

Evaluación de la autorreparación de mezclas asfálticas activadas por microondas elaboradas con GNP y NFU

Brenda I. Martínez¹, Adrián N. Segura¹, Franco E. Vázquez¹

¹Centro de Investigación, Desarrollo y Transferencia de Materiales y Calidad (CINTEMAC), Facultad Regional Córdoba, Universidad Tecnológica Nacional, Maestro M. López esq. Cruz Roja Argentina - Ciudad Universitaria (5016) Córdoba

brendaivannamartinez@gmail.com

Resumen

El desarrollo de mezclas asfálticas con capacidad de autorreparación representa una alternativa tecnológica innovadora para mejorar la durabilidad de los pavimentos y reducir la frecuencia de intervenciones de mantenimiento. En este trabajo se evaluó el comportamiento de mezclas asfálticas con nanoplaquetas de grafeno (GNP 99 %) y con la incorporación conjunta de neumático fuera de uso (NFU), analizando su respuesta frente a un proceso de autorreparación inducida por microondas. Para ello, se llevó a cabo la caracterización de los ligantes modificados y de las mezclas asfálticas elaboradas con dichos materiales.

La capacidad de autorreparación se determinó a partir del ensayo de resistencia a tracción indirecta (RTI), comparando los valores obtenidos antes y después de la aplicación del tratamiento térmico. Los resultados evidenciaron que la incorporación de GNP y NFU produce modificaciones en las propiedades reológicas del ligante. Asimismo, las mezclas asfálticas presentaron mejoras en términos de densidad y estabilidad.

La autorreparación presentó tasas entre el 79 % y el 83 % para las mezclas asfálticas con ligantes modificados, superando a las elaboradas con asfalto convencional, que registró un 66 %. En conjunto, los resultados demuestran que la incorporación de GNP, tanto de forma individual como en combinación con NFU, mejora significativamente el desempeño mecánico y la capacidad de autorreparación de las mezclas asfálticas.

Abstract

The development of self-healing asphalt mixtures represents an innovative technological approach to improving pavement durability and reducing the frequency of maintenance interventions. This study evaluated the behaviour of asphalt mixtures modified with graphene nanoplatelets (GNP, 99%) and mixtures incorporating both GNP and end-of-life tyre rubber (ELT), analysing their response to a microwave-induced self-healing process. To this end, the modified binders and the asphalt mixtures produced using these materials were characterised.

The self-healing capacity was assessed by means of the indirect tensile strength (ITS) test, comparing the values obtained before and after the application of the microwave treatment. The results showed that the incorporation of GNP and ELT modified the rheological properties of the binder. Furthermore, the asphalt mixtures exhibited improvements in terms of density and stability.

Self-healing rates ranged from 79% to 83% for the asphalt mixtures incorporating modified binders, outperforming those produced with conventional asphalt, which achieved a rate of 66%. Overall, the results demonstrate that the incorporation of GNP, both individually and in combination with ELT, significantly enhances the mechanical performance and self-healing capacity of asphalt mixtures.

Palabras clave: Nanoplaquetas de grafeno (GNP), Neumáticos fuera de uso (NFU), Mezclas asfálticas, Autorreparación, Microondas

Keywords: Graphene nanoplatelets (GNP), End-of-life tyres (ELT), Asphalt mixtures, Self-healing, Microwaves

Introducción

La exposición prolongada de los pavimentos asfálticos a solicitudes de tránsito y a condiciones climáticas variables, junto con la ausencia de medidas adecuadas de mantenimiento preventivo, produce un deterioro progresivo del material, manifestado principalmente en la aparición de fisuras y microgrietas

El avance de la tecnología aplicada a los materiales viales ha permitido el desarrollo de nuevas estrategias orientadas a mejorar el desempeño y la durabilidad de los pavimentos asfálticos, entre las cuales se destaca la autorreparación inducida por microondas. Esta tecnología se presenta como una alternativa innovadora frente a métodos convencionales de mantenimiento, tales como el sellado de fisuras y el bacheo, al posibilitar la reparación de daños mediante un proceso térmico controlado conocido como calentamiento dieléctrico. Este fenómeno genera un aumento localizado de la temperatura del ligante asfáltico, reduciendo su viscosidad y favoreciendo su redistribución hacia el interior de las fisuras, permitiendo su sellado parcial y retrasando la propagación del daño. Esta característica resulta especialmente útil para el tratamiento de fisuras internas no visibles en la superficie. La eficiencia del calentamiento por microondas puede incrementarse mediante la incorporación de aditivos con propiedades electromagnéticas, como las nanoplaquetas de grafeno (GNP), capaces de absorber radiación electromagnética y favorecer su conversión en energía térmica, posicionándose como materiales de interés para aplicaciones de autorreparación. La incorporación de grafeno en mezclas asfálticas no solo mejora la eficiencia del proceso de autorreparación, sino que también contribuye al mejoramiento del comportamiento reológico del ligante, incrementando la resistencia y estabilidad de la mezcla asfáltica (Gulisano et al., 2020).

En este contexto, la incorporación de neumático fuera de uso (NFU), en forma de polvo, actúa como modificador del ligante, mejorando propiedades mecánicas como la elasticidad, la estabilidad frente a cargas y la reducción de la fluencia. Esta modificación resulta relevante dentro del proceso de autorreparación, ya que influye en la capacidad del material para recuperar parcialmente su integridad estructural luego del calentamiento inducido por microondas. Sin embargo, aún existe limitada información sobre el comportamiento conjunto de mezclas modificadas con GNP y NFU frente a procesos de autorreparación inducidos por microondas.

