



# REVISTA TÉCNICA

## DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA

Una Revista Internacional Arbitrada  
que está indizada en las publicaciones  
de referencia y comentarios:

- SCOPUS
- Compendex
- Chemical Abstracts
- Metal Abstracts
- World Aluminium Abstracts
- Mathematical Reviews
- Petroleum Abstracts
- Current Mathematical Publications
- MathSci
- Revenct
- Materials Information
- Periódica
- Actualidad Iberoamericana

UNIVERSIDAD DEL ZULIA



REVISTA TÉCNICA  
DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA

"Buscar la verdad y afianzar los valores trascendentes", misión de las universidades en su artículo primero, inspirado en los principios humanísticos. Ley de Universidades 8 de septiembre de 1970.

# Effect of incorporation by dry procedure of rubber residue obtained after removal of an airport runway in asphalt AC-20

*Wilson Cando<sup>1</sup>, Patricio Bonilla<sup>1</sup>, Gustavo Yáñez<sup>1</sup>, Jorge Bucheli<sup>1</sup>, Adriana Muñoz<sup>1</sup>, María Fernanda Orquera<sup>1</sup>, Lenys Fernández<sup>2,3\*</sup> , Patricio Espinoza-Montero<sup>2</sup> *

<sup>1</sup>Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Facultad de Ingeniería, Avenida 12 de octubre y Roca, Apartado 17-01-2184, Quito-Ecuador

<sup>2</sup>Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Escuela de Ciencias Químicas, Avenida 12 de octubre y Roca, Apartado 17-01-2184, Quito, Ecuador

<sup>3</sup>Universidad Simón Bolívar, Departamento de Química, Apartado 89000, Caracas-Venezuela

\*Autor de Contacto: [lmfernandez@puce.edu.ec](mailto:lmfernandez@puce.edu.ec)

<https://doi.org/10.22209/rt.v43n1a01>

Recepción: 12/02/2019 | Aceptación: 12/07/2019 | Publicación: 20/12/2019

## Abstract

In this document, the effect of rubber residue removed from an airport runway tarmac as modifying material of an asphalt mix using asphalt AC-20 (commonly used in Ecuador in the paving of roads) is reported. The samples were analyzed by the Marshall's method. The experimental results has shown that the rubber residue in the asphalt mixture improved volumetric properties, such as air voids, voids in the mineral aggregate and asphalt-filled voids; the first ones were reduced and the last increased in relation to the unmodified mixture. On the other hand, the property comply with the standard requirements. The rigidity modulus test that determined the behavior of the pavement on site also increased, which demonstrates significantly the advantages of using this rubber residue in the asphalt mix.

**Key words:** Rubber Waste; Modified Asphalt Mix; Asphalt-Rubber mixture

## Efecto de la incorporación por vía seca de residuos de caucho obtenido tras su remoción de una pista de aterrizaje de aeropuerto en un asfalto AC-20

### Resumen

En este documento, se reporta el efecto del residuo de caucho, recuperado de la pista de aterrizaje producto de la fricción del neumático y superficie de rodamiento, como material modificador de una mezcla asfáltica que utiliza asfalto AC-20. Se estudió, el comportamiento de la mezcla asfáltica resultante cuando el residuo se agrega como reemplazo de una porción de agregado fino. La mezcla modificada se conformó mediante el proceso vía seca. Los especímenes de mezcla asfáltica fueron analizados por el método Marshall. Los resultados experimentales muestran que la incorporación del residuo a la mezcla asfáltica, mejora sus propiedades volumétricas tales como vacíos de aire, vacíos en el agregado mineral y los vacíos llenos de asfalto; los primeros se redujeron y los dos últimos aumentaron en relación a la mezcla sin modificar. Por otro lado, la estabilidad aumentó y el flujo mantuvo valores dispuestos en la norma. El ensayo de módulo de rigidez, que determinó el comportamiento del pavimento en sitio, igualmente aumentó, lo que demuestra significativamente las ventajas de usar este residuo de caucho en la mezcla asfáltica.

