

Cemento Asfáltico Modificado Con Un Rejuvenecedor Pirolítico Mezcla de Neumáticos Fueras de Uso.

Asphalt Cement Modified with a Pyrolytic Rejuvenator from End-of-Life Tire Mix.

INFORMACIÓN DEL ARTÍCULO

Historial del artículo:

Recibido
14-11-2023
Aceptado
03-08-2024
Publicado
23-12-2024

Palabras Clave:
Neumáticos Fueras de Uso (NFU)
Pirólisis
Cemento Asfáltico

Article history:

Received
14-11-2023
Accepted
03-08-2024
Available
23-12-2024

Keywords:
End Of Life Tires (ELT)
Pyrolysis
Rejuvenator
Asphalt Cement

Resumen

Este trabajo muestra el potencial de líquidos pirolíticos (LPN-Mix) obtenidos de la mezcla de neumáticos fuera de uso de vehículos livianos (NFU-L) y mineros (NFU-M) como un potencial rejuvenecedor de cementos asfálticos envejecidos. El estudio evaluó el efecto de diferentes dosis de LPN-Mix (3%, 6%, % y 12%, por vol. total de cemento asfáltico) sobre las propiedades físicas de un cemento asfáltico a diferentes niveles de envejecimiento. Para comprender el comportamiento del LPN-Mix como rejuvenecedor, se realizó una caracterización completa de sus propiedades físicas (viscosidad, densidad, pH y contenido de agua) y químicas (composición química y presencia de grupos funcionales con actividad rejuvenecedora). En cada cemento asfáltico con LPN-Mix, se evaluó la viscosidad, el punto de ablandamiento y el grado de penetración. Los principales resultados de este estudio revelaron que las propiedades físicas del LPN-Mix son comparables a las de un rejuvenecedor comercial y que el LPN-Mix está compuesto principalmente por hidrocarburos y sustancias aromáticas (92.2%). Además, se determinó que las mezclas con dosis de LPN-Mix del 3% al 6% exhibieron mejoras en la viscosidad, el punto de ablandamiento y la penetración de los cementos asfálticos envejecidos (CA-PAV), restableciendo sus propiedades físicas al estado original del cemento asfáltico. Finalmente, se evidenció que el LPN-Mix podría utilizarse como un producto rejuvenecedor de asfaltos envejecidos, debido a sus propiedades físicas y químicas, con un potencial prometedor en la industria del asfalto para mejorar la durabilidad y sustentabilidad de los pavimentos asfálticos, promoviendo así a la económica circular.

Abstract

This work demonstrates the potential of pyrolytic liquids (LPN-Mix) obtained from the mix of end-of-life tires from light vehicles (NFU-L) and mining vehicles (NFU-M) as a potential rejuvenator for aged asphalt cements. The study evaluated the effect of different doses of LPN-Mix (3%, 6%, and 12% by total volume of asphalt cement) on the physical properties of asphalt cement at different aging levels. To understand the behavior of LPN-Mix as a rejuvenator, a comprehensive characterization of its physical properties (viscosity, density, pH, and water content) and chemical properties (chemical composition and presence of functional groups with rejuvenating activity) was performed. For each asphalt cement with LPN-Mix, viscosity, softening point, and penetration grade were evaluated. The main results of this study revealed that the physical properties of LPN-Mix are comparable to those of a commercial rejuvenator and that LPN-Mix is mainly composed of hydrocarbons and aromatic substances (92.2%). Additionally, it was determined that mixes with LPN-Mix doses ranging from 3% to 6% showed improvements in viscosity, softening point, and penetration of aged asphalt cements (CA-PAV), restoring their physical properties to the original state of the asphalt cement. Finally, it was evidenced that LPN-Mix could be used as a rejuvenating product for aged asphalts due to its physical and chemical properties, with promising potential in the asphalt industry to enhance the durability and sustainability of asphalt pavements, thus promoting a circular economy.

