



# Valoración inicial de mezclas asfálticas retardante de fisuras reflejas elaboradas con asfaltos con alta incorporación de NFU

Initial assessment of asphalt mixtures reflective cracking retarder made with asphalt with high incorporation of NFU

Fecha de entrega: 25 de abril 2023

Fecha de aceptación: 3 de julio 2023

Adrián Segura<sup>1</sup>, Gerardo Botasso<sup>2</sup>, Belén Raggiotti<sup>1</sup>, Ignacio Zapata<sup>2</sup> y Oscar Rebollo<sup>2</sup>

<sup>1</sup> CINTEMAC, Universidad Tecnológica Nacional, Maestro López esq. Cruz Roja Argentina, Ciudad Universitaria, Córdoba, Argentina, asegura@frc.utn.edu.ar, braggiotti@frc.utn.edu.ar

<sup>2</sup> LEMAC, Universidad Tecnológica Nacional, Avda. 60 y 124, La Plata, Argentina, gbotasso@frlp.utn.edu.ar, izapata@frlp.utn.edu.ar, orebollo@frlp.utn.edu.ar

*El deterioro prematuro de los pavimentos debido a la aparición de fisuras que se reflejan de capas inferiores suele ser uno de los problemas frecuentes en las tareas de rehabilitación. Mejorar el desempeño y durabilidad de las capas de refuerzos, retrasando la aparición de fisuras, contribuye a prolongar la vida útil de dichas estructuras. Esto se ha tratado estudiando diferentes alternativas tecnológicas, considerando distintos materiales interpuestos entre las fisuras y las nuevas capas asfálticas colocadas. Es por todo esto que, en la búsqueda de nuevos materiales que sean capaz de aportar a la situación mencionada y analizar alternativas de mayor reuso de neumáticos fuera de uso (NFU), en este trabajo se ha evaluado distintos tipos de mezclas, elaboradas con asfaltos modificados con alta tasa de NFU. El análisis del comportamiento de ellas, ha permitido compararlas y determinar la que presenta el mejor desempeño para demorar la reflexión de las fisuras en superficie.*

*Palabras clave: neumáticos, asfalto, mezcla, retardo de fisuras*

*The premature deterioration of pavements due to the appearance of cracks that are reflected from lower layers is usually one of the frequent problems in rehabilitation tasks. Improving the performance and durability of the reinforcement layers, delaying the appearance of cracks, contributes to prolonging the useful life of those structures. This has been addressed by studying different technological alternatives, considering different materials interposed between the cracks and the new asphalt layers placed. It is for all this that, in the search for new materials that are capable of contributing to the aforementioned situation and analysing alternatives for greater reuse of end-of-life tires (NFU), in this work different types of mixtures have been evaluated, made with modified asphalts with high NFU rate. The analysis of their behaviour has made it possible to compare them and determine which presents the best performance for delaying the reflection of cracks on the surface.*

*Keywords: tires, asphalt, mixture, crack retardation*

## Introducción

El neumático, una vez que llega a agotar su vida útil, su caucho se puede reciclar para diferentes usos, como pueden ser elementos cortados directamente del mismo, energía en hornos de cemento o también como adición en el proceso de modificación de los asfaltos para la elaboración de mezclas asfálticas. Este elastómero no es virgen, ha-

biendo experimentado un cambio en su respuesta frente a estados de sollicitación con deformaciones menos flexibles. Algunas toneladas son utilizadas en algunos de los usos antes mencionados, pero también se depositan en naves y espacios abiertos a la espera de un tratamiento que no siempre llega. Esta acumulación da lugar a la aparición de roedores e insectos como mosquitos e incendios de difi-



cil control. Por otro lado, si estos neumáticos tienen como destino final su disposición en vertederos, trae inconvenientes por su forma y composición, ya que no pueden ser fácilmente compactados, ni se descomponen y, por lo tanto, consumen cantidades considerables de espacio en los vertederos (Lund, 1996).

Por otro lado, en la búsqueda de obtener asfaltos con altas prestaciones elásticas, en los últimos años, se han estudiado distintos modificadores de los asfaltos. El polvo de (NFU) ha sido uno de ellos, siendo tasas del orden del 8% las experiencias realizadas en Argentina (e.g. Botasso y Segura, 2013). Con el objetivo de obtener mejoras en las propiedades mencionadas, en la presente investigación se ha estudiado una mayor incorporación de NFU y su aplicación en mezclas retardantes de la fisuración refleja.

Por otra parte, los pavimentos asfálticos presentan distintos tipos de fallas, que afectan a la calidad y las propiedades de sus materiales. Las más frecuentes son las de deformaciones permanentes (ahuellamiento), el agrietamiento por fatiga, el agrietamiento térmico y la fisuración refleja.

El agrietamiento por fatiga se puede deber a varias causas; entre las que se encuentra el paso del tránsito, el envejecimiento que sufre la mezcla asfáltica durante el transcurso de su vida útil, la presencia de humedad en las capas del pavimento o una pobre calidad de materiales que la componen. Con la iniciación de las fisuras, el sucesivo paso de los vehículos genera que el deterioro de la carpeta de rodamiento prosiga, propagándose la plantilla de fisuras y observándose un entramado de las mismas, lo cual se conoce vulgarmente como “piel de cocodrilo”.

La fisuración refleja se puede definir como la discontinuidad que aparece en la capa asfáltica dispuesta como refuerzo en un pavimento existente, es decir que resulta de una prolongación ascendente de la fisura que presenta la capa inferior y que puede no corresponder a fallas del paquete estructural (Rodríguez y Montestruque, 2010). Estas constituyen no sólo un problema estético sino fundamentalmente una vía posible para la entrada del agua hacia las capas inferiores del pavimento, ocasionando degradaciones que afectan la regularidad superficial y, por lo tanto, la comodidad y la seguridad en el tránsito. También es importante mencionar que esencialmente generan una disminución en la capacidad portante de las capas inferiores, sub-base y

sub-rasante, disminuyendo de esta manera notablemente la vida en servicio del camino (Francesio, 2001).

