

Análisis mecánico de emulsiones asfálticas CRR-1 y CRL-1 modificadas con caucho reciclado de bota de combate por medio del ensayo de corte entre mezclas asfálticas tipo MDC-19 y MDC-10

Mechanical Analysis of Asphalt Emulsions CRR-1 and CRL-1 Modified with Recycled Combat Boot Rubber, by Means of the Shear Test between Asphalt Mixtures Type MDC19 and MDC-10

Valeria Vanessa Díaz Vargas¹
Harrison Fernandez Castellanos²
Jhoan Sebastián Avendaño Rincón³
Johanna C. Ruiz A.⁴

¹Escuela Militar de Cadetes “General José María Córdova”.
Email: valeria.vvdu-09@hotmail.com

²Escuela Militar de Cadetes “General José María Córdova”.
Email: fabian251936@hotmail.com

³Escuela Militar de Cadetes “General José María Córdova”.
Email: jhhanjo24@hotmail.com

⁴Escuela Militar de Cadetes “General José María Córdova”.
Email: caroruiz33@gmail.com

 OPEN ACCESS



Copyright:

©2023. La revista *Ingenierías USBmed* proporciona acceso abierto a todos sus contenidos bajo los términos de la licencia creative commons Atribución no comercial SinDerivar 4.0 Internacional (CC BY-NC-ND 4.0)

Tipo de artículo: Investigación.

Recibido: 26-07-2022.

Revisado: 29-09-2022.

Aprobado: 10-12-2022.

Doi: 10.21500/20275846.6030

Referenciar así:

V. V. Díaz Vargas, H. Fernández Castellanos, J.S. Avendaño Rincón y J.C. Ruiz Acero, “Análisis mecánico de emulsiones asfálticas CRR-1 y CRL-1 modificadas con caucho reciclado de bota de combate por medio del ensayo de corte entre mezclas asfálticas tipo MDC-19 y MDC-10,” *Ingenierías USBMed*, vol. 14, n.º 1, pp. 22–28, 2023.

Disponibilidad de datos:

todos los datos relevantes están dentro del artículo, así como los archivos de soporte de información.

Conflicto de intereses:

los autores han declarado que no hay conflicto de intereses.

Editor: Andrés Felipe Hernández.

Universidad de San Buenaventura, Medellín, Colombia.

Resumen. En los procesos de construcción que se llevan a cabo en las diferentes obras civiles se ha evidenciado el uso de diferentes materiales como el cemento, el asfalto y los agregados pétreos, entre otros. Donde estos materiales requieren la ejecución de métodos para la construcción que afectan directamente el medio ambiente y, en algunos casos, los recursos naturales. Es por esto que los profesionales de la industria y la academia están buscando nuevas técnicas en el uso de estos materiales que ayuden en la reducción del impacto de la contaminación, la explotación de recursos naturales, la emisión de gases de efecto invernadero y, en general, a reducir las afectaciones y aumentar el desarrollo sostenible. En este artículo se propone un método para reutilizar el material de caucho de la suela de botas de combate militar en emulsiones asfálticas tipo CRR-1 y CRL-1 en diferentes dosificaciones que permiten conocer la adherencia entre capas por medio de la fabricación de mezclas asfálticas tipo MDC-19 y MDC-10 y la ejecución de la prueba de corte con el grano de caucho reciclado al 6%, 9% y 12%.

Palabras Clave. Emulsión, emulsionante, rompimiento, GCR, Asfalto modificado, caucho vulcanizado.

Abstract. In the construction processes that are carried out in the different civil works, the use of different materials such as cement, asphalt and stone aggregates, among others, has been evidenced. Where, these materials require the execution of construction methods that directly affect the environment and, in some cases, natural resources. This is why industry and academic professionals are looking for new techniques in the use of these materials that help reduce the impact of pollution, the exploitation of natural resources, the emission of greenhouse gases and, in general, reduce the effects and increase sustainable development. In This paper, we propose a method to reuse the rubber material of the sole of military combat boots, in asphalt emulsions type CRR-1 and CRL-1 in different dosages, which allow to know the adhesion between layers, by means of manufacturing of asphalt mixtures type MDC-19 and MDC-10 and the execution of the cut test with the grain of recycled rubber at 6%, 9% and 12%.

Keywords. Emulsion, Emulsifier, GCR, Vulcanized Rubber, Modified Asphalt Mixtures.