* Corresponding author at: Manuel Chávez Delgado, Universidad del Bío-Bío, Laboratorio de Materiales (LabMAT), Av. Collao 1202, Concepción, Chile. E-mail address: mchavez@ubiobio.cl

RIOC

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

Vol. 12, no. 03, pp. 1–6, Diciembre 2024

1. Introducción.

Las mezclas asfálticas están compuestas de áridos minerales y cemento asfáltico, este último un material termoplástico con propiedades adhesivas y compuesto de hidrocarburos derivados de la destilación del petróleo (Hunter et al., 2013). Estas mezclas corresponden al principal material compuesto usado para la construcción de los pavimentos asfálticos. Sin embargo, durante su vida de servicio los pavimentos asfálticos están expuestos por años a cargas de tráfico, estrés térmico y factores medioambientales (oxidación por aire, radiación UV, humedad) que causan la separación en la interfaz entre los áridos y el cemento asfáltico, generándose el agrietamiento de las mezclas asfálticas (Gordon et al., 2002). Entre los principales factores que promueven el agrietamiento de las mezclas asfálticas en pavimentos está el envejecimiento del cemento asfáltico (Airey, 2003). Para comprender este fenómeno, se debe considerar que el cemento asfáltico es un sistema coloidal compuesto por nano-agregados de asfaltenos dispersos en una fase continua de maltenos. Durante el envejecimiento, la fracción malténica se ve afectada por diferentes fenómenos de carácter físico y químico, tales como la volatilización de fracciones ligeras, el endurecimiento de resinas, la oxidación y la exudación de aceites. Estos cambios provocan un aumento en la fracción de mayor peso molecular (asfaltenos) y una descompensación en la proporción asfaltenos/maltenos, lo que resulta en un aumento de la rigidez y el agrietamiento del cemento asfáltico. Si bien la oxidación del cemento asfáltico es un proceso irreversible, su estado viscoelástico puede ser recuperado mediante la aplicación de agentes rejuvenecedores (Morian et al., 2012). Los agentes rejuvenecedores son aceites lubricantes y extendedores que restauran la composición química del cemento asfáltico envejecido. Sus funciones principales son: reducir la rigidez de la superficie oxidada (fenómeno de suavizamiento), restaurar la consistencia del cemento asfáltico, incrementar la durabilidad y recomponer las propiedades fisicoquímicas y reológicas del cemento asfáltico. Los rejuvenecedores comerciales son derivados del petróleo, cuyo ciclo de vida tiene un alto impacto ambiental. Por esta razón, existe un gran interés científico y tecnológico en encontrar rejuvenecedores alternativos basados en residuos, promoviendo así la sustentabilidad en los pavimentos. En este contexto, los neumáticos fuera de uso (NFU) de vehículos livianos (NFU-L) y mineros (NFU-M) son residuos de complejo tratamiento por su resistencia a la degradación y altos volúmenes de generación. Recientemente, se ha investigado el uso de la pirólisis para transformar los NFUs en productos rejuvenecedores con aplicación en cementos asfálticos envejecidos. La pirólisis es un proceso de descomposición termoquímica (en ausencia de oxígeno) de los polímeros constituyentes de los neumáticos, dando como productos tres fracciones (Ramirez-Canon et al., 2018): Líquida (35-65% p/p.),

Sólida (12-45% p/p.), y Gaseosa (10-35% p/p.). Específicamente, la fracción líquida de la pirólisis contiene benceno, tolueno, xileno terpenos (cimeno y limoneno), hidrocarburos aromáticos y alifáticos, por lo que su aplicación principal ha estado mayormente dirigida al área de los combustibles. En este sentido, investigaciones realizadas por Menares et al. (2020) utilizaron la pirólisis-catalítica-rápida de neumáticos de desecho para el estudio de su fracción líquida, obteniendo en el líquido pirolítico identidades aromáticas con actividad antioxidante. Esta última característica convierte al líquido pirolítico de neumáticos (LPN) en un potencial rejuvenecedor para asfaltos. En este contexto, Norambuena-Contreras et al. (2021) probaron por primera vez la efectividad de un líquido pirolítico de NFU como un posible agente rejuvenecedor encapsulado en compartimentos porosos de Ca-alginato, demostrando que el aceite pirolítico puede difundirse en el cemento asfáltico envejecido reduciendo su viscosidad para promover la autorreparación de sus microgrietas en un 100%. Sin embargo, los autores no evaluaron el efecto del LPN sobre las propiedades físicas de los cementos asfálticos modificados. En este contexto, esta investigación tiene por objetivo evaluar el efecto rejuvenecedor de líquidos pirolíticos obtenidos a partir de mezclas de neumáticos fuera de uso (LPN-Mix) de vehículos livianos (NFU-L) y mineros (NFU-M) en las propiedades físicas de un cemento asfáltico modificado a diferentes niveles de envejecimiento.