La eficiencia del proceso de autorreparación depende de parámetros como el tiempo de exposición, la potencia aplicada, la frecuencia de las microondas y el número de ciclos térmicos utilizados. La adecuada calibración de estos factores permite maximizar la eficiencia del calentamiento inducido y favorecer la recuperación de las propiedades mecánicas de la mezcla asfáltica (Norambuena-Contreras & Garcia, 2016) (Gulisano et al., 2020). Asimismo, las propiedades reológicas del ligante y las características volumétricas de la mezcla influyen directamente sobre la capacidad de recuperación mecánica del material.

El presente trabajo compara dos formulaciones de mezclas asfálticas: una mezcla elaborada con ligante modificado con nanoplaquetas de grafeno de alta pureza (GNP 99 %) y otra formulación con ligante modificado con GNP 99 % combinado con polvo de neumático fuera de uso. El objetivo principal consiste en evaluar el desempeño de ambas formulaciones frente a procesos de autorreparación inducidos por microondas, mediante el análisis de la Resistencia a Tracción Indirecta (RTI) antes y después de la aplicación del tratamiento térmico, con el fin de analizar la eficiencia del proceso y la respuesta mecánica del material.

Desarrollo

1-Materiales:

1.1 Nanoplaquetas de grafeno (GNP) con pureza del 99%: El grafeno es un nanomaterial bidimensional constituido por átomos de carbono dispuestos en una estructura hexagonal tipo panal, en la que cada átomo está unido a tres vecinos mediante enlaces covalentes sp^2 . Uno de los procesos más conocidos es la división micromecánica, que consiste en exfoliar mecánicamente el grafito mediante el uso de cintas adhesiva (Lopez, 2012). Por otro lado, otra metodología empleada es la síntesis química, ampliamente utilizada para producir grafeno a gran escala. Este proceso implica la oxidación del grafito, generalmente mediante el método de Hummers, seguida de una etapa de reducción empleando agentes como ácido ascórbico o hidracina. (Gomez y Sandoval, 2015)

Los materiales utilizados en esta investigación consisten en nanoplaquetas de grafeno con una pureza del 99 %. La morfología y el estado del material se presentan en la Figura 1, mientras que sus principales características se detallan en la Tabla 1. Este tipo de grafeno, conocido como grafeno verde, se produce a partir de biomasa mediante un proceso con balance de carbono negativo, obteniendo como resultado un material de alta calidad estructural, con una reducida cantidad de grupos oxigenados.

Tabla 1: Características de las Nanoplaquetas de grafeno. (Graphene GreenTech, 2020)

Carbono	98-99%
Oxígeno	1-2%
Mezcla de nitrógeno con otros elementos	1%
Densidad	0,40-0,60 g/ml
Comportamiento	Hidrofóbico



Figura 1: Polvo de nanoplaquetas de grafeno. (Fuente: propia)

1.2 Neumático fuera de uso (NFU): El crecimiento sostenido de la industria automotriz ha generado un incremento significativo en la cantidad de neumáticos fuera de uso (NFU), constituyendo un problema ambiental a escala global. Frente a esta situación, se han impulsado estrategias de economía circular orientadas a la reincorporación de estos residuos en nuevos ciclos productivos, destacándose el reciclaje de sus componentes como una alternativa viable para mitigar su impacto ambiental.

La presente investigación empleó NFU en forma de partículas con un tamaño nominal de 0,718 mm, las cuales se obtuvieron mediante un proceso de trituración mecánica, aspecto que se puede visualizar en la Figura 2. Previamente, los neumáticos son sometidos a etapas de limpieza y separación de componentes no deseados, como los elementos metálicos. Posteriormente, el material atraviesa sucesivas etapas de trituración hasta alcanzar la granulometría requerida



Figura 2: Neumático fuera de uso triturado. (Ecovalor, 2023)

1.3 El asfalto es un material de naturaleza semisólida a temperatura ambiente, que se obtiene principalmente como residuo pesado del proceso de refinación del petróleo crudo. Durante la destilación, las fracciones más ligeras y volátiles son eliminadas, lo que da lugar a una fracción residual compuesta por moléculas de elevada complejidad. Esta fracción, de color negro característico, constituye el asfalto y concentra sus propiedades más relevantes. La interacción de estos componentes define sus propiedades reológicas y mecánicas, que resultan fundamentales para su utilización en pavimentación, impermeabilización y otras aplicaciones de ingeniería. (Rony, 2017) En el ámbito vial, el asfalto se clasifica según distintos parámetros normativos que permiten definir su desempeño frente a las solicitudes de servicio. En la presente investigación se empleó un asfalto CA-30, clasificado de acuerdo con el ensayo de viscosidad establecido por la norma IRAM 6837 (2011). Este material se considerará como asfalto convencional y servirá de base para el análisis y desarrollo de los ligantes modificados.

Métodos

La decisión de incorporar un 3% de nanoplaquetas de grafeno (GNP) se sustentó en investigaciones previas que demuestran mejoras significativas en las propiedades reológicas del ligante a esta concentración (Le et al., 2019). Si bien investigaciones reportan dosificaciones máximas del 2% en la mayoría de los estudios, se seleccionó deliberadamente el 3% para evaluar efectos sinérgicos a mayor concentración y explorar posibles mejoras en la capacidad de autorreparación mediante microondas, particularmente en lo que respecta a la eficiencia de absorción de radiación electromagnética.

Respecto al neumático fuera de uso (NFU), la dosificación del 24% se basó en investigaciones previas desarrolladas (Segura, 2024), donde esta concentración demostró valores significativamente elevados de energía necesaria para alcanzar el punto de ruptura del material, indicando una clara mejora en la resistencia mecánica. Este comportamiento se ve reforzado por el aumento observado en la temperatura del parámetro $G^*/\sin \delta$, parámetro indicativo de la resistencia a la deformación permanente (ahuellamiento) a altas temperaturas, que confirma el mejoramiento del desempeño elástico del ligante modificado bajo condiciones de carga repetida. La combinación de estos factores, mayor resistencia a la fractura y mejor comportamiento elástico, justifica técnicamente la selección de esta dosificación específica para las formulaciones que incorporan NFU.

