

Estado del arte del uso de nuevas tecnologías en la construcción de superficies de rodadura vehicular con paneles solares.

Luisa Fernanda López Murcia

Marly Yanith Fandiño García

Trabajo de Grado presentado como requisito para optar el título de Ingeniera Civil

Director

Sandra Milena Cote Vargas

Magíster Ingeniera Civil

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas

Escuela de Ingeniería Civil

Bucaramanga

2018

Dedicatoria

A Dios gracias por ser mi guía espiritual en el camino, por su fidelidad en el cumplimiento de cada uno de mis sueños y anhelos.

A mis padres Luis Álvaro Fandiño & Nohema García García por darme la oportunidad de estudiar, por su confianza en mí, ellos fueron el motor para no rendirme y siempre llegar a mi meta, son mi mayor bendición.

A mi hermosa tía Lilia Fandiño, que ha dedicado toda su vida a educarme, cuidarme y creer en mí como una madre, ella ha sido una de las promotoras para que esta meta sea una realidad.

A mis hermanos Leidy, Herlency & Luis quienes han sido mi mayor alegría para nunca decaer en momentos difíciles, a ellos les agradezco por confiar en su pequeña hermanita.

A mi querida hermana Henny Fandiño García, mi mayor inspiración, quien en su corto paso por la vida me enseñó que los sueños nacieron para hacerse una realidad, que a pesar de los obstáculos siempre se debe luchar por lo que se quiere, que el amor y la dedicación siempre al final haría que todo valiera la pena. A ti mi hermosa hermana te dedico este logro como Ingeniera Civil y sé que hoy estarías muy feliz al verme conseguir este sueño tan anhelado.

Marly Fandiño Garcia

Dedicatoria

A mi mamá por ser mi norte.

A mi papá por ser mi apoyo.

A mi hermano por ser mi fuerza.

Luisa Fernanda López Murcia

A nuestra querida Universidad Industrial de Santander por permitirnos hacer parte de ella, en un nuestro proceso de crecimiento personal y profesional durante estos años.

A la Escuela de Ingeniería Civil por su colaboración, apoyo y por su dedicación al estudiantado.

A nuestra Directora de Tesis, La Ingeniera Sandra Milena Cote Vargas por su confianza en este proyecto, porque desde el principio le agradó el tema de esta investigación, aportándonos los instrumentos necesarios para que este proyecto se haya logrado satisfactoriamente. Por el tiempo invertido revisando nuestros avances, por tomar en cuenta nuestras opiniones encaminándolas hacia el objetivo de nuestra propuesta Investigativa, por la importancia que le presto a nuestra tesis desde el principio hasta el final. Por ser una profesora dedicada a la academia y ser una amiga. A ti nuestros más sinceros agradecimientos.

*Marly Yanith Fandiño García
Luisa Fernanda López Murcia*

Contenido

	Pág.
Introducción	20
1. Metodología	22
1.1 Seleccionar y organizar fuentes de información disponibles.....	22
2. Marco teórico	23
2.1 Historia de las carreteras	23
2.1.1 Recuento histórico del sistema de caminos y carreteras en Europa y el Oriente.....	23
2.1.2 Colombia.....	29
2.2 Época moderna, avances globales en la ingeniería de carreteras:	30
2.3 Desarrollo de los paneles solares como medio de energía renovable	32
2.3.1 Tipos de sistemas o circuitos integrados.....	35
3. Desarrollo de la investigación.....	37
3.1 Creación de prototipos y parámetros de diseño.	37
3.2 Ensayos de laboratorios para los nuevos elementos aplicados a la construcción de superficies de rodadura vial.....	61
3.2.1 Estudios realizados por entidades estadounidenses al modelo SR3 de Solar Roadways Incorporated	62

3.2.2 Estudios realizados por Andrew Bruce Northmore en la Universidad de Waterloo, Canadá.
..... 73

4. Comparaciones..... 108

5. Conclusiones..... 112

Referencias bibliográficas..... 115

Apéndice 121

Lista de figuras

	Pág.
<i>Figura 1.</i> Carretera Real Persa.	24
<i>Figura 2.</i> Perfil de carretera con acanaladura.	25
<i>Figura 3.</i> Caminos cubiertos con arena, grava o césped.	26
<i>Figura 4.</i> Carretera procesional en el templo de Ishtar	27
<i>Figura 5.</i> Vía Apia.	28
<i>Figura 6.</i> Ruta de la Seda.	28
<i>Figura 7.</i> Carguero indígena por el camino de herraduras.	29
<i>Figura 8.</i> Efecto Fotovoltaico en una célula Solar.	34
<i>Figura 9.</i> Esquema Básico de una Celda Solar de Si cristalino.	35
<i>Figura 10.</i> Diagrama Sistema FV con respaldo aislado.	36
<i>Figura 11.</i> Diagrama sistema FV sin respaldo interconectado a la red.	37
<i>Figura 12.</i> Primera muestra de vidrio.	39
<i>Figura 13.</i> Vista en corte del sistema de retención de aguas pluviales.	40
<i>Figura 14.</i> Vista lateral del sistema de retención de aguas pluviales.	40
<i>Figura 15.</i> Placa de circuito de LED: 64 placas por panel.	41
<i>Figura 16.</i> Controlador individual de luces LED.	41
<i>Figura 17.</i> Primer panel Solar Roadways.	42

<i>Figura 18.</i> Péndulo británico que mide la tracción del material.....	43
<i>Figura 19.</i> Nuevo prototipo de forma hexagonal con luces LED.....	44
<i>Figura 20.</i> Lado del Corredor del cable.....	44
<i>Figura 21.</i> Conducto Instalado.	45
<i>Figura 22.</i> Base vertida-contiene vidrio reciclado..	46
<i>Figura 23.</i> Carril para bicicletas en Holanda.....	46
<i>Figura 24.</i> Capas del panel prototipo. A.....	48
<i>Figura 25.</i> Perfil Metálico.	50
<i>Figura 26.</i> Capa base.	51
<i>Figura 27.</i> Capa transparente.....	52
<i>Figura 28.</i> Célula solar de silicio monocristalino cuadrada	54
<i>Figura 29.</i> Esquema de interconexión de un panel para la carretera solar	55
<i>Figura 30.</i> Panel prototipo de Solar Road.	56
<i>Figura 31.</i> Prototipos reales SR3. A.....	59
<i>Figura 32.</i> Panel de Wattway.	60
<i>Figura 33.</i> Panel usado para Wattway.....	61
<i>Figura 34.</i> Capas del prototipo SR3	62
<i>Figura 35.</i> Método de tres carriles D4255M-15 ^a	67
<i>Figura 36.</i> Vista en planta del prototipo SR3.....	68
<i>Figura 37.</i> Elemento de tres rieles para el ensayo de esfuerzo cortante.....	69
<i>Figura 38.</i> Carga avanzada para las Pruebas de Pavimento	70
<i>Figura 39.</i> Diagrama del método de tres puntos de fuerza.....	71
<i>Figura 40.</i> Panel armado con todos los elementos estructurales listos para probar.	73

<i>Figura 41.</i> Respuesta de deflexión al aplicar una carga central de 4,448 [KN].	74
<i>Figura 42.</i> Plataforma de prueba estructural.	75
<i>Figura 43.</i> Demarcación de los puntos de cargue.	75
<i>Figura 44.</i> Sistema de aplicación de fuerza aire-aceite.	76
<i>Figura 45.</i> Celda de Carga StrainSert FL5U-2SPKT. A	77
<i>Figura 46.</i> Ubicación de los instrumentos.	78
<i>Figura 47.</i> Roseta y transductor en la placa base de fibra de vidrio.	79
<i>Figura 48.</i> Sistema de prueba montado.	79
<i>Figura 49.</i> Ubicación de las cargas de prueba sobre el panel.	80
<i>Figura 50.</i> Comportamiento de la deformación por tracción del panel sometido a una carga de 4.44 KN.	81
<i>Figura 51.</i> Comportamiento inesperado de la deformación por tracción para la carga aplicada de 2.22 KN.	81
<i>Figura 52.</i> Capa óptica pegada con resina epóxica.	83
<i>Figura 53.</i> Deformación de la capa de vidrio con carga de 2.22 KN.	84
<i>Figura 54.</i> Deformación de la capa de base con carga de 2.22 KN.	84
<i>Figura 55.</i> Diferencias entre las deformaciones del modelo bajo una carga diagonal de 2.22 KN incluyendo los datos de los bordes.	85
<i>Figura 56.</i> Desfase o error entre los datos de las dos pruebas incluyendo los datos de los bordes del modelo FE.	86
<i>Figura 57.</i> Desfase o error entre los datos de las dos pruebas sin los datos de los bordes del modelo FE.	87
<i>Figura 58.</i> Falla por fatiga del pavimento.	89

<i>Figura 59.</i> Resultado del comportamiento de los materiales que representan límite de fatiga (a) y materiales que no representan límite de fatiga(b).....	90
<i>Figura 60.</i> Curva esfuerzo vs Número ciclos.	92
<i>Figura 61.</i> Límite de fatiga de la capa transparente. A	94
<i>Figura 62.</i> Límite de fatiga de la capa base. A.....	95
<i>Figura 63.</i> Muestras sometidas a congelación y descongelación.	97
<i>Figura 64.</i> Acumulación de sal en las muestras.	98
<i>Figura 65.</i> Punto base de la carga estructural para las pruebas.	98
<i>Figura 66.</i> Narices de soportes de prueba de flexión de tres puntos, collar base y nariz de carga (de izquierda a derecha).	99
<i>Figura 67.</i> Prueba del material con la Intron adaptada para el ensayo.	100
<i>Figura 68.</i> Comportamiento de los tres materiales a la flexión.....	101
<i>Figura 69.</i> Muestra de prueba de fricción saturada de agua.	102
<i>Figura 70.</i> Plataforma de prueba de fricción.	103
<i>Figura 71.</i> Espectrofotómetro Varian Cary 5000 UV / VIS / NIR.....	104
<i>Figura 72.</i> Posicionamiento de muestras para pruebas de Transmisividad (a) y reflectividad (b).	105
<i>Figura 73.</i> Transmisividad de los materiales.....	106
<i>Figura 74.</i> Reflectividad de los materiales.	106
<i>Figura 75.</i> Absortividad de los materiales.....	107
<i>Figura 76.</i> Buena transferencia de cargas usando pasadores o conectores en el pavimento rígido.	108
<i>Figura 77.</i> Mala transferencia de cargas.....	109

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1. <i>Propiedades mecánicas para la capa estructural</i>	49
Tabla 2. <i>Propiedades mecánicas de la capa transparente</i>	51
Tabla 3. <i>Máxima resistencia a la flexión de la capa transparente y al espesor de la hoja de vidrio</i>	53
Tabla 4. <i>Ensayos para el modelo SR3</i>	57
Tabla 5. <i>Ensayos para el modelo desarrollado por Andrew Northmore y la Universidad de Waterloo</i>	64
Tabla 6. <i>Especificaciones más relevantes del ensayo C272</i>	65
Tabla 7. <i>Comparación de las deflexiones del modelo FE y las pruebas</i>	88
Tabla 8. <i>Condiciones de carga de eje equivalente para Ontario Canadá</i>	91
Tabla 9. <i>Procedimientos estándar para pruebas ambientales</i>	95
Tabla 10. <i>Dimensiones promedio y la desviación estándar de las mediciones</i>	99
Tabla 11. <i>Rendimiento de una carretera solar de un kilómetro de longitud</i>	111

Lista de anexos

	Pág.
Apéndice A. Resumen de los avances de la primera fase de la empresa Solar Roadways.....	121
Apéndice B. Resumen de los avances de la segunda fase de la empresa Solar Roadways	123
Apéndice C. Diagrama de Investigación de la metodología por Andrew Bruce Northmore	124
Apéndice D. Descripción de los componentes del prototipo desarrollado por Andrew Northmore en la Universidad de Waterloo.....	125
Apéndice E. Resumen de los avances de la fase IIB de la empresa Solar Roadways con el producto SR3	126
Apéndice F. Comparación de los 3 ensayos escogidos de la ASTM.....	127
Apéndice G. Análisis de selección del artículo SOLAR ROADS.....	128
Apéndice H. Análisis de selección del artículo “SOLAR ROADWAYS” REBUILDING OUR INFRASTRUCTURE AND ECONOMY Volumen 2	129
Apéndice I. Análisis de selección del artículo FEASIBILITY STUDY OF SOLAR ROADWAYS	131
Apéndice J. Análisis de selección del artículo SOLAR ROADWAYS.....	134
Apéndice K. Análisis de selección del artículo EFFECTS OF PHOTOVOLTAIC MODULE SOILING ON GLASS SURFACE RESISTANCE AND POTENTIAL-INDUCED DEGRADATION	136

Apéndice L. Análisis de selección del artículo FIRST EVER USEWATTWAY SOLAR ROAD INSTALLED IN GEORGIA	138
Apéndice M. Análisis de selección del artículo SEGOLENE ROYAL, MINISTER OF ENVIRONMENT, ENERGY AND SEA, UNVEILS ONE KILOMETER OF WATTWAY SOLAR ROAD IN NORMANDY, (FRANCE).....	139
Apéndice N. Análisis de selección del artículo SMART COOLING SYSTEM FOR THE URBAN ENVIRONMENT	141
Apéndice Ñ. Análisis de selección del artículo SOLAR ROADWAYS: THE FUTURE WE’VE BEEN LOOKING FOR	143
Apéndice O. Análisis de selección del artículo PAVING THE WAY TO THE TOMORROW’S ENERGY	146
Apéndice P. Análisis de selección del artículo SOLAR ROADWAYS-THE FUTURE OF ROADWAYS	149
Apéndice Q. Análisis de selección del artículo A REVIEW ON SOLAR ROADWAYS	151
Apéndice R. Análisis de selección del artículo EXAMINING THE OPPORTUNITIES ASSOCIATED WITH SOLAR ROADWAYS	153
Apéndice S. Análisis de selección del artículo SOLAR ROADWAYS	156
Apéndice T. Análisis de selección del artículo SOLAR ROADS FIND MANY USES	159
Apéndice U. Análisis de selección del artículo SOLAROAD PAVING THE WAY TO THE ROADS OF THE FUTURE.....	161
Apéndice V. Análisis de selección del artículo STANDARDIZED TESTING OF NON- STANDARD PHOTOVOLTAIC PAVEMENT SURFACE	163

Apéndice W. Análisis de selección del artículo “SOLAR ROADWAYS” REBUILDING OUR INFRASTRUCTURE AND ECONOMY Volumen 2	165
Apéndice X. Análisis de selección del artículo CANADIAN SOLAR ROAD PANEL DESING: A STRUCTURAL AND ENVIRONMENTAL ANALYSIS	167
Apéndice Y. Intensidad solar en la superficie de Colombia.....	170

Resumen

Título: Estado del arte del uso de nuevas tecnologías en la construcción de superficies de rodadura vehicular con paneles solares*

Autoras: Luisa Fernanda López Murcia**
Marly Yanith Fandiño García

Palabras clave: Carreteras, Energía eléctrica, Energía solar, Medio ambiente, Paneles solares.

Descripción:

El uso de paneles solares en las superficies de rodadura vial para generar energía eléctrica y suplir las necesidades básicas de los seres humanos parece una gran idea desde una perspectiva muy superficial ya que se plantean ventajas como cambiar el área de granjas de recolección de energía por la vasta extensión de malla vehicular y así aprovechar estas para otros tipos de producción económica, suplir de iluminación el alumbrado público, crear puntos de recarga para los medios de transporte eléctrico, y nuevos y mejorados sistemas de señalización de las carreteras para la prevención de accidentes. Este proyecto presenta un recuento histórico de la creación y la evolución de la ingeniería de caminos y muestra información detallada de experimentos e investigaciones, que se llevaron a cabo en distintos lugares del mundo, y sus particulares formas de implementar esta nueva tecnología mostrando sus fases y transformaciones a través del tiempo para la mejora de los materiales que formarán los paneles solares especializados para carreteras. Sometieron los materiales a diferentes tipos de ensayos para estudiar si los prototipos lograban, como mínimo, los requerimientos de carga vial y los factores ambientales. La información permitió realizar una comparación en ciertos aspectos de algunos modelos de paneles solares y analizar su desempeño estructural como superficies de rodadura vial y proveedor de energía eléctrica.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Sandra Milena Cote Vargas, Magíster Ingeniera Civil

Abstract

Title: State of the art of the use of new technologies in the construction of vehicular running surfaces with solar panels*

Authors: Luisa Fernanda López Murcia**
Marly Yanith Fandiño García

Keywords: Roads, Electric power, Solar energy, Environment, Solar panels

Description:

The use of solar panels on road surfaces to generate electrical power in order to supply the basic needs of human beings seems a great idea from a very superficial perspective since there are advantages such as changing the area of energy harvesting farms for the vast extension of vehicular mesh and thus take advantage of these farms' areas for other types of economic production, supplying lighting for public lighting, creating recharging points for electric means of transport, and new and improved road signaling systems for the prevention of accidents. This project presents a historical account of the creation and evolution of road engineering and shows detailed information on experiments and research carried out in different parts of the world and their particular ways of implementing this new technology, showing its phases and transformations over time to improve the materials that will form specialized solar panels for roads. They submitted the materials to different types of tests to study if the prototypes achieved, at least, the road load requirements and environmental factors. The information allowed a comparison in some aspects of some solar panel models and analyze their structural performance as road surfaces and as an electric power supplier.

* Degree work

** Faculty of Mechanical Physics Engineering. School of Civil Engineering. Director: Sandra Milena Cote Vargas, Magister Civil Engineer

Introducción

La presente investigación se refiere al tema de una nueva tecnología que se usará en las carreteras para generar energía eléctrica y contribuir con el planeta, mostrando una minuciosa información acerca del desarrollo de este nuevo conjunto de técnicas y sus materiales.

La energía eléctrica es un recurso indispensable para la humanidad. Mejora la calidad de vida y es fundamental para la productividad comercial e industrial de nuestro país. El problema que se presenta a raíz de esto, es que la demanda de la electricidad cada vez va aumentando debido al crecimiento de la población y por ende de las ciudades, que requieren de más energía, sin contar el gasto innecesario que se hace en algunos sectores del país.

La energía eléctrica en el país se produce mediante fuentes hidroeléctricas y combustibles fósiles. Las fuentes hidroeléctricas son grandes generadores de electricidad que al ser construidas cambian el ecosistema drásticamente causando pérdidas de la población de especies animales y vegetales que dependen de estos ríos. Los combustibles fósiles liberan gases que dañan el medio ambiente. La combustión produce ácidos (sulfúrico y carbónico) los cuales suben a la atmósfera regresando como lluvia ácida que destruye la vegetación y afecta el suelo y el agua. El monóxido de carbono evita que la radiación infrarroja de la tierra se libere de forma normal ocasionando el calentamiento global.

Como alternativa amigable con el ambiente aparecen las fuentes de energía no convencionales, como el uso de células fotovoltaicas para la producción de energía mediante el aprovechamiento de la radiación del sol. Pero si se quiere generar tanta energía como para abastecer a un poblado grande el inconveniente es que la instalación requerirá de grandes extensiones de tierra, por lo que

surge la idea de acoplar estas células solares en la superficie de las carreteras y así aprovechar mejor el área de rodadura vial.

Para ello grandes centros investigativos crearon modelos de paneles solares que resisten las solicitaciones del tráfico y las inclemencias del clima.

Ha sido un camino corto, emprendido, más o menos, hace 12 años atrás, cuando las primeras ideas sobre rediseñar una superficie vial surgieron de algunos ingenieros y corporaciones.

El progreso que lleva esta nueva tecnología y un análisis del desempeño de los primeros prototipos de carreteras con paneles solares se presenta en este artículo a modo de estado del arte. Comparando las metodologías de desarrollo de los proyectos y las actividades investigativas se entrega un aporte bibliográfico e innovador a la universidad concluyendo sobre las ventajas y desventajas que tiene la implementación de esta tecnología en las carreteras, hasta este punto desarrollada.

1. Metodología

A continuación, se describe el proceso investigativo para la recolección y clasificación de la información:

1.1 Seleccionar y organizar fuentes de información disponibles.

Para este proyecto se realizó una recopilación y clasificación de la información disponible incluyendo libros, artículos, y revistas provenientes de la base de datos de la Universidad Industrial de Santander y datos de los sitios web oficiales de centros investigativos que están a la vanguardia de esta tecnología.

Utilizamos una aplicación online y de escritorio llamada Mendeley que se usó como recurso de apoyo para crear, mantener, organizar y dar forma a la bibliografía disponible, eliminando las duplicaciones de artículos e insertando las citas bibliográficas en el estilo adecuado para la investigación y organizar de manera adecuado los artículos seleccionados. (Ver: Apéndice G- Apéndice X)

2. Marco teórico

2.1 Historia de las carreteras

2.1.1 Recuento histórico del sistema de caminos y carreteras en Europa y el Oriente.

Millones de vehículos recorren a diario las rutas trazadas hace ya varios años por ingenieros y especialistas haciendo posible la existencia del sistema económico global actual, la movilización de personas de una zona a otra y el intercambio socio-económico entre comunidades. Algo curioso es pensar que el tiempo de vida de las actuales calzadas es muy corto en comparación con el tiempo que su sistema de construcción lleva vigente.

La carretera más antigua fue la *Carretera Real Persa* que estuvo en explotación desde el año 3500 a 300 antes de Cristo aproximadamente, empezaba en Susa hasta Esmirna con una distancia de 2.957 Km y según Heródoto se tardaba 93 días en recorrerla en el año 475 antes de Cristo. (Blanco Zorio, 1987)

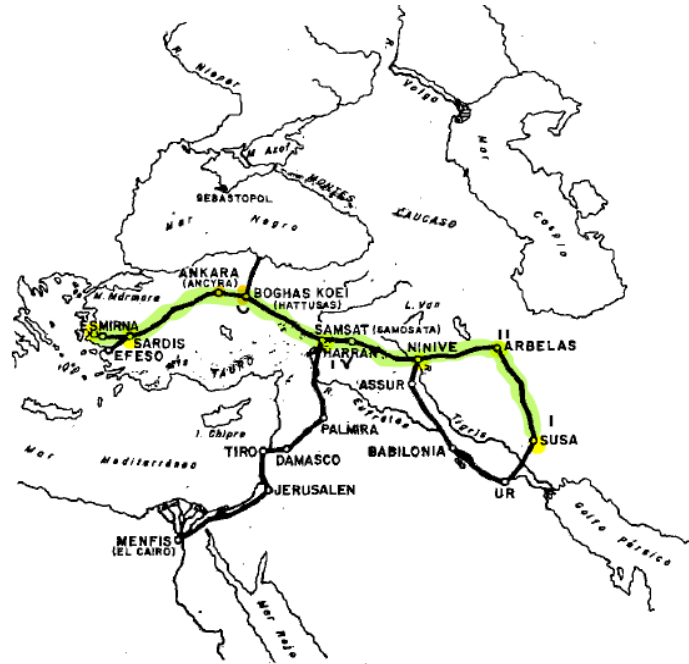


Figura 1. Carretera Real Persa. Adaptado de Blanco Zorio, V. (1987). Breve historia de las Carreteras. Revista de Obras públicas. Disponible en: http://ropdigital.ciccp.es/pdf/publico/1987/1987_enero_3254_04.pdf

En el periodo entre los 3250 y 2750 antes de Cristo, en la India, Baluchistan y Penjab estaban pavimentadas con ladrillo cocido unidos con betún, y se dedicaba un cuidado especial a la evacuación del agua.

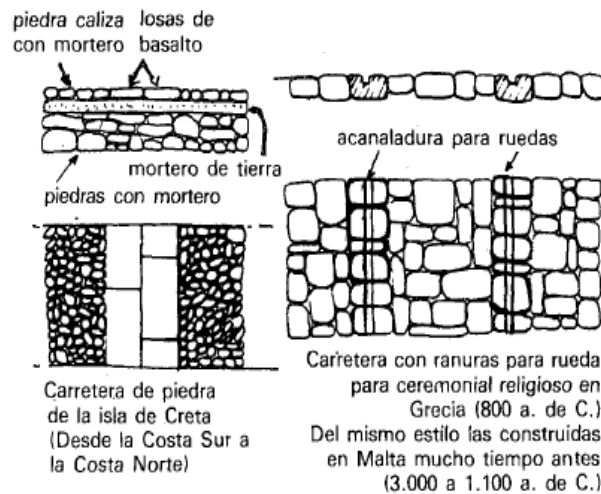


Figura 2. Perfil de carretera con acanaladura. Adaptado de Blanco Zorio, V. (1987). Breve historia de las Carreteras. Revista de Obras públicas. Disponible en: http://ropdigital.ciccp.es/pdf/publico/1987/1987_enero_3254_04.pdf

Entre los años 2000 y 1500 a.C en la Isla Malta construyeron carreteras de carril único, formadas por dos acanaladuras en V cortadas en arenisca de coral de la Isla, siendo transitadas por carros con las ruedas introducidas dentro de las muescas y arrastradas por los hombres. En el año 800 a.C se construyen en Grecia carreteras sagradas con fines religiosos. (Blanco Zorio, 1987, pág. 31)

En el año 1500 a.C los romanos construyeron caminos, los cuales eran cubiertos con arena, grava o césped; además usaron zanjas para reducir la humedad y aumentar la capacidad portante. (Ver figura 3)

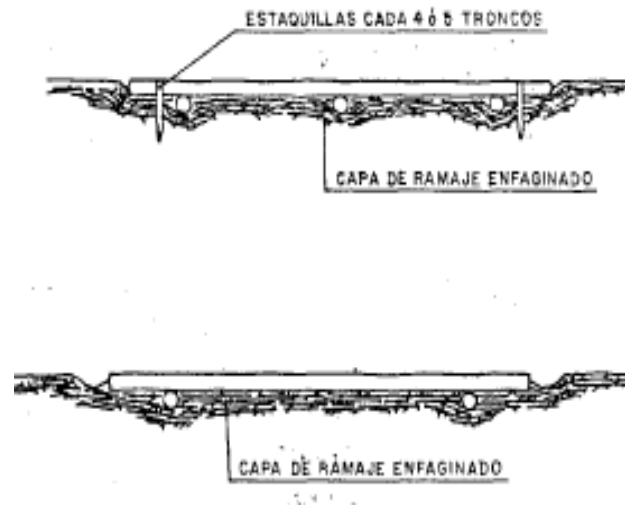


Figura 3. Caminos cubiertos con arena, grava o césped. Adaptado de Blanco Zorio, V. (1987).

Breve historia de las Carreteras. Revista de Obras públicas. Disponible en: http://ropdigital.ciccp.es/pdf/publico/1987/1987_enero_3254_04.pdf

Entre los años 700 a 600 antes de Cristo se construyó la carretera procesional en el Templo de Ishtar que unía palacios y templos entre las ciudades de Assur y Babilonia, estas carreteras fueron elaboradas con ladrillo cocido y piedras unidos por mortero bituminoso siendo pioneros de las calzadas romanas.

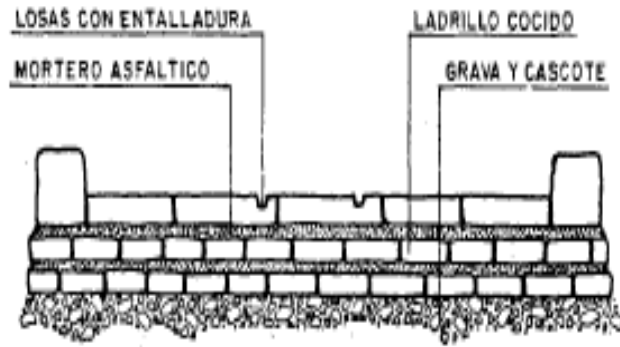


Figura 4. Carretera procesional en el templo de Ishtar Adaptado de Blanco Zorio, V. (1987). Breve historia de las Carreteras. Revista de Obras públicas. Disponible en: http://ropdigital.ciccp.es/publico/1987/1987_enero_3254_04.pdf

Las primeras calzadas modernas en la historia de la civilización fueron construidas por los romanos cuya técnica perduró hasta el siglo XVIII. Utilizaron técnicas cuidadosas para la elaboración de las carreteras, reconocida como admiración en la ingeniería moderna, crearon la Vía Apia que es considerada un tipo de calzada de alta calidad; donde usaron una capa de piedras planas llamadas “statumen” con espesores de 25 a 60 cm, luego se le extendieron una capa de detritus de cantera mezclado con cal “rudus” con un espesor de 22,5 cm, para la base una capa de piedra partida aglomerada por cal grasa con un espesor de 30 cm llamada “nucleus” y de pavimento incluyendo la capa de rodadura utilizaron un enlosado con mortero de cal de 15 cm de espesor que se hacía llamar “Summun dorsum o summa crusta”, dejando un espesor total de la calzada entre 0.9 a 1,5 [m]. (Blanco Zorio, 1987)

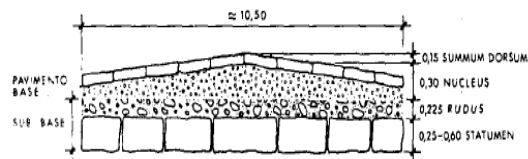


Figura 5. Vía Apia. Adaptado de Blanco Zorio, V. (1987). Breve historia de las Carreteras. Revista de Obras públicas. Disponible en: http://ropdigital.ciccp.es/pdf/publico/1987/1987_enero_3254_04.pdf

Para las calzadas de segunda categoría solo se construía la subbase y base y para las de tercera categoría eran las formadas por la tierra simplemente. Esta técnica un modelo en el año 300 a.C y un tipo estándar para los siguientes 2000 años.

