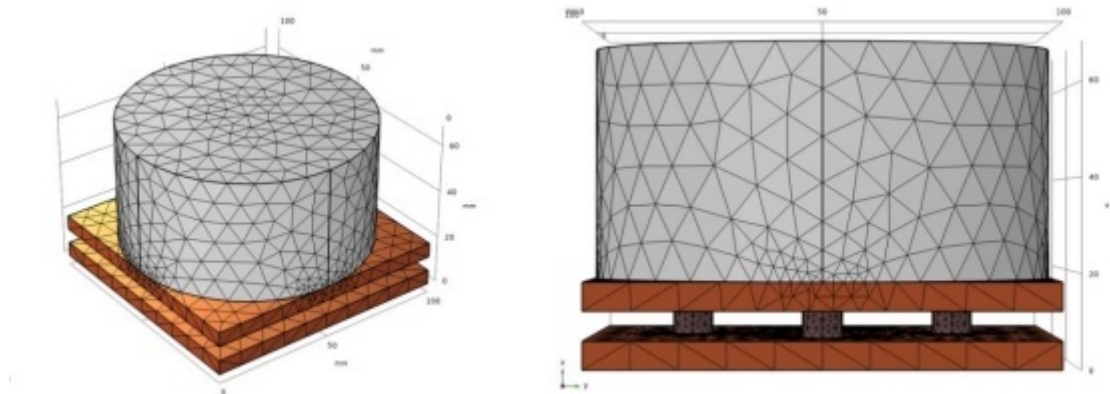
Propriedades	Símbolos	Valores
Constante dielétrica	E	2200 ± 10
Capacitância	C	180 ± 10
Temperatura de Curie (°C)	Te	250
Fator de dissipação (%)	tgδ	≤ 2,0
Frequência (kHz)	Fa	195 ± 5
Impedância ressonante (Ω)	R	≤ 180
Coefficiente de acoplamento eletromecânico (%)	K33	≥ 60
Fator de qualidade mecânica	Qm	≥ 60
Constante de carga piezoelétrica (x10 ⁻¹² C/N)	d33	450

Fonte: MOTA (2021)

Na concepção do projeto, Mota (2021) determinou a utilização de células piezoelétricas entre os valores de 4, 8 e 16 células, variação que auxilia na verificação do ponto ótimo entre a quantidade ideal de elementos e a potência que é gerada. O sistema também precisa resistir às cargas dinâmicas, conforme um pavimento rodoviário convencional é submetido. As cargas aplicadas foram de 3,4 kN à 10,2 kN na superfície do revestimento asfáltico, e simulando o tráfego dos veículos, foram adotadas frequências de 5, 10 e 20 Hz, assim como Roshani *et al.* (2018), correspondendo, respectivamente, às velocidades de 33, 60 e 115 km/h.

A primeira etapa do estudo consistiu em simulações multifísicas através do software COMSOL *Multiphysic*. O protótipo passou por análises de aplicação de cargas, resistências e frequências, e verificou-se também a potência e tensão. (MOTA, 2021)

Figura 39: Modelo de malha adotado para o protótipo



Fonte: MOTA (2021)

Com os resultados obtidos através da primeira etapa, Mota (2021), assim como Roshani *et al.* (2018), observou que a potência gerada foi diminuindo quando a quantidade de elementos piezoelétricos aumentava. Esse fator é devido à distribuição uniforme da força aplicada, pois cada célula recebe a mesma quantidade de carga, e quanto mais células tiver, menor será a quantidade de carga recebida.

Em relação ao espaçamento das células piezoelétricas, duas configurações foram testadas no conjunto de 4 células, resultando um aumento na geração de energia para o sistema com maior espaçamento entre as células. O crescimento da potência se dá em razão da redução da interferência que o efeito piezoelétrico pode causar nas células à volta. (MOTA, 2021)

Mota (2021) apresenta que os resultados obtidos em relação à potência para 4 células com um espaçamento maior, 10,2 kN e 20 Hz, foram mais satisfatórios, resultando em uma geração de 648,8 mW. No entanto, para 16 células com 3,4 kN e 5 Hz o resultado foi de 4,7 mW, o menor valor do teste. Diante disso, percebe-se que a potência aumenta com a elevação da aplicação de carga e frequência, e reduz com o aumento da quantidade de elementos piezoelétricos.

