

Influencia del caucho de desecho de neumáticos en el rendimiento mecánico de mezclas asfálticas en caliente

C. G. L. Nunes^{1*} , P. H. S. Pereira² , R. A. Melo³ ,

J. K. G. Rodrigues⁴ , L. C. F. L. Lucena⁴ 

*Autor de Contacto: camilagluznunes@gmail.com

DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v12i3.575>

Recepción: 23/12/2021 | Aceptación: 08/07/2022 | Publicación: 01/09/2022

RESUMEN

Este trabajo tuvo como objetivo optimizar la producción de mezclas asfálticas en caliente utilizando caucho asfáltico. Para ello, se evaluó el desempeño mecánico de mezclas asfálticas producidas con diferentes ligantes: asfalto caucho comercial (AC08), asfalto caucho 10% (AC10) y 15% (AC15) de residuos de caucho y asfalto convencional (PEN 50-70). Para la composición de estas mezclas, el contenido óptimo de asfalto fue definido por el método Marshall. Para la realización de las pruebas mecánicas se ensayaron probetas moldeadas con compactadores Marshall y Superpave. De los resultados obtenidos se encontró que las mezclas con AR08 y AR10, compactadas con Superpave, presentaron el mejor desempeño mecánico. Sin embargo, el ligante AR08 ya está disponible en el mercado, lo que facilita su uso en trabajos de pavimentación.

Palabras clave: mezcla asfáltica en caliente; asfalto de caucho; *Marshall*; *Superpave*.

Citar como: Nunes, C. G. L., Pereira, P. H. S., Melo, R. A., Rodrigues, J. F. K. G., Lucena, L. C. F. L. (2022), “Influencia del caucho de desecho de neumáticos en el rendimiento mecánico de mezclas asfálticas en caliente”, Revista ALCONPAT, 12 (3), pp. 362 – 377, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v12i3.575>

¹ Ph.D. student of the Graduate Program in Civil and Environmental Engineering, Federal University of Paraíba, João Pessoa, Brazil.

² Master's student of the Graduate Program in Civil and Environmental Engineering, Federal University of Paraíba, João Pessoa, Brazil.

³ Department of Civil Engineering, Federal University of Paraíba, João Pessoa, Brazil.

⁴ Department of Civil Engineering, Federal University of Campina Grande, Campina Grande, Brazil.

Contribución de cada autor

En este trabajo, C. G. L. Nunes contribuyó con la conceptualización (50%), experimentación (60%), análisis (100%) y redacción del borrador original (100%). P. H. S. Pereira contribuyó a la actividad de experimentación en un 40%. R. A. Melo contribuyó con la conceptualización (50%), orientación (100%) y redacción - revisión y edición (70%). J. F. K. G. Rodrigues contribuyó con recursos para la realización de los experimentos (50%). L. C. F. L. Lucena contribuyó con la redacción - revisión y edición (30%) y recursos para la realización de los experimentos (50%).

Licencia Creative Commons

Los derechos de autor (2022) son propiedad de los autores. Este trabajo es un artículo de acceso abierto publicado bajo los términos y condiciones de una licencia internacional Creative Commons Attribution 4.0 International License ([CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)).

Discusiones y correcciones posteriores a la publicación

Cualquier discusión, incluyendo la réplica de los autores, se publicará en el tercer número del año 2023 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del segundo número del año 2023.

Influence of unserviceable tires' rubber on the mechanical performance of hot mix asphalt

ABSTRACT

This work aimed to optimize the production of hot mix asphalt (HMA) from the use of asphalt-rubber. For that, the mechanical performance of asphalt mixtures produced with different binders was evaluated: commercial asphalt-rubber (AR08), asphalt crumb rubber 10% (AR10) and 15% (AR15), and conventional asphalt (PEN 50-70). For the composition of these mixtures, the optimum asphalt contents were defined by the Marshall design. To carry out the mechanical tests, specimens molded with Marshall and Superpave compactors were tested. From the results obtained, it was verified that AR08 and AR10 asphaltic mixtures, compacted with Superpave, carried out the best mechanical performance. However, the AR08 binder is already available on the market, which facilitates its usage in paving works.

Keywords: hot mix asphalt; asphalt-rubber; *Marshall*; *Superpave*.

Influência da borracha de pneus inservíveis no desempenho mecânico de misturas asfálticas a quente

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo otimizar a produção de misturas asfálticas a quente a partir da utilização de asfalto-borracha. Para isso, avaliou-se o desempenho mecânico de misturas asfálticas produzidas com diferentes ligantes: asfalto-borracha comercial (AB08), asfalto-borracha 10% (AB10) e 15% (AB15) de resíduos de borracha e asfalto convencional (CAP 50/70). Para a composição dessas misturas, os teores ótimos de asfalto foram definidos pela dosagem *Marshall*. Já para a realização dos ensaios mecânicos, foram ensaiados corpos de prova moldados com compactadores *Marshall* e *Superpave*. Pelos resultados obtidos, constatou-se que as misturas com AB08 e AB10, compactadas com o *Superpave*, apresentaram o melhor desempenho mecânico. Porém, o ligante AB08 já está disponível no mercado, o que facilita seu uso em obras de pavimentação.

Palavras-chave: Mistura asfáltica a quente; asfalto-borracha; *Marshall*; *Superpave*.

Información Legal

Revista ALCONPAT es una publicación cuatrimestral de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción, Internacional, A. C., Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310, Tel.5219997385893, alconpat.int@gmail.com, Página Web: www.alconpat.org

Reserva de derechos al uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos otorgados por el Instituto Nacional de Derecho de Autor. Editor responsable: Dr. Pedro Castro Borges. Responsable de la última actualización de este número, Unidad de Informática ALCONPAT, Ing. Elizabeth Sabido Maldonado.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor.

La reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación se realiza en apego al código COPE y a la licencia CC BY 4.0 de la Revista ALCONPAT.

1. INTRODUCCIÓN

Los neumáticos inservibles corresponden a los neumáticos usados que no pueden ser reutilizados por medio de reformas, por presentar daños irreversibles en su estructura. Estos neumáticos corresponden a una de las mayores y más problemáticas fuentes de residuos, debido al gran volumen de neumáticos producidos y al largo tiempo que tardan en descomponerse. Además, los neumáticos inservibles se convierten en amenazas para la salud humana y el medio ambiente cuando se desechan de forma inadecuada (Lo Presti, 2013).

En Brasil, la fuerte dependencia del modo viario para el transporte de cargas y personas, impulsa el mercado de neumáticos y, consecuentemente, la generación de residuos de neumáticos. Esta dependencia eleva los costos operativos de transporte, acelera la aparición de defectos en los pavimentos y la necesidad de obras de conservación y mantenimiento. Por lo tanto, el uso de asfalto caucho en las obras de pavimentación es una alternativa viable, no solo para proteger el medio ambiente, sino también para reducir los costos operativos de transporte en el país.