Una fisura subyacente a la capa asfáltica puede actuar de dos formas independientes para provocar su reflexión. Una de ellas es cuando se verifica roce entre la capa de refuerzo y el pavimento existente, lo cual genera a baja temperatura una concentración de tensiones en la región de la extremidad de la fisura que provoca a su vez la abertura de una nueva fisura en la capa de refuerzo.

El deterioro prematuro de los pavimentos debido a la aparición de fisuras reflejas, por rotura rápida de las capas colocadas para tal fin, ocasiona reiteradas tareas de mantenimiento en las carpetas de rehabilitación colocadas sobre ellas, generando incrementos en los costos de conservación de estas estructuras. En búsqueda de mejorar esta situación, se han interpuesto geogrillas y geosintéticos en dichas capas, implicando mayores costos que, en algunos proyectos, puede resultar prohibitivo. Las mezclas más utilizadas para esto, han sido las arenas-asfalto (AA) de granulometría continua y que pueden ser elaboradas con asfalto convencional. Además, permiten corregir deterioros superficiales, restituir gálibos, entre otros; pero en reiteradas ocasiones han fallado de manera temprana frente a la propagación de fisuras. Se genera así la necesidad de mejorar el desempeño de esta mezcla, para lo cual se las han elaborado a partir de asfaltos modificados. En ese sentido en el presente estudio se ha evaluado el desempeño de la mismas, a partir de una elaborada con asfalto convencional (AA CA30), otra fabricada con modificado con polímero virgen (AA AM3) y otra con NFU (AA NFU). Esta última presenta como dificultad que, dada su granulometría continua, alto contenido de finos y su fabricación con un asfalto con elevada tasa de NFU, no posee una adecuada cantidad de vacíos para alojar dicha proporción de NFU; lo cual se puede ver en los resultados de una menor densidad y vacíos. Esto trae aparejado una disminución de su capacidad de resistencia al ahuellamiento y frente a las otras dos AA un mejor desempeño a la propagación de fisuras. En la búsqueda de alternativas para mejorar estas dos características que se tensionan, y considerar una mezcla que posea una mayor capacidad de alojar la alta tasa de NFU, se evalúan mezclas con granulometría discontinua y que deben ser elaboradas con asfalto modificado. Estas presentan un menor ahuellamiento y poseen una mayor proporción de



vacíos capaces de albergar al NFU. Asimismo, estos espacios ocupados parcialmente por el mastic, formado por los finos y el ligante modificado con NFU, generan un medio que dificulta el crecimiento de la fisura. Esto debido, a que ese medio está formado por una proporción de mastic respecto de los vacíos que, junto con la mejor elasticidad del ligante, permite a estas mezclas disipar mejor la energía y disminuir la velocidad de ascenso de las fisuras.

En esa línea, se plantea un estudio de mezclas de discontinuidad creciente en la búsqueda de observar lo antes mencionado. Por ello, se evalúa un microconcreto discontinuo en caliente (MAC), uno elaborado con NFU (MAC NFU) y otro con polímero virgen (MAC AM3). También, avanzando en una mayor discontinuidad, se considera otra propuesta dada por CEDEX (2007) (propuesta: España), una elaborada con NFU (España NFU) y otra con polímero virgen (España AM3). La valoración de la capacidad de disminuir la velocidad de ascenso de las fisuras, se ha realizado en probetas ensayadas con la metodología del modelo de reflejo de fisuras con equipo de cargas cíclicas (MR) LEMaC. La determinación se ha realizado en probetas rectangulares fabricada con cada una de las mezclas. Las mismas han sido consideradas en una aproximación inicial, ya que la evaluación final se debe 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.

En síntesis, una mezcla para retardo de fisura 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 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.

## Materiales y métodos

Los materiales utilizados para el desarrollo experimental, han sido polvo de caucho de NFU, ligante asfáltico convencional y modificado (AM3) 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.

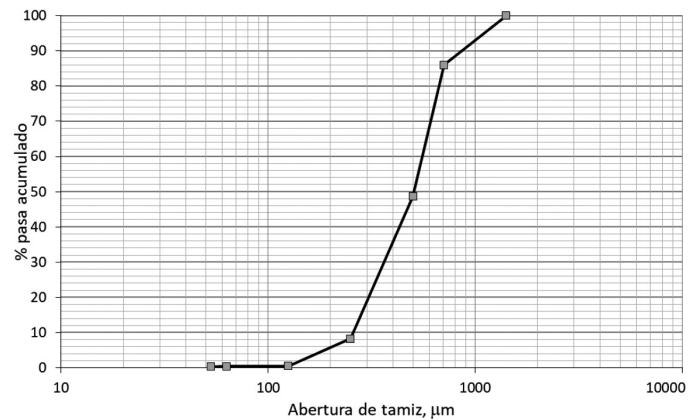


Figura 1: Granulometría del polvo de NFU

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 dispersor y se lo muestra en la Figura 2.



Figura 2: Equipo dispersor



La dispersión se realizó incorporando el polvo de neumático en el asfalto colocado en la cuba inferior a temperatura para comenzar el mezclado. La incorporación se hizo en aproximadamente 5 min y el tiempo total en el equipo fue de 60 min. La velocidad a la cual se elaboraron las dispersiones estuvo entre 7000-7500 RPM y la temperatura entre 180 y 190°C. Posteriormente se procedió a la determinación de la penetración, punto de ablandamiento y viscosidad rotacional a 135°C y 170°C.

En los asfaltos utilizados, se realizó los ensayos antes mencionados y también un barrido de temperatura con el reómetro de corte dinámico siguiendo AASHTO M320-10 (2022). Así es posible determinar los parámetros calculados a partir de ensayos oscilatorios. La magnitud del módulo complejo de corte ( $G^*$ ) y el ángulo de fase ( $\delta$ ) está relacionada con la resistencia total a la deformación ante una carga y la distribución relativa de la deformación elástica y viscosa. Estos parámetros presentan una variación importante con cambios de temperatura y tiempo de carga. La metodología SUPERPAVE (Asphalt Institute, 2003), que es un sistema para especificar ligantes asfálticos, agregados, diseño de mezclas y predicciones del comportamiento de la misma, el cual involucra procedimientos para la selección cuidadosa de materiales, establece que el parámetro  $G^*/\sin\delta$  es el parámetro de control de la deformación permanente. En la Figura 3a y 3b, se puede ver el equipo utilizado y la pastilla de ensayo, respectivamente.



