

Aceite crudo de palma como un rejuvenecedor encapsulado para la autorreparación de asfaltos Crude palm oil as an encapsulated rejuvenator for self-repairing asphalts

INFORMACIÓN DEL ARTÍCULO

Erik Alpizar-Reyes^{1,2}, Silvia Caro³, Diana B. Sánchez⁴, José Norambuena-Contreras⁵

Historial del
artículo:

¹ Departamento de Ingeniería en Maderas, Universidad del Bío-Bío, Concepción, Chile, ealpizar@ubiobio.cl

² LabMAT, Universidad del Bío-Bío, Concepción, Chile, ealpizar@ubiobio.cl

³ Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia, scaro@uniandes.edu.co

⁴ Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia, bo-sanch@uniandes.edu.co

⁵ LabMAT, Universidad del Bío-Bío, Concepción, Chile, jnorambuena@ubiobio.cl

Recibido
14-11-2023
Aceptado
03-12-2024
Publicado
30-04-2025

Palabras Clave:
Aceite crudo de
palma
Alginato biológico
Encapsulación
Autorreparación

Article history:

Received
14-11-2023
Accepted
03-12-2024
Available
30-04-2025

Keywords:
Crude palm oil
Biological alginate
Encapsulation
Self-repair

Resumen

El envejecimiento del cemento asfáltico es una de las principales causas de agrietamiento en los pavimentos asfálticos. En los últimos años se ha logrado un avance significativo en el perfeccionamiento de nuevos rejuvenecedores encapsulados para materiales asfálticos, promoviendo el desarrollo de innovadores pavimentos autorreparables. En este estudio se evaluó la producción y caracterización de cápsulas de alginato que contienen aceite crudo de palma como un prometedor rejuvenecedor para la autorreparación extrínseca de cementos asfálticos envejecidos a largo plazo. Para caracterizar el aceite de palma se utilizaron análisis termogravimétrico (TGA-DTGA) y reflectancia total atenuada (ATR)-FTIR. La producción de cápsulas de alginato con aceite de palma se llevó a cabo utilizando un equipo de microencapsulación que fue equipado con un sistema de extrusión con una boquilla vibratoria. El proceso de encapsulación fue controlado por sus variables de encapsulamiento. Se evaluó el impacto de las variables de encapsulación vibratoria en las propiedades de las cápsulas, considerando la morfología superficial, el aceite superficial y la eficiencia de encapsulación. Los principales resultados de encapsulación mostraron que las propiedades de las cápsulas con aceite crudo de palma son afectadas por los parámetros de encapsulación con una morfología y estabilidad mecánica adecuada para mezclas asfálticas. En general, se demostró que las cápsulas que contienen aceite crudo de palma tienen el potencial de actuar como un rejuvenecedor para promover la autorreparación de un asfalto agrietado.

Abstract

Ageing of asphalt cement is one of the main causes of cracking in asphalt pavements. In recent years, significant progress has been made in the development of new encapsulated rejuvenators for asphalt materials, promoting the development of innovative self-healing pavements. This study evaluated the production and characterisation of alginate capsules containing crude palm oil as a promising rejuvenator for the extrinsic self-repair of long-term aged asphalt cements. Thermogravimetric analysis (TGA-DTGA) and attenuated total reflectance (ATR)-FTIR were used to characterise the palm oil. The production of alginate capsules with palm oil was carried out using a microencapsulation equipment that was equipped with an extrusion system with a vibrating nozzle. The encapsulation process was controlled by its encapsulation variables. The impact of the vibratory encapsulation variables on the properties of the capsules was evaluated, considering surface morphology, surface oil and encapsulation efficiency. The main encapsulation results showed that the properties of crude palm oil capsules are affected by the encapsulation parameters with a morphology and mechanical stability suitable for asphalt mixtures. Overall, it was demonstrated that capsules containing crude palm oil have the potential to act as a rejuvenator to promote self-repair of cracked asphalt.

