



FACULTAD DE ARQUITECTURA DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN
ESCUELA DE CONSTRUCCIÓN CIVIL

**Estudio para la incorporación en Chile de fotocatalisis en pavimentos industriales
producida con dióxido de titanio (TiO₂)**

Proyecto de Título para optar al Título de Constructor Civil

Estudiante:

Nicolás Alfredo Chandía Pérez

Profesor guía:

Mg. Rodrigo Ternero Saavedra

Agosto 2020

Santiago, Chile

DEDICATORIA

El presente proyecto de título es dedicado en comienzo a mis padres que me apoyaron y me motivaron siempre a seguir y a continuar con excelencia hasta terminar con mi ciclo universitario, a la vez también es dedicado a cada una de las personas que participo en mi formación como profesional.

“Cuando hagan cualquier trabajo, háganlo de todo corazón, como si estuvieran trabajando para el Señor y no para los seres humanos.”

Colosenses 3:23(PDT)

AGRADECIMIENTOS

Agradezco en primer lugar a Dios por darme la oportunidad y las capacidades para poder llegar a ser un profesional.

Agradezco de todo corazón al Mg. Rodrigo Ternero Saavedra por confiar en mi para realizar este proyecto de título en su compañía, agradezco a mis padres por nunca dejarme caer en los momentos que más necesite, agradezco a las diferentes personas que aportaron su grano de arena dentro de mi carrera universitaria.

Y por último agradezco a Lidia Faundez Rubio por siempre soportarme y guiarme en las diferentes circunstancias que acontecieron en el pasar por esta escuela y esta carrera, gracias por escuchar y siempre tener un consejo sabio, preciso y eficaz para dar.

RESUMEN

En este proyecto se realizó un análisis bibliográfico y sistemático de diferentes publicaciones con estudios y experimentos referentes a la aplicación de fotocatalisis en pavimentos con el fin de llegar a una propuesta sólida y concreta para aplicar la fotocatalisis en pavimentos industriales en Chile.

Para poder desarrollar este documento se necesitaron definir ciertos conceptos tales como fotocatalisis, desarrollo sustentable, sustentabilidad, pavimentos. Siendo respaldado con diferentes publicaciones en el buscado Web of Science (WoS), en base a esto se presentarán diferentes para la aplicación de fotocatalisis en pavimentos industriales en Chile con dióxido de titanio (TiO_2).

Palabras claves: pavimentos fotocatalíticos, fotocatalisis, dióxido de titanio (TiO_2), desarrollo sustentable, industria, nanomateriales.

SUMMARY

In this project, a bibliographic and systematic analysis of different publications was carried out with studies and experiments concerning the application of photocatalysis in pavements in order to reach a solid and concrete proposal to apply photocatalysis in industrial pavements in Chile. In order to develop this document, it was necessary to define certain concepts such as photocatalysis, sustainable development, sustainability, pavements. Being supported with different publications in the searched Web of Science (WoS), on this basis different will be presented for the application of photocatalysis in industrial pavements in Chile with titanium dioxide (TiO₂).

Keywords: photocatalytic pavements, photocatalysis, titanium dioxide (TiO₂), sustainable development, industry, nanomaterials.

INDICE

DEDICATORIA	2
AGRADECIMIENTOS	3
RESUMEN.....	4
SUMMARY	5
INDICE	6
INDICE TABLAS:.....	7
INDICE DE ILUSTRACIONES.....	8
METODOLOGIAS	9
INTRODUCCION	10
OBJETIVOS	11
Capítulo 1: Antecedentes	12
Capítulo 1.1: contexto de sustentabilidad.....	12
Capítulo 1.2: Definición de conceptos.	13
Capítulo 1.3: Certificaciones sustentables.....	16
Capítulo 2: aplicaciones de la fotocatalisis	20
Capítulo 3: Análisis bibliográfico	22
Capítulo 3.1: “Development of photocatalytic asphalt mixtures by the deposition and volumetric incorporation of TiO ₂ nanoparticles”	22
Capítulo 3.2: “Photocatalytic asphalt mixtures: Mechanical performance and impacts of traffic and weathering abrasion on photocatalytic efficiency”	36
Capítulo 3.3: “Smart, Photocatalytic and Self-Cleaning Asphalt Mixtures: A Literature Review”.	52
Capítulo 3.4: Conama 2012	55
Capítulo 4: Propuestas de pavimentos fotocatalíticos industriales en Chile	61
Conclusiones	69
BIBLIOGRAFIA.....	71

INDICE TABLAS:

Tabla 1: características Styrelf 13/60 de CEPESA® Portugal	24
Tabla 2: Styrelf 13/60 de CEPESA® Portugal.....	24
Tabla 3: Composición de la mezcla experimental.	25
Tabla 4: Composición de la mezcla.	37
Tabla 5: características aditivo CEPESA® 35/50.	37
Tabla 6: Requisitos químicos básicos para el uso de agua en hormigón.	59
Tabla 7: Requisitos químicos complementarios para uso de agua en hormigón.	59
Tabla 8: Granulometría para el uso de granos en pavimentos asfálticos.	63
Tabla 9: Distribución de los agregados en una mezcla tipo de asfalto.	64
Tabla 10: Esquema de distribución de un pavimento de hormigón tipo.....	65
Tabla 11: Granulometría para el uso de granos en pavimentos de hormigón.	66

INDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1: Fotocatalisis.	13
Ilustración 2: Sustentabilidad.	14
Ilustración 3: parámetros certificación LEED.	17
Ilustración 4: Esquematización de métodos de aplicación de fotocatalisis.	26
Ilustración 5: Resultados análisis FTIR.	28
Ilustración 6: Resultados análisis AFM.	29
Ilustración 7: Resultados análisis de estructura cristalográfica de polvos de TiO ₂	30
Ilustración 8: Resultados prueba de movilidad electroforética.	31
Ilustración 9: Resultados análisis de actividad fotocatalítica (1).	32
Ilustración 10: Resultados análisis de actividad fotocatalítica (2)	33
Ilustración 11: Resultados prueba sensibilidad al agua.	40
Ilustración 12: Resultados prueba de deformación permanente.	41
Ilustración 13: Resultados prueba módulo de rigidez.	42
Ilustración 14: Resultados prueba de resistencia a la fatiga.	43
Ilustración 15: Resultados prueba de eficiencia fotocatalítica. (3)	45
Ilustración 16: Resultados prueba de pulverización de TiO ₂	47
Ilustración 17: Resultados fijación de nanomateriales.	48
Ilustración 18: Esquema mezcla de asfalto fotocatalítico.	53
Ilustración 19: Método de pulverización con camión especializado	55
Ilustración 20: Esquema de distribución de un pavimento asfáltico tipo.	62

METODOLOGIAS

Para realizar este proyecto se hizo una búsqueda exhaustiva de publicaciones con gran respaldo dentro de la comunidad científica internacional, esto se produjo principalmente en el buscador de la WoS (Web of Science), al encontrar publicaciones que tuvieran relación y concordancia con el tema principal de este proyecto que fotocatalisis con dióxido de titanio (TiO_2) en pavimentos industriales se realizó un análisis sistemático de diferentes técnicas para la aplicación de los productos semiconductores como lo es el dióxido de titanio (TiO_2), en los cuales se midió el rendimiento de cada una de estas técnicas de aplicación en base a diferentes parámetros, los cuales incluían: temperatura de aplicación, resistencia mecánica, resistencia a las lluvias, comportamiento frente a la abrasión, concentraciones de dióxido de titanio (TiO_2), y efectividad del método empleado para aplicar el material semiconductor (TiO_2).

Después de haber realizado la búsqueda y el análisis de la información encontrada, se procedió a realizar otra búsqueda, pero esta vez con respecto a aplicaciones fuera de laboratorio de la fotocatalisis en base a dióxido de titanio, al momento de haberse encontrado una publicación de CONAMA 2012 se realizó un nuevo análisis de las experiencias mencionadas en el texto, en base a esto también se hizo una propuesta con los datos recopilados por CONAMA 2012 que sirven para hacer un reflejo para la aplicación en Chile

Siguiendo con el análisis sistemático y conjunto de toda la información anterior se propusieron ciertas aplicaciones de la fotocatalisis con dióxido de titanio (TiO_2) en Chile para pavimentos de carácter industrial.

INTRODUCCION

Actualmente se presenta un cuadro en la construcción alrededor del mundo enfocado en la sustentabilidad de las construcciones, ya sea por las diferentes normativas de los diferentes países o por la oportunidad de recibir alguna clase de premio por sustentabilidad, principalmente en el área de construcción industrial.

Para mejorar el área sustentable de una industria se presenta la construcción de pavimentos sustentables fotocatalíticos en base a hormigón y dióxido de titanio (TiO_2).

Con el fin de dar a conocer este proceso de fotocátalisis en pavimentos industriales se darán a conocer diferentes definiciones referentes al tema, se dará un panorama general de los pavimentos industriales en Chile actualmente, y se presentará una propuesta apuntando así al desarrollo sustentable en Chile, esto se ordenará de la siguiente manera:

Capítulo 1, se presentarán antecedentes sobre el desarrollo sustentable, y se mencionarán diferentes certificaciones y reconocimientos sustentables de carácter mundial en industrias.

Capítulo 2, se mostrarán diferentes usos de la fotocátalisis.

Capítulo 3, se analizará la aplicación de fotocátalisis en pavimentos de carácter industrial en el mundo y los costos de esta basado en registros bibliográficos de la WoS (Web of Science).

Capítulo 4, se hará una propuesta para la aplicación en pavimentos industriales en Chile basado en las experiencias internacionales de otras empresas.

OBJETIVOS

-GENERALES:

La finalidad de este proyecto es dar a conocer la aplicación de fotocátalisis a partir de Dióxido de Titanio (TiO_2) en la construcción de pavimentos industriales, mencionando los beneficios y aporte que da este método de construcción, para concluir con una propuesta de cómo aplicar este método de construcción en pavimentos industriales en Chile con la intención de apuntar a un Chile con desarrollo sustentable en las industrias.

-ESPECIFICOS:

- Revisión del estado del arte

- Recopilar información sobre pavimentos y fotocátalisis.

- Analizar la recopilación bibliográfica.

- Definir conceptos importantes para el proyecto como: desarrollo sustentable, pavimentos, fotocátalisis.

- Mencionar diferentes premios de sustentabilidad validos en Chile.

- Exponer los beneficios de la fotocátalisis en la construcción, específicamente en pavimentos industriales.

- Realizar y presentar una propuesta viable para la aplicación de pavimentos sustentables fotocatalíticos en Chile.

Capítulo 1: Antecedentes

Capítulo 1.1: contexto de sustentabilidad

Como se sabe en la actualidad hay muchos problemas subyacentes a la contaminación, un agente importante en la contaminación a nivel mundial es la industria de la construcción, ya que esta aporta en gran parte con desechos, ruido, polvo, contaminación del aire y del agua, uso del suelo, y emisiones peligrosas. Las emisiones al aire son generadas por los gases de los escapes de los vehículos y el polvo durante la etapa de construcción. Estas emisiones contienen CO₂, NO₂ y SO₂, aparte de eso se producen modificaciones de terreno, esto implica que, si existe una zona boscosa, esta es destruida para poder construir, lo cual también implica un factor contaminante, según la CONAMA del año 2010 la industria de la construcción contribuyo con un 34% en la producción de residuos, con un 33% en la contaminación del aire según el MMA del año 2011, utilizando un 26% de los recursos eléctricos según BNE del 2010 y con un 6% de la contaminación de las aguas según AYALA el año 2010, es por esto que la contaminación que aporta el área de la construcción tiene que ser amortiguada y compensada con algo, lo que se postula en este proyecto es algo de ese estilo, esto es aplicar el proceso de fotocátalisis en pavimentos industriales con dióxido de titanio (TiO₂), con el fin de descontaminar, limpiar, y aumentar la durabilidad de los pavimentos utilizados en las diferentes industrias, aparte de todo esto, este proceso ayuda a disminuir la huella de carbono de las empresas y aumenta la sustentabilidad de estas, aportando de esta manera a la huella verde dando la opción a estas de optar a diferentes certificaciones y reconocimientos de carácter internacional con respecto a sustentabilidad, dando así una visión nacional al desarrollo sostenible.

Capítulo 1.2: Definición de conceptos.

Para poder entender a fondo los diferentes temas a tratar en este proyecto se deben definir ciertos conceptos base.

-**Fotocatálisis:** La fotocatalisis parte del principio natural de descontaminación de la propia naturaleza. Al igual que la fotosíntesis, gracias a la luz solar, es capaz de eliminar CO₂ para generar materia orgánica, la fotocatalisis elimina otros contaminantes habituales en la atmósfera, como son los NO_x, SO_x, COVs, mediante un proceso de oxidación activado por la energía solar (<http://www.fotocatalisis.org/que-es-la-fotocatalisis.html>)

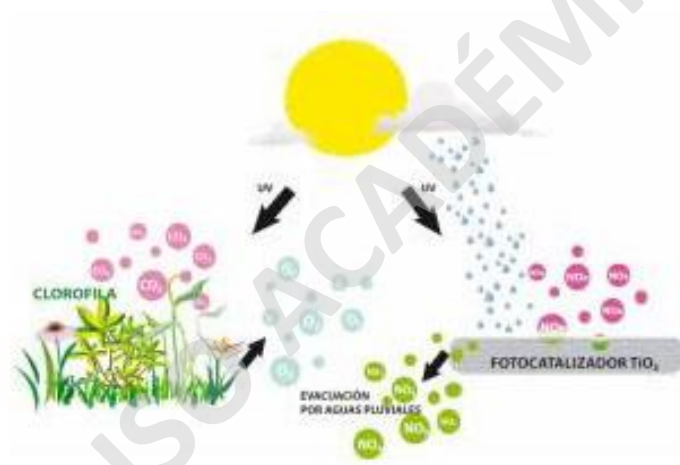


ILUSTRACIÓN 1: FOTOCATALÍISIS.

¿Qué es la fotocatalisis? (n.d.). Retrieved August 27, 2020, <http://www.fotocatalisis.org/que-es-la-fotocatalisis.html>

Desarrollo sostenible: “el desarrollo sostenible como la satisfacción de «las necesidades de la generación presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades” (Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente, nuestro futuro común, 1987). Este concepto es importante dentro del desarrollo del proyecto ya que esto es a lo que apunta, la idea es promover el desarrollo sostenible o desarrollo sustentable en base a la incorporación de nuevas tecnologías en la industria de la construcción, específicamente en los pavimentos de tipo industrial.

Desprendiendo de este concepto del desarrollo sustentable, viene una palabra raíz del concepto que es sustentabilidad, esto es, producir bienes y servicios a partir nuestros recursos (naturales, energéticos, económicos), a un ritmo en el cual no los agotemos y en el cual no produzcamos más contaminantes de aquellos que puede absorber el medio ambiente sin ser perjudicado, tienen una definición muy parecida con el concepto de desarrollo sustentable, pero esto es lo básico, pero es muy interesante, ya que para que algo sea sustentable tiene que presentar relación entre los ámbitos económicos, social y ambiental, esta relación se muestra en la siguiente ilustración:



ILUSTRACIÓN 2: SUSTENTABILIDAD.

