



CAUCHO REACCIONADO Y ACTIVADO PROCEDENTE DE NEUMÁTICOS RECICLADOS

AVANCES SUPERIORES EN LAS PRESTACIONES DEL CAUCHO ASFÁLTICO

Jorge Sousa¹, George Way²,

¹ CONSULPAV, LDA, Casais da Serra, Portugal, Jorge.b.sousa@gmail.com

² CONSULPAV INTERNATIONAL, USA, gway516855@aol.com

Resumen

La tecnología del método húmedo de utilizar polvo de caucho de neumáticos reciclados como modificador del ligante de asfalto (betún) se ha utilizado con éxito en el sellado de grietas, aplicaciones de rociado (chip seals) y mezcla de asfalto en caliente durante al menos 50 años. La tecnología del método húmedo del caucho asfáltico, que comenzó a finales de los años 60 en Arizona y California, se ha utilizado con éxito de manera que beneficie al rendimiento y la durabilidad del pavimento. El proceso húmedo del polvo de caucho es un medio práctico de proporcionar protección ambiental, económica, sostenible y segura al utilizar polvo de caucho de neumáticos reciclados utilizando la tecnología del método húmedo ampliamente utilizada en beneficio de la sociedad. Nuevos conceptos de tecnología de ingeniería imaginativos e innovadores han llevado al desarrollo de un nuevo material por el método semihúmedo de caucho granulado. El nuevo método semihúmedo emplea caucho reaccionado y activado (RAR). El método RAR semihúmedo ha demostrado ser un producto capaz de igualar y superar el rendimiento del asfalto tradicional de mezcla en caliente y el método tradicional de asfalto de caucho granulado. Básicamente, el RAR consiste en caucho pretratado y prerreaccionado que se puede usar directamente en una planta de mezcla como un "filler", por lo que es fácil de manejar y no requiere equipo especial para mezclar caucho granulado y asfalto ni una fuente de calor adicional. El "filler" seco RAR cuando se encuentra con el asfalto caliente se amalgama de tal manera que se convierte en caucho asfáltico como el método tradicional de polvo de caucho. El RAR es superior al método tradicional de caucho granulado, ya que puede usarse en porcentajes más altos. Para garantizar la calidad y aprovechar la naturaleza única del RAR se han creado nuevas especificaciones. Estas especificaciones abarcan una amplia gama de medidas de calidad para permitir un uso más amplio por parte de los departamentos de carreteras.

Este documento presenta el concepto y algunas experiencias del uso de un ligante RAR en mezclas asfálticas de capa delgada aplicadas con o sin una capa intermedia de membrana absorbente de tensiones (SAMI) RAR. El documento presenta cómo la resistencia añadida al agrietamiento por fatiga flexible de estas mezclas conduce a grandes beneficios ambientales. Introduce conceptos clave que pueden ser la base de especificaciones que pueden ser utilizadas por los departamentos de carreteras para garantizar, no solo que el caucho granulado reaccione y se trate adecuadamente, sino que las mezclas tengan betún y RAR adecuados para satisfacer la fatiga por flexión / reflexión.

Palabras Clave: caucho reaccionado y activado, vida a fatiga, polvo de neumático.

1. Antecedentes - Historia

La idea de incorporar caucho natural (látex) y caucho vulcanizado a los pavimentos de asfalto se viene investigando desde hace más de 100 años [1]. Muchos investigadores llegaron a la conclusión de que la adición de caucho al asfalto podría mejorar varias propiedades del asfalto, entre otras, aumentar la elasticidad, disminuir la fragilidad a baja temperatura, ser menos susceptible a la temperatura, aumentar la resistencia a la acción del agua y a la abrasión del tráfico, reducir el derrape, minimizar el mantenimiento y ser un uso beneficioso para el reciclado del caucho de los neumáticos triturados. Este gran interés en abogar por el uso del caucho en los pavimentos de asfalto surgió en cierta medida para aprovechar las propiedades del caucho, como una relación de Poisson de 0,5 y propiedades del caucho que no dependen de la temperatura como el asfalto. No fue hasta la década de 1970, cuando Charles McDonald desarrolló la técnica práctica del caucho asfáltico por vía húmeda (AR), que el AR pudo utilizarse de forma rutinaria en aplicaciones de revestimiento de sellado [2].

2. Caucho asfáltico por vía húmeda McDonald

Charles McDonald inventó un ligante de caucho asfáltico consistente en asfalto caliente y al menos un 15% de caucho de neumático vulcanizado (caucho triturado). Inventó este material principalmente como medio para sellar pavimentos muy agrietados, reduciendo así el mantenimiento y prolongando la vida del pavimento in situ hasta que se pudiera realizar un recubrimiento o una reconstrucción. Experimentó con mayores porcentajes de caucho, hasta el 25%. Comprobó, mediante pruebas rudimentarias, que una mayor cantidad de caucho mejoraba la resistencia a la fractura (agrietamiento) del ligante AR. Sin embargo, mezclar y aplicar un ligante asfáltico con un 25% de caucho presentaba muchos problemas prácticos, por lo que el uso de un 18-20% de caucho en polvo se convirtió en el máximo práctico.

A partir de estos primeros experimentos y con la cooperación de la industria del asfalto, en la década de 1970 se concedieron varias patentes de ligante asfáltico de caucho. La familia de estas patentes se conoce como el caucho asfáltico de proceso húmedo McDonald. A medida que se obtenía más experiencia mediante el uso del proceso húmedo, se llevaron a cabo investigaciones para caracterizar mejor las propiedades del ligante de caucho asfáltico. A partir de esta investigación se determinó que más caucho en el caucho asfáltico no sólo mejoraría la resistencia al agrietamiento, muy probablemente debido a la impartición de propiedades de caucho en el ligante que aumentaba la cantidad de tensión que el caucho asfáltico podía soportar antes de agrietarse. Además, un mayor espesor de la película ralentiza el envejecimiento (oxidación) del ligante AR, manteniéndolo más flexible y menos propenso a agrietarse.

A finales de los años 80 y principios de los 90 se llevaron a cabo experimentos e investigaciones para utilizar el ligante AR en mezclas asfálticas en caliente. Este trabajo condujo al desarrollo de la mezcla caliente Gap Graded con AR, que consiste en mezclas con un VMA más alto, normalmente superior al 19%. A raíz de este esfuerzo con el Gap Graded AR, se desarrolló una mezcla Open Graded. La mezcla Open Graded tiene un VMA del 22% o superior. La figura 1 muestra que a medida que aumenta el VMA aumenta la cantidad de ligante AR. El mayor VMA es necesario para acomodar el aumento de ligante requerido para dejar espacio suficiente para el 15% de polvo de caucho en el ligante AR [3].

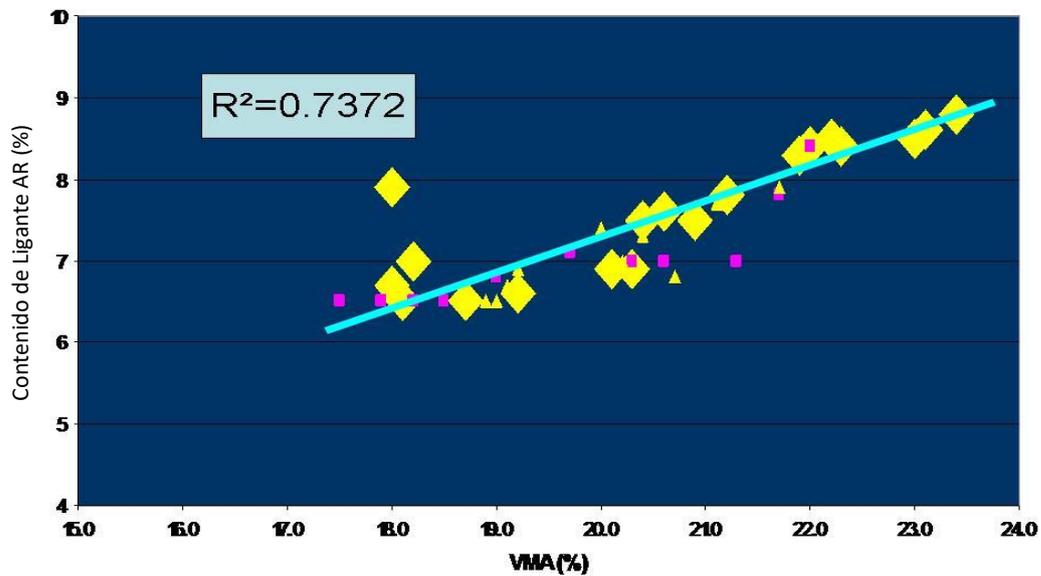


Figura 1. VMA de Mezclas Gap Graded de caucho asfáltico frente a contenido de ligante [3]

3. Resiliencia del caucho asfáltico

El origen de la importancia del 15% de ligante AR comenzó con un informe de investigación del Departamento de Transportes de Arizona en 1977 [4]. Los investigadores descubrieron que "el caucho asfáltico puede sufrir unas cinco veces más tensión antes de la rotura que el asfalto". Investigaciones posteriores demostraron que con un mayor porcentaje de la miga de caucho el ligante AR se vuelve más viscoso y tiene mayor resiliencia (elasticidad). Las pruebas se realizaron entonces con un máximo práctico de aproximadamente un 21% de polvo de caucho. La figura 2 demuestra que, con un porcentaje aún mayor, el ligante AR tendría una resiliencia (elasticidad) aún mayor [5].