Figura 3: a) Equipo reómetro de corte dinámico y b) pastilla de ensayo de asfalto con NFU

Los agregados utilizados tienen un rango de tamaños de 0 a 3 mm, 0 a 6 mm y 6 a 12 mm; de estos se realizaron sus respectivas granulometrías y se utilizaron para la con-

formación de las diferentes curvas granulométricas de las distintas mezclas estudiadas. Estas surgieron como consecuencia de las experiencias realizadas y trabajos previos (Borreli, 2020; PP1200, 2001; Uguet *et al.*, 2020; PET, 2017; Gallego y Saiz, 2017; Segura *et al.*, 2018; Segura *et al.*, 2022), siendo una arena asfalto (AA), un microconcreto discontinuo en caliente (MAC) y otra (propuesta: España) a partir de curvas límites del CEDEX (2007) que las menciona para tal fin.

En el caso de la AA se analizaron diferentes curvas límites y casos de aplicación con el fin de encontrar una curva a utilizar en la experiencia. En la Figura 4 se puede ver en color verde las curvas límites Uruguay que fueron utilizadas en la aplicación de un caso de rehabilitación de una ruta de acceso en Montevideo Uruguay (Borreli, 2020). Asimismo, las curvas celestes La Plata corresponden a curvas límites, utilizadas en PET (2001). Luego la curva en amarillo Bs. As. pertenece a un caso de aplicación de una arena asfalto como sistema antirreflejo de fisura en la provincia de Buenos Aires Argentina (Uguet *et al.*, 2020). Por último, la curva en negro UPM es un mortero bituminoso utilizado en experiencias en el laboratorio de la Universidad Politécnica de Madrid. La curva roja AA es la utilizada para la elaboración de las arenas asfalto para la experiencia. Esta fue adoptada luego de intentar encuadrar dentro los límites, curvas verdes Uruguay, comparando la similitud con los casos antes mencionados Bs. As. y UPM y considerando los límites de las curvas celestes, La Plata. Se puede observar que estas últimas, contiene a la mayoría de los puntos de las otras curvas. Es por todo esto y teniendo en cuenta la granulometría de los áridos locales disponibles, se conformó la curva roja propuesta.

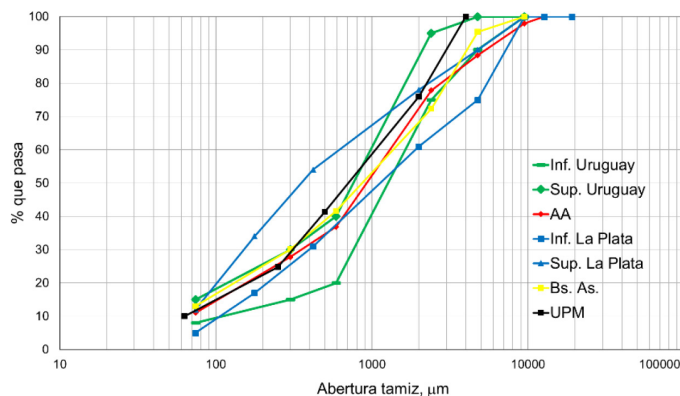


Figura 4: Curvas granulométricas de agregados AA analizadas y adoptada (Inf.: inferior; Sup.: superior)



En cuanto al MAC se procedió de manera similar al caso anterior. En la Figura 5 se puede ver de color negro las curvas límites MAC F10, las mismas corresponden al PET (2017). También la de color amarillo España A, es mencionada por Gallego y Saiz (2017), para uso como retardante de fisuras reflejas. Asimismo, la España A modificada que corresponde a la recién mencionada, pero que fue modificada por Segura *et al.* (2022), en experiencias realizadas en el laboratorio de la Universidad Politécnica de Madrid. La curva verde Propuesta: MAC F10, definida por Segura *et al.* (2018), fue elaborada con una menor cantidad de NFU y para valorar sus características superficiales. Esta curva fue la seleccionada para la realización de los MAC en la presente investigación, a partir de observar la similitud con los otros dos casos España A y A modificada, que se encuentra contenida dentro de las curvas límites de color negro MAC F10 y la posibilidad de conformarla con la granulometría de los áridos locales disponibles.

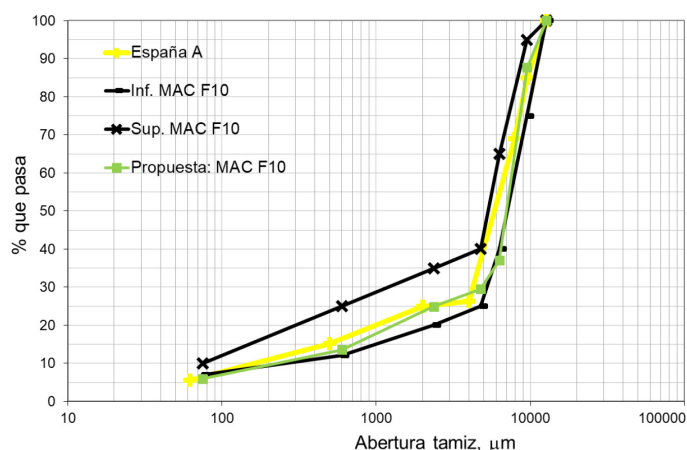


Figura 5: Curvas granulométricas de agregados MAC analizadas y adoptada (Inf.: inferior; Sup.: superior)

La tercera mezcla valorada, ha sido mencionada antes como Propuesta: España y ésta se adoptó construyéndola a partir de los límites superior e inferior del manual español CEDEX (2017), curvas celestes España B, como se muestra en la Figura 6. Esta construcción se realizó separando en fracciones por tamizado del agregado y colocar un porcentaje intermedio entre dichos límites. Esto se debió a la complejidad de obtener una curva resultante a partir de la mezcla de otros de uso frecuente y disponibles, que encuadre dentro de los reducidos entornos de las curvas España B.