I. Introducción

A lo largo de los años, las estructuras de las carreteras se han deteriorado rápidamente debido al aumento de la densidad de tráfico [1], por eso es necesario garantizar que los estados de las infraestructuras viarias se mantengan en los niveles deseables a pesar de la creciente demanda de transporte. Es por esta razón que continuamente se viene buscando mejorar la propiedades físicas y mecánicas de las mezclas asfálticas para ofrecer pavimentos flexibles que garanticen mayor confort a los usuarios y menor emisión de gases de efecto invernadero al ambiente.

Las estructuras de pavimentos están conformadas por varias capas (subrasante, subbase, base y carpeta de rodadura) y para permitir una correcta adherencia entre dos de ellas (o subcapas), se emplean las llamadas emulsiones asfálticas, cuyo componente principal es el asfalto [2].

El uso de asfaltos en la industria de la construcción está acompañado de un proceso de precalentamiento o tratamiento que requiere el consumo altas cantidades energía (134.5 MJ/ton de mezcla asfáltica en caliente) [3], además de la emisión de dióxido de carbono y otros gases de efecto invernadero producto del uso de combustibles fósiles y solventes para su preparación. Adicionalmente, se evidencia que las construcciones de infraestructuras viales están directamente relacionadas con el consumo de combustible y las emisiones de diferentes gases contaminantes, fenómeno que se evidencia al transcurrir el tiempo en dichas infraestructuras. En consecuencia, se identifica un reto para la ingeniería, ya que se debe garantizar la funcionalidad, la seguridad y la economía en los proyectos, además, se debe reducir el impacto ambiental.

Una manera de reducir el uso de asfaltos y reducir esta problemática es reemplazando parcialmente este material con otros compuestos. Por ello, en este artículo se presenta una propuesta de reutilización del caucho vulcanizado, empleado en la fabricación de suelas de botas de combate del personal militar del Ejército Nacional. La propuesta es la generación de un aditivo para el sellante asfáltico que cumpla con las características físicas necesarias para su utilización en la construcción y reparación de los concretos asfálticos, mejorando las condiciones del servicio de las vías y disminuyendo costos debido a un menor mantenimiento de la malla vial.

El uso del Grano de Caucho Reciclado (GCR) como sellante asfáltico tipo ligante permite dotar a la película ligante de un mayor espesor sin que provoque problemas de escurrimientos o exudaciones. Con ello se busca proporcionar uniformidad en la estructura de pavimento y una mayor capacidad de recuperación a deformaciones por el paso de vehículos pesados y cambios de temperatura [4].

En cuanto al ámbito económico, con la propuesta se busca deducir costos debido a que se está reutilizando

materiales, específicamente, la suela de las botas de uso militar. Lo que se pretende con la propuesta es fomentar la economía circular de materiales de uso común y abrir la posibilidad de implementar en diferentes ámbitos de la ingeniería y construcción como material de absorción de impactos y vibraciones, y ampliar la fuente de materia prima como los neumáticos inutilizados [4].

El empleo de hidrocarburos está generando contaminación ambiental a nivel mundial, ya que forman gases contaminantes industriales, “esmog”. Estos gases se generan debido al proceso de calentamiento industrial por medio de las máquinas esparcidoras de riego de asfalto, afectando poblaciones y al personal que realiza dicha actividad, según el Instituto Nacional de Salud y Seguridad Ocupacional, “los vapores contaminantes que pueden desprenderse del asfalto en días muy calurosos es infundada. En ese sentido, el organismo indica que los riesgos para la salud de las personas están mayoritariamente asociados con la fabricación y aplicación de este recubrimiento” [5].