**Palabras clave:** Residuos de Caucho; Mezcla Asfáltica Modificada; Mezcla Asfalto-Caucho.

## Introducción

Para mantener los niveles de rozamiento establecidos internacionalmente, por seguridad operacional, en los aeropuertos se realiza la remoción de caucho en la pista de aterrizaje utilizando agua a una determinada presión. La contaminación por residuo de caucho sobre esa superficie pavimentada, se produce por el roce existente entre los neumáticos de las aeronaves y el asfalto al momento del aterrizaje. Con la finalidad de obtener pavimentos cuyas propiedades de estabilidad y flujo mejoren, desde hace varios años se ha venido desarrollando investigaciones sobre el comportamiento de mezclas asfálticas modificadas con desechos de caucho de llantas [1-10]. En la presente investigación se reporta la evaluación de las propiedades mecánicas y volumétricas de una mezcla asfáltica, convencionalmente utilizada en la construcción de carreteras en Ecuador, modificada por vía seca con residuos de caucho obtenidos de la remoción de la pista de aterrizaje. Se monitorearon las características mecánicas de la mezcla a través del análisis y comparación de su comportamiento dinámico en caliente con y sin residuo, una vez que este último se ha removido del pavimento de la pista para su reutilización. En la modificación de asfalto por vía seca, el caucho reciclado es mezclado con los agregados antes de adicionar el cemento asfáltico [11-13]. En este método, se utilizan los residuos de caucho como un agregado en la mezcla asfáltica, los cuales pueden sumarse como un árido más o como un sustituto de una pequeña parte del agregado fino en aproximadamente entre 1% y 3% del peso total de los agregados en la mezcla. La función de las mezclas asfálticas, es proporcionar una superficie de rodamiento cómoda, segura y económica a los usuarios de las vías de comunicación; así como transmitir eficientemente las cargas debidas al terreno y al tráfico, para que sean soportadas por esta. Según la literatura [14], el uso de partículas de caucho como un agregado en la mezcla asfáltica puede mejorar el desempeño de la misma. Las partículas de caucho expuestas en la superficie del pavimento impiden que los neumáticos de los vehículos se deslicen sobre el pavimento, al ofrecer un mejor agarre; y las que permanecen dentro del cuerpo de la mezcla ayudan a retardar su fisuramiento a consecuencia de la absorción de los esfuerzos y a obstaculizar la propagación de la fisura. De acuerdo a lo antes planteado, nace la hipótesis si modificar mezcla asfáltica convencional que usa AC-20, con el residuo de caucho obtenido tras su remoción de la pista de aterrizaje del Aeropuerto Internacional Mariscal Sucre de Quito-Ecuador, mejorara sus características mecánicas y volumétricas. Por lo que, se reporta el diseño de la mezcla asfáltica utilizando este material; analizando su desempeño en la estructura del pavimento mediante cuatro características: densidad, vacíos de aire (Va), vacíos en el agregado mineral (VAM), vacíos llenos de asfalto (VAF), estabilidad y flujo.

## Materiales y Métodos

Los agregados y asfalto (Asfalto AC-20)

utilizados, se obtuvieron de la planta ubicada en el sector de la Barrotieta, en la vía Panamericana, Quito EMGIRS-EP y la planta industrial Imptek. Agregados gruesos  $\frac{3}{4}$ " y  $\frac{1}{2}$ ", agregado fino  $\frac{1}{4}$ " (Mina Eduardo, ubicada en la rivera del Río Pita en el cantón Rumifahui), residuo de caucho proveniente de la limpieza de la pista de aterrizaje del Aeropuerto Internacional Mariscal Sucre. *Reactivos:* TQ Orange clean 90 (Spartan), desmoldante (Talco + glicerina (Sigma-Aldrich), sulfato de magnesio (Sigma-Aldrich), ácido hidrocórico 37% (Sigma-Aldrich), óxido rojizo (Sigma-Aldrich) y propanol 99% (Sigma-Aldrich). *Equipos:* controlador RTF, modelo CS 325-B, James Cox & Sons INC, regulador de vacío digital modelo H-1, equipo Marshall H-1322, Humboldt MFG. CO. Schiller Park IL 60176, modelo No. H-1782, horno Despatch Industries, máquina de prueba de cribamiento de ajuste manual Gilson, modelo TS-2, Gilson Company INC., tamiz vibrador de cribado, modelo 14860, W. S. Tyler, Viscosímetro DV-II + Pro, tanque de prueba de ductilidad, Soiltest INC, máquina universal HYD 25, Cooper Technology, compactador Marshall, modelo H-1336, Humboldt MFG. CO, estufa Universal 32 lt, modelo UNB-200, Memmert, máquina de abrasión los Ángeles, modelo 42-5305, Soiltest INC.

## Caracterización de los agregados

La caracterización de los agregados se realizó bajo las especificaciones generales para la construcción de caminos y puentes MOP-001-F-2002 [15]. Los ensayos realizados fueron granulometría, gravedad específica, abrasión máquina de los Ángeles, desgaste a los sulfatos y equivalente de arena del agregado fino. En la Tabla 1, se muestra que de manera general los materiales cumplen con las especificaciones de la norma. A pesar que, el agregado fino no cumplió con el desgaste a los sulfatos y la absorción, al ser mínima la diferencia con el valor máximo establecido en la norma, se consideró que este se compensaría con los agregados gruesos.

## Caracterización del asfalto

Para la caracterización del asfalto se realizaron los ensayos indicados en la Tabla 2, bajo la norma NTE INEN 2515:2014 [16]. Los resultados obtenidos indican que el material cumple con las especificaciones establecidas.