2. Metodología.

2.1. Materiales

Los NFU-L y NFU-M se obtuvieron en forma de gránulos libres de acero y material textil (es decir en su fracción polimérica). Estos materiales se secaron en un horno a 110 °C durante 12 horas y se almacenaron en bolsas selladas hasta su uso. Para los ensayos de rejuvenecimiento se utilizó como precursor un cemento asfáltico virgen CA-24 con grado de penetración de 50/70, punto de ablandamiento de 52,2 °C y densidad de 1,034 g/cm³. Este cemento asfáltico se sometió a un proceso de envejecimiento a corto plazo mediante la prueba estandarizada de horno de película delgada rotatoria (RTFO) simulando el envejecimiento por fabricación de la mezcla, según la norma ASTM D 2872-19. Posteriormente, la muestra RTFO se sometió a un proceso de envejecimiento a largo plazo en un recipiente de aire a presión (PAV) según la norma ASTM D 6521-19, generando muestras de cemento asfáltico envejecidos a largo

2.2. Producción del rejuvenecedor pirolítico a escala BENCH.

Una mezcla de neumáticos (50% NFU-L y 50% NFU-M) se pirolizó en una unidad de laboratorio a escala BENCH equipada con un reactor de acero inoxidable (D: 128 mm y H: 235 mm) provisto de un agitador mecánico acoplado a un motor eléctrico de frecuencia 500 rpm. El perfil de temperaturas en el reactor fue

controlado mediante seis termopares de tipo K distribuidos a lo largo de su geometría. En un experimento típico, se colocaron 400 g de NFU-L/M en el reactor. A continuación, la temperatura se fijó a 465°C, utilizando una rampa de calentamiento de 12 °C/min y 2 h de tiempo de residencia. Estas condiciones se seleccionaron inspiradas en protocolos industriales reales y en experiencias previas de Menares et al. (2021). Los líquidos pirolíticos de mezclas de neumáticos (LPN) obtenidos en estos experimentos se recogieron en dos condensadores refrigerados por agua (15 °C) que operaban en serie, mientras que los gases no condensables se quemaron por antorcha a la salida de la planta. Por último, los LPN-Mix se almacenaron a 4 °C hasta ser usados en las pruebas de caracterización fisicoquímica, y en el estudio del efecto del líquido en las propiedades físicas del cemento asfáltico envejecido.

2.3. Caracterización fisicoquímica del LPN-Mix.

Los grupos funcionales presentes en los líquidos pirolíticos LPN-Mix fueron determinados mediante espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR-ATR) usando un espectrómetro Nicolet is20 (Thermofisher, EE.UU.) equipado con un accesorio ATR (Specac Quest ATR, Reino Unido). Los compuestos químicos, específicamente Benceno, Tolueno, Xileno (BTX) y terpenos (limoneno y cimeno) se cuantificaron en base a sus estándares analíticos en un cromatógrafo de gases (GC-2010 Plus, Shimadzu)

equipado con un detector de espectrometría de masas de un sólo cuadrupolo (QP 2010 Ultra, Shimadzu). La abundancia de otros grupos (alcanos y alquenos) se estimó por el parámetro de selectividad según Menares et al. (2020). Además de las caracterizaciones mencionadas, el pH (Tecnal TEC -7) y la densidad, se determinaron mediante el método IP 131/57. La viscosidad del LPN-Mix se midió según la norma ASTM D445 y el contenido de agua se determinó por titulación Karl-Fisher (Mettler Toledo, modelo V20) según la norma ASTM E203-01.

