

UTILIZACIÓN EN ALTAS TASAS DE POLVO DE NFU EN LA ELABORACIÓN DE MEZCLAS ASFÁLTICAS UTILIZADAS EN CAPAS PARA RETARDO DE FISURAS

Segura Adrian
asegura@frc.utn.edu.ar
Botasso Gerardo
gbotasso@frlp.utn.edu.ar
Raggiotti Belén
braggiotti@frc.utn.edu.ar
Rebollo Oscar
orebollo@frc.utn.edu.ar
Zapata Ignacio
izapata@frc.utn.edu.ar
Vázquez Franco
fvazquez@frc.utn.edu.ar

CINTEMAC. Universidad Tecnológica Nacional. Córdoba, Arg.
LEMAC. Universidad Tecnológica Nacional. La Plata, Arg

1. INTRODUCCIÓN

El problema de los residuos es una preocupación mundial y aún más, por sus características, los neumáticos fuera de uso (NFU). Una vez que los neumáticos llegan al final de su vida útil, el caucho puede ser reciclado para diversos usos, incluyendo la fabricación de elementos cortados directamente, su uso como fuente de energía en hornos de cemento y su incorporación en el proceso de modificación de asfaltos para la elaboración de mezclas asfálticas. Sin embargo, es importante destacar que este caucho reciclado ya no tiene las mismas propiedades que el virgen, lo que afecta su respuesta frente a tensiones y deformaciones. Aunque se utilizan algunas toneladas de caucho reciclado en los usos mencionados, también hay casos en los que los neumáticos reciclados no reciben un tratamiento adecuado y son almacenados en naves y espacios abiertos. Esto puede resultar en la proliferación de roedores e insectos, como mosquitos, y aumentar el riesgo de incendios de difícil control. Por otro lado, si terminan siendo dispuestos en vertederos, pueden generar problemas debido a su forma y composición. Estos no son fáciles de compactar ni se descomponen con facilidad, lo que lleva a un consumo considerable de espacio en los vertederos.

Para abordar estos desafíos, es fundamental mejorar la gestión del reciclaje de neumáticos y promover prácticas sostenibles que permitan aprovechar su reutilización de manera más efectiva y responsable, reduciendo así su impacto ambiental negativo.

En los últimos años con el fin de una mayor reutilización del polvo de NFU, se han evaluado alternativas de su uso en la modificación de asfaltos. Esto ha sido en tasas del orden del 8% las experiencias realizadas en Argentina (Botasso et

al., 2013). También, buscando obtener en ellos, altas prestaciones elásticas y respuestas a fatiga, se ha estudiado una mayor incorporación de NFU en el ligante asfáltico y su aplicación en mezclas utilizadas para retardo de fisuras.

En los pavimentos asfálticos, se pueden observar diversos tipos de fallas que afectan la calidad y las propiedades de los materiales. Las más comunes son las deformaciones permanentes, conocidas como ahuellamiento, los agrietamientos por fatiga, los agrietamientos térmicos y las fisuras reflejas. Cada una de estas fallas presenta desafíos específicos que deben ser abordados para mantener la integridad y durabilidad de estas estructuras.

Las fisuras reflejas ocurren cuando las grietas que están presentes en las capas inferiores del pavimento se propagan hacia la capa superficial arriba colocada. Es decir, se reflejan desde las capas inferiores hacia la superficie, afectando la integridad del pavimento en su totalidad. Estas se presentan con más frecuencia, en situaciones donde se realiza una nueva capa de mezclas sobre una otra existente con fisuras o deterioro previo. También pueden ocurrir cuando se realizan trabajos de repavimentación o rehabilitación sin un adecuado tratamiento de las capas inferiores.