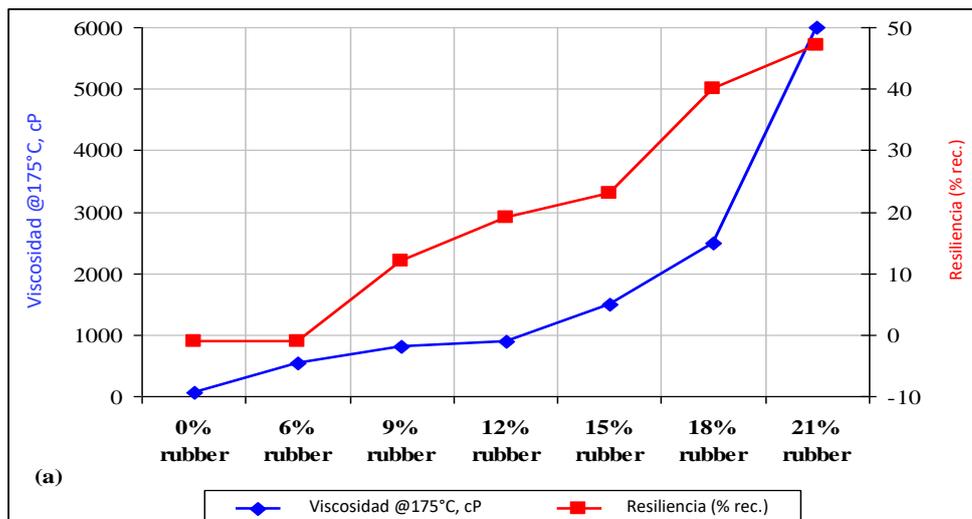


Figura 2. Variaciones de las propiedades físicas, la viscosidad y la resiliencia del AR con cantidades crecientes de polvo de caucho.

Esta clara tendencia de mejora de la resiliencia con el aumento del contenido de polvo de caucho se ha revertido recientemente en 2023, como se muestra en la Figura 3, para mezclas AR con un mayor porcentaje de contenido de polvo de caucho en peso de la mezcla de lo que era posible anteriormente. Con un porcentaje de caucho reaccionado y activado (RAR) del 1,5% en peso de la mezcla se puede conseguir un ligante AR con una alta resiliencia. La figura 4 muestra la misma tendencia para la vida a la fatiga a partir del ensayo de flexión en cuatro puntos, que muestra un aumento sustancial de la vida a la fatiga a medida que aumenta el porcentaje de caucho por encima del 1,5% en peso de la mezcla. La prueba de la viga de flexión de cuatro puntos se desarrolló como parte del Programa de Investigación Estratégica de Carreteras (SHRP) como prueba para predecir la vida de agrietamiento por fatiga de una mezcla asfáltica en caliente. La combinación de una mayor resiliencia del ligante AR (elasticidad, puede deformarse más antes de dañarse) de más polvo de caucho en el ligante y más ligante AR en la mezcla caliente ahora posible con RAR garantiza una mayor vida a la fatiga que representa más cargas de tráfico antes de que se produzca el agrietamiento por fatiga.

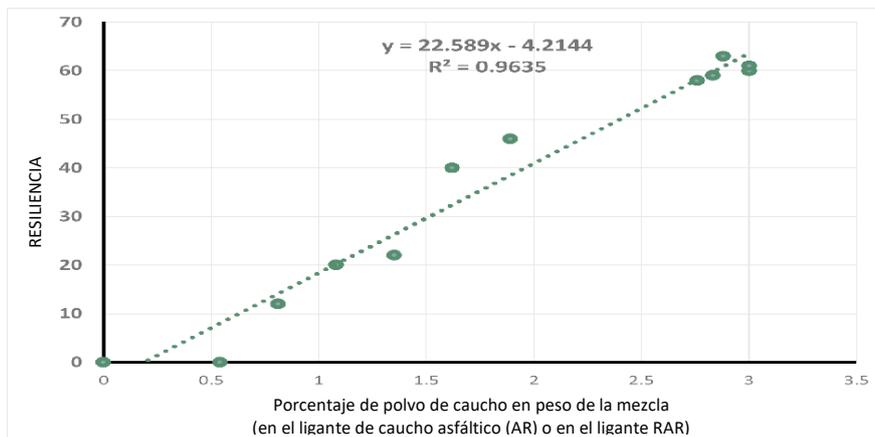


Figura 3. Efecto del porcentaje de polvo de caucho en la resiliencia del ligante.

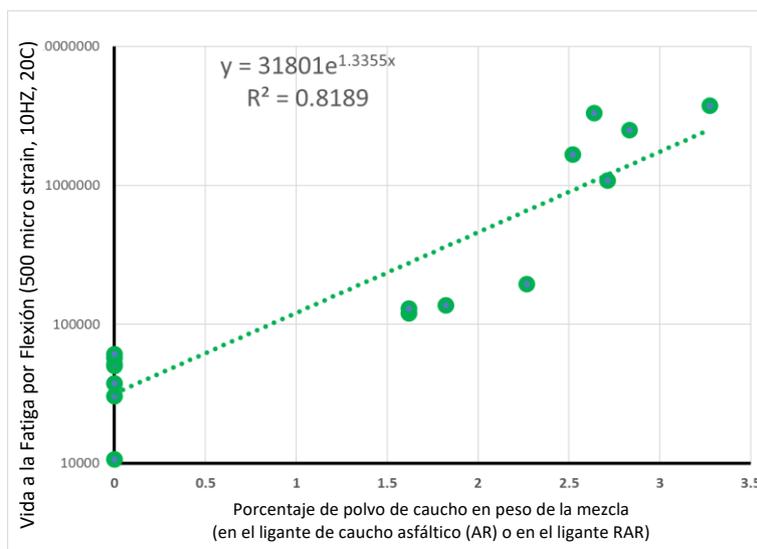


Figura 4. Efecto del porcentaje de polvo de caucho en la fatiga a flexión de una mezcla.

Además, la mejora del rendimiento con el aumento del contenido de caucho asfáltico y ligante RAR sigue una tendencia que puede predecirse mediante la fórmula SHELL de fatiga [6].

Claramente, la ecuación Shell demuestra la razonabilidad de la premisa de que a medida que aumenta el porcentaje en peso, es decir, el porcentaje en volumen, la vida a fatiga de la mezcla aumenta de forma muy drástica, tal como indican los resultados del ensayo de flexión en cuatro puntos.

Ecuación de Shell:

$$\varepsilon_t = ((0,856 \times V_b + 1,08) \times E^{-0,36} \times N^{-0,2})$$

donde:

$$V_b = \frac{P_b \cdot G_t}{G_b}$$

ε_t – Alargamiento a tensión.

V_b – Porcentaje de betún no absorbido por VOLUMEN de la mezcla.

E – Módulo de deformabilidad de la mezcla bituminosa (Pa).

N – Número de repeticiones a la falla, es decir al reducir el 50% del módulo.

P_b – Porcentaje de betún en peso de mezcla.

G_t – Gravedad específica de la mezcla asfáltica.