## Caracterización del residuo de polvo de caucho

Por medio de la granulometría del residuo de polvo de caucho, obtenido de la remoción de la pista de aterrizaje del Aeropuerto Mariscal Sucre, se determinó el material que va a ser reemplazado dentro de la mezcla modificada. El mayor porcentaje de material retenido se encontró en los **tamices N° 50, N° 100, N° 200 y pasante del 200 (Tabla 3).**

## Determinación de la proporción de los agregados

A partir de la granulometría de los agregados, se determinó la cantidad de material que debe contener la

**Tabla 1.** Resumen resultados caracterización de los agregados

Ensayos	Rangos		Resultados	Tamaño del agregado		
	MIN	MAX		3/4	1/2	1/4
	Norma: M OP-001-F-2002			3/4	1/2	1/4
% de Absorción	---	5	% de Ab	4,35 Cumple	4,91 Cumple	5,17 ---
Abrasión (%)	---	50	% Desgaste	36,70 Cumple	30,50 Cumple	--- No Cumple
Desgaste a los sulfatos	---	12	Promedio de desgaste (%)	2,34 Cumple	7,91 Cumple	15,96 No Cumple
Equivalente de arena	50	---	E A Promedio	---	---	91,50 Cumple

**Tabla 2.** Resumen resultados caracterización del asfalto

ENSAYO DE LOS AGREGADOS	RANGOS		RESULTADOS
	NORMA: NTE INEN 2515:2014, tabla 7		
	MIN	MAX	
Viscosidad Absoluta, 60°C	200±40		Viscosidad (Pa.s) 203,23 SI Cumple
Viscosidad cinemática, 135°C	300	----	---- 364,301 SI Cumple
Punto de inflamación y combustión	232	----	Punto de Chispa (°C) 302
			Punto de Llama (°C) 331 SI cumple
Gravedad específica, 25°C	----		Gb 1,011 SI cumple
Índice de penetración	-1,5 a 1		-1 SI cumple
Película delgada en el horno rotatorio	----	1,0	Cambio de Masa Promedio -0,020 SI cumple
Viscosidad, 60°C del (RTFO)	----	800	Viscosidad (Pa.s) 779,14 SI cumple
			D1 52 SI cumple
Ductilidad, 25°C, 5 cm/min	50	----	Distancia de Rotura D2 53 SI cumple
			D3 52 SI cumple

**Tabla3.** Granulometría del residuo de polvo de caucho

Tamiz No	Abertura (mm)	Peso retenido	% Retenido	% que pasa
No 30	0,60	29,14	7,69	92,31
No 50	0,30	135,34	35,74	64,26
No 100	0,15	229,92	60,64	39,36
No 200	0,07	378,70	77,61	22,39
Pasa No 200			100,00	0,00

mezcla. Se ingresó la granulometría de los tres materiales, para establecer el peso necesario de cada tamiz en una muestra conocida como batch (Tabla 4). Esta debe contener un total de 1100 g, que es equivalente a la sumatoria de los pesos correspondientes a los diferentes tamaños de agregado.

porcentajes por encima y dos por debajo de cada 0,5. El ensayo Marshall se realizó con porcentajes de asfalto de 5 %, 5,5%, 6%, 6,5% y 7%. Se conformaron 3 briquetas para cada porcentaje, con un total de 15 especímenes. Para conformar la mezcla, los materiales se mantuvieron a una temperatura de 153 °C a 158 °C; mientras que la

**Tabla 4.** Granulometría de los tres agregados y el peso que contiene un bath de 1100 gr.

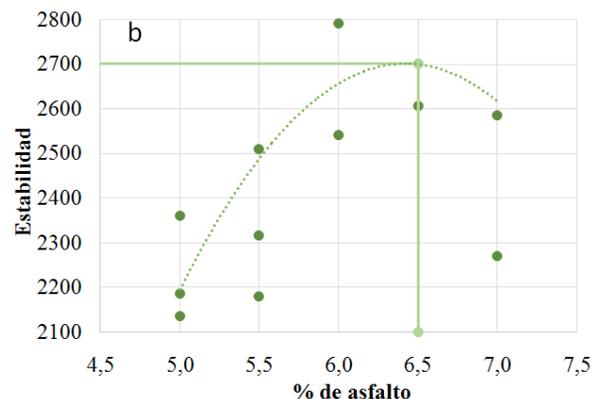
Tamiz #	1	3,4	1,2	3,8	4	8	30	50	100	200	p #200
Tzmm.	25,4	19	12,7	9,5	4,76	2,36	0,6	0,3	0,15	0,075	p 0,075
mat. A	100	98,80	33,19	8,09	1,60	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
mat. B	100	100	99,44	83,27	25,59	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
mat. C	100	100	100	100	95,47	67,36	28,31	14,40	6,91	2,82	
mat. D	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
mezcla	100	99,76	86,53	78,27	62,72	40,42	16,99	8,64	4,15	1,69	
Ret.Ac.	0,00	0,24	13,47	21,73	37,28	59,58	83,01	91,36	95,85	98,31	1,69
Ret.Parc.	0,00	0,24	13,23	8,25	15,55	22,30	23,43	8,35	4,49	2,45	
peso	0,00	2,64	145,57	90,79	171,07	245,34	257,73	91,81	49,43	26,99	
p. acum.	0,00	2,64	148,21	239,01	410,08	655,42	913,15	1004,96	1054,39	1081,39	1100
Espec mín	100	90	-	56	35	23	-	5	-	2	
Espec máx	100	100	-	80	65	49	-	19	-	8	

Según la norma del Instituto del Asfalto y en las especificaciones generales para la construcción de caminos y cuentes, MOP-001-F 2002 [15], la curva granulométrica de la mezcla se debe ubicar entre dos curvas representadas por una granulometría mínima y máxima, Figura 1a. El porcentaje establecido para cada agregado de la mezcla estudiada, de tal manera que la granulometría cumpla con este requerimiento, fue 20% para el agregado grueso 3/4, 20% para el agregado grueso 1/2 y 60% para el agregado fino 1/4.