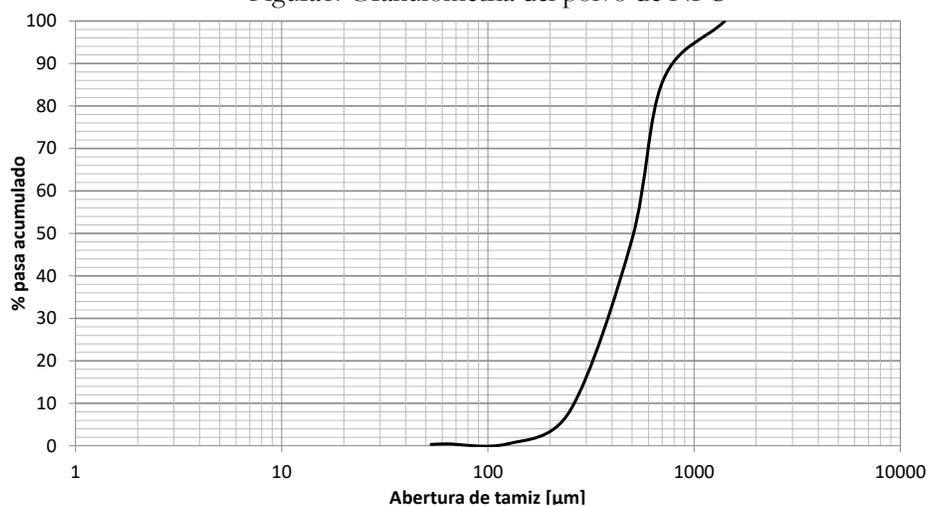
La rotura temprana de los pavimentos debido a las fisuras reflejas, por rotura prematura de las capas colocadas con la finalidad de retrasar las mismas, ocasiona reiteradas tareas de mantenimiento en las carpetas de rehabilitación colocadas sobre ellas, esto resulta en una frecuente necesidad de realizar labores de mantenimiento, lo que aumenta los costos asociados a la conservación de los mismos. Las mezclas más utilizadas para esto, han sido las arenas-asfalto (AA) con una granulometría continua y que pueden ser elaboradas con asfalto convencional. Sin embargo, en numerosas ocasiones estas han fallado de manera anticipada frente a la propagación de fisuras. Surge así la necesidad de mejorar el desempeño de estas mezclas, para lo cual se las han elaborado a partir de asfaltos modificados con polímero virgen y con NFU. Además, en la búsqueda de encontrar otras alternativas tecnológicas que permitan salvar las dificultades que presenta las AA, se estudian otras mezclas con granulometrías discontinuas.

Una mezcla para retardo de fisura en la rehabilitación de pavimentos, deberá ser capaz de disipar las tensiones generadas deformándose y admitiendo una mayor cantidad de ciclos de carga hasta la rotura sin perjudicar otras características. En la presente investigación, para estudiar esto, se han evaluado el desempeño de diferentes mezclas asfálticas elaboradas con un mayor porcentaje de NFU en el ligante asfáltico, por vía húmeda, y creciente discontinuidad granulométrica. Esto es para, además de dotar al ligante base de mejores características al igual que la mezcla, también lograr una mayor utilización de NFU. La evaluación del comportamiento físico de las distintas mezclas, ha permitido compararlas y estimar cuál presenta la mejor prestación para dicho uso.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Los materiales utilizados para el desarrollo experimental, han sido polvo de caucho de NFU, ligante asfáltico convencional y modificado tipo AM3 (IRAM 6596, 2018) y agregados. El NFU se obtuvo del pasante del tamiz N°25, es decir 0,7 mm. En la Figura 1, se observa la granulometría de polvo de NFU utilizada y se aprecia que el material presenta un pasante del 86% en dicho tamiz.

Figura1. Granulometría del polvo de NFU



El ligante asfáltico en el que se realizó la incorporación del NFU fue caracterizado, de acuerdo a la norma IRAM 6835 (2020), como un CA-30. Para ello se determinó la penetración, punto de ablandamiento (PA) y viscosidad rotacional a 60 °C y 135 °C. La incorporación del polvo de NFU fue realizado por vía húmeda, mediante un el equipo dispersor y se lo muestra en la Figura 2.

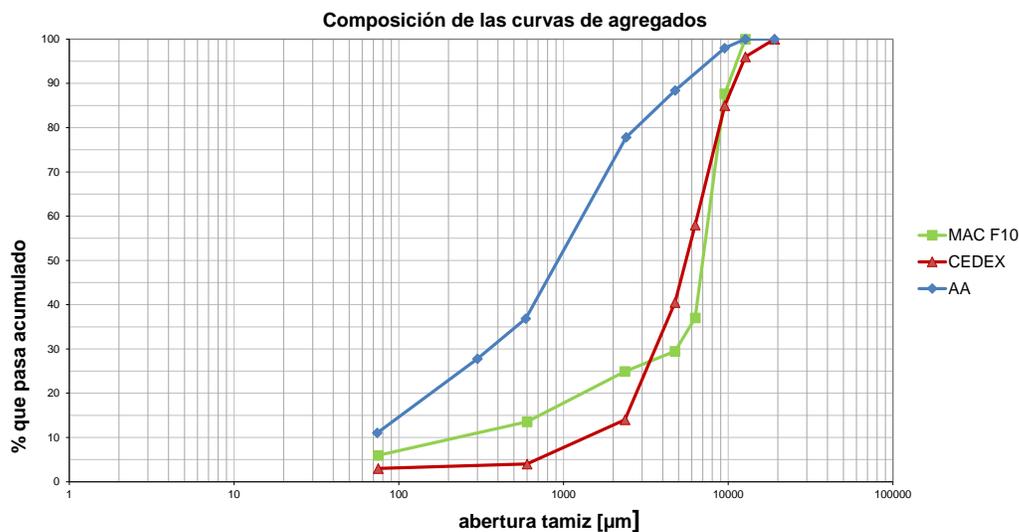
Figura 2. Equipo dispersor



Se realizó la dispersión incorporando polvo de neumático al asfalto, previamente calentado, en la cuba inferior durante 5 minutos, con un tiempo total de operación del equipo de 60 minutos, manteniendo una velocidad de elaboración entre 7000-7500 RPM y temperatura de 180-190 °C. Posteriormente, se determinó la penetración, punto de ablandamiento y viscosidad rotacional a 135 °C y 170 °C del asfalto modificado. Estas mediciones permiten evaluar las algunas propiedades y el grado de modificación.