Caracterización del ligante asfáltico

La caracterización del ligante asfáltico se realizó sobre el asfalto base CA-30 y sobre los ligantes modificados con GNP y GNP+NFU, mediante ensayos de penetración (IRAM 6576, 2004), punto de ablandamiento (IRAM 6841, 2011) y viscosidad (IRAM 6837, 2011). Se adoptaron las siguientes designaciones para los ligantes modificados, A: CA30+3%GNP (99 %) y B: CA30+24%NFU+3% GNP (99 %).

Penetración - Norma IRAM 6576 (2004)

El ensayo de penetración se realizó sobre el asfalto base CA-30 y sobre los asfaltos modificados A y B, con el objetivo de evaluar la variación en la consistencia del ligante producida por la incorporación de los modificadores. El procedimiento se llevó a cabo bajo las condiciones establecidas por la Norma IRAM 6576 (2004), determinando la profundidad de penetración de una aguja normalizada bajo condiciones controladas de carga, tiempo y temperatura. Por cada muestra se realizaron 3 determinaciones en puntos separados, y el valor informado corresponde al promedio de esas 3 lecturas.

Punto de ablandamiento: norma IRAM 6841 (2011)

El ensayo de punto de ablandamiento se realizó para determinar la temperatura a la cual el ligante asfáltico alcanza una consistencia definida y pasa de un estado semisólido a uno más fluido. En el caso de los ligantes modificados, fue necesario extender el tiempo de calentamiento y alcanzar temperaturas superiores a las empleadas para el asfalto base, debido a su mayor resistencia a fluir. Durante la etapa preliminar se consideró el uso de glicerina como medio de calentamiento alternativo, sin embargo, no fue necesario emplearla, ya que las condiciones adoptadas permitieron completar el ensayo sin superar el límite de ebullición del agua destilada.

Viscosidad: Norma IRAM 6837 (2011)

La viscosidad de los ligantes asfálticos se determinó mediante viscosímetro rotacional, siguiendo el procedimiento establecido por la Norma IRAM 6837 (2011). Los ensayos se realizaron sobre el asfalto base CA-30 y sobre los ligantes modificados A y B, debido al incremento de viscosidad esperado en los asfaltos modificados, se empleó la aguja N°27, utilizada habitualmente para ligantes de mayor viscosidad o asfaltos modificados con polímeros, en reemplazo de la aguja estándar N°21. La utilización de esta geometría permitió garantizar una medición adecuada del comportamiento reológico de las formulaciones evaluadas. Los ensayos se realizaron a temperaturas de 135 °C y 170 °C.

Dispersión: Modificación del ligante asfáltico base

La modificación de los ligantes asfálticos se realizó mediante un proceso de dispersión mecánica controlada, con el objetivo de lograr una distribución homogénea de los modificadores dentro de la matriz asfáltica. Debido a que no existe un procedimiento estandarizado para la incorporación de nanoplaquetas de grafeno (GNP) y NFU en ligantes asfálticos, las condiciones de temperatura y tiempo de dispersión fueron definidas a partir de antecedentes en investigaciones previas.

El proceso se desarrolló en etapas sucesivas y no mediante la incorporación simultánea de ambos modificadores. Esta metodología fue adoptada debido a la elevada susceptibilidad de las nanoplaquetas de grafeno a la aglomeración y adhesión superficial durante el mezclado, lo que podría afectar su adecuada dispersión dentro del ligante.

La dispersión de las nanoplaquetas de grafeno (GNP 99 %) se inició con el asfalto base CA-30 fue calentado hasta 150 °C, incorporándose gradualmente el modificador bajo cizallamiento mecánico durante 45 minutos y manteniendo una temperatura constante (± 2 °C).

Para la formulación GNP + NFU se utilizó un asfalto previamente modificado con NFU, sobre el cual se incorporó el GNP mediante dispersión mecánica a 165 °C manteniendo las mismas condiciones de mezclado y tiempo de dispersión explicadas previamente. En la Figura 3 se puede observar el procedimiento paso a paso del proceso de dispersión.

A partir de este procedimiento se elaboraron los ligantes modificados A y B.

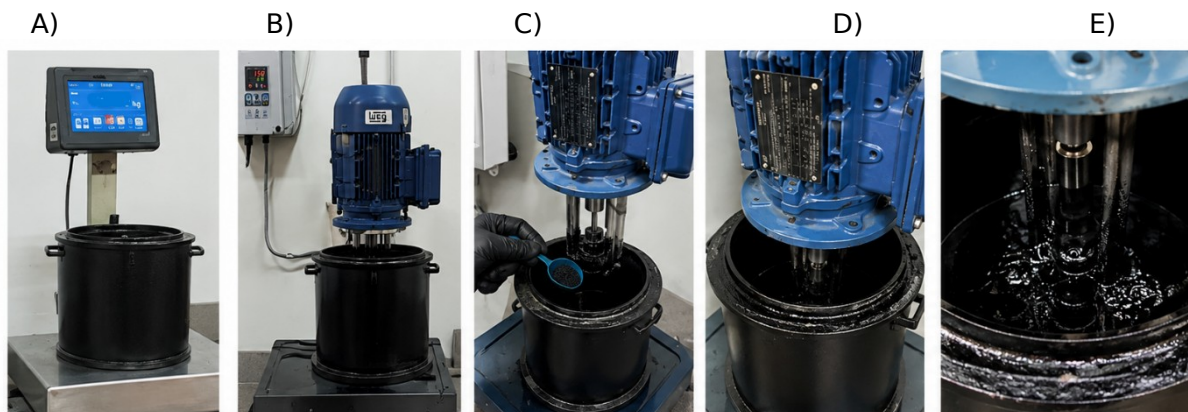


Figura 3: Procedimiento de la dispersión (Fuente: propia). A) Pesaje de batea. B) acondicionamiento de temperatura. C) colocación de elementos a dispersar. D) dispersión. E) ligante asfáltico modificado

Mezclas asfálticas

Las mezclas asfálticas fueron diseñadas conforme al Pliego de Especificaciones Técnicas para Concretos Asfálticos en Caliente de la Dirección Nacional de Vialidad (DNV, 2017), considerando los requisitos granulométricos, propiedades del ligante y parámetros volumétricos establecidos para mezclas densas en caliente.