#### Método Marshall [17]

Para el diseño de las mezclas asfálticas en caliente se utilizó el método Marshall a través del análisis de estabilidad como fluencia, densidad y vacíos. El porcentaje óptimo de asfalto teórico se calculó a partir de las siguientes fórmulas:  $\%P = M \cdot S^{1/5}$ ,  $S$  se determina mediante  $S = 0,17G + 0,33g + 2,3A + 12a + 135f$ . Donde:  $G = 100 -$  Porcentaje de mezcla tamiz N° 3/8,  $g =$  Porcentaje de mezcla tamiz N° 3/8 - Porcentaje de mezcla el tamiz N° 4,  $A =$  Porcentaje de mezcla tamiz N° 4 - Porcentaje de mezcla tamiz N° 50,  $a =$  Porcentaje de mezcla tamiz N° 50 - Porcentaje de mezcla tamiz N° 200,  $f =$  Porcentaje de mezcla tamiz N° 200 y  $M =$  Varía 3,75 - 4,25. El valor obtenido fue de 5,39%. Para realizar la mezcla no modificada se partió con un valor de 6%. El Instituto del Asfalto indica que se deben tomar dos

temperatura de compactación fue de 142 oC a 147 °C, obtenida de la carta de viscosidad, calculada a partir de la viscosidad del asfalto. Se realizó el ensayo de Gravedad Específica Bulk a las briquetas y se procedió con la rotura de las mismas. Posteriormente se disgregaron y se realizó el ensayo Rice (Norma: AASHTO T-209, ASTM D-2041). Una vez efectuado el ensayo Marshall se realizaron los cálculos para obtener las propiedades mecánicas; Estabilidad y Flujo; y las propiedades volumétricas; Va, VAM y VAF. Finalmente, mediante la curva Porcentaje de Asfalto vs. Estabilidad (Figura 1b) se obtuvo un porcentaje óptimo de asfalto de 6,5%.



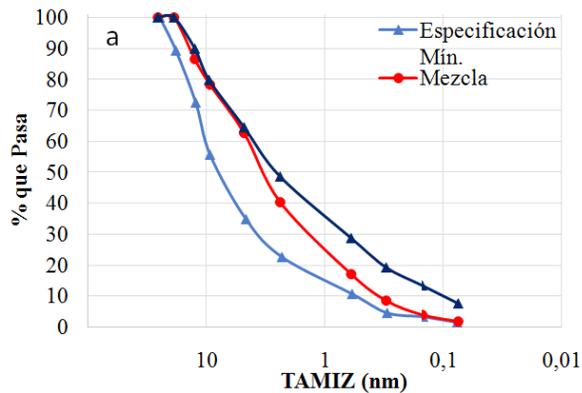


Figura 1.a) Granulometría de la mezcla asfáltica, b) Curva Porcentaje de Asfalto vs. Estabilidad

### Diseño de mezcla asfáltica modificada

El residuo de caucho se reemplazó en el agregado fino de una muestra no modificada de 1100 g de peso, en porcentajes de 25 %, 50 %, 75 % y 100 % del material retenido en los tamices mencionados en el análisis granulométrico. Mediante la curva de Estabilidad vs. Porcentaje de Residuo de Caucho (Figura 2), se determinó que el porcentaje óptimo es 75%. Se utilizó el porcentaje de asfalto óptimo de 6,5 % obtenido en la mezcla no modificada para conformar seis briquetas por cada porcentaje de residuo de caucho, con un total de 24 especímenes. El procedimiento para la elaboración de la mezcla modificada, fue el mismo empleado para la elaboración de la mezcla sin modificar, solo que en este caso se debe tomar en cuenta el tiempo y temperatura de digestión, requeridos en este tipo de mezcla, antes de la compactación. Luego de preparar la granulometría de los agregados pétreos, se calentaron en horno a temperatura entre 170 °C y 210 °C. Se mezcló los agregados calientes con la cantidad de caucho seleccionada, 75 %, y se colocaron en el horno entre 170 y 190 °C por aproximadamente 3 minutos. Se adicionó el asfalto, previamente calentado a la temperatura de mezclado, a la mezcla de agregados y caucho a través de un procedimiento de mezclado de 2 a 3 minutos. Posteriormente la mezcla asfáltica se sometió a un periodo de digestión en el horno, cuyo tiempo y temperatura se definieron con anterioridad mediante el ensayo de Inmersión - Compresión (160 °C por 1 hora). Se retiró la mezcla del horno y se compactó el material mezcla caliente en moldes Marshall precalentados. La compactación se llevó a cabo a una temperatura aproximadamente 10°C más baja que la de digestión, aplicando 75 golpes del Martillo Marshall por ambos lados de la probeta y se dejó reposar por 24 horas antes de extraer la probeta del molde. Posteriormente las briquetas fueron removidas a temperatura ambiente.