Los agregados utilizados para la elaboración de las diferentes mezclas estudiadas son de tamaños de 0 a 3 mm, 0 a 6 mm y 6 a 12 mm. Estos agregados se utilizaron para la conformación de las diferentes mezclas para luego ser evaluadas. Estas, surgieron como consecuencia de las experiencias realizadas y la bibliografía (Borreli, 2020; Plan de pavimentación 1200 cuadras, 2001; Uguet et al., 2020; Pliego de especificaciones técnicas generales para microaglomerados asfálticos en caliente y semicaliente tipo F, 2017; SIGNUS, 2017; Segura et al., 2018; Segura et al., 2022), siendo una Arena Asfalto (AA), un Microconcreto discontinuo en caliente (MAC) y una del Manual de empleo de caucho de NFU en mezclas bituminosas (2007) denominada CEDEX, Figura 3.

Figura 3. Curvas granulométricas de las diferentes mezclas estudiadas



Se puede observar que las tres curvas adoptadas para la realización de la experiencia, la “AA”, el “MAC F10” y “CEDEX”, presentan una creciente discontinuidad granulométrica.

La dosificación del ligante para cada mezcla se determinó en base a investigaciones y trabajos previos, y se consultaron diversas fuentes bibliográficas, incluyendo Uguet et al. (2020), SIGNUS (2017) y Segura et al. (2022). El objetivo fue garantizar que los parámetros mecánicos y volumétricos se mantuvieran dentro de los valores esperados. Las mezclas que se elaboraron fueron las granulometrías antes mencionadas con los diferentes ligantes, quedando las combinaciones que se presentan en la Tabla 1.

Tabla1. Designación de mezclas asfálticas elaboradas

| Ligante/Granulometría | AA | MAC | ESPAÑA |
|-----------------------|---------|---------|-----------|
| CA30 | AA CA30 | - | - |
| CA30+24%NFU | AA NFU | MAC NFU | CEDEX NFU |
| AM3 | AA AM3 | MAC AM3 | CEDEX AM3 |

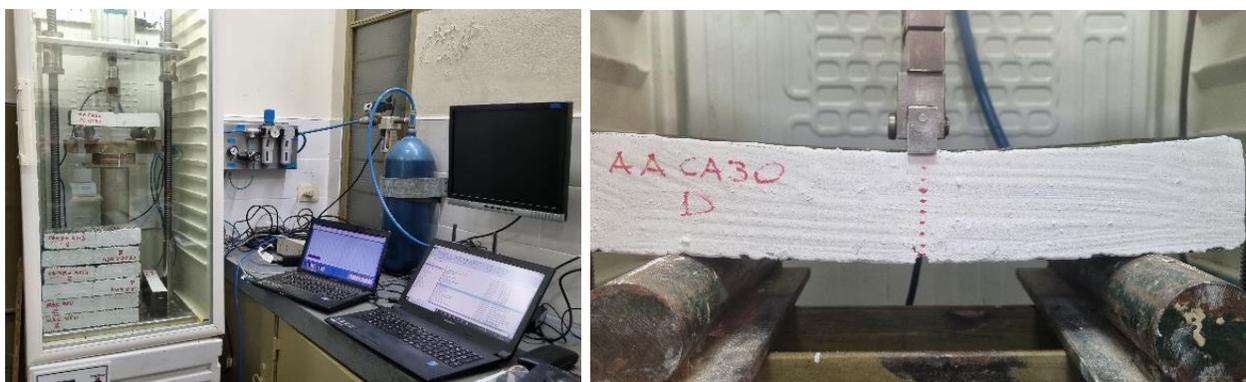
Posteriormente, se procedió a la elaboración de probetas Marshall correspondientes a las siete mezclas, con el fin de determinar los parámetros mecánicos y volumétricos. Además, se fabricaron probetas, Figura 4a, para evaluar el ahuellamiento, Figura 4b, siguiendo la norma UNE-EN 12697-22 (2008) para cada una de las mezclas.