La *Ruta de la Seda* que hacia el año 200 a.C tuvo mayor circulación se crea con los métodos de los romanos, siendo la ruta comercial más importante por su longitud de 12.800 km. (Blanco Zorio, 1987)

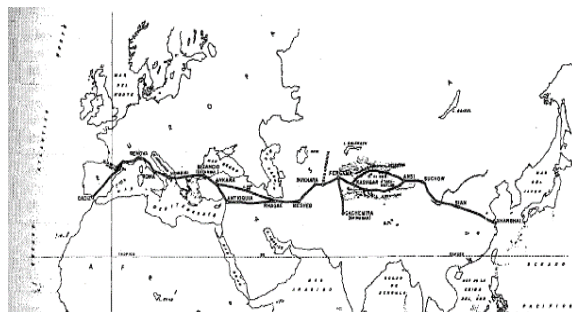


Figura 6. Ruta de la Seda. Adaptado de Blanco Zorio, V. (1987). Breve historia de las Carreteras. Revista de Obras públicas. Disponible en: http://ropdigital.ciccp.es/pdf/publico/1987/1987_enero_3254_04.pdf

Ya en el año 75 antes de Cristo se empezó a usar el pavimento de ladrillo y enlosado de piedra, un tipo de hormigón como capa de base y los principios de relleno de hendiduras con yeso, cal o mortero bituminoso. (Blanco Zorio, 1987)

2.1.2 Colombia. En Colombia nace la red de caminos que marcan el inicio de la formación de nuestra infraestructura vial, estos nacieron para satisfacer la necesidad del intercambio comercial de los indígenas en el territorio, llevándolo al desarrollo comercial. Cuando los españoles llegaron convirtieron algunos lugares costeros puntos estratégicos para el intercambio comercial (Muñoz, 2001). A su vez existían caminos de herraduras que era por donde los indígenas transitaban (Fig. 7). (Baquero, 2014)



Figura 7. Carguero indígena por el camino de herraduras. Adaptado de Fundación Estanislao Merchán-Cano. Isidoro Medina Patiño. Disponible en: <http://www.isidorohistoria.com/historia>

El medio de transporte en Colombia empezó a través del Río Magdalena, pero existía la ausencia de sistemas de comunicación entre las regiones; por ello se hizo necesaria la construcción de un sistema de conexión terrestre eficaz, llevando la idea de construir carreteras para el transporte

y comunicación en todo el país, elaborando un plan vial en 1846 que decreta caminos nacionales importantes para el desarrollo comercial del país.

En 1864 se creó la Ley 28 de mayo, siendo el primer paso para crear un plan integral de infraestructura debido a que las cargas que pasaban superan la resistencia del pavimento, esta ley se completó con la ley 52 de 1872, considerando una carretera la que sobrepasará 6 metros de anchura.

En el siglo XX se expande la red vial terrestre de tipo multimodal, carretera y ferrocarril. Este cambio se dio debido al ingreso del automóvil en el país.

Entre los años 1910 a 1920 se construyó la carretera Cali-Cartago, es decir, una vez fue creado el departamento del valle empezó a funcionar. (Barepcultural., 2017)

En 1951 se crea el Ministerio de Obras Públicas y Transporte (MOPTI), creado para establecer las primeras normas para la construcción de carreteras nacionales siendo un gran impulso para seguir construyendo carreteras. (Muñoz, 2001)

En 1984 se crea el Instituto Nacional de Vías (INVIAS) que es uno de los grandes logros del estado para la modernización de las carreteras, siendo en la actualidad la agencia del gobierno que asigna, regula y supervisa los contratos para la construcción y mantenimientos de autopistas y carreteras en el país. (Muñoz, 2001)

2.2 Época moderna, avances globales en la ingeniería de carreteras:

Un avance para las carreteras en la modernidad se le atribuye a Thomas Telford ya que el sistema de Telford cavó una zanja e instaló cimientos de roca pesada (SMILES, 1904). Estos cimientos se levantaban en el centro para que la carretera se inclinara hacia los bordes permitiendo

el desagüe. La capa inferior o cimientos de árido grueso (tamaño hasta 100 milímetros) y de un espesor de 7,5 a 18 centímetros. (COLLINS, y HART, 1936). Encima de esta capa se colocaban dos capas de áridos de unos 65 milímetros de tamaño máximo y espesor de 15 a 25 cm y finalmente encima de ésta una capa de 4 cm de grava densamente compactada. Se estima que este sistema soportaría una carga cercana a 88 N/mm (Tino Ramos, 2007, págs. 16–25.).

Seguido de John McAdam quien observa las carreteras británicas pavimentadas en el siglo XIX estaban compuestas por grava redondeada (SMILES, 1904) y la reemplazó por árido angular (tamaño máximo de 75 milímetros) en dos capas para una profundidad total a los 20 centímetros (GILLETTE, 1906). Encima de esta capa se colocaban 50 milímetros de árido grueso con un tamaño máximo de 25 milímetros. (COLLINS, y HART, 1936) para proporcionar un pavimento liso para las ruedas del carro y utilizó una superficie inclinada del subsuelo para mejorar el drenaje, puesto que McAdam mantenía la idea que la tierra bien drenada soportaría cualquier carga. Así que la profundidad total de un pavimento macadán era 250 milímetros aproximadamente. (Tino Ramos, 2007) Este diseño de pavimento se evaluó para soportar una carga permitida de 158 N/mm.

En 1850 en las áreas urbanas del reino unido funcionaban 2200 km tipo macadán. En 1823 llegó el primer pavimento macadám a los Estados Unidos, construyéndose en Maryland. Sin embargo, *“los cimientos de la tierra macadamizada no soporto los camiones pesados usados para la I Guerra Mundial, por ello volvieron al sistema Terford ya que proporcionaba una mejor distribución de carga de la carretera sobre el subsuelo subyacente”* (Tino Ramos, 2007).

Al llegar el carro y la bicicleta se opta por mejorar las carreteras y crear muchas más, como avance para reparar las carreteras se usó alquitrán de hulla, alquitrán y aceites como aglomerante de superficie y como soportes de penetración, estos nuevos aportes se consideraban convenientes solo para el tráfico ligero por ello no se colocaban dentro de las ciudades.

Hacia 1870 la industria del petróleo empezó a usar betunes de destilación para la fabricación de mezclas; hasta el siglo XIX el norteamericano C. Richardson mostró la pavimentación con mezclas bituminosas. Esta nueva tecnología se desarrolla hasta después de la 1 Guerra mundial, de este modo durante la segunda Guerra Mundial se desarrolló una cantidad enorme de mezcla bituminosa para la construcción rápida de aeródromos con fines militares (Tino Ramos, 2007).

A partir de 1920 el transporte por carretera comenzó un rápido proceso de transformación a nivel mundial, teniendo un considerable aumento de tráfico, entre ellos tráfico pesado lo que conlleva a un procedimiento de diseño de las carretas tanto en Europa como en América, por ello método de dimensionamiento más conocido para el diseño y construcción de carreteras es el “AASHO Road Test” llevado a cabo en Ottawa Estados Unidos, desde 1958 a 1960, como resultado a dicho ensayo se publicó en 1961 la guía provisional AASHO Interim Design Guide, la cual se va actualizando a medida que el tiempo transcurre para mejorar la calidad del pavimento. (Tino Ramos, 2007)

2.3 Desarrollo de los paneles solares como medio de energía renovable

El principio de funcionamiento de las células solares fue descubierto por Albert Edmund Bequerel en 1837 llamado efecto fotoeléctrico. El físico francés descubrió usando una pila electrolítica que al aumentar la frecuencia de la luz que daba a la pila se generaba una fuga de electrones del material (que se traduce en electricidad).

De esta forma se sabe que al aumentar la frecuencia de la onda de luz algunos materiales reaccionan liberando electrones y que el aumento de su intensidad genera un crecimiento en la cantidad que se escapan del elemento (mayor flujo eléctrico).

Sin embargo, no fue hasta 1956 que “*Daryl Chapin, Calvin Fuller y Gerald Pearson, de los Laboratorios Bell Telephone, desarrollan la primera célula de silicio, la cual da origen a la primera estructura fotovoltaica que lograba convertir luz en electricidad con una eficiencia razonable (6%)*”. (Solis, 2012, pág. 42)

Descubren por error que el silicio impuro también es susceptible a la luz (combinan el silicio puro con elementos cuyo último nivel de energía posee 3 o menos electrones de valencia) y que si se pone junto a una capa de silicio puro se crean dos puntos, polos o diodos. Positivo (+) y negativo (-).

Los electrones tienden a moverse del diodo negativo (la lámina de silicio pura cargada negativamente debido a la influencia de los fotones de luz) hacia el diodo positivo (la lámina de silicio impura) pero necesitan de una conexión o medio que los lleve de un polo al otro. Este movimiento es la electricidad tal como lo descubrió Bequerel con el efecto fotoeléctrico.

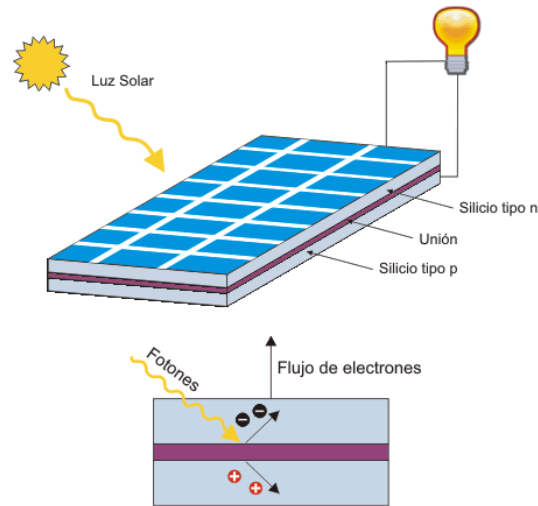


Figura 8. Efecto Fotovoltaico en una célula Solar. Adaptado de Celdas Solares. (2005). Textoscientificos.com. Retrieved 19 October 2017, Disponible en: <https://www.textoscientificos.com/energia/celulas>

En 1955 Hoffman Electronic, empresa de Illinois, USA, ofrece células del 3% de 14mW a 1.500 \$/Wp) para propósitos aeroespaciales con la NASA.

En 1957 Hoffman Electronic alcanza el 8 % de rendimiento en sus células y el 17 de marzo de 1958 se lanza el primer satélite alimentado con energía solar. El satélite lleva una superficie cubierta con el panel, aproximada de 100 cm², para alimentar un transmisor de respaldo de 5 mW, que estuvo operando 8 años

Para el año de 1959 la misma compañía alcanza el 10 % de rendimiento en sus células comerciales y en 1962 se lanza el primer satélite comercial de telecomunicaciones, el Telstar, con una potencia fotovoltaica de 14W.

A partir de la década de los 70s el uso de paneles solares se intensifica para usos terrestres habiendo mejoras de hasta el 20% en su rendimiento.

Actualmente el 10% de la energía total creada en todo el planeta es generada usando celdas solares siendo China y España los mayores productores. Los paneles han incrementado su rendimiento a más del 50% pero con todo y los avances en este campo tecnológico aún existen perdida que se ilustran mejor en la siguiente imagen:

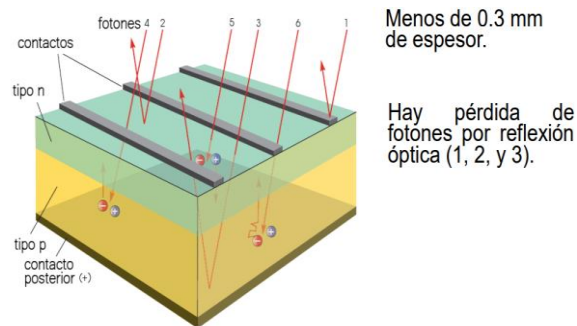


Figura 9. Esquema Básico de una Celda Solar de Si cristalino. Adaptado de Solis, J. (2012). Física de Celdas Fotovoltaicas. Universidad Nacional de Ingeniería de Perú, 42. Disponible en: http://www.perusolar.org/wp-content/uploads/2012/12/III_Jsolis1.pdf

2.3.1 Tipos de sistemas o circuitos integrados. “Se le llama sistema solar fotovoltaico al sistema integrado por distintos elementos que interactúan entre sí para la conversión de la energía solar a energía eléctrica, los componentes del sistema solar fotovoltaico son los paneles, controlador, baterías e inversor”. (Cardozo Piña, 2014, pág. 50)

Cuando la corriente se usa para alimentar dispositivos electrónicos (como el computador y aparatos eléctricos comunes del hogar) se requiere que sea alterna, en forma de onda sinusoidal, sin embargo, la corriente que entrega el panel solar al conductor es directa. Para esto se usa el inversor que convierte la corriente directa en alterna antes de llegar a los aparatos.

Las baterías son almacenadores de energía para su uso en caso de emergencia o de falta de iluminación solar en días nublados. Los controladores regulan la cantidad de corriente que los paneles entregan al circuito.

Usando estos elementos se pueden crear 3 tipos de circuitos, el aislado, el interconectado, y una combinación de los dos el mixto.

El circuito aislado contiene un sistema de baterías que almacena la corriente creada por los paneles para posterior uso cuando sea requerida. En este tipo de sistema el único generador de energía es el panel solar.

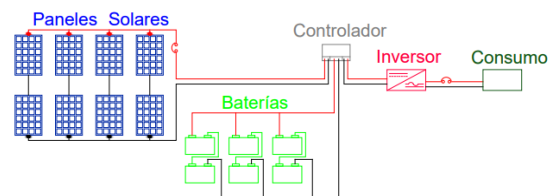


Figura 10. Diagrama Sistema FV con respaldo aislado. Adaptado de Cardozo Piña, A. (2014). Cálculo y Diseño de Sistema Solar Fotovoltaico para Uso Doméstico. Universidad Nacional Autónoma de México, 50. Disponible en: <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/6924/TESINA.pdf?sequence=1>

Por otro lado, un circuito interconectado posee una conexión a la red pública de electricidad, CFE, y cuando el conjunto de paneles excede la producción de energía necesaria para el consumo del hogar este la transfiere a la CFE haciendo descuento del consumo en la factura. En este tipo de circuitos un medidor se hace necesario para conectar la red pública con el consumo y el suministro del panel.

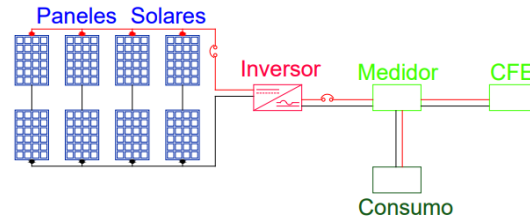


Figura 11. Diagrama sistema FV sin respaldo interconectado a la red. Adaptado de Cardozo Piña, A. (2014). Cálculo y Diseño de Sistema Solar Fotovoltaico para Uso Doméstico. Universidad Nacional Autónoma de México, 50. Disponible en: <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/6924/TESINA.pdf?sequence=1>

3. Desarrollo de la investigación

3.1 Creación de prototipos y parámetros de diseño.

Para agosto del 2009 Solar Roadways Incorporated recibe una dotación de 100.000 dólares por el Departamento de Transporte de los Estados Unidos para la financiación de una primera fase llamada Small Business Innovative Research (Phase I SBIR) que tenía como objetivo crear un prototipo que cumpliera con el siguiente pliego de atributos:

- ✓ Generar su propio poder; ya sea a través de la energía del sol o quizás la energía de la masa del vehículo en movimiento que viaja sobre el pavimento.
- ✓ Es lo suficientemente inteligente como para transferir la potencia generada al lugar más necesario o a un dispositivo de almacenamiento temporal.

- ✓ Está hecho de materiales reciclados u otros materiales sostenibles.
 - ✓ Puede ser modular para facilitar la sustitución de secciones desgastadas o dañadas.
 - ✓ Es lo suficientemente resistente para resistir la carga repetida del tráfico pesado en o por encima del nivel de los sistemas actuales de pavimento
 - ✓ Resuelve o supera las características de seguridad de los sistemas de pavimento existentes.
 - ✓ Mitiga la escorrentía de agua a través de la permeabilidad o de la retención y filtración diseñadas.
- (Solarroadways.com., 2017)

Tiene un costo que le permite ser económicamente autosuficiente; lo que significa que los beneficios de la generación de energía y la mitigación de la escorrentía del agua durante la vida útil del diseño superan su costo inicial.

Se pensó que el plástico sería un buen material que podía cumplir con estas características, pero al tener en cuenta factores de degradación a largo plazo el plástico no era más una opción viable para la superficie de rodadura de las carreteras.

Los laboratorios del Instituto de Investigación de Materiales de Penn State y del Instituto de Investigación de la Universidad de Dayton:

Sin dudar, sugirieron el uso del vidrio para la superficie. A diferencia del plástico, las propiedades ópticas del vidrio son estables frente a la solarización (oscurecimiento a largo plazo) y otros mecanismos inducidos por UV de degradación del material". (Solarroadways.com., 2017)

El vidrio verdoso que se muestra a continuación se llama vidrio de soda cal y es el tipo más común. Las ventanas y las botellas generalmente están hechas de vidrio de soda cal. El tinte verde es causado por el contenido de hierro del vidrio. (Solarroadways.com., 2017)

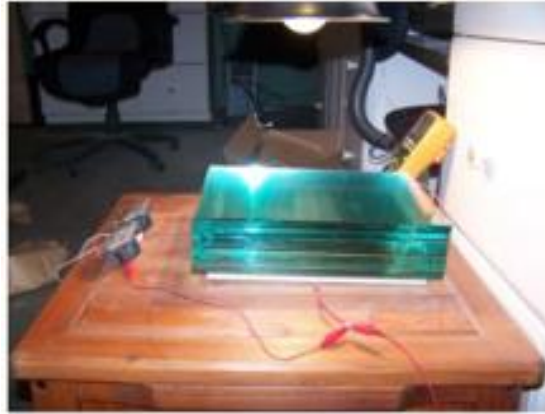


Figura 12. Primera muestra de vidrio. Adaptado de Solarroadways.com. (2017) R&D-SolarRoadways. Disponible en: <http://www.solarroadways.com/Research/Research>.

En pro de hacer un modelo de carretera totalmente amigable con el ambiente el diseño inicial de la carretera moderna contó con un canal de recolección que captura y filtra el agua lluvia antes de que llegue a algún caudal natural o a su vez, por medio de motobombas dirigirla a otros lugares y darle diferente uso. *“Algunos estudios muestran que más del 50 por ciento de la contaminación del agua es causada por el agua de lluvia.”* (Solarroadways.com., 2017)

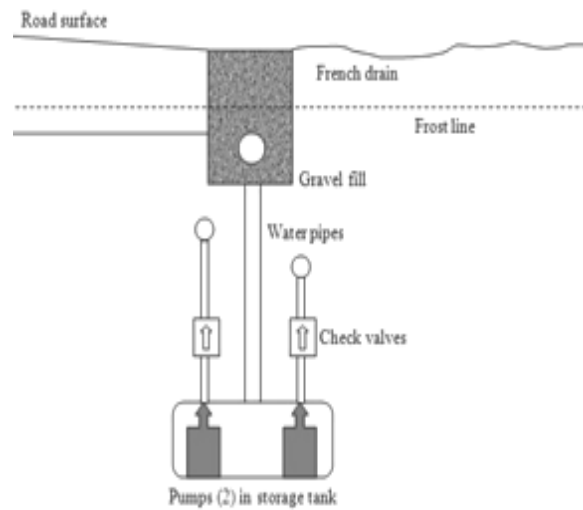


Figura 13. Vista en corte del sistema de retención de aguas pluviales. Adaptado de Solarroadways.com. (2017) R&D- SolarRoadways. Disponible en: <http://www.solarroadways.com/Research/Research>.

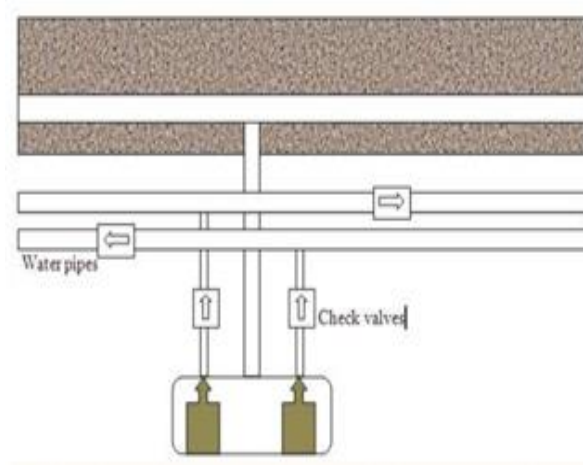


Figura 14. Vista lateral del sistema de retención de aguas pluviales. Adaptado de Solarroadways.com. (2017) R&D- SolarRoadways. Disponible en: <http://www.solarroadways.com/Research/Research>.

El primer panel que diseñaron (prototipo SR1) ese mismo año contaba con una matriz de 32x32 celdas de luces LED:

Cada celda contiene 3 LED blancos y 3 amarillos para simular cualquier configuración de pintura de línea de carretera. Esto requirió 64 placas de circuito para crear el SR1 de 12 pies por 12 pies. Se necesitaba otra tarjeta de circuitos para la unidad de control del microprocesador. (Solarroadways.com., 2017)

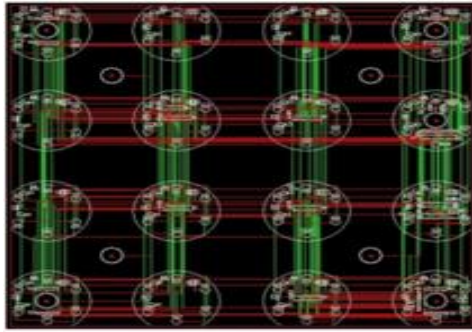


Figura 15. Placa de circuito de LED: 64 placas por panel. Adaptado de Solarroadways.com. (2017)

R&D- SolarRoadways. Disponible en: <http://www.solarroadways.com/Research/Research>.

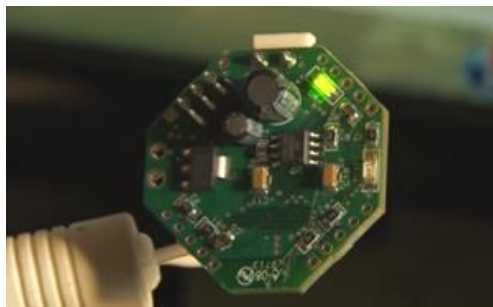


Figura 16. Controlador individual de luces LED. Adaptado de Solarroadways.com. (2017). Solar

Freakin' Videos. Disponible en: <http://www.solarroadways.com/Product/Videos#>

El resumen de los avances de la primera fase se encuentra en el **Apéndice A**.

Después de los estudios electrónicos los paneles de 12x12pies se sometieron a pruebas iniciales correspondientes al área de la ingeniería civil, pero resultaron ser muy ineficientes y pesados para el transporte y la instalación ya que su enorme tamaño no permitía la definición de las curvas horizontales y verticales.

La imagen siguiente muestra el resultado final de la primera fase de la compañía.



Figura 17. Primer panel Solar Roadways. Adaptado de Solarroadways.com. (2017). Solar Roadways Specifics. Disponible en: <http://www.solarroadways.com/Specifics/Electrical>

En julio del 2011 Solar Roadways recibe fondos de 750,000 dólares para iniciar la fase II SBIR. En esta fase construirían un estacionamiento de prueba hecho de paneles fotovoltaicos.

El prototipo se redujo a una forma hexagonal de aproximadamente 4 pies cuadrados (SR2). “*El resultado final pesó 110 libras, por lo que un individuo podría ubicarlo en un vehículo para transportarlo. La pequeña forma hexagonal también permitía acomodarlo en curvas y colinas*” (Solarroadways.com., 2017)

Solucionado el problema del tamaño y el peso el gran obstáculo fue la creación de un vidrio lo suficientemente fuerte como para resistir el peso de un camión cargado, con un coeficiente de fricción tal que evitara que los vehículos se deslizaran sobre la superficie tanto seca como húmeda y que a la vez permitiera que la luz solar pasara hasta las celdas solares.

Inicialmente probaron con un vidrio de huella de rugosidad aprobado por la ADA (acta de americanos con discapacidad). Se usó un probador de péndulo británico para medir la tracción del material.

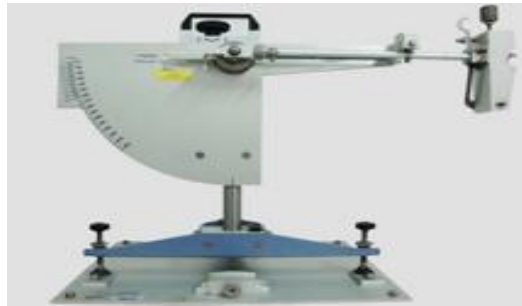


Figura 18. Péndulo británico que mide la tracción del material. Adaptado de Site.concreservicios.com.co. (2017). Péndulo Británico. Concreservicios. Disponible en: <http://site.concreservicios.com.co/index.php/pendulo-britanico>

Los resultados del vidrio dieron que este era capaz de detener un vehículo que viaja a aproximadamente 64km/h en una superficie mojada en la distancia requerida. Datos muy buenos, pero para la implementación de este prototipo en carreteras transitadas por vehículos que superan diariamente los 80km/h no era suficiente. Así que se mejoró la superficie de rodadura alcanzando a detener un vehículo que conducía a una velocidad de aproximadamente 128 Km/h.

Por otro lado, las solicitaciones de carga se evaluaron con pruebas de resistencia de impacto y pruebas de carga. Las pruebas de carga demostraron que el SR2 resistía 250,000lb (113,636Kg

aprox.) y la confirmación de los datos por el análisis del Método de Elementos Finitos 3D (simulación por computadora) fue la misma, 250,000lb.

El diseño de las luces LED les exigió bombillas de alta intensidad para que se vieran durante el día y se redujo la cantidad a 51 LED blancos y 51 LED amarillos por hexágono usados para simular cualquier configuración de línea de carretera.

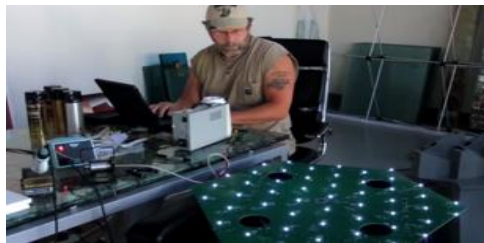


Figura 18. Nuevo prototipo de forma hexagonal con luces LED. Adaptado de Solarroadways.com. (2017). Solar Freakin' Videos. Disponible en: <http://www.solarroadways.com/Product/Videos#>

En diciembre de ese mismo año se instaló el primer prototipo de la compañía Solar Roadways. Un parqueadero en Sagle, Idaho compuesto de paneles SR2.



Figura 20. Lado del Corredor del cable. Adaptado de Solarroadways.com. (2017) R&D-SolarRoadways. Disponible en: <http://www.solarroadways.com/Research/Research>.

Como se observa en la figura anterior, el proceso de elaboración de una carretera con paneles solares es casi el mismo que se usa actualmente.

Primero se debe excavar, nivelar y compactar el suelo, el muro de la imagen anterior es el que separa los canales de recolección de aguas lluvia y el canal de cableado electrónico de la zona donde se instalarán los paneles.

Se aplica el relleno de la subrasante usando los mismos métodos de diseño de una carretera convencional y se instala la red de tubería por la que va el cableado que conecta las células fotovoltaicas con los controladores y demás elementos del circuito.



Figura 19. Conducto Instalado. Adaptado de Solarroadways.com. (2017) R&D- SolarRoadways. Disponible en: <http://www.solarroadways.com/Research/Research>.

Se cubre la tubería con una mezcla de concreto y queda lista la subrasante de la carretera para ensamblar los módulos.



Figura 20. Base vertida-contiene vidrio reciclado. Adaptado de Solarroadways.com. (2017) R&D-SolarRoadways. Disponible en: <http://www.solarroadways.com/Research/Research>.

El resumen de los avances de la segunda fase se encuentra en el **Apéndice B**.

Mientras la fase II SBIR estaba arrojando mejoras positivas, en Holanda para el año 2014 se instala el primer prototipo de carril para bicicletas en Krommenie en la localidad de Zaanstad. La longitud de la cicloruta es de 1Km y la superficie está hecha de paneles rectangulares de 2.5m por 3.5m.



Figura 21. Carril para bicicletas en Holanda. Adaptada de SOLAROAD, “Paving the way to the road of the future, pdf

Las láminas solares están encajonadas en un módulo de concreto que protege entre otras cosas el cableado del circuito que transporta la energía eléctrica y de capa superficial se usó vidrio templado con superficie rugosa para garantizar la fricción entre los neumáticos y la vía.

En el primer año de prueba los módulos generaron 9,800 kW/h de energía, lo suficiente para abastecer a tres viviendas normales. Teniendo en cuenta que de la ciclo ruta sólo el carril de la derecha mostrado en la imagen anterior es fotovoltaico, los resultados del primer prototipo son buenos.

En ese mismo año se publica en Canadá el desarrollo de un estudio de la construcción de un prototipo de panel solar para carretera considerando principalmente su desempeño estructural y ambiental, tanto para el módulo como para cada material que lo compone individualmente.

La metodología de la investigación realizada por Andrew Bruce Northmore en el Centro de Pavimento y la Tecnología del Transporte (CPATT), el Laboratorio de Ingeniería Civil y el Laboratorio de Energía Solar Térmica de la Universidad de Waterloo tuvo en cuenta pruebas para el análisis de la respuesta de los materiales a la deflexión y el esfuerzo a compresión y como base de comparación usó el método de elementos finitos.

Para el comportamiento a la exposición del medio ambiente los módulos fueron expuestos a pruebas de flexión (sabiendo que la variación de la temperatura es un factor importante en la deflexión de los materiales), fricción, descamado y óptica (que la capa superficial conceda el paso de la luz a la celda fotovoltaica). (Northmore, s.f.)