G_b – Gravedad específica del asfalto a 25°C

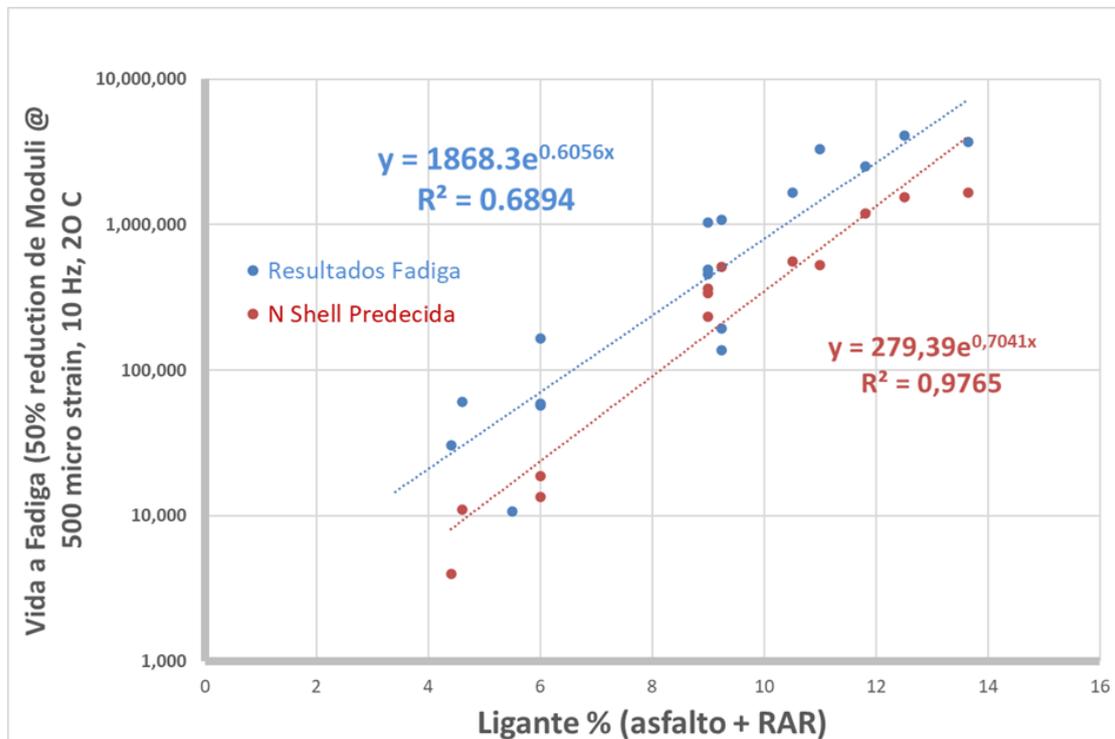


Figura 5. Predicción mediante la ecuación de la Shell y resultados reales de fatiga en ensayos de flexión en cuatro puntos en función del % de ligante.

4. El caucho asfáltico mejora la resistencia a la fatiga

En la década de 1990, USA llevó a cabo un programa nacional de investigación estratégica de carreteras (SHRP) para mejorar las pruebas de asfalto y desarrollar un programa de diseño empírico mecanicista de pavimentos con el fin de mejorar su rendimiento. A partir de esta investigación, se desarrolló un ensayo de viga de flexión en cuatro puntos para predecir el agrietamiento por fatiga. Con este ensayo, ahora era posible probar varias mezclas con diferentes cantidades de ligante asfáltico y de vacíos de aire seleccionar mejor los pavimentos que resistirían el agrietamiento por fatiga. La investigación se llevó a cabo en mezclas densas típicas con ligantes asfálticos típicos sin polímeros ni caucho. A partir de la observación de los daños en las vigas durante las pruebas, se seleccionó una reducción del 50% en la rigidez como punto final o punto de fallo de los ciclos hasta el fallo. Después de esta investigación, se han realizado muchas más pruebas con mezclas AR Gap Graded y Open Graded que demuestran que las mezclas AR tienen una vida a fatiga más larga con mayores cantidades de caucho. La figura 3 muestra que a medida que aumenta el porcentaje de caucho, aumenta la vida a la fatiga y el número de ciclos hasta el fallo en la prueba de flexión en cuatro puntos. La ventaja de más ligante AR es muy clara; sin embargo, es incluso mayor de lo que muestra la Figura 5. La Figura 6 muestra el perfil de la curva de fractura para una mezcla graduada densa típica y una mezcla AR Gap Graded. La mezcla Gap Graded de caucho asfáltico no falla en el mecanismo de fractura normal, sino que continúa absorbiendo tensión (deformación) durante toda la prueba. Del mismo modo, las mezclas AR probadas mediante el ensayo de flexión de cuatro puntos no se fracturan en el nivel de reducción del 50% de la rigidez, por lo que las vidas de fatiga de las mezclas AR de la Figura 3 son considerablemente más largas de lo que se muestra. Un valor de fallo más representativo para las mezclas AR es probablemente una reducción del 30% de la rigidez. La Universidad del Estado de Arizona investigó las propiedades mecánicas de las mezclas calientes de asfalto y de las mezclas calientes con caucho asfáltico Gap Graded que mostraron una reducción del agrietamiento [7] al aumentar la energía de fractura de las mezclas (Figura 7).

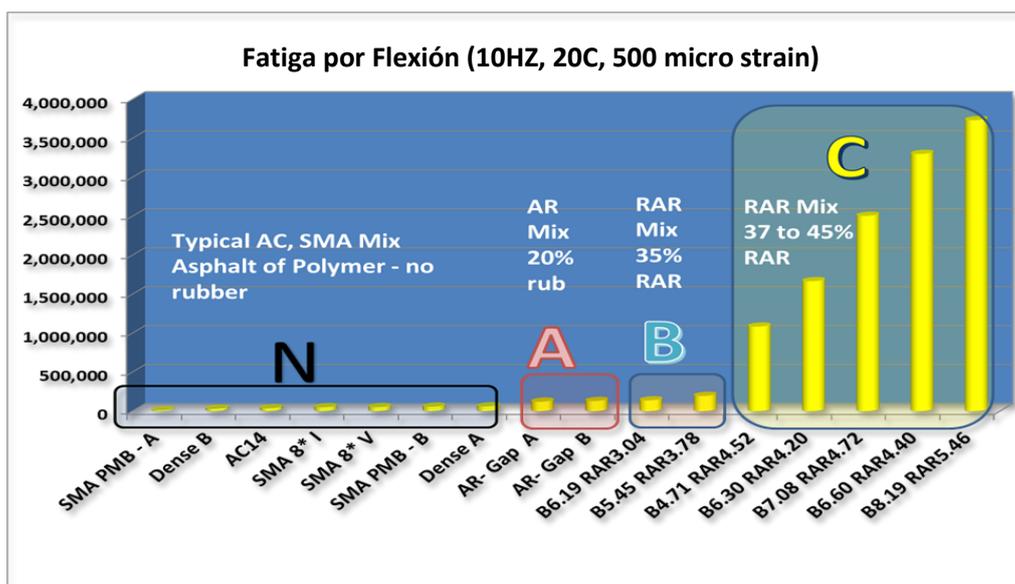


Figura 6. Comparación de la vida a la fatiga por flexión en cuatro puntos de flexión a 20C, 10 Hz y 500 microstrain para varias mezclas, convencionales, modificadas con polímeros, mezclas de caucho asfáltico y mezclas modificadas con RAR.

Performance de la Mezcla: Convencional VS. Caucho Asfáltico

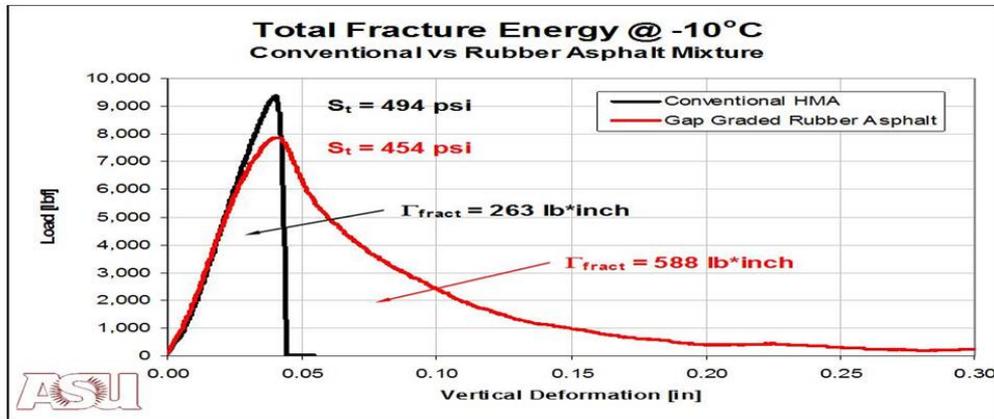


Figura 7. Se predijo una mayor energía de fractura con la mezcla Gap Graded de caucho asfáltico, lo que reduce el agrietamiento a baja temperatura (Zborowski, 2009).