Granulometría

La distribución granulométrica de los agregados pétreos se determinó mediante ensayo de tamizado conforme a la Norma IRAM 1505 (2006). Para esta investigación se utilizaron agregados naturales provenientes de canteras de la provincia de Córdoba, obteniéndose la curva granulométrica empleada en el diseño de las mezclas asfálticas.

Ensayo Marshall- IRAM 6845 (2016)

La caracterización mecánica de las mezclas asfálticas se realizó mediante el ensayo Marshall, conforme a la Norma IRAM 6845 (2016), con el objetivo de evaluar la influencia de los ligantes modificados A y B sobre el desempeño de la mezcla en comparación con una formulación convencional elaborada con asfalto base CA-30. A partir de este ensayo se determinaron parámetros mecánicos y volumétricos, tales como estabilidad, fluencia, densidad, porcentaje de vacíos, VAM y RBV, permitiendo analizar la respuesta estructural y la compactabilidad de las mezclas desarrolladas.

Determinación de la resistencia a tracción indirecta IRAM 6846-1 (2022)

La evaluación de los efectos de los modificadores incorporados al asfalto base, GNP y GNP+NFU, sobre el comportamiento mecánico y la capacidad de autorreparación de las mezclas asfálticas se realizó mediante el ensayo de Resistencia a Tracción Indirecta (RTI), conforme a la Norma IRAM 6846-1 (2022). Para ello, se comparó una mezcla convencional elaborada con asfalto CA-30 con dos mezclas modificadas con los ligantes asfálticos modificados A y B, ensayándose tres probetas por cada dosificación antes y después del tratamiento por microondas.

Previo al ensayo, las probetas fueron acondicionadas y posteriormente colocadas alineadas entre los flejes de carga inferior y superior del equipo de ensayo, demostración en la Figura 4. La carga diametral se aplicó de manera continua y sin impacto, a velocidad constante, hasta alcanzar la carga máxima registrada mediante flexímetro, sin continuar hasta la rotura total de la probeta.

El cálculo del RTI se lo obtiene a partir de la siguiente fórmula:

$$RTI = \frac{2 P_{max}}{\pi \times D \times h}$$

P_{max}: carga máxima = Factor de corrección por altura x n° divisiones x constante del aro
D: diámetro de la muestra
h: altura de la muestra



Figura 4: Probeta en ensayo a tracción indirecta con mordaza adaptada con fleje.
(Fuente: Propia)

Autorreparación

La autorreparación es la capacidad de un material para recuperar total o parcialmente sus propiedades mecánicas y funcionales tras sufrir un daño. En el caso de las mezclas asfálticas, este fenómeno ocurre de forma natural en el asfalto gracias a su comportamiento viscoelástico que, le permite cerrar microfisuras y, en consecuencia, restaurar parte de su rigidez y resistencia estructural.

Autorreparación mediante microondas

Las probetas, una vez sometidas al ensayo de Resistencia a Tracción Indirecta (RTI), fueron expuestas a un proceso de autorreparación, para el cual se empleó un horno microondas convencional con una potencia de 900 W. Los tiempos de exposición fueron ajustados según el tipo de mezcla, buscando alcanzar temperaturas superficiales cercanas a 120 °C a partir de una temperatura inicial de 25 °C. Las mezclas con mayor capacidad de absorción electromagnética requirieron menores tiempos de exposición.

La determinación de los tiempos de exposición a las microondas se realizó mediante una etapa experimental, tomando como referencia antecedentes que señalan al tiempo de exposición y la temperatura alcanzada como parámetros que influyen en la eficiencia del proceso de autorreparación (Norambuena-Contreras & García, 2016) (Gulisano et al., 2020). Durante la etapa preliminar, se evaluó el comportamiento térmico de las diferentes mezclas asfálticas mediante la exposición de probetas a intervalos de tiempo crecientes bajo radiación de microondas hasta identificar el punto de ablandamiento inicial. Posteriormente, se tomó las temperaturas en las caras externa de cada probeta para determinar el tiempo de exposición necesario para alcanzar una temperatura próxima a 120 °C, identificada como condición óptima para el proceso de autorreparación, (Gulisano et al., 2020), ya que a temperaturas inferiores no se observaba un ablandamiento suficiente del ligante que

favoreciera el cierre de las fisuras, mientras que a temperaturas superiores se producían deformaciones y pérdida de integridad de las probetas.

Durante el ensayo de tracción indirecta al alcanzar la carga máxima, se detuvo la acción de la prensa, preservando así la integridad de las probetas para los posteriores ensayos de autorreparación.

Previo al proceso de calentamiento, y una vez realizada la RTI en estado sin fisurar, se colocó en cada probeta un elemento de confinamiento lateral, consistente en tres bandas elásticas de ancho de 2,5 cm cuyo diámetro es 1 cm inferior al de la probeta (Figura 5). Esta medida tuvo como objetivo simular las condiciones reales del confinamiento que presenta una capa asfáltica dentro del paquete.