Esta investigación tuvo como alcance definir el diseño de un panel solar para carreteras soportando cargas estructurales y condiciones ambientales típicas de una estructura de pavimento canadiense, mientras que al mismo tiempo genere electricidad a través de las células fotovoltaicas.

El requisito estructural más importante es que los paneles solares debían soportar la carga vehicular tanto estática como cíclica y así mismo el soporte estructural no podía desviar la carga a las células solares (*Canadian Solar Road Panel Design: A Structural and Environmental Analysis, 3.1.1.1 Requisitos estructurales*). Toda la hipótesis completa en la que se basa el estudio está en el **Apéndice C**.

Se estipuló que los paneles necesitan de una base de material granular, asfalto o concreto que diera mayor apoyo y garantizar una superficie plana (capa subrasante compactada adecuadamente). La fricción adecuada para el frenado del vehículo se tomó como el segundo requisito fundamental, y en adición el material debía ser lo suficientemente transparente para que dejara pasar la luz del sol. (*Canadian Solar Road Panel Design: A Structural and Environmental Analysis, 3.1.1.1 Requisitos estructurales*).

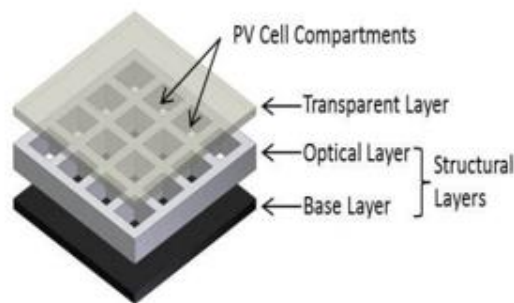


Figura 22. Capas del panel prototipo. Adaptado de Northmore, A. (sf). *Canadian Solar Road Panel Design: A Structural and Environmental Analysis*

“Con estos requisitos en mente, los materiales candidatos identificados para las capas estructurales eran acero A36, aluminio 6061-T6, y polímero reforzado con fibra de vidrio (FRP)”.

(Northmore, s.f.)

La siguiente tabla muestra las propiedades que se tienen en cuenta en pavimentos tradicionales pero esta vez de los materiales a usar en la capa *estructural (capa óptica y la base del panel)* y el *marco del panel prototipo*.

Tabla 1.

Propiedades mecánicas para la capa estructural

material de la categoría	la compresión Rendimiento (Mpa)	Young Módulo (Gpa)	Densidad (g/cm ³)
Estructural Acero-A36 (ACI,2013)	152	200	7.85
Estructural Aluminio-6061-T6 (ACI,2013)	276	68.9	2.7
Estructural GPO.3 Laminado de fibra de vidrio (Roching 2013)	55	12	1.9
Estructural HDPE- Fibra de relleno de vidrio (ACI,2013)	36.9	7.38	1.25
Estructural ABS-Fibra de relleno de vidrio (ACI,2013)	120	5.55	1.56
Pavimentos Pavimento de hormigón (ARA, 2011)	32	29.6	2.32
Pavimentos Pavimento asfáltico (AASHTO, 1993)	N/A	2.76	2.46

Fuente: Northmore. A. (sf). Canadian Solar Road Panel Design: A Structural and Environmental Analysis

Con resultados de resistencia a la compresión de 152Mpa y 276Mpa y módulos de Young de 200Gpa y 68.9Gpa para el A36 y el 6061-T6 respectivamente se observa que soportan grandes cargas antes de deformarse sustancialmente y se garantiza la integridad de la célula solar.

El aluminio se usa como material de un perfil en C de 50,8 mm- [2-in] que será el *marco* de todas las capas que componen al módulo solar para carreteras.

Se adicionan a las aletas del perfil metálico con espumas para el contacto con las láminas de vidrio y un canal para encajarlas. (Ver figura 24)



Figura 23. Perfil Metálico. Adaptado de Northmore. A. (sf). Canadian Solar Road Panel Design: A Structural and Environmental Analysis

Por otro lado, el acero requiere revestimiento para protegerlo de la oxidación y de ser conductor de corriente, además que el proceso de producción necesitaría de cortadoras láser o chorros de agua a presión para hacer la geometría de la *capa óptica* por lo que se selecciona el GPO-3 que, aunque tenga resistencia a la compresión de 55Mpa cumple como aislante eléctrico y de factores climáticos desafiantes.

La *capa base* está dividida en dos subcapas de GPO-3. La capa que sirve de base para las células es de espesor 6,35mm y es de menor área. La otra capa que tiene contacto directo con la subrasante tiene de espesor 6.35mm.

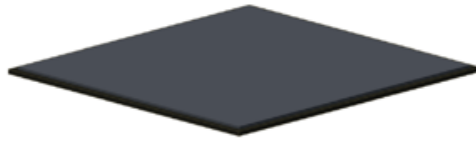


Figura 24. Capa base. Adaptado de Northmore. A. (sf). Canadian Solar Road Panel Design: A Structural and Environmental Analysis

La condición de la *capa transparente* es que deje pasar los fotones por lo que la selección se limita a acrílico, policarbonato, o vidrio templado. En la tabla 2 se muestran las propiedades mecánicas de los materiales.

Tabla 2.

Propiedades mecánicas de la capa transparente

Categoría	Material	Resistencia a la compresión Rendimiento (Mpa)	Young Módulo (Gpa)	Densidad (g/cm ³)
Transparente	Acrílico-Óptico Grado (ACI,2013)	95	2.87	0.655
Transparente	Policarbonato-Óptico Grado (ACI,2013)	70	2.35	1.13
Transparente	El vidrio templado (Alsop y Saunders,1999)	>5000	72	2.5
Pavimento	Pavimento de hormigón (ARA,2011)	32	29.6	2.32
Pavimento	Asphalt Pavement (AASHTO, 1993)	N/A	2.76	2.46

Fuente: Northmore. A. (sf). Canadian Solar Road Panel Design: A Structural and Environmental Analysis

Considerando que la capa transparente está en voladizo sobre las láminas fotovoltaicas y que el acrílico y el policarbonato tienen módulos de Young muy bajos, de 2.87Gpa y 2.35Gpa respectivamente, se descartaron pues las deformaciones del material podrían tocar a las células y dañarlas.

El vidrio templado, por otro lado, no falla a través de deformación plástica como el polímero, aunque esto significa que hay menos indicación de pérdida de rendimiento antes de la falla. (Northmore, s.f.)

El proceso de templado también significa que en caso de una falla catastrófica la capa se rompería en pedazos muy pequeños en lugar de grandes hojas de vidrio. (Northmore, s.f.)

Por esto se llegó a la conclusión de unir dos láminas de vidrio templado para que los fragmentos rotos se unan a la otra capa de vidrio y evitar la dispersión masiva de fragmentos del material por todo el panel.

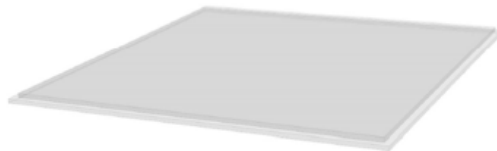


Figura 25. Capa transparente. Adaptado de Northmore. A. (sf). Canadian Solar Road Panel Design: A Structural and Environmental Analysis

En la imagen se ve claramente que la capa superior es de menor área, esto se debe a que la capa transparente va a estar asegurada por un marco metálico que demarcará toda la estructura general del panel o módulo.

Para definir el grosor de las láminas se definió que las secciones en voladizo de la superficie serían de 140mm^2 y se sometieron a cargas de 480kPa de presión con muestras de diferente

espesor. El factor a analizar fue la deflexión del vidrio bajo la teoría de flexión y “*esta información se aplica a las correlaciones desarrolladas para las relaciones de estrés (Roark & Young, 1975), utilizando la teoría de flexión baja (Low bending theory)*”. (Northmore, s.f.)

Tabla 3.

Máxima resistencia a la flexión de la capa transparente y al espesor de la hoja de vidrio

Thickness(mm)	6	8	10	12	14	16	18	20
Maximum Bending stress (Mpa)	75.11	42.25	27.04	18.78	13.8	10.56	8.345	6.76
Maximum Deflection (mm)	0.5415	0.2284	0.117	0.06769	0.04262	0.02856	0.02006	0.01462

Fuente: Northmore. A. (sf). Canadian Solar Road Panel Design: A Structural and Environmental Analysis

Pese a que los valores de la deformación dieron similares se usó la configuración de 10mm.

Para el prototipo a escala se usaron células cuadradas de silicio monocristalino de 125mm.

Esta selección permitió usar la lámina DMSolar DMS-125M-280 (RMSolar, 2012) para el diseño del panel prototipo. Esta célula tiene un voltaje de punto de máxima potencia y la corriente de 0.521-V y 5.342-A, respectivamente. Debido al menor tamaño de las células es posible ensamblar 25 de ellas en cada metro cuadrado de panel solar de carretera, lo que resulta en una tensión de salida total de 13.025-V y una potencia de salida máxima de 69,58-W. (Northmore, s.f.)

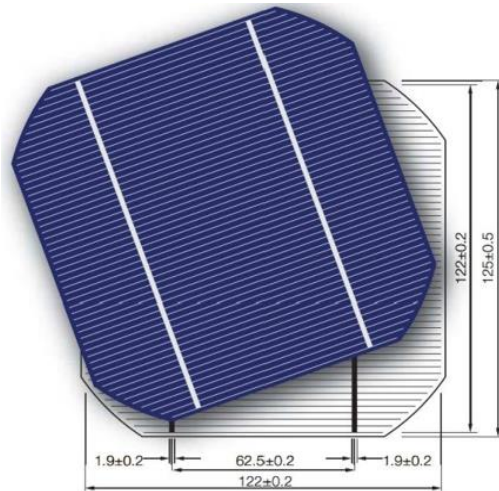


Figura 26. Célula solar de silicio monocristalino cuadrada (RM Solar, 2012)

El método de interconexión típico entre células fotovoltaicas en un módulo solar es soldar una cinta de estaño-plomo a las barras de distribución en la parte superior de una célula y la parte inferior de la celda adyacente. Esto funciona bien en la fabricación de módulos solares convencionales debido a las cargas bajas colocadas en las conexiones y debido a que las células son adyacentes entre sí con mínima separación; como ya se ha identificado, ninguna de estas condiciones va a estar disponibles en el diseño de un panel solar para vía vehicular. Para acomodar esto, la interconexión de células fue diseñada para ser un híbrido entre la tradicional cinta de estaño-plomo y cable eléctrico. La cinta de soldadura sigue siendo necesaria para garantizar una conexión sólida entre la barra colectora de la celda y el conductor eléctrico, pero la cinta sólo se extendió como una pequeña pestaña fuera de la célula solar y un cable eléctrico se suelda entre las lengüetas soldadas de células adyacentes”. (Northmore, s.f.) “Alambre de calibre 22 fue seleccionado para esta aplicación debido a la esperada carga eléctrica a lo largo del módulo”. (Northmore, s.f.)

Además del circuito eléctrico incorporado dentro del panel, es necesario un diodo de protección contra corriente inversa para asegurar que no se permite el paso de corriente en la dirección equivocada a través del panel ya que esto resultaría en la destrucción de los componentes electrónicos sensibles. Para simplificar el diseño del panel se determinó que esto debía ser hecho externamente”. (Northmore, s.f.) “El diodo seleccionado para este proporciona protección de corriente inversa de hasta 5-A en tensiones de hasta 40-V. (Northmore, s.f.)

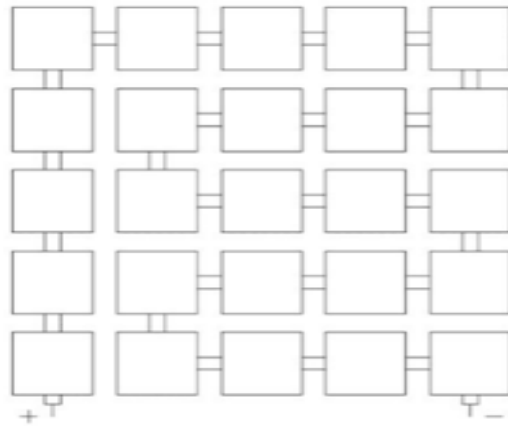


Figura 27. Esquema de interconexión de un panel para la carretera solar (Northmore y Tighe, 2012b)

El modelado final del panel se representa en la siguiente imagen.

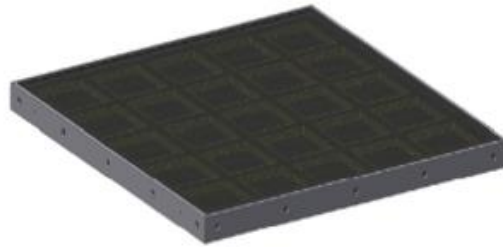


Figura 30. Panel prototipo de Solar Road. Adaptado de Northmore. A. (sf). Canadian Solar Road Panel Design: A Structural and Environmental Analysis

En el **Apéndice D** se muestran todos los componentes del prototipo desarrollado por la investigación de Andrew facilitando un resumen de la descripción de los componentes del prototipo para una mejor proyección del estudio que realizo.

En “*noviembre del 2015 solar Roadways Incorporated recibe el contrato de Fase IIB SBIR (Small Business Innovative Research) del Departamento de Transporte (DOT) de los EE.UU. El contrato de Fase IIB de \$750,000 a 2 años e incluye pruebas de ingeniería civil adicionales*” (Northmore, s.f.) presentes en la siguiente tabla.

Tabla 4.

Ensayos para el modelo SR3

ENSAYOS	GENERALIDADES
CICLOS DE CONGELACIÓN/DESCONGELACIÓN	Para probar que el funcionamiento de los sistemas mecánicos y eléctricos no decaiga en condiciones climáticas fuertes los paneles se colocaron en una cámara ambiental y se expusieron a temperaturas extremas
ACONDICIONAMIENTO DE HUMEDAD	Los prototipos son sometidos a ambientes húmedos y secos. Proceso que se realiza muchas veces en la misma cámara ambiental.
PRUEBA DE RESISTENCIA AL ESFUERZO CORTANTE	Los paneles son sometidos a esfuerzos cortantes o de cizalla para simular el frenado de los vehículos pesados
CARGA AVANZADA	“Simulará años de abuso de camiones en cuestión de meses”. [21]

“Mientras, planeamos comenzar con aplicaciones no críticas tales como entradas para autos, estacionamientos, banquetas, senderos para bicicletas, etc., estas pruebas de ingeniería civil nos acercarán a estar listos para las carreteras, nuestro objetivo final” (Solar Roadways Inc.)

El prototipo SR3 tiene luces LED de mayor intensidad para que se note su brillo a plena luz del día. Los orificios de la superficie de los paneles se quitaron para permitir mayor cobertura superficial con las placas fotovoltaicas.

Lo que implica que el modo de ensamblado de los paneles a la superficie del suelo cambió, sin embargo, no hay datos específicos de esto. El modelo SR2 tenía un rendimiento de 36 vatios y el SR3 es un panel de 48 vatios del mismo tamaño.

El producto SR3 es un hexágono que mide aproximadamente 26 " por 30". Hay semi-módulos para crear la geometría de los bordes rectos y partes cortadas en cuartos para que también permitan la creación de esquinas de las áreas pavimentadas. En general, la unidad tiene varias pulgadas de espesor y se debe colocar sobre una capa de cimentación de concreto para proporcionar una resistencia estructural continua a la carretera. Se omiten otras características de diseño debido a su propietario. Las capas de vidrio templado emparedan una capa central que contiene todos los componentes eléctricos, de calefacción, fotovoltaicos y de procesamiento de computadoras de cada unidad. Los componentes eléctricos dentro de cada unidad no están alimentados internamente por las células directamente. Las células fotovoltaicas proporcionan energía directamente a la red. Los LED integrados, los componentes de calor y los procesadores de la computadora extraen energía de la red independientemente del sistema de producción de energía.

La capa de polímero en el producto SR3 es un producto más resistente y es más resistente a la temperatura que el utilizado en los modelos anteriores por SRI. Esta capa no solo sella herméticamente todos los componentes sensibles al clima, sino que actúa como un adhesivo, uniendo las capas de vidrio templado en una estructura laminada. También transfiere las cargas de la superficie de rodamiento a la capa de vidrio base que está en contacto directo con la estructura de hormigón de soporte debajo de los módulos.

Cada módulo o adoquín está anclado a esta capa de cimentación de concreto con una serie de clips ventilados a lo largo de sus bordes. Este método minimiza la interferencia con las células fotovoltaicas, maximizando el potencial de salida de cada panel. También mantiene una superficie relativamente lisa y al mismo tiempo permite que el agua fluya fuera de la superficie. Estos clips de ventilación permiten el flujo de agua lejos de la superficie de contacto de los vehículos y los usuarios del pavimento, lo que reduce el riesgo de carreteras resbaladizas debido a la precipitación.” (Nussbaum, Lake, & Coutu, sf)



Figura 28. Prototipos reales SR3. Adaptado de Solarroadways.com. (2017) R&D-SolarRoadways. Disponible en: <http://www.solarroadways.com/Research/Research>.

Se detallan los avances de la fase IIb con el producto SR3 después de la investigación de Solar Roadways en el **Apéndice E**.

En diciembre del 2016 la empresa francesa COLAS, filial de Bouygues que desarrolla estas carreteras solares gracias a la tecnología bautizada Wattway, lanza en la localidad francesa de Tourouvre una instalación beta de 2.800 metros cuadrados de paneles solares que se prevé generen picos de energía de 17.963 kWh por día; valores que se traduce en que 1Km de láminas fotovoltaicas puestas en la superficie de una carretera tendría la capacidad energética para alimentar el alumbrado público de un pueblo con 5000 habitantes.

La tecnología de Wattway desarrolló un módulo para carretera que no necesita de acciones de ingeniería civil para su ubicación. Los paneles se pegan con resina epoxica a la superficie de la vía, lo que elimina los costos de remoción de la capa asfáltica y reduce el tiempo de instalación.



Figura 29. Panel de Wattway. Adaptada de Wattway, C. (2017). Paving the way to tomorrow's energy, 1–15. Disponible en: wattwaybycolas.com

Las celdas solares tienen no más de 5mm de espesor y aunque su instalación es más sencilla y elimina costos adicionales, generar un vatio por medio de esta carretera vale 16 euros mientras que el costo de producción energética convencional en Francia está en alrededor de un euro por vatio lo que hace por el momento que la tecnología Wattway sea ineficiente y extremadamente costosa. Además, que después del primer año de prueba, para el 2017, se observó que la producción de energía diaria era de “790 kWh. Es decir, 20 veces menos que lo esperado.” (Bigordà, 2018)

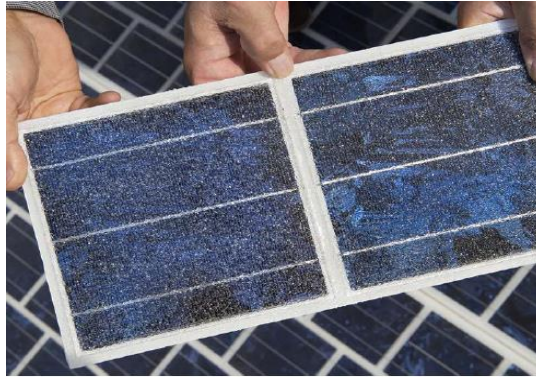


Figura 30. Panel usado para Wattway. Adaptado de Sophiahightech.com. (2017). Citar un sitio web - Cite This For Me. Disponible en: <http://www.sophiahightech.com/astm-d-4255-testing-fixture-2/?pdf=246>

3.2 Ensayos de laboratorios para los nuevos elementos aplicados a la construcción de superficies de rodadura vial

La construcción de una carretera que genere energía eléctrica requiere de la implementación de nuevos materiales. El uso de paneles solares supone el cambio del asfalto, el hormigón de concreto asfáltico y productos bituminosos por otros materiales antes impensables para la elaboración de la superficie de rodadura de una vía vehicular o peatonal.

Los ensayos y las pruebas estandarizadas son normas que los laboratoristas deben seguir para que los resultados de las propiedades de los materiales sean verídicos y no sufran alteraciones. Estos ensayos están establecidos y ampliamente acogidos por organizaciones como la Sociedad Estadounidense de Pruebas y Materiales (ASTM), la Asociación Estadounidense de Funcionarios Estatales de Autopistas y Transporte (AASHTO), la Administración Federal de Autopistas (FHWA), la Administración Federal de Aviación (FAA), etc.

El problema surge cuando no hay ensayos estandarizados para materiales nuevos aplicados a este campo de la ingeniería civil por lo que se ve la necesidad de crear pruebas que estudien las propiedades de los elementos. Para una calzada convencional, aunque los materiales sean distintos deben cumplir con ciertas propiedades, y parámetros establecidos para estas, por lo que los materiales que componen los módulos solares para carretera deben resistir las condiciones de carga tanto estáticas como dinámicas y las adversidades climáticas a las que el pavimento común está sometido y este es el punto de partida para la elaborar los nuevos ensayos.

3.2.1 Estudios realizados por entidades estadounidenses al modelo SR3 de Solar Roadways Incorporated. Del resultado de la fase IIB SBIR se publica en el artículo del 2016 “*Standardized Testing of Non-Standard Photovoltaic Pavement Surfaces*”, en este se muestra que se modificaron los estándares de prueba existentes de varias maneras y siguiendo las normas vigentes de la ASTM: estándares de pavimentos rígidos para carga avanzada, estándares adhesivos estructurales para carga cortante, estándares específicos de estructura para el acondicionamiento de humedad y estándares específicos de aplicación para ciclos de congelación / descongelación.

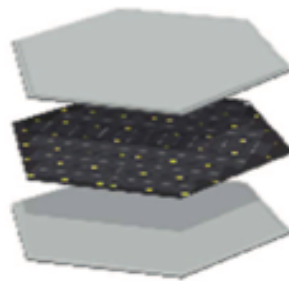


Figura 31. Capas del prototipo SR3

3.2.1.1 Pruebas Ambientales

3.2.1.1.1 Prueba de hielo y deshielo: Se seleccionan dos ensayos pertenecientes a la ASTM, el C1645 “Hielo y deshielo, y la durabilidad de la sal de deshielo” para materiales que se usan en carreteras y el C1026-13 “Método estándar para medir la resistencia de la cerámica y el vidrio al ciclo de congelación y descongelación” por criterios de uso y tipo de material respectivamente.

Tabla 5.

Ensayos para el modelo desarrollado por Andrew Northmore y la Universidad de Waterloo

C1645	C1026-13
Para materiales que se usaran como pavimento de carretera.	Para materiales de otro tipo de uso como ventanearía, acabado para pisos y enchapes, etc.
Procedimientos que tienen en cuenta las especificaciones requeridas para un material que está sometido a condiciones reales ambientales de una carretera.	Procedimientos que no tienen en cuenta el entorno al que estarán sometidos los elementos.
La muestra tiene el tamaño completo.	Cortar la muestra en tamaños específicos.
Los especímenes se sumergen totalmente y en solución salina que simule las condiciones reales del ambiente.	Los especímenes deben estar sumergidos a la mitad y en agua potable.
16 horas de congelamiento y 8 horas de deshielo por un ciclo completando después, 7, 28 y 49 ciclos.	300 ciclos de hielo y deshielo sin especificar duraciones en las fases.
Toma del peso de la muestra antes y después del ensayo.	Toma del peso de la muestra antes y después del ensayo.
Diagnostico visual al finalizar la prueba en busca de daño.	Diagnostico visual al finalizar la prueba en busca de daño.

De los dos se escogió C1645 que simula con mayor exactitud las condiciones ambientales y el entorno al que los vidrios de los módulos estarán sometidos.

3.2.1.1.2 Prueba de condiciones de humedad

Se seleccionó el ensayo C272 / C272M-16, "método de prueba estándar para la absorción de agua de materiales de núcleo para construcciones tipo sándwich" (Nussbaum, Lake, & Coutu, sf) debido a que se ajustaba mejor a los requerimientos geométricos del módulo solar.

Tabla 6.

Especificaciones más relevantes del ensayo C272

C272/C272M-16
Las muestras tienen tamaño (recomendado) y forma específica (requerida).
Las muestras deben ser sumergidas en una solución en condiciones específicas del ensayo, se remueve de la solución y después de un tiempo determinado por los parámetros del ensayo se pesa la muestra.

Aunque el ensayo defina el tamaño de la muestra se considera que si se sumerge el adoquín solar completo arrojará mejores resultados de humedad pues tiene clips de metal de enganche que están distribuidos a lo largo del borde y que llegan hasta la superficie por lo que generan potenciales puntos de filtración.

3.2.1.2 Ensayos de carga:

Debido a la construcción única de los módulos SR3 y sus materiales, los métodos estándar de resistencia al corte en los pavimentos y prueba de carga no se pueden transferir directamente al producto en la mayoría de los casos. (Nussbaum, Lake, & Coutu, sf)

El SR3, debido a su mezcla de vidrio templado rígido y capas poliméricas flexibles, combina los sistemas de funcionamiento de los pavimentos rígidos y flexibles. Tanto el ACC, pavimentos "flexibles" y PCC o "rígidos" transfieren sus cargas de diferentes maneras. Un pavimento flexible es esencialmente una membrana impermeable sobre un suelo diseñado para soportar la carga del tráfico mientras que un pavimento rígido lleva la carga directamente. Debido a esto, la resistencia de carga de los pavimentos ACC es mucho más baja que los pavimentos PCC. En el diseño de pavimentos flexibles, las cargas de cizallamiento son una gran preocupación, ya que los daños causados por el frenado y el giro del vehículo pueden rasgar el pavimento, y las temperaturas extremas pueden hacer que se vuelva frágil y se agriete. (Nussbaum, Lake, & Coutu, sf)

La naturaleza del material de construcción y el estándar de construcción de los adoquines SR3 evita que las pruebas de pavimento, específicamente las pruebas comunes de resistencia al corte, se realicen en el producto. (Nussbaum, Lake, & Coutu, sf)

Además, no existen pruebas para los laminados compuestos de vidrio / polímero para medir su desempeño de forma equivalente a las pruebas de pavimento rígido. (Nussbaum, Lake, & Coutu, sf)

3.2.1.2.1 Ensayo de resistencia al cortante: Aunque encapsular la lámina fotovoltaica entre dos capas de vidrio dispuestas en forma de sándwich supone una mejora en el aerodinamismo de los módulos SR3 agrega a su vez un posible punto de falla por fuerzas cortantes.

Para lograr la adhesión entre los vidrios se usa un material adherente que en casos de funcionamiento real estaría sometido a fuerzas tensionantes de frenado y movimientos curvilíneos de los automóviles.

Los ensayos, candidatos para el estudio del material adherente, se seleccionaron teniendo en cuenta criterios geométricos y puntos de evaluación de cada prueba, primando para este último aspecto datos obtenidos de la resistencia del material bajo acción de fuerzas cortantes.