El hallazgo de cinco veces la deformación en el informe de investigación de 1977 se verificó en un estudio de 2007 [8] realizado en California y que se muestra en la Tabla 1. Este estudio muestra de nuevo que el caucho asfáltico con al menos un 15 por ciento de polvo de caucho, la energía de deformación a la rotura de las mezclas se mejora en un factor de cinco como se muestra en el informe de 1977.

Tabla 1. Resultados del ensayo comparativo de flexión en cuatro puntos de una viga (informe TPC para California)

Tipo de ligante	RELACIÓN DE LA ENERGÍA DE DEFORMACIÓN A LA ROTURA DE LAS MEZCLAS (O LIGANTE)
Convencional	1
Ligante modificado con polímeros/otros	1.5
Caucho asfáltico 15% Goma triturada	5

El resultado práctico de todos estos descubrimientos es que más ligante AR con mejor resiliencia y más polvo de caucho serán más capaces de resistir el agrietamiento por fatiga. Esto llevó a perfeccionar el proceso RAR húmedo/seco, semihúmedo.

5. Ligante asfáltico RAR de proceso húmedo/seco, semihúmedo

Ahora es posible fabricar mezclas de AR con un 24% o más de polvo de caucho real. En 2011, o alrededor de esa fecha, se llevaron a cabo experimentos que condujeron al desarrollo de un proceso húmedo/seco o semihúmedo y al desarrollo de un Caucho Reaccionado y Activado (RAR) que se muestra en la Figura 8. El proceso implica la fabricación de un polvo de RAR que, cuando se mezcla con asfalto caliente se convierte en un ligante de caucho asfáltico y fue patentado en 2017. La mezcla puede realizarse en un camión de aplicación por pulverización para el revestimiento de sellado o introducirse en una planta en caliente por lotes o de tambor. El RAR

es un polvo por lo que no hay necesidad de ningún equipo o calor adicional, ahorrando así en costes de equipo adicional y reduciendo los costes de energía y reduciendo las emisiones de CO2. El RAR es un polvo en el que se pueden utilizar porcentajes más altos, como Charles McDonald previó hace mucho tiempo.



Figura 8. Componentes de caucho reaccionado y activado y producto en polvo (Bitumen, Polvo de Caucho e Fillers)

Desde la inspiración en 2011 hasta la actualidad, se ha construido un sorprendente total de 4144 km de carril (carriles de 1000 m de largo y 3,5 m de ancho) empleando RAR en mezclas en caliente SMA, Gap Graded, Open Graded y Thin Gap. El RAR se ha utilizado en aplicaciones de pulverización, capas de sellado y SAMI. Está más allá del alcance de este documento revisar en detalle cada proyecto que se muestra en la Tabla 2 lista de trabajos construidos con RAR en todo el mundo. En 2019 se construyó un importante proyecto de repavimentación en México, a las afueras de Ciudad de México. El proyecto consistió en la superposición de 80 kilómetros de carretera dividida de un pavimento de hormigón en mal estado con una mezcla de 50 mm de RAR-Thin Gap. Este proyecto tuvo tanto éxito que recientemente se han construido muchos otros proyectos de recubrimiento en México. El éxito del uso del ligante RAR se atribuye a la mejora de las propiedades del ligante y de la mezcla en caliente. Este éxito ha llevado a la construcción en 2022 de una planta de fabricación de RARX en México, también hay plantas en España y Portugal.

Tabla 2. Lista de trabajos construidos con RAR en todo el mundo.

LUGAR DE LA OBRA	LOCALIZACION	PAIS	ANO	LUGAR DE LA OBRA	LOCALIZACION	PAIS	ANO
BULGARIA	Highways A-1 Lyubimets	BULGARIA	2013	CARRIL BICI TORREJÓN DE ARDOZ	TORREJÓN DE ARDOZ	ESPAÑA	2017
CHILE	Ruta de la Fruta	CHILE	2019	PLAN ASFALTO FUENLABRADA 2017	FUENLABRADA	ESPAÑA	2017
LefoIIContractor	Carreteras secundarias	FRANCIA	2014	REFUERZO L 313 GUISSON A	LÉRIDA	ESPAÑA	2017
ALEMANIA	BAVIERA	ALEMANIA	2018	PLAN ASFALTO FUENLABRADA 2017	FUENLABRADA	ESPAÑA	2017
ALEMANIA		ALEMANIA	2023	PLAN DE ASFALTO FUENLABRADA	FUENLABRADA	ESPAÑA	2018
AUTOPISTA DE YAKARTA	YAKARTA	INDONESIA	2017	A-42 PLAZA ELÍPTICA	MADRID	ESPAÑA	2018
CARRERAS DE CARBÓN		INDONESIA	2018	SEGOVIA		ESPAÑA	2018
VARIAS CARRERAS		INDONESIA	2018	PRUEBAS	DRENSÉ	ESPAÑA	2018
CIRCUNVALACION DE DUBLÍN	DUBLÍN	IRLANDA	2018	PLAN ASFALTO DE COSLADA	COSLADA	ESPAÑA	2018
TEL AVIV	Camino de acceso a carretera	ISRAEL	2012	FUERTEVENTURA	FUERTEVENTURA	ESPAÑA	2019
TEL AVIV	Calle Yeheskel	ISRAEL	2014	ZAMORA		ESPAÑA	2019
TEL AVIV	Calle Salome	ISRAEL	2014	PLAN ASFALTO DE COSLADA	COSLADA	ESPAÑA	2019
Provincia de Trento	SS421	ITALIA	2013	MALLORCA	MALLORCA	ESPAÑA	2019
Ciudad de Bussero	Via Primo Maggio	ITALIA	2013	GRANADA	GRANADA	ESPAÑA	2019
Rho	Via Magenta	ITALIA	2013	AEROPUERTO GRAN CANARIAS	GRAN CANARIAS	ESPAÑA	2019
Trento	SS 12 Freight terminal	ITALIA	2013	AUTOVIA A 4	VALDEPEÑAS	ESPAÑA	2019
Venlo	Viale Cavour Ce mustoo	ITALIA	2014	OPERACION ASFALTO MADRID	MADRID	ESPAÑA	2020
ITALIA	Carreteras secundarias	ITALIA	2017	OPERACION ASFALTO MADRID	MADRID	ESPAÑA	2020
ITALIA	Carreteras secundarias	ITALIA	2023	AUTOVIA A 68	ZARAGOZA	ESPAÑA	2020
AUTOPISTA PIRAMIDES	TULANCINGO	MÉXICO	2018-19	OPERACION ASFALTO MADRID	MADRID	ESPAÑA	2020
AVENIDA ACUEDUCTO	ZAPOCAN, JALISCO	MÉXICO	2020	PUERTO DE HUELVA	HUELVA	ESPAÑA	2020
CALLES DERODAJE AEROPUERTO	GUADAJARA	MÉXICO	2020	GRANADA	GRANADA	ESPAÑA	2020
AUTOPISTAS MICHOACAN TRAMO PATZCUARO	URUAPAN	MÉXICO	2020	LA GRANIA	SEGOVIA	ESPAÑA	2020
PERIFERICO MORELIA	MORELIA	MÉXICO	2021	OPERACION ASFALTO MADRID	MADRID	ESPAÑA	2020
PISTA DE ATERRIZAJE AEROPUERTO TULUANA	TULUANA	MÉXICO	2021	AEROPUERTO DE FUERTEVENTURA	FUERTEVENTURA	ESPAÑA	2021
AUTOPISTA MEXICO TUXPAN	TRAMO NECAXA TIHUATLAN	MÉXICO	2021-22	CV 35	VALENCIA	ESPAÑA	2021
PUENTE COMANILLA CARR. 45		MÉXICO	2023	PARKINGALEGRA		ESPAÑA	2021
PISTA ATERRIZAJE AEROPUERTO BIX	LEON	MÉXICO	2023	ILANERA	OVIEDO	ESPAÑA	2021
TRAMO PRUEBA CIRCUITO EXTERIOR MEXIQUENSE		MÉXICO	2023	PLAN DE ASFALTO DE MÁLAGA	MÁLAGA	ESPAÑA	2018-19
REHABILITACION 200,000 M ² H. COLEGIO MILITAR		MÉXICO	2023	PLAN DE ASFALTO DE MÁLAGA	MÁLAGA	ESPAÑA	2018-20
AUTOPISTA MERIDA KANTUNIN SICT		MÉXICO	2023	ALICANTE	ALICANTE	ESPAÑA	2018-20
TRAMO PRUEBA RCD LAGOS DE MORENO	AGUACALIENTES	MÉXICO	2023	PLAN DE ASFALTO DE MÁLAGA	MÁLAGA	ESPAÑA	2019-20
BOMBARRAL	Pista de peaje de autopista	POR TUGAL	2015	OPERACION ASFALTO MADRID	MADRID	ESPAÑA	2019-20
BRAGA	Rampas de acceso a autopista	POR TUGAL	2021	CONSERVACION A 3	MADRID	ESPAÑA	2020-21
ICS Vila Flor	Douro Litoral	POR TUGAL	2021	SEGOVIA		ESPAÑA	2020
ENJO	Setúbal	POR TUGAL	2022	SEGOVIA		ESPAÑA	2020
ALGARVE	Algar Barlavento	POR TUGAL	2023	A-32 VILLACARRILLO VILLANUEVA DEL ARZOBISPO	JAÉN (ANDALUCÍA)	ESPAÑA	2021
ALGARVE	Algar Soflavento	POR TUGAL	2023	SUR DE SUECIA	SUECIA	2014	
ALGARVE	EN 125	POR TUGAL	2023	MICHIGAN	MICHIGAN	EEUU	2018
SAN PETERSBURGO	Ringway y South	RUSIA	2013	VIRGINIA EEUU	VIRGINIA	EEUU	2019
SAN PETERSBURGO	Puente	RUSIA	2018			ESPAÑA	2022
Municipalidad de Al Ain		EMIRATOS	2018			ESPAÑA	2023
		REP. CHECA	2022			URUGUAY	2023
Concepto n SACYR		BRAZIL	2023			CHILE	2023