2.4. Propiedades físicas del cemento asfáltico envejecido modificado con LPN-Mix.

El efecto del LPN-Mix en la restauración de las propiedades físicas del cemento asfáltico envejecido se estudió siguiendo el procedimiento descrito por Concha et al. (2023) y mostrado en Figura 1. De este modo, el LPN-Mix se mezcló con cemento asfáltico envejecido PAV en proporciones de 3%, 6%, 9%, y 12% v/v. Luego, los ligantes fueron caracterizados mediante ensayos de: i) viscosidad dinámica según ASTM D 4402-06, a temperaturas de 60 y 135 °C utilizando un viscosímetro rotacional RVDV-II+Pro (Brookfield, Middleboro, MA, EE.UU.); ii) punto de ablandamiento según ASTM D 36-06 utilizando un aparato de anillo y bola Humboldt H-1569 (Elgin, IL, EE.UU.); y iii) penetración según ASTM D 5-97 utilizando un penetrómetro Humboldt H-1240 (Elgin, IL, EE.UU.).

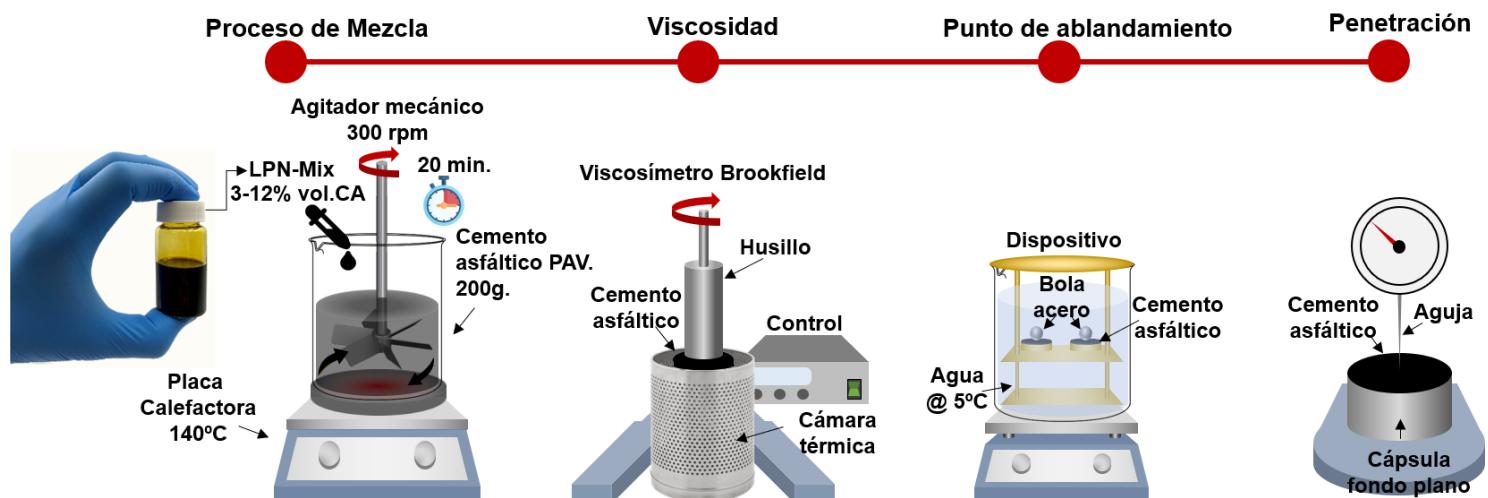


Figura 1. Proceso de mezclado y ensayos de caracterización física de un cemento asfáltico envejecido y modificado con diferentes dosis de LPN-Mix.

3. Análisis de resultados.

3.1. Rendimiento de pirólisis y propiedades físicas del LPN-Mix.

En la Tabla 2 se muestra que el rendimiento del LPN-Mix es del 47%, lo cual está en línea con los resultados reportados previamente por varios autores (Martínez et al., 2013; Williams et al., 2013) que han evaluado la pirólisis de neumáticos fuera de uso. Sin embargo, este resultado no es el único indicador de los