Fuente: <https://www.disenoarquitectura.cl/sustentabilidad-o-sostenibilidad/>

Como se puede observar, al relacionarse entre solo 2 de los términos nombrados anteriormente resultan otra clase de proyectos, pero al relacionarse los 3 al mismo tiempo resulta un proyecto sustentable.

-Pavimentos: Se llama pavimento al conjunto de capas de material seleccionado que reciben en forma directa las cargas del tránsito y las transmiten a los estratos inferiores en forma disipada, proporcionando una superficie de rodamiento, la cual debe funcionar eficientemente. Los pavimentos se clasifican según su flexibilidad de la siguiente manera:

-Pavimentos flexibles: estos son contruidos en base a material asfáltico y granular, presentan una gran elasticidad, haciendo que su uso sea más rápido, pero menos duradero.

-Pavimentos rígidos: Son pavimentos hechos en base de hormigón y material granular, que presentan la característica de que al tiempo de ejecución es más tardío que los pavimentos flexibles, pero mucho más duraderos. Es necesario dejar en claro lo que son los pavimentos y sus clasificaciones ya que, la propuesta que se hará será en base a pavimentos con dióxido de titanio (TiO_2), en este caso se utilizará un pavimento rígido con el compuesto antes mencionado.

Capítulo 1.3: Certificaciones sustentables

Tras haber dejado claros algunos términos, es interesante el tema del desarrollo sustentable y la sustentabilidad, a lo largo del tiempo diferentes entidades han incentivado el uso de materiales reutilizables, o de diferentes técnicas de construcción o tecnologías para disminuir la huella de carbono y aumentar la huella verde de las diferentes construcciones y empresas, es por esto que en este capítulo se hará mención de las certificaciones, premios y condecoraciones más importantes a nivel mundial y en Chile sobre sustentabilidad tema de sustentabilidad.

-Certificación LEED: esta certificación está presente en varios países del mundo, teniendo una base de dato internacional, La certificación LEED® (Leadership in Energy and Environmental Design o Liderazgo en Energía y Diseño Ambiental), esta certificación es de las más complejas de todas las que se mencionaran ya que esta evalúa los proyectos desde el anteproyecto, ve desde lo que se hará con los desechos, hasta como se utilizara el agua, estos son los factores que se comprenden la evaluación de esta certificación, Proceso integral, localización y transporte, materiales y recursos, eficiencia del agua, energía y atmosfera, sitio sustentable, calidad ambiental interior, innovación, prioridades regionales, a continuación se presentara una imagen que explica en que consiste cada uno de estos parámetros.



ILUSTRACIÓN 3: PARÁMETROS CERTIFICACIÓN LEED.

Fuente: <https://www.eechile.cl/certificacion-leed/>

En base a esos principios se saca una calificación a los edificios y se les asigna un nivel de certificación, esto se ordena de la siguiente forma:

- Certificación LEED, esta se obtiene al obtener entre 40 y 49 puntos en la evaluación.
- LEED Silver, en este caso se necesitan 50-59 puntos en la evaluación.
- LEED Gold, que considera entre los 60 y 79 puntos.
- LEED Platinum, siendo este el rango más alto que se puede optar en esta certificación comprende de los 80+ puntos.

Los puntajes son asignados por una comisión revisora, la cual es a nivel internacional, vienen diferentes agentes del mundo como revisores en general al azar y sin saber que edificio revisaran, se efectúa la revisión, se evalúa y se asigna un puntaje, con este puntaje obtienen uno de los niveles en Chile, hoy en día en Chile existe un solo edificio con la certificación LEED Platinum y este es el edificio de Chilena consolidada-Zurich, y 8 edificios con la certificación LEED Gold, más otros que están optando por esta certificación.

-Certificación earthcheck: esta certificación es mucho más difícil de conseguir ya que no es solo una evaluación en un solo momento y ya, sino que consta de una supervisión a tiempo real en base a datos que son subidos a un programa entregado por la empresa certificadora, y que en cualquier momento puede llegar un supervisor a ver si esos datos son verdaderos o no, esta certificación al igual que LEED comienza desde el anteproyecto pero esta certificación considera desde el lugar donde se emplazara el edificio y como afecta a la zona tanto social como ambientalmente, los puntos que evalúa esta certificación son los siguientes:

- Emisiones de gases de efecto invernadero.
- Eficiencia energética, conservación y manejo.
- Gestión de agua potable y recursos de aguas pluviales.
- Conservación y gestión de ecosistemas.
- Gestión de los asuntos sociales y culturales.
- Ordenamiento del territorio y gestión.
- Calidad del aire y control del ruido.
- Gestión de aguas residuales.
- Manejo de residuos.

Earthcheck se caracteriza por hacer que todos los proyectos que postulan tengan que tener áreas de comparación conocidas como benchmark, esto consiste en ingresar datos al software que entregan por un periodo de 3 meses, todo proyecto que postule a esto parte con certificación bronce y desde ahí va escalando, y para que esto suceda deben ir cumpliendo diferentes parámetros impuestos por los certificadores, estos parámetros son dados en base a los benchmark, si el proyecto cumple con estas medidas obtiene la clasificación plata, si cumple con las medidas por 5 años consecutivos pasa a certificación oro, por 10 años platino y por 15 años master que es la clasificación más alta de todas, en Chile no existe ningún proyecto que considere esta certificación.

-CES: esta es la certificación edificio sustentable, es una certificación nacional que abarca los procesos desde el diseño del proyecto, dejando fuera el anteproyecto, las áreas de evaluación de esta certificación son las siguientes: calidad del ambiente interior, energía, agua, residuos y gestión; esta certificación es única y sin grados, por lo cual está muy por debajo de los estándares internacionales.

Capítulo 2: aplicaciones de la fotocatalisis

El contenido de este proyecto se basa en el uso de la fotocatalisis en pavimentos industriales, pero antes de ir a la base principal, se mencionarán otros usos que tiene la fotocatalisis que también son aplicables para conseguir las certificaciones antes mencionadas.

-En la naturaleza: La fotocatalisis es una reacción fotoquímica que convierte la energía solar en energía química en la superficie de un catalizador o sustrato, consistente en un material semiconductor que acelera la velocidad de reacción. Durante el proceso tienen lugar reacciones tanto de oxidación como de reducción. De esta forma se promueve la eliminación de la mayor parte de los contaminantes en las ciudades, esto ya que con este proceso se absorbe el CO_2 presente en el medioambiente, lo transforma y libera en forma de O_2 .

-Alternativa para el tratamiento de aguas residuales, aquí se aplica el uso de la fotocatalisis para proceso de tratamiento de aguas en base a la oxidación de los diferentes agentes contaminantes presentes en el agua, esto se produce gracias a que en la fase de descomposición de las aguas a tratar se le añade una dosis líquida de dióxido de titanio (TiO_2), lo que produce que los residuos se sequen de manera más rápida y el proceso de tratamiento sea más efectivo y rápido, otro beneficio que se obtiene a partir de aplicar el proceso de fotocatalisis para este tratamiento es que al aplicarse el dióxido de titanio (TiO_2) se reducen las emisiones de gases contaminantes y por el contrario se aumenta la emisión de oxígeno al ambiente.

-En muros con la necesidad de estar descontaminados: Existen innumerables fuentes de contaminación, como puede ser el tráfico de las grandes ciudades, la industria, productos químicos procedentes de la actividad agropecuaria, residuos sólidos de las actividades domésticas y un largo etcétera. Al encontrarse expuestos a la luz solar, parte de esta contaminación se degrada de forma natural por fotodescomposición, pero esto no es suficiente debido a la gran cantidad de contaminación existente. Las plantas, gracias a la fotosíntesis, eliminan gran cantidad de esta contaminación a través de sus hojas, utilizando la luz y el agua, que absorben por sus raíces, convirtiendo el dióxido de carbono en materia orgánica y oxígeno. Pero existen otros métodos de descontaminación como la fotocatalisis en la que intervienen la luz, el agua y otros componentes, que no producen oxígeno pero que contribuyen de forma eficaz en la eliminación de la contaminación. La fotocatalisis es un fenómeno que se origina de forma espontánea en la naturaleza, tal y como ocurre en la fotosíntesis. La luz y la humedad del ambiente toman un papel protagonista para eliminar ciertos contaminantes presentes en el aire que respiramos. En 1972, los profesores Akira Fujishima y Kenichi Honda centraron sus estudios en una particularidad de ciertos minerales que reaccionan a la luz y ese mismo año redactaron una novedosa publicación titulada *Electrochemical Photolysis of Water at Semiconductors Electrodes* (Nature 238, 37-38), en el que se desvelaba el mecanismo de acción del óxido de titanio (TiO_2), un conocido mineral fotocatalítico, en la descomposición del agua por acción de la luz. Este descubrimiento inició una revolución en la industria de la cerámica, del vidrio y otras industrias, con el desarrollo de un sinnúmero de aplicaciones en diferentes sectores. (<https://hospitecnia.com/arquitectura/materiales-y-revestimientos/materiales-fotocataliticos-mejores-atmosferas-hospitalarias/>)

Capítulo 3: Análisis bibliográfico

Capítulo 3.1: “Development of photocatalytic asphalt mixtures by the deposition and volumetric incorporation of TiO₂ nanoparticles”

En este capítulo se abordarán 3 casos experimentales y comparativos encontrados en bibliografía de la WoS (Web of Science) y de un caso de aplicación.

El primer texto al cual se le hará referencia tiene por título “Development of photocatalytic asphalt mixtures by the deposition and volumetric incorporation of TiO₂ nanoparticles” publicado en la revista “Constructions and buildings materials vol. 32” en enero del año 2013, encontrada en el buscador especializado de la WoS teniendo una evaluación Q1 (siendo Q1 la más alta y Q4 la más baja) lo que significa que son datos de validez y reconocimiento a nivel internacional por la comunidad científica.

En este texto se presenta un modelo para la incorporación de nanopartículas de dióxido de titanio (NaTiO₂) en pavimentos de carreteras, donde se encuentran datos importantes para el desarrollo de este proyecto.

“The field of construction and building industry was identified as an important market for the use of photocatalytic products since they can be applied to reduce building facades maintenance costs and also the pollution effects that it is particularly important in metropolis with high population density. In fact, the field of construction and building materials holds the largest market share (about 87%) in what concerns photocatalytic products” (Carneiro, J.O - Azevedo, S – Teixeira, V. , Development of photocatalytic asphalt mixtures by the deposition and volumetric incorporation of TiO₂ nanoparticles, página 2, 2013).

La industria de la construcción va en camino a lo sustentable, para lo cual se requiere investigación y prueba de ciertos materiales, el 87% de los productos fotocatalíticos a nivel mundial, estos productos aportan en gran medida a la descontaminación y a la reducción de contaminantes tanto en el aire como en elementos tangibles como muros y pavimentos, el semiconductor más utilizado para la producción de fotocátalisis es el dióxido de titanio (TiO_2) y su variante nanomolecular (NaTiO_2), pero ¿Por qué es el más utilizado? La respuesta a esta pregunta es porque se presenta comúnmente en la tierra, y por sus propiedades químicas, es estable químicamente, no es toxico ni radioactivo y actúa bien frente a la luz de sol (rayos UV).

El experimento mostrado en este artículo es desarrollado en base a materias primas como betún, agregados y aglomerantes, este betún es un reactante que se combina con NaTiO_2 , fue escogido en base a cómo reacciona al combinarse con el nano dióxido de titanio (NaTiO_2), lo que se espera es que el pH del betún no se vea afectado en gran manera para que no se provoque un deterioro en las características mecánicas de los pavimentos con el pasar del tiempo.

La preparación de la mezcla base de asfalto fue preparada mezclando un betún (aditivo) comercial modificado con polímeros (Styrelf 13/60 de CEPESA® Portugal) con diferentes cantidades de agregados pétreos (grava gruesa, fina) y material de relleno (Caliza en polvo), el aditivo antes mencionado es utilizado comúnmente en carreteras en Portugal y tiene las siguientes características.

CHARACTERISTICS	STYRELF®13-60 45/80-55
Penetration at 25 ° C (1-10mm)	45-60
Softening temperature (°C) ball and ring (TBA)	≥ 55
Flash point Cleveland	≥ 220
Elastic return at 25 ° C	≥ 70
Tensile test (5 ° C 100 mm / min) Cohesion at 400% elongation (J / cm²)	≥ 6
Storage stability (3 days / 180 ° C) TBA haut – TBA bas	≤ 3

TABLA 1: CARACTERÍSTICAS STYRELF 13/60 DE CEPSA® PORTUGAL

FUENTE: (TRADUCCIÓN DE [HTTP://WWW4.TOTAL.FR/PDF/BITUMES/FT-STYRELF-13_60-TOTAL.PDF](http://www4.total.fr/pdf/bitumes/FT-Styrelf-13_60-TOTAL.PDF))

CHARACTERISTICS	STYRELF®13-60 45/80-55
Fraass point of weakness * (°C)	≤ -15
Plasticity Interval (TBA-Fraass) (°C)	≥70
Tensile test (5 ° C 100 mm / min) Allongement à la rupture	≥500
After RTFOT curing at 163 ° C	
Elastic return at 25 ° C	≥70
Tensile test (5 ° C 100 mm / min)	
Elongation at break (%)	≥ 500
Cohesion at 400% elongation (J / cm²)	≥ 6

TABLA 2: STYRELF 13/60 DE CEPSA® PORTUGAL

Fuente: (TRADUCCIÓN DE http://www4.total.fr/pdf/bitumes/FT-Styrelf-13_60-Total.pdf)

Se realizó una mezcla de prueba la cual se agitó durante 30 min. hasta que se obtuvo una mezcla homogénea, posteriormente se vació en moldes de ensayo, se comprimó, los moldes tenían las siguientes medidas: 90.6 x 44.5 x 12.5 mm. la proporción exacta de los materiales se ve en la siguiente tabla:

Materiales	Porcentaje en peso (%)
Áridos finos (0.5-2 mm)	5.5
Agregados gruesos (2-6 mm)	87.0
Betún modificado con polímeros (PMB)	7.0
Relleno (Caliza)	0.5

TABLA 3: COMPOSICIÓN DE LA MEZCLA EXPERIMENTAL.

Fuente: (Carneiro, J.O - Azevedo, S – Teixeira, V., Development of photocatalytic asphalt mixtures by the deposition and volumetric incorporation of TiO₂ nanoparticles, página 3, 2013).

En base a esta composición se realizaron dos tipos de mezclas de prueba, una con un contenido de 3% de dióxido de titanio (TiO₂) en relación con la adición de PMB, y otra con un 6% con relación al PMB, esto para ver cómo reacciona el dióxido de titanio (TiO₂) como material semiconductor con respecto a la mezcla general en diferentes proporciones; el dióxido de titanio (TiO₂) agregado es encontrado comercialmente como “Aeroxide TiO₂ P25 de Quimidroga” la adhesión de este compuesto a la mezcla es de gran importancia ya que es el que proporciona las características fotocatalíticas al pavimento que será puesto a prueba más adelante, para la realización de estas pruebas se realizaron mezclas en las cuales se agregó el dióxido de titanio (TiO₂) en dos métodos de modificación diferentes, el primero es el antes mencionado, la cual consiste en agregar el dióxido de titanio (TiO₂) en forma de aditivo en relación al PMB.