Posteriormente al proceso de autorreparación mediante microondas, las probetas fueron acondicionadas durante 24 h a 25 °C y ensayadas nuevamente mediante RTI para determinar la tasa de autorreparación, definida como la relación entre la resistencia a tracción indirecta final y la inicial.

$$\% \text{ Tasa de autorreparación} = (RTI_{\text{final}} - RTI_{\text{inicial}}) \times 100$$



Figura 5: Probetas con banda elástica. (Fuente: propia)

Resultados

Caracterización de ligantes

Las modificaciones se realizaron sobre un asfalto base CA-30, clasificado por viscosidad de conforme a la norma IRAM 6837 (2011). A partir del procedimiento de dispersión descriptos previamente, se obtuvieron 2 ligantes modificados: A y B, cuyas composiciones se describen en la Tabla 2.

Tabla 2: Tiempo de dispersión

Asfalto modificado	Temperatura de dispersión	Tiempo de mezclado (min)	Velocidad (rpm)
A	150	45	3000
B	165		4500

Los ensayos realizados según las normas IRAM 6837 (2011): Viscosidad, IRAM 6576 (2009), Penetración IRAM 6841(2011), Punto de ablandamiento IRAM 6841 (2011), permitieron evaluar el comportamiento reológico del asfalto base CA-30 frente a distintas modificaciones, en particular con nanoplaquetas de grafeno (GNP) y neumáticos fuera de uso (NFU). Los resultados obtenidos se ilustran en las Figuras 6, 7 y 8.

La Figura 6 muestra los resultados obtenidos en el ensayo de punto de ablandamiento, donde se observa una tendencia creciente en los valores conforme se incorporan aditivos. El asfalto base CA-30 presenta un punto de ablandamiento de 48 °C, para el caso del asfalto modificado A, este se eleva a 53 °C. Posteriormente, con es asfalto modificado B se alcanza un valor superior a 58 °C, constituyendo el mayor valor entre los ligantes evaluados.

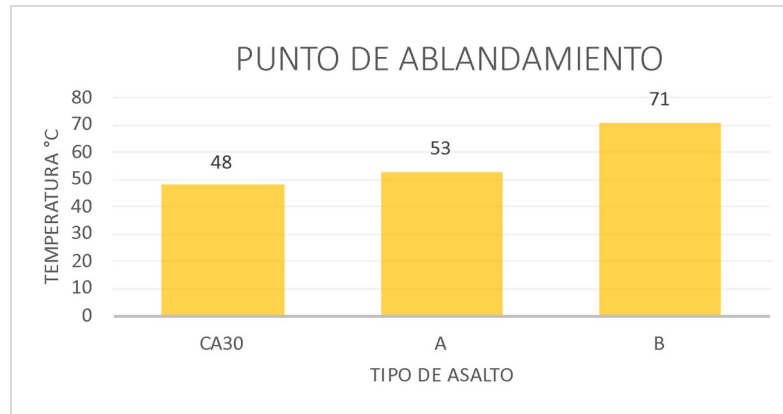


Figura 6: Resultados del ensayo de punto de ablandamiento. (Fuente: propia)

Los resultados del ensayo de penetración en la Figura 7 evidencian una reducción progresiva en cada tipo de asfalto modificado en comparación con el asfalto base. El valor de penetración del CA-30 es de 41 mm, este valor desciende a 35 mm con el asfalto modificado A. En el caso del asfalto modificado B, el valor de penetración disminuye a 28 mm, registrando la penetración más baja entre todas las formulaciones analizadas.

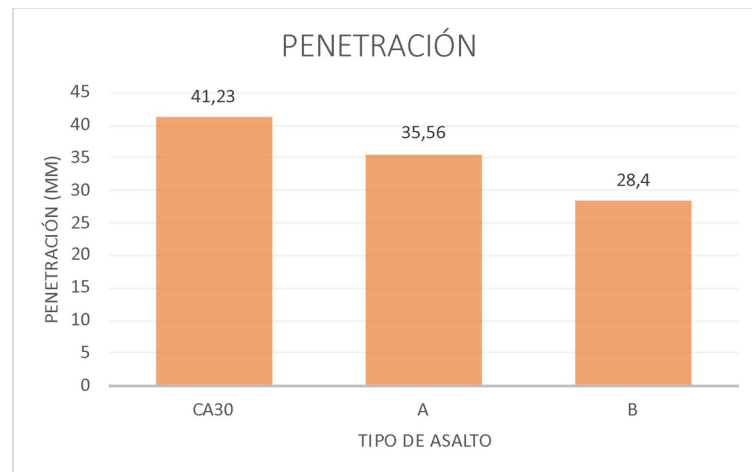


Figura 7: Resultados del ensayo de penetración. (Fuente: propia)

Por último, la Figura 8 presenta los resultados obtenidos en los ensayos de viscosidad a dos temperaturas (135 °C y 175 °C). En ambos niveles de temperatura, la viscosidad aumenta respecto al asfalto base, especialmente a 135 °C, donde se aprecian los valores más altos en las mezclas que incorporan NFU y GNP de forma conjunta. El asfalto base CA-30 presenta las viscosidades más bajas, mientras que los asfaltos con aditivos muestran una variación en ambos niveles de temperatura evaluados.