LPN-Mix como un potencial líquido rejuvenecedor. También existen otras propiedades relevantes, como el pH, la densidad, la viscosidad y la composición, que pueden variar en función de la temperatura de pirólisis y del origen de los NFUs, ver resultados en Tabla 2. Los valores de viscosidad, densidad y pH del LPN-Mix son consistentes con los informados en investigaciones anteriores sobre LPN (Martínez et al., 2013; Antoniou & Zabaniotou, 2013). A su vez, estos valores están en el mismo orden de las

propiedades físicas de algunos rejuvenecedores líquidos comerciales utilizados en cementos asfálticos. El LPN-Mix presenta un contenido de agua relativamente alto en comparación con los valores reportados en la literatura (López et al., 2017) y que generalmente se sitúan alrededor del 1%. Se presume que este contenido de agua ha llevado a una disminución de la viscosidad del LPN-Mix, lo que resulta

beneficioso para su aplicación y difusión efectiva en el interior de cementos asfálticos en caliente. Sin embargo, estos porcentajes de contenido de agua pueden favorecer el proceso de oxidación, por lo que la aplicación de este producto como rejuvenecedor líquido puede afectar el comportamiento de los cementos asfálticos. En conclusión, la investigación futura debe estar centrada en minimizar el contenido de agua en el LPN-Mix.

Tabla 1. Rendimiento y caracterización física del LPN-Mix

Temperatura Pirólisis (°C)	Rendimiento LPN	Viscosidad @ 20°C (cP)	Densidad (g/cm³)	pH @ 25°C	Karl-Fisher (%)
465	47	2.39	0.878 ± 0.05	8.68 – 8.77	3.104 ± 0.01

3.2. Propiedades químicas de LPN-Mix.

La Figura 2(a) muestra el espectro y la identificación de señales para el LPN-Mix. Las bandas observadas entre 3500 – 3200 cm⁻¹ corresponden a la vibración de O–H y pueden asignarse al agua o a los grupos hidroxilo en ácidos. Además, las señales entre 3000 y 2700 cm⁻¹ se atribuyen a las vibraciones de estiramiento C–H en los alcanos, lo que también sugiere las vibraciones de flexión C–H que se encuentran entre 1500 y 1300 cm⁻¹. La presencia de

compuestos aromáticos fue corroborada por las absorciones en las regiones entre 1600 – 1500 cm⁻¹, 1150 – 1000 cm⁻¹ y 810 – 675 cm⁻¹ correspondientes a estiramientos C–C, flexión en el plano C–H y las vibraciones de flexión fuera del plano C–H, respectivamente. Los peaks entre 1750 y 1700 cm⁻¹ se atribuyen al estiramiento C=O en las cetonas. Finalmente, las vibraciones de estiramiento C=C a 1675 y 1600 cm⁻¹, y entre 1020 y 845 cm⁻¹ son indicativas del grupo funcional alqueno.

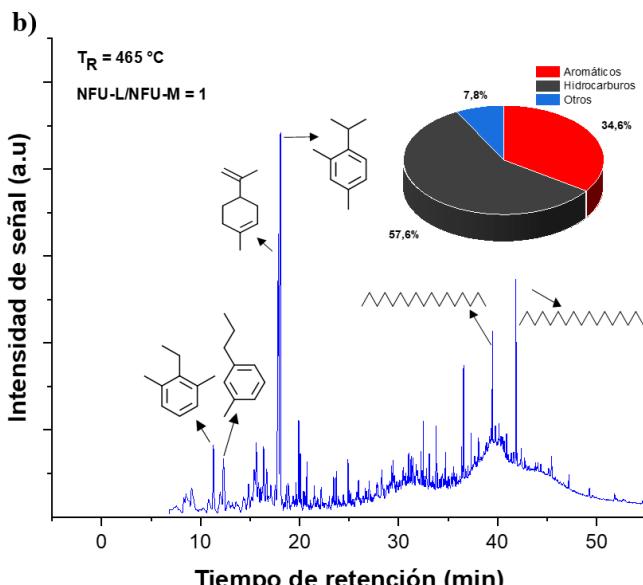
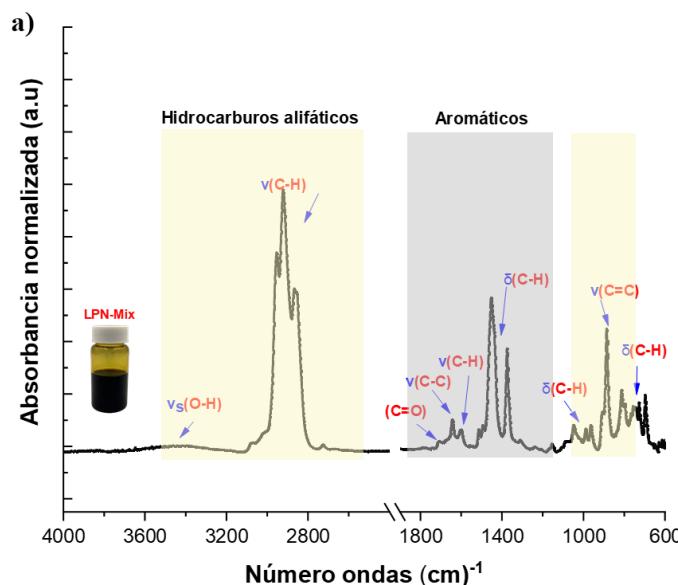