El segundo método de modificación, el dióxido de titanio (TiO_2) se aplicó por pulverización acuosa, método que consiste en rociar el dióxido de titanio (TiO_2) de forma homogénea sobre el pavimento bituminoso, el cual fue preparado de la misma manera como se realizó mención en la Tabla 3, la pulverización fue hecha en una base acuosa con $\text{pH}=5.5$ y 8 estos pH fueron utilizados para apreciar cómo afectan dentro de la mezcla, lo cual permite que el pavimento determinar cuál es más efectivo para que el pavimento no se dañe a si mismo por corrosión con el pasar del tiempo o que simplemente pueda no tener alguno al ser adherido el dióxido de titanio (TiO_2) al pavimento bituminoso, esto fue aplicado en dos diferentes concentraciones con respecto al PMB, la primera es 4g/L y la segunda 10g/L, ambas aplicadas utilizando un compresor de aire atmosférico, fueron rociados los pavimentos a una distancia de 20 cm., la potencia utilizada para aplicar el dióxido de titanio (TiO_2) fue de 100ml/min y fue aplicada por 30seg lo que permitió que para la primera concentración se encontrara una tasa de aplicación de $5\text{mg}/\text{cm}^2$ y $12.5\text{mg}/\text{cm}^2$ en la segunda.

Ambos métodos de aplicación son esquematizados en la siguiente ilustración:

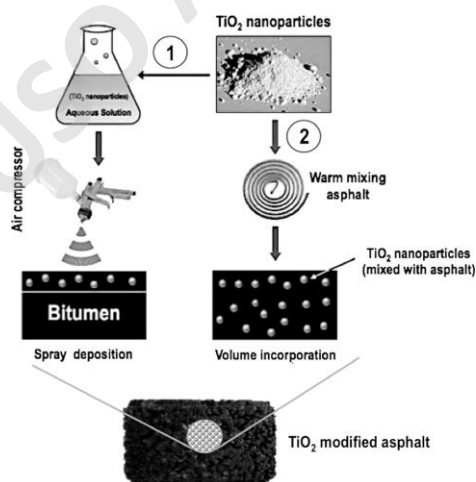


ILUSTRACIÓN 4: ESQUEMATIZACIÓN DE MÉTODOS DE APLICACIÓN DE FOTOCATALÍSIS.

Fuente: (Carneiro, J.O - Azevedo, S – Teixeira, V., Development of photocatalytic asphalt mixtures by the deposition and volumetric incorporation of TiO_2 nanoparticles, página 4 2013).

Después de que ambos procesos fueran realizados fueron analizados bajo diferentes pruebas, a las cuales se les hará mención ahora, la primera prueba de análisis fue FTIR (Fourier-transform infrared spectroscopy O Espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier) esto para analizar la composición química del asfalto modificado SBS (styrene-butadiene-styrene, estos son los materiales básicos de modificación en un pavimento asfáltico)

Pero ¿Qué es FTIR?

“FTIR stands for Fourier transform infrared, the preferred method of infrared spectroscopy. When IR radiation is passed through a sample, some radiation is absorbed by the sample and some passes through (is transmitted). The resulting signal at the detector is a spectrum representing a molecular ‘fingerprint’ of the sample. The usefulness of infrared spectroscopy arises because different chemical structures (molecules) produce different spectral fingerprints.”

Fuente: <https://www.thermofisher.com/cl/es/home/industrial/spectroscopy-elemental-isotope-analysis/spectroscopy-elemental-isotope-analysis-learning-center/molecular-spectroscopy-information/ftir-information/ftir-basics.html>

El siguiente grafico representa los resultados del análisis de FTIR.

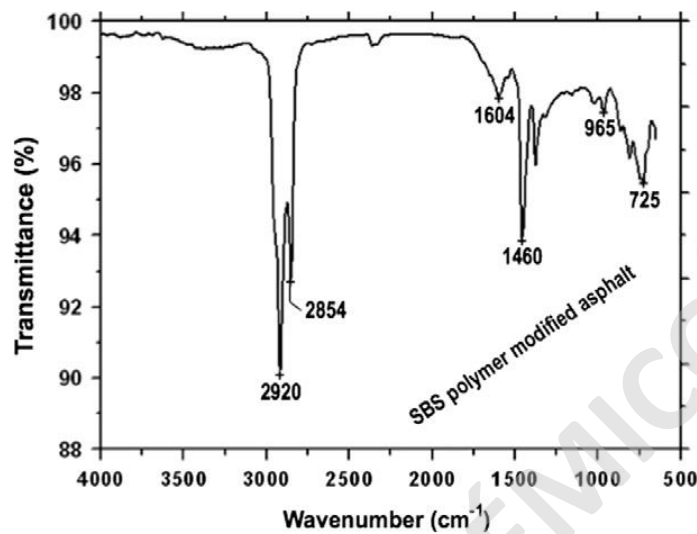


ILUSTRACIÓN 5: RESULTADOS ANÁLISIS FTIR.

Fuente: (Carneiro, J.O - Azevedo, S – Teixeira, V., Development of photocatalytic asphalt mixtures by the deposition and volumetric incorporation of TiO₂ nanoparticles, página 7, 2013).

Los resultados al analizar el FTIR muestra que la mezcla presenta diferentes anomalías y cambios con respecto a la muestra original, la cual no tiene aditivos. Uno de los cambios que presento fue un estiramiento simétrico de las partículas en los segmentos de hidrocarburo en los puntos 2920 cm⁻¹ y 2854 cm⁻¹, en 1460 cm⁻¹ se presentan el pico de flexión, en 1604 cm⁻¹ se presentan los anillos de benceno, en 965 cm⁻¹ y en 725 cm⁻¹ se presentan los segmentos de cadena de butadieno y vibraciones de flexión en el betún modificado, aquí es donde se presentan los cambios con respecto al pavimento normal, las conclusiones de esta prueba serán nombradas más adelante.

Otra prueba que se le realizó a este pavimento modificado con polímero (SBS) fue un análisis AFM.

“El microscopio atómico de fuerzas (AFM) permite la obtención de imágenes tridimensionales de la superficie de muestras tanto conductoras como aislantes sin ninguna preparación especial de las muestras”

(Fuente: <https://www.icmm.csic.es/fis/espa/afm.html>)

Para realizar esta prueba se tomó una muestra del pavimento modificado con polímero (SBS) y se depositó en un portaobjeto de microscopio de vidrio, posteriormente se realizaron los análisis, con los cuales se tomaron las siguientes imágenes:

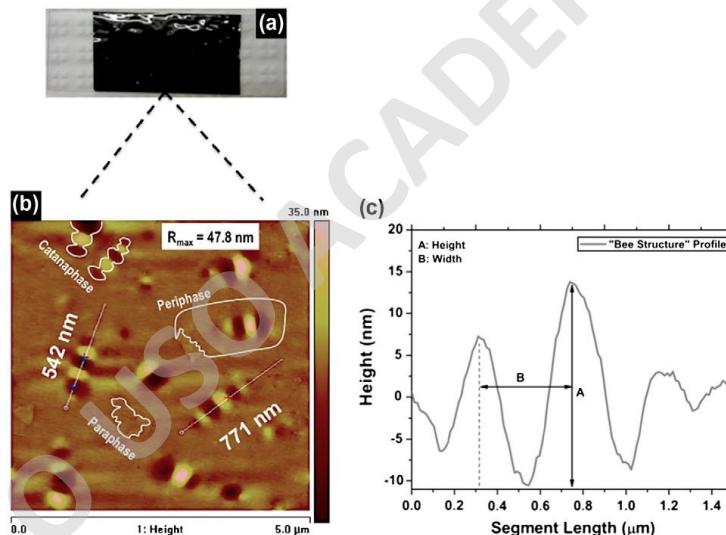


ILUSTRACIÓN 6: RESULTADOS ANÁLISIS AFM.

“Two-dimensional images of SBS polymer modified bitumen: (a) photographic image; (b) topographic AFM image showing a homogeneous matrix and the dispersed domains in that matrix (5 μm × 5 μm); (c) topographic profile of a domain in bitumen where maxima and minima, respectively correspond to pale and dark strips.”

Fuente: (Carneiro, J.O - Azevedo, S – Teixeira, V., Development of photocatalytic asphalt mixtures by the deposition and volumetric incorporation of TiO₂ nanoparticles, página 8, 2013).

La tercera prueba hecha a este pavimento bituminoso fue el análisis de la estructura cristalográfica de polvos de TiO_2 , esto consiste en aplicar rayos x para mostrar la difracción del espectro de las partículas de TiO_2 .

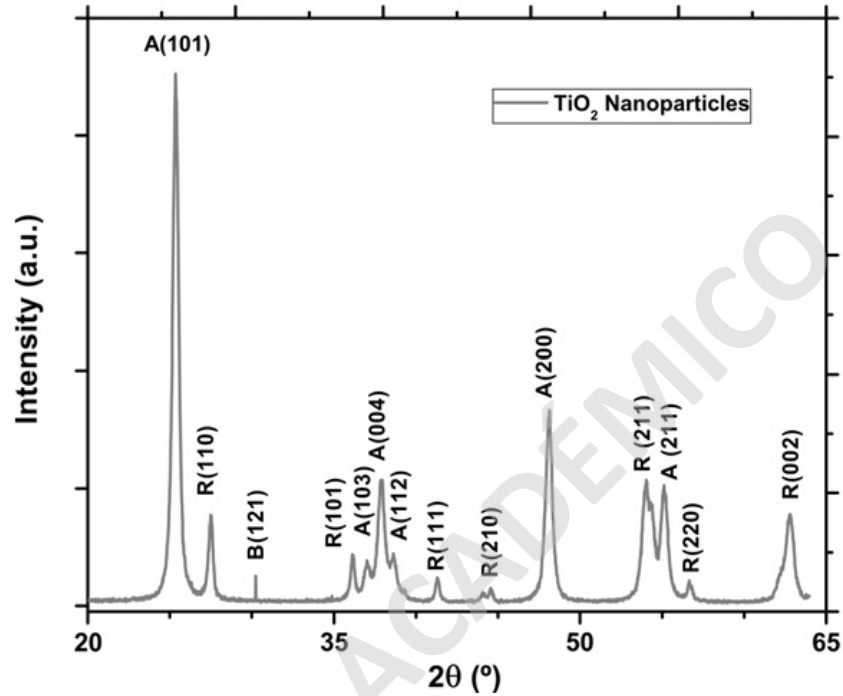


ILUSTRACIÓN 7: RESULTADOS ANÁLISIS DE ESTRUCTURA CRISTALOGRÁFICA DE POLVOS DE TiO_2 .

Fuente: (Carneiro, J.O - Azevedo, S – Teixeira, V., Development of photocatalytic asphalt mixtures by the deposition and volumetric incorporation of TiO_2 nanoparticles, página 9, 2013).

La cuarta prueba que se realizó consiste en estudiar la movilidad electroforética de las nanopartículas de TiO_2 , esto se utiliza para ver de qué manera afecto el pH utilizado en cada caso, los resultados fueron expresados en el siguiente gráfico.

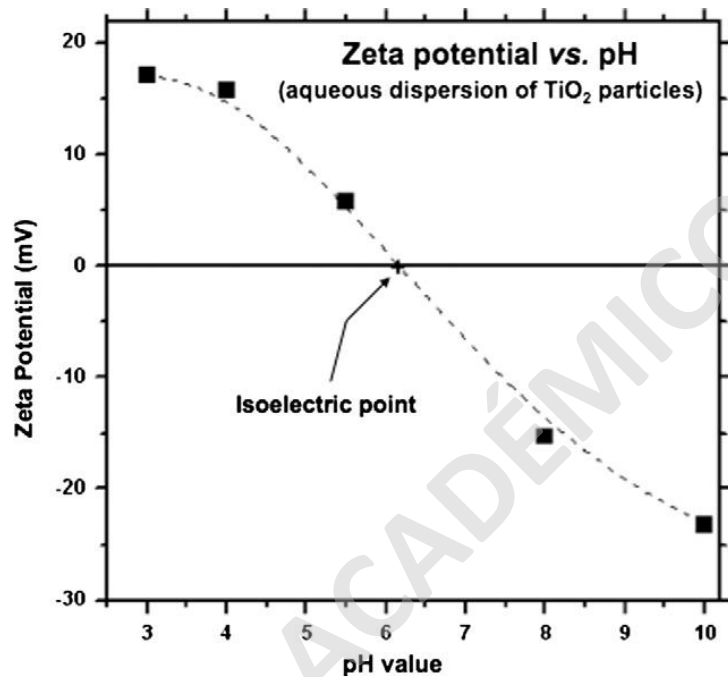


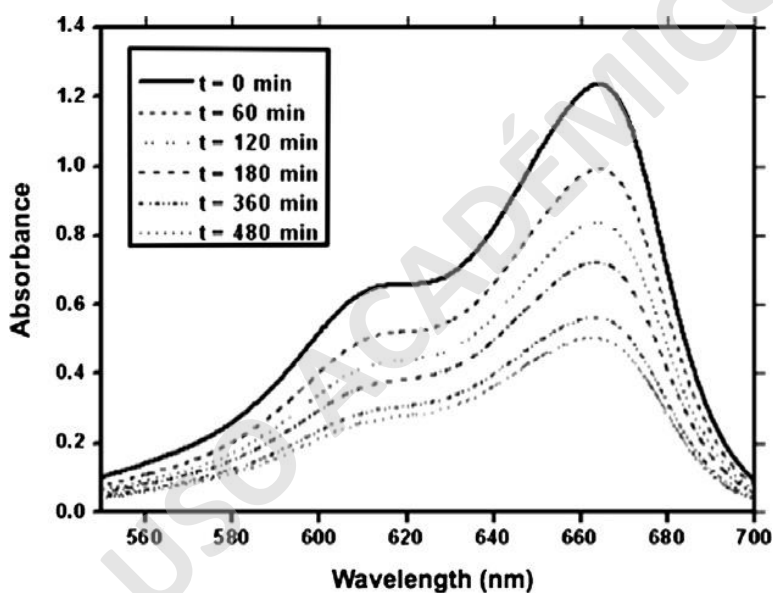
ILUSTRACIÓN 8: RESULTADOS PRUEBA DE MOVILIDAD ELECTROFORÉTICA.

Fuente: (Carneiro, J.O - Azevedo, S – Teixeira, V., Development of photocatalytic asphalt mixtures by the deposition and volumetric incorporation of TiO_2 nanoparticles, página 9, 2013).

El punto isoeléctrico es donde el pH se vuelve nulo, como se puede ver en la ilustración 8, “El potencial Zeta es el potencial eléctrico que existe en el plano de corte de la partícula, con una distancia corta de la superficie.”

(<https://www.lenntech.es/potentialzeta.htm#ixzz6U0xour67>)

Y por último antes de hablar de los resultados y conclusiones se realizó una evaluación de la actividad fotocatalítica de TiO_2 , para medir esto las muestras fueron rociadas con azul de metileno (MB), compuesto que debería ser eliminado por la fotocátalisis producida por el TiO_2 , esto al ser un compuesto en base a carbono (C) e hidrogeno (H), para saber cómo reaccionaron las diferentes concentraciones de TiO_2 (3% y 6% en base al PMB) se evaluó a través del tiempo mediante irradiación ultravioleta, la primera que se evaluó fue la muestra con un 6% de concentración, la cual fue pulverizada a una concentración de 10 g/L, la cual tuvo cobertura de 12.5 mg/cm^2 .