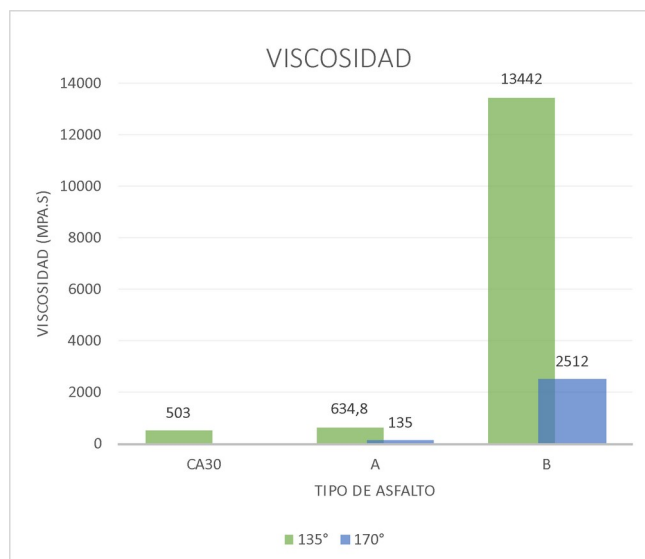


Figura 8: Resultados del ensayo de viscosidad. (Fuente: propia)

Granulometría

La distribución granulométrica de los agregados se determinó conforme a la Norma IRAM 1505 (2006). La curva granulométrica obtenida, presentada en la Figura 9, corresponde a una formulación compuesta por agregados naturales de las fracciones 0-6 mm y 6-19 mm, diseñada de acuerdo con los requisitos establecidos por la Dirección Nacional de Vialidad (DNV, 2017). Los porcentajes de material pasante para cada tamiz se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3: Granulometría tradicional (Fuente: propia)

AGREGADOS					MEZCLA AGREGADOS	CURVAS LÍMITE	
PORCENTAJE		55%	45%	0%		Entorno	TMN 12,5mm
DESCRIPCIÓN		0 - 6	6 - 19	-		Límite Inferior	Límite Superior
TAMIZ							
Designación	Abertura [mm]	% que Pasa	% que Pasa	% que Pasa	% que Pasa	% que pasa	% que pasa
3/4"	19,0	100,0%	97,5%	0,0%	99,0%	83%	100%
1/2"	13,20	100,0%	44,8%	0,0%	75,0%	70%	90%
3/8"	9,50	100,0%	22,0%	0,0%	65,0%	60%	75%
N°4	4,75	95,0%	1,5%	0,0%	53,0%	42%	60%
N°8	2,36	73,0%	0,7%	0,0%	40,0%	29%	47%
N°30	0,600	36,0%	0,5%	0,0%	20,0%	15%	29%
N°50	0,300	24,0%	0,4%	0,0%	13,0%	11%	21%
Nº200	0,075	8,0%	0,3%	0,0%	5,0%	4%	8%

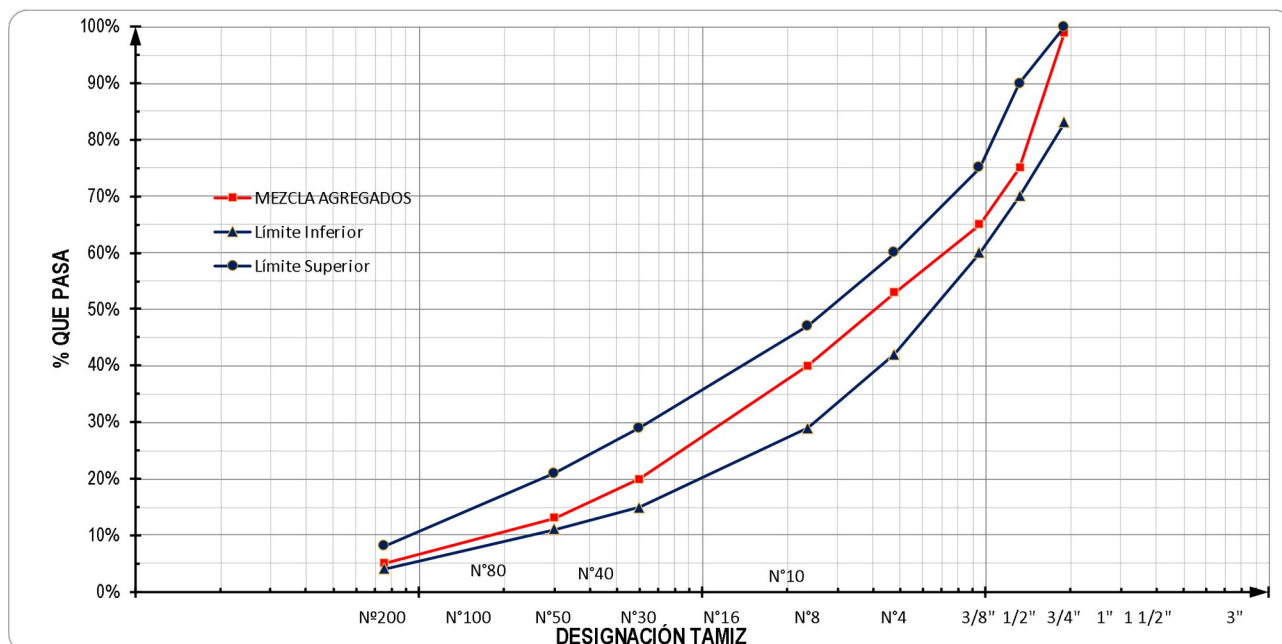


Figura 9: Granulometría tradicional. (Fuente: propia)

Método Marshall

Las mezclas elaboradas con asfalto base CA-30 y con el asfalto modificado A presentaron un contenido óptimo de ligante del 5,3 %. Por otro lado, las mezclas asfálticas elaboradas con asfalto modificado B requirió un contenido de 5,8 %. Estas cantidades fueron seleccionados por cumplir con los criterios establecidos en el Pliego de Especificaciones Técnicas para Concretos Asfálticos en Caliente de la Dirección Nacional de Vialidad (DNV, 2017).

1. 5,3%- CA30 (convencional)
2. 5,3%- CA-30 + 3 % GNP (99 %)
3. 5,8%-CA-30 + 24 % NFU + 3 % GNP (99 %)

Caracterización de mezclas asfálticas

Los resultados obtenidos mediante el ensayo Marshall se presentan en la Tabla 4.

Las mezclas asfálticas con ligante asfáltico modificado A registra las densidades más elevadas, 2,56 gr/cm³. En cuanto a la estabilidad Marshall, aquellas mezclas asfálticas con asfalto modificado B presentaron mayor valor de estabilidad, 1390 kg, superando a una mezcla asfáltica convencional.