El asfalto caucho presenta numerosas ventajas con respecto al asfalto convencional, como menor índice de penetración, flexibilidad y ductilidad a bajas temperaturas, mayor resistencia a la deformación permanente, mayor resistencia a la aparición de grietas a bajas temperaturas y mayor resistencia a la fatiga (Yetkin, 2007; Palit *et al.*, 2004; Xiang *et al.*, 2009). Otras ventajas incluyen mayor vida útil, menores costos de conservación y mantenimiento, reducción del envejecimiento de la mezcla asfáltica y reducción del ruido del tráfico (Sol-Sánchez *et al.*, 2020; Lee *et al.*, 2008; Navarro *et al.*, 2004; Chiu *et al.* Lu, 2007; Bueno *et al.*, 2014; Ding *et al.*, 2017).

A pesar de los beneficios, el asfalto caucho todavía no es ampliamente aceptado y utilizado. Esto ocurre por dos razones. El primero es la falta de capacitación profesional, en términos de dominio de las diversas técnicas y comprensión de algunas variables (por ejemplo, contenido del caucho, dimensiones de las partículas del caucho, superficie del caucho y almacenamiento). Segundo, faltan políticas públicas locales que estimulen el uso del asfalto caucho (Lo Presti, 2013; Picado-Santos *et al.*, 2020).

El uso del asfalto caucho sigue siendo bajo en Brasil. En el país falta mano de obra especializada (Thives, 2009) y políticas públicas que incentiven el uso de ese material. Así, uno de los objetivos de este estudio fue evaluar el desempeño mecánico de mezclas asfálticas en caliente (MAC). Las mezclas se produjeron con cuatro tipos de ligantes: (i) asfalto caucho comercial (AC08), (ii) asfalto caucho 10% (AC10) y (iii) 15% (AC15) ambos producidos en laboratorio con residuos de caucho de neumáticos, y (iv) asfalto convencional, es decir, ligante asfáltico con penetración entre 50-70 (PEN 50/70), que es usual para pavimentación en Brasil. Además, el objetivo también era analizar la eficacia del *dominant aggregate size range* (DASR), método de predicción de deformación permanente en mezclas asfálticas, así como analizar la influencia del método de compactación (*Marshall* o *Superpave*) en el rendimiento mecánico de las mezclas.

En Brasil, la especificación para la selección granulométrica de las mezclas asfálticas se fundamenta en el encuadramiento de los agregados en bandas granulométricas, sugeridas por el Departamento Nacional de Infraestructura de Transportes (DNIT). Este método consiste en un procedimiento de ensayo y error, donde las proporciones de los agregados componentes de la mezcla se ajustan para el encuadre dentro de los límites de esas bandas. Por lo tanto, este método no tiene en cuenta los efectos de la distribución de agregados en el comportamiento mecánico de las mezclas asfálticas. Esto puede resultar en mezclas con menor estabilidad y menor resistencia a la deformación permanente. Por lo tanto, el concepto de porosidad DASR fue utilizado en este estudio para evaluar la deformación permanente de mezclas asfálticas.

El DASR es un método racional para seleccionar la composición granulométrica de las mezclas asfálticas. El método es de simple aplicación y utiliza uno solo parámetro, la porosidad DASR, que independiente del tamaño nominal máximo de la mezcla asfáltica. En este método, se considera

que las mezclas con porosidad superior al 50% no proporcionan una buena interacción entre los agregados, lo que las hace menos resistentes a la deformación permanente. Estudios anteriores muestran la eficiencia de la aplicación de este método para obtener un diseño adecuado, con menor propensión a desarrollar deformación permanente (Greene *et al.*, 2014; Kim *et al.*, 2009). Por lo tanto, el método DASR se utilizó para verificar la eficiencia de la elección de la composición de la matriz de agregados.

En este trabajo, el contenido óptimo de asfalto se determinó utilizando el método *Marshall*, ya que este método sigue siendo el más utilizado en Brasil. Posteriormente, para la realización de los ensayos mecánicos, los cuerpos de prueba fueron moldeados con los compactadores *Marshall* y *Superpave*. En estudios anteriores con otros materiales que también utilizaron estas dos compactaciones, se verificó que cuerpos de prueba compactados con *Superpave* tienden a presentar mejores resultados en ensayos mecánicos. Estos mejores resultados suelen atribuirse a la mayor eficiencia de la compactación por amasamiento utilizada por *Superpave*, en comparación con la compactación por impacto utilizada en *Marshall* (Assis *et al.*, 2017). Así, en este trabajo, se compararon los resultados obtenidos con las dos formas de compactación.

2. PROCEDIMIENTO

2.1 Materiales

Este estudio siguió un procedimiento experimental que se inició con la recolección de los materiales: PEN 50-70, AC08, agregados graníticos y caucho triturado de neumáticos. Estos materiales fueron donados por empresas de las regiones Noreste y Sudeste de Brasil. El caucho obtenido posee una densidad de 0,99 g/cm³, y ha sido sometido a un tamizado preliminar para eliminar partículas gruesas que podrían comprometer la homogeneidad de la mezcla con ligante convencional. La especificación ASTM D6114/D6114M-19 recomienda no utilizar partículas de caucho muy gruesas. Por lo tanto, en esta investigación se utilizaron las fracciones más finas, con granulometría entre 0,15 y 0,59 mm.

2.2 Producción de asfalto caucho

En la producción de asfalto caucho en laboratorio, 10% y 15% del contenido de asfalto convencional fueron reemplazados por caucho, entonces fueron producidos los ligantes AC10 y AC15. Para estos ligantes, el caucho se añadió al asfalto convencional en un mezclador mecánico con rotación constante de 2.000 rpm y temperatura de 170°C durante una hora. Los ligantes AC10, AC15, PEN 50-70 y AC08 han sido probados para determinar sus propiedades físicas. Estas pruebas han incluido penetración, punto de ablandamiento, viscosidad rotacional, recuperación elástica y estabilidad al almacenamiento. Además, se han realizado ensayos para determinar las propiedades físicas de los agregados, incluyendo granulometría, absorción, densidad, desgaste en máquina de “Los Angeles” y durabilidad del asfalto al sulfato de sodio. Los ensayos se realizaron de acuerdo con las normas del DNIT.

2.3 Diseño de mezclas asfálticas

2.3.1 Selección de la composición granulométrica

Para determinar la composición granulométrica de los agregados se utilizó el método de ensayo para encuadrar la mezcla en la banda C del DNIT. La porosidad DASR también se calculó para estimar si la granulometría elegida proporcionaría una buena capacidad de resistencia a la deformación permanente a las mezclas. Antes del cálculo de la porosidad DASR, se eligieron las bandas de agregados que compondrían la DASR. Según el método DASR, esta elección debe hacerse con la ayuda de un diagrama de interacción. Por lo tanto, deben seleccionarse dos tipos de agregados: (i) con una granulometría superior a 1,18 mm y (ii) con una relación porcentual de

material retenido entre tamices consecutivos de 0,43 y 2,33 mm. La porosidad se determinó mediante la ecuación (1):

$$\eta_{DASR} = \frac{VIC_{ag} + VAM}{VTM - V_{ag>DASR}} \quad (1)$$

Donde η_{DASR} coincide con la porosidad DASR (%); VIC_{ag} es el volumen de agregados más pequeños que DASR; VAM son los vacíos del agregado mineral; VTM es el volumen total de la mezcla; $V_{ag>DASR}$ es el volumen de agregados mayor que el DASR.