6. Consideraciones sobre el grosor de la capa AR y el grosor de la película

El material original de proceso húmedo de caucho asfáltico de Charles McDonald se utilizó en una aplicación de pulverización de capa de sellado de normalmente 2,4 l/m². Más tarde se desarrollaron mezclas AR Gap Graded y Open Graded con un 8 a 10 por ciento de ligante de caucho asfáltico. Comparando el grosor de la película de varias mezclas, la mezcla de rutina de gradación densa con un 5% de asfalto tiene un grosor de película de unas 9 microns, el asfalto de caucho de Gap Graded, puede llegar a las 18 microns y el de Open Graded a las 36 microns. Cuanto mayor sea el espesor de la película, más lento será el envejecimiento. Las mezclas Gap Graded y Open Graded se han utilizado como recubrimientos sobre pavimentos agrietados o como recubrimientos sobre la capa de sellado AR colocada sobre un pavimento agrietado. En 1982 se llevó a cabo un estudio de investigación para determinar el mérito relativo de los recubrimientos delgados con una capa de sellado de caucho asfáltico. El Departamento de Transportes de Arizona tenía muchos kilómetros de pavimentos de hormigón agrietados y alabeados que presentaban una gran aspereza y una baja resistencia al deslizamiento. Se construyeron recubrimientos AR sobre el hormigón utilizando capas intermedias de membrana absorbente de tensiones. La primera capa colocada sobre el hormigón para nivelarlo fue una mezcla Open Graded, seguida de una capa de sellado AR y luego otra mezcla Open Graded. En aquel momento no existían las mezclas AR Open Graded, de lo contrario se habrían utilizado. La investigación evaluó la capacidad de reducción de tensiones del sistema SAMI de tres capas utilizando análisis de elementos finitos. Los resultados del estudio [9] muestran que el sistema de tres capas es equivalente a muchos centímetros de recubrimiento convencional, como se muestra en la Figura 9. Años más tarde, se colocaron mezclas AR Gap Graded y Open Graded en miles de kilómetros de autopistas ADOT y el agrietamiento coincidía con los resultados de los elementos finitos, ya que el agrietamiento se reducía significativamente, como se muestra en la Figura 10. El espesor de la mezcla asfáltica convencional en caliente era del orden de 115 mm, mientras que la mezcla Gap Graded es de 40

mm a 50 mm y la mezcla Open Graded es de 13 mm a 25 mm. Las mezclas AR Gap Graded y Open Graded se colocaron más finas que las mezclas convencionales y se comportaron mejor con menos agrietamiento [10].

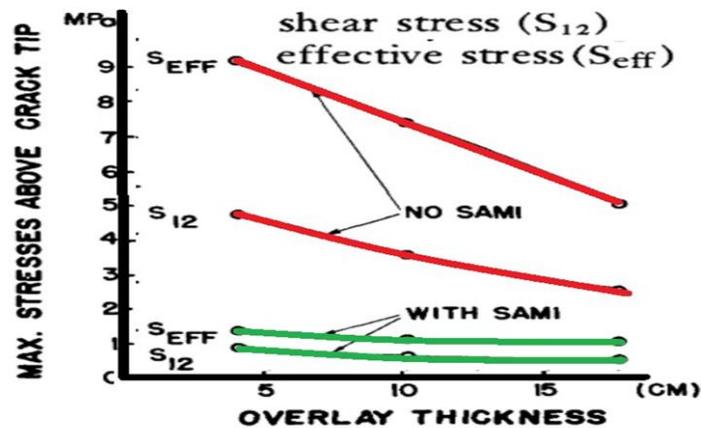


Figura 9. Efecto de una SAMI sobre el esfuerzo cortante y las tensiones efectivas en una superposición

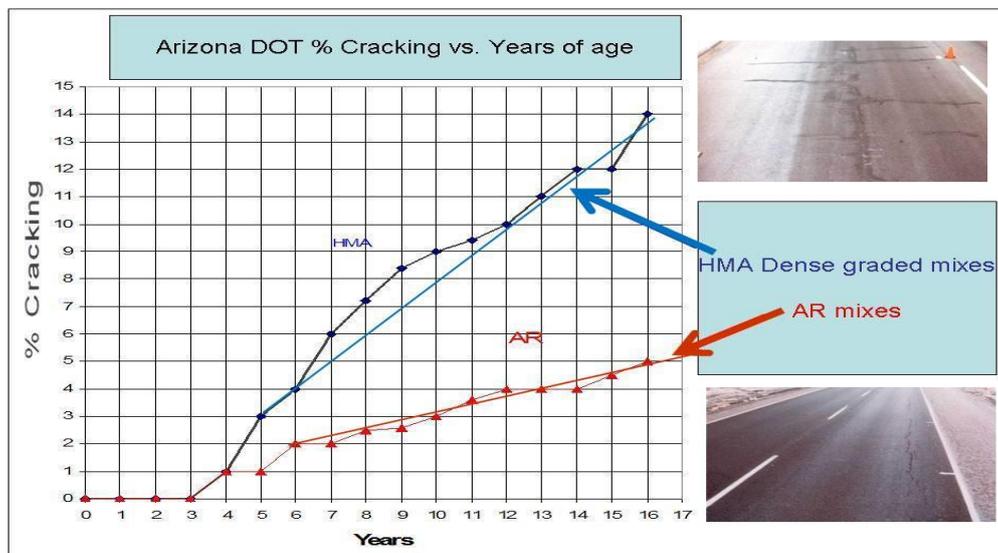


Figura 10. Evolución del % de agrietamiento a lo largo del tiempo - Mezclas asfálticas de caucho en comparación con mezclas dense graded- datos de ADOT.