As tensões elétricas se mantiveram iguais diante as frequências testadas, apresentando resultados de 258 V a 3026 V para 16 células e 4 células, respectivamente.

Com os resultados das simulações, Mota (2021) diz que as potências elétricas são vinculadas às variáveis aplicadas em relação à velocidade do veículo e também à carga, quantidade de células e à resistência elétrica. Quanto maior os valores da carga e frequência, maiores são os resultados de potência elétrica.

Na primeira etapa, o protótipo também foi submetido à análise de tensões mecânicas, apresentando resultados mais elevados para a frequência de 5Hz (velocidade de 33 km/h). Com o aumento da carga aplicada, os valores ficam mais distantes, como por exemplo, na simulação de 4 células mais espaçadas, há um aumento na tensão mecânica de 37% em 5 Hz, quando comparado aos resultados de 20 Hz. A tensão mecânica também é reduzida quando a quantidade de células piezoelétricas é aumentada, apresentando uma redução de 46% quando avaliando a situação de 4 para 8 células e 74% quando altera de 4 para 16 células. (MOTA, 2021).

Finalizando a análise das simulações, Mota (2021) explica que apesar do espaçamento entre as células apresentar vantagens em relação à potência elétrica, quando analisado quanto à tensão mecânica, os resultados também são maiores.

Na etapa de ensaios laboratoriais, necessária para a avaliação de tensão e potência elétrica, foram realizados o ensaio de Módulo Dinâmico (MD) na Universal Test Machine (UTM-25) e teste de compressão com o elemento piezoelétrico do protótipo, conforme Figura 41. Esse protótipo apresenta duas placas de cobre quadradas com 6 mm de espessura e uma placa de poliestireno para fixar as células piezoelétricas inserida entre elas e os demais componentes conforme protótipo das simulações. (MOTA, 2021).

Nos ensaios laboratoriais, o sistema com 4 células piezoelétricas apresentou menores resultados, e Mota (2021) expõe que em testes físicos, existe uma baixa probabilidade de contato entre a placa de cobre e todos os elementos piezoelétricos. Como os dados obtidos

com a utilização de 8 células foram melhores, a quantidade de elementos aumentou a chance de contato, exercendo o efeito piezoelétrico de maneira mais eficaz.

Figura 40: Protótipo laboratorial



Fonte: MOTA (2021)

Figura 41: Teste em laboratório – UTM-25



Fonte: MOTA (2021)

Os resultados para a segunda etapa de testes, o modelo com 4 células apresenta um maior valor de tensão elétrica para a carga de 10,2 kN e frequência de 20Hz, totalizando em 4,90 V. Nessa mesma característica de sistema é obtido a maior potência elétrica, de 47,53

mW, na qual cada célula gera cerca de 11,883 mW. Os resultados de resistência elétrica variam entre 0,39 e 0,77 k Ω . Para 4 células mais espaçadas os valores obtidos foram quase 2 vezes os valores do modelo de 4 células piezoelétricas, apresentando a resistência elétrica variando entre 0,65 e 1,07 k Ω . Valores podem destoar um pouco do padrão em função de alguns elementos fraturados e o contato falho entre as células e a placa de cobre. (MOTA, 2021).

O valor obtido em relação à tensão elétrica foi melhor para o sistema de 8 células com frequência de 20 Hz e carga de 10,2 kN, resultando em 13,59 V. A potência elétrica nesse caso gerou 226,95 mW, aproximadamente 28,4 mW por células que compõem o modelo. Tanto os resultados de tensão, quanto as potências apresentaram valores superiores aos modelos de 4 células e 4 células mais espaçadas. (MOTA, 2021).

Para tensões que são comuns em pavimentos rodoviários, de até 0,70 MPa, a utilização de 8 células piezoelétricas em uma frequência de 20 Hz (velocidade de 115 km/h) aparenta ser a melhor alternativa de acordo com os testes em laboratório. Esse sistema retorna até 120 mW em passagem de uma roda de veículo.

Durante a execução dos testes, Mota (2021) analisou rompimentos de forma prematura de algumas células piezoelétricas, principalmente nos modelos contendo 4 células e 4 células mais espaçadas. Diante disso, viu-se a necessidade de realizar ensaios de compressão mecânica visando à obtenção da tensão máxima que o elemento pode suportar.