Figura 4. a) Probetas. b) Ensayo de ahuellamiento



La evaluación del crecimiento de la fisura se llevó a cabo utilizando probetas rectangulares de dimensiones 30 cm de largo, 10 cm de ancho y 5 cm de espesor, a estas se les realizó una entalladura en la parte inferior para representar una fisura existente. Las probetas se obtuvieron cortando las muestras del ensayo de ahuellamiento mediante una aserradora. La metodología utilizada se basó en el modelo de reflejo de fisuras con el equipo de cargas cíclicas (MR) LEMaC, el cual fue evaluado y empleado previamente por Delbono (2014). Este posee la capacidad para seleccionar la carga de ensayo y que la misma sea aplicada con distintas frecuencias de repetición. El dispositivo empleado consta de un actuador neumático, que posibilita la variación de cargas en un rango de 0 a 4,9 kN, y a diversas frecuencias, desde 0,2 Hz a 20 Hz, es por ello que se ha denominado equipo de carga cíclica LEMaC. El mismo se encuentra en una cámara termostatzada que permite trabajar a temperaturas comprendidas entre 5 y 40 °C manteniendo acondicionadas las muestras. El equipo utilizado es el de módulo dinámico descrito en la norma UNE EN 12697-26 (2006). Los ensayos se realizaron con una frecuencia de 0.33 Hz, a una temperatura de 25 °C y aplicando una carga de 82 Kg. Cabe destacar que este mismo equipo se utilizó para determinar el módulo dinámico en las mismas mezclas, con su correspondiente metodología. En la Figura 5a y 5b se muestra el equipamiento utilizado para valoración de reflejo de fisuras y el inicio de una de ellas en una de las mezclas estudiadas, respectivamente.

Figura 5. a) Equipo de módulo adaptado para modelo de reflejo de fisuras. b) Ensayo e inicio de fisura



3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Tabla 2 presenta los resultados obtenidos de los ensayos realizados en los ligantes asfálticos.

Tabla 2. Resultados de ensayos sobre los ligantes asfálticos utilizados

| Ligante/Ensayo | Penet. [0.1 mm] | PA [°C] | Visc. 60 °C [dPa.s] | Visc. 135 °C [mPa.s] | Visc. 170 °C [mPa.s] |
|----------------|--------------------|------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|
| CA30 | 60 | 48 | 3450 | 503 | - |
| CA30+24%NFU | 28 | 67 | - | 10459.4 | 2200 |
| AM3 | 52 | 76 | - | - | 580 |

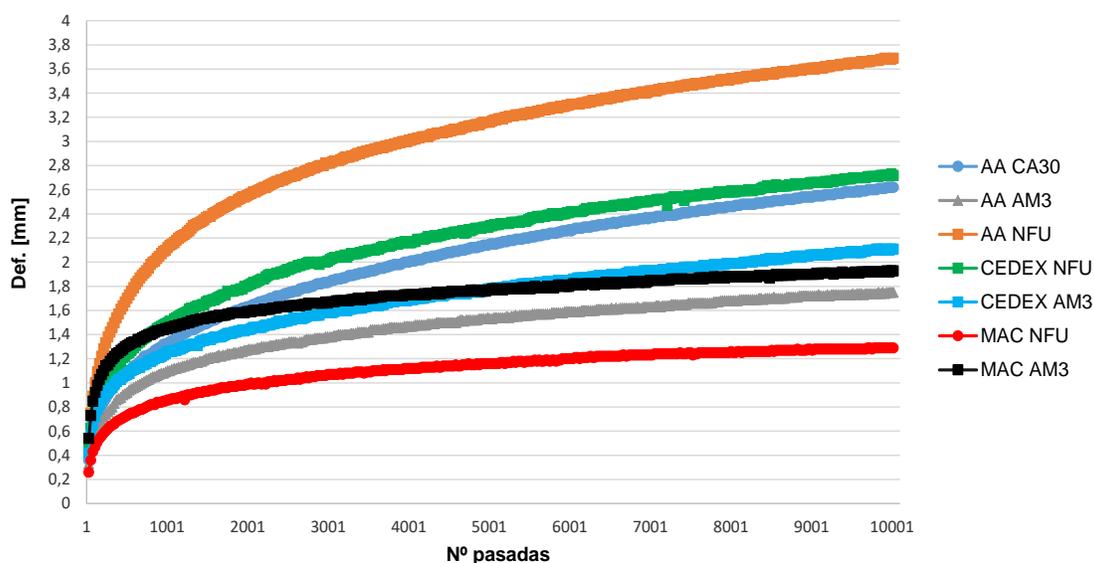
La Tabla 3 muestra los resultados de los parámetros volumétricos y mecánicos obtenidos de las distintas mezclas. Estos parámetros incluyen la densidad, los vacíos, el ahuellamiento y las relaciones entre la cantidad de filler sobre asfalto, así como su relación con los vacíos de la mezcla.