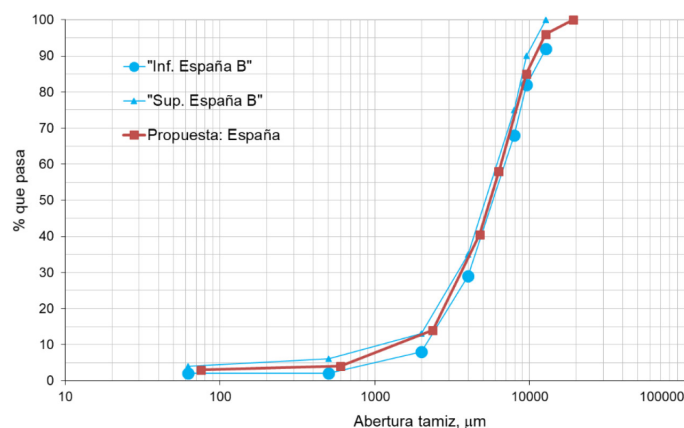


Figura 6: Curvas granulométricas de Propuesta España analizadas y adoptada

Se puede observar en las Figuras 4, 5 y 6 que las tres curvas adoptadas para la realización de la experiencia, AA, MAC F10 y España, presentan una creciente discontinuidad granulométrica, es decir, granulometría no uniforme con una mayor ausencia de tamaños intermedios. Esto se puede ver en el marcado cambio de la curva de aproximadamente una línea, la AA, hasta una de dos tramos, la España.

En cuanto a la dosificación de la cantidad de ligante a incorporar en cada una de las mezclas, fue establecido según los desarrollos y trabajos llevados a cabo anteriormente (Gallego y Saiz, 2017; Segura *et al.*, 2022; Uguet *et al.*, 2020) y buscando que los parámetros mecánicos y volumétricos se encontraran dentro de 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.

Tabla 1: Designación de mezclas asfálticas elaboradas

Ligante/ Granulometría	AA	MAC	España
CA30	AA CA30	-	-
CA30+24%NFU	AA NFU	MAC NFU	España NFU
AM3	AA AM3	MAC AM3	España AM3

Luego se fabricaron probetas Marshall de cada una de las siete mezclas, como se puede ver en la Figura 7, para la determinación de los parámetros mecánicos y volumétricos y la resistencia a daños por humedad inducidos. Esta



última se hizo siguiendo AASHTO T283 (2022) y en las Figuras 8a, 8b y 8c se presentan el acondicionamiento, saturación y ensayo en prensa a tracción indirecta de las mismas, respectivamente. Asimismo, se fabricaron probetas para la determinación del ahuellamiento siguiendo la norma UNE-EN 12697-22 (2008) para cada una de las mezclas, tal como se observa en las Figuras 9a y 9b (Botasso y Segura, 2013).



Figura 7: Probetas Marshall

La valoración de la propagación de la fisura se realizó sobre probetas rectangulares de 30 cm de largo, 10 cm de ancho y 5 cm de espesor. Las mismas fueron obtenidas cortando las del ensayo de ahuellamiento, Figura 10a, siendo esto una primera aproximación en la determinación del comportamiento estudiado. La metodología se hizo a través del modelo de reflejo de fisuras con equipo de cargas cíclicas (MR) LEMaC, que fue evaluado y utilizado por Delbono (2014). La misma utiliza el equipo de módulo dinámico, Figura 10b, descrito en la Norma UNE EN 12697-26 (2006), adaptándolo al denominado Módulo de Rigidez (MR). Este consta de un actuador neumático que posibilita la variación de cargas a diferentes frecuencias y el acondicionamiento de todo el equipo y muestra a la temperatura de ensayo deseada. En la Figura 10c, se observa el inicio de la fisura en una de las mezclas estudiadas.

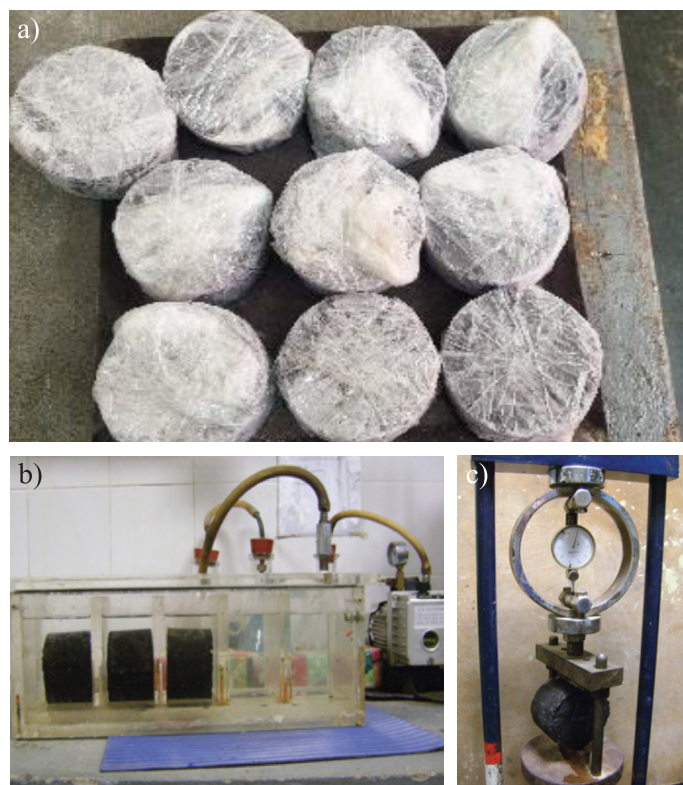


Figura 8: a) Acondicionamiento de probetas, b) saturación de probetas y c) ensayo a tracción indirecta de probetas