No ensaio de compressão, representado na Figura 42, para avaliar o fraturamento do elemento piezoelétrico aplicaram a célula de carga de 5,0 kN, a cada 0,1 mm de deslocamento. Procedimento ficou em repetição até o valor limite ser atingido, ou até o rompimento do componente. O ensaio resultou em uma tensão de 46,229 MPa, e o valor limite foi atingido sem o rompimento da célula piezoelétrica.

Segundo Mota (2021), o resultado do ensaio de compressão é importante para determinar, testar e comprovar a resistência da célula piezoelétrica. Concluiu-se com esse teste que o acontecimento durante os ensaios laboratoriais não foi em relação à baixa resistência dos elementos piezoelétricos, mas talvez da deformidade das placas de cobres que alterou a distribuição da tensão para os componentes.

Figura 42: Ensaio de compressão



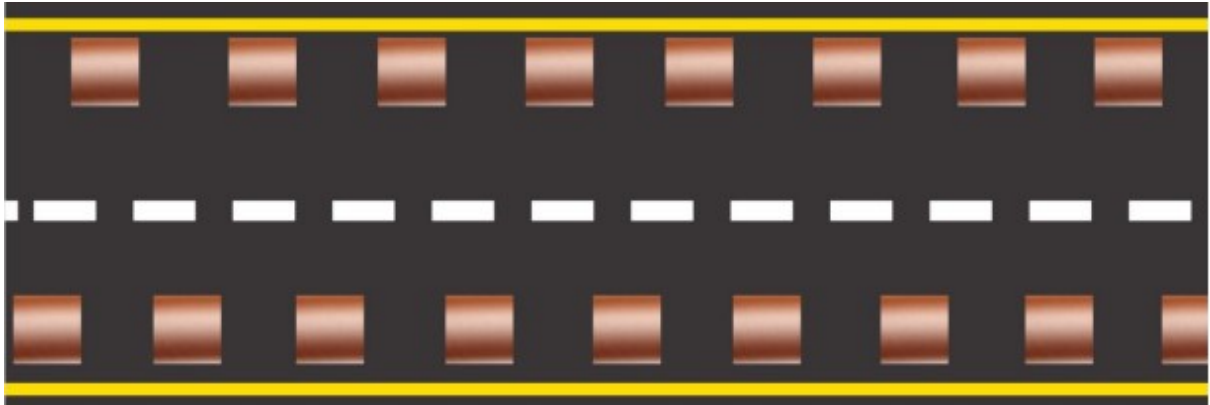
Fonte: MOTA (2021)

Um trecho da BR-222, em Caucaia – CE foi escolhido para simulações em ambiente real do protótipo do projeto. A via apresenta um alto tráfego de veículos comuns e comerciais, impactando diretamente na estrutura do pavimento, devido às cargas que são aplicadas. Para essa análise foram considerados apenas carros de passeio, supondo cargas de 1,98 kN por roda e caminhões de dois eixos, com cargas de 24,5 kN também por roda. Além disso, a velocidade máxima na via é de 60 km/h. (MOTA, 2021)

Para a primeira análise, de simulação multifísica, Mota (2021) considerou o pavimento da estrada com nenhuma irregularidade, apresentando resistência elétrica controlada por caixas de resistência que seriam inseridas nos bordos da via. Adotou-se a resistência para uma frequência de 10 Hz (velocidade máxima de 60 km/h) e o protótipo ficou localizado 5 cm abaixo da superfície do revestimento. Considerou-se também a regularidade das placas de cobre, mantendo um contato de 100% junto aos elementos piezoelétricos.

A Figura 43 ilustra a localização simulada para a instalação do protótipo na via.

Figura 43: Pontos de distribuição do protótipo na via



Fonte: MOTA (2021)

Tabela 7: Potência simulada para trecho da BR-222 em situação ideal

Tipo	Potência	Unidade
Pneu de carro/módulo	0,01212	W
Pneu de ônibus e caminhão/módulo	0,14679	W
Pneu de carros/dia/módulo	86,12717	Wh
Pneu de ônibus e caminhão/dia/módulo	165,57828	Wh
Pneu de carros/ano/módulo	31,73642	kWh
Pneu de ônibus e caminhão/ano/módulo	60,43607	kWh

Fonte: MOTA (2021)

Com os dados obtidos informados na tabela acima, Mota (2021), planejando a aplicação de cerca de 10.000 protótipos na extensão de 1 km de estrada, estipulou a produção de 918,78 MWh por ano, 76,56 MWh por mês. Considerando o consumo médio mensal de energia na região de 125,2 kWh por casa, seria possível o abastecimento de 611 residências.