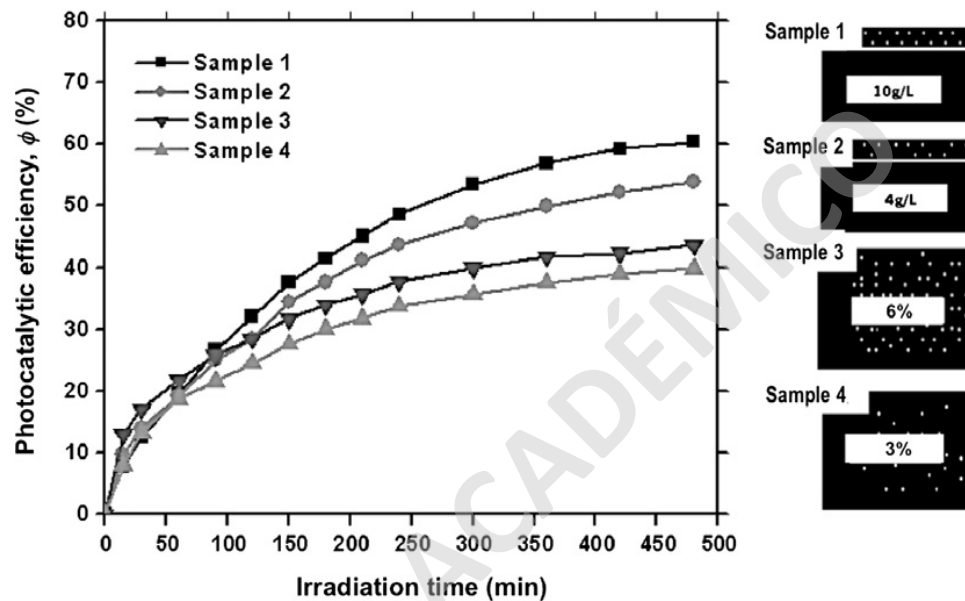
Absorption spectra of MB solution taken at different irradiation times and under the photocatalytic action of a TiO_2 photocatalyst (10g/L).

ILUSTRACIÓN 9: RESULTADOS ANÁLISIS DE ACTIVIDAD FOTOCATALÍTICA (1).

Fuente: ((Carneiro, J.O - Azevedo, S – Teixeira, V., Development of photocatalytic asphalt mixtures by the deposition and volumetric incorporation of TiO_2 nanoparticles, página 12, 2013).

En condiciones normales el azul de metileno (MB) no cambia su concentración, ni es absorbido, pero en este caso, donde se presenta un material semiconductor (dióxido de titanio (TiO_2)) se puede apreciar que si hay una absorción y disminución de la concentración del azul de metileno (MB).

El siguiente grafico muestra la eficiencia fotocatalítica a través del tiempo:



Time variation of the photocatalytic efficiency for all samples modified with the TiO_2 photocatalyst material.

ILUSTRACIÓN 10: RESULTADOS ANÁLISIS DE ACTIVIDAD FOTOCATALÍTICA (2)

Fuente: (Carneiro, J.O - Azevedo, S – Teixeira, V., Development of photocatalytic asphalt mixtures by the deposition and volumetric incorporation of TiO_2 nanoparticles, página 12, 2013).

“The spraying modification technique, unlike the volume incorporation, has great advantage because it does not require any changes to a bituminous paving structure, thereby reducing the modification costs. In this sense, the spraying technique is very versatile because the photocatalytic product can be applied either directly on the existing road surface (after an appropriate cleaning cold spray) or immediately after the road paving has been laid (hot spray). In addition, the spray treatment can be applied in areas with heavy traffic and can also be successfully used in urban areas such as multi-storey car parks or parking areas.” (Carneiro, J.O - Azevedo, S – Teixeira, V., Development of photocatalytic asphalt mixtures by the deposition and volumetric incorporation of TiO₂ nanoparticles, página 12, 2013).

Estas son de las primeras conclusiones que se ven dentro de este paper, partiendo del resultado que el método de pulverización es más efectivo en tema de eficiencia que el método de incorporación en la mezcla.

Conclusiones de la publicación.

-El mejor pH para incorporar el dióxido de titanio (TiO_2) es el 5.5 ya que en el pH 8 el deterioro del betún y del pavimento fue mayor, por otra parte, el pH 5.5 presenta una mejor adicción entre el betún y el pavimento.

- “The use of TiO_2 as an additive (volume incorporation) to the base asphalt mixture was able to promote the photodegradation of an organic pollutant (here simulated by the methylene blue dye). The maximum photocatalytic efficiency (45%) was obtained for samples having the highest TiO_2 concentration (at a content of 6% by bitumen weight).”

*

- “When used as a spray coating, TiO_2 improved the photocatalytic efficiency at 60% (for samples sprayed with the solution higher concentration, 10 g/L). In this sense, the spraying modification technique, unlike the volume incorporation has great advantages because apart from improving the photocatalytic efficiency, does not produce any changes to a bituminous paving structure, and substantially reduces the application costs.” *

*(Carneiro, J.O - Azevedo, S – Teixeira, V., Development of photocatalytic asphalt mixtures by the deposition and volumetric incorporation of TiO_2 nanoparticles, página 13, 2013).

Capítulo 3.2: “Photocatalytic asphalt mixtures: Mechanical performance and impacts of traffic and weathering abrasion on photocatalytic efficiency”

En esta parte del capítulo 3 se hablará sobre otro paper publicado en catalysis today de ScienceDirect encontrado en la WoS (Web of Science) que tiene por título “Photocatalytic asphalt mixtures: Mechanical performance and impacts of traffic and weathering abrasion on photocatalytic efficiency”, este paper fue publicado en abril del año 2019 y tiene una calificación total de Q1 (siendo Q1 la más alta y Q4 la más baja).

“In this research, an asphalt mixture was functionalized with nano-TiO₂ by bulk incorporation, using the contents 3 and 6%, and by spraying coating using an aqueous solution over its surface at different temperatures and rates.” (Irán Gomes da Rocha Segundo - Salmon Landi Jr. - Joaquim Alexandre O. Carneiro, Photocatalytic asphalt mixtures: Mechanical performance and impacts of traffic and weathering abrasion on photocatalytic efficiency, página 1, 2019).

“The key reactions considering the titanium dioxide (TiO₂) material, one of the most used semiconductors in photocatalysis field due to its remarkable properties such as the strong oxidation ability, low-price, non-toxicity and chemical inertness.” (Irán Gomes da Rocha Segundo - Salmon Landi Jr. - Joaquim Alexandre O. Carneiro, Photocatalytic asphalt mixtures: Mechanical performance and impacts of traffic and weathering abrasion on photocatalytic efficiency, página 2, 2019).

Se repite un patrón con el paper anterior “Development of photocatalytic asphalt mixtures by the deposition and volumetric incorporation of TiO₂ nanoparticles” ambos dicen que uno de los catalizadores semiconductores más utilizados a nivel mundial es el TiO₂ ya que tiene un bajo costo, no es toxico y es altamente reactivo en las circunstancias que se necesita.

Aquí se plantea el uso de fotocátalisis en carreteras, ya que el dióxido de Titania (TiO₂) no discrimina los contaminantes a absorber y transformar, el caso del aceite de motor no es una excepción, se propone el uso de este compuesto semiconductor en base a la limpieza de los pavimentos, cosa que aporta dos cosas importantes, la primera es a la descontaminación, y segundo a la limpieza de las carreteras lo que por ende aumenta la seguridad vial.

Para la experimentación en este paper se propuso una mezcla compuesta de la siguiente forma:

Materiales	Porcentaje en peso (%)
Agregados de granito	92
Betún modificado con polímeros (PMB)	5
Relleno (Caliza)	3

TABLA 4: COMPOSICIÓN DE LA MEZCLA.

Fuente: (Irán Gomes da Rocha Segundo - Salmon Landi Jr. - Joaquím Alexandre O. Carneiro, Photocatalytic asphalt mixtures: Mechanical performance and impacts of traffic and weathering abrasion on photocatalytic efficiency, página 4, 2019).

La finalidad de esto era lograr un 4% de huecos en el desarrollo del pavimento final, el aditivo utilizado fue CEPSE® 35/50 que tiene las siguientes características,

Características	Unidad	Norma	Min.	Máx.
Betún Original				
Penetración (25°C)	0,1 mm	EN 1426	35	50
Índice de penetración	-	EN 12591	-1,5	+0,7
Punto de reblandecimiento	°C	EN 1427	50	58
Punto de rotura Fraass	°C	EN 12593	-	-5
Solubilidad	%	EN 12592	99,0	-
Punto de inflamación	°C	EN ISO 2592	240	-
Resistencia al endurecimiento a 163°C (EN 12607-1)				
Variación de masa (valor absoluto)	%	EN 12607-1	-	0,5
Penetración retenida	%	EN 1426	53	-
Δ punto de reblandecimiento	°C	EN 1427	-	11
ESPECIFICACIONES TEMPERATURAS ORIENTATIVAS DE TRABAJO APLICACIONES				
> Temperatura de mezcla (°C): 160 - 165. > Temperatura de trabajo del ligante (°C): 160 - 165. > Temperatura de compactación (°C): 150 - 160. > Temperatura máxima de calentamiento (°C): 175.				
> Mezclas bituminosas en caliente.				

TABLA 5: CARACTERÍSTICAS ADITIVO CEPSE® 35/50.

Fuente: <https://www.cepsa.es/stfls/comercial/FICHEROS/Productos/Asfaltos/Af-ficha-ESP-Cepsasfalt-35-50.pdf>

Como catalizador semiconductor se utiliza nano-TiO₂ de Quimidroga (TiO₂ P25:80% de anatasa y 20% de rutilo).

La preparación de la mezcla se preparó en base a la norma EN 13108-1 y las pruebas fueron realizadas bajo las normas EN 129697-12 con esta se hicieron las pruebas en forma de losas cilíndrica, para realizar las pruebas de sensibilidad al agua y losas prismáticas para evaluar la eficiencia fotocatalítica y pruebas de resistencia mecánica basados en la norma AASHTO TP 8-94.

Con esto claro, se procedió a la preparación del experimento, se utilizaron 2 técnicas diferentes una fue la pulverización (después de la compactación) y la otra incorporada a la mezcla a granel.

El primero fue rociar una solución acuosa de nano-TiO₂ (4g/L) con un pH=8, eso fue aplicado con un compresor de aire atmosférico a una distancia de 20 cm durante 30 seg., teniendo el conjunto de la velocidad de todos los chorros un total de 100 ml/min en este experimento también fue una variable la temperatura, aquí se usaron temperaturas de 60°C, 100°C y 140°C, la temperatura de 60°C fue considerada para aplicación durante el uso del pavimento, y las temperaturas de 100 °C y 140°C fueron consideradas para la fase de pavimentación y compactación. Y se evaluaron tres proporciones de pulverización que son 4, 8 y 16 ml/cm².

La segunda técnica utilizada fue la incorporación masiva a granel que consiste en reemplazar parte de la masa del betún por nano-TiO₂ en razones del 3% y el 6%.

A cada una de las muestras se les dejó una marca y un identificador para poder diferenciarlas.

La primera prueba el llevarse a cabo fue la sensibilidad al agua, esta como se dijo anteriormente fue realizada en base a la norma EN 12697-12 donde un grupo de muestras se sumergió en agua a 40°C por 72 horas (3 días) y otro grupo se mantuvo fuera de la prueba, posteriormente se les hizo una prueba indirecta a la tracción que consistió en colocarlas en una cámara a 15°C por 2 horas.

La segunda prueba fue nombrada deformación permanente, que consiste en identificar las deformaciones de las mezclas de asfalto en base a una prueba de seguimiento de rueda (WTT)

con los parámetros de la norma EN 12697-22 aquí se probaron 2 losas prismáticas de 30x20x4 cm³ con hasta 10000 ciclos de una rueda de 700N a 0.44Hz y 60°C, la idea de esta prueba es analizar el comportamiento de la mezcla de asfalto con y sin TiO₂.

La tercera prueba realizada fue el módulo de rigidez donde se midió la flexión de la losa en cuatro puntos, procedimiento realizado bajo parámetros de la norma EN12697-26 con diferentes niveles de frecuencia, donde se compararon los resultados en mezclas con y sin TiO₂.

Prueba de fatiga, esta es la cuarta prueba que se realizó, consistió en medir la capacidad de las mezclas para resistir cargas cilíndricas a través del procedimiento de prueba de flexión de cuatro puntos según la norma EN 12697-24, la resistencia a fatiga corresponde al número final de ciclos de la carga que se les dio y se medirán a través de niveles de deformación expresados en gráficos.

La quinta prueba fue la eficiencia fotocatalítica, que consiste en la eliminación de la rodamina b (RhB) en función de la irradiación de luz solar artificial.

Sexta prueba, simulación de tráfico, se llevó a cabo utilizando un disco de cepillo que realizo abrasión mecánica de forma homogénea sobre las losas.

Y la séptima y última prueba lleva por título simulación de lluvia, que consistió en como dice el nombre simular una lluvia típica en Portugal y ver los efectos que esta tenía sobre los pavimentos.

Resultados de la publicación.

Los resultados de las diferentes pruebas mecánicas serán expuestos a continuación:

Para la prueba de sensibilidad al agua se observaron como resultado que la mezcla con menor contenido de TiO_2 (3%) al ser analizada presento una mayor resistencia al agua que la que presentaba un mayor contenido de TiO_2 (6%), pero sin embargo ambas superaron el 80% de la resistencia al agua que pide como mínimo la normativa en Portugal para mezclas de asfalto.

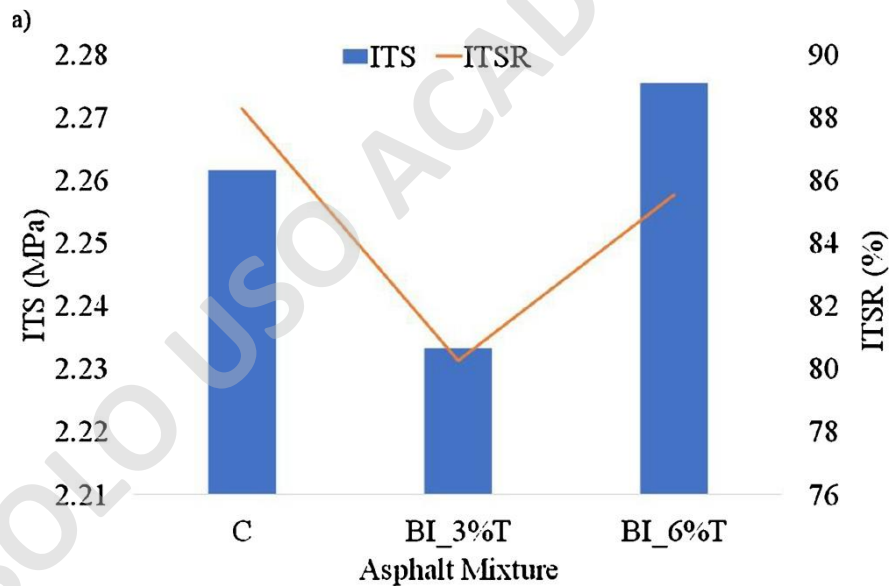


ILUSTRACIÓN 11: RESULTADOS PRUEBA SENSIBILIDAD AL AGUA.

a) Water Sensitivity

Fuente: (Irán Gomes da Rocha Segundo - Salmon Landi Jr. - Joaquim Alexandre O. Carneiro, Photocatalytic asphalt mixtures: Mechanical performance and impacts of traffic and weathering abrasion on photocatalytic efficiency, página 6, 2019).