La contaminación por hidrocarburos a nivel nacional afecta, principalmente, a más del 60% de las comunidades o resguardos indígenas. Donde la ocupación y el uso del suelo está siendo afectada, según el periódico *El Tiempo* “En total, ocupan más de 4 millones de hectáreas, en 4 departamentos de la Amazonia colombiana”; ya que, el pavimento asfáltico se basa, principalmente, en el petróleo. Este hidrocarburo se extrae de las represas subterráneas, por medio del fracturamiento hidráulico “fracking”, método que en Colombia es una controversia entre ambientalistas y visionarios, pero es el método más usado y hasta la fecha legal según el Consejo de Estado de noviembre del 2018 en el cual se rechaza la petición del Ministerio de minas y de energía de Colombia de cautelar esta práctica. “De los 51 bloques petroleros, 37 se traslapan con 81 resguardos indígenas, principalmente en los departamentos de Putumayo, Caquetá y Amazonas” [5]. El ejército de Colombia y los ingenieros militares, durante varios años, han ayudado a algunas comunidades desfavorecidas y necesitadas, que además no cuentan con una vía de comunicación, construyendo vías en excelente estado de calidad y ayudando a mejorar el transporte y desarrollo de las comunidades. A pesar de estos trabajos no se cuenta con un proceso óptimo que ayude a reducir la contaminación, aunque cuenten con los recursos posibles como el caucho reciclado de la suela de las botas de los soldados. El ejército tiene un problema ambiental por el mal manejo de desechos que tienen hacia estas materias primas en estado de eliminación. Además, al reducir los costos que genera la construcción de una vía de pavimento asfáltico, el ahorro se podría invertir en la adquisición de nuevos materiales. Según el periódico *El Tiempo* “Construir un kilómetro carril (1000 metros de largo por 3.5 metros de ancho) de vía es tan costoso que, cada vez que se hace, Bogotá debe gastar el equi-

valente a lo que cuesta financiar la educación gratis de un año para 900 niños (1500000 pesos por cupo)” [6].

“Las fuerzas militares cuentan con un plan anual de bota vulcanizada, la cantidad de 254.070 botas” [7], este proceso lo que contribuirá al medio ambiente es evitar “(...) la debida depuración que se realiza por parte del Batallón de Intendencia Las Juanas al entregar dicho monto de botas a una empresa x privada” [8]. Esta depuración consiste en procesos de fundición y quema del material, donde el 50% es caucho que libera gases tóxicos nocivos para la salud y el medio ambiente, estos materiales son mercurio, plomo y monóxido de carbono.

La propuesta se identifica como una oportunidad para satisfacer las necesidades ambientales, económicas y equilibrar el sostenimiento de institución, aparte de ofrecer a las nuevas generaciones nuevos métodos que ayuden a impulsar en el uso otros elementos reciclables como es el caucho, elemento que tardaría como mínimo 500 años en descomponerse. Según el Instituto Nacional de Ecología (INE) “cada neumático tarda 500 años en biodegradarse (...) Aunque las llantas no son consideradas desechos peligrosos, su acumulación en tiraderos, lotes baldíos o cualquier otra área ocasiona incendios y contaminación del ambiente (...) por lo que es indispensable contar con programas para coleccionar, procesar y reutilizar su materia prima”.

Es por ello que proponemos la reutilización del caucho, materia prima que difícilmente puede ser biodegradable, naturalmente, buscando evitar costos y sobrecostos que se generan por parte de la institución. Además, se busca aumentar el presupuesto que se tiene para la inversión en otras necesidades prioritarias del Ejército. De igual manera, se busca reducir la contaminación que se genera debido a la quema de este material y se comience a innovar con estos materiales dando una segunda vida útil. Finalmente, es importante que los jóvenes ingenieros y futuras generaciones generen soluciones innovadoras para aprovechar materiales reciclados.

II. Justificación

El desarrollo de un país está directamente relacionado con la conectividad y la movilidad en las vías, ya que es el medio por el cual se movilizan las personas y se transportan materias primas, insumos, alimentos y mercancías. Por otro lado, se conoce que en los 30 últimos años ha aumentado la magnitud y número de cargas y se evidencia que el 80% de la carga en Colombia se moviliza por las carreteras [9]. La economía de cualquier municipio, ciudad e inclusive país requiere contar con una infraestructura vial en óptimas condiciones, segura y confortable, que permita realizar el trayecto en el menor tiempo posible, con un mejor aprovechamiento de los recursos de acceso y facilite la comunicación entre comunidades y desde el interior del país hacia los puer-

tos, muelles, terminales y aeropuertos que conectan a Colombia con el resto del planeta [10].

En la construcción de las carreteras, usualmente, existen dos tecnologías, las cuales son denominadas pavimento rígido (es un pavimento hidráulico que se conforma principalmente por concreto) y pavimento flexible (pavimento a base de asfalto). Además, se identifica que de ambas materias primas se produce un gran impacto ambiental por los contaminantes que se generan al fabricar el cemento o en la explotación petrolera para obtener el asfalto. Por este motivo las instituciones públicas y privadas buscan alternativas sostenibles en la construcción de las carreteras [11].