La Asociación Americana de Ensayos de Materiales ASTM escogió 3 ensayos que cumplieron con las pruebas a las que fueron sometidos. **(Ver Apéndice F)**

El método de tres carriles D4255M-15a “permite la prueba de la capacidad de resistir el corte de un adherente en un sistema de placas. La muestra está destinada a prepararse como se muestra en la figura siguiente con un espesor máximo de 0.125””. (Nussbaum, Lake, & Coutu, sf)

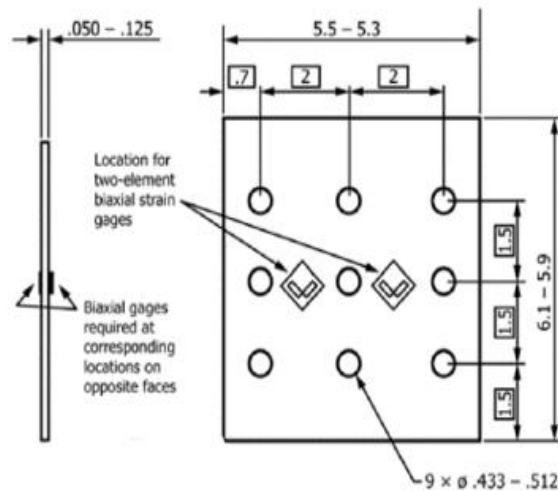


Figura 32. Método de tres carriles D4255M-15^a. Adaptado de Nussbaum, John H.; Lake, Robert A.; Coutu, Ronald A. (sf). Air Force Institute of Technology Wright Patterson AFB, OH., “Standardized Testing of Non-Standard Photovoltaic Pavement Surfaces. USA

“Sin embargo, si ignoramos las especificaciones de la muestra y simplemente mecanizamos una unidad de SR3 completa para unir la instalación de tres rieles como se muestra en” (Nussbaum, Lake, & Coutu, sf) la Figura. 35, “podemos medir la resistencia al corte de la unidad como un todo”. (Nussbaum, Lake, & Coutu, sf)

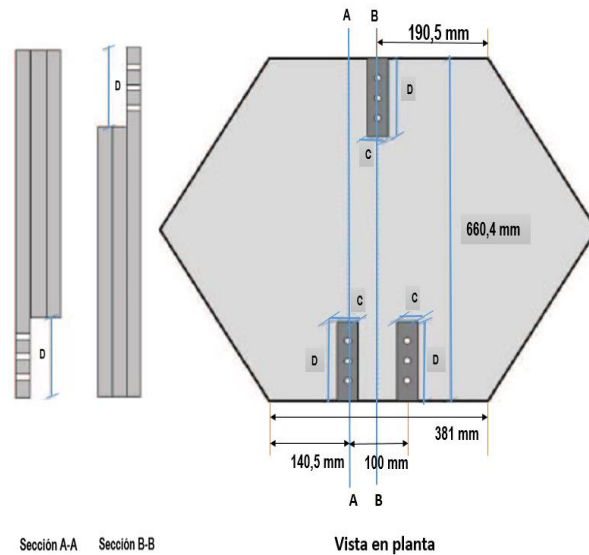
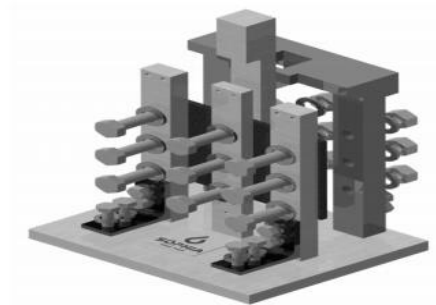


Figura 33. Vista en planta del prototipo SR3

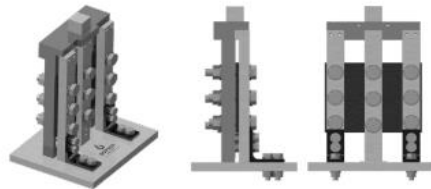
Para unir el panel SR3 al accesorio de prueba de tres rieles, las muescas deberían cortarse completamente a través de la capa de vidrio y polímero en lados alternados del adoquín como se muestra en las secciones transversales AA y BB de la figura... Además, los agujeros de los pernos tendrían que perforarse a través de la capa de vidrio restante para permitir la fijación del dispositivo en sí. (Nussbaum, Lake, & Coutu, sf)

Aunque esta es una modificación extrema de la especificación del estándar de prueba para especímenes de prueba, permitiría un análisis directo de la resistencia total de cortante del módulo SR3 para las cargas de corte inducidas por el tráfico en su superficie. En todos los diferentes métodos de prueba de cizallamiento, se utilizan algunos aparatos y algunos métodos mediante los cuales se aplica la fuerza. Sin embargo, todos establecen la fijación del espécimen de prueba con los accesorios que consisten en rieles que agarran o atornillan al accesorio y empujan o tiran de los dos rieles en direcciones opuestas. Este mismo método generalizado de aplicar la fuerza se divide en numerosas especificaciones para diversos materiales y aplicaciones. Aunque hay algunas

variables que pueden medirse a través de este método de carga, como la relación tensión-deformación de la capa de polímero en sí misma frente al acoplamiento a los materiales adherentes, la metodología es casi la misma. (Nussbaum, Lake, & Coutu, sf)



ASTM D 4255-B Testing Fixture - Assembly



ASTM D4255-B Testing Fixture

Figura 34. Elemento de tres rieles para el ensayo de esfuerzo cortante. Adaptado de Sophiahightech.com. (2017). Citar un sitio web - Cite This For Me. Disponible en: <http://www.sophiahightech.com/astm-d-4255-testing-fixture-2/?pdf=246>

3.2.1.2.2 Ensayo de carga avanzada: La carga avanzada, para las pruebas de pavimento, generalmente se realiza con un aparato "Dynalect" o "Road Rater" de acuerdo con "ASTM Active Standard D4602-93 (2015), guía estándar para pruebas no destructivas de pavimentos utilizando equipo de deflexión dinámica de carga cíclica". (Nussbaum, Lake, & Coutu, sf)



Figura 35. Carga avanzada para las Pruebas de Pavimento [29]

“Se puede hacer directamente en los adoquines SR3 sin variación a pesar de los laminados de polímero con fibras de vidrio no reflectantes estándar”. (Nussbaum, Lake, & Coutu, sf)

Las pruebas estándar de carga puntual existentes y la resistencia al impacto se aplican a la capa más externa (el vidrio) que arroja resultados satisfactorios para los estándares del DOT.

Para el diseño de las capas estructurales del pavimento en aeropuertos la FAA (Administración Federal de Aviación) creó un software, FAARFIELD Airport Design. El programa necesita únicamente como variable el módulo de elasticidad del pavimento.

Si se considera al adoquín solar como la capa de rodadura se le puede aplicar la prueba D7275, “Propiedades de flexión de materiales compuestos de matriz polimérica”.

El ensayo requiere que las muestras se corten en tamaños específicos. Y se ubiquen como se muestra en la figura 39.

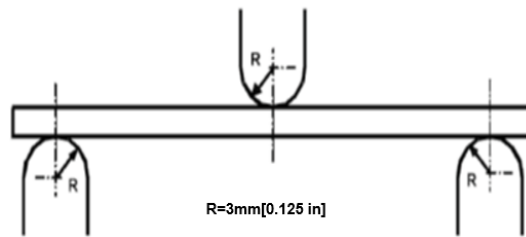


Figura 36. Diagrama del método de tres puntos de fuerza. Adaptado de Nussbaum, John H.; Lake, Robert A.; Coutu, Ronald A. (sf). Air Force Institute of Technology Wright Patterson AFB, OH, “Standardized Testing of Non-Standard Photovoltaic Pavement Surfaces. USA

Alternativamente, podemos utilizar potencialmente las ecuaciones de diseño de pavimento de aeródromos existentes para calcular a mano el espesor requerido de la capa de hormigón debajo de los módulos SR3. Si se prefiere el uso del paquete de diseño de software FAARFIELD, (1) proporciona el cálculo de una superposición rígida no unida de un pavimento rígido. Esta ecuación coincide con la ecuación 1 de UFC* 3-260-02. (Nussbaum, Lake, & Coutu, sf)

“Ecuación (1)

$$h_0 = \sqrt{h_d^2 - C \left(\frac{h_d}{h_e} * h_E \right)^2}$$

h_0 = Nuevo grosor de la superposición (espesor de un módulo SR3)

h_d = Espesor del pavimento si la sección transversal completa estuviera hecha de material con resistencia a la flexión determinada empíricamente de la capa superior (si el adoquín solar se coloca directamente sobre la subrasante, qué espesor debería tener)

h_e = Espesor del pavimento si la sección transversal completa estuviera hecha de material con la resistencia a la flexión medida de la capa subyacente (si el pavimento existente se espesara para cumplir con los requisitos de diseño, qué espesor debería tener).

H_E = espesor de la capa subyacente existente

C = Coeficiente de condición de los pavimentos existentes” Standardised of non-standard photovoltaic pavement surface, pag. 7 (Northmore, s.f.)

Como h_0 y C son conocidos o pueden identificarse a partir de tablas, las únicas variables son h_d y h_e que se pueden encontrar con (2), que es la Ecuación 2 de UFC 3-260-02, y calcula un espesor de pavimento sobre un base y / o subrasante estabilizada. (Nussbaum, Lake, & Coutu, sf)

“Ecuación (2)

$$h_0 = \sqrt[1.4]{h_d^{1.4} - \left[\left(\sqrt{\frac{E_b}{E_c}}\right)h_b\right]^{1.4}}$$

h_0 = espesor del pavimento (h_d o h_e para Ecuación (1))

h_d = grosor del diseño si se hizo una sección transversal completa de la base estabilizada in situ como se identifica en las curvas de diseño en UFC 3-260-02, Capítulo 12

E_b = Módulo de elasticidad de la base estabilizada

E_c = Módulo de elasticidad del pavimento (módulo SR3 para h_d o concreto existente para h_e)

h_b = espesor de la base estabilizada” Standardised of non-standard photovoltaic pavement surface, pag. 7 (Northmore, s.f.)

Usando estas ecuaciones, podemos calcular h_0 desde (1) que equivale al espesor mínimo requerido para las baldosas solares. Siempre que sean más gruesos que este mínimo, se pueden usar como una superposición no unida del pavimento rígido”. (Nussbaum, Lake, & Coutu, sf)

3.2.2 Estudios realizados por Andrew Bruce Northmore en la Universidad de Waterloo, Canadá.

3.2.2.1 Pruebas estructurales

Las pruebas estructurales tienen como objetivo el estudio de la deflexión de los adoquines solares como respuesta a la aplicación de cargas variables en la capa más superficial (capa de vidrio de alta resistencia) que simularán las cargas de sollicitación vial.

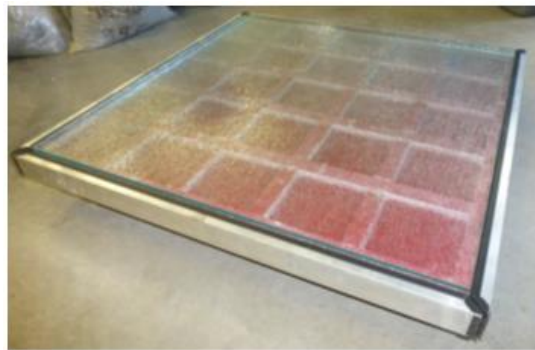


Figura 40. Panel armado con todos los elementos estructurales listos para probar. Adaptado de Northmore. A. (sf). Canadian Solar Road Panel Design: A Structural and Environmental Analysis

Según Andrew Bruce la prueba se realiza con carga baja para respuesta estática dentro del rango elástico en todos los materiales en cuestión, pues considera que es suficiente para obtener una respuesta del módulo en situaciones reales.

El análisis inicial de la carga estructural en el panel de vidrio, como se muestra en la Figura 40, determinó que el prototipo necesitaría ser probado hasta 4,448-kN [1,000-lbf], lo que solo produciría una deflexión de 0,84 mm [0.033-in], para garantizar que no falle en condiciones frágiles durante la prueba. (Northmore, s.f.)

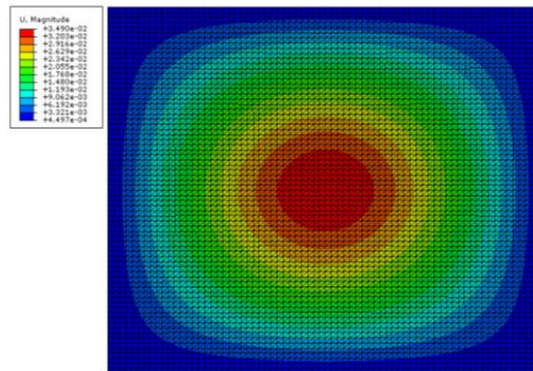


Figura 37. Respuesta de deflexión al aplicar una carga central de 4,448 [KN]. Adaptado de Northmore. A. (sf). Canadian Solar Road Panel Design: A Structural and Environmental Analysis

Se creó un marco como el que se muestra en la figura 41 que se soporta en una placa de 1.5 m por 1.83 m por 0.03 m, y está reforzada con canales C de 101.6 mm por debajo. Los materiales de la armadura construida para apoyar el elemento fueron probados para asegurarse que no tuvieran deflexiones ante las solicitaciones de carga que se le implantarían al módulo solar.

Esto debido a que el adoquín iría suspendido entre los elementos tipo viga de la armadura y la mínima reacción de esta alteraría los resultados del primero.



Figura 38. Plataforma de prueba estructural. Adaptado de Northmore. A. (sf). Canadian Solar Road Panel Design: A Structural and Environmental Analysis

Las cargas se aplicaron en los puntos medios de los nodos de la capa óptica (cuadrícula que enmarca las células fotovoltaicas) pues se esperaba que allí fuesen los puntos de mayor concentración de esfuerzo cuando el vehículo pasara.

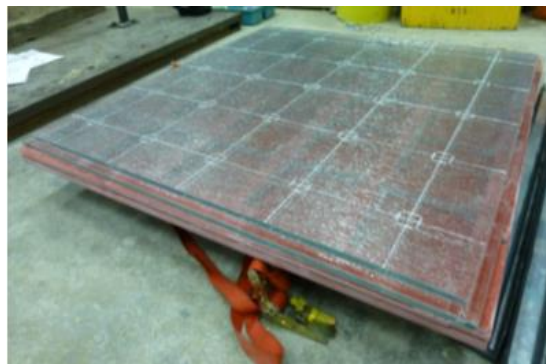


Figura 39. Demarcación de los puntos de cargue. Adaptado de Northmore. A. (sf). Canadian Solar Road Panel Design: A Structural and Environmental Analysis

La carga para la prueba se suministró a través de un actuador accionado por aire sobre aceite. Este sistema puede usar las líneas de suministro de aire existentes en el laboratorio para presurizar el aceite a una presión variable de hasta 10.3 MPa [1500 psi]. (Northmore, s.f.)



Figura 40. Sistema de aplicación de fuerza aire-aceite. Adaptado de Northmore, A. (sf). Canadian Solar Road Panel Design: A Structural and Environmental Analysis

Fue importante cuidar el contacto directo entre el aparato de carga y el vidrio por lo que la cara cuadrada de 25.4 mm del accionador se cubrió con una goma.

Los materiales incluyen “una celda de carga para validar la carga suministrada al panel, rosetas de tensión adheridas a los miembros de vidrio y fibra de vidrio, y LVDT para medir el desplazamiento de la capa inferior de fibra de vidrio”. (Northmore, s.f.)

La celda de carga que se usa para validar la carga en el panel es una StrainSert FL5U-2SPKT. Esto se calibró utilizando un anillo de carga de 13,4 kN [3000 lbf] en un rango de 0 a 8,90 kN [2000 lbf]. (Northmore, s.f.)



Figura 41. Celda de Carga StrainSert FL5U-2SPKT. Adaptado de Northmore. A. (sf). Canadian Solar Road Panel Design: A Structural and Environmental Analysis

Por efectos de simetría se reduce la ubicación de los instrumentos de medición de respuestas y aplicación de cargas a un cuarto del panel como se muestra en la siguiente figura.

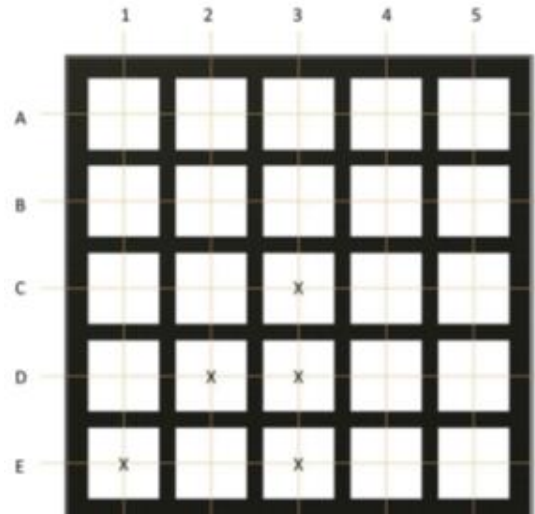


Figura 42. Ubicación de los instrumentos. Adaptado de Northmore. A. (sf). Canadian Solar Road Panel Design: A Structural and Environmental Analysis

“Las rosetas de tensión que se utilizan para la prueba son todas las rosetas Vishay Modelo C2A-06-250LR-350. Estas rosetas están diseñadas para adherirse a muestras de vidrio y fibra de vidrio y proporcionan mediciones de deformación plana de alta precisión”. (Northmore, s.f.)

Los transductores se montan en el anillo de carga del bastidor de pruebas estructurales utilizando soporte de laboratorio magnéticos. En la Figura 46 *“se muestra una imagen del posicionamiento de la roseta y el transductor en la placa base de fibra de vidrio durante la prueba”.* (Northmore, s.f.)

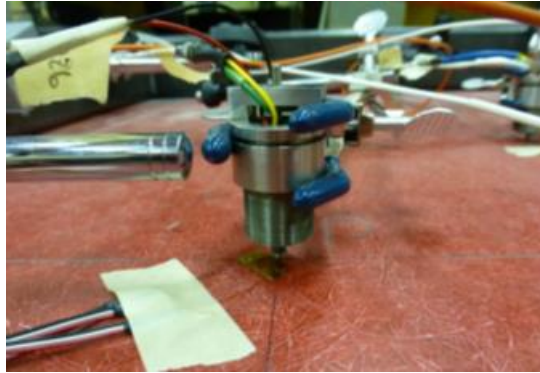


Figura 43. Roseta y transductor en la placa base de fibra de vidrio. Adaptado de Northmore. A. (sf). Canadian Solar Road Panel Design: A Structural and Environmental Analysis

Luego se puede observar todo el sistema de prueba montado.

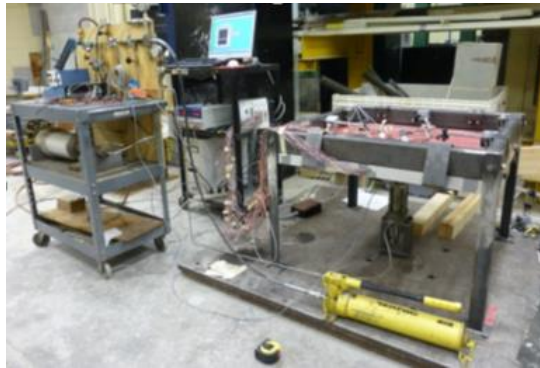


Figura 44. Sistema de prueba montado. Adaptado de Northmore. A. (sf). Canadian Solar Road Panel Design: A Structural and Environmental Analysis

Se aplicaron dos cargas, la mayor de 4.44 kN y la otra de 2.22 kN, y se recogieron cuatro conjuntos de datos para tres ubicaciones diferentes de las cargas.

Las posiciones se muestran en la figura 48 haciendo alusión al centro, un costado y un punto en diagonal.

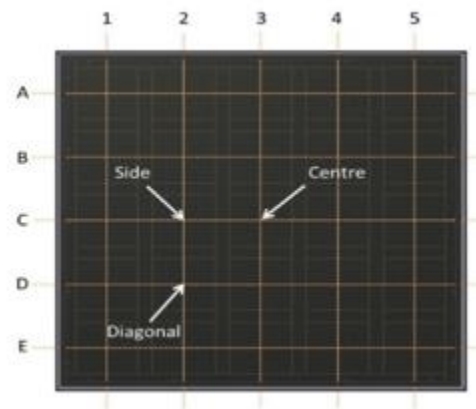


Figura 45. Ubicación de las cargas de prueba sobre el panel. Adaptado de Northmore. A. (sf).
Canadian Solar Road Panel Design: A Structural and Environmental Analysis

El comportamiento de la tensión del panel fue normal. En la figura 49 se muestra que el pico más alto registrado para el valor de la tensión se localiza justo donde la carga fue aplicada y desciende a medida que llega a los bordes.

Este mismo fenómeno de disipación hacia los bordes sucede para las otras posiciones de las dos cargas. Sin embargo, en algunos casos aparecen picos más altos de respuesta de la deformación en los bordes del panel que en el punto C-3 de aplicación de la carga de 2.22 KN.

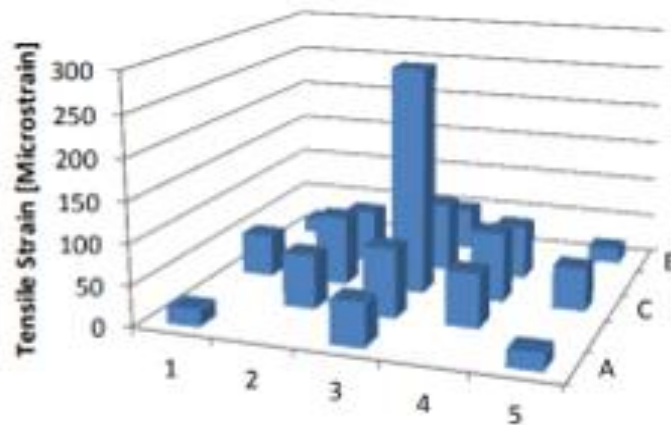


Figura 50. Comportamiento de la deformación por tracción del panel sometido a una carga de 4.44 KN. Adaptado de Northmore. A. (sf). Canadian Solar Road Panel Design: A Structural and Environmental Analysis

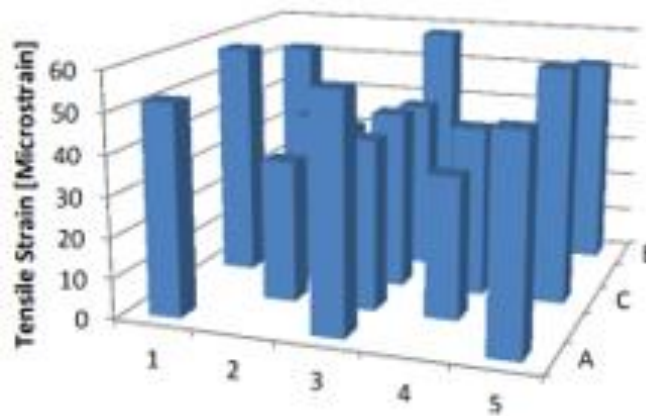


Figura 46. Comportamiento inesperado de la deformación por tracción para la carga aplicada de 2.22 KN. Adaptado de Northmore. A. (sf). Canadian Solar Road Panel Design: A Structural and Environmental Analysis

Para el análisis de las deflexiones únicamente se tomaron los datos para las cargas centrales de 4.44 kN y 2.22 kN, y los resultados mostraron el mismo patrón de disipación mencionado anteriormente. Pico mayor de deflexión en el punto de aplicación y disminución gradual a medida que se acerca a los bordes.

El valor de deflexión fue de 1.4mm con 0.56mm por encima del valor arrojado por el modelo de predicción FE al inicio del ensayo

3.2.2.2 Prueba de elementos finitos (FE): Para el modelado del método

El marco de aluminio se excluyó del modelo y las capas transparentes y estructurales se ampliaron para formar cuadrados de 36 pulgadas. Esta es una simplificación razonable ya que el marco de aluminio es mucho menos rígido que el vidrio que se utiliza en la capa transparente, por lo que tendrá un impacto mínimo en el rendimiento del modelo. La validación del modelo basado en las pruebas estructurales se enfocará en modelar los puntos de carga internos para mitigar las anomalías de carga en el borde. (Northmore, s.f.)

Las mallas de GPO-3 de la capa estructural se modelan como un bloque de material homogéneo con la cuadrícula de cuadrados recortados. Esto es más realista de cómo se fabricaría un futuro prototipo, ya que esta capa sería una trampa de fibra de vidrio personalizada, pero puede no representar con precisión el prototipo construido. (Northmore, s.f.)

Puesto que el proceso de elaboración de la cuadrícula o capa óptica se hizo recortando tiras del material y luego se unieron con resina epóxica para brevedad y economía en la construcción del panel.



Figura 47. Capa óptica pegada con resina epóxica. Adaptado de Northmore. A. (sf). Canadian Solar Road Panel Design: A Structural and Environmental Analysis

La capa transparente prototipo tiene una superficie texturizada, pero se modeló como plana para el análisis de FE. Esta es una aproximación razonable, ya que la goma suave en el aplicador de carga transmitirá la carga uniformemente a través del área de contacto. (Northmore, s.f.)

Los resultados de la simulación para la deformación por efectos tensiles se ven a continuación. Los contornos de deformación de las capas estructurales y del vidrio, para la carga diagonal de 2.2 kN con propiedades promedio del material, demuestran los resultados típicos.

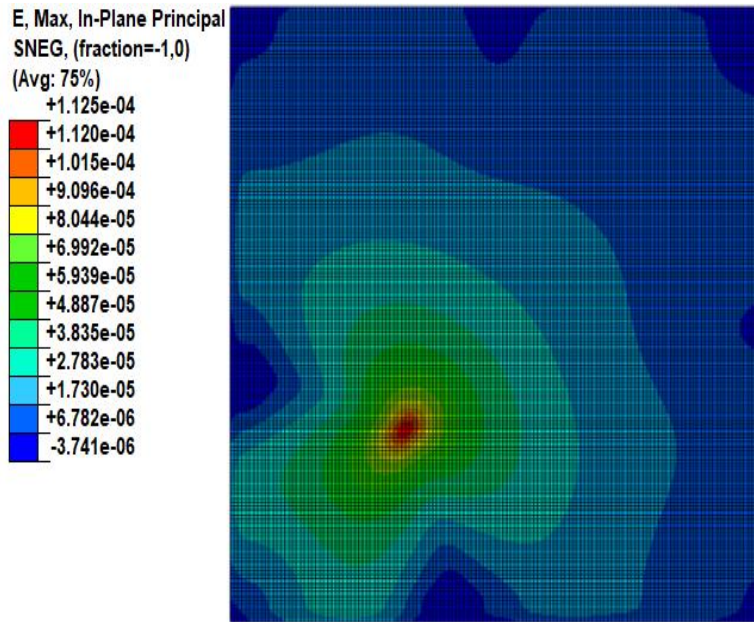


Figura 48. Deformación de la capa de vidrio con carga de 2.22 KN. Adaptado de Northmore. A. (sf). Canadian Solar Road Panel Design: A Structural and Environmental Analysis

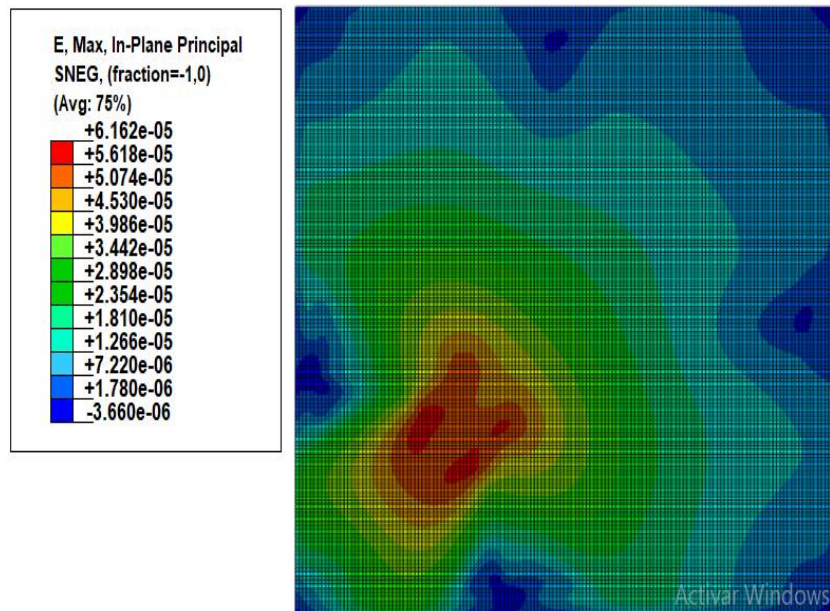


Figura 49. Deformación de la capa de base con carga de 2.22 KN. Adaptado de Northmore. A. (sf). Canadian Solar Road Panel Design: A Structural and Environmental Analysis

En la capa transparente, los valores más altos de la deformación se centran justo en la zona donde se aplica la fuerza, mientras que en las capas estructurales la zona de mayor deformación es más grande debido a que los nervios de la capa óptica transfieren la carga entre las capas de la base.

3.2.2.2.1 Comparación del modelo FE con las pruebas estructurales: En la figura 54 se muestra el desfase entre los valores calculados con el modelo de predicción del FEA y las pruebas estructurales. Se observa que en los bordes la diferencia es muy elevada debido a un error en la definición de las propiedades de frontera del modelo FE, por lo que los datos de los bordes A, E, 1 y 2 son eliminados.

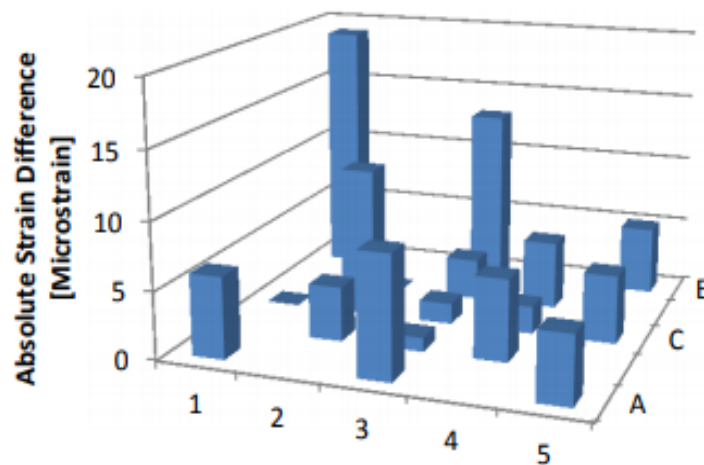


Figura 50. Diferencias entre las deformaciones del modelo bajo una carga diagonal de 2.22 KN incluyendo los datos de los bordes. Adaptado de Northmore. A. (sf). Canadian Solar Road Panel Design: A Structural and Environmental Analysis

Las propiedades de los materiales también se estudiaron en el modelo FE para decidir cuales tenían mayor rendimiento y con cuales el error de predicción era menor.

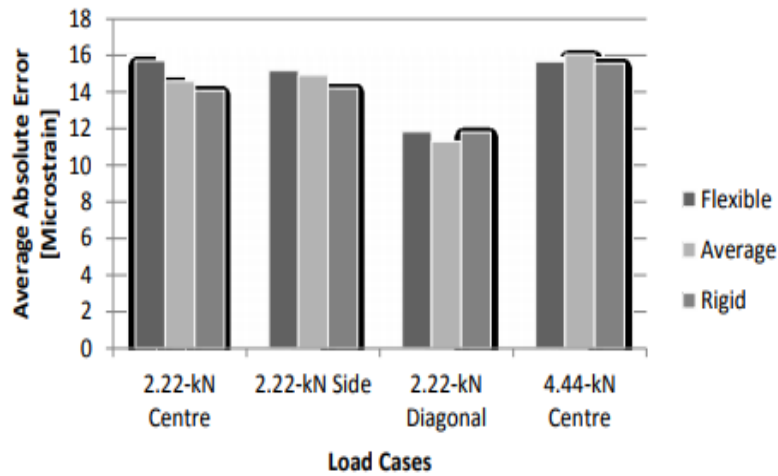


Figura 51. Desfase o error entre los datos de las dos pruebas incluyendo los datos de los bordes del modelo FE. Adaptado de Northmore. A. (sf). Canadian Solar Road Panel Design: A Structural and Environmental Analysis

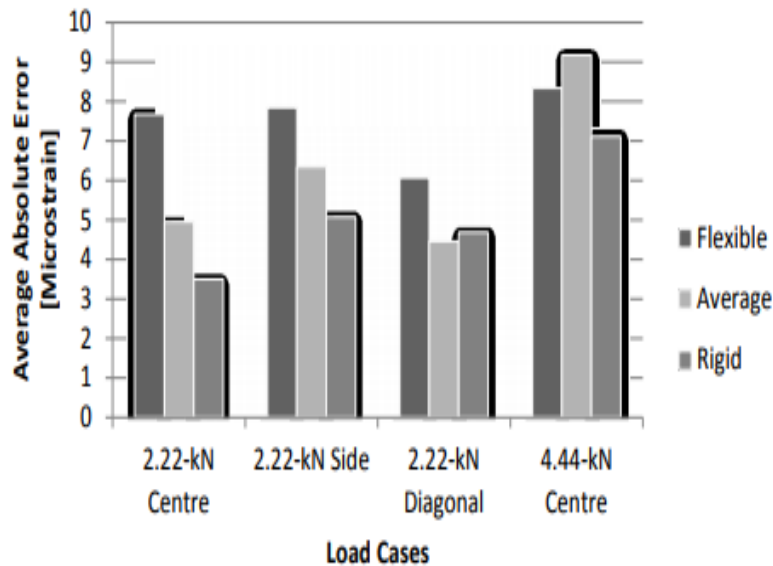


Figura 52. Desfase o error entre los datos de las dos pruebas sin los datos de los bordes del modelo FE. Adaptado de Northmore, A. (sf). Canadian Solar Road Panel Design: A Structural and Environmental Analysis

La ultima figura “muestra que, si bien las propiedades promedio son las de mejor rendimiento para el caso de carga diagonal, la configuración general de la mejor propiedad del material para hacer coincidir las pruebas estructurales sigue siendo la configuración rígida” (Northmore, s.f.)