En cambio, para la prueba de deformación permanente arrojo mejores resultados la muestra con mayor cantidad de TiO_2 (6%), esta muestra tuvo una deformación de 4.95mm., la muestra con menor cantidad de TiO_2 (3%) obtuvo una deformación de 7.5mm y la muestra sin contenido de TiO_2 tuvo una deformación de 6.8mm.

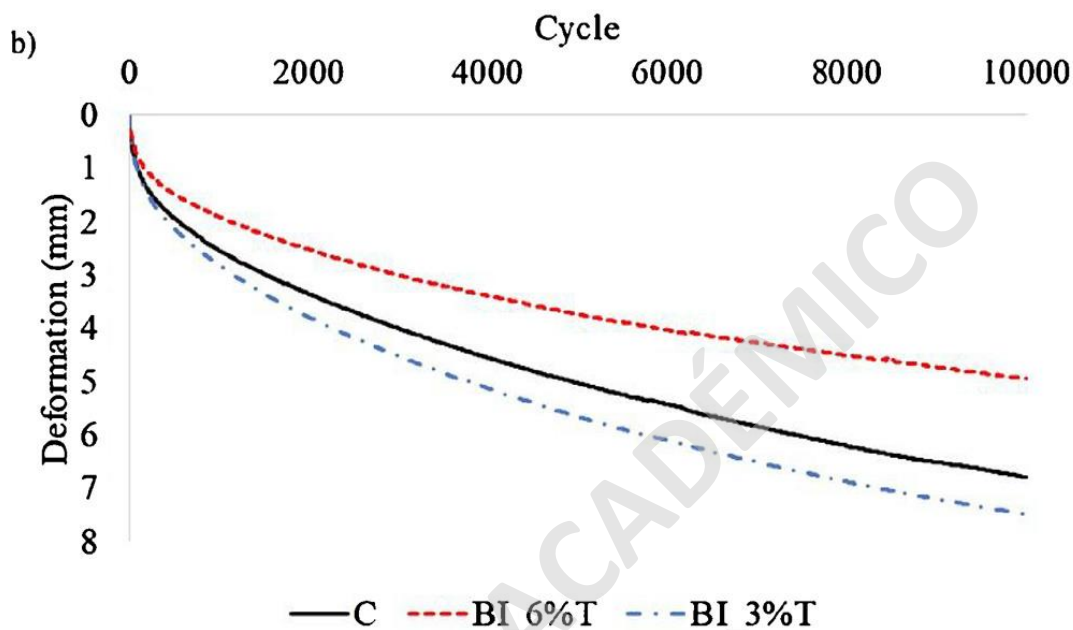


ILUSTRACIÓN 12: RESULTADOS PRUEBA DE DEFORMACIÓN PERMANENTE.

b) Permanent Deformation Results.

Fuente: (Irán Gomes da Rocha Segundo - Salmon Landi Jr. - Joaquím Alexandre O. Carneiro, Photocatalytic asphalt mixtures: Mechanical performance and impacts of traffic and weathering abrasion on photocatalytic efficiency, página 6, 2019).

Los resultados de la tercera prueba que es el módulo de rigidez, ambas mezclas con TiO_2 (3% y 6%) presentaron una rigidez más baja respecto a la mezcla convencional sin aditivos, pero en las mezclas con aditivos de compuesto semiconductor (TiO_2) presentan resultados similares, sin importar la concentración de aditivo agregada.

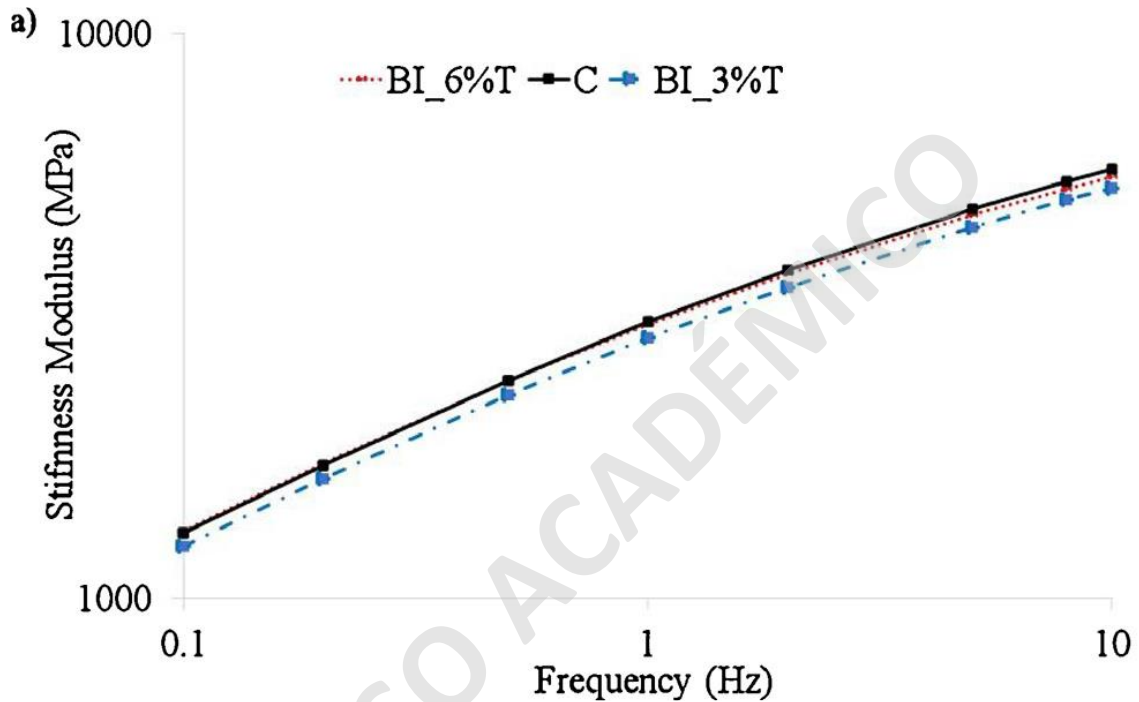


ILUSTRACIÓN 13: RESULTADOS PRUEBA MÓDULO DE RIGIDEZ.

a) Stiffness Modulus

Fuente: (Irán Gomes da Rocha Segundo - Salmon Landi Jr. - Joaquim Alexandre O. Carneiro, Photocatalytic asphalt mixtures: Mechanical performance and impacts of traffic and weathering abrasion on photocatalytic efficiency, página 7, 2019).

Por otro lado, la prueba de resistencia a la fatiga se evaluó mediante el número de ciclos aplicados sobre la losa versus la deformación aplicada, como se verá en el gráfico el resultado

de la mezcla de TiO₂ con la concentración más baja (3%) presento resultados similares a la muestra convencional sin aditivos, mientras que la con mayor concentración de TiO₂ presento una leve baja en la resistencia a la fatiga.

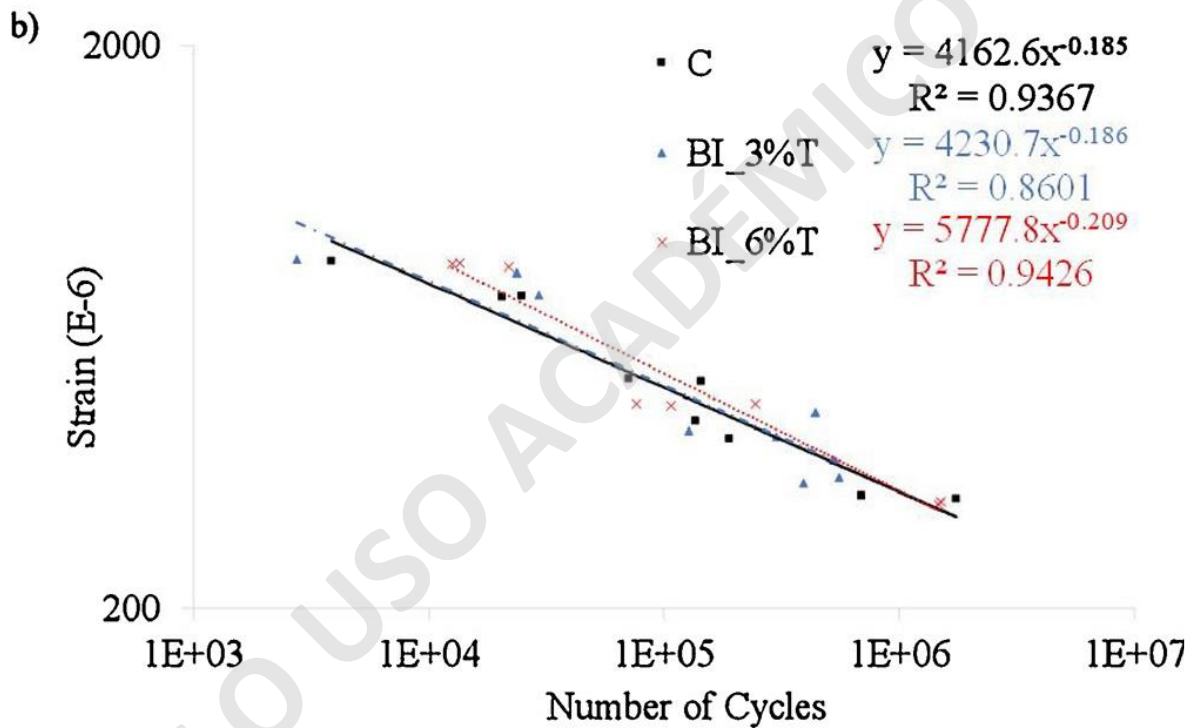


ILUSTRACIÓN 14: RESULTADOS PRUEBA DE RESISTENCIA A LA FATIGA.

b) Fatigue Resistance.

Fuente: (Irán Gomes da Rocha Segundo - Salmon Landi Jr. - Joaquím Alexandre O. Carneiro, Photocatalytic asphalt mixtures: Mechanical performance and impacts of traffic and weathering abrasion on photocatalytic efficiency, página 7, 2019).

En esta parte se presentarán los resultados de las pruebas según su eficiencia fotocatalítica:

La primera prueba en esta sección es la evaluación de la temperatura del sustrato durante la aplicación, las condiciones fueron de temperatura (60°C, 100°C y 140°C), en base a esto los métodos de pulverización y de incorporación a granel en la fase de mezclado no presentaron resultados similares, sin diferencias sustanciales, para las muestras que no tuvieron cubiertas sus superficies laterales con betún se presenta una eficiencia en la actividad fotocatalítica ya que el aditivo tenía un mayor contacto con el RhB, de hecho se hizo una prueba donde se cubrieron los laterales con betún y se redujo la actividad fotocatalítica del 29% al 17%.

En el texto se hace una reflexión y aclaración del tema, que dice: “all the experiments were carried out with samples covered with bitumen, except in their superior faces (i.e. the functionalized faces). In this sense, the selection of aggregates seems important since their constitution can facilitate the photocatalytic process together with TiO₂ mainly for oil/grease degradation in order or reduce road accidents caused by contamination of these materials.”

(Irán Gomes da Rocha Segundo - Salmon Landi Jr. - Joaquín Alexandre O. Carneiro, Photocatalytic asphalt mixtures: Mechanical performance and impacts of traffic and weathering abrasion on photocatalytic efficiency, página 8, 2019).

Aquí se presenta el grafico de estudio nombrado anteriormente:

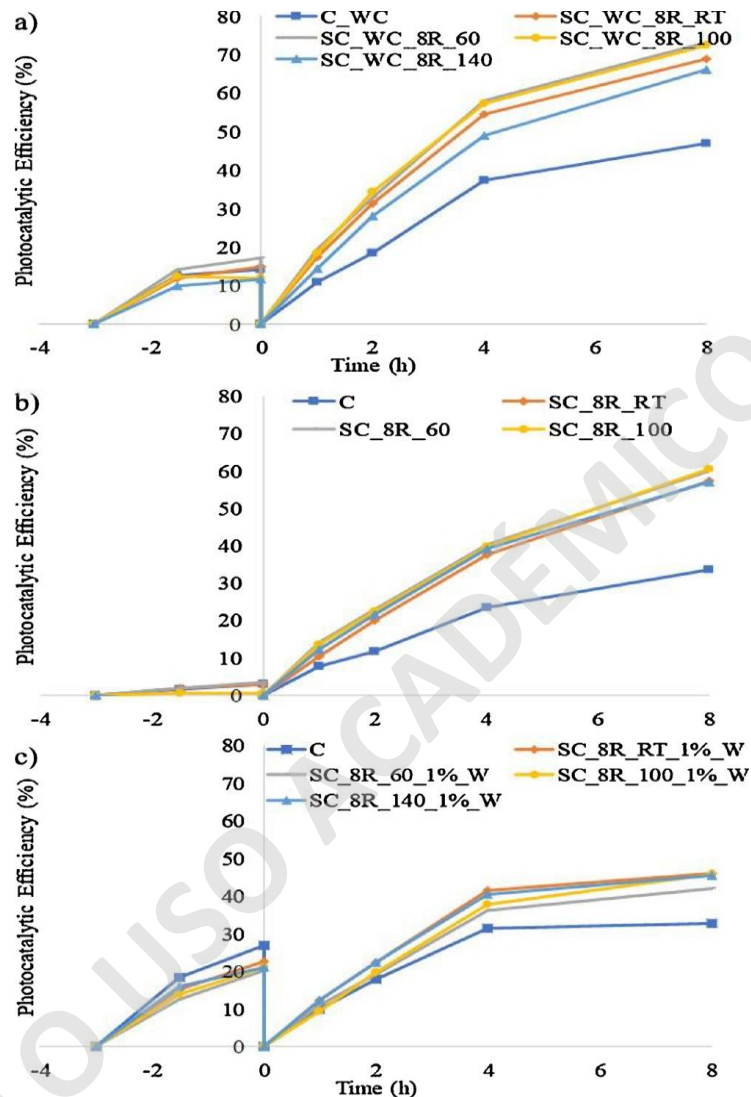


ILUSTRACIÓN 15: RESULTADOS PRUEBA DE EFICIENCIA FOTOCATALÍTICA. (3)

Photocatalytic Efficiency for Different Temperatures: a) before abrasion and without lateral covering; b) before abrasion and with lateral covering; c) after 1% superficial abrasion and rain simulation.

Fuente: (Irán Gomes da Rocha Segundo - Salmon Landi Jr. - Joaquím Alexandre O. Carneiro, Photocatalytic asphalt mixtures: Mechanical performance and impacts of traffic and weathering abrasion on photocatalytic efficiency, página 8, 2019).

Como se ve en el grafico (c) la eficiencia fotocatalítica se vio afectada en las losas que fueron probadas en la prueba de abrasión, el rendimiento de estas bajo en un 10%, hecho que se le atribuye a que el material fotocatalítico se desprendió de las losas.