Actualmente, la preocupación por disminuir el impacto ambiental ha generado que las empresas del área de la construcción busquen modificar materiales que proporcionen buenas propiedades mecánicas, disminuyendo el impacto ambiental y la inversión económica. Como se evidencia, todos los materiales utilizados a menudo se convierten en escombros, es decir, que grandes cantidades (50%) se presentan en forma de materiales de desecho [12].

La dotación de los uniformados de las fuerzas militares colombianas, al igual que la policía nacional, está compuesta por la bota de combate media caña en cuero sistema vulcanizado e inyección directa. Estas botas al finalizar su ciclo de vida son incineradas con el resto de la intendencia. En este artículo se presenta una propuesta para reutilizar el caucho vulcanizado de las botas, buscando que sea transformarlo en un aditivo del asfalto que se utilice como emulsión en el riego de liga, generando una práctica ambiental sostenible al reciclar este producto y reducción de los contaminantes generados en la fabricación del producto pétreo [13]. Para lograrlo se analiza la adherencia entre capas mediante la prueba de corte, norma INV-E 811 [14], modificando la emulsión asfáltica con el caucho obtenido de las botas de combate en diferentes porcentajes.

III. Materiales y métodos

El método comienza con la fabricación mezclas asfálticas tipo MDC-10 y MDC19, usando asfalto 60/70. Adicionalmente, se utiliza emulsión asfáltica CRL-1 y CRR-1 con dosificaciones de 0.3, 0.5 y 0.7 kg/m². El Grano de Caucho proviene de la suela de bota militar y su uso en la emulsión es de 6%, 9% y 12%.

Los especímenes de ensayo son fabricados con dos tipos de mezcla asfáltica: la primera capa con espesor aproximado de 6.5 cm y con una mezcla asfáltica en caliente tipo MCD-19. La capa superior con espesor aproximado de 4.5 cm se fabrica con una mezcla asfáltica en caliente tipo MDC-10 de acuerdo con el artículo 450 del INVIAS [14]. Finalmente, se realizan pruebas de corte mediante evaluación de adherencia entre capas de un pavimento asfáltico según norma INV-E 811.

A. Caracterización de asfalto

En la Tabla 1 se presentan resultados de caracterización física del asfalto utilizado (60/70) por medio de los ensayos de penetración de materiales bituminosos (INVE 706), punto de ablandamiento de materiales bituminosos (INV-E 712), viscosidad absoluta (INV-E 714), ductilidad de los materiales asfálticos (INV-E 702), solubilidad de materiales asfálticos (INV-E 713), agua en los materiales asfálticos por destilación (INV-E 704), puntos de inflamación y de combustión mediante la copa abierta de Cleveland (INV-E 709), determinación del contenido de parafinas en ligantes asfálticos (INV-E 718) y densidad de materiales bituminosos sólidos y semisólidos (INV-E 707).

B. Caracterización de emulsiones asfálticas

En la Tabla 2 se presentan los resultados de caracterización física del emulsificante catiónico de rompimiento lento: CRL-1 a través de los ensayos de viscosidad Saybolt Furol de emulsiones asfálticas (INVE 763), contenido de agua en una emulsión asfáltica (INV-E 761), sedimentación y estabilidad durante el almacenamiento de las emulsiones asfálticas (INV-E 764), destilación de emulsiones asfálticas (INV-E 762), tamizado de las emulsiones asfálticas (INV-E 765), identificación de las emulsiones asfálticas catiónicas mediante la determinación de la carga de las partículas (INV-E 767) y pH de las emulsiones asfálticas (INV-E 768). Así mismo, se realizan pruebas de caracterización del residuo de destilación como se muestra en esta misma tabla.

En la Tabla 3 se presentan los resultados de caracterización física del emulsificante catiónico de rompimiento rápido: CRR-1 a través de los ensayos de viscosidad Saybolt Furol de emulsiones asfálticas (INVE 763), contenido de agua en una emulsión asfáltica (INV-E 761), sedimentación y estabilidad durante el almacenamiento de las emulsiones asfálticas (INV-E 764), destilación de emulsiones asfálticas (INV-E 762), tamizado de las emulsiones asfálticas (INV-E 765), identificación de las emulsiones asfálticas catiónicas mediante la determinación de la carga de las partículas (INV-E 767) y pH de las emulsiones asfálticas (INV-E 768). Así mismo se realizan pruebas de caracterización del residuo de destilación como se muestra en esta misma tabla.