* Corresponding author at: Erik Alpizar-Reyes, Departamento de Ingeniería en Maderas, Universidad del Bío-Bío, Concepción, Chile. E-Mail address: ealpizar@ubiobio.cl

RIOC

journal homepage: <https://rioc.ufro.cl/index.php/rioc/index>

Vol. 13, no. 01, pp. 1–6, Abril 2025

1. Introducción.

El proceso de envejecimiento del cemento asfáltico se caracteriza por una serie de reacciones químicas que ocurren en los materiales bituminosos, resultando en modificaciones en sus propiedades químicas y físicas. Estas modificaciones comprenden una disminución en la capacidad de adherencia árido-ligante dentro de la mezcla asfáltica, lo que conduce a la formación de grietas en los pavimentos asfálticos (Norambuena-Contreras et al., 2020). Sin embargo, debido a la naturaleza viscoelástica y capacidad de fluidez ante el incremento de temperatura, el cemento asfáltico posee la capacidad intrínseca de autorreparar (sellar de manera autónoma) sus microgrietas abiertas. Pese a esto, a medida que los cementos asfálticos envejecen su rigidez incrementa y la capacidad de autorreparación disminuye, provocando la formación y la propagación de microgrietas. Asimismo, los ciclos de esfuerzos mecánicos y la exposición a las condiciones medioambientales ocasionan que estas microgrietas puedan evolucionar a macrogrietas, conduciendo a la degradación del material y su posterior deterioro. Una de las soluciones habituales para reparar el daño por envejecimiento en la superficie de los pavimentos asfálticos se basa en la utilización de agentes líquidos rejuvenecedores (Gonzalez-Torre y Norambuena-Contreras, 2020). Los rejuvenecedores se refieren a sustancias como aceites, extractos o grasas que se utilizan para restablecer ciertas propiedades de los ligantes asfálticos que normalmente disminuyen durante el proceso de envejecimiento. La función principal de este proceso es disminuir la viscosidad y la rigidez del cemento asfáltico, mejorando así la elasticidad de los cementos asfálticos. De este modo, la eficacia del procedimiento de rejuvenecimiento está íntimamente ligada al enfoque empleado para la aplicación del rejuvenecedor en el ligante asfáltico degradado. Comúnmente, la técnica consiste en la aplicación de rejuvenecedores líquidos sobre la superficie de pavimentos asfálticos que han sufrido oxidación. Sin embargo, esta metodología ha demostrado ineficacia en el nivel de reparación (sólo en los primeros centímetros del pavimento) que se suma a los costos asociados a las obras de mantenimiento y conservación de los pavimentos. Como resultado, la investigación actual se ha centrado en proteger a los rejuvenecedores durante el proceso de mezclado y compactación de las mezclas asfálticas para permitir que el efecto de los rejuvenecedores sea desde el interior de las mezclas y no sólo en su superficie, además de promover los mecanismos de autorreparación de microgrietas de forma preventiva (Alpizar-Reyes et al., 2022; Concha et al., 2022; Gonzalez-Torre y Norambuena-Contreras, 2020; Prosperi y Bocci, 2021). Los mecanismos de autorreparación permiten que el cemento asfáltico envejecido recupere algunas de las características pérdidas durante el envejecimiento. Este

enfoque de reparación autónomo consiste en mecanismos para: i) el uso de nuevas tecnologías de encapsulamiento que permitan contener y proteger a los agentes rejuvenecedores durante los procesos de compactación y mezclado, y ii) liberarlos adecuadamente al momento de la formación de las microgrietas en el asfalto envejecido y con ello revertir el daño por envejecimiento. Estos mecanismos se basan en el desarrollo de redes de fibras y cápsulas que contienen rejuvenecedores. Diferentes investigaciones han demostrado con éxito que la encapsulación de rejuvenecedores es una solución útil para la autorreparación de materiales asfálticos. Entre los agentes rejuvenecedores que se han encapsulado se encuentran los bioaceites (Norambuena-Contreras et al., 2020), el aceite de cocina reciclado (Norambuena-Contreras et al., 2022), el aceite de girasol (Alpizar-Reyes et al., 2022) y el aceite de motor (Concha et al., 2022). Para sintetizar cápsulas conteniendo rejuvenecedores, se han empleado mayormente procesos de encapsulación fisicoquímicos, como la polimerización in situ y la gelación iónica. Siendo este último proceso el más utilizado. Asimismo, se ha demostrado con éxito que el aceite crudo de palma (AP) podría ser útil como un rejuvenecedor de materiales asfálticos envejecidos (Al-Sabaei et al., 2022). Con base en esto, este trabajo tiene como objetivo investigar la producción de cápsulas a base de alginato con aceite crudo de palma como un potencial rejuvenecedor encapsulado para la autorreparación de asfaltos. Para lograr este objetivo, se llevó a cabo la producción de cápsulas con aceite crudo de palma mediante el empleo de un dispositivo de microencapsulación equipado con un mecanismo de extrusión y una boquilla vibratoria con flujo controlado por parámetros de encapsulación. Se emplearon diversas caracterizaciones para examinar el impacto de los parámetros de encapsulación en las cápsulas. Los principales resultados de estas caracterizaciones han sido documentados y discutidos en este trabajo.