2.3.2 Definición del Contenido Óptimo de Asfalto

Se utilizó la dosificación *Marshall* para determinar el contenido óptimo de asfalto. Probetas cilíndricas fueron moldeadas y compactadas con 75 golpes en cada lado (norma brasileña DNER ME-043/95). Se seleccionaron tres parámetros para determinar el contenido óptimo de asfalto: volumen vacíos, máxima densidad aparente y máxima estabilidad. Se realizaron cuatro dosis (una por cada ligante) en total.

Para la producción de la mezcla asfáltica con el PEN 50-70, los agregados fueron calentados a temperatura de 165°C por 24 horas y mezclados al ligante a 155°C. Para las mezclas con los tres tipos de asfalto caucho, los agregados se calentaron a 175 °C durante 24 horas y se mezclaron a los aglutinantes a 165°C. Estas temperaturas fueron obtenidas por medio del ensayo de Viscosidad rotacional *Brookfield* realizado con los cuatro ligandos asfálticos.

2.3.3 Ensayos Mecánicos

Para evaluar el rendimiento mecánico, las mezclas asfálticas se sometieron a los ensayos de resistencia a la tracción indirecta (RT), módulo de resiliencia (MR), daño por humedad inducida y *flow number* (FN). Los ensayos se realizaron con cuerpos de prueba producidos por los compactadores *Marshall* y *Superpave*. Cada ensayo se realizó tres veces para analizar la precisión de los resultados. La tabla 1 muestra las normas que se han seguido para realizar los ensayos.

Tabla 1. Normas para los ensayos mecánicos.

Ensayos	Normas
Resistencia a la Tracción Indirecta	DNIT ME 136/2010
Módulo de Resiliencia	DNIT 135/2018-ME
Daño por humedad inducida	AASHTO T 283/2002
<i>Flow Number</i>	NBR 16505/2016

3. RESULTADOS Y DISCUSIONES

3.1 Propiedades físicas

La tabla 2 muestra los resultados de las propiedades físicas de los agregados. Los criterios de aceptación se basan en la norma DNIT ES 031/2006 para pavimentos flexibles.

Tabla 2. Propiedades físicas de los agregados naturales.

Propiedad	Valor del ensayo	Limite
Desgaste en máquina de “Los Angeles” (%)	27,53	Max. 50
Durabilidad del asfalto al sulfato de sodio (%)	1	Max. 12
Absorción (%)		-
Piedra triturada 3/4”	0,51	
Piedra triturada 3/8”	0,79	
Densidad (g/cm ³)		-
Piedra triturada 3/8”	2,67	
Piedra triturada 3/4”	2,63	
Finos de Trituración	2,64	

De acuerdo con la Tabla 2, las propiedades físicas de los agregados graníticos cumplen con los criterios de las normas brasileñas. Por lo tanto, los agregados se pueden utilizar para construir pavimentos flexibles.

La Tabla 3 muestra las propiedades físicas de los ligantes. Para el PEN 50-70, las normas del DNIT se han seguido para cada ensayo, excepto para el ensayo de viscosidad. Para este ensayo se han seguido los criterios establecidos en la norma ASTM D4402. Para los ligantes asfalto caucho se han seguido las especificaciones de la norma DNIT ES 111/2009.

Tabla 3. Propiedades físicas de los ligantes asfálticos.

Ensayos	Ligantes Asfálticos				Norma - Asfalto Convencional	Norma Asfalto Caucho
	PEN 50-70	AC10	AC15	AC08		
Penetración (10 ⁻¹ mm)	69	44	36	45	50 – 70	30-70
Punto de ablandamiento (°C)	51	62	64	62	Min. 46	Min. 55
Viscosidad <i>Brookfield</i> 135GC-SP21 (cP)	395	2.106	3.667	2,085	Min. 274	-
Viscosidad <i>Brookfield</i> 150GC-SP21 (cP)	203	1.132	1.735	1.096	Min. 112	-
Viscosidad <i>Brookfield</i> 177GC-SP21 (cP)	79	578	819	562	57 – 285	-
Recuperación elástica (%)	0	57	39	61	-	Min. 50
Estabilidad al almacenamiento (°C)	0,5	5,0	8,5	5,5	-	Max. 9

De acuerdo con la Tabla 3, los ligandos PEN 50-70, AC08 y AC10 cumplen con las normas brasileñas. Por lo tanto, los ligantes se pueden usar en la producción de mezclas asfálticas en caliente. Lo ligante AC15 no se puede usar porque no cumple los requisitos mínimos para el ensayo de recuperación elástica. Sin embargo, en este estudio se mantuvo el procedimiento de ensayo con AC15 para evaluar el rendimiento mecánico de las mezclas de asfalto producidas con este ligante.

3.2 Composición granulométrica de las mezclas

La figura 1 muestra la composición granulométrica de las mezclas asfálticas. La curva granulométrica consta de: (1) 21% de piedra triturada 3/4", (2) 30% de piedra triturada 3/8" e 49% de finos de trituración. Esta composición se utilizó para las cuatro mezclas asfálticas, y se obtuvo

mediante un proceso de ensayo para que la curva granulométrica se ajustara a los límites de la banda C especificados en la norma DNIT ES 031/2006.

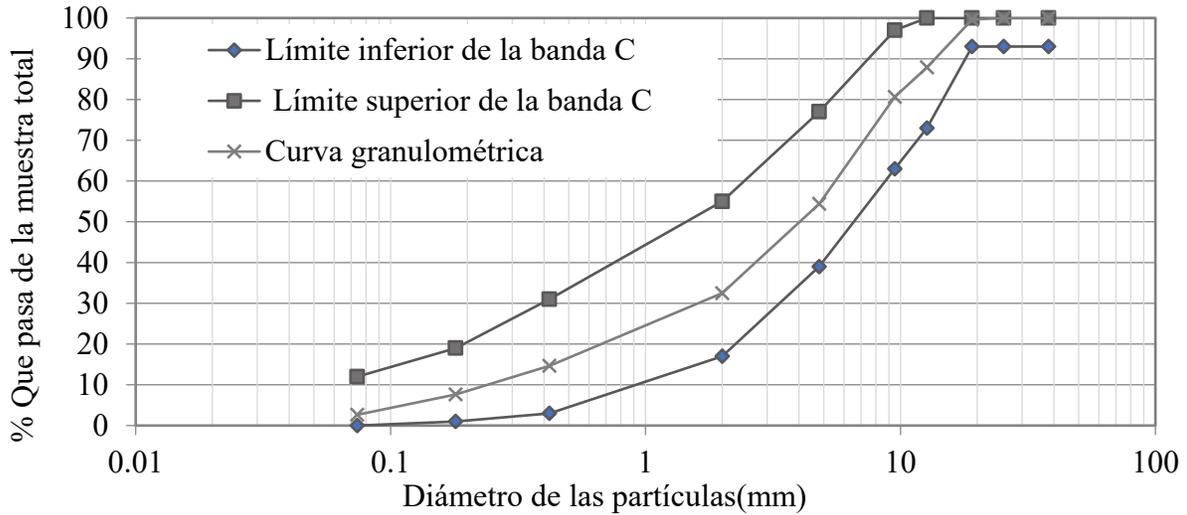


Figura 1. Curva granulométrica de las mezclas.