Figura 2. (a) Grupos funcionales en el LPN-Mix y determinados por FTIR-ATR; (b) Cromatograma por GC/MS del LPN-Mix que incluye la distribución de productos por grupos funcionales.

Además, en la Figura 2(b) se puede observar que los compuestos aromáticos e hidrocarburos y que son altamente miscibles con el ligante (Norambuena-Contreras et al., 2021) representaron el 92.2% del área de los peaks. Los aromáticos se forman a partir de la descomposición térmica de cauchos como el estireno-butadieno y el poliisopreno. Este proceso está controlado por la escisión y ciclización de intermediarios como el terpenoide d,l-limoneno y la deshidrogenación del estireno. Las reacciones de aromatización ocurren en un rango de temperaturas amplio (400–

700°C), lo que implica que la composición del líquido pirolítico depende de los tipos de neumáticos y las condiciones de pirólisis utilizadas (Menares et al., 2020). Por otro lado, los hidrocarburos (57.6%), principalmente alcanos y alquenos, se forman a través de la apertura en anillo y la reciclación del d,l-limoneno y el isopreno, respectivamente. Asimismo, se confirma que el líquido pirolítico presenta un contenido considerable de d,l-limoneno (32%), compuesto conocido por su capacidad antioxidante (Bacanlı et al., 2015).

3.3. Efecto del LPN-Mix en las propiedades físicas del cemento asfáltico envejecido.

La Figura 3 muestra la variación de las propiedades físicas del cemento asfáltico envejecido PAV al mezclarse con diferentes dosis de LPN-Mix. En primer lugar, las Figuras 3(a) y (b) muestran el efecto de los procesos de envejecimiento sucesivos RTFO y PAV en las propiedades físicas del cemento asfáltico virgen, observando: i) una reducción del nivel de penetración desde 53 hasta 18 dmm; ii) un aumento en el punto de ablandamiento desde 52,2 hasta 65,8 °C; y iii) un aumento en la viscosidad desde 265 hasta 6260 P*s @60°C y desde 0,4 hasta 1,125 P*s @135°C. El objetivo del proceso de rejuvenecimiento de un cemento asfáltico oxidado es restablecer sus propiedades físicas a un estado original sin envejecer. Con base en este objetivo, es de vital importancia tener un control sobre la dosificación adecuada del LPN-Mix, ya que dosis elevadas pueden afectar negativamente al pavimento asfáltico, causando deformaciones permanentes

como el ahuellamiento. Con este objetivo, la Figura 3(a) muestra un aumento progresivo en el nivel de penetración con la incorporación de LPN al ligante PAV. Particularmente, dosis de LPN-Mix entre 3% y 6% resultaron en un aumento del nivel de penetración del 47% respecto de un PAV, resultando en valores de penetración entre un estado virgen y envejecido RTFO. Estos resultados son consistentes con estudios anteriores publicados por Fini et al. (2016) y Kumar et al. (2022). Similarmente, la Figura 3(a) muestra que dosis de LPN-Mix entre 3% y 6% resultan en un valor de punto de ablandamiento similar al de un ligante sin envejecer. Lo anterior también es confirmado con los valores de viscosidad mostrados en la Figura 3(b). Con base en estos resultados, se concluye que la incorporación de LPN-Mix en un ligante PAV en contenidos de hasta un 6% es capaz de restaurar las propiedades físicas a su estado original, evitando un efecto de sobrerejuvenecimiento.