2. Metodología

2.1 Materiales de encapsulamiento

En esta investigación se desarrollaron cápsulas con aceite crudo de palma (CAP) para la autorreparación de cementos asfálticos envejecidos. Las cápsulas se sintetizaron utilizando alginato de sodio de bajo peso molecular (viscosidad de 175 cP a 20 °C para una solución al 2 % p/v) suministrado por Gelymar (Santiago, Chile) y cloruro de calcio dihidratado ($\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) proporcionado por Winkler en pellets granulares de 70% de pureza (Santiago, Chile). El aceite crudo de palma (AP) es el producto primario obtenido del mesocarpio del fruto de la palma aceitera. El AP fue suministrado por un productor local de aceite de palma (Bogotá, Colombia), con densidad de 0.88 g/cm³ a 20 °C, una viscosidad de 756.2 cP y un pH de 5.84. Finalmente, los reactivos químicos utilizados para los experimentos (éter de petróleo, citrato de sodio, hexano,

isopropanol, etanol y n-hexano) fueron adquiridos con Merck (Darmstadt, Alemania). El agua utilizada en todos los experimentos fue ultrapura (TOC<30 ppb).

2.2. Caracterización del aceite crudo de palma

Se analizaron las propiedades químicas y térmicas del AP para determinar su viabilidad como agente rejuvenecedor en la autorreparación de asfaltos, ver esquema de caracterización en la Figura 1. La caracterización química se realizó mediante reflectancia total atenuada con espectroscopía infrarroja transformada de Fourier (ATR-FTIR) en un espectrómetro Perkin Elmer equipado con un accesorio ATR de reflexión única (Waltham, EE.UU.). Para adquirir los espectros IR, se llevaron a cabo 20 escaneos a una resolución espectral de 2 cm^{-1} en el rango de 4000 cm^{-1} a 600 cm^{-1} . El AP se caracterizó térmicamente utilizando un análisis termogravimétrico (TGA) con un analizador termogravimétrico TGA Q50 de TA Instruments (New Castle, EE.UU.). Los termogramas se obtuvieron con una rampa de calentamiento de 10 °C/min y una velocidad de flujo de N_2 de 20 mL/min a temperaturas que fueron de 25 a 800 °C . Previo al proceso de encapsulación fue necesario sintetizar emulsiones del alginato con AP. Las emulsiones de tipo aceite en agua (O/W) se sintetizaron de la siguiente manera: el hidrogel de alginato de sodio se preparó agregando polvo de alginato de sodio con una proporción en peso al 2% p/p con agua ultrapura manteniendo la dispersión en agitación continua durante 24 h a temperatura ambiente para permitir el desdoblamiento de la estructura polimérica del alginato. Luego, el AP se homogeneizó durante 10 min a 7500 rpm en el hidrogel a una relación másica de aceite-alginato de 5:1 utilizando un homogeneizador JSR270D, Cientec (Santiago, Chile) y un baño térmico a 40 °C . Como resultado, la emulsión O/W registro una viscosidad de 151.0 cP y un pH de 6.53 a 40 °C .