7. Proyectos RAR con mayor contenido de polvo de caucho

Como se muestra en la Tabla 2, más arriba, desde 2011 ha habido muchos proyectos en los que se ha utilizado RAR. Sin embargo, merece la pena llamar la atención sobre algunos trabajos en los que el porcentaje de caucho en las mezclas fue probablemente el más alto jamás utilizado en cualquier mezcla. En estos proyectos se intentaba llegar a un punto en el que el ligante (es

decir, el betún y el RAR) tuviera un porcentaje de caucho frente al betún que estuviera muy cerca de cambiar de fase. Un porcentaje mayor de caucho y el ligante dejaría de ser un líquido viscoso.

Con este alto contenido de RAR, el ligante tiene una resiliencia muy elevada y un porcentaje de recuperación muy alto. Obviamente, para incorporar porcentajes tan elevados de caucho como los mostrados en la Tabla 3, hubo que ajustar las gradaciones de los áridos y, básicamente, se eliminaron la mayoría de los finos para crear espacio para los elevados valores de caucho en miga, como se muestra en la Figura 11. Cabe señalar que tener un 5% en peso de RAR en la mezcla corresponde a aproximadamente un 12% en volumen. Además, dada la forma de la miga de caucho, la superficie es muy elevada en comparación con la de los áridos utilizados habitualmente. En estos casos, la superficie se multiplica por 10, lo que requiere un mayor contenido de ligante para recubrir todas las partículas de caucho y de árido.

También es evidente que con el aumento del contenido de ligante se incrementa el espesor de la película alrededor de cada partícula, lo que conduce a una mayor durabilidad, como se muestra en un artículo de Krishna, et. al. [11]. Todas las mezclas se diseñaron con un contenido de aire vacío del 4%, excepto la mezcla A32-SPAIN, que se diseñó para alcanzar un 18% de aire vacío, reduciendo así el contenido de ligante y disminuyendo el espesor de la película.

Algunas de estas mezclas se sometieron a ensayos de fatiga por flexión. Es evidente que la vida a fatiga de estas mezclas es unas 100 veces superior a la de las mezclas densas normales ensayadas en condiciones idénticas.

Los proyectos seleccionados fueron los pavimentos que tenían una buena capacidad estructural, pero estaban agrietados. En este caso se necesitaba una mezcla flexible con gran resistencia al envejecimiento, gran textura y buena resistencia al deslizamiento, pero también gran capacidad de agrietamiento por reflexión. En algunos proyectos el agrietamiento era también demasiado extenso y por ello se utilizó también un RAR SAMI.

Los proyectos en los que se utilizó RAR-SAMI fueron A4-Madrid (ESPAÑA) y Michigan (USA). El RAR SAMI contenía unos 2,4 l/m² con un 25 a 30% de RAR y unos 14 kg/m² de árido de tamaño único (entre 19 y 16 mm). El uso de una SAMI ha aumentado significativamente la durabilidad del pavimento.

Todos estos proyectos, después de varios años en el campo, están funcionando como se esperaba, demostrando que las mezclas con alto contenido en caucho realmente pueden tener grandes beneficios medioambientales porque se aplican con capas muy finas. En los casos anteriores, el grosor de las capas de las mezclas oscilaba entre 2 y 4 cm.

Tabla 3. Propiedades generales de la mezcla de los recubrimientos aplicados con éxito con altos porcentajes de RAR.

	A4 - Madrid SPAIN + SAMI	IC5 - (SMA10S) PORTUGAL	Freeway PORTUGAL	EN10 - SETUBAL PORTUGAL	Mata do Duque - PORTUGAL	Michigan USA	A32 - SPAIN
Bitumen (% by weight of mixture)	7.2	7.5	7.08	6.9	7.5	7.2	4.64
RAR (% by weight of mixture)	4.8	5	4.72	4.6	5	4.8	1.36
Crumb rubber by weight of the	2.88	3	2.832	2.76	3	2.88	0.816
Film Thickness (micron)	14.8	17.6	17.6	16.5	13.3	16.8	9.2
VMA	23.5	27.5	29.8	26.7	27	26.6	27.5
Viscosity at 177 C (Poises)	10200	12200	8900	8600	9600	12800	-
Ring and Ball C	82	82	81	81	85	83	-
Resilience (%)		60	59	58	61	63	-
Fatigue life 10 Hz 20 C cycles to failure at (500µ)	3,700,000	4,076,667	2,200,000	1,200,000		3,300,000	-

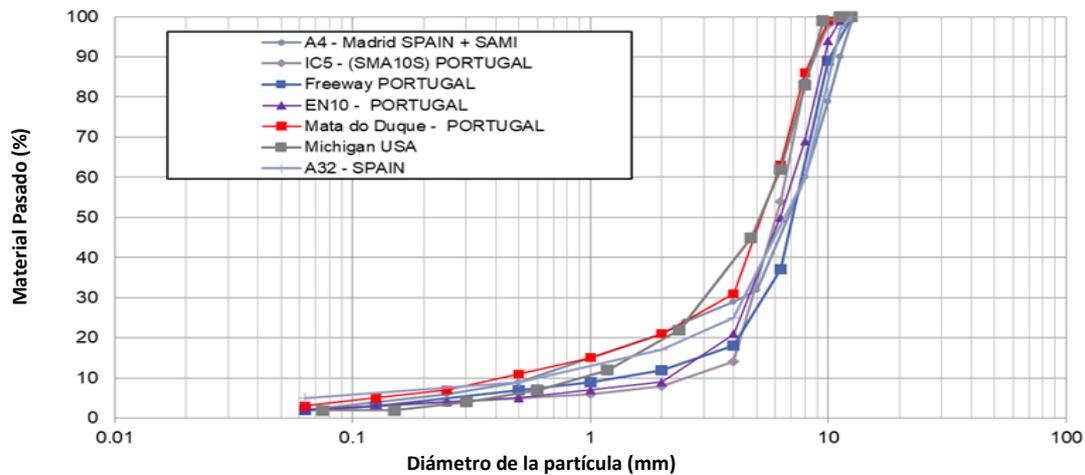


Figura 11. Gradación de áridos de mezclas aplicadas con éxito con altos porcentajes de RAR.

El concepto de reducir el espesor cuando se utilizan mezclas de caucho asfáltico o RAR y más aún si se introducen SAMI-R de caucho asfáltico para evitar el agrietamiento por reflexión no es nuevo. Forman parte de la “Caltrans Pavement Design Guide” [12] que, extrañamente, no se han aplicado de forma generalizada en todo el mundo dado lo bien que han funcionado estos conceptos y soluciones. En la Tabla 4 y en la Tabla 5 queda clara la eficacia de las mezclas de caucho asfáltico Asphalt Rubber Hot Gix Gap Graded - ARHM-GG en comparación con las mezclas tradicionales Hot Mix Asphalt HMA (DGCA - Dense Graded Asphalt Concrete), alcanzando una reducción del espesor del 50%. También está claro que con la introducción de un SAMI-R esa reducción puede alcanzar el 30% en algunos casos.

Tabla 4. Equivalencias estructurales de California (mm)

DGAC	ARHM-GG ¹	ARHM-GG/ SAMI
45	30 ²	-
60	30	-
75	45	30
90	45	30
105	60	45
120	60	45
135	45 ³	60
150	45 ⁴	60
165	60 ³	45 ³
180	60 ⁴	45 ⁴

Notas:

1. La equivalencia no experimental máxima permitida para ARHM-GG es de 2:1.
2. El espesor mínimo admisible del ascensor ARHM-GG es de 30 mm.
3. Coloque primero 45 mm de DGAC nuevo.
4. Coloque primero 60 mm de DGAC nuevo.

Tabla 5. Equivalencias de retardo de grieta reflectante de California (mm)

DGAC	ARHM-GG	ARHM-GG/SAMI
45	30 ¹	-
60	30	-
75	45	-
90	45	-
105 ²	45 ³	30 ⁴

Notas:

1. El espesor mínimo admisible subida ARHM-GG es de 30 mm.
2. Un espesor DGAC de 106 mm es el espesor máximo recomendado por Caltrans para la fisuración por reflexión.
3. Utilice 45 mm si la anchura de la fisura es inferior a 3 mm y 60 mm si la anchura de la fisura es igual o superior a 3 mm.
4. Utilizar si la anchura de la fisura es igual o superior a 3 mm. Si es inferior a 3 mm, utilice otra estrategia.

El rendimiento de todos los proyectos en la TABLA 2 confirma la validez de los conceptos que subrayan la creación de las directrices en la TABLA 4 y 5 - Equivalencias estructurales de California (mm).