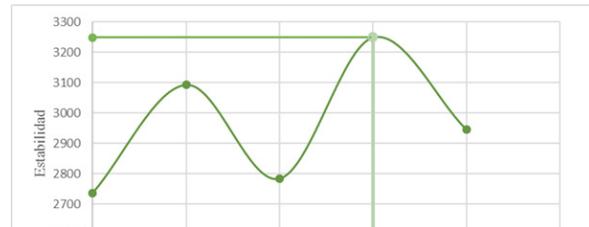


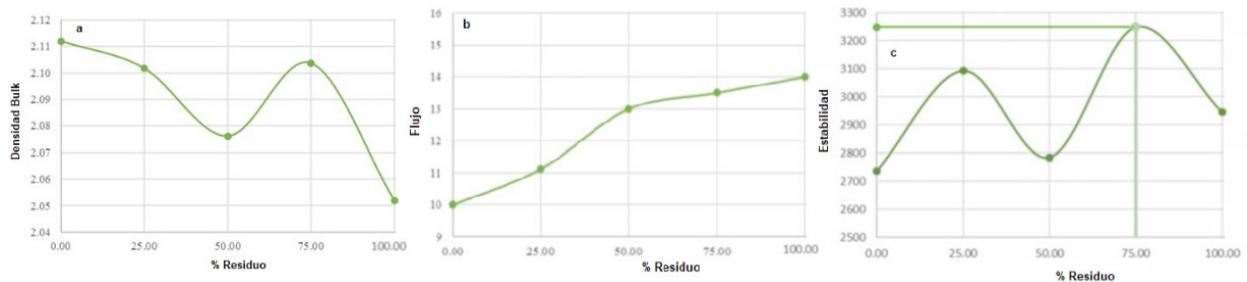
Figura 2. Curva porcentaje de residuo de caucho vs. Estabilidad

### Módulo de rigidez

Para determinar el comportamiento del pavimento ante la carga vehicular se determinó el Módulo de rigidez, el cual es un método no destructivo de tracción indirecta. En este ensayo se utilizó una Máquina universal marca Cooper HYD25. Se proporcionaron pulsos de cargas con periodos de descanso en forma repetitiva, se ensayaron dos briquetas para mezcla no modificada y dos briquetas para mezcla modificada. Las muestras ensayadas se llevaron a una temperatura de  $25 \pm 1$  °C y se centraron dentro del bastidor de montaje. Se ajustaron los deformímetros y la posición de la célula de carga hasta llegar a la posición de ensayo.

## Resultados y Discusión

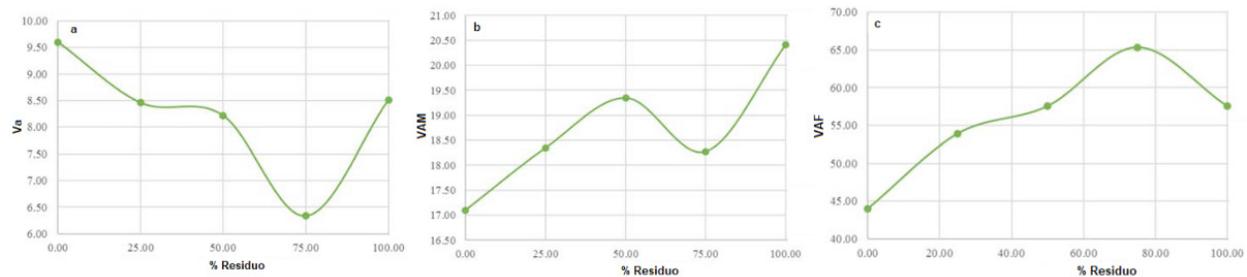
Los resultados obtenidos en la evaluación de la mezcla modificada se muestran en la Figura 3 y Figura 4. A partir de la granulometría del residuo de caucho, se determinó que el mayor porcentaje retenido fue en los tamices No. 50, 100, 200 y pasante del tamiz No. 200, por lo que se reemplazó el material fino de la muestra normal de 1100 g proporcionalmente en un porcentaje de 25, 50, 75, 100 % del material retenido en los tamices mencionados en la sección experimental, utilizando el porcentaje de asfalto óptimo obtenido en la mezcla original. A medida que aumenta el porcentaje de residuo de caucho la densidad Bulk en la briketa disminuye, a partir de un 50 % de residuo aumenta hasta alcanzar la máxima densidad a un 75 % de residuo de caucho y la mínima densidad a 100 % de residuo (Figura 3a). Para la mezcla asfáltica con el 75 % de residuo de caucho, se tiene una densidad Bulk de 2,11 (gr/cm<sup>3</sup>) y para ese mismo porcentaje una estabilidad de 3249 (lbf), Figura 3b, mayor al requerido por el MTOP para tráfico muy pesado 2200 (lbf)). El flujo en la briketa fue directamente proporcional a la cantidad de residuo de caucho que se adicionó a la mezcla (Figura 3c).