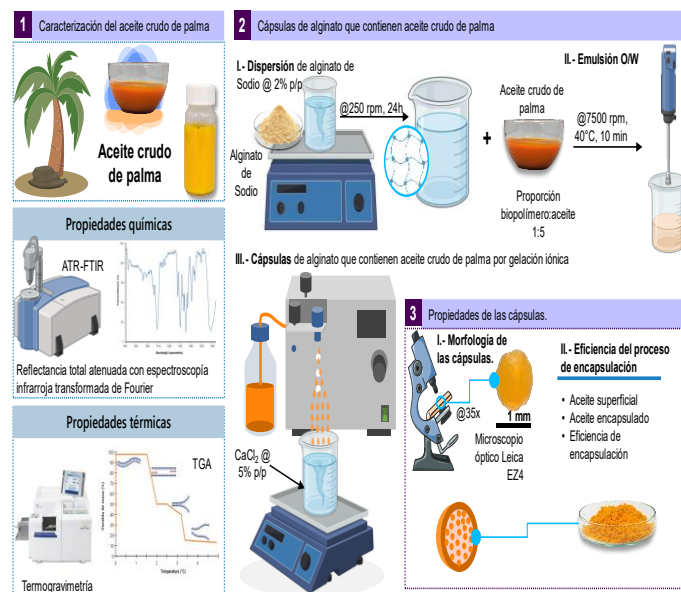


Figura 1. Aceite crudo de palma como rejuvenecedor encapsulado para la autorreparación de asfaltos.

2.3 Cápsulas de alginato que contienen aceite crudo de palma

Las cápsulas se sintetizaron mediante un proceso de gelación iónica utilizando un encapsulador Buchi B-390 (Flawil, Suiza). Las emulsiones O/W se alimentaron a un dispositivo encapsulador. El encapsulador utilizado consistió en un dispositivo mecánico que emplea una boquilla vibratoria cargada para formar gotas de la emulsión que fluye a través de ella. Después de alimentar la emulsión, se hace vibrar en pequeñas gotas a una frecuencia configurable de 40 a 6000 Hz y una amplitud de 1 a 12 . Además, la temperatura de la emulsión se puede ajustar a los valores deseados. Las gotas son cargadas por un campo eléctrico que es simultáneamente ajustable de 250 a 2500 V . Para sintetizar diferentes cápsulas de aceite de palma (CAP), las variables de entrada del encapsulador se ajustaron de acuerdo con la Figura 2 en su etapa III. Finalmente, las pequeñas gotas cargadas se dispersaron y cayeron en una solución endurecedora de CaCl_2 al 5% p/p que provocó la gelación iónica. Para preparar las cápsulas, las gotas se mantuvieron en una solución de CaCl_2 agitada a 250 rpm . La formación de las cápsulas ocurrió debido a que los iones de calcio se difunden en la emulsión facilitando la reticulación en la interfase solución-emulsión, lo que da como resultado la formación de un complejo estable a base de alginato de calcio. Después de la encapsulación, las cápsulas de AP se reticularon durante 30 minutos. Luego, las cápsulas se lavaron, filtraron y secaron en un horno a 30 °C por 24 horas. Finalmente, las cápsulas se almacenaron a -18 °C para evitar la oxidación del aceite de palma.

2.4 Propiedades de las cápsulas: morfología y eficiencia.

La influencia de las variables de entrada del encapsulador sobre las propiedades de las cápsulas de AP se determinó analizando su morfología y la eficiencia del proceso de encapsulación. Para ello, se estudió la morfología de las cápsulas utilizando un microscopio óptico Leica EZ4 (Wetzlar, Alemania) con un aumento de 35x. Adicionalmente, se determinó la eficiencia del proceso de encapsulación con el método descrito por Alpizar-Reyes et al. (2022), donde la eficiencia de encapsulamiento es determinada como la relación entre la cantidad de aceite superficial y encapsulada para un cierto tipo de cápsula.