En el caso de las deflexiones tal como en el caso anterior de las pruebas estructurales los resultados obtenidos “siguieron la tendencia esperada de la FEA inicial, pero fueron de una magnitud mucho mayor.” (Northmore, s.f.) Las deflexiones modeladas finales, basadas en los modelos de deformación “demuestran que se predice una diferencia máxima de deflexión de 0,28 mm entre las pruebas de carga central de 2,22 KN y 4,44 KN. Estos valores se comparan con los valores obtenidos de las pruebas,” (Northmore, s.f.) como se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 7.

Comparación de las deflexiones del modelo FE y las pruebas

Transducer Location	C-3	D-3	E-3	D-2	E-1
Test Results [mm]	1.39	0.84	0.38	0.60	0.17
Model Results [mm]	0.29	0.21	0.05	0.15	0.03
% Difference	387%	306%	655%	309%	593%

Fuente: Northmore. A. (sf). Canadian Solar Road Panel Design: A Structural and Environmental Analysis

Los resultados muestran que existe una clara diferencia entre las deflexiones que se miden y las que se predicen, aunque la similitud del perfil de deflexión entre los resultados medidos y pronosticados confiere confianza a los procedimientos de modelado que describen con precisión el rendimiento del panel en las condiciones de prueba de laboratorio. (Northmore, s.f.)

3.2.2.2 Análisis de Fatiga: Los valores tomados para evaluar el rendimiento estático y de fatiga de los paneles fueron la tensión máxima de la capa transparente y las capas estructurales, las tensiones máximas en la capa estructural; y la deflexión máxima de la capa base. Estos valores se compararon entre los diferentes casos de carga y las bases estructuradas para determinar qué condiciones de base estructural son más adecuadas para instalarse en los paneles.

El fallo por fatiga de un material es el deterioro de este debido a la exposición repetida de varios ciclos de carga. En gran medida la carga por sí sola no provoca la falla, pero la aplicación constante de esta sí lo degenera progresivamente.

En pavimentos convencionales (rígidos y flexibles) este tipo de falla se conoce como fisura en bloque y se ve cuando las grietas en la superficie de rodadura se entrecruzan de tal manera que forman bloques de no más de 1m² de área. (Catálogo, Argos)



Figura 53. Falla por fatiga del pavimento. Adaptado de Tipos de deterioros en Pavimentos de Concreto” (2017). Catalogo ARGOS, Disponible en: www.argos.com.co.

El fenómeno de fatiga en los materiales se representa por medio de la curva de Wohler que relaciona esfuerzo y número de ciclos. En general se observan dos tipos de comportamientos. Para materiales que presentan y no, límite de fatiga. Las gráficas se muestran a continuación:

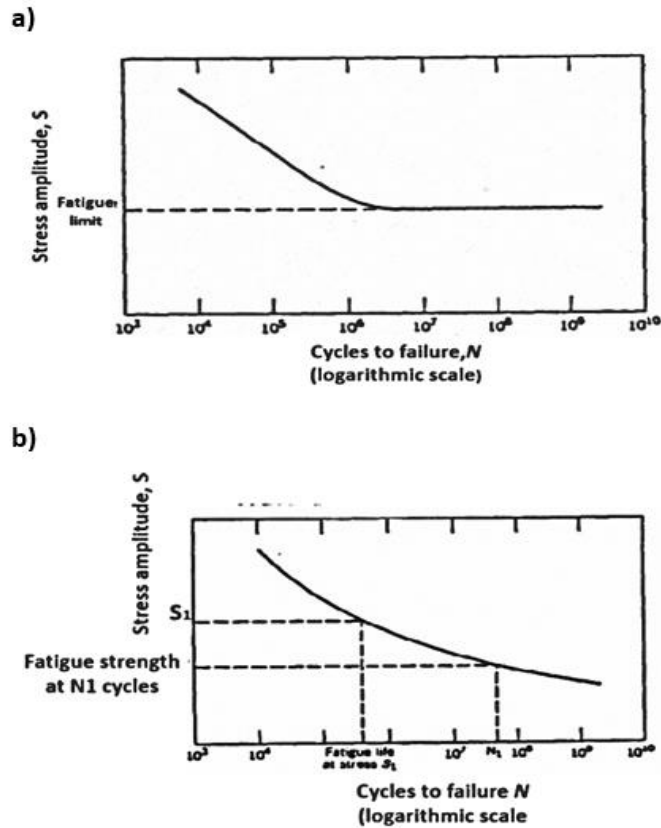


Figura 54. Resultado del comportamiento de los materiales que representan límite de fatiga (a) y materiales que no representan límite de fatiga(b). Adaptado de Northmore. A. (sf). Canadian Solar Road Panel Design: A Structural and Environmental Analysis

El estudio del comportamiento de los paneles solares a la repetición de cargas no supone gran dificultad. Primero se determinó la carga de diseño típica para el pavimento en la región interesada de estudio, en este caso, Ontario, Canadá. En la siguiente tabla se muestran los valores para la carga estática y la cíclica.

Tabla 8.

Condiciones de carga de eje equivalente para Ontario Canadá

Condition	Load [kN]	Contact Dimensions
Static	87.5	0.60-m x 0.25-m
Fatigue	40	0.529-m x 0.364-m

Fuente: Northmore, A. (sf). Canadian Solar Road Panel Design: A Structural and Environmental Analysis

El análisis de fatiga se completó de forma diferente para las capas de vidrio, la óptica y la base, ya que fallan a través de la carga cíclica por diferentes mecanismos, sin embargo, el objetivo es determinar el número de ESALs (carga de eje único equivalente) que el panel puede soportar en cada base estructural antes de la falla de cualquier componente.

Las muestras de vidrio fallan a través de los métodos de fractura debido a la naturaleza frágil del material. A medida que el panel se carga cíclicamente, la grieta se propaga lentamente. Esta propagación se produce a una velocidad constante mientras se aplica la carga al vidrio, por lo que también se analizará la sensibilidad de la velocidad del tráfico sobre el panel. Se han identificado otros factores que incluyen los parámetros de muesca en la literatura (Budynas & Nisbett, 2008) y variarán a medida que aumente la longitud de la grieta, lo que la convierte en una solución iterativa. Para que ocurra falla por fatiga, las deformaciones tensiles desarrolladas deben exceder la compresión de 69 MPa del proceso de templado del vidrio. (Northmore, s.f.)

Por su parte:

El laminado de polímero reforzado con fibra de vidrio falla a través de los métodos tradicionales de la teoría de la fatiga, ya que se han desarrollado curvas S-N que predicen con exactitud el rendimiento de varios laminados a cargas cíclicas. En este caso, la curva se ha desarrollado como se muestra a continuación... para matrices cortas de este material; que es una mejor estimación disponible del rendimiento de fatiga del GPO-3 utilizado en el panel de prototipos. La determinación de la cantidad de ciclos de carga disponibles se basa en la tensión inducida por la carga de fatiga hasta la relación de tensión máxima del material. (Northmore, s.f.)

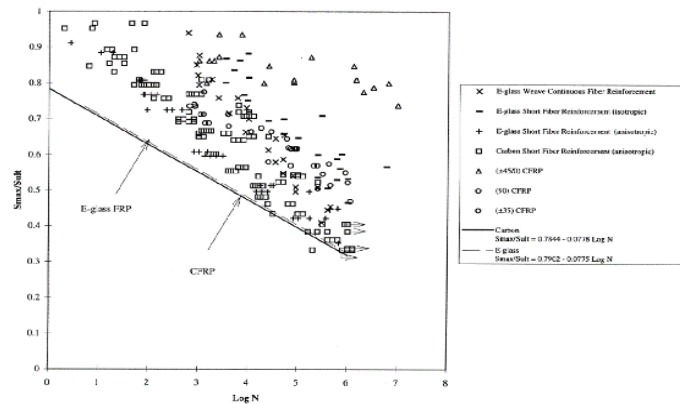


Figura 60. Curva esfuerzo vs Número ciclos. Adaptado de Northmore, A. (sf). Canadian Solar Road Panel Design: A Structural and Environmental Analysis

Los pavimentos de concreto fallan a través de una serie de mecanismos como se describe en las ecuaciones que se muestran” (Northmore, s.f.) a continuación “donde N_f es la cantidad máxima de ciclos de tensión, σ es la tensión cíclica aplicada al hormigón, y S_c es la resistencia a la compresión del hormigón. (Northmore, s.f.)

Ecuación 3: Ecuaciones de fatiga del pavimento de hormigón (Huang, 2004)

$$\text{For } \frac{\sigma}{S_c} \geq 0.55: \log N_f = 11.737 - 12.077 \left(\frac{\sigma}{S_c} \right)$$

$$\text{For } 0.45 < \frac{\sigma}{S_c} < 0.55: N_f = \left(\frac{4.2577}{\sigma/S_c - 0.4325} \right)^{3.268}$$

$$\text{For } \frac{\sigma}{S_c} \leq 0.45: N_f = \text{unlimited}$$

Fuente: Northmore, A. (sf). Canadian Solar Road Panel Design: A Structural and Environmental Analysis

De forma similar a las ecuaciones para GPO-3, existe un límite de resistencia a una tensión máxima de 0,45 veces la resistencia a la compresión del hormigón, en cuyo punto se pueden aplicar ciclos de fatiga ilimitados. La resistencia a la compresión asumida para estos cálculos será de 32 MPa, un valor de diseño tradicional para pavimentos de Ontario (ARA, 2011). Estas condiciones también son sensibles a la

colocación de la junta ya que típicamente se realizan esfuerzos más altos en los bordes y esquinas de las losas de concreto. (Northmore, s.f.)

Para el agrietamiento por fatiga, la relación entre la vida útil del diseño y la deformación horizontal desarrollada en la parte inferior de la capa de asfalto se muestra a continuación en la Ecuación 4; donde N_f es la cantidad permisible de ciclos de carga, ϵ_t es la tensión horizontal en la parte inferior de la capa de asfalto, y E_1 es el módulo elástico del material asfáltico. El valor de módulo elástico utilizado en esta ecuación empírica debe ingresarse en unidades imperiales, por lo que se utilizó un valor de 400,000 psi. (Northmore, s.f.)

Ecuación 4: Relación entre la vida útil del diseño y la deformación horizontal desarrollada en la parte inferior de la capa de asfalto

$$N_f = 0.0796(\epsilon_t)^{-3.291}(E_1)^{-0.854}$$

Fuente: Northmore. A. (sf). Canadian Solar Road Panel Design: A Structural and Environmental Analysis

En orden de analizar este fenómeno en la capa transparente, es decir:

Para desarrollar grietas por fatiga, se debe aplicar una tensión de tracción neta a la superficie, por lo que la tensión máxima medida debe ser mayor que la tensión de compresión inherente en el vidrio. La especificación mínima para el vidrio templado es una tensión de compresión de borde de 69 MPa. (Northmore, s.f.)

La figura siguiente muestra el límite de fatiga para la capa de vidrio templado y los esfuerzos generados en la misma, cuando se apoya sobre diferentes tipos de subrasantes de un pavimento común y se aplican las cargas estáticas y cíclicas.

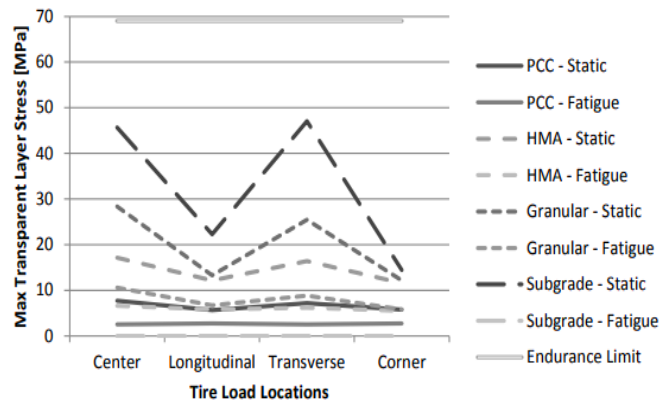


Figura 55. Límite de fatiga de la capa transparente. Adaptado de Northmore. A. (sf). Canadian Solar Road Panel Design: A Structural and Environmental Analysis

Como es notorio en la gráfica, “la capa transparente en el prototipo no formará grietas de fatiga en estas configuraciones. Como resultado, es posible reducir el grosor de los paneles de vidrio utilizados en las pruebas” (Northmore, s.f.)

Como resultado de esto, no se completó ningún análisis de crecimiento de grietas por fatiga.” (Northmore, s.f.)

Para la capa base hecha de GPO-3 se aplica la relación de la ecuación 4 teniendo en cuenta que solo es válida para valores por encima de 0.3. “Como resultado, la primera comprobación para realizar en las capas ópticas y de base es ver si superan este límite, que es de 16.6 MPa para los laminados GPO-3. Esto se muestra a continuación”

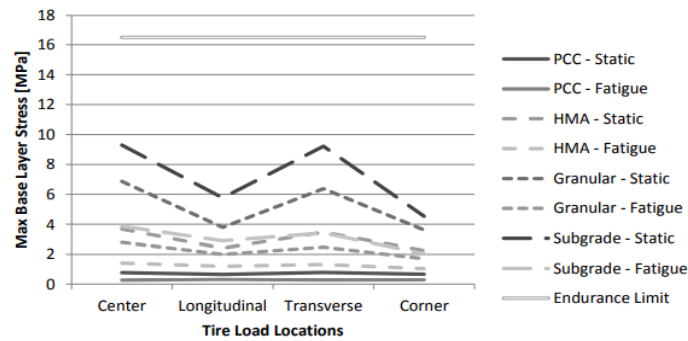


Figura 56. Límite de fatiga de la capa base. Adaptado de Northmore. A. (sf). Canadian Solar Road Panel Design: A Structural and Environmental Analysis

Haciendo el mismo análisis que para la capa transparente, se concluye que la capa base de GPO-3 no va a fallar por fatiga pues los límites de esfuerzo no superan 16.6MPa.

3.2.2.3 Estudios ambientales: La siguiente tabla muestra los 4 ensayos escogidos para estudiar los materiales de los adoquines solares.

Tabla 9.

Procedimientos estándar para pruebas ambientales

Purpose	Standard	Description	Sample Size
Conditioning	ASTM C672	Scaling resistance evaluation of concrete surfaces exposed to deicing chemicals	N/A
Testing	ASTM D790	Three-point bending of unreinforced and reinforced polymers	114-mm x 25.4-mm x 6-mm or 6.35-mm
Testing	ASTM E303	Frictional evaluation using the British Pendulum Tester	89-mm x 152-mm x 6-mm or 6.35-mm
Testing	ASTM E1175	Determining solar or photopic properties of materials using an integrating sphere	50.8-mm x 50.8-mm x 6-mm or 6.35-mm

Fuente: Northmore. A. (sf). Canadian Solar Road Panel Design: A Structural and Environmental Analysis

3.2.2.3.1 *Ensayo, ASTM C 672 aplicado a los paneles:* La prueba C672 indica cómo determinar la capacidad de una mezcla de hormigón para resistir la descamación en presencia de agentes químicos descongelantes. Ensayos en laboratorio y experiencias recabadas en obra confirman que la incorporación de aire mejora sustancialmente la resistencia a los descongelantes y es un factor fundamental para lograr pavimentos consistentemente resistentes a la descamación cuando las condiciones de exposición son severas.

Soluciones como la del concreto surgen de años de experimentación y observación del comportamiento del material en ambientes adversos, para hacer lo mismo con los módulos solares se requiere primero de la adecuación de la prueba estándar a los nuevos materiales usados y ver su reacción.

Para el ensayo se introducen las muestras en una solución de cloruro de sodio al 4% sin embargo en los materiales componentes del panel la descamación no tendrá un efecto significativo de análisis por lo que se aumenta la cantidad de cloruro de sodio al 25%.

Esto agrega otra diferencia entre a las pruebas de resistencia de descame tradicionales. Una solución al 25 por ciento en peso de cloruro de sodio en realidad no se congelaría a las temperaturas a las que podríamos reciclar las muestras, aunque las muestras aún alcanzan una temperatura de 16°C, según lo verificado por un termómetro de infrarrojos. Esto debería tener poco impacto en el estudio ya que el propósito típico de congelar la solución de salmuera es propagar el hielo en las grietas del material, pero debido a la suavidad de nuestras muestras, no debería de haber grietas significativas para que se propague el hielo, lo que hace que la mayor solidez de la solución sea una gran ventaja para determinar el potencial y los efectos de la corrosión. (Northmore, s.f.)

El estándar requiere una profundidad de solución constante en la superficie de las muestras que se mantendrá, sin embargo, la cantidad de especímenes y sus tamaños irregulares que se prueban lo hicieron difícil. Para acomodar esto, se determinó que las muestras podrían sumergirse o suspenderse en contenedores de la solución de salmuera. Esto todavía mantiene un nivel adecuado de salmuera que se

aplica a una superficie específica de la muestra, y cada muestra se puede identificar por el clima en que se sumergió o suspendió. Las muestras sumergidas eran típicamente de vidrio mientras que los polímeros se suspendieron debido a las diferencias en la densidad de los materiales. (Northmore, s.f.)



Figura 57. Muestras sometidas a congelación y descongelación. Adaptado de Northmore. A. (sf).

Canadian Solar Road Panel Design: A Structural and Environmental Analysis

El carro se colocaba dentro y fuera del congelador de laboratorio del CPATT a intervalos que permitían al menos dos horas para que las muestras se congelaran y dos horas para que las muestras se descongelaran, ya que estos eran los intervalos determinados durante los controles. El primer ciclo para asegurar que las muestras alcanzaran sus temperaturas requeridas según lo verificado por un termómetro infrarrojo. (Northmore, s.f.)

Durante el proceso, no se observaron efectos notables de descamación en ninguno de los especímenes. Los cambios que ocurren en los materiales se cree que ocurren a un nivel macroscópico en la superficie. El efecto más notable que se produjo durante la prueba fue una acumulación de residuos de sal en las muestras. (Northmore, s.f.)

La siguiente imagen muestra:

Ejemplos de vidrio, acrílico y policarbonato (de arriba hacia abajo) especímenes de 3 puntos de flexión que habían sido sometidos a 50 ciclos de congelación-descongelación.

Las muestras de la izquierda son del conjunto normal, mientras que las muestras de la derecha son del conjunto escalado. (Northmore, s.f.)

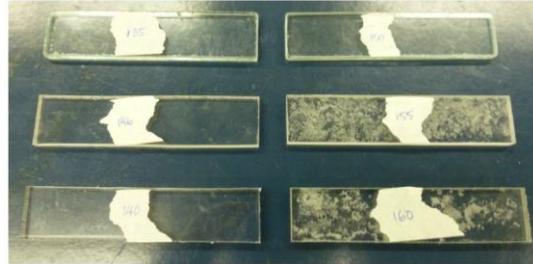


Figura 58. Acumulación de sal en las muestras. Adaptado de Northmore. A. (sf). Canadian Solar Road Panel Design: A Structural and Environmental Analysis

3.2.2.3.2 *Ensayo, flexión de tres puntos, ASTM D-790:* Debido a que no contaban con la maquina especializada para este tipo de ensayo, se diseñaron tres piezas de hardware para hacer que este estándar funcionará con la máquina Instron de 500kg; un collar para montar una base estructural de 3 puntos en el Instron (figura 64), los soportes de la nariz de soporte y el conjunto de la nariz de carga. La Figura 65 muestra los componentes terminados fabricados por RJB Machining.

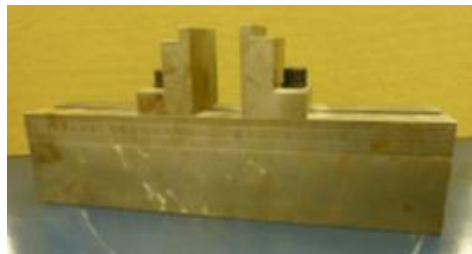


Figura 59. Punto base de la carga estructural para las pruebas. Adaptado de Northmore. A. (sf). Canadian Solar Road Panel Design: A Structural and Environmental Analysis



Figura 60. Narices de soportes de prueba de flexión de tres puntos, collar base y nariz de carga (de izquierda a derecha). Adaptado de Northmore. A. (sf). Canadian Solar Road Panel Design: A Structural and Environmental Analysis

Las muestras se cortaron originalmente con la intención de realizar pruebas en un tramo de 101,6 mm [4 pulgadas] debido a que el tamaño estándar de los materiales está disponible en un grosor de 6,35 mm [0,25 pulgadas]. (Northmore, s.f.)

Algunos de los materiales solo estaban disponibles en un tamaño métrico, por lo que se utilizó una profundidad de 6 mm para estos materiales, ya que este era el tamaño métrico disponible más cercano. Las dimensiones promedio y la desviación estándar de las mediciones se detallan a continuación en la Tabla 10. (Northmore, s.f.)

Tabla 10. Dimensiones promedio y la desviación estándar de las mediciones

Material	Length		Width		Height	
	Average [mm]	Standard Deviation	Average [mm]	Standard Deviation	Average [mm]	Standard Deviation
Acrylic	113.8	0.5055	24.83	0.5613	5.687	0.1651
Glass	114.3	1.400	26.25	1.041	5.550	0.03302
Polycarbonate	113.7	0.3353	24.93	0.5004	6.233	0.03810

Fuente: Northmore. A. (sf). Canadian Solar Road Panel Design: A Structural and Environmental Analysis

Para acomodar los materiales más delgados, se determinó que se debe usar un tramo menor de 101,6 mm [4 pulgadas] en las pruebas. Se estableció que el tramo en función del grosor real del material era de 95,25 mm [3,75 pulgadas], ya que esto permitiría probar todas las muestras dentro de los límites de la medición de muestras para la norma ASTM D790. (Northmore, s.f.)



Figura 61 Prueba del material con la Instron adaptada para el ensayo. Adaptado de Northmore. A. (sf). Canadian Solar Road Panel Design: A Structural and Environmental Analysis

El equipo de prueba se muestra en la Figura 66, con el espaciado de la nariz de soporte establecido en 92 mm [3.625 pulgadas], un valor dentro del rango válido de prueba según ASTM D790. La prueba se realizó a una velocidad de desplazamiento de 2,71 mm / min [0,1067 pulgadas/min] de acuerdo con la norma ASTM y las dimensiones de estas muestras.

Como candidatos para material de la capa transparente se toman el acrílico, el policarbonato y el vidrio. La figura 67 muestra el comportamiento flector de los tres materiales.

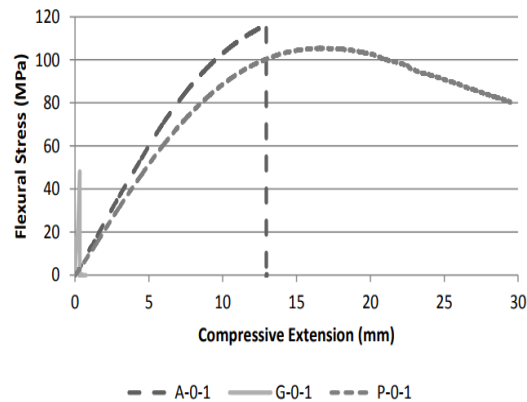


Figura 62. Comportamiento de los tres materiales a la flexión Adaptado de Northmore. A. (sf).
Canadian Solar Road Panel Design: A Structural and Environmental Analysis

La resistencia al esfuerzo flexionante del acrílico y el policarbonato es mucho mayor a la del vidrio que es de 50MPa lo que arroja como mejores opciones para material de la capa transparente al acrílico y el policarbonato, sin embargo, el desplazamiento del vidrio es por debajo de 1mm y “es importante tener en cuenta que la deflexión mínima se impuso como un requisito de diseño para un panel solar de carretera teniendo en cuenta que las células solares no se dañen por el tráfico de vehículos” añadiendo además que el:

Esfuerzo al que falla el vidrio es un esfuerzo equivalente para las muestras de acrílico y policarbonato a aproximadamente 4 mm y 5 mm respectivamente.

La menor rigidez de las opciones del polímero no solo impacta la deflexión sobre las células solares, sino que también pone mayor énfasis en la rigidez del panel que se basa en los materiales de la capa estructural.

En el diseño actual del prototipo esto se invierte ya que la rigidez se basa principalmente en el vidrio con las capas estructurales de GPO-3 actuando como soporte. En un diseño con acrílico o policarbonato como la capa óptica, es probable que se requiera aluminio, acero u otro metal estructural para que las capas estructurales hagan todo el panel lo suficientemente rígido como para minimizar las tensiones en las células solares. (Northmore, s.f.)

3.2.2.3.3 Prueba de fricción, ASTM E-303

La prueba de fricción, según ASTM E303 (ASTM, 2012b), se realizó en el laboratorio CPATT utilizando el péndulo británico calibrado existente. Se siguió el estándar sin modificaciones, y en base a la práctica se determinó que se requerían seis pulverizaciones de agua de una botella de spray para saturar completamente la superficie de las muestras con agua, como se muestra en la figura 68. (Northmore, s.f.)



Figura 63. Muestra de prueba de fricción saturada de agua. Adaptado de Northmore. A. (sf).

Canadian Solar Road Panel Design: A Structural and Environmental Analysis

Para acomodar las muestras de prueba, se diseñó una plataforma con parachoques ajustables, como se muestra en la Figura 69. Se creó para instalarse alrededor del encofrado existente para el péndulo. Esta plataforma también permitió la compatibilidad entre las pruebas de fricción en curso

en el laboratorio, por lo que no era necesario reajustar constantemente el péndulo entre probar cilindros de hormigón para otras investigaciones y los materiales ópticos para este análisis.



Figura 70. Plataforma de prueba de fricción. Adaptado de Northmore, A. (sf). Canadian Solar Road Panel Design: A Structural and Environmental Analysis

Los datos obtenidos de esta prueba están en términos de números de péndulo británicos, BPN, ya que los valores obtenidos eran demasiado bajos para compararlos en términos del número de deslizamiento; un valor más comúnmente utilizado en la evaluación del pavimento. (Northmore, s.f.)

“Para un pavimento típico, un BPN de 40 proporciona una excelente característica de fricción húmeda para conducir”, por otro lado, las pruebas arrojaron valores promedios que no superaban un BPN de 30 por lo que se concluye que *“el acrílico, el vidrio y el policarbonato requerirían mejoras significativas de micro y macro texturas para proporcionar suficiente fricción siendo una superficie húmeda de manejo”* (Northmore, s.f.)

3.2.2.3.4 Prueba óptica

Las pruebas ópticas, según lo descrito por ASTM E408-13 (ASTM, 2013), E903-12 (ASTM, 2012a) y E1175-87 (ASTM, 2009), se realizan para determinar la transmitividad, reflectividad y absortividad de

los materiales. El aparato utilizado para esta prueba es el espectrofotómetro Varian Cary 5000 UV / VIS / NIR, como se muestra. (Northmore, s.f.)

En la Figura 70, “operado por el Laboratorio Solar de Investigación Térmica en la Universidad de Waterloo”. (Northmore, s.f.)



Figura 64. Espectrofotómetro Varian Cary 5000 UV / VIS / NIR. Adaptado de Northmore. A. (sf).

Canadian Solar Road Panel Design: A Structural and Environmental Analysis

Las pruebas se realizaron a intervalos de 5 nm desde 250 nm hasta 1200 nm. El pico de 1200 nm para las pruebas se eligió para garantizar que se cubriera todo el espectro de absorción de las células fotovoltaicas solares (Luque y Hegedus, 2003) y para reducir el tiempo de ejecución de la prueba de 2500 nm, según estaba disponible; la prueba de radiación de onda larga, prueba de más de 800 nm, requiere mucho tiempo debido al sensor utilizado para la recopilación de datos. (Northmore, s.f.)

En la prueba, se usaron muestras cuadradas de 50,8 mm [2 pulgadas] para garantizar que el material cubriría toda la abertura para la transmisión de la luz. Las muestras se limpiaron con un limpiador de vidrios antes de la prueba para eliminar cualquier residuo que se haya acumulado durante el proceso de escalado. Para las pruebas de transmisión, las muestras se instalaron frente a la esfera integradora del Cary 5000, como se muestra. (Northmore, s.f.)

En la Figura 71, “de modo que la radiación electromagnética podría pasar a través de la muestra y dentro de la esfera integrante. Para la prueba de reflexión, las muestras se instalaron detrás de la esfera integradora como se muestra en la Figura 70”. (Northmore, s.f.)