Tabla 3. Resultados de ensayos sobre las mezclas asfálticas estudiadas

| Mezcla/ Ensayo | Ligante [%] | Densidad [Kg/dm ³] | Vacíos [%] | Ahuellamiento [mm] | (filler/asfalto)/vacíos (f/a)/v [%] | Módulo [MPa] | Inicio Fisura [ciclos] | Ciclos a rotura [ciclos] |
|-------------------|----------------|-----------------------------------|---------------|-----------------------|--|-----------------|------------------------------|--------------------------------|
| AA CA30 | 6.8 | 2.378 | 3.73 | 2.62 | 40.4 | 3249 | 100 | 390 |
| AA AM3 | 6.8 | 2.363 | 3.53 | 1.75 | 42.7 | 1703 | 250 | 412 |
| AA NFU | 9.0 | 2.311 | 2.51 | 3.69 | 44.3 | 2314 | 570 | 956 |
| MAC AM3 | 5.0 | 2.398 | 4.11 | 1.92 | 27.7 | 2436 | 670 | 2470 |
| MAC NFU | 8.0 | 2.358 | 2.84 | 1.29 | 24.3 | 3445 | 1900 | 5244 |
| CEDEX AM3 | 5.0 | 2.331 | 5.17 | 2.11 | 11.0 | 1315 | 11 | 93 |
| CEDEX NFU | 8.0 | 2.228 | 6.86 | 2.72 | 5.0 | 2173 | 180 | 295 |

El valor de ahuellamiento presentado en la Tabla 3 corresponde al valor final obtenido en el ensayo, que en la Figura 6 se puede visualizar el mismo y también la evolución del ensayo para cada tipo de mezcla.

Figura 6. Curvas de ensayo de ahuellamiento de las distintas mezclas evaluadas.



La valoración de la propagación de la fisura se realizó según la metodología descrita antes y siendo esto una primera aproximación, ya que la evaluación final se deberá realizar en el modelo que considere las capas intervinientes en una tarea de rehabilitación, siendo esto una capa inferior fisurada, una intermedia retardante de la fisura y una superficial de refuerzo. Para una mejor visualización se presentan el gráfico de inicio de fisura y rotura en la Figura 7. En la Figura 8a y 8b se muestran los gráficos de relación entre la cantidad de ciclos a rotura, módulo y la cantidad de filler sobre asfalto y su relación con los vacíos.