Además, también ha sido claramente corroborado por el estudio ALF - FHWA [13] completado en 2012 que una sección de prueba de mezcla AR Gap Graded se comportó mucho mejor que todas las demás secciones de prueba como se muestra en la Figura 12. Se probaron varias secciones, incluida una sección de control de 10 cm de espesor construida con el ligante SHRP que se recomendó tras un proyecto de investigación SHRP de 5 años para la identificación y selección de la función ligante de la localización, la carga y el entorno frente a un caucho asfáltico de 5 cm de espesor sobre una mezcla convencional de 5 cm de espesor (igual que la de la sección de control). La sección con caucho asfáltico (LANE 1) no mostró ningún agrietamiento, véase la Figura 12, incluso después de 350.000 ciclos de carga, mientras que la sección de control empezó a agrietarse a los 20.000 ciclos aproximadamente.

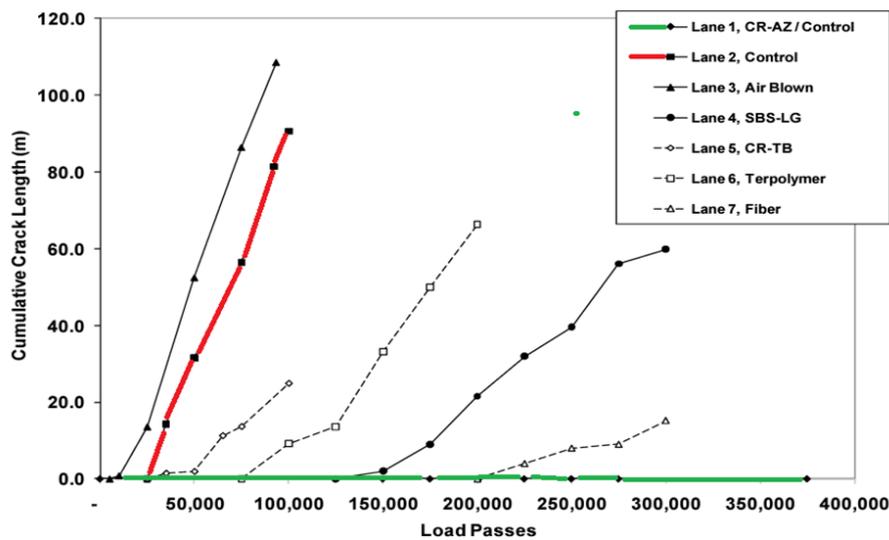


Figura 12. Longitud de grieta acumulada frente a pasadas de ALF en secciones de 4 pulgadas (100 mm) a 66 °F (19 °C) cargadas por fatiga.

Esta abrumadora cantidad de datos demuestra el alcance de los beneficios derivados de la incorporación adecuada del polvo de caucho en las mezclas de pavimentación, lo que sugiere que se trata de un candidato de primer orden para ser utilizado ampliamente en futuras estrategias de pavimentación sostenible con asfalto.

8. Medio ambiente sostenible

A medida que necesitamos crear un medio ambiente más sostenible, la importancia de adoptar ampliamente mezclas que incorporen adecuadamente mezclas de caucho asfáltico y RAR adquiere mayor relevancia. Con el aumento de la vida útil a la fatiga (resistencia a las grietas) sin comprometer la formación de roderas ni los daños causados por la humedad, estas mezclas pueden conducir a la construcción de pavimentos y revestimientos más finos, lo que lleva directamente a la minimización de los recursos, concretamente de la minería, el transporte y el calentamiento de los áridos.

Se realizó un estudio para comparar el ahorro de energía mediante el uso de caucho asfáltico y mezclas similares al RAR con otros usos comunes de los neumáticos usados, es decir, la cubierta diaria alternativa y el combustible derivado del neumático [14]. Como se muestra en la Figura 13, el uso de caucho asfáltico proporcionó un ahorro sustancial de energía, así como de CO₂. Esto se debe principalmente a que las mezclas de caucho asfáltico y RAR se colocan en capas relativamente finas que reducen la cantidad de árido que necesita extraerse, el transporte del árido y la cantidad de mezcla caliente que necesita calentarse. En un informe de la ASU presentado en AR2009 se comunicó un hallazgo similar. La figura 14 muestra la naturaleza de los ahorros de CO₂ comunicados por la ASU [15].

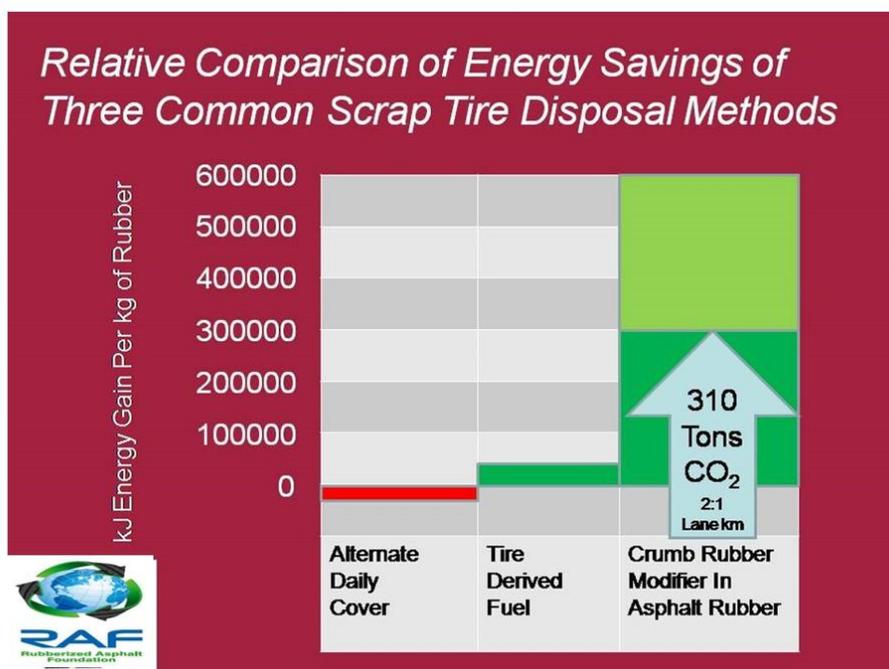


Figura 13. Ahorro de energía y CO₂ con el caucho asfáltico

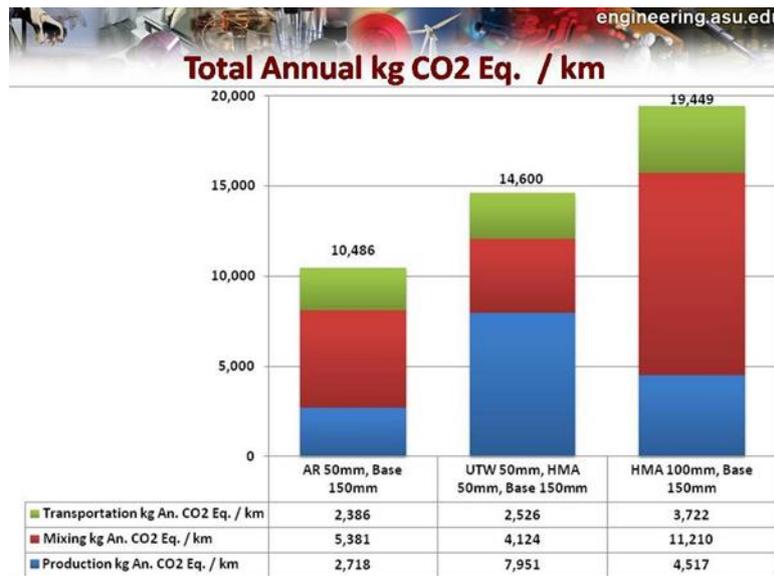


Figura 14. Total anual kg CO2 Eq. / km para diseños de pavimento con volumen de tráfico moderado

Las mezclas de caucho asfáltico y RAR son más duraderas y tienen una mejor capacidad de envejecimiento con menos agrietamiento, lo que prolonga la vida útil del pavimento. El estudio de la ASU [15] demostró en la Figura 15 la importancia del aumento de la vida útil para reducir el CO2. Esta figura demuestra que a medida que aumenta la vida útil del caucho asfáltico y del RAR se reduce significativamente el total anual de CO2 eq./km. Los pavimentos que duran cinco años en un ciclo de 25 años producirán 500.000 Kg de CO2 en comparación con los pavimentos que duran 25 años producirían 125.000 Kg de CO2, una reducción muy sustancial. Tal reducción de CO2 es muy beneficiosa para el medio ambiente y para una economía circular sostenible, lo que se amplía aún más en un estudio que concluyó que las soluciones de betún modificado con caucho proporcionan un beneficio inmediato en lo que respecta al ahorro de energía debido a la reducción de materias primas y procesos relacionados necesarios durante la fase de construcción, así como la ventaja de una mayor vida útil del pavimento [16].