Para a análise de simulação em ambiente real realizada em laboratório, consideraram-se os dados de tráfego, pista e carga conforme apresentado para a primeira etapa, alterando apenas as irregularidades das placas de cobre, simulando também a irregularidade da pista. (MOTA, 2021).

Tabela 8: Potência simulada para trecho da BR-222 em situação com limitações

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

Fonte: MOTA (2021)

Foi considerado também a aplicação de 10.000 protótipos na extensão do trecho, e nesse caso, estipulando a produção de cerca de 41,33 MWh por ano, 3,44 MWh pro mês. Mantendo o consumo médio mensal de energia na região de 125,2 kWh por residência, a instalação do projeto resultaria em até 27 residências abastecidas por essa coleta, de acordo com os dados dessa simulação. (MOTA, 2021)

3 DISCUSSÃO

Vários autores apresentam ideias e concepções de projetos que permitem a produção de energia elétrica através de fontes sustentáveis e sem impactos ambientais, diferentemente das hidrelétricas.

É notório que existem muitas pesquisas sendo desenvolvidas e aprimoradas em torno do mundo para que seja possível a implementação “em massa” das tecnologias apresentadas para a geração de energia em pavimentos rodoviários, de forma eficaz e viável.

As tecnologias abordadas no presente trabalho possuem como foco principal apresentar alternativas para a diminuição do impacto ambiental causado pelo ser humano. Mas como estão em fase ainda de desenvolvimento, apresentam também desvantagens mediante análise.

3.1 Vantagens e desvantagens

3.1.1 Pavimento solar

Dentre as vantagens que a estrada solar apresenta, pode-se citar que a principal é que o tipo de pavimento utilizado, painéis solares, utiliza de uma fonte renovável de energia para a

produção da energia elétrica. Apresentando um possível potencial de redução de fontes convencionais de geração de energia. Ademais, os painéis solares possuem uma vida útil muito maior do que os asfaltos utilizados atualmente na pavimentação das estradas. (KOHAK et. al, 2019).

Segundo Kohak et. al (2019), um outro fator positivo é não precisar da utilização ou criação de áreas não utilizadas para a instalação dessas placas, reduzindo impactos ambientais negativos, diferentemente das grandes instalações fotovoltaicas que estão sendo implementada em várias partes do mundo.

Além disso, considerando a evolução da tecnologia e o crescente aumento do número de veículos elétricos na atualidade, os pavimentos solares podem ser destinados também ao carregamento dos automóveis enquanto ainda estão em movimentos. (KOHAK et. al, 2019).

Kohak et. al (2019) expõem que a principal desvantagem é em relação ao custo da implantação e manutenção das estradas solares, valores extremamente alto, mas que com o avanço da tecnologia e a alta produção podem chegar a diminuir significativamente. Essa questão interfere diretamente na viabilidade de construção dessas estradas em países mais pobre.

Outro ponto negativo é a respeito da eficiência do pavimento solar quando comparado ao painel solar instalado em telhados. Kohak et. al (2019) também apresentam a possibilidade de acúmulo de materiais na superfície que podem impedir as células fotovoltaicas de captarem a luz solar.

Diante desses pontos, a instalação dessa inovação tecnológica deve ser algo analisado e muito bem estruturado para que o custo benefício à longo prazo seja favorável aos investimentos iniciais.

3.1.2 Pavimento piezoelétrico

O sistema piezoelétrico apresenta vantagens como a elevada capacidade de gerar energia. A energia mecânica que fornece ao material piezoelétrico a possibilidade de gerar a eletricidade independe das situações climáticas, ou seja, em chuva ou sol, existindo o trânsito de veículos no local, a energia é produzida. Outro ponto importante da piezoeletricidade nos pavimentos é a possibilidade de as células piezoelétricas serem utilizadas como sensores responsáveis por monitorar o tráfego, e registrar informações sobre. (MOTA, 2019)

No entanto, a captação da energia mecânica nos pavimentos rodoviários apresenta alguns fatores negativos como a fragilidade dos elementos que compõem o sistema

piezoelétrico. A profundidade de instalação do captor no pavimento asfáltico deve ser precisa, caso contrário o contato entre as células e o pneu do veículo pode ser reduzido, afetando a capacidade de geração de energia. Além disso, por não apresentar ainda um sistema de armazenamento, a energia produzida por esse sistema é geralmente indicada para pequenas aplicações, como a iluminação da via. (MOTA, 2019)

3.2 Análise de custo

Mota (2021) apresenta uma análise de custo para a instalação do protótipo de pavimento com piezoeletricidade, conforme tabela abaixo.