Figura 7. Curva de inicio de fisura y rotura para las diferentes mezclas

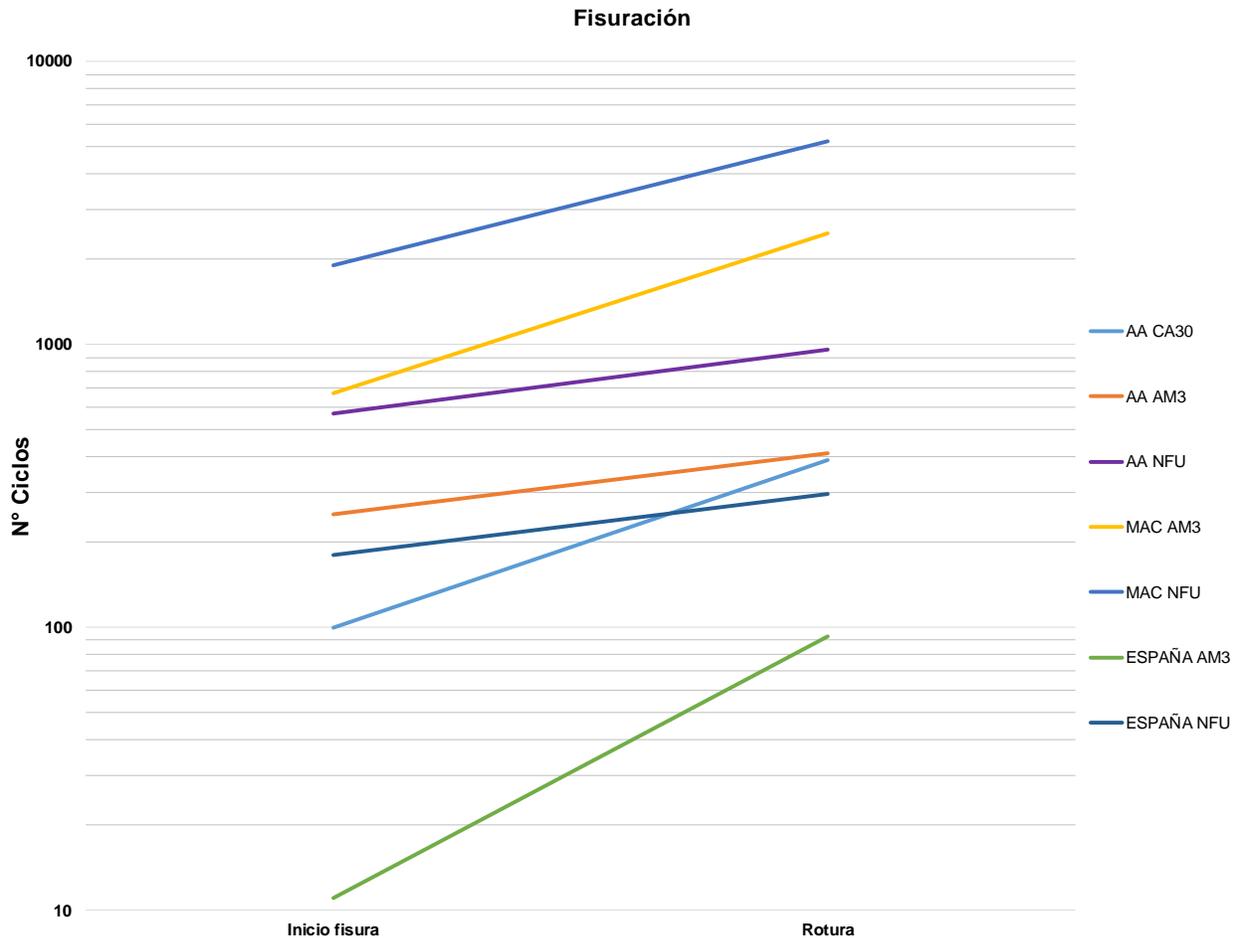
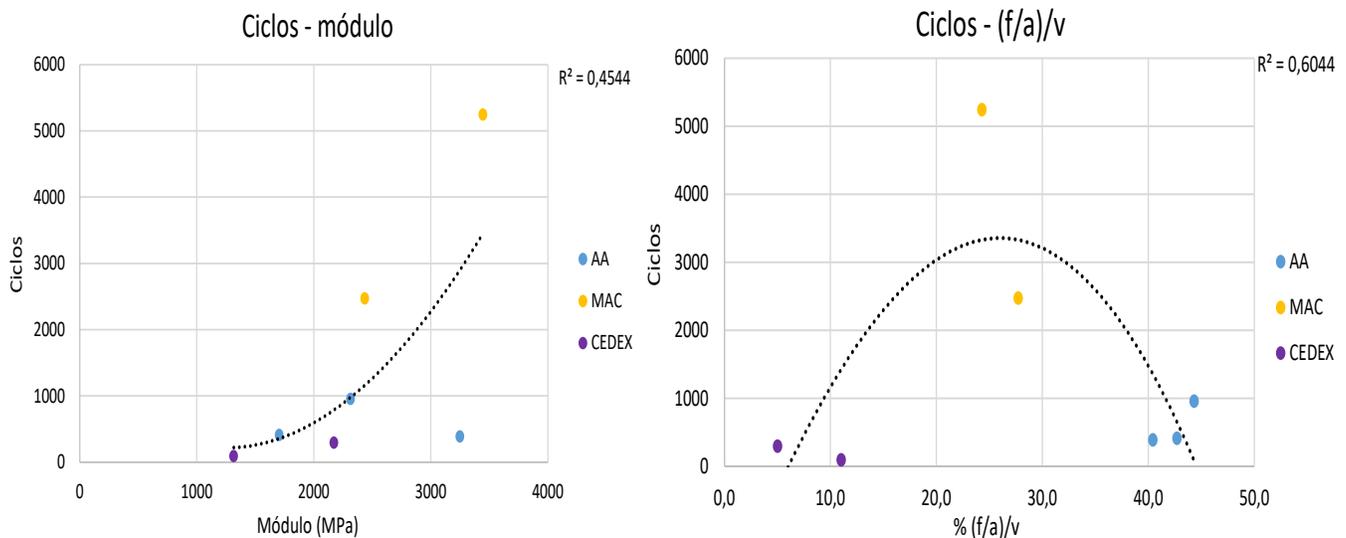


Figura 8. a) Gráfico cant. de ciclos a rotura y módulo. b) Gráfico cant. de ciclos a rotura y porcentaje de $(f/a)/v$.



En la mezcla (AA), se puede observar que la mezcla con NFU presenta valores más bajos de densidad, vacíos y mayor ahuellamiento en comparación con las otras dos mezclas AA. Además, la menor deformación superficial de las tres mezclas AA se obtuvo para la realizada con AM3.

En los MAC, las densidades son similares tanto para el AM3 como para el NFU, aunque la mezcla con NFU muestra una ligera inferioridad. Se estima que esto puede estar relacionado con su estructura granular, la cual facilita el alojamiento del NFU sin dispersar la energía de compactación, además de contar con un mayor porcentaje de ligante. Por otra parte, el ahuellamiento presenta un valor menor en el MAC NFU. Esta diferencia puede atribuirse a la interacción entre la estructura granular y el ligante con NFU, así como a la alta tasa de utilización del mismo en la mezcla.