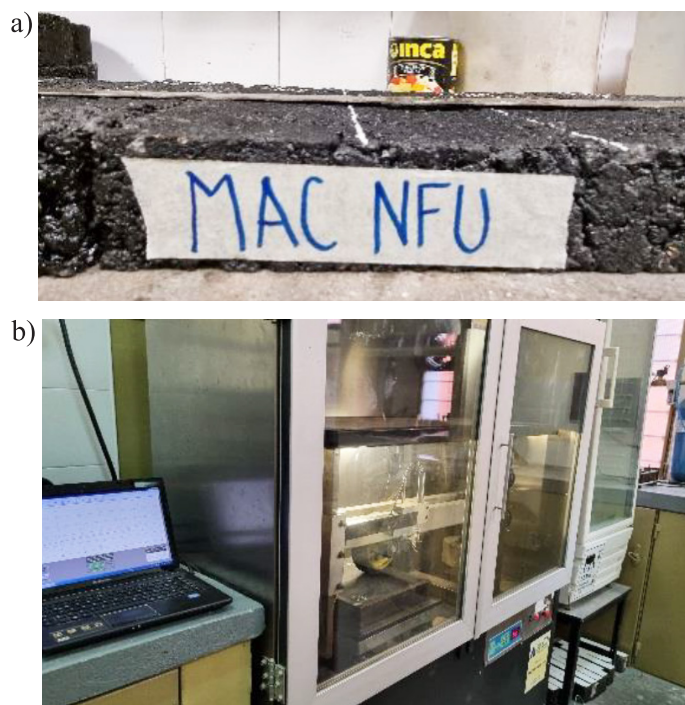


Figura 9: a) Probeta para ensayar ahuellamiento y b) equipo de ensayo de ahuellamiento



Figura 10: a) Corte de probetas, b) equipo de módulo y c) ensayo e inicio de fisura

## Resultados y discusión

Los resultados de los ensayos de los asfaltos se muestran en la Tabla 2, en donde se ha incorporado la temperatura alcanzada para 1 kPa de  $G^*/\text{sen } \delta$ , siendo éste el primer criterio de Superpave (Asphalt Institute, 2003). En la Figura 11 se muestra la variación de  $G^*/\text{sen } \delta$  para diferentes temperaturas obtenido en el reómetro.

Tabla 2: Ensayos en asfaltos

Ligante/ Ensayo	Penet., 0.1 mm	PA, °C	Visc. 60°C, dPa.s	Visc. 135°C, mPa.s	Visc. 170°C, mPa.s	$G^*/$ $\text{sen } \delta$ , 1 kPa, °C
CA30	60	48	3450	503	-	70
CA30+24% NFU	28	67	-	10459	2200	88
AM3	52	76	-	-	580	82

Penet.: penetración; PA: punto de ablandamiento; Visc.: viscosidad

Estos muestran una fuerte modificación del asfalto base al incorporar una tasa del 24% de NFU. Esto se evidencia en

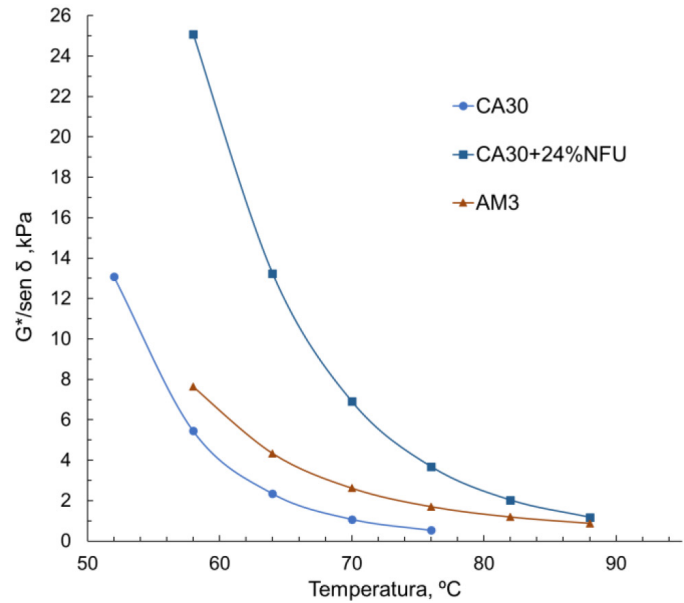


Figura 11: Variación de  $G^*/\text{sen } \delta$  a diferentes temperaturas para los tres ligantes asfálticos

un aumento del punto de ablandamiento PA, disminución de la penetración y en el aumento de la temperatura para el valor de 1 kPa de  $G^*/\text{sen } \delta$ . Estos resultados para el asfalto con NFU permiten mencionar que son los esperados para lograr un mejor desempeño elástico del ligante en la elaboración de mezclas.

En la Tabla 3 se presentan los resultados obtenidos de parámetros volumétrico y mecánicos, realizados a las diferentes mezclas siendo éstos: la densidad, vacíos, relación de los esfuerzos tensional (TSR), entre los grupos de probetas acondicionadas y las no acondicionadas, y ahuellamiento. Asimismo, de los tres primeros se muestran gráficos para su comparación en las Figuras 12, 13 y 14; para el último parámetro se ha construido un gráfico para cada grupo de mezcla, ver Figuras 15, 16 y 17.