La composición granulométrica se probó con el método DASR para evaluar si las mezclas asfálticas tendrían una buena resistencia a la deformación permanente. Para la aplicación del método DASR se elaboró el diagrama de interacción, presentado en la Figura 2. Este diagrama permitió definir qué intervalos de agregado grueso compondrían la DASR.

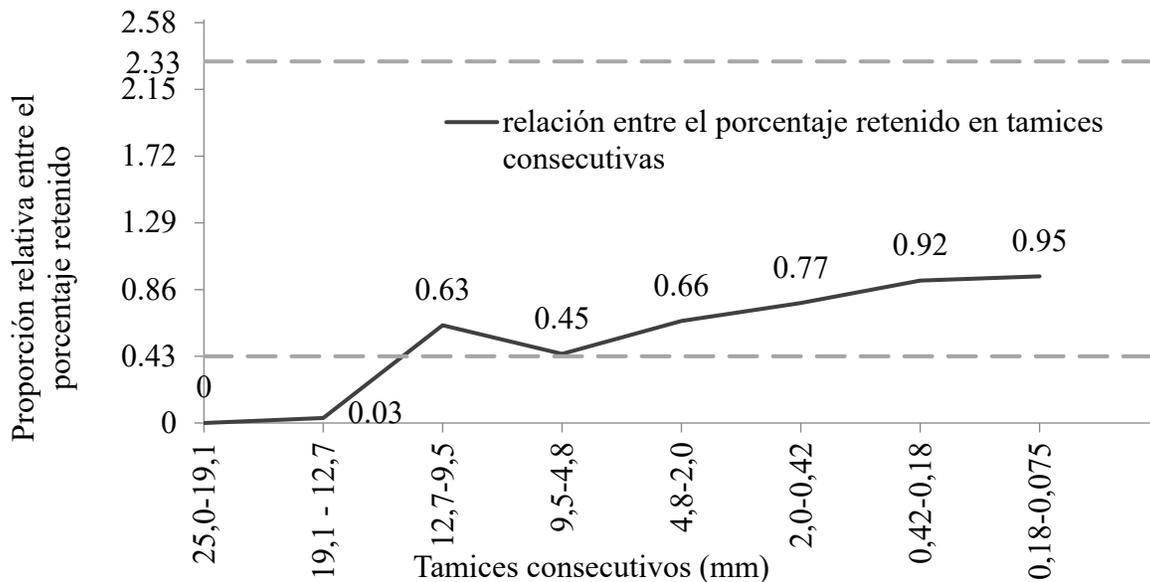


Figura 2. Diagrama de interacción entre agregados

Según la figura 2, las bandas de 12,7-9,5, 9,5-4,8 y 4,8-2,0 mm tienen agregados con un tamaño de partícula superior a 1,18 mm. Además, la relación entre el porcentaje de material retenido entre tamices consecutivos varía de 0,43 a 2,33. La banda 9,5-4,8 mm tenía una relación entre el porcentaje retenido entre tamices consecutivos muy cercana al valor mínimo estimado para una buena interacción entre los agregados. Por lo tanto, esta banda no se ha considerado en la selección de DASR. Para la elección entre las bandas 12.7-9.5 y 4.8-2.0 mm se calculó la porosidad DASR que cada una proporcionaría, por medio de la Ecuación (1).

Para calcular el VAM en la ecuación (1), se han asumido los valores de volumen de vacíos (V_v) y relación betún vacíos (RBV) sobre la base de los límites exigidos para estos parámetros en la norma DNIT ES 031/2006. De acuerdo con esta norma, las mezclas asfálticas utilizadas en capas de rodadura deben tener un V_v entre 3 y 5% y un RBV entre 75 y 82%. En este trabajo, los valores medios de estos límites (V_v del 4% y RBV del 79%) fueron utilizados para calcular el VAM. Por tanto, se obtuvo un valor aproximado de VAM del 19 %.

Para η_{DASR} , se obtuvieron los siguientes resultados: 53% para la banda de 12,7-9,5 mm y 39% para la banda de 4,8-2,0 mm. Por lo tanto, solo la banda de 4,8-2,0 mm tenía una η_{DASR} inferior al 50%, que se considera la porosidad mínima para que las mezclas que presentan una buena resistencia a la deformación permanente. Por lo tanto, este intervalo se utilizó para componer el DASR. Como la curva granulométrica obtenida por el método del DNIT presentó un valor de η_{DASR} inferior al 50%, la composición de los agregados no necesitó ser ajustada.

3.3 Dosificación Marshall

La Tabla 4 presenta los resultados obtenidos con la dosificación *Marshall* para los cuatro tipos de ligantes.

Tabla 4. Parámetros obtenidos con la dosificación *Marshall*.

Propiedades	Ligantes Asfálticos				Norma Asfalto Convencional	Norma Asfalto Caucho
	PEN 50-70	AC10	AC15	AC08	DNIT ES 031/2006	DNIT ES 112/2009
El contenido óptimo del asfalto (%)	5,2	6,8	7,0	6,2	-	-
Estabilidad <i>Marshall</i> (kgf)	1.163	1.374	806	1.351	> 500	> 800
Densidad Específica Aparente (g/cm^3)	2,31	2,27	2,21	2,26	-	-
V_v (%)	3,86	4,99	4,87	4,92	3-5	3-5
VAM (%)	17	20	23	20	Min.16	Min.13
RBV (%)	77	74	78	75	75-82	65-78

La Tabla 4 muestra que la mayoría de las mezclas con asfalto caucho tienen mayor estabilidad *Marshall* que el ligante convencional. Según Setyawan *et al.* (2017), el caucho proporciona una mejor interconexión y conexión entre los agregados y el ligante asfáltico, lo que aumenta la estabilidad de las mezclas. Por lo tanto, se esperaba que las mezclas asfalto caucho presentaran mejores resultados. Para la mezcla con el ligante AC15, también se esperaba que las mezclas con este ligante no presentaran un rendimiento mecánico tan bueno como las demás mezclas con asfalto caucho, ya que no cumplía todos los criterios físicos. La menor estabilidad y densidad *Marshall* de la mezcla AC15 están relacionadas con el mayor contenido de caucho y la menor homogeneidad de este ligante. Estos factores llevaron a una expansión volumétrica de los cuerpos de prueba. Consecuentemente, promovieron la reducción de la densidad y estabilidad de esa mezcla.

A pesar de la reducción de la estabilidad con el ligante AC15, se observa en la Tabla 4, que todas las mezclas atendieron a los criterios de las normas brasileñas en relación a la dosificación *Marshall*. Después de la determinación de los parámetros volumétricos se realizó el cálculo de la porosidad DASR para cada mezcla. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 5.

Tabla 5. η_{FAD} después de la dosificación *Marshall*.