En lo que respecta a CEDEX NFU, se observa una densidad inferior y mayores vacíos, lo cual se atribuye a su granulometría y se nota un ahuellamiento más pronunciado. Además, en este último aspecto, la curva muestra una tendencia de crecimiento. En contraste, en las otras mezclas se aprecia un menor crecimiento en el tramo final de la curva, siendo esto especialmente notable en los MAC.

El análisis de las curvas de propagación de fisura revela que el MAC NFU mostró una mayor resistencia al agrietamiento, al admitir el mayor número de ciclos hasta la rotura en comparación con todas las otras mezclas. De manera similar, dentro de cada grupo de mezclas, la elaborada con NFU demostró una mayor capacidad para resistir ciclos antes de alcanzar la rotura. Además, se desprende que cada familia de curvas exhibe una tendencia con pendientes similares entre sí. Estos rendimientos se relacionan con la capacidad elástica más elevada presente en el ligante con NFU, así como con las diferencias en densidades, vacíos y estructura granular de las diversas mezclas.

En la Figura 8b, se aprecia que existe una tendencia hacia un mayor número de ciclos a rotura cuando la relación $(f/a)/v$ se encuentra alrededor del 25%. Por otro lado, la Figura 8a muestra que los ciclos tienden a aumentar a medida que se incrementa el módulo de la mezcla. Estos comportamientos están relacionados con la mayor capacidad elástica presente en el ligante con NFU, así como con las diferencias en densidades, vacíos y estructura granular de las distintas mezclas.

4. CONCLUSIONES

- El análisis de los tres tipos de mezclas elaboradas con asfalto con NFU revela que todas presentan una disminución en sus densidades. Esta reducción se atribuye a la respuesta generada por el efecto rebote del equipo de compactación debido a la presencia del NFU.
- El mejor desempeño elástico del CA30+24%NFU y que asociado a la granulometría del MAC NFU da como resultado un menor ahuellamiento.
- A pesar de que el CA30+24%NFU exhibe un rendimiento elástico superior, esto no se traduce en un menor ahuellamiento en la AA NFU. Se estima que esto se debe a la granulometría continua y la presencia de agregado fino en la mezcla de AA NFU, lo que limita su capacidad para alojar la cantidad de NFU. Como resultado, durante la compactación, se produce una disipación de energía que se traduce en una menor densidad y un mayor ahuellamiento en la mezcla.
- En la mezcla CEDEX NFU, se nota un ligeramente mayor ahuellamiento en comparación con el AM3. Esto puede atribuirse a su granulometría, que produce una mayor cantidad de vacíos y contiene menos finos que puedan colaborar con el mastic, lo que resulta en una estructura con una menor capacidad de resistencia al ahuellamiento en comparación con el MAC NFU.
- Las mezclas elaboradas con CA30+24%NFU superan en número de ciclos a rotura a todas las demás mezclas estudiadas.
- La mezcla MAC NFU, que consiste en un ligante con NFU junto con una estructura granular discontinua que incluye gruesos y una cantidad adecuada de finos, muestra una mayor resistencia a los ciclos de carga antes de llegar a la rotura. Este rendimiento mejorado se debería a la presencia de un mastic asfáltico más elástico, presente en los espacios vacíos, que se interpone en el paso de la fisura. Como resultado, se disipa la energía y se reduce la rapidez de propagación de las mismas, lo que contribuye a una mayor durabilidad y vida útil del pavimento. Este fenómeno

hace que el MAC NFU se posicione como una opción adecuada para sistemas de retardo de fisuras en comparación con las otras mezclas.