**Figura 3.** a) % Residuo vs. Densidad Bulk, b) % Residuo vs. Estabilidad y c) % Residuo vs. Flujo

Para la mezcla asfáltica con el 75% de residuo se obtuvo un flujo de 14 centésimas de pulgada, valor dentro de los parámetros permitidos. Los vacíos (Va) dentro la mezcla asfáltica modificada tiende a disminuir en primera instancia. Sin embargo, se recuperan cuando se utilizó una cantidad de residuo mayor al 75% (Figura 4a). Los VAM dentro de las briquetas modificadas hasta un 50% en la mezcla, fueron directamente proporcional a la cantidad de residuo de caucho que se adicionó (Figura 4b), disminuyen con un 75% de residuo y posteriormente aumentan a mayores porcentajes del mismo. Para la mezcla asfáltica con el 75% de residuo de caucho se tiene un valor de 18,3%, valor mayor al mínimo requerido (14%). Los VAF dentro de las briquetas aumentan aproximadamente hasta el 75% de material de caucho adicionado, porcentaje a partir del cual disminuyen (Figura 4c). Para la mezcla asfáltica con el 75% de residuo se tiene un VAF equivalente a 65,3%, valor que se encuentra dentro de los límites permitidos (de 65% a 75%). Mediante los datos obtenidos se sugiere que el porcentaje óptimo de residuo de caucho que se debe considerar para la mezcla es del 75%.

MOP-001-F2002 y FAA AC 150/5370-10G, podemos considerar que la mezcla asfáltica no modificada es óptima (porcentaje óptimo de asfalto 6,5%), ya que cumple con las especificaciones establecidos en dichos criterios. Cuando se incorporó el residuo de caucho en la mezcla, las propiedades volumétricas vacíos de Aire (Va), vacíos en el agregado mineral (VAM) y los vacíos llenos de Asfalto (VAF) se alteran; los primeros se redujeron y los dos últimos aumentaron en relación a la mezcla sin modificar. Por otro lado, la estabilidad aumentó y el flujo se mantuvo el rango dispuesto en la norma. De acuerdo a la literatura [18], los Va son especies de bolsas de aire entre agregados revestidos por el ligante en la mezcla final, los cuales permiten cierta compactación adicional bajo el tráfico a través de espacios donde puede fluir el asfalto. Cuanto menor sea la cantidad de vacíos, menor es la permeabilidad de la mezcla y por ende puede esperarse mayor durabilidad del pavimento. El hecho que, al agregar residuo de caucho en el diseño de la mezcla asfáltica, disminuya el Va a un valor que particularmente cumple con la norma en comparación con el valor obtenido con mezcla sin modificar, es un resultado favorable mecánicamente ya que podríamos esperar que la mezcla modificada sea más resistente



**Figura 4.** a) % Residuo vs. Va, b) % Residuo vs. VAM y c) % Residuo vs. VAF

En la Tabla 5, se resume y comparan los resultados obtenidos en el ensayo Marshall, utilizando la mezcla no modificada y la modificada. De acuerdo a los criterios Marshall

al deterioro por entrada de agua y aire a través de un exceso de Va en la mezcla.

**Tabla 5.** Resumen de resultados Marshall

Ensayos	Criterios MOP-001-F2001		Criterios FAA AC 150/5370-10G		Resultados			
	MÍN	MÁX	MÍN	MÁX	Asfalto	Resultado	MOP-001-F2001	FAA AC 150/5370-10G
Va	3	5	2	5	Sin modificar	9,6	No cumple	No cumple
					Modificado	6,3	No cumple	No cumple
VAM	>14	.....	14	.....	Sin modificar	16	No se puede especificar	No se puede especificar
					Modificado	18,3	No se puede especificar	Si cumple
VAF	65	75	.....	.....	Sin modificar	43,53	No cumple	.....
					Modificado	65,3	Si cumple	.....
Estabilidad	1800	.....	1800	.....	Sin modificar	2737	Si cumple	Cumple
					Modificado	3249	Si cumple	Si cumple
Flujo	8	14	8	18	Sin modificar	14	Si cumple	Si cumple
					Modificado	10	Si cumple	Si cumple