3. Análisis de resultados

3.1 Caracterización de AP para la síntesis de cápsulas.

Este trabajo propone por primera vez la producción de cápsulas con aceite crudo de palma como rejuvenecedor para la autorreparación de asfaltos. Para lograr este objetivo, se caracterizaron las propiedades químicas y térmicas del AP. La Figura 2(a) muestra los grupos funcionales del AP. Se observa que los triglicéridos se forman combinando glicerol con tres moléculas de ácidos grasos. Los ácidos grasos más comunes son el ácido palmítico, el ácido oleico y el ácido alfa-linolénico, siendo estos los componentes principales del aceite crudo de palma (Ye y Meng, 2022). Por lo tanto, parece razonable que los máximos característicos de estas moléculas predominen en los espectros. Las bandas pronunciadas en 2920 cm^{-1} y 2850 cm^{-1} están relacionadas con el enlace simple entre el CH y un estiramiento asimétrico y simétrico, respectivamente. El máximo pronunciado en 1744 cm^{-1} se debe al estiramiento del doble enlace C=O del COOH (Ye y Meng, 2022). El máximo medio ubicado en 1458 cm^{-1} se atribuye a la flexión CH. Mientras tanto, el máximo medio característico a 1254 cm^{-1} es por el estiramiento -CO y la flexión -CH₂- del aceite crudo de palma (Guille y Cabo, 1997). A su vez, la intensa vibración a 1161 cm^{-1} se atribuye comúnmente al estiramiento del CO y a la flexión del CH. Las bandas con vibraciones medias en 1118 cm^{-1} y 1095 cm^{-1} se ocasionan por estiramiento del CO y la vibración media a 721 cm^{-1} se debe al balanceo de los grupos CH (Guille y Cabo, 1997; Ye y Meng, 2022). Król et al., (2016) demostraron que los rejuvenecedores de origen biológico como el aceite de soya, el aceite de girasol, el aceite de maíz, el aceite de cocina reciclado, los residuos de aceite de ricino, el aceite de colza, y los aceites orgánicos, corresponden a rejuvenecedores reales con la capacidad de restaurar las propiedades del asfalto envejecido a un estado original. La propiedad clave de estos rejuvenecedores reales es que todos ellos contienen triglicéridos. Entonces, como se demostró en los (ATR)-FTIR que el AP es básicamente un triglicérido, se puede concluir que el aceite crudo de palma es un rejuvenecedor real con potencial para su aplicación en la autorreparación del asfalto. Además, Figura 2 (b) muestra la estabilidad térmica del AP evaluada por

TGA y DGTa. Las curvas de TGA y DTGA revelaron dos etapas de degradación en el aceite. De acuerdo con las curvas obtenidas, los máximos de degradación térmica se alcanzaron a temperaturas de $214\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $388\text{ }^{\circ}\text{C}$. Los resultados del TGA indicaron que el AP tiene una buena estabilidad térmica, en comparación con la temperatura de trabajo de la mezcla asfáltica cercana a los 160°C . El análisis de las curvas de TGA-DTGA prueba que el AP es apropiado para su uso como un agente rejuvenecedor estable a las condiciones térmicas a las que se trabajan los asfaltos.

3.2 Efecto de las variables de encapsulación en las propiedades de las cápsulas.

En esta sección se discute el efecto de las variables de entrada del encapsulador (mostradas en

Figura 2(c)) sobre las propiedades de las cápsulas de alginato que contienen AP. La

Figura 2 (d) muestra algunas imágenes de microscopía de las cápsulas. Esta figura muestra que las CAP-1 y CAP-2 presentaron una superficie ovalada e irregular. Por el contrario, las CAP-3 y CAP-4 presentaron una morfología más uniforme con respecto a los otros sistemas de cápsulas producidos (CAP-1 y CAP-2), lo que demuestra que existen diferencias notorias entre ambos tipos de grupos de cápsulas fabricados. También se puede observar que la superficie de los CAP es rugosa, mostrando la presencia de microcavidades distribuidas por toda la superficie de las cápsulas. Estas cavidades se pueden atribuir al aire encapsulado en la superficie de las cápsulas. Además, la diferencia entre los grupos de CAP se asocia principalmente a la dependencia de la viscosidad con la temperatura del proceso de encapsulación. Se sabe que un aumento de la temperatura conduce a una disminución de la viscosidad. Luego, al incrementar la temperatura se favorece el flujo de la emulsión través de la boquilla del encapsulador y en consecuencia se tiene una mejor morfología en la cápsula.