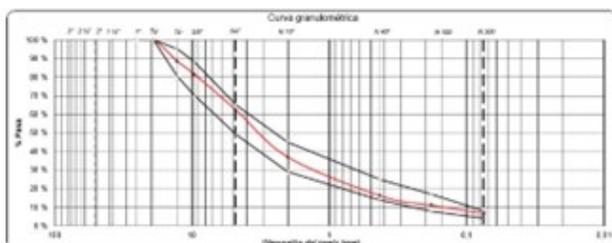


Figura 1. Curva granulométrica definida para elaboración de mezcla MDC-19

C. Diseño de mezcla

En la Figura 1 se presenta la curva granulométrica en color rojo, definida para la fabricación de mezclas asfálticas tipo MDC-19 y ajustada entre los límites superior e inferior de este tipo de mezcla.

En la Figura 2 se presenta la curva granulométrica en color rojo definida para la fabricación de mezclas asfálticas tipo MDC-10 y ajustada entre los límites superior e inferior de este tipo de mezcla.

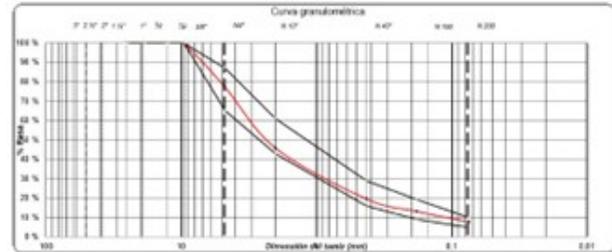


Figura 2. Curva granulométrica definida para elaboración de mezcla MDC-10

Para la fabricación de mezclas asfálticas se agrega a la bandeja el agregado que ya se encuentra debidamente separado de acuerdo con los pesos identificado en las curvas granulométricas y se procede a llevar a una temperatura de 155 °C para luego ser mezclado con el asfalto 60/70. Seguidamente, se calienta el asfalto a 155°C para llevarlo a la mezcla con el agregado cumpliendo los parámetros de peso. Finalmente, se mezclan los agregados pétreos con el asfalto y se debe dejar a 140°C para realizar el proceso de compactación.

D. Aplicación emulsiones

En esta etapa se realiza el proceso de aplicación de las emulsiones CRR-1 y CRL-1 y el grano de caucho reciclado proveniente de la suela de bota militar debidamente pesado para cumplir con los cálculos establecidos para la aplicación en la unión de las briquetas (Figura 3).



Figura 3. Registro Fotográfico proceso experimental de extensión de emulsión modificada sobre briquetas

Posteriormente, se compacta la briketa superior a 100 golpes con la emulsión y el caucho de acuerdo con los porcentajes y cantidades específicas y calculadas para cada una de las briquetas para finalmente realizar prueba de corte. En la Figura 4 se pueden evidenciar

Tabla 1. Resultados ensayos de caracterización de asfalto 60/70

Características	Unidades	Norma ensayos	Asfalto		Resultado
			Mín	Máx	
Penetración (25 c,100 g,5 s)	0.1 mm	E-706	60	70	64.8
Punto de Ablandamiento	° C	E-712	48	54	48
Índice de Penetración	–	E-724	-1.2	0.6	-1.1
Viscosidad Absoluta (60 °C)	P	E 712	1500	–	21.3
Ductilidad a 25 °C	CM	E-702	100	–	100
Solubilidad	%	E-713	99	–	99.99
Contenido de Agua	%	E-704	–	0.2	0
Punto de Ignición Mediante copa Abierta de Cleveland	°C	E-709	230	–	285
Contenido de Parafinas	%	E-718	–	3	1.3
Peso específico 25 °C	Kg/m	E-707	–	–	1012