Tabela 8: Composição do protótipo e custo total

Material	Especificação	Quant.	Preço Unit.	Preço total
Caixa de resistência	Caixa de resistência padrão; Megabras CPR-15G	10.000	R\$ 2.000,00	R\$ 20.000.000,00
Placa de cobre	Chapa cobre M/D CH 6,35 x 100 mm x 100 mm	20.000	R\$ 250,00	R\$ 5.000.000,00
Células piezoelétricas	Ultrasonic Piezoelectric Ceramic Cylinder 8,56x6,2 mm – PZT5H	40.000	R\$ 12,86	R\$ 514.400,00

Fonte: MOTA (2021)

Apenas com o material seriam gastos R\$ 25.514.400,00. Considerando serviços básicos descritos pelo SEINFRA, com valor de R\$ 87.277,02 para um trecho de 7,20 m de largura, 1,0 km de extensão e revestimento com 5,0 cm de espessura, o custo final resultaria em R\$ 25.601.677,02, cerca de R\$ 3.555,80/ m². (MOTA, 2021)

O custo do protótipo do pavimento com células piezoelétricas é muito alto, e apesar da economia que resultaria no custo de energia elétrica, Mota (2021) expõe que o retorno do investimento inicial levaria de 41 a 218 anos, considerando então um investimento inviável no ponto de vista econômico.

No projeto desenvolvido por Roshani *et al.* (2018) consideraram que a produção de energia elétrica, nos Estados Unidos, de maneira convencional é mais econômica do que a geração por pavimentos piezoelétricos. No entanto, dados que podem apontar essa questão como verdadeira não envolvem valores ambientais, com a emissão de gases de efeito estufa.

A fabricação dos módulos testados por Roshani *et al.* (2018), apresentou um custo de material de cerca de \$ 200 cada um (R\$ 956,00 - cotação de março de 2022), e sua instalação

pode ser considerada mais econômica, por ser inserida como parte da execução do pavimento comum.

No caso do pavimento solar, com a utilização de células fotovoltaicas, o valor também apresenta ser alto. A estrada solar construída na China custou cerca de R\$ 8,5 milhões, aproximadamente R\$ 1.500,00 por metro quadrado, 100 vezes mais do que o valor do revestimento convencional em asfalto. Valor para essa construção é consideravelmente elevado, assim como a estrada com painéis solares na França, em Tourouvre, que custou R\$ 17,5 milhões em 1 km de extensão, sendo R\$ 6.250,00 por metro quadrado. (VENTURA, 2017)

Apesar dos elevados custos iniciais para a implementação dos protótipos de pavimentos geradores de energia apresentados, o avanço da tecnologia e das pesquisas nessas áreas, juntamente com a otimização das células e materiais utilizados, podem tornar os projetos viáveis, permitindo com que as estradas e rodovias contribuam para a geração de energia no mundo, de forma efetiva e sustentável.

4 CONCLUSÃO

A otimização das rodovias demonstra ser uma forte demanda para o futuro do transporte urbano e rodoviário. Muitos pesquisadores acreditam que a utilização das estradas vai além do tráfego de veículos, e através das informações apresentadas, percebe-se que as vias podem apresentar outras funcionalidades, como a geração de energia elétrica.

O presente trabalho buscou apresentar alguns projetos existentes referente às tecnologias inovadoras que estão sendo utilizadas para a geração de energia em pavimentos das rodovias, para que fosse possível o entendimento do que está sendo desenvolvido e dos aspectos importantes que podem auxiliar no aprimoramento dos mesmos e produção de futuros projetos nesse segmento.

As tecnologias analisadas nesse trabalho capazes de gerar energia a partir de células piezoelétricas, produzindo eletricidade através da energia mecânica no pavimento causada pela pressão exercida pelo tráfego de veículos, e de células fotovoltaicas, responsáveis por gerar energia elétrica através da captação da luz solar, apresentam-se como soluções alternativas em relação à produção de energia em meios convencionais, devido à suas fontes limpas e renováveis.