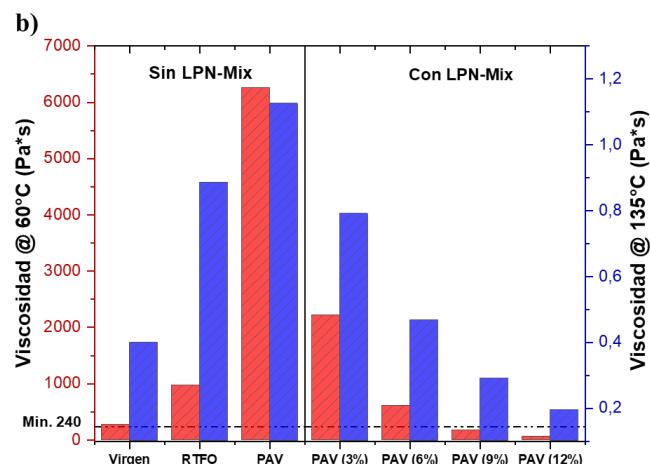
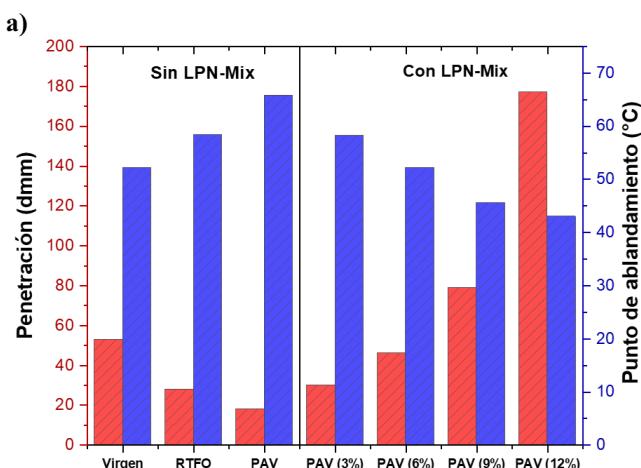


Figura 3. Resultados de (a) penetración y punto de ablandamiento, y (b) Viscosidad a 60 y 135°C, para cemento asfáltico no envejecido, RTFO, y PAV con diferentes porcentajes de adición del LPN-Mix.

4. Conclusiones.

- Las propiedades físicas del líquido pirolítico proveniente de mezclas de neumáticos fuera de uso (LPN-Mix) son similares a las de los rejuvenecedores comerciales. Estos valores permiten inferir el potencial del LPN-Mix como rejuvenecedor. Sin embargo, el contenido de agua podría afectar el comportamiento del cemento asfáltico.
- LPN-Mix contiene un alto porcentaje de compuestos aromáticos e hidrocarburos (92.2%), así como la presencia de compuestos químicos con capacidad antioxidante (limoneno). Por lo tanto, el LPN-Mix tiene potencial para ser utilizado como un agente rejuvenecedor de cementos asfálticos envejecidos.

- La caracterización física del cemento asfáltico envejecido PAV reveló que la adición del 6% de LPN-Mix permite restaurar las propiedades físicas originales de los cementos asfálticos.

5. Agradecimientos.

Los autores agradecen el apoyo económico otorgado por la Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo de Chile (ANID) a través del proyecto FONDEF IDeA 21I10127. Además, el primer autor agradece a la Universidad del Bío-Bío por su beca interna de doctorado.