Ligante Asfáltico	VAM (%)	η_{FAD} (%)	Criterio
PEN 50-70	17	36	<50%
AC10	20	40	
AC15	23	44	
AC08	20	40	

La Tabla 5 muestra que las mezclas con los ligantes AC10 y AC08 presentaron η_{DASR} próxima al valor estimado del 39% (antes de la dosificación). Las otras mezclas presentaron una mayor variación en relación a η_{DASR} estimada. Esto se debió a la mayor variabilidad entre los valores de VAM obtenidos después de la dosificación y el VAM estimado del 19%. A pesar de las diferencias, las estimaciones fueron aceptables con relación al método DASR, pues todas las mezclas presentaron valor de η_{DASR} inferior al 50%.

3.4 Ensayos Mecánicos

3.4.1 Resistencia a la Tracción Indirecta (RT)

La figura 3 muestra los resultados del ensayo de resistencia a la tracción indirecta para los métodos *Marshall* y *Superpave*.

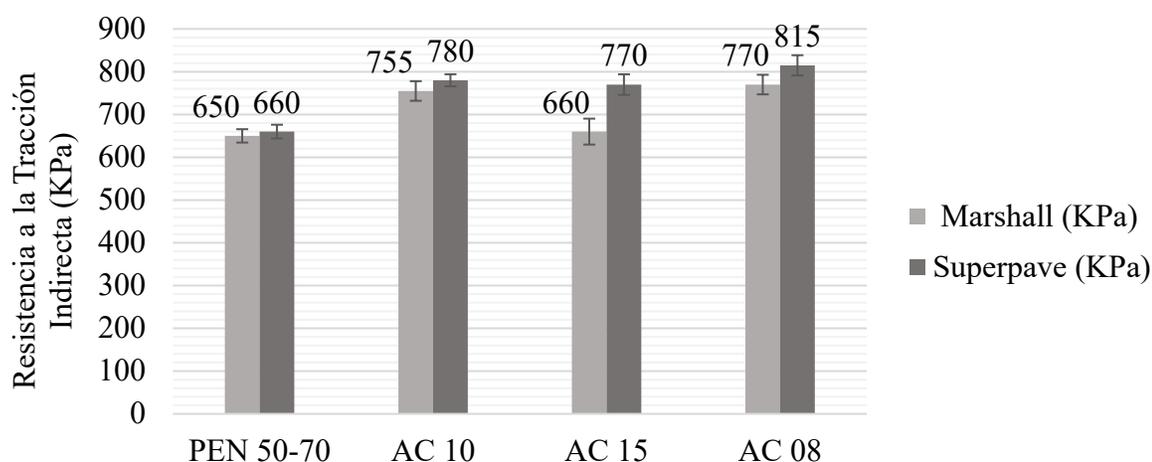


Figura 3. Resultados del ensayo de RT para cada mezcla.

De acuerdo con la Figura 3, las mezclas presentaron mayor RT cuando compactadas por el método *Superpave*. Este resultado era esperado, ya que el método *Superpave* simula mejor las condiciones de campo y tiene menor riesgo de alterar la granulometría de los agregados.

La mezcla con el ligante PEN 50-70 cumple con una resistencia a la tracción mínima de 650 kPa (conforme a la norma DNIT ES 031/2006), tanto para el método *Marshall* como para el *Superpave*. Para las mezclas asfalto caucho, la norma DNIT ES 112/2009 requiere una resistencia a la tracción mínima de 750 kPa. Este límite fue cumplido por todas las mezclas, excepto por la mezcla AC15 compactada por el método *Marshall*.

En el caso de la mezcla AC15, los resultados del ensayo de resistencia a la tracción indirecta y la estabilidad *Marshall* pueden haber estado influidos por el mayor contenido de caucho. El resultado del ensayo de estabilidad al almacenamiento, con un valor cercano al límite máximo permitido por la norma, demuestra que el mayor contenido de caucho conduce a una menor adherencia entre el caucho y el ligante asfáltico, lo que reduce la cohesión y la homogeneidad de la mezcla (Navarro *et al.*, 2004; Navarro *et al.*, 2005; Shen *et al.*, 2009; Dantas Neto *et al.*, 2006; Navarro and Gámez,

2012), y consecuentemente, resulta en valores más bajos de RT y estabilidad (Navarro and Gámez, 2012).

3.4.2 Módulo de resiliencia (MR)

La figura 4 muestra los resultados del ensayo del módulo de resiliencia para los métodos *Marshall* y *Superpave*.

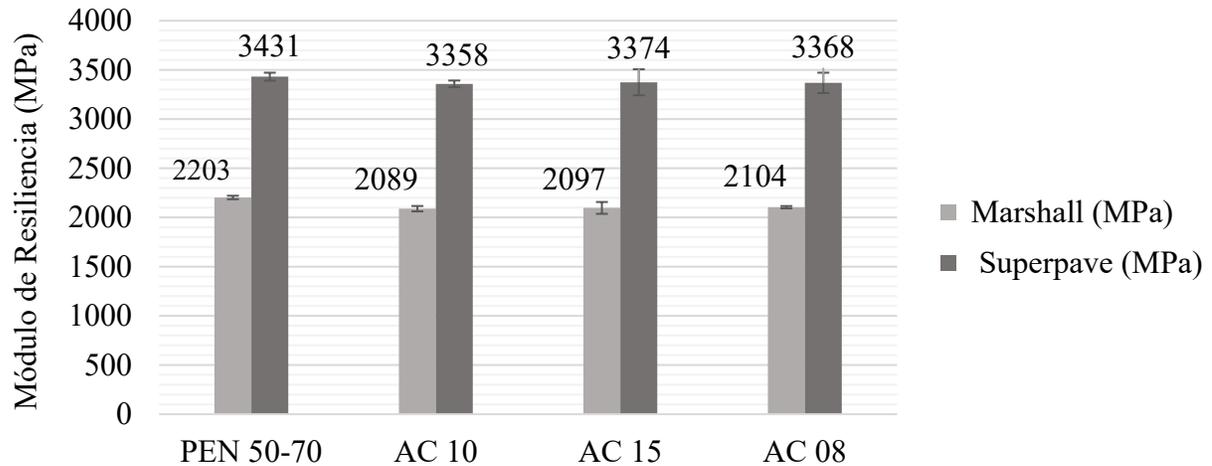


Figura 4. Resultados del ensayo de MR para cada mezcla.

La Figura 4 muestra que las mezclas asfalto caucho presentan menores valores de MR cuando se consideran los dos métodos. La reducción del MR está relacionada con la mayor elasticidad de las mezclas asfalto caucho. A bajas temperaturas, estas mezclas generalmente presentan una disminución en el módulo de resiliencia respecto a las mezclas convencionales. Por otro lado, a medida que aumenta la temperatura, el valor del módulo tiende a aumentar. Esto resulta en mezclas menos quebradizas y más flexibles a bajas temperaturas, y con mayor rigidez que las mezclas convencionales a temperaturas más elevadas (Palit *et al.*, 2004). Por lo tanto, la reducción del módulo de resiliencia en las mezclas con asfalto caucho no significa que estas mezclas tengan un rendimiento mecánico inferior al de la mezcla con PEN 50-70.