Notam-se muitos fatores positivos em ambos os sistemas e modelos apresentados em questão de benefícios ambientais ao comparar a produção de energia em meios convencionais

com o apresentado. A sustentabilidade é um dos pontos mais importante para avaliar em questão da necessidade de projetos que visam à geração de energia através de fontes que não sejam prejudiciais ao meio ambiente. Mas, assim como a maioria dos projetos em desenvolvimento, se não todos, existem fatores que podem inviabilizar sua execução. No caso do pavimento gerador de energia, o principal deles é o custo inicial que, conforme exposto, apresenta valor alto que impede a instalação em países mais pobres.

Diante de todo material apresentado no trabalho conclui-se que a utilização de pavimento gerador de energia em rodovias é importante para a contribuição da engenharia de infraestruturas na diminuição do impacto ambiental, mas por se tratar de um tema relativamente novo, ainda existem algumas incertezas sobre sua viabilidade em todo o planeta. Até o momento, apenas países com alto poder econômico estão investindo na implantação desses projetos em suas rodovias, pois os benefícios que oferecem demonstram ser mais relevantes que os gastos iniciais.

Espera-se que com a evolução acelerada da tecnologia, os pavimentos solares e os com elementos piezoelétricos possam ser viáveis para instalação em todos os pontos do mundo e que, além disso, sua contribuição para o ambiente seja relevante.

REFERÊNCIAS

- BERNUCCI, L.B. *et al.* **Pavimentação asfáltica: Formação básica para engenheiros.** Rio de Janeiro: Petrobrás: Abeda, 2008.
- BLOOMBERG NEWS. **China's Built a Road So Smart It Will Be Able to Charge Your Car.** 2018. Disponível em: <<https://www.bloomberg.com/news/features/2018-04-11/the-solar-highway-that-can-recharge-electric-cars-on-the-move>>. Acesso em: 05 mar. 2022.
- BOSS, M. de J. **Primeur Utrecht: Maartensdijk heeft langste zonnefietspad ter wereld.** Solar Magazine, 2021. Disponível em: <<https://solarmagazine.nl/nieuws-zonne-energie/i24924/primeur-utrecht-maartensdijk-heeft-langste-zonnefietspad-ter-wereld#:~:text=In%20Maartensdijk%20is%20het%20langste,wegen%20wordt%20gezien%20als%20kansrijk.>>>. Acesso em: 04 mar. 2022.
- BRADSHER, K. **Free power from freeways? China is testing roads paved with solar panels.** The New York Times, 2018. Disponível em: <<https://www.nytimes.com/2018/06/11/business/energy-environment/china-solar-roads-renewables.html>>. Acesso em: 05 mar. 2022.
- BRUSAW, S. *et al.* **Engineering Tests to Evaluate the Feasibility of na Emerging Solar Pavement Technology for Public Roads and Highways.** Technologies 8, 2020.
- BUSINESS STANDARD. **Solar highway: China's built a road so smart it will be able to charge car.** 2018. Disponível em: <https://www.business-standard.com/article/international/solar-highway-china-s-built-a-road-so-smart-it-will-be-able-to-charge-car-118041201215_1.html>. Acesso em: 05 mar. 2022.
- CALLISTER JR., W. D. C. **Ciência e Engenharia de Materiais - Uma Introdução.** Rio de Janeiro: LTC, 2020.
- CHINADAILY. **World's first photovoltaic highway nears completion in Jinan.** Chinadaily.com.cn, 2017. Disponível em: <https://usa.chinadaily.com.cn/a/201712/15/WS5a33346da3108bc8c6734df4_1.html#:~:text=Workers%20are%20paving%20photovoltaic%20devices,by%20the%20end%20of%20Dec.>>. Acesso em: 05 mar. 2022.
- CNT - Confederação Nacional do Transporte. **Anuário CNT do Transporte.** Disponível em <<https://anuariodotransporte.cnt.org.br/2021/Rodoviario/1-3-1-1-1-/Malha-rodovi%C3%A1ria-total>>. Acesso em 26 de março de 2022.
- DRESCH, F. **Projeto de Estradas.** Porto Alegre: Sagah, 2018.
- DNIT - Departamento Nacional de infra-estrutura de transporte. **Manual de Pavimentação.** Publicação IPR – 719. Rio de Janeiro, 2006.
- FARIAS, G. e SALLUM, A. **Projeto de geradores piezoelétricos para iluminação no restaurante universitário da UNICAMP.** Revista Ciências do Ambiente Online, 2013.