Tabla 3: Ensayos en las mezclas asfálticas

Mezcla/ Ensayo	Ligante, %	Densidad, kg/dm <sup>3</sup>	Vacíos, %	TSR, %	Ahuellamiento, mm
AA CA30	6.8	2.378	3.73	84	2.62
AA AM3	6.8	2.363	3.53	91	1.75
AA NFU	9.0	2.311	2.51	83	3.69
MAC AM3	5.0	2.398	4.11	90	1.92
MAC NFU	8.0	2.358	2.84	82	1.29
España AM3	5.0	2.331	5.17	88	2.11
España NFU	8.0	2.228	6.86	81	2.72

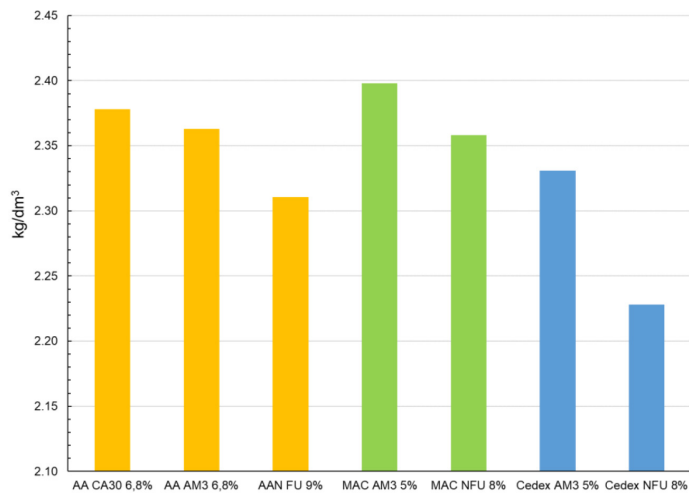


Figura 12: Densidad Marshall de cada tipo de mezcla

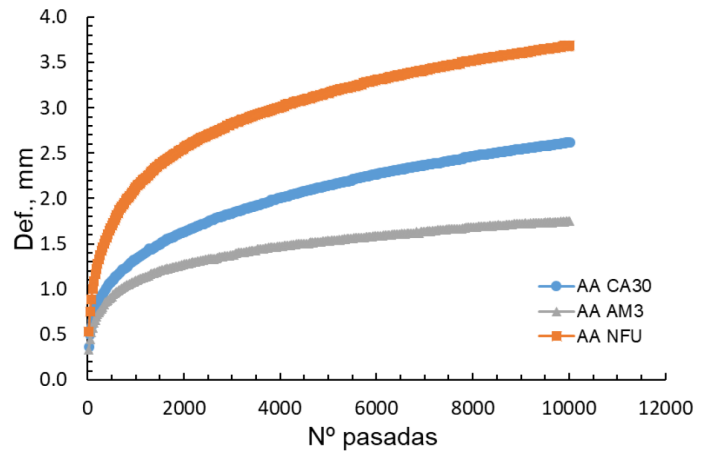


Figura 15: Curva de ahuellamiento para las mezclas AA y tipo de ligante asfáltico (wheel tracking test WTT)

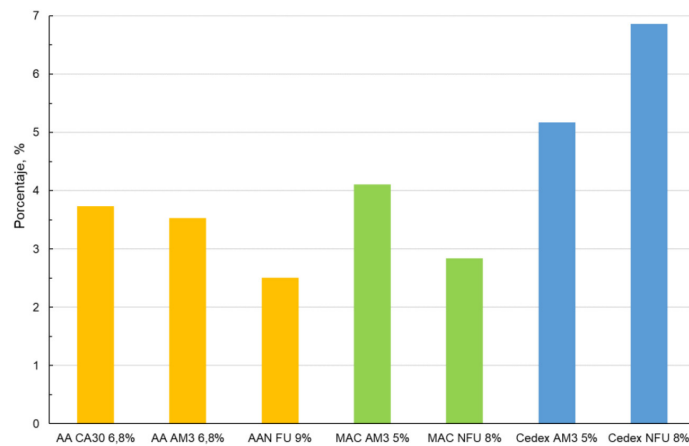


Figura 13: Vacíos de cada tipo de mezcla

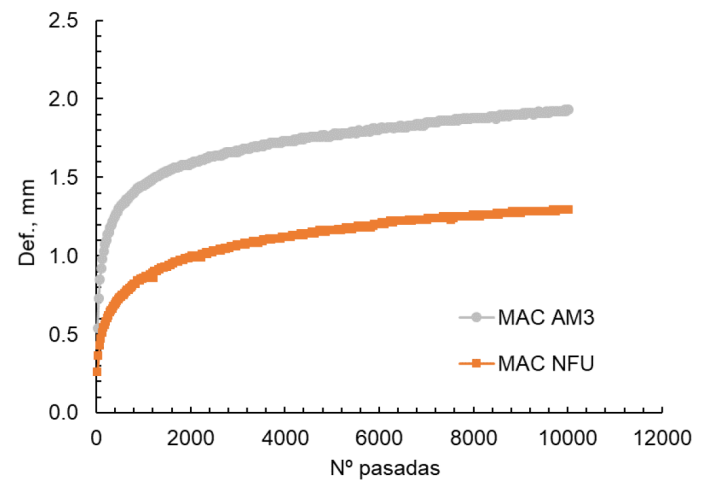


Figura 16: Curva de ahuellamiento para las mezclas MAC y tipo de ligante asfáltico (wheel tracking test WTT)