3.4.3 Daño por humedad inducida

La figura 5 muestra los resultados obtenidos para el ensayo de daño por humedad inducida.

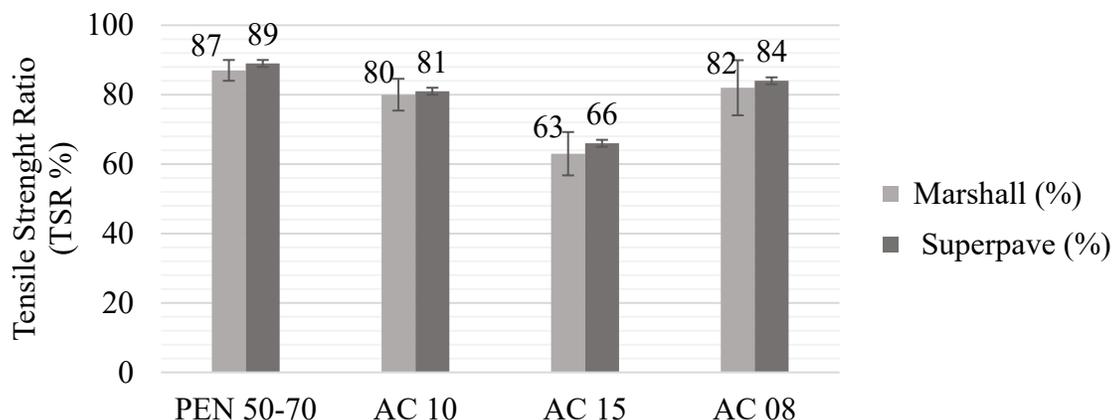


Figura 5. Resultados del ensayo de daño por humedad inducida para cada mezcla.

La Figura 5 muestra que todas las mezclas, con excepción de la mezcla AC15, cumplieron el requisito mínimo de TSR del 80%, según lo especificado en la AASHTO T 283/2002. Menores valores de TSR fueron obtenidos para las mezclas con el ligante asfalto caucho. El *California Department of Transportation* señaló que las mezclas densas con el ligante asfalto caucho son más susceptibles a los efectos de la humedad que las mezclas convencionales. Por lo tanto, se recomienda el uso de aditivos mejoradores de adhesividad en estas mezclas (Shatnawi, 2001).

En este estudio se utilizó un aditivo para mejorar la adherencia en todas las mezclas. Las mezclas AC10 y AC08 mostraron buena resistencia al daño por humedad, aunque los resultados fueron inferiores a los de la mezcla PEN 50-70. En relación con la mezcla AC15, el uso del aditivo no fue suficiente para que la mezcla alcanzara el límite mínimo del 80% recomendado por la norma. Esto indica que esta mezcla es más susceptible al daño por humedad.

3.4.4 Flow Number (FN)

La figura 6 muestra los resultados del ensayo de FN para las mezclas utilizando el método *Superpave*.

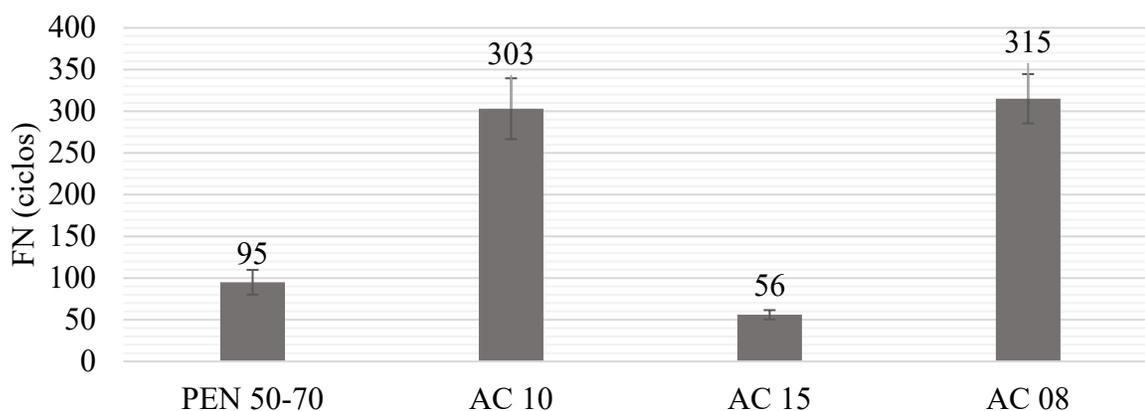


Figura 6. Resultados del ensayo de FN.

De acuerdo con la Figura 6, las mezclas con los ligantes AC10 y AC08 presentan mejores resultados en relación a la mezcla con el ligante convencional. Esto indica que estas mezclas tienen una mayor resistencia a la deformación permanente. Los valores más bajos de la mezcla AC15 se esperaban debido a los resultados de ensayos anteriores, que demostraron que el mayor contenido de caucho y la menor homogeneidad afectaron negativamente al rendimiento mecánico de la dicha mezcla.

4. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

El análisis de varianza (ANOVA) es un método estadístico que permite comparaciones entre medias de diferentes poblaciones. Por lo tanto, este método se utilizó en este estudio para comparar el rendimiento de las diferentes mezclas en cada ensayo. Para el ANOVA, el tipo de mezcla (el tipo de ligante en el caso de los ensayos físicos) fue la variable explicativa. Cuatro niveles (tratamientos) fueron considerados: PEN 50-70, AC08, AC10 y AC15. Además, se asumió un nivel de significancia del 5% para probar dos hipótesis:

H_0 : los valores de las medias de los tratamientos son iguales;

H_1 : al menos una de las medias de los tratamientos es distinta de las demás.

La hipótesis nula es rechazada si el p-valor es menor o igual al nivel de significancia. Después de probar las hipótesis, se aplicó la prueba de Tukey para determinar si los pares de tratamientos eran

significativamente diferentes o no. Los resultados de la prueba de Tukey se presentan en las tablas 6, 7 y 8, para los ensayos físicos, mecánicos con método *Marshall* y mecánicos con método *Superpave*, respectivamente.

Tabla 6 Resultados de la prueba de Tukey para los ensayos físicos.

Tratamiento		p-valor – comparando pares de medias (ij)				
(i)	(j)	Penetración	Punto de ablandamiento	Viscosidad <i>Brookfield</i>	Recuperación elástica	Estabilidad al almacenamiento
PEN 50-70	AC08	0,00000	0,00033	0,00000	0,00000	0,00171
	AC10	0,00000	0,00033	0,00000	0,00000	0,00336
	AC15	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00006
AC08	AC10	0,91770	1,00000	0,28040	0,39200	0,93380
	AC15	0,00010	0,55530	0,00000	0,00000	0,03246
AC10	AC15	0,00018	0,55530	0,00000	0,00030	0,01464

*La diferencia entre las medias es significativa en el nivel 0,05.

Tabla 7. Resultados de la prueba de Tukey para los ensayos mecánicos con el método *Marshall*

Tratamiento		p-valor – comparando pares de medias (ij)		
(i)	(j)	RT	MR	Daño por humedad inducida
PEN 50-70	AC08	0,00114	0,03360	0,71820
	AC10	0,00272	0,01633	0,48400
	AC15	0,95610	0,02392	0,00401
AC08	AC10	0,86120	0,94980	0,97230
	AC15	0,00198	0,99430	0,01556
AC10	AC15	0,00495	0,99160	0,02776

*La diferencia entre las medias es significativa en el nivel 0,05.