En la evaluación de la velocidad de pulverización del sustrato se evaluó en base a la aplicación del betún en 3 tasas de pulverización (4, 8 y 16 ml/cm²) y aplicadas a temperatura ambiente lo que llevo a que la eficiencia fotocatalítica fuera de 60%, el orden de las tasas según sus resultados fue ascendente, o sea que la tasa de 4 ml/cm² presento la menor eficiencia y la de 16 ml/cm² la mayor eficiencia.

Posteriormente fueron sometidas a una prueba de abrasión y simulación de lluvia (0.125%) y las tasas más efectivas fueron las de 8 y 16 ml/cm², una conclusión que se saca aquí es que los resultados de la tasa de 8 ml/cm² presenta resultados tan similares con la de 16 ml/cm² que es mejor utilizar la de 8 ml/cm² ya que es más económica.

SOLO USO ACADÉMICO

Gráficos de la prueba de evaluación de la velocidad de pulverización del sustrato.

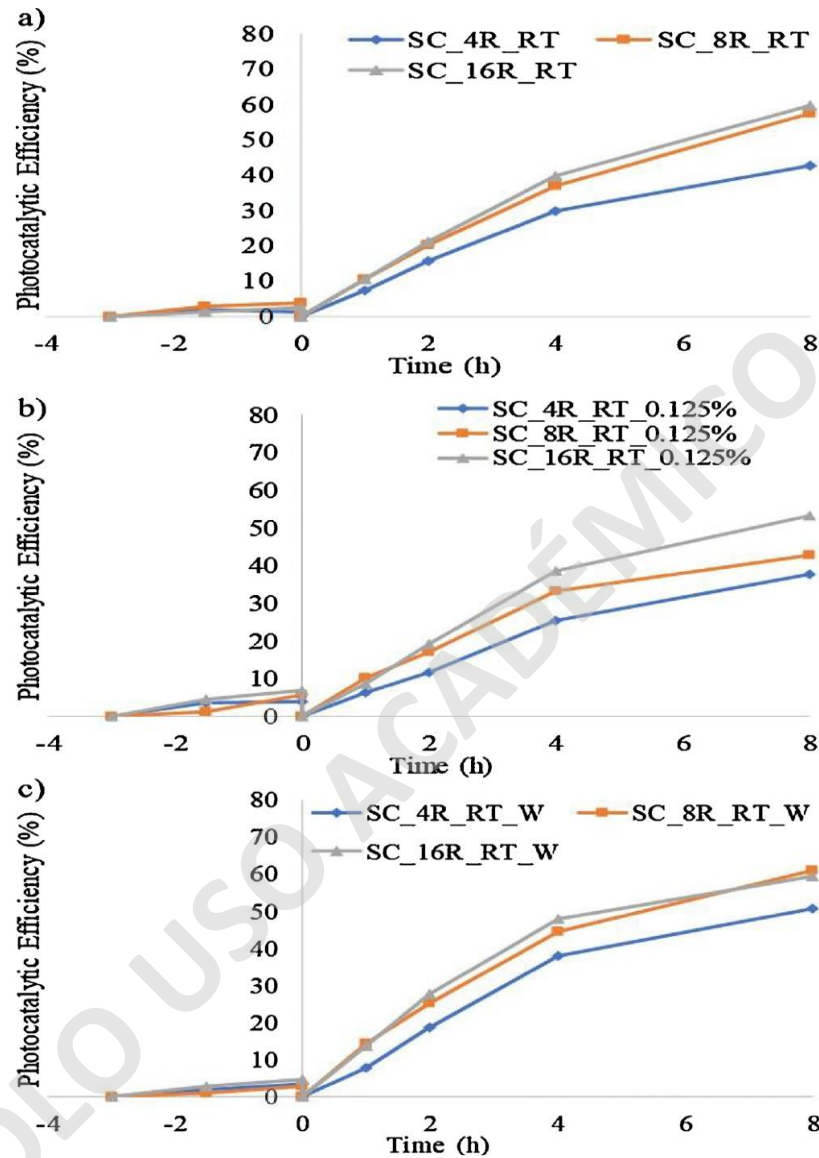


ILUSTRACIÓN 16: RESULTADOS PRUEBA DE PULVERIZACIÓN DE TiO_2 .

Photocatalytic Efficiency for Different Spraying Rates: a) before abrasion;
b) after 0.125% of a superficial abrasion; c) after rain simulation.

Fuente: (Irán Gomes da Rocha Segundo - Salmon Landi Jr. - Joaquím Alexandre O. Carneiro, Photocatalytic asphalt mixtures: Mechanical performance and impacts of traffic and weathering abrasion on photocatalytic efficiency, página 9, 2019).

La siguiente prueba de la que se ven sus resultados es la de estudio de la fijación de los nanomateriales, que se ve reflejada en la ilustración 17.

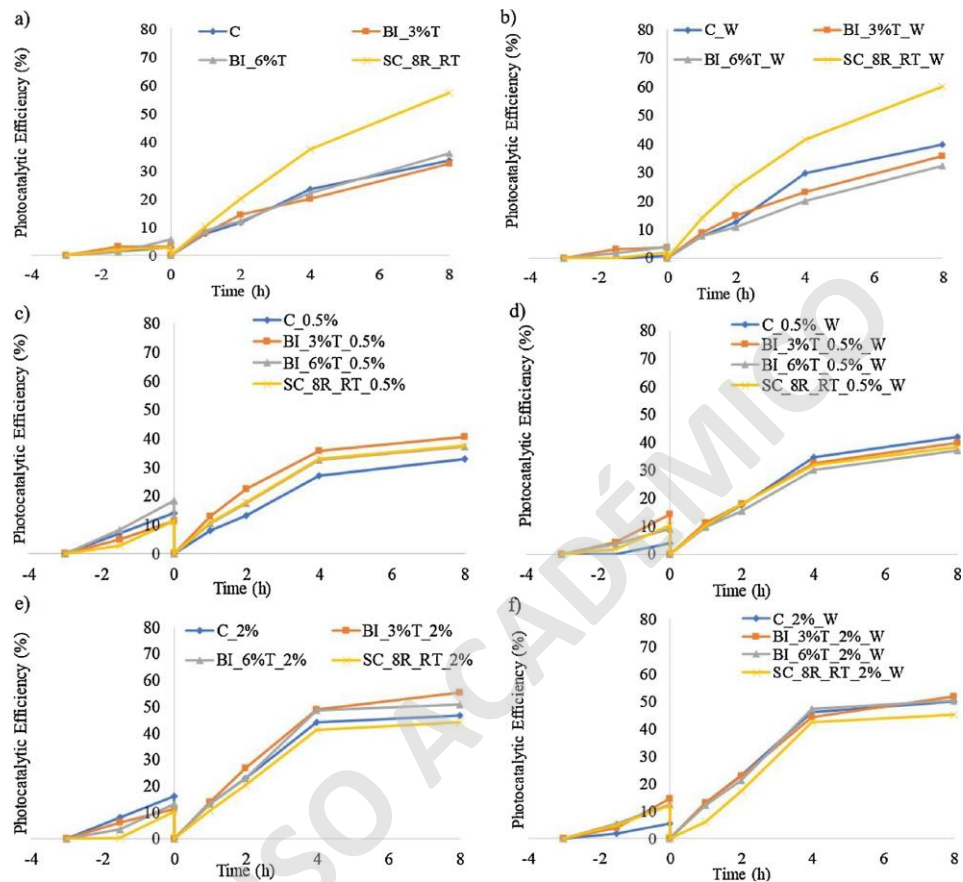


ILUSTRACIÓN 17: RESULTADOS FIJACIÓN DE NANOMATERIALES.

Photocatalytic Efficiency: a) before abrasion; b) after rain simulation; c) after 0.5% of a superficial abrasion; d) after 0.5% of a superficial abrasion and rain simulation; e) after 2% of superficial abrasion; f) after 2% of superficial abrasion and rain simulation.

Fuente: (Irán Gomes da Rocha Segundo - Salmon Landi Jr. - Joaquín Alexandre O. Carneiro, Photocatalytic asphalt mixtures: Mechanical performance and impacts of traffic and weathering abrasion on photocatalytic efficiency, página 10, 2019).

La eficiencia de la mezcla preparada con la adición de TiO_2 dentro de la fase de mezclado se vio afectada cuando se le aplicó el betún en la parte superficial ya que no permitió que el aditivo semiconductor (TiO_2) reaccionara de manera efectiva ya que las nanopartículas quedaron cubiertas. Pero después de haber sido sometidas a la prueba de abrasión superficial la eficiencia de estas subió de 32% a entre 40% y 55% para la mezcla con un 3% de TiO_2 y del mismo porcentaje a 41% para la mezcla con un 6% de TiO_2 . Contrario a lo que se pensaba los mejores resultados fueron presentados por la concentración más baja, esto se puede haber presentado por la aglomeración de las partículas de TiO_2 en la mezcla con mayor concentración.

“the wheel tracks. The other areas of the traffic lanes and also the shoulders are mostly submitted to weathering. Taking into account the low impact on photocatalytic efficiency of the rain, it is expected a high performance of both techniques on field since the area submitted to the abrasion is significantly lower than the total area of the pavement.”

Fuente: (Irán Gomes da Rocha Segundo - Salmon Landi Jr. - Joaquín Alexandre O. Carneiro, Photocatalytic asphalt mixtures: Mechanical performance and impacts of traffic and

weathering abrasion on photocatalytic efficiency, página 11, 2019).

Por ende, los cambios presentes teniendo en cuenta la abrasión superficial y la lluvia es que se considera una opción viable la de pulverización por sobre la de adición de TiO_2 en la fase de mezclado porque presentan resultados muy similares y el método de pulverización es más económico.

En este paper se presentan conclusiones, las cuales serán presentadas a continuación.

- En la incorporación masiva de nano-TiO₂ la resistencia a la humedad presento una baja, pero sigue cumpliendo con la norma portuguesa, por otro lado, la mezcla con mayor contenido de TiO₂ (6%) presento una mejora frente a la deformación permanente, tuvo resultados similares en el módulo de rigidez, y redujo la resistencia a la fatiga pero muy levemente estos parámetros comparados con la muestra sin aditivos, con la mezcla convencional, en cambio la muestra con menos adición de TiO₂ (3%) aumento levemente la deformación permanente, disminuyo un poco la rigidez y mantuvo la resistencia a la fatiga.
- La selección de agregados de granito es importante, ya que la buena elección de estos apporto un aumento en la eficiencia fotocatalítica.
- La temperatura en la cual se añadió el semiconductor (TiO₂) no influyo en los resultados, por lo tanto, se puede añadir el semiconductor en cualquier fase ya sea de construcción, pavimentación o en cualquier momento del uso del pavimento.
- Respecto al método de pulverización, la mejor tasa de pulverización para realizarlo son las de 8 y 16 ml/cm² y bajo el efecto de abrasión del 0.125% las mejores tasas fueron en orden ascendente: 4 ml/cm² < 8 ml/cm² < 16 ml/cm².
- la eficiencia fotocatalítica fue mucho mayor para el revestimiento por pulverización, esto sobre la incorporación de granel, este fenómeno se debió probablemente al bajo contenido de TiO₂ sobre la superficie de la muestra.
- Frente a la simulación de lluvia no se presentaron cambios, ni siquiera en el método de pulverización, el efecto fotocatalítico de este método sigue siendo muy alto.
- Después de la abrasión, la eficiencia fotocatalítica fue afectada en gran cantidad para el método de pulverización, pero en cambio para el método de incorporación a granel esta eficiencia presento un aumento.
- La simulación de lluvia junto con la prueba de abrasión lavan la superficie, llevándose las partículas de TiO₂ que no están inmovilizadas.

“With these results seems acceptable to forecast a good performance of the photocatalytic road surfaces on field. The surface of road pavements is submitted to traffic wearing mostly in the wheel tracks. It represents a reduced percentage of the total area of the surface. In view of the low effect of rain on the photocatalytic efficiency, it is expected a good performance of the spraying coating technique, less expensive. The ideal solution would be the combination of both techniques, with negligible impact on mechanical performance, however it requires a cost-benefit analysis.”

(Irán Gomes da Rocha Segundo - Salmon Landi Jr. - Joaquín Alexandre O. Carneiro, Photocatalytic asphalt mixtures: Mechanical performance and impacts of traffic and weathering abrasion on photocatalytic efficiency, página 12, 2019).

En base a esto es por qué hay que estudiar la propuesta de mejoramiento de pavimentos en Chile en base a fotocatalisis, todo por un mejoramiento en la calidad de vida, influyendo aquí la contaminación y la seguridad vial, estos estudios se pueden proyectar no solo a pavimentos en carreteras, sino que a pavimentos en general, es por esto que fueron estudiados en este proyecto ya que se hará una propuesta de tipo costo-beneficio para un pavimento de carácter industrial.

Capítulo 3.3: “Smart, Photocatalytic and Self-Cleaning Asphalt Mixtures: A Literature Review”.

En este capítulo se realizará una revisión a diferentes conceptos presentados en el paper “Smart, Photocatalytic and Self-Cleaning Asphalt Mixtures: A Literature Review”. Texto publicado en MDPI encontrado en el buscador WoS (Web of Science), publicado en octubre de 2019, tiene como calificación Q2 (siendo Q1 la más alta y Q4 la más baja).

“The global market of photocatalytic products is growing from \$848 million in 2009 to the expected value of \$2.9 billion by 2020”

(Irán Rocha Segundo - Salmon Landi, Jr. - Joaquín O. Carneiro, Smart, Photocatalytic and Self-Cleaning Asphalt Mixtures: A Literature Review, página 1, 2019).

Frente a estas cifras es importante como a nivel mundial se está creando conciencia frente a los diferentes usos de la fotocatalisis, donde cada vez se está invirtiendo más en un recurso tan importante como lo es esta para hacerle frente a la contaminación, por ende al cambio climático, y que es tan útil que incluso mejora la seguridad vial al ser utilizado en pavimentos, reduce el riesgo de propagación de infecciones y enfermedades, es por esto que es utilizado en muros y pisos de quirófanos en hospitales, entre otros muchos usos que tiene este proceso, este proceso está siendo estudiado desde la década de los 60', el primer científico en tener registros de haber estudiado esto fueron los profesores Honda y Fujishima de la Universidad de Tokio en el año 1968.

Es importante mencionar que los papers revisados anteriormente son en base a pavimentos asfálticos, pero este proceso de fotocatalisis también se puede utilizar en pavimentos de hormigón.

“Since in the presence of light irradiation, photocatalytic materials can degrade organic pollutants (such as oils and greases) adsorbed to their surface, these materials can also be classified as self-cleaning materials, a very important property in road engineering applications, because the self-cleaning function can contribute to a significant reduction of car accidents on oil-spilled areas.”

(Irán Rocha Segundo - Salmon Landi, Jr. - Joaquím O. Carneiro, Smart, Photocatalytic and Self-Cleaning Asphalt Mixtures: A Literature Review, página 2, 2019).