- El MAC AM3 muestra una menor resistencia a los ciclos en comparación con el MAC NFU. Esto se debería a que el MAC AM3 tiene una mayor cantidad de vacíos en los cuales hay una menor cantidad de mastic asfáltico, con un asfalto con menor capacidad elástica que da como resultado una menor capacidad para disipar la energía generada por las fisuras. Esta limitación afecta su capacidad para resistir ciclos de carga y lo hace menos duradero en comparación con el MAC NFU.
- Al comparar las mezclas AA, MAC y ESPAÑA elaboradas con CA30+24%NFU, se pueden notar algunos aspectos importantes. En primer lugar, todas las mezclas muestran un aumento de vacíos, en segundo lugar, se observa una creciente discontinuidad en la granulometría, y, en tercer lugar, hay una mayor proporción de vacíos respecto a la cantidad de mastic en cada mezcla. El MAC NFU es el que admite el mayor número de ciclos hasta llegar a la rotura, lo cual sugiere que una mayor cantidad de vacíos con un mastic asfáltico más elástico contribuye a resistir más ciclos de carga. Sin embargo, se estima que este fenómeno ocurre hasta cierto punto de incremento de vacíos o relación $(f/a)/v$, ya que en las mezclas CEDEX y AA, la cantidad de ciclos es menor. Es decir, existiría un punto óptimo de relación entre la cantidad de vacíos y un mastic asfáltico más elástico, que favorece la resistencia a los ciclos de carga en las mezclas.
- El aumento en el número de ciclos con el incremento del módulo podría ser resultado de una mejor distribución de tensiones. Cuando el módulo aumenta, las tensiones se distribuyen de manera más uniforme en una superficie mayor, lo que conduce a una menor concentración de tensiones en la fisura inducida. Esta distribución más equilibrada de tensiones ayuda a que la mezcla soporte más ciclos antes de que se produzca la rotura.
- Según los resultados obtenidos, se sugiere que el MAC NFU podría ser una opción prometedora como sistema de retardo de fisuras en comparación con las mezclas AA tradicionales. Sin embargo, es esencial seguir evaluando este comportamiento mediante otros ensayos y modelos para validar y reforzar aún más este desempeño. La investigación continua y el análisis detallado permitirán obtener una visión más completa y confiable de las ventajas que ofrece el MAC NFU en términos de retardo de fisuras, lo que podría tener un impacto significativo en la calidad y durabilidad de los pavimentos en el futuro.

REFERENCIAS

- Borreli, M. (2020). Jornada del asfalto (virtual). Asociación uruguaya de caminos. Rehabilitación en mezcla asfáltica-Ruta1doble vía Acceso a Montivideo. Uruguay. <https://bitafal.com.uy/arena-asfalto-con-am3-en-ruta-1/>
- Botasso, G. y Segura, A. (2013). Estudio experimental de microaglomerado asfáltico antiderrapante modificado con NFU. *Obras y Proyectos* 14, 36-44.
- CEDEX (2007). Manual de empleo de caucho de NFU en mezclas bituminosas. Centro de estudios y experimentación de obras públicas. Ministerio de Medio ambiente y de Fomento de España. Madrid, España. ISBN: 978-84-7790-450-2. pp 63.
- IRAM 6596 (2018). Asfaltos modificados con polímeros para uso vial. Clasificación y requisitos. Polymer modified asphalts for use in pavement construction. Classification and requirements. Instituto argentino de normalización y certificación. Argentina. pp 12.
- IRAM 6835 (2020). Asfaltos para uso vial. Clasificación por viscosidad – Requisitos. Asphalt for pavements. Classification by viscosity. Requirements. Instituto argentino de normalización y certificación. Argentina. pp 12.
- Plan de pavimentación 1200 cuadras (2001). Pliego de especificaciones técnicas. Municipalidad de La Plata. Buenos Aires, Argentina.
- Pliego de especificaciones técnicas generales para microaglomerados asfálticos en caliente y semicaliente tipo F (2017). Dirección Nacional de Vialidad (DNV). Argentina.

Segura, A., Gallego, J., Botasso, G., Raggiotti, B. (2022). Congreso: Rubberized Asphalt - Asphalt Rubber RAR2022. Evaluation Of Anti-Reflective Cracking Mixtures Made With High Nfu Asphalts. Málaga, España. Locape - Artes gráficas, Lda. Portugal. ISBN: 978-989-53684-0-2. pp 11.

Segura, A., Positieri, M., Botasso, G. (2018). Libro: Utilización de asfalto modificado con NFU. Elaboración de un microconcreto discontinuo en caliente. Volumen I. Publicia. London, United Kingdom. ISBN: 978-620-2-43179-8. pp 286.

SIGNUS (2017). Guía para la fabricación y puesta en obra de mezclas bituminosas con polvo de neumático. Sistema colectivo de gestión de neumáticos fuera de uso. Madrid, España. ISBN 13 978-84-616-9263-7. pp 35.

Uguet, M., Larsen, D., Williams, E., Nosetti, A., Morano, P., Perazo, A. (2020). Arena asfalto como sistema antirreflejo de fisuras en la provincia de buenos aires. Congreso (virtual): XXXIX reunión del asfalto. Encuentro binacional argentino - paraguay. Argentina. a0075. pp 15. <http://cpasfalto.com.ar/xxxix-reunion-del-asfalto-presentaciones/#1615905458736-9c8f7caa-e585>

UNE EN 12697-26 (2006). Método de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Rigidez. Test methods for hot mix asphalt. Stiffness. Asociación española de normalización y certificación. España. pp 26.

UNE-EN 12697-22 (2008). Método de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Ensayo de rodadura. Test methods for hot mix asphalt. Wheel tracking. Asociación española de normalización y certificación. España. pp 32.