Tabla 8. Resultados de la prueba de Tukey para los ensayos mecánicos con el Método *Superpave*.

Tratamiento		p-valor – comparando pares de medias (ij)			
(i)	(j)	RT	MR	Daño por humedad inducida	FN
PEN 50-70	AC08	0,00006	0,81640	0,42600	0,00002
	AC10	0,00036	0,74480	0,12140	0,00003
	AC15	0,00066	0,85530	0,00035	0,28970
AC08	AC10	0,21800	0,99900	0,77230	0,93140
	AC15	0,09347	0,99980	0,00184	0,00000
AC10	AC15	0,92500	0,99580	0,00539	0,00000

* La diferencia entre las medias es significativa en el nivel 0,05.

Las Tablas 6, 7 y 8 muestran que la hipótesis nula fue rechazada para todos los ensayos, excepto el módulo de resiliencia por el método *Superpave* (o sea, hubo diferencias significativas entre las medias de los tratamientos). Además, los ligantes AC08 y AC10, así como las mezclas con estos ligantes, no presentaban valores medios significativamente diferentes (es decir, p-valor superior a 0,05). Esto indica que no hay diferencias estadísticamente significativas entre las propiedades físicas y mecánicas de los dos ligantes.

La Tabla 6 muestra que hubo diferencias significativas entre el ligante convencional (PEN 50-70) y los ligantes asfalto caucho en todos los ensayos. Esto indica que los ligantes asfalto caucho tienen propiedades físicas diferentes con respecto al PEN 50-70, lo que indica que el caucho cambia las propiedades físicas de las mezclas. No se esperaba ninguna diferencia significativa en el rendimiento de los ligantes AC08, AC10 y AC15, ya que el ligante AC15 no cumplía los requisitos mínimos de los ensayos físicos.

Para los ensayos mecánicos con el método *Marshall*, los resultados de la Tabla 7 indican que no hubo diferencias significativas en las capacidades de resistencia a la tracción de las mezclas con los ligantes PEN 50-70 y AC15. Del mismo modo, no se encontraron diferencias entre los resultados del ensayo de daño por humedad inducida de las mezclas con PEN 50-70, AC08 y AC10. Por lo tanto, se puede decir que la reducción de la TSR en las mezclas con AC08 y AC10 no afectó la resistencia a la humedad de esas mezclas. Se observó el efecto contrario en el ensayo del módulo de resiliencia. En este ensayo, la reducción del MR de las mezclas asfalto caucho en relación con la mezcla PEN 50-70 puede considerarse significativa.

La Tabla 8 indica que los resultados obtenidos con el método *Superpave* no presentan diferencias significativas en el ensayo de MR. Como este método simula las condiciones de campo de forma más eficiente que el método *Marshall*, se cree que las mezclas con asfalto caucho no presentan grandes variaciones de MR en relación a la mezcla PEN 50-70. En los ensayos de RT y FN se constató que existían diferencias significativas entre las mezclas PEN 50-70, AC08 y AC10. Así, se puede decir que el aumento de RT y FN observado en las mezclas AC08 y AC10, fue de hecho relevante en relación a los valores presentados por la mezcla PEN 50-70. En cuanto al ensayo de daño por humedad inducida, solo se observaron diferencias significativas con la mezcla AC15. Esto era de esperar, ya que esta mezcla mostró una mayor reducción en el ensayo de daño por humedad inducida.

5. CONCLUSIONES

El objetivo principal de este estudio fue evaluar el rendimiento mecánico de las mezclas de asfalto caucho mediante ensayos de laboratorio utilizados para la construcción de pavimentos flexibles. En ese sentido, después del análisis estadístico realizado, se puede afirmar que las mezclas asfalto caucho presentaron mejor desempeño en relación a la mezcla PEN 50-70, lo que hace su uso viable. Una mayor recuperación elástica, una menor susceptibilidad térmica, una mayor resistencia a la tracción y la ocurrencia de deformaciones permanentes pueden ser citadas como ventajas de las mezclas AC08 y AC10 en relación a la mezcla PEN 50-70.

El ligante AC15 no se puede utilizar en mezclas asfálticas porque no cumple con los requisitos de recuperación elástica. Sin embargo, en algunos ensayos, tuvo un rendimiento similar al asfalto convencional (PEN 50-70), y en el caso del ensayo de MR similar también a los demás asfaltos caucho. Por lo tanto, se cree que el desempeño de esa mezcla podría haber sido satisfactorio en todos los ensayos, si se hubiera añadido algún agente compatibilizante al ligante AC15, que aumentara su homogeneidad.

En todos los ensayos, las mezclas AC10 y AC08 no mostraron diferencias significativas. Esto significa que en este estudio no se encontraron diferencias significativas en el rendimiento mecánico de estas mezclas. Sin embargo, el AC08 ya se produce a gran escala, lo que lo hace más atractivo que el ligante AC10, producido en laboratorio para este estudio. Por lo tanto, el uso del ligante AC08 sería más adecuado para la construcción de carreteras.

Para la selección granulométrica, el método DASR estima un buen rendimiento mecánico para valores de porosidad inferiores al 50%, pero esta estimación no fue válida para la mezcla AC15. Sin embargo, el rendimiento inferior de esta mezcla es probablemente debido a la menor calidad del ligante AC15 (que en comparación con la elección granulométrica). Por lo tanto, en esta

investigación no puede considerarse insatisfactoria la utilización del método DASR para la predicción del rendimiento mecánico de las mezclas. En cuanto al método de compactación, se confirmó la tendencia de estudios anteriores (Jitsangiam *et al.*, 2013; Swami *et al.*, 2004; Asi, 2007): los resultados del método *Superpave* fueron mejores que los resultados del método *Marshall* en todos los ensayos. Por lo tanto, el método *Superpave* debe preferirse para la compactación de mezclas asfálticas.

6. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la *Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior* (CAPES) y al *Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico* (CNPq) por el apoyo financiero, a la empresa Greca Asfaltos, por la donación del asfalto caucho, y a la empresa DAFONTE Pneus, por la donación del caucho triturado de neumáticos. Agradecemos también a los técnicos de laboratorio y colegas que ayudaron en el desarrollo de la investigación.