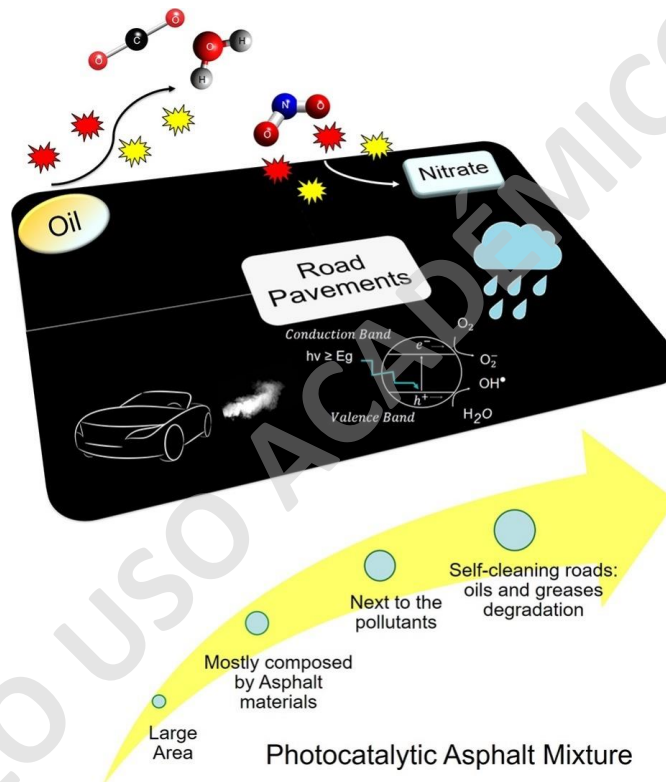


ILUSTRACIÓN 18: ESQUEMA MEZCLA DE ASFALTO FOTOCATALÍTICO.

Photocatalytic asphalt mixture.

(Irán Rocha Segundo; Salmon Landi, Jr.; Joaquím O. Carneiro, Smart, Photocatalytic and Self-Cleaning Asphalt Mixtures: A Literature Review, página 8, 2019).

Esta característica que presenta el dióxido de titanio (TiO_2) frente a la luz ultravioleta es por el cual da una mayor seguridad vial que un pavimento normal, aparte de eso, esta es una de las características por las cuales se quiere proponer un pavimento de uso industrial en Chile en este proyecto.

Otro beneficio que se nombra en esta publicación que en las otras no es el hecho de que al incorporar dióxido de titanio (TiO_2) a los diferentes tipos de pavimentos le da una particularidad autolimpiante, esto debido a la capacidad que tiene de degradar contaminantes orgánicos, como aceites y grasas.

En el análisis de costo-beneficio se vio que el método más económico y eficiente en términos de tiempo y función es el método de pulverización de una solución acuosa de TiO_2 , en el año 2012 se utilizó una concentración de 0.05 L/m^2 que tuvo USD 2.25 por m^2 , y en el 2018 se vio una diferencia ya que el precio vario entre 1-3 USD por m^2 y cada uno de estos cubre aproximadamente 7 g/m^2 , estos son precios para pavimento en base asfáltica, pero en pavimentos con base de hormigón, se presentan valores de € 6.50 por m^2 con rendimiento 0.067 kg/m^2 y € 20 por m^2 con rendimiento 1 kg/m^2 .

En las conclusiones de esta publicación se hace referencia a un concepto relativamente nuevo que es “pavimentos inteligentes”, particularidad que se le atribuye a pavimentos con incorporación de dióxido de titanio (TiO_2) ya que este es considerado como material inteligente, esto gracias a su particularidad de reaccionar frente a los diferentes contaminantes tanto orgánicos como atmosféricos sin la necesidad de darle alguna clase de señal para que comience la reacción.

Capítulo 3.4: “Pavimentos descontaminantes a partir de sprays”

El año una publicación del año 2012 de Conama titulado “Pavimentos descontaminantes a partir de sprays” se presenta un caso tipo de uso de utilización de fotocatalísis con dióxido de titanio (TiO_2) con el método de pulverización en un aeropuerto de la ciudad de Milán en Italia, esto fue hecho para probar el efecto de la fotocatalísis in-situ.

Aquí se utilizó una microemulsión fotocatalítica llamada Coverlite®, al igual se utilizó un camión con tecnología patentada que al final de cuentas es un compresor de aire atmosférico modificado para pulverizar la mezcla.



ILUSTRACIÓN 19: MÉTODO DE PULVERIZACIÓN CON CAMIÓN ESPECIALIZADO

Aplicación de Coverlite®, mediante el prototipo patentado por “Impresa Bacchi”, en la Terminal 1 del Aeropuerto de Malpensa (Milán).

Fuente: (Gianni Rovito Scandiffio - David Almazán Cruzado, Pavimentos descontaminantes a partir de sprays, pagina 7, 2012)

La aplicación de este producto fue en un estacionamiento de 20.000 m² ubicado en el aeropuerto de Malpensa en Milán y la segunda aplicación nombrada en este artículo es en un edificio sede político-administrativo en Milán con una superficie total de casi 25.000 m².

Los resultados de las pruebas mostraron lo siguiente:

“En el caso del Aeropuerto de Malpensa la reducción de óxidos de nitrógeno ha alcanzado un 9% mientras que en el caso de los alrededores del Edificio de la Región Lombardia ha alcanzado un 7,4% de reducción. Resultados muy prometedores teniendo en cuenta que las distintas épocas del año y las distintas horas de irradiación solar de las dos aplicaciones.”

(Gianni Rovito Scandiffio - David Almazán Cruzado, Pavimentos descontaminantes a partir de sprays, pagina 9, 2012)

También se vieron resultados con respecto al área mecánica de los pavimentos, las cuales no presentaron grandes cambios con respecto al mismo pavimento preparado sin la pulverización.

Es por esto por lo que el empleo de esta metodología es viable en pavimentos de todo tipo, ya sean carreteras, industrias, aeropuertos, túneles, estacionamientos, entre otros usos.

Dentro de este mismo apartado del capítulo 3 se hará mención a la composición de cementos fotocatalíticos para aplicar en Chile, este análisis y comparación se harán en base al texto “guía práctica de la fotocatalisis aplicada a infraestructuras urbanas”, en este texto se habla que los ensayos probados en pavimentos de base asfáltica funcionan de la misma manera, por ende el uso de los métodos de pulverización o de adición en masa a la mezcla de dióxido de titanio (TiO_2), también se dice que la composición de los hormigones hechos con este cemento se preparan de la misma manera que un hormigón convencional.

En base a esto se presentará una propuesta de un hormigón fotocatalítico para utilizar en Chile.

“Con independencia del método empleado para la fabricación, el orden apropiado de introducción de los componentes (a respetar estrictamente) será el siguiente: 1. agua 2. resina 3. aditivo (sí fuera necesario) 4. arena 5. filler 6. Cemento”

(Faraldos Marisol; Bahamondes Ana; Rovito Gianni, Guía Práctica de la Fotocatálisis Aplicada a Infraestructuras Urbanas, página 50, 2012

Agua:

el agua debe cumplir con los requisitos de la norma chilena NCh-1498 “agua hormigón” que dice:

4 requisitos:

4.1 El agua potable de la red puede emplearse como agua de amasado siempre que no se contamine antes de su uso.

4.2 Se permite el empleo de agua de mar solamente en hormigones simples de resistencia característica a la compresión inferior a 15 MPa (150 kgf/cm²) siempre que no exista otra fuente de agua disponible en la zona.

4.3 No se permite el empleo de agua que contenga azúcares como sacarosa, glucosa o similares.

4.4 Pueden emplearse aguas de otro origen o procedencia o cuya calidad se desconozca, siempre que cumplan con los requisitos químicos básicos indicados en la tabla 1. Si el contenido de sólidos disueltos resulta mayor que 5 000 mg/l, las aguas deben cumplir además con los requisitos químicos complementarios que se indican en la tabla 2.

4.5 En casos particulares pueden establecerse otros requisitos químicos especiales de acuerdo con las exigencias del hormigón o a las características de la obra.” (NCh-1498 of.82)

Tabla 1 - Requisitos químicos básicos

Requisitos químicos	Unidad	Valores límites	Ensayo
Valor del pH ¹⁾		- 6 a 9,2 NCh413	
Sólidos en suspensión	mg/ℓ	≤ 2 000	NCh416
Sólidos disueltos ²⁾	mg/ℓ	≤ 15 000	NCh416
Materiales orgánicos (Como oxígeno con sumido)	mg/ℓ	≤ 5	anexo B

NOTAS

- 1) Se recomienda determinar el pH en el mismo lugar del muestreo o lo más pronto posible después de tomada la muestra.
- 2) El contenido de sólidos disueltos puede determinarse, aproximadamente, mediante el ensayo de conductancia eléctrica específica, expresada en milimho/cm, según la NCh417 (ver anexo A).

TABLA 6: REQUISITOS QUÍMICOS BÁSICOS PARA EL USO DE AGUA EN HORMIGÓN.

Fuente: (Nch-1498 of.82, página 3)

Tabla 2 - Requisitos químicos complementarios

Requisitos químicos	Unidad	Valores máximos	Ensayo
Cloruros ¹⁾			
- en hormigón armado	kg Cl/m ³ hormigón	1,200	anexo C
- en hormigón tensado	kg Cl/m ³ hormigón	0,250	anexo C
Sulfatos solubles en agua ²⁾			
- en todo hormigón	kg Cl/m ³ hormigón	0,600	NCh420

NOTAS

- 1) El contenido de cloruro en el hormigón corresponde al total aportado por los áridos, cemento, agua y aditivos.
- 2) El contenido de sulfatos solubles en el hormigón corresponde al total aportado por los áridos, agua y aditivos.

TABLA 7: REQUISITOS QUÍMICOS COMPLEMENTARIOS PARA USO DE AGUA EN HORMIGÓN.

Fuente: (Nch-1498 of.82, página 3)

Resinas:

Las resinas sintéticas que se deben utilizar en estos hormigones deben ser en base a dióxido de titanio (TiO_2), certificadas y que cumplan con las condiciones de aplicación con el máximo de un 3% de la masa total de la mezcla.

Aditivos:

Los aditivos deben ser utilizados en las mismas condiciones que en cualquier hormigón, el especialista a cargo debe decidir si utilizarlos o no y en el caso de ser necesario debe decidir qué tipo de aditivo y como utilizarlo.

Arena:

Las arenas deben cumplir con “arido que pasa por el tamiz de abertura 4,75 mm y es retenido en el tamiz 0,075mm”.

(NCh163:2013 Áridos para morteros y hormigones – Requisitos)

Relleno:

Se propone el uso de un material de relleno en base a silíceo tamizado con un mínimo del 75% por el tamiz de 63 micras según la norma ASTM malla 250.

Cemento:

El cemento que se propone para uso debe ser tipo puzolánico, corriente y de alta resistencia.

Capítulo 4: Propuestas de pavimentos fotocatalíticos industriales en Chile

En este capítulo se harán tres propuestas para implementar el uso de pavimentos industriales fotocatalíticos en base a los artículos, papers y publicaciones analizadas anteriormente con el fin de implementarlas en diferentes empresas e industrias y así fortalecer tanto la disminución de la huella de carbono, como la contaminación que producen, ya sea en base a gases emanados por los diferentes vehículos utilizados, o por la contaminación producida por los residuos generados como por ejemplo, el aceite industrial de las diferentes maquinas o vehículos utilizados en sus instalaciones, y por último se hará una propuesta para el uso completo de fotocatalisis en una industria tanto en pavimentos como en muros.

Estas propuestas tienen el fin de ser utilizadas en pavimentos industriales de tipo asfáltico.

La corporación de desarrollo tecnológico (CDT) público en su registro técnico de materiales la definición de cada una de las partes de un pavimento.

Subrasante: La función de la subrasante es soportar las cargas que transmite el pavimento y darle sustentación, además de considerarse la cimentación del pavimento. Entre mejor calidad se tenga en esta capa el espesor del pavimento será más reducido y habrá un ahorro en costos sin mermar la calidad.

Subbase: Cumple una cuestión de economía ya que nos ahorra dinero al poder transformar un cierto espesor de la capa de base a un espesor equivalente de material de subbase (no siempre se emplea en el pavimento), impide que el agua de las terracerías ascienda por capilaridad y evitar que el pavimento sea absorbido por la subrasante.

Base: Es la capa que recibe la mayor parte de los esfuerzos producidos por los vehículos. La carpeta es colocada sobre de ella porque la capacidad de carga del material friccionante es baja en la superficie por falta de confinamiento.

Sección Transversal:

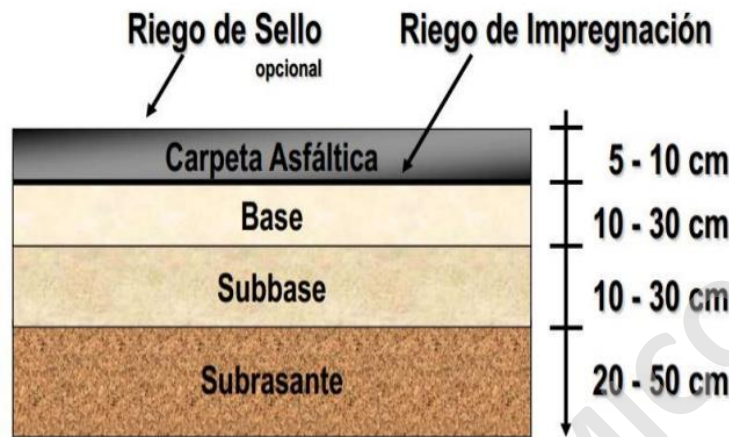


ILUSTRACIÓN 20: ESQUEMA DE DISTRIBUCIÓN DE UN PAVIMENTO ASFALTICO TIPO

Fuente: (<https://es.slideshare.net/nievesiita/pavimento-flexible-y-rigido>)

Tomando en cuenta la información detallada de los componentes de un pavimento asfáltico, se propone:

Para la subrasante se hará una escarificación de 0.2 m. y se realizará una compactación, hasta obtener una densidad mayor o igual o mayor al 95% del D.M.C.S. del Proctor modificado o el 80% o superior de la densidad relativa, en caso de esto no ser posible, se realizará un relleno al suelo hasta alcanzar el resultado de densidad antes mencionado, la subbase “deberá contener un porcentaje de partículas chancadas para lograr el CBR especificado y el 60 % o más de las partículas retenidas en el tamiz N° 4 ASTM (American Society for Testing and Materials), tendrán a lo menos 2 caras fracturadas. Esta sub-base estará constituida por mezclas naturales o artificiales de agregados granulares y finos de tal manera que estén comprendidos entre la siguiente banda granulométrica.” (ESPECIFICACIONES TECNICAS DE PAVIMENTOS EN ASFALTO, Minvu)

En el caso de la base El material a utilizar deberá estar constituido por un suelo del tipo grava arenosa, homogéneamente revuelto, libre de grumos o terrones de arcilla, de materiales vegetales o de cualquier otro material perjudicial. Deberá contener un

porcentaje de partículas chancadas para lograr el CBR especificado y el 60 % o más de las partículas retenidas en el tamiz N° 4 ASTM, tendrán a lo menos 2 caras fracturadas. Deberá estar comprendida dentro de la siguiente banda granulométrica:

Tamiz ASTM	%Pasa en peso
2"	100
1 1/2"	70-100
1"	55-85
3/4"	45-85
3/8"	35-65
N°4	25-55
N°10	15-45
N°40	5-25
N°200	0-8

TABLA 8: GRANULOMETRÍA PARA EL USO DE GRANOS EN PAVIMENTOS ASFALTICOS.