Fuente: Datos literatura y grupo de expertos

Tabla 2. Resultados ensayos de caracterización de asfalto 60/70

Ensayo	Método	Especificación		Resultado
		Mín	Máx	
Viscosidad Saybolt furol 25 °C	INVE-763	20	200	27.5
Contenido de Agua en Volumen	INVE-761	–	43	40
Estabilidad Almacenamiento a 5 días	INVE-764	–	5	3.2
Contenido de Asfalto Residual	INVE-762	57	–	60
Tamizado Retenido tamiz #20	INVE-765	–	0.1	TRAZAS
Carga particular	INVE-767	POSITIVA		POSITIVA
PH	INVE-768	–	6	3.3
Residuo de destilación				
penetración 25 °C 100 gr 5 seg 01 mm	INVE-706	100	250	160
DUCTILIDAD (5 °C, 5Cm/m) Cm	INVE-702	40	–	>100.0
Solubilidad en Tricloroetileno	INVE-713	97.5	–	98.7

Tabla 3. Resultados ensayos de caracterización emulsión asfáltica CRR-1

Ensayo	Método	Especificación		Resultado
		Mín	Máx	
Viscosidad saybolt Furol 50 °C	INVE-763	20	100	28.5
Contenido de agua en volumen	INVE-761	–	40	39.5
Estabilidad almacenamiento a 5 días	INVE-764	–	5	3.4
Contenido de asfalto residual	INVE-762	60	–	60.2
Tamizado retenido Tamiz #20	INVE-765	–	0.1	TRAZAS
Demulsibilidad %	INVE-766	40	–	72.3
Carga particular	INVE-767	POSITIVA		POSITIVA
PH	INVE-768	–	6	4.7
Residuo de destilación				
Penetración 25 °C 100 Gr 5 seg 01 mm	INVE-706	100	250	171
DUCTILIDAD (5 °C, 5Cm/m) Cm	INVE-702	40	–	103
Solubilidad Tricloroetileno en %	INVE-713	97.5	–	99.7

los dos tipos de mezclas unidos mediante la emulsión asfáltica modificada y de esta manera el montaje en la Prensa Marshall para la ejecución de la prueba de corte.



Figura 4. Registro Fotográfico capas adheridas y ensayo de corte

En la Tabla 4 se evidencia el programa experimental realizado para analizar resultados obtenidos:

Tabla 4. Programa experimental de muestras fabricadas para ensayo de corte

Briquetas	Dosificación (kg/m ²)	CRR-1	CRL-1
Sin modificar	0.3	2	2
	0.5	2	2
	0.7	2	2
Caucho (%)			
0.3 kg/m ²	6%	2	2
	9%	2	2
	12%	2	2
0.5 kg/m ²	6%	2	1
	9%	2	1
	12%	2	1
0.7 kg/m ²	6%	2	2
	9%	2	2
	12%	2	2

IV. Análisis y discusión de resultados

En la Figura 5 se presentan los resultados de esfuerzo de rotura para las emulsiones CRR-1 y CRL-1 sin ser modificadas, con dosificación de 0.3, 0.5 y 0.7 Kg/m². También, se evidencia mayor esfuerzo de rotura para las tres dosificaciones usadas en la emulsión tipo CRL-1 con resultados de 99.58 PSI, 119.31 PSI y 96.50 PSI respectivamente. Por su parte, la emulsión CRR-1 tuvo esfuerzo de rotura para dosificación de 0.3 kg/m² de 74.01 PSI; para dosificación de 0.5 kg/m² esfuerzo de rotura de 103.62 PSI y para dosificación de 0.7 kg/m² esfuerzo de rotura de 87.59 PSI.

En la Figura 6 se presentan los resultados de esfuerzo de rotura para la emulsión CRR-1 con dosificación de 0.3 kg/m², 0.5 kg/m² y 0.7 kg/m² modificada con

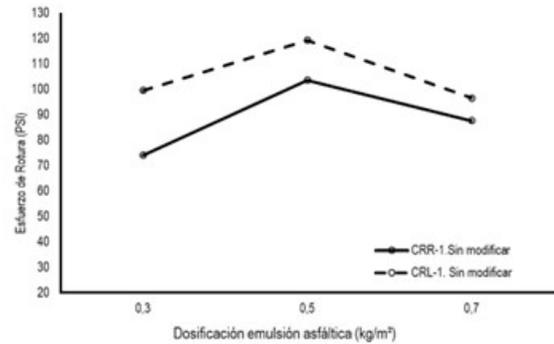


Figura 5. Esfuerzo de rotura para emulsiones CRR-1 y CRL-1 sin ser modificadas

caucho reciclado de bota de combate al 6%, 9% y 12%. También se evidencia mayor esfuerzo de rotura en la emulsión con dosificante de 0.5 kg/m² para el 6% de adición de caucho reciclado de bota de combate con resultado de 105.98 PSI. El menor esfuerzo de rotura se evidencia para la dosificación de 0.7 kg/m² para el 12% de con caucho reciclado de bota de combate con resultado de 74.15 PSI. A medida que aumenta la dosificación de emulsificante y de caucho reciclado, disminuye el esfuerzo de rotura.