Los espacios de aire entre las partículas de agregado en la mezcla compactada de pavimentación (VAM), incluyendo los espacios que están llenos de asfalto, en la mezcla modificada reportada aumentaron cuando se modificó el residuo de caucho. Este resultado se asocia al aumento de espacios disponibles para acomodar el volumen efectivo de asfalto (todo el asfalto menos la porción que se pierde por absorción, en el agregado) y el volumen de vacíos necesario. Para obtener un espesor de película de asfalto durable, se deben lograr valores mínimos de VMA. Valores de VMA por debajo del mínimo especificado en la norma, como el obtenido en la mezcla sin modificar, puede resultar en películas delgadas de asfalto y en mezclas de baja durabilidad y apariencia seca, característica que puede solventarse modificando la mezcla con el residuo de caucho. Los resultados obtenidos en valores de Va y VMA, concuerdan con el aumento resultante de los VAF en la mezcla modificada, lo que sugiere que la dicha mezcla es capaz de propiciar el arreglo y sinergia adecuada de los materiales a fin de lograr una mezcla asfáltica con características mecánicas y volumétricas mejoradas, que podrían asegurar mejor durabilidad de la misma. De acuerdo a Asphalt Institute [19], la estabilidad de Marshall es la carga máxima de resistencia obtenida aplicando una velocidad de deformación constante, mientras que el flujo Marshall es una medida de la deformación elástica y plástica de la muestra, determinada durante el ensayo de estabilidad. Si el flujo en el contenido de aglutinante óptimo seleccionado está por encima del límite especificado superior, la mezcla se considera demasiado plástica o inestable. Si el flujo está por debajo del límite

especificado inferior, la mezcla se considera demasiado frágil. Por lo que los parámetros de estabilidad y flujo se complementan, a fin de experimentalmente generar datos claves del comportamiento de la mezcla una vez construida una carretera. En nuestro caso el aumento de la estabilidad de la mezcla con el aumento en porcentaje de caucho, sugiere que dicha modificación le permitirá a la mezcla acomodarse adecuadamente para el tránsito esperado, en contraste a la mezcla sin modificar, debido a que tendría mejor capacidad de resistir desplazamientos y deformaciones bajo cargas de tránsito. Por otro lado, la muestra modificada mantuvo un valor de flujo dentro de la norma, lo que predice una mezcla modificada que mantiene su capacidad de sufrir pocas deformaciones.

#### Ensayo de módulo de rigidez

El ensayo de módulo de rigidez se rigió bajo la norma UNE-EN 12697:26 2012 (Tabla 6). Se obtuvo que el módulo de rigidez efectivo a la tracción indirecta, aumentó significativamente de 820,5 Mpa en la mezcla sin modificar a 1883,5 Mpa en la mezcla modificada, y la deformación horizontal se redujo de 6,26  $\mu\text{m}$  a 4,09  $\mu\text{m}$ . Estos valores son indicadores potenciales del agrietamiento que puede sufrir el pavimento, una deformación alta a la falla, orientan si la mezcla asfáltica puede tolerar deformaciones altas antes de fallar, lo que significa que probablemente resista más el agrietamiento que una mezcla con una deformación baja a la falla [20]. La mezcla modificada presenta mayor rigidez y menor deformación en comparación con la mezcla sin modificar.

**Tabla 6.** Resumen de resultados ensayo de módulo de rigidez

Módulo de rigidez	Criterio: UNE-EN 112697:262012	Asfalto	Resultado	Criterio: UNE-EN 112697:262012	
Ajustado (Mpa)	MÍN 11500	MÁX 3000	Sin modificar	820,5	No cumple
			Modificado	1883,5	Si cumple
Deformación horizontal ( $\mu\text{m}$ )	5 $\pm$ 2 $\mu\text{m}$		Sin modificar	6,26	Si cumple
			Modificado	4,09	Si cumple

## Conclusión

La modificación de la mezcla asfáltica con residuo de polvo de caucho mejoró significativamente su estabilidad, por lo que puede asumirse que el pavimento va a resistir una mayor carga de tráfico, lo cual es ideal para las necesidades del Aeropuerto. Las mejoras en los Va, VMA y VAF soportan este resultado. La durabilidad de un pavimento guarda relación con su contenido de aire, razón por la cual la mezcla no modificada podría presentar desgaste prematuro como consecuencia de ser una mezcla abierta que permitiría el ingreso de aire y agua a la capa de rodadura. Este problema se reduciría considerablemente tras la incorporación de los residuos de caucho a la mezcla asfáltica. Podría predecirse que la modificación de la mezcla asfáltica con este residuo, aumentará la resistencia al envejecimiento y oxidación del ligante asfáltico, la resistencia de la mezcla al agrietamiento, la resistencia frente al calor del ligante asfáltico y disminuirá el ruido de rodadura. Son de importancia los resultados obtenidos, ya que el residuo de caucho almacenado en el Aeropuerto Internacional Mariscal Sucre Quito-Ecuador, se ha venido transformando cada día en un material con un alto impacto ambiental negativo que hasta los momentos no ha sido considerado para ser reusado y/o reciclado.

## Agradecimientos

Los autores agradecen al Laboratorio de Materiales de Construcción (PUCE-Quito, Ecuador) por su invaluable asistencia técnica. A planta industrial Imptek por haber proporcionado el material.