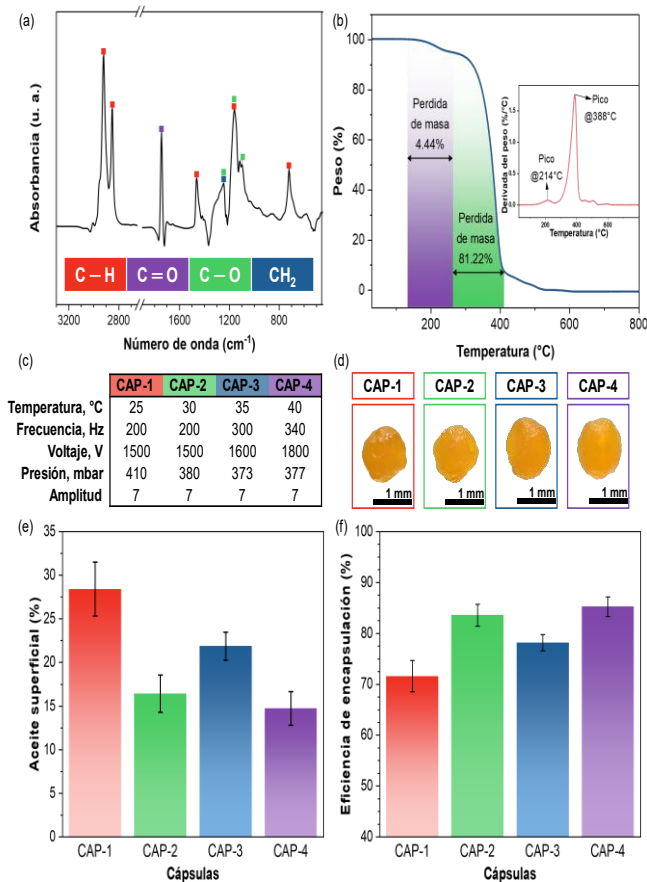


Figura 2. Resultados de la investigación de AP como rejuvenecedor encapsulado para la autorreparación de asfaltos. (a-b) Caracterización de AP; (a) espectros (ATR)-FTIR y (b) curvas TGA-DTGA. (c) Parámetros de funcionamiento del encapsulador. (d-f) Encapsulación de AP en alginato. (d) Morfologías de microscopio óptico; (e) Aceite superficial y (f) Eficiencia de encapsulación de las cápsulas de AP.

Por otra parte, la

Figura 2 (e-f) muestra la determinación cuantitativa de la eficiencia de encapsulación y el aceite en la superficie de los cuatro tipos de cápsulas. Se puede observar que a medida que el aceite superficial disminuye en las CAP, se registró un incremento en la eficiencia de encapsulación. Por lo tanto, se concluye que las variables de entrada del encapsulador influyeron notablemente en la eficiencia de encapsulación de las cápsulas. Por ejemplo, los parámetros usados en CAP-4 condujeron a un aumento notable en la eficiencia de encapsulación y una disminución en el aceite superficial. La cantidad de aceite en la superficie de las cápsulas afectó la capacidad de la cápsula para evitar la liberación del aceite interno a través de fugas. Por lo tanto, un diseño eficiente de cápsula con fines de autorreparación de asfaltos buscará producir cápsulas con pequeñas cantidades de aceite en superficie y una mayor eficiencia en el proceso de encapsulación. Este resultado sugiere que las CAP-4 pudieron

retener más aceite crudo de palma dentro de la cápsula, dada su estructura con múltiples cavidades. En resumen, los parámetros definidos para CAP-4 permitieron producir cápsulas con un mayor control en la morfología y excelentes eficiencias de encapsulación, con valores superiores al 80%.