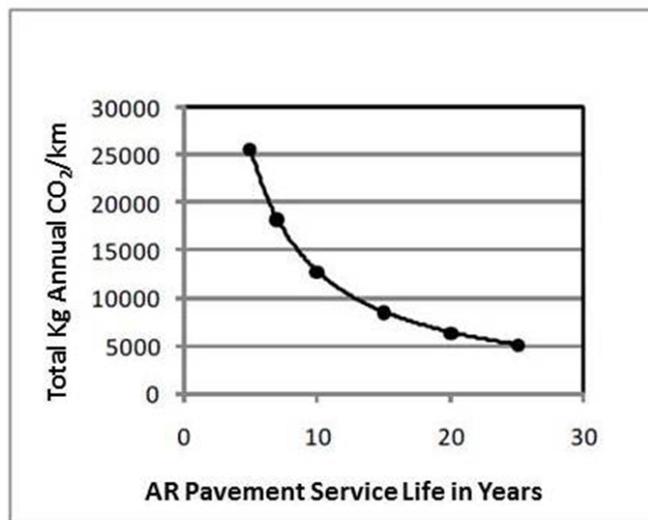


Figura 15. Cambio en el total de Kg anuales de CO2 Eq./km en función de la vida útil del pavimento de caucho asfáltico en años.

Los beneficios medioambientales se demuestran aún más en un documento presentado en la Conferencia RAR2022 en Málaga, España [17]. Este documento, al igual que los otros dos, concluía que tras 20 años de vida operativa de un pavimento de caucho asfáltico/RAR la huella medioambiental y la huella de carbono son la mitad que las de una mezcla asfáltica convencional.

9. Conclusiones

Los datos presentados en este documento apoyan el concepto bien demostrado de que la incorporación de ligantes y mezclas adecuadamente diseñadas con polvo de caucho de neumáticos reciclados produce importantes beneficios de rendimiento en los pavimentos.

Existen especificaciones en California para el uso de caucho asfáltico considerando la reducción del espesor de algunas capas de pavimento y en conjunción con el uso de sellados SAMI.

Las mezclas recientemente formuladas que incorporan caucho reaccionado y activado (RAR) han demostrado beneficios que igualan y superan a los de las mezclas de caucho asfáltico simplemente porque ahora es posible incorporar mayores contenidos de polvo de caucho en el ligante al igual que McDonald intentaba hacer cuando utilizaba caucho asfáltico normal.

Se presenta la formulación de varias mezclas RAR con contenidos de ligante mucho más elevados que las mezclas regulares, llegando al 12,5%. La modelización, las pruebas de laboratorio y el rendimiento sobre el terreno apoyan el concepto de que la introducción de polvo de caucho en las mezclas y en las SAMI produce un rendimiento significativamente mejor y que el rendimiento aumenta con el contenido de polvo de caucho. En parte, ese aumento del rendimiento se debe al aumento del espesor de la película alrededor del árido.

10. Referencias

- [1] Whiting, 1873, US Patent 142,601
- [2] McDonald, 1975, US Patent 3891585
- [3] Jorge Sousa, George B. Way, and Ali Zareh. "Asphalt-Rubber Gap Graded Mix Design Concepts," Proceedings Asphalt Rubber 2006, Pages 523-544, Palm Springs, California, October 25-27, 2006, ISBN: 962-405-091-0.
- [4] Green, E. L., William J. Tolonen, and Robert L. Dunning, "The Chemical and Physical Properties of Asphalt Rubber Mixtures," Arizona Department of Transportation, Final Report HPR-1-14(162), March 1977.
- [5] Chehovits, James G., "Design Methods for Hot-mixed Asphalt Rubber Concrete Paving Materials," Proceedings of National Seminar on Asphalt-Rubber, October 1989.
- [6] The Shell Bitumen Handbook, Sixth Edition, 2015.
- [7] Zborowski, 2009, Zborowski, Aleksander and Kamil Kaloush, "A Fracture Energy Approach to Model the Thermal Cracking Performance of Asphalt Rubber Mixtures", Pages 153-169, Asphalt Rubber 2009, Road to Sustainability, Proceedings, Nanjing, China, 2nd to 4th, November 2009, ISBN: 978-988-18681-1-4. 10.
- [8] Sousa, J. B., and George B. Way, "Models for Estimating Treatment Lives, Pavement Life Extension and the Cost Effectiveness of Treatments on Flexible Pavements," California Department of Transportation and California Pavement Preservation Center, December 2007.
- [9] Chen, Nan Jim, Joseph A. Di Vito, and Gene R. Morris, Finite Element Analysis of Arizona's Three-Layer Overlay System of Rigid Pavements to Prevent to Prevent Reflective Cracking, Association of Asphalt Pavement Technologists, Volume 51, Page 150, 1982.
- [10] Way, George B., Jorge Sousa, and Kamil E. Kaloush, "Rubberized Asphalt Benefitting Asphalt Pavements," Rubberized Asphalt/Asphalt Rubber (RAR2018) Conference, Pages 23-46, Proceedings Kruger Park Protea Hotel, South Africa, September 25th-28th, 2018, ISBN: 978-989-20-8662-0.
- [11] Vinay H N, Francisco Silva, Jorge B. Sousa, George B. Way, Krishna Prapoorna Biligiri, "Assessment of Threshold Film Thickness Surface Area for RAR Modified Asphalt Rubber Mixtures," Pages 61-78, Proceedings Rubberized Asphalt/Asphalt Rubber (RAR2018) Conference, Kruger Park Protea Hotel, South Africa, September 25th-28th, 2018, ISBN: 978-989-20-8662-0.

- [12] Shatnawi, Shakir, and Bing Long, “*Performance of Asphalt Rubber as Thin Overlays*,” Asphalt Rubber 2000 Proceedings, Page 53-72, Vilamoura, Portugal, November 14th to 17th 2000, Rubberized ISBN: 972-95240-9-2.
- [13] Gibson, Nelson, Xicheng Qi, Aroon Shenoy, Ghazi Al-Khateeb, M. Emin Kutay, Adrian Andriescu, Kevin Stuart, Jack Youtcheff, and Thomas Harman, “*Performance Testing for Superpave and Structural Validation*,” Report No. FHWA-HRT-11-045, November 2012.
- [14] Sousa, Jorge, George B. Way and Douglas Carlson, “*Environmental, Energy Consumption and CO2 Aspects of Recycled Waste Tires Used in Asphalt-Rubber*”, Asphalt rubber 2009 Proceedings, pages 755-766, Nanjing, China, November 2th-4th, 2009, ISBN: 978-988-18681-1-4.
- [15] White, Philip White, Jay S. Golden, Krishna P. Biligiri, and Kamil Kaloush, “*Modeling Climate Change Impacts of Pavement Production and Construction*”, College of Design Innovation and School of Sustainability, Arizona State University, 2009.
- [16] Cacho, Marta S., Bruno Ferreira, Jorge B. Sousa, and George Way, “*A Three Solution Pavement Rehabilitation Case Study, Demonstrating Rubber-Modified Bitumen Cost and CO2 Effective Solution for a Circular Sustainable Economy*,” Rubberized Asphalt/Asphalt Rubber (RAR2018) Conference, Pages 581-596, Proceedings Kruger Park Protea Hotel, South Africa, September 25th-28th, 2018, ISBN: 978-989-20-8662-0.
- [17] Coll, Miguel Angel Sanz, Cirtec. Sacyr Green, Abaleo S.L., and José Luis Canga Cubanés, “*Environmental benefits and carbon footprint reduction when executing roads with asphalt mixtures that incorporate secondary raw materials from recycling of used tires*,” Rubberized Asphalt/Asphalt Rubber Proceedings, Pages 557-575, Malaga, Spain, June 26th to 29th. 2022, ISBN978-989-53684-0-2.