## Referencias bibliográficas

- [1] Panagiotis F.: Crumb rubber-bitumen interactions: Cold-stage optical microscopy. *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 15, No. 5 (2003) 419-426.
- [2] Ocampo M., Caicedo B. y González D.: Mezclas asfálticas mejoradas con caucho molido proveniente de llantas. *Revista de Ingeniería*, Vol. 16, No. (2002) 175-80.
- [3] Ocampo M., Caicedo D. y González D.: Estudio de las mejoras mecánicas de mezclas asfálticas con desechos de llantas. Bogotá: Instituto de Desarrollo Urbano, 2007.
- [4] Zhang S.L., Xin Z.X., Zhang Z.X. and Kim J.K.: Characterization of the properties of thermoplastic elastomers containing waste rubber tire powder. *Waste Manage*, Vol. 29 No. 5 (2009) 1480-1485.
- [5] Karger-Kocsis J., Meszaros L. and Barany T.: Ground tyre rubber (GTR) in thermoplastics, thermosets, and rubbers. *J. Mater. Sci.*, Vol. 48, (2013) 1-38
- [6] Hassan M.M., Badway N.A., Gamal A.M., Elnaggar M.Y., Hegazy E.S.A.: Studies on mechanical, thermal and morphological properties of irradiated recycled polyamide and waste rubber powder blends. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B*, Vol. 268, No. 9 (2010) 1427-1434.
- [7] Cao W.: Study on properties of recycled tire rubber modified asphalt mixtures using dry process. *Construction and Building Materials*. Vol. 21, No. 5 (2007)1011-1015.
- [8] Leng Z., Padhan R. K. and Sreeram A.: Production of a sustainable paving material through chemical recycling of waste PET into crumb rubber modified asphalt. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 180 (2018) 682-688.
- [9] Rasool R., Song P. and Wang S.: Thermal analysis on the interactions among asphalt modified with SBS and different degraded tire rubber. *Construction and Building Materials*, Vol. 182 (2018). 134-143.
- [10] Franesqui M. A., Yepes J., García-González C. and Gallego J. Sustainable low-temperature asphalt mixtures with marginal porous volcanic aggregates and crumb rubber modified bitumen. *Journal of Cleaner Production*. (2018).
- [11] Cao W.: Study on properties of recycled tire rubber modified asphalt mixtures using dry process. *Construction and Building Materials*, Vol. 21, No. 5 (2007)1011-1015.
- [12] da Silva L., Benta A. and Picado-Santos L.: Asphalt rubber concrete fabricated by the dry process: Laboratory assessment of resistance against reflection cracking. *Construction and Building Materials*, Vol. 160 (2018)539-550.
- [13] Unsiwilai S. and Sangpetngam B.: Influences of Particle Size and Content on Deformation Resistance of Crumb Rubber Modified Asphalt using Dry Process Mix. *Engineering Journal*, Vol. 22, No. 3 (2018)181-193.
- [14] Nguyen H. T. and Tran T. N.: Effects of crumb rubber content and curing time on the properties of asphalt concrete and stone mastic asphalt using dry process. *International Journal of Pavement Research and Technology*, Vol. 11, No. 3 (2018) 236-244.
- [15] Ministerio de Transportes y Obras Públicas (MTO). 2002. Especificaciones Generales para la Construcción de Caminos y Puentes MOP - 001 - F 2002. Ecuador.
- [16] Muñoz López A. P. and Orquera Guerrero M. F.:

- (2018). Mejoramiento de una mezcla asfáltica con la adición del residuo de caucho obtenido tras su remoción de la pista de aterrizaje del Aeropuerto Internacional Mariscal Sucre, por vía seca (Bachelor's thesis, PUCE).
- [17] Garnica Anguas, P., Delgado Alamilla, H., & Sandoval Sandoval, C. D. (2005). Análisis comparativo de los métodos Marshall y Superpave para compactación de mezclas asfálticas. Publicación técnica, (271).
- [18] Garnica Anguas P., Delgado Alamilla, H., Gomez Lopez, J. A., Alonso Romero, S., & Alarcon Orta, H. A. (2004). Aspectos del diseño volumétrico de mezclas asfálticas. Publicación técnica, (246).
- [19] Lavin, P. (2014). Asphalt pavements: a practical guide to design, production and maintenance for engineers and architects. CRC Press.
- [20] Flores, M & Garnica, P & Gómez, J & Delgado, H. (2005). Caracterización geomecánica de mezclas asfálticas. Sanfandilla. Publicación técnica No. 267. Recuperado de:<http://www.imt.mx/archivos/publicaciones/publicaciontecnicapt267.pdf>.



UNIVERSIDAD  
DEL ZULIA

---

## REVISTA TECNICA

DE LA FACULTAD DE INGENIERIA  
UNIVERSIDAD DEL ZULIA

Vol. 43. N°1, Enero - Abril 2020, pp. 03 - 56 \_\_\_\_\_

*Esta revista fue editada en formato digital y publicada en Diciembre de 2019, por el **Fondo Editorial Serbiluz**, Universidad del Zulia. Maracaibo-Venezuela*

[www.luz.edu.ve](http://www.luz.edu.ve)

[www.serbi.luz.edu.ve](http://www.serbi.luz.edu.ve)

[www.produccioncientifica.luz.edu.ve](http://www.produccioncientifica.luz.edu.ve)