Los resultados de fluencia mostraron que el menor valor se presenta en la mezcla tradicional (2,71 mm), mientras que, en la incorporación de nanoplaquetas de grafeno presenta valores de fluencia de 3,16 mm, el mayor valor corresponde a la mezcla asfáltica 3, alcanzando los 3,58 mm.

El proceso de dosificación, que involucró múltiples iteraciones y ajustes, permitió establecer las condiciones óptimas para cada formulación, garantizando que todas las mezclas cumplan con los requisitos técnicos establecidos y proporcionando una base sólida para la posterior evaluación de su capacidad de autorreparación.

Tabla 4: Resultados del ensayo Marshall. (Fuente: propia)

Mezcla	Dosificación	Rice	Marshall	% de Vacíos	Estabilidad	Fluencia	VAM	RBV
1	5,3%-CA30 (convencional)	2,57	2,47	3,81%	1025	2,71	16,92%	77,48
2	5,3%-CA30+3%GNP (99%)	2,7	2,56	4,83%	1153	3,16	18,61%	72,9
3	5,8%CA30+24%NFU+	2,63	2,55	3,26%	1390	3,58	18,04%	74,84

	3%GNP (99 %)							
--	--------------	--	--	--	--	--	--	--

Autorreparación

Las mezclas con incorporación de grafeno presentaron la mayor tasa y un menor tiempo de exposición, según lo presentado en la Tabla 5.

Tabla 5: Resultados de Tasa de autorreparación. (Fuente: propia)

Dosificación	Tiempo de exposición [s]	Tasa de autorreparación [%]	Temperatura externa [°C]
1	210	66	123
2	195	79	120
3	195	83	120

Los resultados de autorreparación obtenidos en laboratorio (Tabla 5) indican que mezclas modificadas con GNP presentan tasas de autorreparación superiores al asfalto convencional, alcanzando valores cercanos al 80-83 %, frente al 66 % del CA30. Asimismo, se observó una reducción en los tiempos de exposición requeridos para alcanzar temperaturas de reparación, lo cual se traduce en un menor consumo energético por intervención.

Discusión

El análisis global de los resultados permite identificar relaciones claras entre la composición de los ligantes modificados y el comportamiento de las mezclas asfálticas. El procedimiento experimental, desde la caracterización inicial de los materiales hasta la evaluación de las mezclas, configura una secuencia que explica las diferencias observadas entre dosificaciones. A continuación, se presenta una interpretación de los hallazgos más relevantes, ordenada según el desarrollo experimental, donde se muestra cómo las modificaciones del ligante se traducen en mejoras concretas en el rendimiento de las mezclas, tales como mayor estabilidad, mejor respuesta a la fluencia y su comportamiento final frente a la aplicación de microondas.

Caracterización de los ligante con la incorporación de GNP (99%) y NFU y su comportamiento en las mezclas asfálticas

La caracterización de los ligantes modificados permitió analizar las diferentes alternativas de incorporación de elementos y evaluar su influencia en las propiedades fundamentales del asfalto CA-30. Los resultados obtenidos evidenciaron comportamientos diferenciados según la naturaleza del aditivo empleado.

La incorporación del Neumático Fuera de Uso (NFU) produjo las mayores variaciones en las propiedades evaluadas, como ser el mayor incremento en el punto de ablandamiento, alcanzando los 60 °C frente a los 48 °C del CA-30. Este comportamiento se atribuye al hinchamiento del caucho, el cual absorbe fracciones más ligeras del asfalto, actuando como agente espesante; en consecuencia, se incrementa la resistencia a la deformación plástica a elevadas temperaturas.

Los resultados de penetración mostraron una disminución progresiva respecto al asfalto convencional, siendo más pronunciada en las formulaciones que incorporaron NFU. Esta tendencia resulta consistente con el incremento observado en el punto de ablandamiento y sugiere un aumento de la rigidez del ligante modificado.

La alternativa de incorporar Nanoplaquetas de Grafeno (GNP), si bien no mostró variaciones significativas como el NFU en el punto de ablandamiento, evidenció influencia en la penetración y viscosidad del ligante.

La reducción de la penetración observada en las formulaciones con GNP podría estar asociada a la presencia de nanoplaquetas dispersas dentro del ligante asfáltico, las cuales

restringen parcialmente la movilidad de sus componentes y contribuyen al incremento de la resistencia al flujo.

Los ensayos de viscosidad realizados a 135 °C y 170 °C evidenciaron incrementos para todas las ligantes asfálticos modificados respecto al asfalto base, siendo las formulaciones con NFU las de mayor viscosidad. Estos resultados son consistentes con las mediciones de penetración y punto de ablandamiento.

Las mezclas asfálticas con ligantes asfálticos modificados con GNP permitieron alcanzar las mayores densidades del estudio. Este comportamiento sugiere una mejora en la compactación favoreciendo una estructura más homogénea.

Asimismo, las mezclas modificadas presentaron incrementos en la estabilidad Marshall respecto a la mezcla convencional. Particularmente, la formulación con GNP y NFU registró los mayores valores de estabilidad, indicando una mayor capacidad para resistir cargas sin experimentar deformaciones permanentes significativas.

Caracterización de la autorreparación

El análisis de los resultados de la autorreparación por microondas evidenció que la incorporación de nanoplaquetas de grafeno mejoró significativamente la capacidad de autorreparación de las mezclas asfálticas respecto a la mezcla convencional. Mientras que la mezcla elaborada con asfalto base CA-30 alcanzó una tasa de autorreparación del 66 %, las mezclas asfálticas modificadas 2 y 3 registraron valores del 79 % y 83 %, respectivamente. La recuperación mecánica para las mezclas modificadas requirió menores tiempos de exposición para alcanzar las condiciones térmicas establecidas experimentalmente para el proceso de autorreparación. Mientras que la mezcla convencional necesita 210 s de exposición, las formulaciones con GNP alcanzaron temperaturas equivalentes en 195 s, evidenciando una mayor eficiencia de calentamiento.