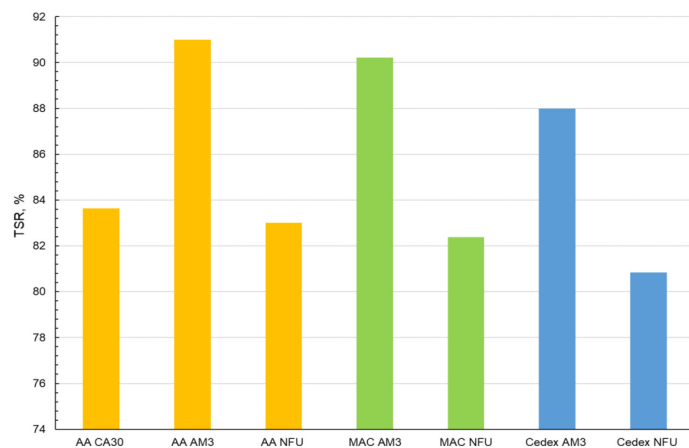


Figura 14: Test de Lottman de cada tipo de mezcla

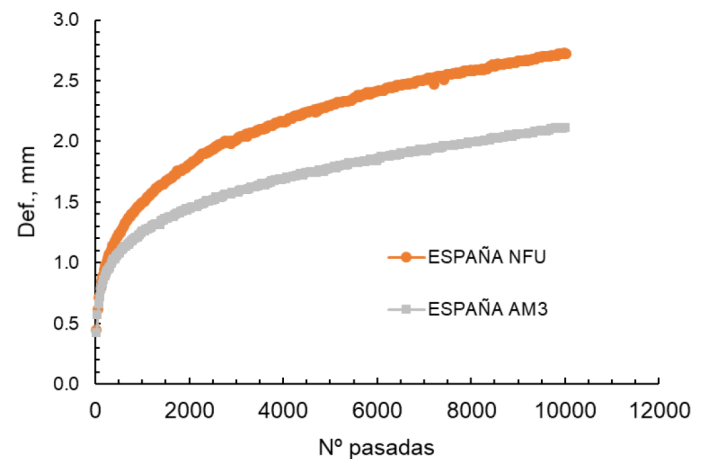


Figura 17. Curva de ahuellamiento para las mezclas España y tipo de ligante asfáltico (wheel tracking test WTT)

La valoración de la propagación de la fisura se realizó según la metodología descrita antes y siendo esto una primera aproximación, se tomaron los valores de ensayos





expresados en la Tabla 4, iguales para todas las mezclas, en donde también están los resultados obtenidos para cada una de ellas. Asimismo, para una mejor visualización se presentan graficados en la Figura 18.

Tabla 4: Propagación de fisura en las mezclas asfálticas

Mezcla/Ensayo	Frecuencia, Hz	Temperatura, °C	Carga, kg	Inicio fisura, ciclos	Rotura, ciclos
AA CA30	0.33	25	82	100	390
AA AM3				250	412
AA NFU				570	956
MAC AM3				670	2470
MAC NFU				1900	5244
España AM3				11	93
España NFU				180	295

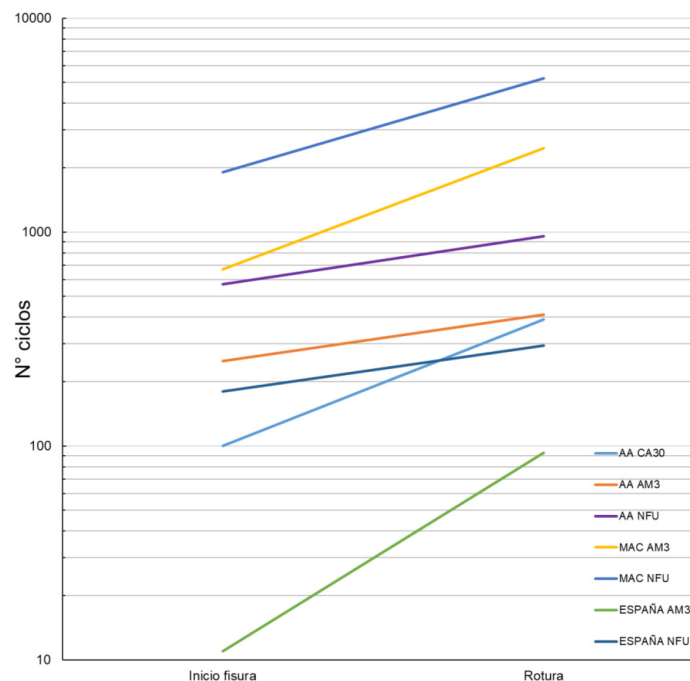


Figura 18: Curva de inicio de fisura y rotura para las diferentes mezclas

En la AA se observa que la con NFU presenta un valor menor de densidad, vacíos y TSR, respecto de las otras dos mezclas AA. Asimismo, el menor ahuellamiento de las tres AA se obtuvo para la realizada con AM3.

En los MAC las densidades se encuentran cercanas entre el AM3 y NFU, siendo levemente inferior la mezcla con NFU, y los vacíos de este último es menor. Esto se estima que esté relacionado con su estructura granular permitien-

do alojar el NFU sin disipar la energía de compactación y también por el mayor porcentaje de ligante. Asimismo, en éste, la menor presencia de vacíos muestra un TSR con un valor aceptable y cercano al obtenido al MAC AM3. Por otro lado, el ahuellamiento muestra un valor inferior en el MAC NFU, esto puede estar relacionado a su estructura granular que interactúa con el ligante con NFU y a la elevada tasa del mismo.

En cuanto a España NFU, presenta una menor densidad y vacíos mayores, esto se estima sea por su granulometría, y se evidencia una menor resistencia TSR y un mayor ahuellamiento. En este último, además se observa que la curva muestra una tendencia de crecimiento. En cambio, en las otras mezclas se observa un menor crecimiento en todo el tramo último de la curva, siendo esto más evidente en los MAC.

El gráfico de propagación de fisura muestra que el MAC NFU admitió el mayor número de ciclos hasta la rotura respecto de todas las otras mezclas. Asimismo, para cada grupo de mezcla la que fue elaborada con NFU resistió mayor cantidad de ciclos para alcanzar la rotura. También se desprende que cada familia de curvas presenta una tendencia a una similar pendiente entre ellas. Estos desempeños están asociados a la mayor capacidad elástica que presenta el ligante con NFU, las densidades, vacíos y estructura granular de las distintas mezclas.

## Conclusiones

Los parámetros evaluados como la penetración, punto de ablandamiento,  $G^*/\text{sen}\delta$  en el ligante con NFU, muestran que se ha logrado una fuerte modificación en el asfalto base.

La elaboración de los tres tipos de mezclas estudiados con asfalto con NFU muestran que en todas se produce una disminución de sus densidades. Esto se estima sea la respuesta que produce el efecto rebote del equipo de compactación por la presencia del NFU.

Una mayor temperatura del  $G^*/\text{sen}\delta$  para el CA30+24% NFU, evidencia un mejor desempeño elástico y que asociado a la granulometría del MAC NFU da como resultado un menor ahuellamiento.