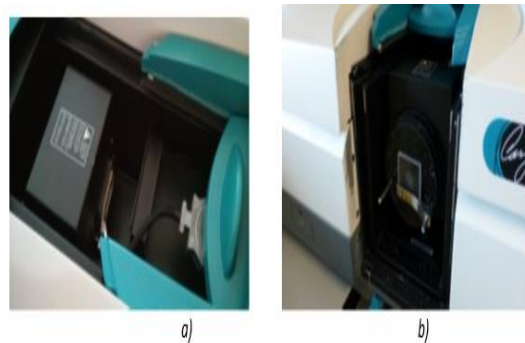


Figura 65. Posicionamiento de muestras para pruebas de Transmisividad (a) y reflectividad (b). Adaptado de Northmore. A. (sf). Canadian Solar Road Panel Design: A Structural and Environmental Analysis

La figura 72 Muestra la comparación entre los valores de transmisividad de las muestras normales y las sometidas al ensayo de descamación... A partir de este gráfico, es evidente que el acrílico de grado óptico adquirido tiene la transmisividad global más alta, mientras que las muestras de policarbonato tuvieron la menor, y las muestras de vidrio fueron, en general, ligeramente más altas que los resultados del policarbonato. La transmisividad es el factor más importante para determinar la eficiencia del panel solar, ya que un valor más alto significa que más radiación incidente en el panel llegará a las células solares, lo que hace que el acrílico sea la mejor opción desde esta perspectiva. (Northmore, s.f.)

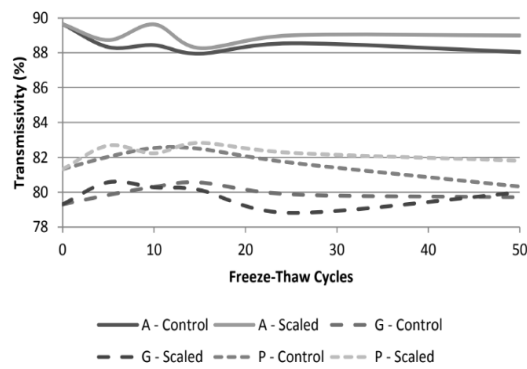


Figura 66. Transmisividad de los materiales. Adaptado de Northmore. A. (sf). Canadian Solar Road Panel Design: A Structural and Environmental Analysis

La figura 73 “muestra la comparación entre los valores promedio de reflectividad de las muestras utilizadas en las pruebas ópticas.” (Northmore, s.f.)

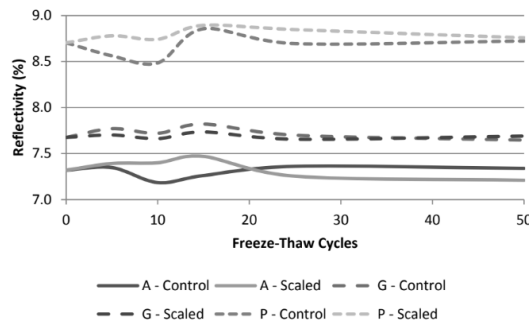


Figura 67. Reflectividad de los materiales. Adaptado de Northmore. A. (sf). Canadian Solar Road Panel Design: A Structural and Environmental Analysis

Evidente que las muestras de policarbonato tienen la mayor reflectividad, seguidas por las muestras de vidrio, y las muestras de acrílico tienen la menor. En términos de ingeniería de transporte, la reflectividad es una propiedad de seguridad muy importante; los caminos que son demasiado reflectantes producen reflejos que pueden distraer a los conductores y causar

accidentes. Desde esta perspectiva, tanto el material acrílico como el vidrio proporcionan buenas opciones en comparación con el policarbonato. (Northmore, s.f.)

Por último, la figura 74 muestra los valores promedio calculados para la absorptividad de los materiales. Aquí está claro que las muestras de vidrio son las más absorbentes, seguidas por las muestras de policarbonato, y que las muestras acrílicas son mucho menos absorbentes. La energía absorbida por estos materiales va a afectar directamente a la temperatura de la capa transparente de un panel de carretera solar, por lo que los valores más bajos son más ideales. Dicho esto, la capa estructural debajo de la capa transparente absorberá mucha más radiación. (Northmore, s.f.)

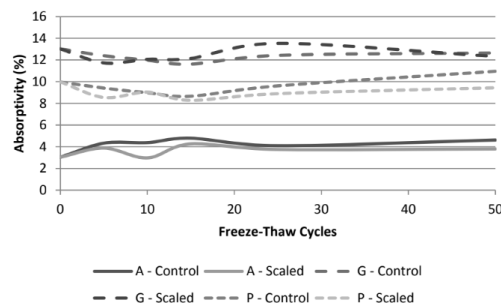


Figura 68. Absorptividad de los materiales. Adaptado de Northmore. A. (sf). Canadian Solar Road Panel Design: A Structural and Environmental Analysis

4. Comparaciones

El adoquín SR3 desarrollado por la corporación Solar Roadway, el propuesto por Andrew Bruce Northmore en la Universidad de Waterloo y el modelo holandés de la TNO, suponen un cambio total en el modelo común de una superficie no fragmentada de rodadura vial, a un modelo embaldosinado.

En la construcción de una estructura en pavimento para evitar fisuras y fallos por fatiga, el diseñador debe asegurar que la distribución de cargas a lo largo de toda la superficie vial sea la adecuada. Es decir, que la capa de rodadura sea homogénea tal que garantice una buena transferencia de cargas, como se muestra en la siguiente figura.

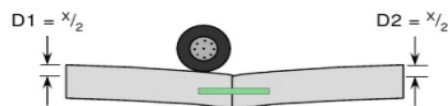


Figura 69. Buena transferencia de cargas usando pasadores o conectores en el pavimento rígido.

Adaptado de Diseño de Pavimentos Rígidos. (2008). SlideShare. (16 November 2017), Disponible en:

<https://es.slideshare.net/henryj20/diseo-pavimento-rigido>

El desplazamiento vertical diferencial sea cual sea el material de la superficie vial genera fallas en la estructura, que se presentan como grietas en los pavimentos y como desniveles en las losas o cuadros cuando la carretera se compone de adoquines (ya sea en piedra, en concreto o en paneles solares). Las causas son una pérdida de soporte en una de las losas, que desciende con respecto a

la otra producida por el bombeo y arrastre de finos, que migran en la parte inferior de una losa con respecto a la otra.

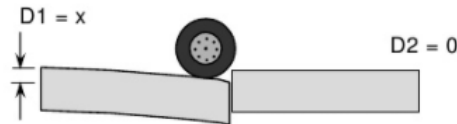


Figura 70. Mala transferencia de cargas. Adaptado de Diseño de Pavimentos Rígidos. (2008). SlideShare. (16 November 2017), Disponible en: <https://es.slideshare.net/henryj20/diseo-pavimento-rigido><https://es.slideshare.net/henryj20/diseo-pavimento-rigido>

En las carreteras adoquinadas el desplazamiento vertical diferencial se hace más pronunciado con el paso del tiempo y provoca desprendimientos de sus componentes. Cosa que es más sencilla de prevenir en una carretera de pavimento convencional. De este modo pensar en construir paneles solares de tamaños pequeños agrega un problema grave al desempeño de la carretera

Este problema agrega entonces una variable más al diseño de un modelo óptimo para las carreteras solares y es el sistema de ensamble entre paneles. Se podría creer que los modelos creados por la entidad holandesa han funcionado muy bien estructuralmente debido a su tamaño y a que son embebidos en una base de concreto, pero el punto clave está en la forma de contorno del panel y en sus conexiones. Al ser rectangulares, los módulos permiten mayor adaptación entre sí en sus bordes. Un prototipo holandés tiene dos huecos conectores en las dos esquinas de uno de los bordes que se juntan y en el otro borde opuesto tiene dos patas o conectores que encajan en los huecos del módulo adyacente.

Estas conexiones son de gran tamaño comparadas con las conexiones de los modelos SR3 de SolarRoadways que ya han presentado falencias en su prototipo puesto en Sandpoint Idaho.

Sin embargo, las investigaciones y los modelos propuestos por los ingenieros estadounidenses cuentan con cierto grado de complejidad mayor, que enmarca el objetivo de reinventar todo el sistema de carretera para volverlo totalmente amigable con el ambiente y esto se refleja en que su prototipo tenga más características que agrandan el pliego de servicios brindados como: proveer de iluminación y señalización de las vías incorporando luces led y circuitos programadores, y la creación de un sistema de bombeo de la escorrentía mediante un conjunto de válvulas y bombas alimentadas con la misma energía de los paneles. Aun cuando este sistema de bombeo sea un rediseño de las cunetas y no del panel solar en sí.

En suma, abarcan otros aspectos para la optimización del uso de las carreteras partiendo de la generación de energía limpia. Cosa que las tecnologías, francesa y holandesa, no definen en sus paneles. En el caso del diseño propuesto por Andrew Northmore, la disposición de la capa óptica que sirve de cajón o malla para proteger a las células solares no permite la adaptación a dispositivos electrónicos pues implicaría una reducción del área de las células solares que se traduce en un decrecimiento del rendimiento del módulo creando energía eléctrica.

La siguiente tabla muestra el desempeño de los modelos propuestos por TNO de Holanda, SRI de Estados Unidos, Wattway de Francia y Andrew Northmore de la Universidad de Waterloo Canadá en términos de kWh por año para un modelo pavimentado de carretera de 1Km de longitud.

Tabla 11

Rendimiento de una carretera solar de un kilómetro de longitud

Prototipo	Rendimiento Anual (KWH/km)
TNO	9.800,0
SolarRoadways	$4.5*(48*2)*30*12=155.520,0$
Universidad de Waterloo	$4.5*69,58*30*12= 112.719,6$
Wattway	$790*30*12= 284.400,0$

Donde el rendimiento del modelo de la TNO se obtuvo de los documentos leídos y seleccionados sobre el carril-bici después de su primer año de funcionamiento.

Para el modelo SR3 de SRI se usó una ecuación sencilla en el cálculo del rendimiento de las células; donde 4,5 es el índice de radiación del lugar en que se quiere ubicar el panel (se escogió la ciudad de Bucaramanga, ver **Apéndice Y**) 48 es el rendimiento del panel dado en vatios (W), 2 es la cantidad de paneles que se necesitan para crear un área de 1 metro cuadrado, 30 y 12 son factores de conversión a mes y año respectivamente.

De igual forma se hizo el análisis para el modelo de A. Northmore dividiendo y multiplicado por mil para tener las unidades de kW y de kilometro respectivamente. Para Wattway de COLAS se simplificó pues el dato de la producción diaria del kilómetro construido ya se tenía.

La diferencia en el rendimiento puede ser provocada por muchos factores como la zona donde se ubican los prototipos ya que la radiación es variable según la superficie del planeta, también la potencia de salida de las células solares que usaron, por ejemplo, en la tecnología Wattway, pudo

ser mayor que la potencia de las células seleccionadas en el proyecto de la Universidad de Waterloo y en los otros dos prototipos.

Comparando a SolarRoadways con el modelo de Andrew Northmore vemos que los resultados son muy similares, de igual forma que sus modelos de paneles solares. Del mismo modo si observamos la tecnología francesa, Wattway, y la holandesa, SolaRoad, presentan grandes diferencias entre sí, teniendo los rendimientos más altos y más bajos respectivamente. Lo que lleva a la suposición de que el diseño de los módulos entra a ser un factor más que altera el rendimiento de la producción de energía, enfocado a la capa superior, que tiene la importante tarea de dejar pasar la radiación incidente en el panel a las células fotovoltaicas, mientras soporta las solicitaciones del tráfico y el ambiente.

5. Conclusiones

- Pese a la falta de pruebas que estudiaran el comportamiento de los nuevos materiales en condiciones de uso para una superficie de rodadura vial, y los arreglos no estandarizados para poder someter las muestras a algunos ensayos, las entidades implicadas lograron crear prototipos iniciales de paneles solares que se adaptaran a las demandas del tráfico y el ambiente. No obstante, la optimización del diseño de un panel solar avanza lento, y en conjunto estos presentan falencias.

Los modelos in situ arrojaron un decrecimiento fuerte en la producción de energía. Tal es el caso de la calzada puesta a prueba en Normandía Francia, por parte de COLAS, que no alcanzó el pico previsto de 17963 KWH por día y se quedó en 790 KWH por día, y el carril bicicleta de

Holanda que, aunque, según reportes, superó las expectativas, su producción no supera los 10000 KWH por año, lo que alcanza apenas para cubrir la demanda de 3 hogares de bajo consumo eléctrico.

Lo anterior refleja la incapacidad de auto sostenibilidad de los modelos de carreteras solares creados hasta este punto de la historia. Los prototipos nombrados en el párrafo anterior tuvieron costos de producción de 5 y 3.5 millones de euros respectivamente para cada kilómetro, es decir en promedio 4 veces más el costo de un kilómetro de vía en condiciones sencillas; que es en promedio de 1,2 millones de euros. Traducido en precio de producción energética, el watt/vatio que normalmente vale 1 euro, cuesta aproximadamente 16 euros. Por lo tanto, es necesario optimizar el rendimiento de las células fotovoltaicas, y el diseño y producción de los paneles.

- En aditamento, el grupo de paneles SR3 manifestó grandes falencias estructurales en el prototipo montado en una plazoleta de Sandpoint Idaho, donde se observó que después de unos pocos meses de funcionamiento la mayoría de las luces LED habían dejado de funcionar y los paneles se notaban sueltos o desanclados de la base o subrasante, producto de un mal sistema de unión entre esta capa de paneles y las inferiores que sirven de soporte. A partir de lo cual, se puede concluir, que la conexión entre paneles SR3 tampoco eran adecuadas, por lo que estas y las conexiones entre las capas que conforman la estructura vial necesitan un desarrollo investigativo más profundo.

- Aun cuando se aclara que las diferencias tan grandes en los resultados arrojados por el modelo de predicción de FE y las pruebas estructurales puede ser debida a errores en la simulación de las condiciones de borde del panel solar en el software, la dificultad para adaptar las pruebas estructurales al prototipo en físico de Andrew Northmore no se puede descartar como factor de error. Lo que nos lleva a pensar que es necesario realizar una investigación sustanciosa dedicada

a ampliar la gama de materiales que pueden servir como superficie de rodadura vial y la consecuente estandarización de las pruebas pertinentes.

Por el momento el único modo cien por ciento verídico de probar el desempeño de los paneles es construir prototipos de carretera y estudiar su comportamiento. Sin embargo, realizar pruebas a los diseños posteriores a la instalación ayuda a prever y desarrollar panes que tengan un buen desempeño y reduce los números de intentos fallidos en la reinversión y mejora de los mismos.

Referencias bibliográficas

- Agrawal, R., & Prakash, O. (2017). Feasibility Study of Solar Roadways, (2), 1972–1976.
- Agrawal, R., & Prakash, O. (2017). Feasibility Study of Solar Roadways. Imperial Journal of Interdisciplinary Research (IJIR), 3(2), 5. Retrieved from <http://www.onlinejournal.in>
- ASIF. (2008). Historia de la energia solar fotovoltaica. Retrieved from <https://edi-net6-4-0-6.wikispaces.com/file/view/HISTORIA+energia+solar+1.pdf>
- ASST.PROF. INGAWALE P.K, DESHMUKH S.P, GAIKWAD A.S, A. S. (2017). A Review on Solar Roadways, 4, 860–863. Retrieved from prasadingawale@gmail.com, shekhar141096@gmail.com, [shekharaawale46@gmail.com](mailto:shekhar141096@gmail.com),
- ASST.PROF. INGAWALE P.K, DESHMUKH S.P, GAIKWAD A.S, A. S. . (2017). A Review on Solar Roadways, 4, 860–863. Retrieved from prasadingawale@gmail.com, shekhar141096@gmail.com, [shekharaawale46@gmail.com](mailto:shekhar141096@gmail.com)
- Ayushi Mehta, Neha Aggrawal, A. T. (2015). Solar Roadways-The future of roadways. International Advanced Research Journal in Science, Engineering and Technology (IARJSET), 2(1), 1–5. Retrieved from <https://doi.org/10.17148/IARJSET>
- Bañon Blásquez L. Los primeros Caminos. Antecedentes Históricos. Retrieved from https://sirio.ua.es/proyectos/manual_%20carreteras/01010101.pdf
- Baquero, I. O. (2014). Breve reseña histórica de las vías en Colombia.
- Barepcultural. (2018). Red Cultural del Banco de la República de Colombia. Retrieved from http://www.banrepcultural.org/blaavirtual/historia/equinoccial_3_transportes/cap9.htm

- Beeldbank.rws.nl. (2017). Dvk_b2324. Retrieved from https://beeldbank.rws.nl/MediaObject/Details/Dynaflect_442203
- Bigordà, T. (2018). Calzada solar de un kilómetro de longitud en Normandía. *Renovables Verdes*. Retrieved from <https://www.renovablesverdes.com/calzada-solar-de-un-kilometro-de-longitud-en-normandia/> [Accessed 26 Oct. 2017].
- Blanco Zorio, V. (1987). Breve historia de las Carreteras. *Revista de Obras públicas*. Retrieved from http://ropdigital.ciccp.es/pdf/publico/1987/1987_enero_3254_04.pdf
- Capitulo 1, INVIAS 2012, ARTICULO 100, SECCIÓN 100.3, pdf
- Cardozo Piña, A. (2014). Cálculo y Diseño de Sistema Solar Fotovoltaico para Uso Doméstico. Universidad Nacional Autónoma de México, 50. Retrieved from <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/6924/TESINA.pdf?sequence=1>
- Celdas Solares. (2005). *Textoscientificos.com*. Retrieved 19 October 2017, Retrieved from <https://www.textoscientificos.com/energia/celulas>
- Colas. (2016). Ségolène Royal, Minister of Environment, Energy and Sea, unveils one kilometer of Wattway solar road in Normandy, (France), 1. Retrieved from <http://www.wattwaybycolas.com/wp-content/uploads/2016/12/20161222-Communiqué-de-presse-Inauguration-Tourouvre-GB.pdf>
- Diseño de Pavimentos Rígidos. (2008). SlideShare. Retrieved 16 November 2017, Retrieved from <https://es.slideshare.net/henryj20/diseo-pavimento-rigido><https://es.slideshare.net/henryj20/diseo-pavimento-rigido>
- Exploratory, T., Fact, P., Production, E. P., Power, I., & Benefits, E. (n.d.). *Creating Productive Roadways*.

- Fundación Estanislao Merchán-Cano. Isidoro Medina Patiño. [En línea]. Retrieved from <http://www.isidorohistoria.com/historia>
- Hacke, P., Burton, P., Hendrickson, A., Spataru, S., Glick, S., & Terwilliger, K. (2015). Effects of photovoltaic module Soiling on Glass Surface Resistance and Potential-Induced Degradation. National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO, USA, 1–5. Retrieved from <https://doi.org/10.1109/PVSC.2015.7355711>
- Hartwig, B. B. (n.d.). Solar Roadways: The Future We' ve Been Looking For, 8. Imagen tomada de SOLAROAD, "Paving the way to the road of the future, pdf"
- King, A. (2016). Solar roads. Retrieved from http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/cind.803_3.x/abstract
- Kolokotsa, D. (2016). Smart cooling systems for the urban environment. Using renewable technologies to face the urban climate change. Solar Energy, 11. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.12.004>
- Kristiyan Yotov, Yana Panayotova, P. G. (2015). SOLAR ROADWAYS. SOFIA UNIVERSITY Faculty of Economics and Business SOLAR, 2–16.
- McCarville, D. (2017). Solar roads. HDIAC Social & Multi-Media Editor, 2. Retrieved from http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/cind.803_3.x/abstract
- McCarville, D. (2017). Solar roads. HDIAC Social & Multi-Media Editor, 2. Retrieved from http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/cind.803_3.x/abstract
- Monera, F. (2015). Breve Historia De La Energía Solar Fotovoltaica. ELECSOLSOLAR. Madrid. Retrieved from <http://www.elecsolsolar.com/wp-content/uploads/2015/01/BREVE-HISTORIA-DE-LA-ESF.pdf>


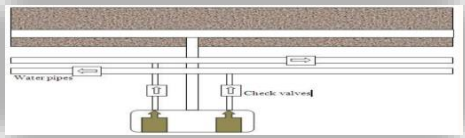
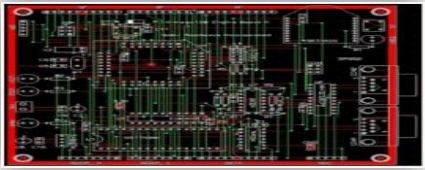
- Muñoz, F. F. (2001). CONSERVACIÓN DE CARRETERAS NACIONALES EN COLOMBIA, UN EJEMPLO A SEGU. Universidad Nacional de Colombia. Retrieved from <https://doi.org/10.1007/s13398-014-0173-7.2>
- Northmore, A. B. (2014). Canadian Solar Road Panel Design: A Structural and Environmental Analysis by.
- Northmore, A. Canadian Solar Road Panel Design: A Structural and Environmental Analysis
- Nussbaum, John H.; Lake, Robert A. Coutu, Ronald A. Air Force Institute of Technology Wright Patterson AFB, OH, USA, john.nussbaum@afit.edu. “Standardized Testing of Non-Standard Photovoltaic Pavement Surfaces”
- OUTBACK, M. M. (2015). Solar Roadways. Retrieved from <http://www.solarroadways.com/faq.shtml#faqAnimalNaps>
- Ravi Sharma, Mohit Purohit, Jayshree Mor, Sonali Lad, S. K. (2017). “Solar Roadways” – Rebuilding our Infrastructure and Economy. International Journal of Engineering Research In Science & Engineering, 2(3), 1429–1436. Retrieved from www.ijrise.org Ceditor@ijrise.org
- Roadways, S. (2010). Highways baking in the hot sun are wasted energy. Scott Brusaw’s solution? Make them out of solar panels THE LAZY ENVIRONMENTALIST: NO-SWEAT TIPS FOR GOING GREEN Get Paid to Save Money on Your Utility Bill, (July).
- Serrano Mitre, R. C. (2006). “Estudio De Fatiga De Pavimentos Rígidos, Mediante Determinación De La Resistencia Cíclica De Probetas Cilíndricas De Hormigón Cargadas Transversalmente.” Universidad Austral de Chile, 150. Retrieved from <http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2006/bmfcis487e/doc/bmfcis487e.pdf>
- Serrano Mitre, R. C. (2006). “Estudio De Fatiga De Pavimentos Rígidos, Mediante Determinación De La Resistencia Cíclica De Probetas Cilíndricas De Hormigón Cargadas Transversalmente.”


- Universidad Austral de Chile, 150. Retrieved from <http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2006/bmfcis487e/doc/bmfcis487e.pdf>
- Site.concreservicios.com.co. (2017). Péndulo Británico | Concreservicios. Retrieved from <http://site.concreservicios.com.co/index.php/pendulo-britanico/>
- Solarroadways.com. (2017) R&D- SolarRoadways. Retrieved from <http://www.solarroadways.com/Research/Research>.
- Solarroadways.com. (2017). Solar Freakin' Videos. Retrieved from <http://www.solarroadways.com/Product/Videos#>
- Solarroadways.com. (2017). Solar Roadways Specifics. Retrieved from <http://www.solarroadways.com/Specifics/Electrical>
- Solis, J. (2012). Física de Celdas Fotovoltaicas. Universidad Nacional de Ingeniería de Perú, 42. Retrieved from http://www.perusolar.org/wp-content/uploads/2012/12/III_Jsolis1.pdf
- Sophiahightech.com. (2017). Citar un sitio web - Cite This For Me. Retrieved from <http://www.sophiahightech.com/astm-d-4255-testing-fixture-2/?pdf=246> [Accessed 17 Sep. 2017].
- Tino Ramos, R. (2007). Vías, carreteras y otras calzadas: Breve historia de las mismas. Cimbra: Revista Del Colegio de Ingenieros Técnicos de Obras Públicas, (376), 16–25. Retrieved from <http://dialnet.unirioja.es/servlet/extart?codigo=2447886>
- Tipos de deterioros en Pavimentos de Concreto. CATALOGO ARGOS, Retrieved from www.argos.com.co.
- Wattway, C. (2016). First ever US Wattway solar road installed in Georgia, (December), 1. Retrieved from www.wattwaybycolas.com

_____. (2017). Paving the way to tomorrow's energy, 1–15. Retrieved from wattwaybycolas.com

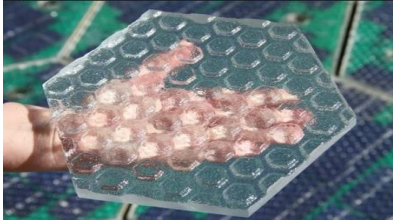

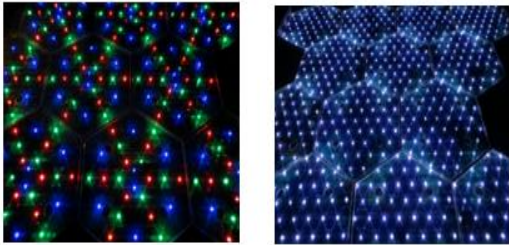
Apéndice

Apéndice A. Resumen de los avances de la primera fase de la empresa Solar Roadways

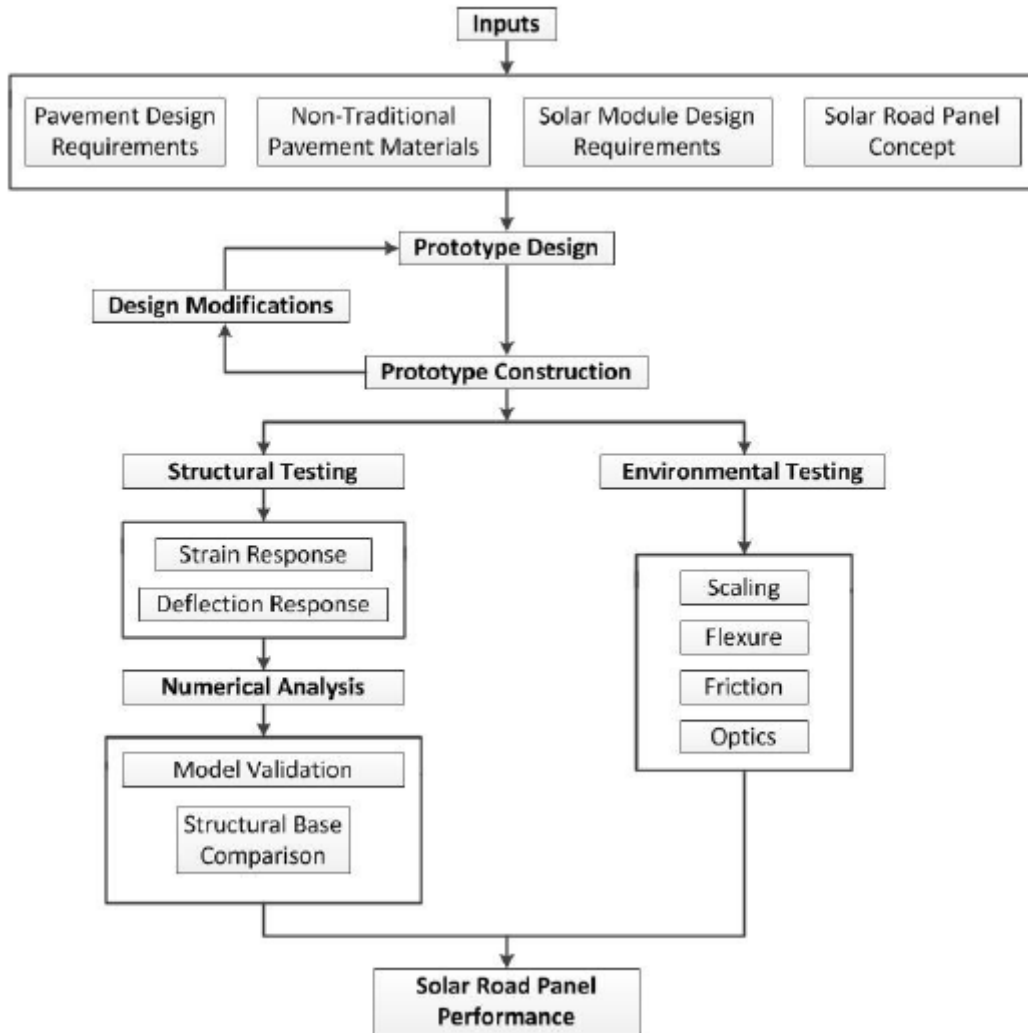
Materiales	Descripción	Imagen
<p>VIDRIO</p>	<p>Se seleccionó vidrio flotante debido a su amplia disponibilidad comercial y bajo coste. El contenido de hierro afecta negativamente a la transmitancia (capacidad de pasar la luz del sol) del vidrio, por lo que se seleccionó un vidrio de hierro bajo.</p>	 <p><i>Ilustración 1 Vidrio flotante [19]</i></p>
<p>SISTEMA DE RECOLECCIÓN DE AGUA LLUVIA</p>	<p>Diseñando estas carreteras con sistemas de retención de aguas pluviales, se puede hacer el filtrado inicial. Si se incluyen bombas, el agua podría trasladarse a áreas de tratamiento avanzado y luego a acuíferos o centros agrícolas.</p>	 <p><i>Ilustración 2 Vista lateral del sistema de retención de aguas pluviales [19]</i></p>
<p>CIRCUITOS ELECTRÓNICOS Y SOFTWARE PARA LA ILUMINACIÓN</p>	<p><i>"Tres placas de microprocesador fueron ensambladas y probadas. Estas fueron las tablas de control / comunicaciones para el sistema de control de aguas pluviales, el panel de camino solar y el panel de la acera. Se agregó un módulo XBee RF a la placa del microprocesador"</i></p>	 <p><i>Ilustración 3 Placa de microprocesador [19]</i></p>

Materiales	Descripción	Imagen
	<p>para incorporar la comunicación inalámbrica.</p> <p>Scott luego escribió el firmware* para las placas de microprocesador. Se necesitaba un programa de software para probar y controlar, que incluye:</p> <p>Configurar qué LED se encenderán/apagarán, controlar las bombas de aguas pluviales y leer/controlar el panel del paso de peatones. Scott al mismo tiempo escribió el firmware y los programas de software para las interacciones deseadas."[19]</p>	 <p>Ilustración 4 software de prueba[19]</p>

Apéndice B. Resumen de los avances de la segunda fase de la empresa Solar Roadways

Material	Descripción	Imagen
<p>Vidrio</p>	<p>Vidrio con capacidad de 250,000lb y rugosidad suficiente para frenar un vehículo a 125km/h en condiciones de humedad.</p>	
<p>Pasillo del cableado</p>	<p>Diseñado para que una persona adulta entrara en él y pudiera manipular los circuitos, pero el uso de guantes de protección es imposible</p>	 <p><i>Ilustración 6 [19]</i></p>
<p>Circuitos electrónicos y software para la iluminación</p>	<p><i>Diseño LED inicial incluía 51 LED blancos y 51 LED amarillos por panel hexagonal. El circuito del microprocesador permitió 128 líneas de entrada / salida para los LED, de modo que dejó 26 líneas de E / S no utilizadas.</i>[19]. Agregó 9 LED rojos, 9 verdes y 8 azules, pero la intensidad de estos en el mercado era baja así que en el día no se visibilizaban los colores.</p>	 <p><i>Ilustración 6 de luces LED [19]</i></p>

Apéndice C. Diagrama de Investigación de la metodología por Andrew Bruce Northmore



Apéndice D. Descripción de los componentes del prototipo desarrollado por Andrew Northmore en la Universidad de Waterloo

Material	Descripción
Vidrio	Se definió que con dos hojas bastaría. En caso de que se rompa la más externa la otra sola podría resistir la sollicitación del tráfico. Tensión del vidrio templado 42Mpa. Secciones en voladizo de 140mm ² . Espesor de cada lámina 10mm
Estructura de soporte	<p>La capa óptica se compone de dos capas de fibra de vidrio de GPO-3 con espesores de 6,35mm cada una. Una de las capas tiene recortes para el paso de las interconexiones de las láminas fotovoltaicas y la otra (que soporta la capa transparente) no.</p> <p>La capa base está dividida en dos subcapas de GPO-3. La capa que sirve de base para las células es de espesor 6,35mm y de menor área. La otra que tiene contacto directo con la subrasante tiene espesor de 12,7 mm</p>
Marco	Perfil en C de 50,8 mm- [2-in] de aluminio 6061-T6.
Células fotovoltaicas	Lámina DMSolar DMS-125M-280 (RMSolar, 2012) con voltaje de máxima potencia y la corriente de 0.521-V y 5.342-A, respectivamente. 25 láminas cuadradas de lados que miden 125mm

Apéndice E. Resumen de los avances de la fase IIB de la empresa Solar Roadways con el producto SR3

Material	Descripción
Vidrio	Dos capas de vidrio que emparedan a las láminas fotovoltaicas.
Polimérico	Tiene una capa de polímero más resistente a la temperatura. El material es usado para sellar herméticamente todos los componentes sensibles al clima, y actúa como un adhesivo, uniendo las capas de vidrio templado en una estructura laminada. "También transfiere las cargas de la superficie de rodamiento a la capa de vidrio base que está en contacto directo con la estructura de hormigón de soporte debajo de los módulos". [22]
Circuitos electrónicos y software para la iluminación	"Diseño LED inicial incluía 51 LED blancos y 51 LED amarillos por panel hexagonal. El circuito del microprocesador permitió 128 líneas de entrada / salida para los LED, de modo que dejó 26 líneas de E / S no utilizadas." [19] Agregó 9 LED rojos, 9 verdes y 8 azules. La intensidad de las bombillas LED es mayor y ya se puede ver su iluminación en el día.
Sistema de anclado entre módulos	Cada módulo o adoquín está anclado a esta capa de cimentación de concreto con una serie de clips a lo largo de sus bordes.