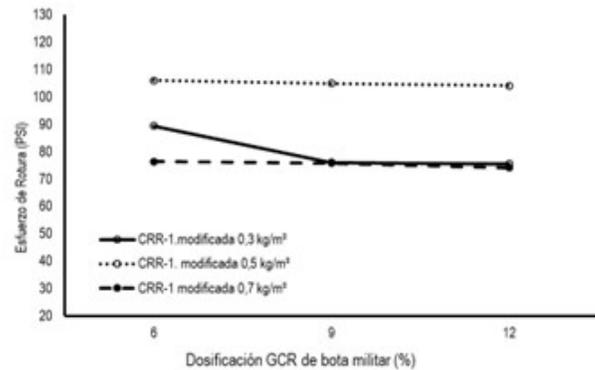


Figura 6. Esfuerzo de rotura para emulsiones CRR-1 con emulsificante de 0.3 kg/m², 0.5 kg/m² y 0.7 kg/m² y caucho reciclado de bota de combate al 6%, 9% y 12%

En la Figura 7 se presentan los resultados de esfuerzo de rotura para la emulsión CRL-1 con dosificación de 0.3, 0.5 y 0.7 Kg/m² modificada con caucho reciclado de bota de combate al 6%, 9% y 12%. También se evidencia mayor esfuerzo de rotura en la emulsión con dosificante de 0.5 kg/m² para el 6% de adición de caucho reciclado de bota de combate con resultado de 123.21 PSI. El menor esfuerzo de rotura se evidencia para la dosificación de 0.7 kg/m² para el 12% de caucho reciclado de bota de combate con resultado de 70.10 PSI. A medida que aumenta la dosificación de emulsificante y de caucho reciclado, disminuye el esfuerzo de rotura.

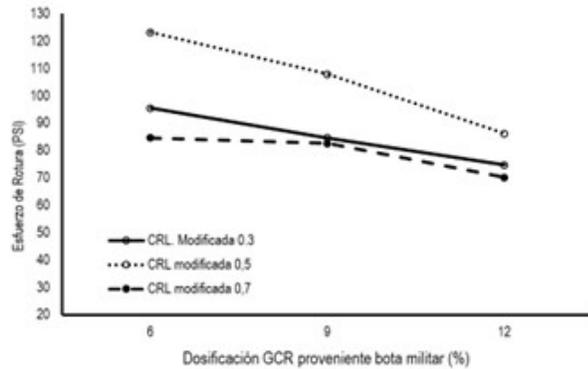


Figura 7. Esfuerzo de rotura para emulsiones CRL-1 con emulsificante de 0.3 kg/m², 0.5 kg/m² y 0.7 kg/m² y caucho reciclado de bota de combate al 6%, 9% y 12%

V. Conclusiones

Según lo anterior, se evidencia que para la emulsión asfáltica CRR-1 modificada con 0.3 kg/m², 0.5 kg/m² y 0.7 kg/m², el esfuerzo de rotura con valor más alto se presentó en la dosificación de 0.5 kg/m². Una vez se modificó esta emulsión con el caucho reciclado de bota de combate, el esfuerzo de rotura con mayor valor (105.98 PSI) se presentó para el 6% de caucho reciclado; a medida que aumenta el porcentaje de caucho a 9% y 12%, disminuye el esfuerzo a rotura.

De igual forma, se evidenció que para la emulsión asfáltica CRL-1 modificada con 0.3 kg/m², 0.5 kg/m² y 0.7 kg/m², el esfuerzo de rotura con valor más alto se presentó en la dosificación de 0.5 kg/m². Una vez se modificó esta emulsión con el caucho reciclado de bota de combate, el esfuerzo de rotura con mayor valor (123.21 PSI), se presentó para el 6% de caucho reciclado; a medida que aumenta el porcentaje de caucho a 9% y 12%, disminuye el esfuerzo a rotura.