El mayor valor de  $G^*/\text{sen}\delta$  en CA30+24% NFU no se ve reflejado en un menor ahuellamiento en la AA NFU. Esto



se estima se deba a que por su granulometría continua y agregado fino no es capaz alojar la cantidad de NFU, generando una disipación de energía en la compactación trasladándose a una menor densidad y mayor ahuellamiento y un menor TSR.

En la mezcla España NFU se observa un ahuellamiento levemente mayor respecto que con AM3. Esto puede deberse a que su granulometría proporciona mayor cantidad de vacíos, posee menor cantidad de finos que colabore con el mastic, generando una estructura con una menor capacidad de resistencia al ahuellamiento que en el MAC NFU.

Todas las mezclas elaboradas con CA30+24 NFU presentan mayor cantidad de ciclos para la rotura respecto a las otras mezclas.

El ligante con NFU asociado a una estructura granular discontinua, con presencia de gruesos y una adecuada cantidad de finos, como es el caso de MAC NFU, admite una mayor cantidad de ciclos hasta la rotura. Esto se estima se deba a que la fisura encuentra a su paso un mastic asfáltico más elástico que ocupa los vacíos de esta mezcla, disipando la energía y disminuyendo su rapidez de ascenso.

El MAC AM3 presenta menor cantidad de ciclos respecto del MAC NFU. Esto se estima a que el primero, presenta una mayor proporción de vacíos y en ellos hay una menor cantidad de mastic asfáltico, con un asfalto con menor capacidad elástica y por esto menor capacidad de disipar la energía de la fisura.

Entre las mezclas AA, MAC y España elaboradas con CA30+24% NFU, se observa un incremento de vacíos, una creciente discontinuidad granulométrica y una mayor proporción de vacíos respecto a la cantidad de mastic, respectivamente. Asimismo, el MAC NFU es la que más ciclos admitió hasta llegar a la rotura. Se estima que un aumento de la cantidad de vacíos que contengan un mastic asfáltico más elástico colabora a resistir más ciclos de carga. Esto último se considera que sucede hasta cierto incremento de vacíos, ya que en España la cantidad de ciclos es menor.

Una adecuada relación mastic asfáltico sobre vacíos, elaborado con un asfalto con mejor capacidad elástica observado en el  $G^*/\sin\delta$ , permitiría obtener una mayor cantidad de repeticiones de carga hasta la rotura, tal como muestra el MAC NFU. Una variación de dicha relación se

traduciría en una menor capacidad, siendo la más desfavorable aquella que presenta una elevada cantidad de vacíos respecto al mastic disponible.

De acuerdo a los resultados mostrados, el MAC NFU se presentaría como una buena alternativa para sistemas de retardo de fisura frente a las tradicionales mezclas AA usadas. Siendo esto un comportamiento a continuar evaluando mediante otros ensayos y modelos que permita continuar evidenciando dicho desempeño.

## Referencias

AASHTO M320-10 (2022). Standard specification for performance – Graded asphalt binder. American Association of State Highway and Transportation Officials AASHTO, Washington DC, USA

AASHTO T283 (2022). Standard method of test for resistance of compacted asphalt mixtures to moisture-induced damage. American Association of State Highway and Transportation Officials AASHTO, Washington DC, USA

Asphalt Institute (2003). Superpave. Performance graded asphalt binder specification and testing. 3<sup>rd</sup> ed., Lexington KY, USA

Borreli, M. (2020). Rehabilitación en mezcla asfáltica- Ruta 1 doble vía Acceso a Montevideo. *Jornada del Asfalto* (virtual), Asociación Uruguaya de Caminos, 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 (CEDEX). Ministerio de Medio Ambiente y de Fomento de España. Madrid, España

Delbono, H.L. (2014). *Estudio de grillas poliméricas en sistemas anti-reflejo de fisuras bajo solicitaciones dinámicas*. Tesis doctoral, Universidad Tecnológica Nacional, La Plata, Buenos Aires, Argentina

Francesio, C.A. (2001). El control de la fisuración refleja. *XI CILA – Congreso Iberoamericano del Asfalto*, Lima, Perú

Gallego, J. y Saiz, L. (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, SIGNUS. Madrid, España



- IRAM 6835 (2020). Asfaltos para uso vial. Clasificación por viscosidad – Requisitos. Instituto Argentino de Normalización y Certificación. Buenos Aires, Argentina
- Lund, H.F. (1996). Manual McGraw-Hill de Reciclaje. Vol. I. Interamericana, Madrid, España
- PET (2017). Pliego de especificaciones técnicas generales para microaglomerados asfálticos en caliente y semicaliente tipo F. Dirección Nacional de Vialidad (DNV), Argentina
- PET (2001). Pliego de especificaciones técnicas. Plan de pavimentación 1200 cuadras. Municipalidad de La Plata. Buenos Aires, Argentina
- PP1200 (2001). Plan de pavimentación 1200 cuadras. Pliego de especificaciones técnicas. Municipalidad de La Plata, Buenos Aires, Argentina
- Rodríguez, R. y Montestruque, G. (2010). Implementación computacional de un modelo para la previsión de la propagación de fisuras en recapados asfálticos. Tomo 1. *Congreso Comisión Permanente del Asfalto CPA*, Sao Pablo, Brasil
- Segura, A., Gallego, J., Botasso, G. and Raggiotti, B. (2022). Evaluation of anti-reflective cracking mixtures made with high NFU asphalts. *Congress Rubberized Asphalt - Asphalt Rubber RAR2022*, Málaga, España. Locape - Artes gráficas Lda., Portugal
- Segura, A., Positieri, M. y Botasso, G. (2018). *Utilización de asfalto modificado con NFU. Elaboración de un microconcreto discontinuo en caliente*. Volumen I, Publicia, Londres, Reino Unido
- Uguet, M., Larsen, D., Williams, E., Nosetti, A., Morano, P. y 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, <http://cpasfalto.com.ar/xxxix-reunion-del-asfalto-presentaciones/>
- 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, Madrid, España
- 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, Madrid, España