6. Referencias.

- Airey, G. D. (2003). State of the art report on ageing test methods for bituminous pavement materials. *International Journal of Pavement Engineering*, 4(3), 165-176.
- Drews, "Standard Test Method for Softening Point of Bitumen (Ring-and-Ball Apparatus)," *Man. Hydrocarb. Anal.* 6th Ed., vol. 95, no. Reapproved, pp. 50-50-4, 2008, doi: 10.1520/mnl10830m.
- Drews, "Standard Test Method for Penetration of Bituminous Materials," *Man. Hydrocarb. Anal.* 6th Ed., pp. 47-47-3, 2008, doi: 10.1520/mnl10829m.
- Drews, "Standard Test Method for," *Man. Hydrocarb. Anal.* 6th Ed., vol. 05, pp. 545-545-3, 2008, doi: 10.1520/mnl10913m.
- Antoniou, N., & Zabaniotou, A. (2013). Features of an efficient and environmentally attractive used tyres pyrolysis with energy and material recovery. *Renewable and sustainable energy reviews*, 20, 539-558.
- ASTM D6521, "Standard Practice for Accelerated Aging of Asphalt Binder Using a Pressurized Aging Vessel (PAV)" no. January, pp. 1-6, 2022.
- ASTM International. Standard test method for kinematic viscosity of transparent and opaque liquids (and calculation of dynamic viscosity) (ASTM D445-19a).
- Bacanlı, M., Başaran, A. A., & Başaran, N. (2015). The antioxidant and antigenotoxic properties of citrus phenolics limonene and naringin. *Food and chemical Toxicology*, 81, 160-170.
- Concha, J. L., Delgadillo, R., Arteaga-Pérez, L. E., Segura, C., & Norambuena-Contreras, J. (2023). Optimised Sunflower Oil Content for Encapsulation by Vibrating Technology as a Rejuvenating Solution for Asphalt Self-Healing. *Polymers*, 15(6), 1578.
- K. Viscometers, R. Density, V. O. Standards, C. Viscometer, B. Oils, and O. Instructions, "Standard Test Method for Kinematic Viscosity of Transparent and Opaque Liquids (and the Calculation of Dynamic Viscosity) 1," pp. 1-10, 2004.
- A. D2872, "Standard test method for effect of heat and air on a moving film of asphalt (rolling thin-film oven test)," Am. Soc. Test. Mater. West Conshohocken, PA, pp. 1-11, 2012.
- Fini, E. H., Hosseinezhad, S., Oldham, D. J., & Sharma, B. K. (2016). Investigating the effectiveness of liquid rubber as a modifier for asphalt binder. *Road Materials and Pavement Design*, 17(4), 825-840.
- Gordon D. Airey & Young-Kyu Choi (2002) State of the Art Report on Moisture Sensitivity Test Methods for Bituminous Pavement Materials, *Road Materials and Pavement Design*, 3:4, 355-372, DOI: 10.1080/14680629.2002.9689930.
- Hunter R, Self A, Read J. (2014). The shell bitumen handbook, 6th edition: Thomas Telford Ltd.
- Kumar, A., Choudhary, R., & Kumar, A. (2022). Composite Asphalt Modification with Waste EPDM Rubber and Tire Pyrolytic Oil: Rheological, Chemical, and Morphological Evaluation. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 34(12), 04022325.
- Lopez, G., Alvarez, J., Amutio, M., Mkhize, N. M., Danon, B., Van der Gryp, P., & Olazar, M. (2017). Waste truck-tyre processing by flash pyrolysis in a conical spouted bed reactor. *Energy conversion and management*, 142, 523-532.
- Martínez, J. D., Puy, N., Murillo, R., García, T., Navarro, M. V., & Mastral, A. M. (2013). Waste tyre pyrolysis—A review. *Renewable and sustainable energy reviews*, 23, 179-213.
- Menares, T., Herrera, J., Romero, R., Osorio, P., & Arteaga-Pérez, L. E. (2020). Waste tires pyrolysis kinetics and reaction mechanisms explained by TGA and Py-GC/MS under kinetically-controlled regime. *Waste management*, 102, 21-29.
- Morian, N., Hajj, E. Y., Glover, C. J., & Sebaaly, P. E. (2011). Oxidative Aging of Asphalt Binders in Hot-Mix Asphalt Mixtures. *Transportation Research Record*, 2207(1), 107-116. <https://doi.org/10.3141/2207-14>.
- Norambuena-Contreras, J., Arteaga-Pérez, L. E., Concha, J. L., & Gonzalez-Torre, I. (2021). Pyrolytic oil from waste tyres as a promising encapsulated rejuvenator for the extrinsic self-healing of bituminous materials. *Road Materials and Pavement Design*, 22(sup1), S117-S133.
- Ramirez-Canon, A., Muñoz-Camelo, Y. F., & Singh, P. (2018). Decomposition of used Tyre Rubber by pyrolysis: enhancement of the physical properties of the liquid fraction using a hydrogen stream. *Environments*, 5(6), 72.
- Williams, P. T. (2013). Pyrolysis of waste tyres: a review. *Waste management*, 33(8), 1714-1728.