El caucho granular reciclado de las botas de combate generó un mejor comportamiento en las propiedades de adherencia y esfuerzo de rotura con la emulsión de rompimiento lento (CRL-1) para la dosificación de 0.5 kg/m² al 6% de GCR.

Por lo anterior, se logra concluir que es necesario hacer la compactación del material (agregados con asfalto) con emulsión asfáltica CRR y CRL, porque al compactar solo con caucho no genera ninguna cohesión del material dado que solo el caucho sería un aislante, donde entre mayor cantidad de caucho menor compactación se causará.

A medida que se aumenta el porcentaje de caucho reciclado de bota de combate, el esfuerzo de rotura disminuye. Por tanto, se recomienda probar con porcentajes menores al 6% de grano de caucho reciclado de bota de combate.

VI. Agradecimientos

Los autores agradecen a la Escuela Militar de Cadetes “José María Córdova”.

Referencias

- [1] N. Mashaan, A. Ali, M. Karim y A. Mahrez, “Effect of blending time and crumb rubber content on properties of crumb rubber modified asphalt binder,” *Int. J. Phys. Sci.*, vol. 6, n.º 9, págs. 2189–2193, 2011.
- [2] L. Ortiz y M. Angie, *Instructivo del proceso constructivo de una vía en pavimento flexible*. Bogotá, Colombia: Universidad Distrital Francisco José de Caldas, 2017.
- [3] E. Castillo, L. Acevedo y J. Orduz, “Perfil tecnológico ambiental de la industria de mezclas asfálticas en Colombia,” *Revista Ion*, vol. 16, n.º 1, págs. 21–30, 2000.
- [4] J. Sapei y H. Arenas, (8 de mar. de 2021). Emulsiones de imprimación, su aporte en la adherencia. *revistas.ucr.ac.cr* [Online]. Available: <https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/vial/article/download/14196/15639>.
- [5] H. Arenas, *Tecnología del Cemento Asfáltico*. Cali: Faid, 1999.
- [6] El Universal-México, Asfalto contaminante. Párr. 1 [Online]. Available: <https://archivo.eluniversal.com.mx/cultura/47716.html>, 2006.
- [7] El Tiempo, Hay 81 resguardos indígenas en riesgo por 37 contratos petroleros [Online]. Available: <https://www.eltiempo.com/>, 2019.
- [8] Ejército Nacional de Colombia, Escuela militar de Cadetes “José María Córdova”. Dirección Departamento de Logística (CEDE, 4). Bogotá, Colombia, 2006.
- [9] E. N. de Colombia, “Directiva Permanente N° 162/2019: Proceso de operaciones logísticas del Ejército. Anexo C: Logística inversa. Escuela militar de Cadetes “José María Córdova”. Bogotá, Colombia,” en.
- [10] M. Cardoza Zambrano, K. V. Palomino Cadena y G. E. Angulo Blanquissett, “Pavimento flexible utilizando una mezcla asfáltica con grano de caucho reciclado para su sostenibilidad en Colombia,” *Revista Sostenibilidad, Tecnología y Humanismo*, vol. 10, n.º 2, págs 17–27, 2019. <http://revistas.unitecnar.edu.co/index.php/sth/article/view>.
- [11] F. Sánchez Galindo, “Las carreteras y su influencia en el desarrollo económico y en el bienestar social de un país,” *Dialnet, Aula abierta*, vol. 67, págs. 161–180, 1996. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=45385>.
- [12] R. J. Miranda Rebolledo, “Deterioros en pavimentos flexibles y rígidos,” thesis, Universidad Austral de Chile, Valdivia, Chile, 2010.

- [13] J. Lombera, “Impactos ambientales en la industria de la construcción,” *Revista Materiales de Construcción. Dailnet*, n.º 297, 2010.
- [14] Instituto Mexicano de Transporte, secretaria de Comunicaciones y Transportes, (2001). Impacto ambiental de proyectos carreteros. Efectos por la construcción y conservación de superficies de rodamiento: I pavimentos flexibles (Vol. publicación técnica 163) [Online]. Available: <https://www.imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTécnica/pt163.pdf>.
- [15] *Especificaciones generales de construcción de carreteras y Normas de ensayo de materiales para carreteras*. Colombia: Instituto Nacional de Vías-INVÍAS, 2022.