4. Conclusiones

- La caracterización química del aceite crudo de palma mostró que sus principales grupos funcionales corresponden a los triglicéridos – ácidos grasos, que ayudan a la restauración de los cementos asfálticos envejecidos.
- El análisis termogravimétrico reveló que el aceite crudo de palma es térmicamente adecuado como rejuvenecedor encapsulado para la autorreparación de asfaltos y cuenta con la capacidad de resistir los procesos de fabricación en caliente de mezclas asfálticas.
- El control de las variables de entrada del encapsulador condujo a la producción de cápsulas CAP-3 y CAP-4 esféricas y uniformes.
- Los parámetros de CAP-4 aumentaron la eficiencia de encapsulación y redujeron significativamente la cantidad de aceite superficial. Por lo tanto, la cápsula CAP-4 puede retener más aceite dentro de su estructura de múltiples cavidades.
- Las variables definidas para CAP-4 permitieron la producción de cápsulas de alginato de calcio con una morfología mejorada y una mejor eficiencia de encapsulación. Este resultado sugiere que este tipo de cápsula puede ser usado con éxito para la investigación futura en mezclas asfálticas evaluando su eficiencia de autorreparación.

5. Agradecimientos

Los autores agradecen el financiamiento otorgado por la Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo de Chile (ANID) a través del proyecto FONDECYT Regular 1190027. Los autores también agradecen la colaboración del Investigador LabMAT Dr(c) Jose Luis Concha.

6. Referencias

- Al-Sabaei, A. M., Al-Fakih, A., Noura, S., Yaghoubi, E., Alaloul, W., Al-Mansob, R. A., Imran Khan, M., & Aliyu Yaro, N. S. (2022). Utilization of palm oil and its by-products in bio-asphalt and bio-concrete mixtures: A review. *Construction and Building Materials*, 337, 127552. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2022.127552>

- Alpizar-Reyes, E., Concha, J. L., Martín-Martínez, F. J., & Norambuena-Contreras, J. (2022). Biobased Spore Microcapsules for Asphalt Self-Healing. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 14(27), 31296–31311. <https://doi.org/10.1021/acsami.2c07301>
- Concha, J. L., Arteaga-Pérez, L. E., Alpizar-Reyes, E., Segura, C., Gonzalez-Torre, I., Kanellopoulos, A., & Norambuena-Contreras, J. (2022). Effect of rejuvenating oil type on the synthesis and properties of alginate-based polynuclear capsules for asphalt self-healing. *Road Materials and Pavement Design, Accepted M*, 1–26. <https://doi.org/10.1080/14680629.2022.2092026>
- Gonzalez-Torre, I., & Norambuena-Contreras, J. (2020). Recent advances on self-healing of bituminous materials by the action of encapsulated rejuvenators. *Construction and Building Materials*, 258, 119568. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119568>
- Guille, D., & Cabo, N. (1997). Infrared Spectroscopy in the Study of Edible Oils and Fats. *J Sci Food Agric*, 75, 1–11. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0010\(199709\)75:1](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0010(199709)75:1)
- Król, J. B., Kowalski, K. J., Niczke, Ł., & Radziszewski, P. (2016). Effect of bitumen fluxing using a bio-origin additive. *Construction and Building Materials*, 114, 194–203. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2016.03.086>
- Norambuena-Contreras, J., Arteaga-Perez, L. E., Guadarrama-Lezama, A. Y., Briones, R., Vivanco, J. F., & Gonzalez-Torre, I. (2020). Microencapsulated Bio-Based Rejuvenators for the Self-Healing of Bituminous Materials. *Materials*, 13(6), 1446. <https://doi.org/10.3390/ma13061446>
- Norambuena-Contreras, J., Concha, J., Arteaga-Pérez, L., & Gonzalez-Torre, I. (2022). Synthesis and Characterisation of Alginate-Based Capsules Containing Waste Cooking Oil for Asphalt Self-Healing. *Applied Sciences*, 12(5), 2739. <https://doi.org/10.3390/app12052739>
- Prosperi, E., & Bocci, E. (2021). A Review on Bitumen Aging and Rejuvenation Chemistry: Processes, Materials and Analyses. *Sustainability*, 13(12), 6523. <https://doi.org/10.3390/su13126523>
- Ye, Q., & Meng, X. (2022). Highly efficient authentication of edible oils by FTIR spectroscopy coupled with chemometrics. *Food Chemistry*, 385, 132661. <https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2022.132661>