7. REFERENCIAS

- American Association of State Highway and Transportation Officials. (2002). *AASHTO T 283 Resistance of compacted asphalt mixtures to moisture induced damage*. Washington, D.C.
- Asi, I. M. (2007), *Performance evaluation of Superpave and Marshall asphalt mix designs to suite Jordan climatic and traffic conditions*. *Construction and Building Materials*. 21:1732–1740. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.05.036>.
- Assis, S. R. H., Queiroz, B. O., Araújo, C. C., Nunes, K. K. F., Melo, R. A., Lucena L. C. F. L. (2017), *Evaluation of limestone crushed dust aggregates in hot mix asphalt*. *Construction and Building Materials*. 148: 659-665. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.107>.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2016). *NBR 16505: Misturas asfálticas-Resistência à deformação permanente utilizando o ensaio uniaxial de carga repetida*. Rio de Janeiro.
- ASTM International. (2012). *ASTM 4402/D4402M Standard test method for viscosity determination of asphalt at elevated temperatures using a rotation al viscometer*.
- ASTM International. (2019). *ASTM D6114/D6114M-19 Standard Specification for Asphalt-Rubber Binder*.
- Bueno, M., Luong, J., Terán, F., Viñuela, U., Paje, S.E. (2014), *Macrotecture influence on vibrational mechanisms of the tyre-road noise of an asphalt rubber pavement*. *International Journal of Pavement Engineering*. 15:606-613. <http://dx.doi.org/10.1080/10298436.2013.790547>.
- Chiu C., Lu, L. (2007), *A laboratory study on stone matrix asphalt using ground tire rubber*. *Construction and Building Materials*. 21:1027–1033. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2006.02.005.
- Dantas Neto, S. A., Farias, M. M, Pais, J. C., Pereira, P. A. A., Sousa, J. B. (2006), *Influence of crumb rubber and digestion time on the asphalt rubber binders*. *Road Materials and Pavement Design*. 7:131–148. <https://doi.org/10.1080/14680629.2006.9690030>.
- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. (2009). *DNIT 112:2009-EM: Pavimentos flexíveis – Concreto asfáltico com asfalto borracha, via úmida, do tipo “Terminal Blending” - Especificação de serviço*. Rio de Janeiro.
- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. (2009). *DNIT 111:2009-EM: Pavimentação flexível-Cimento asfáltico modificado por borracha de pneus inservíveis pelo processo via úmida, do tipo “Terminal Blending” – Especificação de material*. Rio de Janeiro.
- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. (2006), *DNIT 031/2006 – ME– Método de ensaio. Pavimentos flexíveis - concreto asfáltico - especificação de serviço*. Rio de Janeiro.
- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. (1995). *DNER 043/1995–ME: Misturas Betuminosas a Quente. Ensaio Marshall – Método de Ensaio*. Rio de Janeiro.

Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. (2010). *DNIT 136/2010–ME: Método de Ensaio. Pavimentos flexíveis- Misturas asfálticas–Determinação da resistência à tração por compressão diametral*. Rio de Janeiro.

Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. (2018). *DNIT135/2018–ME: Pavimentação asfáltica – Misturas Asfálticas – Determinação do Módulo de Resiliência – Método de Ensaio*. Rio de Janeiro.

Ding, X., Ma, T., Zhang, W., Zhang, D. (2017), *Experimental study of stable crumb rubber asphalt and asphalt mixture*. Construction and Building Materials. 157:975–981. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.164>.

Greene, J., Chun, S., Choubane, B. (2014), *Enhanced Gradation Guidelines to Improve Asphalt Mixture Performance*. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. 2456: 3–10. <https://doi.org/10.3141/2456-01>.

Jitsangiam, P., Chindaprasirt, P., Nikraz, H. (2013), *An evaluation of the suitability of Superpave and Marshall asphalt mix designs as they relate to Thailand's climatic conditions*. Construction and Building Materials. 40:961–970. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.11.011>.

Kim, S., Roque, R., Birgisson, B., Guarin, A. (2009), *Porosity of the Dominant Aggregate Size Range to Evaluate Coarse Aggregate Structure of Asphalt Mixtures*. Journal of Materials in Civil Engineering. 21: 32–39. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0899-1561\(2009\)21:1\(32\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0899-1561(2009)21:1(32))

Lee, S., Akisetv, C.K., Amirkhanian, S. N. (2008), *Recycling of laboratory-prepared long-term aged binders containing crumb rubber modifier*. Construction and Building Materials. 22:1906–1913. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.07.012>.

Lo Presti, D. (2013), *Recycled Tyre Rubber Modified Bitumens for road asphalt mixtures: A literature review*. Construction and Building Materials. 49 863-881. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.09.007>.

Navarro, F.J., Partal, P., Martínez-Boza F., Gallegos C. (2004), *Thermo-rheological behaviour and storage stability of ground tire rubber-modified bitumens*. Fuel. 83:2041–2049. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2004.04.003>.

Navarro, F.J., Partal, P., Martínez-Boza F., Gallegos C. (2005), *Influence of crumb rubber concentration on the rheological behavior of a crumb rubber modified bitumen*. Energy & Fuels. 19:1984-1990. <https://doi.org/10.1021/ef049699a>

Navarro, F. M., Gámez, M. C. R. (2012). *Influence of Crumb Rubber on the Indirect Tensile Strength and Stiffness Modulus of Hot Bituminous Mixes*. Journal of materials in civil engineering. 24(6):715–724. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000436](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000436).

Palit, S. K., Reddy, K. S., Pandey, B. B. (2004), *Laboratory Evaluation of Crumb Rubber Modified Asphalt Mixes*. Journal of Materials in Civil Engineering, 16(1): 45–53. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0899-1561\(2004\)16:1\(45\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0899-1561(2004)16:1(45)).

Picado-Santos, L.G., Capitão, S. D., Neves, J. M.C. (2020), *Crumb rubber asphalt mixtures: A literature review*. Construction and Building Materials. 247:118577. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118577>.

Setyawan, A., Febrianto, N., Sarwono, D. (2017), *Design and Properties of Thin Surfacing Hot Mix Asphalt Containing Crumb Rubber as Partial Aggregate Replacement*. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 75: 1-6. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/75/1/012016>.

Shatnawi, S. (2001), *Performance of Asphalt Rubber Mixes in California*. International Journal of Pavement Engineering. 2(1): 1-16. <http://dx.doi.org/10.1080/10298430108901713>.

Shen, J., Amirkhanian, S., Xiao, F., Tang, B. (2009), *Influence of surface area and size of crumb rubber on high temperature properties of crumb rubber modified binders*. Construction and Building Materials. 23: 304–310. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.12.005>.

Sol-Sánchez, M., Jiménez del Barco Carrión, A., Hidalgo-Arroyo, A., Moreno-Navarro, F., Saiz, L., Rubio-Gámez, M. del C. (2020), *Viability of producing sustainable asphalt mixtures with crumb*

- rubber bitumen at reduced temperatures*. Construction and Building Materials. 265:120154. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120154>.
- Swami, B.L.; Mehta, Y.A.; Bose, S. (2004), *A Comparison of the Marshall and Superpave Design Procedure for Materials Sourced in India*. International Journal of Pavement Engineering. 5(3):163-173. <http://dx.doi.org/10.1080/10298430412331309115>.
- Thives, L. P. (2009), “*Optimizing the performance of bituminous mixtures with rubber modified bitumen for pavement rehabilitation*”. Phd Thesis. University of Minho/ Federal University of Santa Catarina, p.581.
- Xiang, L., Cheng, J., Que, G. (2009), *Microstructure and performance of crumb rubber modified asphalt*. Construction and Building Materials. 23:3586–3590, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.06.038>.
- Yetkin, Y. (2007), *Polymer modified asphalt binders*. Construction and Building Materials. 21: 66–72. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.07.007>.