FEARNSIDE, P. M.; GRAÇA, P. M. L. de A. **BR-319: a rodovia Manaus-Porto Velho e o impacto potencial de conectar o arco do desmatamento à**. Novos cadernos NAEA. Vol. 12, n. 1, 2009.

GAIOTTO, F. J. **Design transformadores cerâmicos piezoelétricos e aplicações**. Maringá – PR, 2012.

HELLER, L. F. **Microgeração de energia em pavimentos: estudo de caso de um gerador piezoelétrico instalado em um pavimento rodoviário**. Porto Alegre – RS, 2019.

HIGA, P. **França inaugura primeira estrada com painel solar**. Tecnoblog, 2017. Disponível em: <<https://www1.tecnoblog.net/205228/franca-estrada-painel-solar/>>. Acesso em: 04 mar. 2022

HUANG, E. **A new solar highway in China perfectly captures its clean-energy ambitions**. Quartz, 2017. Disponível em: <<https://qz.com/1166975/a-new-solar-highway-in-china-perfectly-captures-its-clean-energy-ambitions/>>. Acesso em: 05 mar. 2022.

INTELBRÁS. **O que é energia solar? Tudo sobre o sistema fotovoltaico**. Intelbrás Blog, 2020. Disponível em: <<https://blog.intelbras.com.br/o-que-e-energia-solar-tudo-sobre-o-sistema-fotovoltaico/>>. Acesso em 28 de março de 2022

JANSEN, K. **Betonnen zonnepad Maartensdijk levert stroom voor 45 huishoudens**. Betonhuis, 2021. Disponível em: <<https://betonhuis.nl/betonhuis/betonnen-zonnepad-maartensdijk-levert-stroom-voor-45-huishoudens.>>. Acesso em: 04 mar. 2022.

KANG-WON, W; CORREIA, A. J. **A Pilot study for investigation of novel methods to harvest solar energy from asphalt pavements**. Instituto Coreano de Tecnologia de Construção (KICT): Goyang, Coreia, 2010.

KOHAK, P. G. *et al.* **A Review on Design and Fabrication of a Solar Roadways**. IRJET Journal: Ahmednagar – Índia, 2019.

KYUPERS, A. **Trials with new generation of solar road surfacing**. TNO Innovation for life, 2021. Disponível em: <<https://www.tno.nl/en/tno-insights/articles/trials-with-new-generation-of-solar-road-surfacing/>>. Acesso em: 04 mar. 2022.

LEE, C. S. *et al.* **Poly (vinylidene fluoride) transducers with highly conduction poly (3,4-ethylenedioxythiophene) electrodes**. Synthetic Metals, 2005.

LEE, K. W. *et al.* **Solar energy harvesting from roadways**. 93rd Annual Meeting of Transportation Research Board, 2014.

MOTA, B. C. **O pavimento como instrumento de geração de energia para o desenvolvimento sustentável de cidades inteligentes**. Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal do Ceará, 2019.

MOTA, B. C. **Captação de energia no pavimento rodoviário com a aplicação de células piezoelétricas**. Pós-Graduação da Universidade Federal do Ceará, 2021.

NORTHMORE A.; TIGHE S. **Innovative pavement design: are solar roads feasible?** Conference of the Transportation Association of Canada-Transportation: Innovations and Opportunities, 2012.

OCA SOLAR ENERGIA. **Energia Solar Fotovoltaica e Energia Solar Térmica: Entenda a Diferença.** OcaEnergia, 2016. Disponível em: <<https://www.ocaenergia.com/blog/energia-solar/energia-solar-fotovoltaica-energia-solar-termica-saiba-diferenca/>>. Acesso em 28 de março de 2022.

ONYX SOLAR. **Photovoltaic Outdoor – Technical Pavement.** [s.d.]. Disponível em: <<https://www.onyxsolar.com/>>. Acesso em: 05 mar. 2022.

PAIVA, A.F.; PEREIRA, I.N.A. **Impactos socioambientais gerados pela implantação da rodovia BR-319.** Brazilian Journal of Development. Curitiba - PR, 2021.