La presencia de nanoplaquetas de grafeno favorece la absorción de la radiación electromagnética y su transformación en energía térmica, acelerando el calentamiento del sistema, como consecuencia, el ligante alcanza más rápidamente una condición de fluidez adecuada para favorecer el cierre de fisuras y la recuperación parcial de las propiedades mecánicas de la mezcla.

Por otra parte, la incorporación conjunta de NFU y GNP produjo la mayor tasa de autorreparación del estudio. Este resultado podría estar asociado a un efecto combinado entre la mayor capacidad de calentamiento aportada por el GNP y las propiedades elásticas del NFU, que favorecerían la recuperación estructural de la mezcla una vez alcanzada la temperatura de reparación.

Los resultados obtenidos indican que la incorporación de modificadores no solo mejora determinadas propiedades mecánicas del material, sino que también incrementa la eficiencia del proceso de autorreparación, reduciendo simultáneamente el tiempo de exposición requerido para alcanzar temperaturas de activación similares.

Conclusión

Las mezclas asfálticas elaboradas con ligantes modificados mediante nanoplaquetas de grafeno (GNP) y la combinación GNP+NFU presentaron un desempeño superior al de la mezcla convencional tanto en las propiedades reológicas del ligante como en el comportamiento mecánico de las mezclas. Los resultados obtenidos mediante los ensayos de penetración, punto de ablandamiento y viscosidad evidenciaron una modificación efectiva del asfalto base CA-30, mientras que la caracterización Marshall confirmó mejoras en parámetros asociados a la estabilidad estructural de las mezclas.

El análisis de los resultados de la autorreparación inducida por microondas presenta a las mezclas modificadas obteniendo las mayores tasas de recuperación mecánica, registrando valores cercanos al 79 % para la mezcla 2 y del 83 % para la mezcla 3, frente al 66 % obtenido en la mezcla 1. Asimismo, estas formulaciones requirieron menores tiempos de exposición para alcanzar las temperaturas de reparación establecidas, evidenciando una mayor eficiencia frente al calentamiento por microondas.

Los resultados obtenidos demuestran que la incorporación de nanoplaquetas de grafeno favorece significativamente la capacidad de autorreparación de las mezclas asfálticas y que su combinación con el polvo de neumático fuera de uso permite potenciar aún más dicha

respuesta. En consecuencia, estas dosificaciones constituyen una alternativa prometedora para el desarrollo de pavimentos con mayor durabilidad, menor necesidad de intervenciones de mantenimiento y mejor aprovechamiento de tecnologías de reparación térmica.

Agradecimientos

Se agradece a la Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Córdoba, en especial al Centro de Investigación, Desarrollo y Transferencia de Materiales y Calidad (CINTEMAC), por el apoyo institucional brindado para la realización de esta investigación.

Referencias

Gomez, R. M. R., & Sandoval, R. L. (2015). Síntesis de grafeno derivado químicamente mediante la reducción química de óxido de grafeno, pp 52. <http://hdl.handle.net/11627/3019>

Graphene GreenTech. (2020). Graphene 99 & Graphene 92. [Folleto técnico]

Gulisano, F., Crucho, J., Gallego, J., & Picado-Santos, L. (2020). Microwave Healing Performance of Asphalt Mixture Containing Electric Arc Furnace (EAF) Slag and Graphene Nanoplatelets (GNPs). *Applied Sciences*, volumen 10. <https://doi.org/10.3390/app10041428>.

IRAM 1505. (2006). Agregados. Análisis granulométrico. Instituto argentino de normalización y certificación. Argentina. pp 13

IRAM 6576. (2004). Determinación de la penetración utilizando un penetrómetro de aguja. Instituto argentino de normalización y certificación. Argentina. pp 15

IRAM 6837. (2011). Determinación de la viscosidad rotacional. Instituto argentino de normalización y certificación. Argentina. pp 13

IRAM 6841. (2011). Determinación del punto de ablandamiento. Método del anillo y la esfera. *Asphalts for pavements. Determination of softening point. Ring and ball method*. Instituto argentino de normalización y certificación. Argentina. pp 12

IRAM 6846-1. (2022). Mezclas asfálticas. Parte 1. Determinación de la resistencia a tracción indirecta de probetas y testigos de mezclas asfálticas. Instituto argentino de normalización y certificación. Argentina. pp 17

Lizárraga, J. M., & Gallego, J. (2020). Self-healing analysis of half-warm asphalt mixes containing electric arc furnace (EAF) slag and reclaimed asphalt pavement (RAP) using a novel thermomechanical healing treatment. *Materials*, volumen 13, issue 11. <https://doi.org/10.3390/ma13112502>

Lopez, L. I. L. (2012). Métodos de preparación de grafeno y derivados a partir de grafito y su incursión en la obtención de nanocompuestos polímero/grafeno, pp8. <https://ciqa.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1025/460>

Norambuena-Contreras, J., & Garcia, A. (2016). Self-healing of asphalt mixture by microwave and induction heating. *Materials & Design*, volumen (106) , pp 404-414. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.05.095>

Rony, (2017). Composición química del asfalto, pp 6-10. Recuperado de <https://es.scribd.com/presentation/360409334/Composicion-Quimica-Del-Asfalto>
Segura, A., 2024. Asfaltos altamente modificados con polvo de neumáticos fuera de uso (NFU) en mezclas asfálticas retardantes de la fisuración refleja. Tesis doctora en Ingeniería

mención materialesl. Universidad Tecnológica Nacional. La Plata. ISBN 978-987-8992-40-2, pp 148-151