Apéndice F. Comparación de los 3 ensayos escogidos de la ASTM

Código en la ASTM	Nombre	Aspectos de evaluación	Forma
D5656-10	Método de prueba estándar para juntas de cizallamiento de metal adherentes gruesas para la determinación del comportamiento de la tensión-tensión de los adhesivos en cizallamiento por carga de tensión	Evalúa la relación tensión-deformación del adhesivo mismo en tensión (sin ubicarlo entre placas adherentes de otro material)	No tienen en cuenta los efectos de la geometría.
D4027	Ensayo de las propiedades de los adhesivos estructurales al esfuerzo cortante mediante la prueba de riel modificado	Evalúa la adhesión del polímero a los adherentes de vidrio. Limita el grosor de la capa adhesiva a 0.5"	
D4255M-15a	Método de prueba estándar para propiedades de cortante en plano de materiales compuestos de matriz de polímero mediante el método de corte de tres rieles	Evalúa la resistencia al corte del adherente entre dos elementos. La muestra está destinada a prepararse con un espesor máximo de 0.125"	El elemento de tres rieles permite acomodar un módulo solar de menor área pero de la misma geometría

Apéndice G. Análisis de selección del artículo SOLAR ROADS

Referencia	McCarville, D. (2017). Solar roads. <i>HDIAC Social & Multi-Media Editor</i> , 2. Retrieved from http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/cind.803_3.x/abstract
Nombre del articulo	SOLAR ROADS
Lugar donde se realizo	Estados Unidos
Fecha de publicación	2017
Objetivo del articulo	Implementar las carreteras solares para tener independencia de la red eléctrica con los avances tecnológicos que se realizan en los Estados Unidos para mejorar las capacidades de la energía eléctrica.
Información suministrada	Teniendo una responsabilidad ambiental se hará paneles en carretera utilizando celdas fotovoltaicas, cableado eléctrico y luces de diodo emisores de luz. Los paneles son más fuertes que el asfalto y son más fáciles de reemplazarlos y así se eliminaría el cableado dejando atrás tantas fallas energéticas en el país.
Investigación	n/a
Resultados	n/a
Conclusiones	Existe una incertidumbre en cuanto al costo de la fabricación e implementación ya que sigue siendo elevado, y la frecuencia del mantenimiento y el reemplazo del panel por ellos se quiere llegar a colocar las carreteras con paneles solares en superficies como aceras, carriles bici, estacionamientos y caminos vecinales para proporcionar una mejor idea de esta nueva tecnología y medir la viabilidad a gran escala.

Apéndice H. Análisis de selección del artículo “SOLAR ROADWAYS” REBUILDING

OUR INFRASTRUCTURE AND ECONOMY Volumen 2

Referencia	Ravi Sharma, Mohit Purohit, Jayshree Mor, Sonali Lad, S. K. (2017). “Solar Roadways” – Rebuilding our Infrastructure and Economy. <i>International Journal of Engineering Research In Science & Engineering</i> , 2(3), 1429–1436. Retrieved from www.ijrise.org%7Ceditor@ijrise.org
Nombre del artículo	“SOLAR ROADWAYS” REBUILDING OUR INFRASTRUCTURE AND ECONOMY Volumen 2
Lugar donde se realizó	Mumbai, India
Fecha de publicación	2017
Objetivo del artículo	Materiales que conforman la creación de un panel, ventajas y desventajas de la implementación de esta nueva tecnología.
Información suministrada	<p>Solar Roadways son una idea ingenieril que desea reemplazar la carretera pavimentada para generar energía en hogares, negocios, entre otros y así sustituir la necesidad actual de combustibles fósiles que se utiliza para la generación de electricidad y los aceites usados para la conducción de los vehículos llegando poder reducir los gases de efecto de invernadero casi a la mitad.</p> <p>Para la creación de las partes de un panel se necesitan materiales reciclados como bolsas de basura, botellas de agua, neumáticos de caucho que se pueden mezclar con material orgánico. Se van a dividir en la Capa superficial, capa electrónica, y Capa base.</p> <p>Cada panel tendrá una identificación por radiofrecuencia RFID para tener seguimiento en tiempo real y saber dónde están los autos en todo momento.</p>
Investigación	n/a
Resultados	n/a

Conclusiones	<p>VENTAJAS:</p> <ul style="list-style-type: none">○ Utilizan la iluminación LED lo cual ayuda a evitar el índice de accidentabilidad.○ Las carreteras se calientan por sí mismas para remoción del hielo y la nieve.○ Elimina la necesidad de combustibles fósiles <p>DESVENTAJAS</p> <ul style="list-style-type: none">○ El costo de esta construcción es tres veces más que las carreteras actuales.○ Se requiere un tráfico vehicular limitado para que no dañe el panel. Y su servicio de mantenimiento tiene que hacerse semanalmente. <p>-.</p>
---------------------	---

**Apéndice I. Análisis de selección del artículo FEASIBILITY STUDY OF SOLAR
ROADWAYS**

Referencia	Agrawal, R., & Prakash, O. (2017). Feasibility Study of Solar Roadways. <i>Imperial Journal of Interdisciplinary Research (IJIR)</i> , 3(2), 5. Retrieved from http://www.onlinejournal.in
Nombre del artículo	FEASIBILITY STUDY OF SOLAR ROADWAYS
Lugar donde se realizo	Jaipur, India.
Fecha de publicación	2017
Objetivo del artículo	Dar una visión general de la implicación ambiental al usar las carreteras con paneles solares y los inconvenientes asociados a este proyecto, la viabilidad del proyecto se ilustrara en este artículo con soluciones a posibles deficiencias

<p>Información suministrada</p>	<p>Las carreteras con paneles solares son una innovación que conduce hacia la energía limpia, para llevar a cabo este proyecto se tiene que tener en cuenta el presupuesto para que la investigación se pueda materializar.</p> <p>Estas carreteras solares están compuestas por paneles de 12 x 12 pies de forma hexagonal que forman células fotovoltaicas compuestas de un material semiconductor que muestra los efectos de la absorción de radiación electromagnética actuando sobre la superficie y por último la extracción de electrones que son utilizados como fuente de flujo de corriente para así poder generar energía eléctrica y satisfacer las necesidades de los usuarios.</p> <p>Las carreteras están compuestas por la Capa superficial, que se encuentra en la parte superior del panel y posee una superficie semitransparente con un alto grado de resistencia para soportar la carga vehicular y una rugosidad para evitar el deslizamiento de los coches. Sigue la Capa electrónica que se encuentra debajo de la capa superficial y está constituida por un microprocesador de circuitos que controla y supervisa las funciones de las células solares. Y por último esta la Capa Base que está debajo de la capa electrónica que se coloca encima del suelo.</p> <p>La carretera tiene una distribución uniforme de la carga sin ningún comportamiento de fractura, resistente a la corrosión, tiene una instalación electrónica adecuada y unas características de fácil mantenimiento. Para la realización de su Diseño fue realizado por un Software de Simulación de Ingeniería en la Universidad de Ontatio Occidental (COMSOL), el cual comprueba la fiabilidad y viabilidad de la estructura bajo a diferentes condiciones de tráfico y mostrando el mejor material según las condiciones del rendimiento. (se utilizaron motos, bicicletas y coches cada uno representado el peso limite)</p>
<p>Investigación</p>	<p>n/a</p>

Resultados	n/a
<p>Conclusiones</p>	<p>VENTAJAS:</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ Las luces LED que se colocan debajo de los paneles de vidrio, en la noche evita los accidentes y también dan un buen aspecto estético, el trafico ya no será un inconveniente ya que mediante el microprocesador en la capa electrónica hace que los vehículos se mantengan en velocidades adecuadas y se sepa que ruta está disponible. ○ Esta nueva tecnología elimina el desperdicio de cientos de miles de dólares por la disminución de combustibles fósiles puesto que no requiere del uso del betún. ○ Es amigable con el planeta ya que evita el deshielo debido a que el mismo panel puede descongelar el hielo por medio de la transferencia de calor por la célula fotovoltaica en la estructura de la carretera, el deshielo está compuesto de diferentes sales, cloruro de calcio, cloruro de potasio, cloruro de magnesio. cloruro de sodio que al llegar a la vegetación la destruye por completo. <p>DESVENTAJAS</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ Los paneles son una estructura rígida y sin doblar causan la acumulación de caucho, sal y otras materias que bloquean la luz solar, lo cual disminuye la durabilidad y aumentan los costos del manteamiento de cada panel. ○ El cambio de estaciones causa un cambio en la eficiencia del panel solar, por ello es necesario la fuente de energía adicional para el funcionamiento durante el invierno lo cual reduce la eficacia del panel y aumenta el costo. ○ El diseño geométrico no deja curvar el panel para colocarlo sobre la carretera por ello la carretera se tiene que adecuar para la implementación de esta tecnología. ○ Durante fuertes lluvias el panel es sometido a que el circuito falle debido al material que entra. ○ El tráfico de carga pesada permite un aumento de la probabilidad de fallo de la estructura

Apéndice J. Análisis de selección del artículo SOLAR ROADWAYS

Referencia	OUTBACK, M. M. (2015). Solar Roadways. Retrieved from http://www.solarroadways.com/faq.shtml#faqAnimalNaps
Nombre del artículo	SOLAR ROADWAYS
Lugar donde se realizo	MAUREEN McINTYRE is the editor and publisher of solar today
Fecha de publicación	2015
Objetivo del artículo	Mostrar los avances y las entidades involucradas atraves del tiempo en el proceso de esta nueva tecnología
Información suministrada	<ul style="list-style-type: none"> ○ En el año 2006 Julie & Scott compartieron su visión con el resto del mundo con la idea de reemplazar las superficies de asfalto y hormigón expuestas al sol con un producto que puede generar electricidad, derrita la nieve, y proporcionar la iluminación en las carreteras. Los Brusaws empezaron sus ensayos con las instalaciones más pequeñas, como aceras, calzadas y aparcamientos para refinar el producto y su rendimiento antes de pasar a las calles y carreteras. ○ En el año 2009 Solar Roadways recibe una subvención de \$ 100,000 de Small Business Innovación Research (SBIR) de la Administración Federal de Carreteras, una agencia de la Departamento de Transporte de Estados Unidos, para construir el primer prototipo de panel solar del camino. ○ En el año 2010 gana un premio de \$ 50,000 a la comunidad desafío Ecomagination de General eléctrica que sirvió de apoyo para su investigación y desarrollo.

	<ul style="list-style-type: none"> ○ En el año 2011 Scott recibe una beca SBIR \$ 750.000 que permite desarrollar un estacionamiento solar prototipo en su propiedad. ○ En el año 2014 se puso en marcha una campaña de rowdfunding. Durante los siguientes dos meses, más de 48.000 personas-un récord Indiegogo dieron un total de más de \$ 2,2 millones en apoyo a Solar Roadways. El resultado final superó la meta original de \$ 1 millón. -.
Investigación	n/a
Resultados	n/a
Conclusiones	n/a

Apéndice K. Análisis de selección del artículo EFFECTS OF PHOTOVOLTAIC MODULE SOILING ON GLASS SURFACE RESISTANCE AND POTENTIAL-INDUCED DEGRADATION

Referencia	Hacke, P., Burton, P., Hendrickson, A., Spataru, S., Glick, S., & Terwilliger, K. (2015). Effects of photovoltaic module Soiling on Glass Surface Resistance and Potential-Induced Degradation. <i>National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO, USA</i> , 1–5. https://doi.org/10.1109/PVSC.2015.7355711
Nombre del artículo	EFFECTS OF PHOTOVOLTAIC MODULE SOILING ON GLASS SURFACE RESISTANCE AND POTENTIAL-INDUCED DEGRADATION
Lugar donde se realizo	Universidad de Aalborg, Aalborg, Dinamarca
Fecha de publicación	2015
Objetivo del artículo	Experimentar la resistencia de la lámina vidrio con tres factores que afectan la degradación de potencial Inducida (PID) (tierra de la carretera de Arizona, el hollín y la sal del mar) con respectivas temperaturas y humedad del suelo
Información suministrada	Se realiza una investigación para determinar la resistencia de la lámina de vidrio utilizando tres tipos de factores externos que son polvo del suelo de Arizona, el hollín y la sal del mar que estarán sometidos a una temperatura específica y diferentes tipos de humedad relativa. y su rendimiento encontrando los factores ambientales que los afecta como la temperatura, la humedad (interna y externa en el módulo), la iluminación, la suciedad en la cara del módulo. Para ello se toman diferentes tipos de suelo y se estudia el comportamiento de la lámina. Para este experimento se usa un vidrio cuadrado de 413 cm ² (incolorado Starphire) que son bajos en hierro, para colocarlo en el suelo y determinar la resistencia eléctrica del módulo.

	<p>Utilizamos simuladores del suelo como el material que se puede encontrar en la naturaleza, colocándolo en la cara del módulo y de esa manera estudiar el comportamiento de la lámina que se somete bajo diferentes especificaciones.</p>
<p>Investigación</p>	<p>Par esta investigación se usan dos pares de 60 células de silicio multicristalino de 240 W, donde en un par está el vidrio sucio y en el otro está libre de material que se sometían a una temperatura de 60°C, un rango de humedades de 25%,39%, 65%, 85% y 95% para determinar la resistividad del material dependiendo de lo que tiene encima, la temperatura, la humedad relativa a la que se somete y el tiempo que lleva el material en el módulo.</p>
<p>Resultados</p>	<ul style="list-style-type: none"> ○ La muestra de hollín mostro que afecta mínimamente el vidrio comparándolo con el vidrio limpio bajos la misma temperatura y humedad. ○ La muestra del polvo de Arizona demostró que la resistividad dependió de los cambios de humedad en el experimento. ○ La muestra con sal de mar indico un aumento significativo en la corriente de fuga, cuando la humedad relativa es 85% y 95%, esto se debe a la corrosión del aluminio, la migración de los iones y el químico del vidrio. Al aumentar la humedad relativa de 39% a 95% la sal produce una disminución en la resistencia de la superficie del vidrio.
<p>Conclusiones</p>	<ul style="list-style-type: none"> ○ La suciedad es un factor principal para la resistencia de la lámina, acelerando su degradación por ellos se utilizaron tres tipos de suciedad para determinar cual afecta más al módulo. ○ La degradación de un módulo se ve principalmente en los bordes cerca del marco, concentrándose esa suciedad en esa parte del módulo. ○ La suciedad que afecta de manera rápida al módulo es la sal marina, puesto que la degrada de manera más rápida.

Apéndice L. Análisis de selección del artículo **FIRST EVER USEWATTWAY SOLAR****ROAD INSTALLED IN GEORGIA**

Referencia	Wattway, C. (2016). First ever US Wattway solar road installed in Georgia, (December), 1. Retrieved from www.wattwaybycolas.com
Nombre del artículo	FIRST EVER USE WATTWAY SOLAR ROAD INSTALLED IN GEORGIA
Lugar donde se realizo	
Fecha de publicación	2016
Objetivo del artículo	Inauguración del primer sitio experimental Wattway de la empresa Colas en los Estados Unidos en Georgia
Información suministrada	En el año 2016 se inaugura la instalación del primer sitio de prueba de cincuenta metros cuadrados de paneles solares Wattway que capturara la energía solar para producirla en energía renovable, en el centro de información para visitantes en el estado Georgia en la ciudad West Point en el tramo de carretera llamo el “rayo” esperando una producción de 7000 kWh en un año, esto debe gracias a la Fundación Ray y el Departamento de Transporte de Georgia siendo socios del primer centro de ensayo de Wattway en los Estados Unidos.
Investigación	n/a
Resultados	n/a
Conclusiones	n/a

Apéndice M. Análisis de selección del artículo SÉGOLENE ROYAL, MINISTER OF ENVIRONMENT, ENERGY AND SEA, UNVEILS ONE KILOMETER OF WATTWAY SOLAR ROAD IN NORMANDY, (FRANCE)

Referencia	Colas. (2016). Ségolène Royal, Minister of Environment, Energy and Sea, unveils one kilometer of Wattway solar road in Normandy, (France), 1. Retrieved from http://www.wattwaybycolas.com/wp-content/uploads/2016/12/20161222-Communiqué-de-presse-Inauguration-Tourouvre-GB.pdf
Nombre del artículo	SÉGOLENE ROYAL, MINISTER OF ENVIRONMENT, ENERGY AND SEA, UNVEILS ONE KILOMETER OF WATTWAY SOLAR ROAD IN NORMANDY, (FRANCE)
Lugar donde se realizo	Francia
Fecha de publicación	2016
Objetivo del artículo	Comunicado de prensa acerca de la Inauguración de la primera carretera en Francia con paneles solares
Información suministrada	<p>El 22 de diciembre de 2016 Francia inaugura el primer gran proyecto en el camino solar de Wattway, siendo un sitio de prueba compuesto por 2.880 paneles fotovoltaicos que se encuentran instalados en el RD5, entre la salida sur de Tourouvre y el cruce con la N12, en la localidad de Le Gué-à-Pont.</p> <p>Este proyecto es parte de la ley de transición energética que implica logros en proyectos innovadores y ambiciosos. La electricidad producida por este tramo de la carretera solar se enviará a la red Enedis (proveedor de electricidad en Francia).</p> <p>Se espera una producción anual de 280 MWh, una producción promedio de 767 kWh por día, con picos de 1.500 kWh en verano, que variara según el clima y las estaciones, para ellos se instalara Un panel de información cerca de la carretera solar</p>

	<p>que indicará la producción inmediata, así como la producción total desde la instalación. Este panel será alimentado por electricidad generada a través de paneles Wattway.</p> <p>Para el director de Wattway, Jean-Charles Broizat, este proyecto es un paso importante en el desarrollo de la carretera solar de Wattway: "Todavía estamos en una fase experimental. La construcción de un sitio de prueba de esta escala es una oportunidad real para nuestra innovación. nosotros para mejorar nuestro proceso de instalación de paneles fotovoltaicos, así como su fabricación, para seguir optimizando nuestra innovación".</p>
Investigación	n/a
Resultados	n/a
Conclusiones	<p>Este proyecto es un paso importante en el desarrollo de la carretera solar de Wattway, dice el director Jean-Charles Broizat, que todavía está en una fase experimental para llegar a mejorar la fabricación y el proceso de instalación de los paneles fotovoltaicos.</p>

Apéndice N. Análisis de selección del artículo SMART COOLING SYSTEM FOR THE URBAN ENVIRONMENT

Referencia	Kolokotsa, D. (2016). Smart cooling systems for the urban environment. Using renewable technologies to face the urban climate change. <i>Solar Energy</i> , 11. https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.12.004
Nombre del artículo	SMART COOLING SYSTEMS FOR THE URBAN ENVIRONMENT. USING RENEWABLE TECHNOLOGIES TO FACE THE URBAN CLIMATE CHANGE
Lugar donde se realizo	Chania, Grecia
Fecha de publicación	2016
Objetivo del artículo	Describir el papel importante de las tecnologías de energía renovable para contribuir como solución a la contaminación del planeta, mostrando las nuevas tecnologías del siglo 21 para generar energía eléctrica.
Información suministrada	<p>La demanda de energía eléctrica para el desarrollo social, económico, bienestar humano y de salud está en constante aumento debido a la demanda de habitantes y el gasto de ellos. Se requiere esta energía para las necesidades humanas como la comodidad del espacio, iluminación, los usos en la cocina, la comunicación, así como para servir distintos procesos productivos (Edenhofer et al., 2012).</p> <p>Por otra parte, se puede observar el cambio climático que se experimente en el siglo 21 que dependen de gases de efecto del invernadero, las tasas de aumento en la temperatura, toda esta respuesta del ecosistema se debe a la contaminación que los seres humanos han conllevado.</p> <p>Debido a lo anterior se quiere implementar tecnologías para la generar energía con recursos renovables, como lo es el proyecto Solaroad (http://en.solaroad.nl/) que</p>

	incorpora paneles fotovoltaicos en las carreteras y explota grandes superficies para colocar losas prefabricadas hechas por módulos de 2,5 m x 3,5 m con una capa traslucida de vidrio templado con 1cm aproximadamente de espesor, debajo de ella se encuentra las células solares de silicio cristalino.
Investigación	n/a
Resultados	n/a
Conclusiones	n/a

Apéndice Ñ. Análisis de selección del artículo **SOLAR ROADWAYS: THE FUTURE****WE'VE BEEN LOOKING FOR**

Referencia	Hartwig, B. B. (n.d.). Solar Roadways : The Future We ' ve Been Looking For, 8.
Nombre del artículo	SOLAR ROADWAYS : THE FUTURE WE ' VE BEEN LOOKING FOR
Lugar donde se realizo	
Fecha de publicación	
Objetivo del artículo	Informar que Solar Roadways es la solución para reducir las huellas de carbono utilizando conceptos ingenieriles para realizar caminos solares que generen electricidad.
Información suministrada	<p>Los creadores de Solar Roadways, el ingeniero eléctrico Scott Brusaw y su esposa Julie desean llegar a pavimentar todas las carreteras con su grandioso invento, carreteras solares y satisfacer las necesidades energéticas reduciendo nuestra huella de carbono</p> <p>Si se lograra sustituir el pavimento convencional en las carreteras, estacionamientos, entre otros, por celdas solares, nuestro mundo podría estar totalmente alimentado por el sol. Este invento ofrece muchos desafíos técnicos que deben ser superados y llegar a obtener energía limpia ilimitada cortando las emisiones de carbón significativamente y ayudar a nuestro planeta para limpiar el aire.</p> <p>Durante diez años de investigación se ha logrado desarrollar carreteras solares fuertes y resistentes a la sobrecarga de los vehículos y al cambio climático, que recogen la energía solar y la transforma en energía eléctrica para alimentar ciudades. Se estima que esta caja hexagonal de vidrio a prueba de balas soportar 250.000 Libras de peso que se instalan en sucesión y encajan en un sitio, tienen un amplio sistema de comunicación por ello es importante resaltar que el momento en que una célula falla,</p>

	<p>la otra célula informara al sistema para que dé inmediatamente esta sea cambiada y su funcionamiento siga en curso con la generación de energía para los hogares.</p> <p>Esta tecnología quiere que la red eléctrica sea más eficaz evitando los apagones por las centrales eléctricas, quitando los postes telefónicos y eléctricos para colocar una vivienda subterránea de fácil acceso que se encontrara al lado de las carreteras llamado corredor de cable y mejorar la visibilidad de las calles sin tanto cableado por encima, que puede ser perjudicial en el momento de alguna tormenta fuerte.</p>
Investigación	
Resultados	Solar Roadways realizo paneles de forma hexagonal de vidrio, con una alta resistencia que miden 12 x 12 pies y generan 3600 vatios de potencia.
Conclusiones	<p>DESVENTAJAS:</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ El costo de la implementación de las carreteras es alto, y para que los paneles paguen por sí misma inversión se necesitan 20 años. ○ Existe un vacío en cuando al almacenamiento de la energía para las épocas donde no salga el sol o haya nieve, ya que en la actualidad no existen métodos eficaces para transportar la energía eléctrica a largas distancias. ○ En condiciones donde el panel este húmedo no se ha probado altas velocidades para demostrar que la fricción de la baldosa es eficiente. <p>VENTAJAS:</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ Se incorporará en los paneles Luces LED que mejorara las condiciones del tráfico, informando a los conductores por medio de señales que estarán iluminadas acerca del tráfico en la hora real, dándoles soluciones de escoger rutas óptimas para llegar a tiempo a su destino. Además, será una gran fuente de información donde se le brinda al conductor comunicaciones acerca de las condiciones climáticas, de los obstáculos en el camino, de los accidentes en la carretera, entre otros. De la misma

	<p>forma tendrá un sistema de calefacción que derrite la nieve y evita que los autos queden atrapados en la nieve y se pueda transitar de una manera normal.</p>
--	--

**Apéndice O. Análisis de selección del artículo PAVING THE WAY TO THE
TOMORROW'S ENERGY**

Referencia	Wattway, C. (2017). Paving the way to tomorrow's energy, 1–15. Retrieved from wattwaybycolas.com
Nombre del artículo	PAVING THE WAY TO TOMORROW'S ENERGY
Lugar donde se realizo	Francia
Fecha de publicación	2017
Objetivo del artículo	Mostrar el avance de la empresa Colas en crear Wattway para generar electricidad en Francia y cómo surgió la idea y hacerla hoy en día una realidad.
Información suministrada	<p>Todo comenzó en el 2005 donde Jean-Luc director del Centro de Competencia en el campus Colas de Ciencia y técnica reflexiona acerca de que las carreteras pasan el 90% mirando el cielo, siendo expuestos por los rayos del sol, ingeniando una manera para aprovechar tal acontecimiento, se basa en investigar como con colectores fotovoltaicos en las carreteras se podría transformar los rayos del sol en energía eléctrica. Jean- Luc Gautier sigue esta investigación en su garaje para poder probar esta idea, compra células solares y construye un panel solar de 40 cm de ancho que para que pueda generar energía eléctrica. Este experimento en el 2010 tiene un éxito demostrando que los colectores fotovoltaicos rinden de manera eficaz para generar la energía eléctrica cuando se aplica en el suelo, por ello el campus de Ciencias y tecnologías empieza a realizar una serie de pruebas para que estos paneles que serán colocados en el pavimento puedan soportar el peso de los vehículos y no resbalen generando una fricción adecuada para conducir sobre ellos.</p>