Fuente: “ESPECIFICACIONES TECNICAS DE PAVIMENTOS EN ASFALTO, Minvu”

Lo cual deberá compactarse y revisarse, para posteriormente proceder a colocar la carpeta asfáltica, la cual tendrá las siguientes características.

Materiales	Porcentaje en peso (%)
Áridos finos (0.5-2 mm)	5.5
Agregados gruesos (2-6 mm)	87.0
Betún modificado con polímeros (PMB)	7.0
Relleno (Caliza)	0.5

La tabla presentada anteriormente corresponde a la tabla 1, en base a esto mismo se hará procederá, pero con un cambio

Materiales	Porcentaje en peso (%)
Áridos finos (0.5-2 mm)	6
Agregados gruesos (2-6 mm)	92
Relleno (Caliza)	2

TABLA 9: DISTRIBUCIÓN DE LOS AGREGADOS EN UNA MEZCLA TIPO DE ASFALTO.

Ya que en este caso el betún modificado con polímeros (PMB) no se utilizará, se hará uso del método de pulverización, donde se deberá importar un aditivo de dióxido de titanio de base acuosa, ya que en Chile no existe algún producto que asemeje las condiciones de estos aditivos, esta solución tendrá el 3% de la masa total de carpeta asfáltica, será pulverizado con un camión equipado y adaptado con un compresor de aire atmosférico (como el que se presenta en la ilustración 19) con una velocidad de pulverización de 16 ml/cm², todo esto al final del proceso de asfaltado, cuando el asfalto ya esté listo para su uso.

Por tanto, se propone la importación de productos como Coverlite o similar técnico hasta que se algún laboratorio a nivel nacional saque al mercado un producto que cumpla con las condiciones y características técnicas.

La siguiente propuesta es hecha en base al manual de especificaciones técnicas de pavimentación en hormigón.

Para la subrasante se hará una escarificación de 0.2 m. y se realizará una compactación, hasta obtener una densidad mayor o igual o mayor al 95% del D.M.C.S. del Proctor modificado o el 80% o superior de la densidad relativa, en caso de esto no ser posible, se realizará un relleno al suelo hasta alcanzar el resultado de densidad antes mencionado, la subbase “deberá contener un porcentaje de partículas chancadas para lograr el CBR especificado y el 60 % o más de las partículas retenidas en el tamiz N° 4 ASTM (American Society for Testing and Materials), tendrán a lo menos 2 caras fracturadas. Esta sub-base estará constituida por mezclas naturales o artificiales de agregados granulares y finos de tal manera que estén comprendidos entre la siguiente banda granulométrica.” (ESPECIFICACIONES TECNICAS DE PAVIMENTACIÓN EN HORMIGÓN, Minvu)

Sección Transversal:

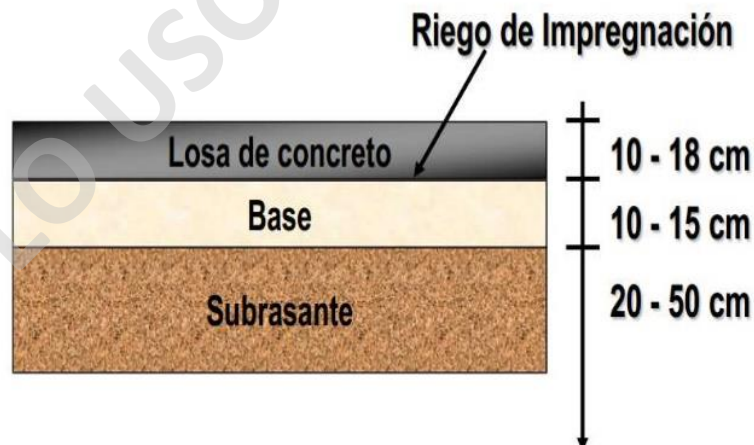


TABLA 10: ESQUEMA DE DISTRIBUCIÓN DE UN PAVIMENTO DE HORMIGÓN TIPO.

Fuente: <https://es.slideshare.net/nievesiita/pavimento-flexible-y-rigido>

En el caso de la base El material a utilizar deberá estar constituido por un suelo del tipo grava arenosa, homogéneamente revuelto, libre de grumos o terrones de arcilla, de materiales vegetales o de cualquier otro material perjudicial. Deberá contener un porcentaje de partículas chancadas para lograr el CBR especificado y el 60 % o más de las partículas retenidas en el tamiz N° 4 ASTM, tendrán a lo menos 2 caras fracturadas. Deberá estar comprendida dentro de la siguiente banda granulométrica:

Tamiz ASTM	%Pasa en peso
2"	100
1"	90-70
3/8"	30-65
N°4	25-55
N°10	15-40
N°40	8-20
N°200	2-8

TABLA 11: GRANULOMETRÍA PARA EL USO DE GRANOS EN PAVIMENTOS DE HORMIGÓN.

Fuente: “ESPECIFICACIONES TECNICAS DE PAVIMENTACIÓN EN HORMIGÓN, Minvu”

Lo cual deberá compactarse y revisarse, para posteriormente proceder a colocar la carpeta asfáltica, la cual tendrá las siguientes características.

En este caso la losa de concreto se hará en base a lo que el especialista diga, pero para hacerle el tratamiento semiconductor, fotocatalítico se hará de la misma manera que en la propuesta anterior, se realizara con el uso del método de pulverización, en este caso también se propone una importación de aditivos de dióxido de titanio (TiO_2) en base acuosa, será pulverizado con un camión equipado y adaptado con un compresor de aire atmosférico (como el que se presenta en la ilustración 20) con una velocidad de pulverización de 16 ml/cm^2 , todo esto al final del proceso de asfaltado, cuando el asfalto ya esté listo para su uso.

Las propuestas anteriores eran en base a pavimentos fotocatalíticos de uso vehicular, estas tienen el fin de reducir la contaminación emanada por cada uno de los vehículos que se

utilizan en una industria sin importar el rubro de esta, aparte de esto en el caso de las industrias mineras estos pavimentos aportan en la seguridad vial ya que estos pavimentos absorben y descomponen los diferentes aceites derramados por las diferentes maquinarias y camiones, y con este mismo efecto de absorción y descomposición de aceites que aporta el dióxido de titanio (TiO_2) aporta a la limpieza de la zona y a reducir la contaminación que se produce en base a gases contaminantes producidos por los agentes nombrados anteriormente. También estos pavimentos son pensados para industrias de carácter alimenticio donde aparte de aportar los mismos beneficios para las industrias mineras y junto con esto da beneficios para el control de agentes contaminantes en los productos, ya sean enfermedades, virus entre otras cosas ya que se le da el mismo uso que en hospitales, está comprobado que el efecto fotocatalítico reduce el riesgo de propagación de enfermedades ya que actúa de la misma manera que con los aceites o con los diferentes gases contaminantes, el dióxido de titanio absorbe la bacteria o virus y lo degrada, pero lo más efectivo en estos casos es combinar el uso de la fotocatalísis en muros y en pavimentos, hecho que podría ayudar y aportar de mejor manera a industrias que tengan este rubro alimenticio o que tengan algún rubro de carácter biológico-químico.

La última propuesta es para volver fotocatalítico un pavimento industrial ya construido y en uso, para realizar esta tarea se hará un proceso similar al descrito anteriormente, donde se utilizará un camión equipado con un compresor de aire atmosférico (como el de la ilustración 19) y se utilizará el 3% de igual manera de solución de dióxido de titanio con una velocidad de pulverización de 16 ml/cm^2 .

El fin de esta propuesta es aplicar pavimentos fotocatalíticos en las diferentes empresas o industrias, pero sin la necesidad de reemplazar los ya existentes, esto para no contaminar indebidamente y a la vez para reducir los costos de instalación de este tipo de pavimentos.

SOLO USO ACADÉMICO

Conclusiones

Los objetivos de este proyecto fueron cumplidos a cabalidad, ya que se después de haber efectuado un análisis investigativo y bibliográfico, se pudo llegar a realizar propuestas para el mejoramiento de los pavimentos para convertirlos en fotocatalíticos para el uso en los diferentes rubros industriales en Chile.

La mejor forma de aplicar la fotocatalisis en base a dióxido de titanio (TiO_2) tanto por costos como por rendimiento es la forma de pulverización, esto implica un 3% de la masa total del pavimento aplicado como base acuosa de dióxido de titanio (TiO_2), con una velocidad de pulverización de 8 ml/cm^2 o 16 ml/cm^2 , siendo más viable el de 8 ml/cm^2 por el hecho de ser más económico y tener resultados muy similares y casi iguales a la velocidad de 16 ml/cm^2 , y por último la temperatura de aplicación de la solución de dióxido de titanio (TiO_2) no presenta cambios significativos por ende no es un factor a considerar, esto aplicable a pavimentos en base de asfalto o de hormigón.

La implementación de la fotocatalisis en pavimentos para las diferentes industrias presentes en Chile es muy positivo, ya que aporta en gran manera a reducir la huella de carbono de las diferentes empresas e industrias que la apliquen, así como aporta en la seguridad vial, ayuda a evitar la contaminación de productos y la propagación de enfermedades.

Es un proceso que está siendo estudiado hace mucho tiempo, desde el año 1972 por los profesores Akira Fujishima y Kenichi Honda, pero hoy en la actualidad se están presentando resultados interesantes para la comunidad científica internacional, esto se puede ver con la cantidad de veces que han sido citados las diferentes publicaciones que tienen que ver con este tema, por lo que cada vez se invierte más tanto en la investigación de la fotocatalisis como en la aplicación de esta en países desarrollados en Europa, esto debido a que los resultados que presenta en ensayos de laboratorio coinciden con la aplicación sin esas condiciones tan específicas.

Investigando la sustentabilidad a nivel mundial se pudo apreciar que Chile presenta un gran atraso en comparación a países desarrollados principalmente europeos, viendo que en Chile hay solo un edificio que tiene la certificación LEED Platinum, siendo el edificio de Chilena Consolidada-Zurich y solo siete con certificación LEED Gold, por lo cual estamos muy atrasados como país en ámbitos sustentables, es por esto que se necesita investigar temas como la fotocatalisis o el uso de materiales o de técnicas que aporten y ayuden a aumentar la sustentabilidad de los diferentes proyectos ya sean proyectos ya realizados como proyectos que vienen en camino.

Siguiendo este mismo contexto es necesario que los diferentes laboratorios químicos, laboratorios y entes que se dediquen a la innovación de materiales, se adhieran a temas sustentables y estudien variantes de productos como Coverlite.

BIBLIOGRAFÍA

- Uso y definiciones de pavimentos: registro CDT, 2008, Pavimentos, <http://www.registrocdt.cl/registrocdt/www/admin/uploads/docTec/Pavimentos.pdf>
- ¿Qué es la fotocatalisis? (n.d.). Retrieved August 27, 2020, <http://www.fotocatalisis.org/que-es-la-fotocatalisis.html>
- Nuevas Certificaciones para Edificaciones Sustentables - Revitaliza. (n.d.). Retrieved August 27, 2020, from <http://revitalizaconsultores.com/blog/2018/07/15/nuevas-certificaciones-sustentables/>
- Sustentabilidad o Sostenibilidad | Diseño Arquitectura. (n.d.). Retrieved August 27, 2020, from <https://www.disenoarquitectura.cl/sustentabilidad-o-sostenibilidad/>
- Certificación LEED - Eficiencia Energética Chile. (n.d.). Retrieved August 27, 2020, from <https://www.eechile.cl/certificacion-leed/>
- EarthCheck. (n.d.). Retrieved August 27, 2020, from <https://es.earthcheck.org/>
- Materiales fotocatalíticos para mejores atmósferas hospitalarias. (n.d.). Retrieved August 27, 2020, from <https://hospitecnia.com/arquitectura/materiales-y-revestimientos/materiales-fotocataliticos-mejores-atmosferas-hospitalarias/>
- Almazán, David., Bahamonde, Ana., Carbajo, Jaime., Faraldos, María de la soledad., Iglesias, Ana., Rovito, Gianni., (2012)- Guía Práctica de la Fotocatálisis Aplicada a Infraestructuras Urbanas, 2012 – Conama2012, Congreso Nacional del Medio Ambiente: <http://www.fotocatalisis.org/assets/subcnt277.pdf>

- Almazán, David, Rovito, Gianni (2015) Medidas de control de eficiencia de pavimentos descontaminantes: <http://www.fotocatalisis.org/assets/doc503.pdf>
- Almazán, David, Rovito, Gianni (2016) Evaluación del. comportamiento de. los pavimentos. Descontaminantes: <http://www.fotocatalisis.org/assets/doc499.pdf>
- J.O.Carneiro^aS.Azevedo^aV.Teixeira^aF.Fernandes^aE.Freitas^bH.Silva^bJ.Oliveira^b, “Development of photocatalytic asphalt mixtures by the deposition and volumetric incorporation of TiO₂ nanoparticles”: <https://www-sciencedirect-com.ezproxy.usach.cl/science/article/pii/S0950061812006678>
- Características de aditivo Styrelf 13-60: http://www4.total.fr/pdf/bitumes/FT-Styrelf-13_60-Total.pdf
- Segundo, IGD (da Rocha Segundo, Iran Gomes) ; Landi, S (Landi, Salmon, Jr.) ; Oliveira, SMB (Batista Oliveira, Sergio Manuel) ; de Freitas, EF (de Freitas, Elisabete Fraga) ; Carneiro, JAO (Carneiro, Joaquim Alexandre O.), “Photocatalytic asphalt mixtures: Mechanical performance and impacts of traffic and weathering abrasion on photocatalytic efficiency”: <https://www-sciencedirect-com.ezproxy.usach.cl/science/article/pii/S0920586118309659>
- Iran Rocha Segundo; Elisabete Freitas; Manuel F. M. Costa; Joaquim O. Carneiro, “Smart, Photocatalytic and Self-Cleaning Asphalt Mixtures: A Literature Review”: <https://www.mdpi.com/2079-6412/9/11/696>
- Buscador Web of Science (WoS): http://apps.webofknowledge.com.ezproxy.usach.cl/WOS_GeneralSearch_input.do?product=WOS&search_mode=GeneralSearch&SID=8BDDMAFXQaVdPPCRLfe&preferencesSaved=
- ESPECIFICACIONES TECNICAS DE PAVIMENTACIÓN EN HORMIGÓN, Minvu: http://pavimentacion.metropolitana.minvu.cl/doc/MPALL/CAP2B_ESP_TEC_PAV_HORMIGON.pdf

- ESPECIFICACIONES TECNICAS DE PAVIMENTACIÓN ASFALTICA, Minvu: <http://pavimentacion.metropolitana.minvu.cl/doc/MPALL/CAP2A.pdf>
- Partes de un pavimento: <https://es.slideshare.net/nievesiita/pavimento-flexible-y-rigido>
- Ley de uso de agua para Hormigón: Nch-1498 of.82
- Definición FTIR: <https://www.thermofisher.com/cl/es/home/industrial/spectroscopy-elemental-isotope-analysis/spectroscopy-elemental-isotope-analysis-learning-center/molecular-spectroscopy-information/ftir-information/ftir-basics.html>
- Características aditivo Cepsa 35-50 : <https://www.cepsa.es/stfls/comercial/FICHEROS/Productos/Asfaltos/Af-ficha-ESP-Cepsasfalt-35-50.pdf>