PELEGI, A. **China constrói estrada solar feita com painéis fotovoltaicos.** Diário do transporte, 2018. Disponível em: <<https://diariodotransporte.com.br/2018/01/11/china-construi-estrada-solar-feita-com-paineis-fotovoltaicos/>>. Acesso em: 05 mar. 2022.

PEOPLE'S DAILY, CHINA. “The world’s first solar highway on Thursday opened to the public in eastern China's Shandong”. 28 de dezembro de 2017, 06h44. Twitter.

PHILIPPI JR, A. P.; REIS, L. B. **Energia e sustentabilidade.** Barueri, SP: Editora Manole, 2016.

PLATIO SOLAR. **Platio Solar Pavement.** [s.d.]. Disponível em: <<https://platosolar.com/>>. Acesso em: 23 fev. 2022.

REIS, H. **Plano de Desenvolvimento do Amazonas: Programa 1975.** Manaus: Imprensa Oficial do Estado do Amazonas, 1975.

ROSA, M. **Calçada capaz de gerar energia solar é instalada nos EUA.** Ciclo Vivo, 2013. Disponível em: <<https://ciclovivo.com.br/planeta/desenvolvimento/calçada-capaz-de-gerar-energia-solar-e-instalada-nos-eua/>>. Acesso em: 05 mar. 2022.

ROSHANI, H. *et al.* **Theoretical and Experimental Evaluation of Two Roadway Piezoelectric-Based Energy Harvesting Prototypes.** Journal of Materials in Civil Engineering, 2018.

SANTOS, M. A. dos. **Fontes de Energia Nova e Renovável.** Rio de Janeiro: LTC, 2013.

SINKE, W. **Solaroad’s new phase: A motorway that also generates electricity.** TNO Innovation for life, 2019. Disponível em <<https://www.tno.nl/en/tno-insights/articles/solaroad-s-new-phase-a-motorway-that-also-generates-electricity/>>. Acesso em: 04 mar. 2022.

SOLAR ROADWAYS. **Research.** Solar Roadways A Real Solutions. [s.d.]. Disponível em: <<https://solarroadways.com/research/>>. Acesso em: 11 fev. 2022.

SOLAROAD. **About SolaRoad**. [s.d.]. Disponível em: <<https://www.solaroad.nl/about/>>. Acesso em: 12 fev. 2022.

TETRACON. **Qual a diferença entre pavimento de concreto e pavimento asfáltico?** Tetracon – Pisos intertravados, 2019. Disponível em: <<https://tetraconind.com.br/pisos-intertravados/qual-a-diferenca-entre-pavimento-de-concreto-e-pavimento-asfaltico/>>. Acesso em 10 de fevereiro de 2022.

VENTURA, F. **China inaugura “estrada solar” que absorve luz para converter em eletricidade**. Tecnoblog, 2017. Disponível em: <<https://tecnoblog.net/noticias/2017/12/28/china-estrada-solar/>>. Acesso em: 05 mar. 2022.

VIAN, A. *et al.* **Energia Solar Fundamentos Tecnologia e Aplicações**. São Paulo: Editora Blucher, 2021.

WANG, C. *et al.* **Fabrication and performance of a Power generation device based on stacked piezoelectric energy-harvesting units for pavements**. Energ Conver Manage, 2018.

WATTWAY. **Wattway Pack, solution d’autonomie énergétique pour des équipements en bord de voirie**. [s.d.]. Disponível em: <<https://www.wattwaybycolas.com/references/documents.html>>. Acesso em: 05 mar. 2022.

WELLE, D. **França inaugura primeira estrada solar do mundo**. G1, 2016. Disponível em: <<https://g1.globo.com/mundo/noticia/franca-inaugura-primeira-estrada-solar-do-mundo.ghml>>. Acesso em: 05 mar. 2022.

XIONG, H. **Piezoelectric energy harvesting on public roadways**. PhD Thesis – Instituto Politécnico da Virginia e Universidade Estadual, 2014.

ZHAO, H. *et al.* **A comparative analysis of piezoelectric transducers for harvesting energy from asphalt pavement**. Journal of the Ceramic Society of Japan, 2012.

ZHAO, H. *et al.* **Harvesting Energy from Asphalt Pavement by Piezoelectric Generator**. Journal of Wuhan University of Technology-Mater, 2014.