	<p>La empresa Colas se une con INES (Instituto Nacional de Energía Solar Francés) para empezar a trabajar y buscar soluciones para hacer de esta idea una realidad. En el año 2013 se inició de cero con silicio policristalino debido a que el mercado fotovoltaico había caído ocasionando pérdidas en el tiempo de experimentación, desde ese entonces se optó por utilizar células fotovoltaicas fabricadas en Francia. Después de dos años de trabajo, la investigación da a conocer en octubre del 2015 Wattway ganando un premio para la solución climática.</p> <p>En el 2016 se pone en marcha diferentes pruebas tanto en Francia y en el mundo para evaluar el potencial de Wattway con una serie de nuevos usos como el alumbrado público, iluminación de las calles, la carga de vehículos eléctricos, paneles para edificios ecológicos y la alimentación de los pueblos remotos, realizando un seguimiento con equipos informáticos para supervisar la producción de energía fotovoltaica en diferentes temperaturas y niveles de la radiación solar, recopilando datos que se serán utilizados por expertos brindando la información con sus socios.</p>
<p>Investigación</p>	<p>Empezaron a experimentar con paneles flexibles compuesto de silicio amorfo de película delgada de Smac, una empresa de Colas especializada en impermeabilización y revestimiento. Se le realizaron pruebas de velocidades con vehículos, cada vez se aumentaba la velocidad y el peso de los vehículos, demostrando que el panel resistía favorablemente, pero debido a su baja producción tuvieron que cambiar el panel que se ve reflejado en el año 2013.</p> <p>Los paneles de Wattway son delgados con un espesor mínimo que no contiene vidrio y soporta el tráfico de los vehículos, adaptándose su tamaño en cualquier carretera del mundo. Estos paneles contienen células de silicio policristalino de 15 cm de ancho, se recubren de resina y polímeros suficientes para soportar el tráfico tratando la resistencia al deslizamiento con mezclas asfálticas convencionales y crea suficiente transparencia</p>

	<p>para que los rayos del sol pasen generando la electricidad para el consumo de las personas.</p>
Resultados	<p>Lo que empezó como una idea hoy puede proporcionar energía para:</p> <p>Farolas: 1,000 metros lineales de pavimento Wattway pueden abastecer un pueblo de 5,000 habitantes (ADEME)</p> <p>Energía para hogares cercanos: 20 m² de paneles Wattway, es decir, 4 metros lineales de carreteras, con 1,000 horas / año de sol, pueden proporcionar energía a un hogar francés promedio simple (ADEME / CEREN 2014)</p> <p>Cargar Vehículos eléctricos: 100 m² de paneles Wattway pueden proporcionar energía suficiente para que un automóvil eléctrico viaje 100.000 km / año (INES)</p> <p>Entre otros.</p>
Conclusiones	<p>Este avance tecnológico produce electricidad con las carreteras existentes preservando la capacidad de soportar el tráfico. Wattway es un pavimento fotovoltaico que se puede utilizar en todos los vehículos y las carreteras de mundo, siendo paneles extra finos y extremadamente resistentes, proporcionan un agarre excelente y un rendimiento duradero a la carretera, se pegan directamente a las carreteras existentes, senderos para bicicletas, plazas de aparcamiento, etc., suministrando energía eléctrica para las necesidades del ser humano.</p>

Apéndice P. Análisis de selección del artículo SOLAR ROADWAYS-THE FUTURE OF ROADWAYS

Referencia	Ayushi Mehta, Neha Aggrawal, A. T. (2015). Solar Roadways-The future of roadways. <i>International Advanced Research Journal in Science, Engineering and Technology (IARJSET)</i> , 2(1), 1–5. https://doi.org/10.17148/IARJSET
Nombre del artículo	SOLAR ROADWAYS-THE FUTURE OF ROADWAYS
Lugar donde se realizo	Ghaziabad, India
Fecha de publicación	2015
Objetivo del artículo	n/a
Información suministrada	<p>Solar Roadways se crea con el fin de que esta tecnología mejore el funcionamiento del vehículo, para generar iluminación y tener un seguimiento del estado de la carretera, combinando una superficie de conducción transparente con células solares subyacentes, electrónicas y sensores para trabajar como una matriz solar que se programa para su funcionamiento total.</p> <p>La energía fotovoltaica es un método de la generación de energía eléctrica mediante la conversión de la radiación solar en directa corriente por medio de un semiconductor muestra el efecto fotovoltaico. La energía solar se genera por medio de paneles solares compuestos de celulares solares que contienen material fotovoltaico.</p>
Investigación	<p>Fase I : Solar roadways recibe \$100.000 (SBIR) de parte del (DOT) Departamento de Transporte para que construya un estacionamiento solar.</p> <p>Fase II: Solar roadways recibe \$750.000 (SBIR) de parte del (DOT) Departamento de Transporte para realizar diferentes pruebas para construir carreteras con paneles solares</p>

	que generen electricidad mediante energía solar utilizando energía fotovoltaica e incluya paneles solares y letreros LED que se pueden conducir sobre ellos.
Resultados	n/a
Conclusiones	<p>Ventajas:</p> <ul style="list-style-type: none">○ Genera energía eléctrica con impacto limitado con el ambiente, comparado con otras formas de producir energía, reduciendo la dependencia de las fuentes convencionales como combustibles de carbón, petróleo y fósiles.

Apéndice Q. Análisis de selección del artículo A REVIEW ON SOLAR ROADWAYS

Referencia	ASST.PROF. INGAWALE P.K, DESHMUKH S.P, GAIKWAD A.S, A. S. .(2017). A Review on Solar Roadways, 4, 860–863. Retrieved from prasadingawale@gmail.com , shekhar141096@gmail.com , shekharaawale46@gmail.com .
Nombre del artículo	A REVIEW ON SOLAR ROADWAYS
Lugar donde se realizo	
Fecha de publicación	2017
Objetivo del artículo	Es una noticia acerca de lo que nos brindara el proyecto Solar Roadways y lo mucho que ayudara al medio ambiente.
Información suministrada	Solar Roadways puede ser un salvar al mundo de la crisis energética y el cambio climático. A medida que pasan los años los seres humanos buscan respuesta de la deteriorada infraestructura de las carreteras, la caída de la red eléctrica y la crisis ambiental. La solución a todos estos cambios negativos que hemos sufrido hasta ahora se llama “Solar Roadways” Una infraestructura de autopistas inteligente que genera electricidad con paneles solares eliminando nuestra necesidad de combustibles fósiles y también reducirá la inversión en tecnología anticuada y líneas eléctricas aéreas. En la actualidad los precios de los productos derivados del petróleo han aumentado enormemente y sus recursos son escasos, ya no habrá material factible como el asfalto para nuestras superficies de carreteras. Debido a esto es importante dar un paso y enfatizarnos en la construcción de paneles solares en las carreteras, lo que permitirá el crecimiento de la población y el aumento de las necesidades de energía. Nuestra idea es aumentar la conciencia y dar un paso adelante en el trabajo y desarrollo del concepto de las tecnologías de la carretera con paneles solares, desarrollado por Solar Roadways. El trabajo propuesto de revisión del sistema de energía solar y requiere el desarrollo de

	vidrio fuerte, transparente y autolimpiante que tiene las propiedades de tracción y resistencia al impacto.
Investigación	n/a
Resultados	n/a
Conclusiones	<p>Ventajas:</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ Serán caminos iluminados y ayudaran a evitar accidentes cuando se conduce en la noche ya que muchos conductores presentan la dificultad para ver las líneas de la carretera en la, más aún cuando las luces están en dirección opuesta cegando al conductor o cuando llueve están líneas no se alcanzan a visualizar, con esta nueva tecnología la conducción nocturna será más segura. ○ Los vehículos eléctricos podrán recargarse en cualquier parada de descanso, existen investigaciones acerca de cargar el vehículo mientras se está conduciendo por la carretera. Siendo los coches eléctricos un gran aporte para eliminar gran parte del calentamiento global. ○ Estas nuevas vías reemplazaran las centrales eléctricas actuales, pudiendo eliminar la necesidad de postes eléctricos y cortes de luz. <p>Desventajas:</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ El costo es muy alto. ○ La acumulación de sal, caucho y otros materiales que evitan que la luz solar entre en el panel, lo que con lleva a que no se genere electricidad, por ello hay que realizar un frecuente mantenimiento de la carretera. ○ Los costos de la instalación de las carreteras con paneles solares son tres veces más en comparación de las carreteras convencionales, para ello debe ser una inversión a largo plazo para generar ganancias.

**Apéndice R. Análisis de selección del artículo EXAMINING THE OPPORTUNITIES
ASSOCIATED WITH SOLAR ROADWAYS**

Referencia	ASST.PROF. INGAWALE P.K, DESHMUKH S.P, GAIKWAD A.S, A. S. . (2017). A Review on Solar Roadways, 4, 860–863. Retrieved from prasadingawale@gmail.com , shekhar141096@gmail.com , shekharaawale46@gmail.com ,
Nombre del artículo	EXAMINING THE OPPORTUNITIES ASSOCIATED WITH SOLAR ROADWAYS : CASE STUDY OF INTERSTATE 95 IN BALTIMORE
Lugar donde se realizó	2017
Fecha de publicación	Estados Unidos
Objetivo del artículo	Analizar las oportunidades asociadas con la creación de carreteras solares a través de un ejemplo de estudio.
Información suministrada	Desde 1921 las carreteras de los Estados Unidos de América se han elaborado con asfalto bituminoso. Por fortuna algunas tecnologías modernas se han unificado para crear un medio ambiente mejor, más seguro, más rentable amigable, y la solución de producción de energía. Debajo de los paneles se puede reciclar material que de otro modo estaría en un vertedero. La construcción de carreteras estándar requiere cortar y llenar el suelo. Dependiendo de la situación, puede ser necesario llevar el relleno al sitio a un costo significativo para el proyecto. La base de agregados graduados, o GAB, se usa para la estabilidad, pero tal vez los residuos inorgánicos no volátiles como los plásticos se podrían usar como relleno para las carreteras. Esta sería otra característica ambiental

	<p>adicional para todo el sistema propuesto. Una forma de utilizar un desecho inútil es siempre positiva, especialmente cuando afecta el medio ambiente.</p>
<p>Investigación</p>	<p>Cada panel debe tener un corto circuito para contener el pulso eléctrico en casos de falla o caída de rayos, para que el resto de la carretera solar siga funcionando. Con ello estos paneles pueden ser usados para encender las luces de la calle con toda seguridad. Estos paneles se pueden fabricar de diferentes maneras, según el tamaño de la carretera, para así no perder tiempo de colocar gran cantidad de paneles pequeños se puede colocar uno grande que cumpla con los requisitos para lo cual fue construido.</p> <p>Los paneles estarían conectados por medios de un agente de unión que es quizás uno de los pocos casos en que se necesita un subproducto de petróleo fuera de la fabricación y procesos de transporte.</p>
<p>Resultados</p>	<p>Costo de la construcción carreteras convencionales:</p> <ul style="list-style-type: none"> -Carretera indivisa de 2 carriles área rural: alrededor de \$ 2- \$ 3 millones por milla. -Carretera indivisa de 2 carriles área urbana =alrededor de \$ 4-5 millones por milla. -Carretera de 4 carriles área rural y suburbana: \$ 4- \$ 6 millones por milla. -Carretera de 4 carriles área urbana: \$ 8- \$ 10 millones por milla. -Para la construcción interestatal de 6 carriles -Autopista área rural: alrededor de \$ 7 millones por milla -Autopista área urbana: \$ 12 millones o más por milla -Molino y repavimentación de un camino de 4 carriles: 1.25 millones por milla. -Expandir una autopista interestatal a partir de 4 carriles a 6 carriles: alrededor de \$ 4 millones por milla

Conclusiones	<p>Ventajas:</p> <ul style="list-style-type: none">○ Los paneles solares tendrán iluminación con luces LED que será una herramienta multiusos ya que sirven para señalar las líneas de tráfico, para prever accidentes en la noche e informar al conductor el estado de la carretera en tiempo real.○ Los paneles tendrán un sistema de calefacción para eliminar acumulación de hielo, remover la nieve pesada y retirar los depósitos de sal pesados en el sistema de agua.○ La utilización de residuos inorgánicos no volátiles como los plásticos para llenar el suelo y estabilizarlos para colocar encima el panel solar, es una forma de utilizar un desecho inútil que afecta el medio ambiente para evitar más contaminación.○ El panel solar brinda información en tiempo real, notificando al conductor si hay alguna persona o animal sobre el carril por donde va conduciendo por medio de un mecanismo de un sensor de peso dentro del panel reduciendo la velocidad del vehículo por medio de las luces LED dentro de la carretera.○ Permitirá que el tráfico sea más eficiente, realizando evaluaciones de la densidad vehicular en tiempo real, lo que ayudara a reducir los viajes al trabajo del conductor y mejorar el flujo en la hora pico.
---------------------	---

Apéndice S. Análisis de selección del artículo SOLAR ROADWAYS

Referencia	Kristiyan Yotov, Yana Panayotova, P. G. (2015). SOLAR ROADWAYS. <i>SOFIA UNIVERSITY Faculty of Economics and Business SOLAR</i> , 2–16.
Nombre del artículo	SOLAR ROADWAYS
Lugar donde se realizó	Bulgaria
Fecha de publicación	2015
Objetivo del artículo	Dar a conocer la situación ambiental en el mundo para mostrar la solución Solar Roadways y el beneficio que trae implementarlos.
Información suministrada	<p>En la actualidad se puede notar las consecuencias del cambio climático observando cómo se derriten las capas de hielo, como aumentan el nivel del mar, los cambios y la temperatura aumentan, ocurriendo desastres naturales de los que nos enteramos a través de las noticias. Investigadores crean diferentes tipos de métodos y soluciones para luchar contra estos cambios, pero no muchos de ellos son tan efectivos como se necesitan. Por lo tanto, necesitamos avanzar en enfoques más complejos y soluciones más generales e interrelacionadas para resolver los problemas acuciantes. Sin embargo, existe una tecnología que puede ayudarnos a normalizar nuestro clima, pero también a ayudarnos en nuestras vidas diarias.</p> <p>Solar Roadways es una solución que puede cambiar drásticamente nuestra forma de vida para mejorar. Este proyecto ofrece carreteras que combinan diferentes soluciones en una: puede ayudarnos a mejorar la producción de energía a partir de paneles solares, a recolectar y distribuir agua de lluvia, a proporcionar una plataforma digital, a facilitar coches eléctricos emergentes y automóviles sin conductor, y mucho más. Este proporciona muchos beneficios adicionales para los ciudadanos, para el medio ambiente y contribuirá al desarrollo sostenible en general.</p>

	<p>El calentamiento global se produce más que todo con el aumento de los niveles de CO2, por ellos se busca una solución para la reducción de este gas.</p>
<p>Investigación</p>	
<p>Resultados</p>	<p>Estas carreteras solares están hechas de vidrio templado y este vidrio templado es 4-5 veces más resistente que el vidrio no templado. Pruebas adicionales han revelado que la superficie del camino del panel es menos resbaladiza que una carretera normal. Cada uno de los paneles contiene su propio microprocesador, que se comunica de forma inalámbrica con paneles circundantes.</p>
<p>Conclusiones</p>	<p>Los ingresos de la carretera pueden ser generados a través de:</p> <ul style="list-style-type: none"> . A través de la generación de electricidad . Mediante el transporte de aguas pluviales limpiado a los municipios o centros agrícolas . Por el alquiler del conducto borde de la carretera (Corredor cable) a entidades tales como empresas de servicios públicos, teléfono, Internet de alta velocidad, televisión por cable, etc. . Con la venta de publicidad en los estacionamientos con los LEDs configurables . Mediante el cobro de las personas o empresas para recargar sus vehículos eléctricos <p>Ventajas:</p> <ul style="list-style-type: none"> o Crea un impacto social y ambiental o Optimizan nuestro tráfico de manera que la productividad del trabajo no se pierda, se conserva el combustible y se evitan accidentes. o Aunque es a largo plazo los frutos tanto económicos, como ambientales se van a ver en esta nueva tecnología. o Durante el invierno derrite la nieve, lo que facilita conducir en esas épocas del año. o Los vehículos se pueden recargar en cualquier lugar.

	<ul style="list-style-type: none">○ Se disminuir la dependencia del petróleo, parando la contaminación de nuestro planeta.○ Como los paneles están de forman circundante tiene la forma de comunicarse, lo que ayuda cuando uno de ellos falle, el otro de inmediato comunicará al sistema el daño y se hará el manteniendo de una forma rápida y efectiva.
--	--

Apéndice T. Análisis de selección del artículo SOLAR ROADS FIND MANY USES

Referencia	Harrop, P. (2016). Roads Find Many Uses, 46–47. Retrieved from research@IDTechEx.com
Nombre del artículo	SOLAR ROADS FIND MANY USES
Lugar donde se realizo	Amsterdam, France and the USA
Fecha de publicación	2016
Objetivo del artículo	Dar a conocer las tres empresas vinculadas en esta nueva tecnología.
Información suministrada	Es una tendencia a generar energía eléctrica limpia hoy en día, su costo es menor. Esta idea pareció tonta al principio ya que parecía costosa y poco probable que funcionara a menos que la superficie estuviese limpia, libre de nieve y hielo y bajo la luz solar directa, demasiado infrecuente en la mayoría de los lugares. Por ello los investigadores se basaron en encontrar soluciones a estos percances.
Investigación	<p>Solar Roadways: Esta empresa tiene un sistema modular de paneles solares especialmente diseñados que pueden ser accionados, pero también transportan cables. Contienen luces LED para crear líneas y señalización sin pintura y elementos de calentamiento para evitar la acumulación de nieve y hielo. Los microprocesadores permiten que los paneles se comuniquen entre sí, una estación de control central y vehículos. El vidrio tiene una superficie traicionada que es equivalente al asfalto. Hasta ahora solo pueden soportar el peso de las semi-camiones, estos paneles se implementarán primero en los estacionamientos.</p> <p>Solar Road: Esta empresa TNO crea en Holanda el carril bici que conecta los suburbios de Krommenie y Wormerveer en. En 2014 se construye un tramo de 70 metros en la primera carretera pública del mundo con paneles solares integrados. Con un costo de alrededor de € 3 M (\$ 3,6 M) y financiado principalmente por la autoridad local, este</p>

	<p>camino está formado por hileras de células solares de silicio cristalino, encerradas dentro del concreto y cubiertas con una capa translúcida de vidrio templado. Los paneles produjeron aproximadamente un 30% menos de energía que los fijados en los techos, pero cuando el camino se amplía a 100 metros en 2016, producirá suficientes kilovatios para alimentar a tres hogares.</p> <p>Las pruebas han demostrado que los paneles solares soportan con éxito el peso de los vehículos, como los tractores.</p> <p>Wattway: La empresa Colas saca a luz su proyecto llamado Wattway, estos paneles están compuestos de células fotovoltaicas apiladas que aseguran la resistencia y el agarre del neumático. No requieren la destrucción de las carreteras existentes, simplemente pueden agregarse a ellas.</p>
<p>Resultados</p>	<p>n/a</p>
<p>Conclusiones</p>	<p>Desventajas:</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ Wattway: En épocas de invierno la calefacción de los paneles estará encendida lo que ocasionara que los animales en búsqueda de calor se acuesten sobre ellos y esto ocasionará que sean aplastados por el tráfico. ○ Wattway: Para que la calefacción funcione tendrá que estar conectada a la red eléctrica o las baterías demasiado caras y de corta vida que necesitan un mantenimiento regular a menos que los diseños mejoren.

**Apéndice U. Análisis de selección del artículo SOLAROAD PAVING THE WAY TO THE
ROADS OF THE FUTURE**

Referencia	Valk, G. J. (2017). SOLAROAD PAVING THE WAY TO THE ROADS OF THE FUTURE. <i>TNO Innovation for Life</i> . Retrieved from E gerritjan.valk@tno.nl
Nombre del artículo	SOLAROAD PAVING THE WAY TO THE ROADS OF THE FUTURE
Lugar donde se realizó	Holanda
Fecha de publicación	2017
Objetivo del artículo	Dar a conocer el primer camino en el mundo que genera energía eléctrica, dando un aporte al futuro.
Información suministrada	<p>La demanda de la necesidad de energía eléctrica cada vez aumenta más, y con ella empiezan a crear ideas innovadoras para la generación de esta, aumentando la demanda de las fuentes de energías sostenibles.</p> <p>La empresa Holandesa TNO crea el proyecto SolaRoad, siendo el creador del el primer camino en el mundo en generar energía eléctrica. Se creó con el interrogante de que exista la posibilidad de utilizar la infraestructura existente para generar energía eléctrica con poco o ningún impacto en el paisaje. Creando la idea de crear carreteras con paneles solares y de allí nació Solar Road que hoy en día es una realidad.</p>
Investigación	Las primeras pruebas mostraron que cada metro cuadrado de SolaRoad tiene el potencial para producir 50 kilovatios-hora de electricidad por año.
Resultados	El consorcio desarrollado, probó y modificó los materiales que componen SolaRoad. Los prototipos de SolaRoad se ensayaron frente a las mismas medidas de seguridad y la comodidad de quienes transitan la misma ruta. La resistencia al deslizamiento, la durabilidad y la sostenibilidad son requisitos fundamentales que se debe cumplir.

	<p>Cada módulo prefabricado de SolaRoad consta de una carcasa de hormigón que mide aproximadamente 2,5 por 3,5 metros. En el interior están las células solares de silicio usadas como material de protección. La capa superior es de vidrio templado con una superficie robusta y asegura el paso óptimo de la luz del sol cumpliendo de la misma manera las normas de seguridad para carreteras existentes.</p>
Conclusiones	n/a

Apéndice V. Análisis de selección del artículo STANDARDIZED TESTING OF NON-STANDARD PHOTOVOLTAIC PAVEMENT SURFACE

Referencia	Nussbaum, J. H., Lake, R. A., & Coutu, R. A. (2016). Standardized testing of non-standard photovoltaic pavement surfaces. <i>Proceedings of the IEEE National Aerospace Electronics Conference, NAECON</i> , 1–8. https://doi.org/10.1109/NAECON.2016.7856766
Nombre del artículo	STANDARDIZED TESTING OF NON-STANDARD PHOTOVOLTAIC PAVEMENT SURFACE
Lugar donde se realizo	Estados Unidos
Fecha de publicación	2016
Objetivo del artículo	Ensayos de laboratorios para los nuevos elementos aplicados en Roadways donde dan a conocer el prototipo SR3 y sus características
Información suministrada	<p>La construcción de una carretera que genere energía eléctrica requiere de la implementación de nuevos materiales. El uso de paneles solares supone el cambio del asfalto, el hormigón de concreto asfáltico y productos bituminosos por otros materiales antes impensables para la elaboración de la superficie de rodadura de una vía vehicular o peatonal.</p> <p>Los ensayos y las pruebas estandarizadas son normas que los laboratoristas deben seguir para que los resultados de las propiedades de los materiales sean verídicos y no sufran alteraciones. Estos ensayos están establecidos y ampliamente acogidos por organizaciones como la Sociedad Estadounidense de Pruebas y Materiales (ASTM), la Asociación Estadounidense de Funcionarios Estatales de Autopistas y Transporte (AASHTO), la Administración Federal de Autopistas (FHWA), la Administración Federal de Aviación (FAA), etc.</p>

<p>Investigación</p>	<p>Ensayos de laboratorios para los nuevos elementos aplicados a la construcción de superficies de rodadura vial</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ Los estudios realizados por entidades estadounidenses al modelo SR3 de Solar Roadways incorporated son: <p>Pruebas Ambientales: Prueba de Hielo y Deshielo y Prueba de condición de humedad</p> <p>Ensayos de carga: Ensayo de resistencia al cortante, ensayo de carga avanzada</p>
<p>Resultados</p>	<p>n/a</p>
<p>Conclusiones</p>	<p>n/a</p>

Apéndice W. Análisis de selección del artículo “SOLAR ROADWAYS” REBUILDING

OUR INFRASTRUCTURE AND ECONOMY Volumen 2

Referencia	Nussbaum, J. H., Lake, R. A., & Coutu, R. A. (2016). Standardized testing of non-standard photovoltaic pavement surfaces. <i>Proceedings of the IEEE National Aerospace Electronics Conference, NAECON</i> , 1–8. https://doi.org/10.1109/NAECON.2016.7856766
Nombre del artículo	“SOLAR ROADWAYS” REBUILDING OUR INFRASTRUCTURE AND ECONOMY Volumen 2
Lugar donde se realizo	Mumbai, India
Fecha de publicación	2017
Objetivo del artículo	Materiales que conforman la creación de un panel, ventajas y desventajas de la implementación de esta nueva tecnología.
Información suministrada	Solar Roadways son una idea ingenieril que desea reemplazar la carretera pavimentada para generar energía en hogares, negocios, entre otros y así sustituir la necesidad actual de combustibles fósiles que se utiliza para la generación de electricidad y los aceites usados para la conducción de los vehículos llegando poder reducir los gases de efecto de invernadero casi a la mitad. Los paneles solares se dividen en Capa superficial, capa electrónica y capa Base. Cada panel solar mide 12 por 12 pies en su red eléctrica.
Investigación	n/a
Resultados	n/a

Conclusiones

VENTAJAS:

- Utilizan la iluminación LED lo cual ayuda a evitar el índice de accidentabilidad.
- Las carreteras se calientan por sí mismas para remoción del hielo y la nieve.
- Elimina la necesidad de combustibles fósiles
- Independencia de aceite
- Vehículos eléctricos que serán cargados en con electricidad limpia y renovable.

DESVENTAJAS

- El costo de esta construcción es tres veces más que las carreteras actuales.
- Se requiere un tráfico vehicular limitado para que no dañe el panel. Y su servicio de mantenimiento tiene que hacerse semanalmente.

-.

**Apéndice X. Análisis de selección del artículo CANADIAN SOLAR ROAD PANEL
DESING: A STRUCTURAL AND ENVIRONMENTAL ANALYSIS**

Referencia	Northmore, A. B. (2014). Canadian Solar Road Panel Design : A Structural and Environmental Analysis . <i>University of Waterloo, Canada, 1</i> , 1–166.
Nombre del artículo	CANADIAN SOLAR ROAD PANEL DESIGN : A STRUCTURAL AND ENVIRONMENTAL ANALYSIS
Lugar donde se realizo	University of Waterloo, Canadá
Fecha de publicación	2014
Objetivo del artículo	
Información suministrada	<p>El estudio de Andrew Northmore es acerca de cómo los paneles deban soportar la carga vehicular tanto estática como cíclica y así mismo el soporte estructural no podía desviar la carga a las células solares. Se estipuló que los paneles necesitan de una base de material granular, asfalto o concreto que diera mayor apoyo y garantizara una superficie plana (capa subrasante compactada adecuadamente). La fricción adecuada para el frenado del vehículo se tomó como el segundo requisito fundamental, y en adición el material debía ser lo suficientemente transparente para que dejara pasar la luz del sol.</p> <p>Con resultados de resistencia a la compresión de 152Mpa y 276Mpa y módulos de Young de 200Gpa y 68.9Gpa para el A36 y el 6061-T6 respectivamente se observa que soportan grandes cargas antes de deformarse sustancialmente y se garantiza la integridad de la célula solar.</p> <p>El aluminio se usa como material de un perfil en C de 50,8 mm- [2-in] que será el <i>marco</i> de todas las capas que componen al módulo solar para carreteras, se adicionan a las aletas</p>

	<p>del perfil metálico espumas para el contacto con las láminas de vidrio y un canal para encajarlas.</p> <p>El acero requiere revestimiento para protegerlo de la oxidación y de ser conductor de corriente, además que el proceso de producción necesitaría de cortadoras láser o chorros de agua a presión para hacer la geometría de la <i>capa óptica</i> por lo que se selecciona el GPO-3 que, aunque tenga resistencia a la compresión de 55Mpa cumple como aislante eléctrico y de factores climáticos desafiantes</p> <p>La <i>capa base</i> está dividida en dos subcapas de GPO-3. La capa que sirve de base para las células es de espesor 6,35mm y es de menor área. La otra capa que tiene contacto directo con la subrasante tiene de espesor 12,7mm.</p>
<p>Investigación</p>	<p>Para el prototipo a escala se usaron células cuadradas de silicio monocristalino de 125mm. “Esta selección permitió usar la lámina DMSolar DMS-125M-280 (RMSolar, 2012) para el diseño del panel prototipo. Esta célula tiene un voltaje de punto de máxima potencia y la corriente de 0.521-V y 5.342-A, respectivamente. Debido al menor tamaño de las células es posible ensamblar 25 de ellas en cada metro cuadrado de panel solar de carretera, lo que resulta en una tensión de salida total de 13.025- V y una potencia de salida máxima de 69,58-W</p>
<p>Resultados</p>	<p>El vidrio Se definió que con dos hojas bastaría. En caso de que se rompa la más externa la otra sola podría resistir la sollicitación del tráfico. Tensión del vidrio templado 42Mpa. Secciones en voladizo de 140mm². Espesor de cada lámina 10mm. La capa óptica se compone de dos capas de fibra de vidrio de GPO-3 con espesores de 6,35mm cada una. Una de las capas tiene recortes para el paso de las interconexiones de las láminas fotovoltaicas y la otra (que soporta la capa transparente) no. La capa base está dividida en dos subcapas de GPO-3. La capa que sirve de base para las células es de espesor 6,35mm y de menor área. La otra que tiene contacto directo con la subrasante tiene espesor 12,7mm.</p>

	Las células fotovoltaicas se componen de lámina DMSolar DMS-125M-280 (RMSolar, 2012) con voltaje de máxima potencia y la corriente de 0.521-V y 5.342-A, respectivamente. 25 láminas cuadradas de lados que miden 125mm
Conclusiones	

Apéndice Y. Intensidad solar en la superficie de Colombia

PROTOTIPO	RENDIMIENTO ANUAL (KWH/km)
TNO	9.800,0
SolarRoadways	$4.5 * (48 * 2) * 30 * 12 = 155.520,0$
Canadá	$4.5 * 69,58 * 30 * 12 = 112.719,6$

