



Industrial Data

ISSN: 1560-9146

ISSN: 1810-9993

industrialdata@unmsm.edu.pe

Universidad Nacional Mayor de San Marcos

Perú

Navarrete Schettini, Gabriel Antonio

Diseño de mezclas asfálticas integrando residuos sólidos de la industria automovilística (elastómero) y de vías (pavimento asfáltico envejecido) en Manabí, Ecuador

Industrial Data, vol. 22, núm. 1, 2019, -Julio

Universidad Nacional Mayor de San Marcos

Perú

Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=81661270002>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en [redalyc.org](https://www.redalyc.org)

redalyc.org
UAEM

Sistema de Información Científica Redalyc

Red de Revistas Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

Diseño de mezclas asfálticas integrando residuos sólidos de la industria automovilística (elastómero) y de vías (pavimento asfáltico envejecido) en Manabí, Ecuador

GABRIEL ANTONIO NAVARRETE SCHETTINI ¹

RECIBIDO: 11/05/2018 ACEPTADO: 05/12/2018

RESUMEN

El propósito de la investigación es diseñar mezclas asfálticas integrando residuos sólidos de neumáticos fuera de uso (elastómero) y pavimento asfáltico envejecido en el Cantón Bolívar, provincia de Manabí, Ecuador. Los factores en estudio fueron el elastómero en los niveles 4%, 8%, 12% y 16%, y la granulometría fina, media y gruesa, empleando 52% de pavimento asfáltico envejecido. Además, se empleó el diseño completamente al azar de un arreglo bifactorial $GxE+1$ con trece tratamientos y tres repeticiones, donde G corresponde a la granulometría de áridos utilizados y E al elastómero. A partir del buen proceder del diseño de mezclas asfálticas con pavimento asfáltico envejecido, podemos concluir que, de la adición de 4%, 8% y 12% de elastómero en las curvas granulométricas media y fina, es posible utilizar aquel diseño en vías de tráfico liviano y medio, como el que se presenta en el Cantón Bolívar.

Palabras-claves: Elastómero; pavimento asfáltico envejecido; residuos de industrias.

INTRODUCCIÓN

En el mundo hay aproximadamente 800 millones de vehículos comerciales en uso y cerca de 70 millones de unidades se añaden a ese número cada año (Bureau of International Recycling, 2016). Además de eso, de acuerdo con Peláez, Velásquez y Giraldo (2017), en 2014 se estimó que el consumo mundial de esta materia prima fue de 28,9 millones de toneladas, aumentando en un 0,7% en el 2015. De toda esa cantidad mundial mencionada, en "Ecuador cada año se desechan alrededor de 2.4 millones de neumáticos" (Castro, 2015, p. 2) y, al ser ideado como un producto que ofrece la mayor resistencia posible al desgaste en su uso, se estima que su descomposición natural ocurrirá en un periodo mayor a 600 años. La composición de estos neumáticos incluye elementos peligrosos como el plomo, el cromo, el cadmio y otros metales pesados que, cuando se eliminan de manera inapropiada, constituyen una amenaza para la salud y el medio ambiente (Bertalot, 2017). El reciclado de pavimentos asfálticos se realiza sobre materiales deteriorados que han perdido en gran medida sus propiedades iniciales. El aprovechamiento de los materiales fresados mediante el reciclado resulta técnicamente viable, lo cual se enriquece con la adición de materiales pétreos (Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas, 2011).

Por otro lado, Sánchez (2012) señala que "los materiales que se obtienen tras el tratamiento de los residuos de neumáticos, una vez separados los restos aprovechables en la industria, pueden [tener varios usos]" (p. 29). Además, los estudiosos Sánchez (2012), Martín (2015) y Grytsenko, Pozdniakova y Vnukova (2015) coinciden en mencionar que una de las aplicaciones del caucho es funcionar como componente de las capas asfálticas que se usan en la construcción de carreteras, con lo que disminuye la extracción de áridos en canteras. Asimismo, le confieren características especiales, ya que puede ser utilizado como caucho en la capa de rodadura, para que ayude a obtener una mayor media de vida, más elasticidad, menos deformaciones, mayor resistencia al agrietamiento, mayor resistencia al arrastramiento. Aparte de lo dicho, también tiene la característica de

¹ Ingeniero civil por la Universidad Central del Ecuador y magíster en Educación y Desarrollo Social de la Universidad Tecnológica Equinoccial. Actualmente, es docente de la Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí Manuel Félix López (ESPAyMFL). Manabí, Ecuador
E-mail: gnavarrete@espa.y.edu.ec

pavimento drenante y le otorga a la mezcla asfáltica impedimento en la acumulación de agua, lo que incrementa su adherencia, evita las proyecciones de agua y concede buenas condiciones ópticas y bajo nivel de ruido. De esta forma, presenta tanto beneficios ambientales como económicos, ya que las vías, con la incorporación de caucho, se vuelven más resistentes, durables y menos frágiles, incluso ofrecen oposición a que se quiebren y tiene una vida útil de 10 años (Amorim y Lima, 2018).

Por otro lado, Lacamara (2014) nos ofrece un dato relevante, el cual evidencia que "se pueden emplear entre 1000 y 7000 neumáticos por kilómetro de carretera de dos carriles. Cifras tan elevadas colocan el pavimento asfáltico como una de las grandes soluciones para emplear los neumáticos fuera de uso" (párr. 13). Así, el reciclado de pavimentos constituye una alternativa de rehabilitación de pavimentos más competitiva y sostenible, puesto que permite minimizar la utilización de recursos no renovables, agregados naturales y asfalto; además, previene la creación de residuos y la ocupación de botaderos (Paiva y Ramos, 2014). Asimismo, comprende una serie de técnicas constructivas con tendencia al aprovechamiento integral de materiales envejecidos de firmes y pavimentos. Por ello, es de vital importancia desarrollar una propuesta sostenible para las personas que

[...] basan sus ingresos en la recuperación informal de lo que otros desechan, están expuestos a peligros [sanitarios] [...]. Dentro de este sector informal, es importante el número de niños y niñas que encuentran en el trabajo de recuperación de residuos la

única forma de sobrevivir ante una sociedad muchas veces indiferente (Lecitra, 2010, p. 4)

De esta forma, se propone diseñar mezclas asfálticas integrando residuos sólidos de neumáticos fuera de uso (elastómero) y pavimento asfáltico envejecido en el Cantón Bolívar, provincia de Manabí, Ecuador.

METODOLOGÍA

1. Diseño experimental. En la investigación se utilizó el diseño completamente al azar (DCA) en un arreglo bifactorial $G \times E + 1$ con trece tratamientos y tres repeticiones, donde G corresponde a la granulometría y E , al elastómero. Se utilizó el software InfoStad para determinar el coeficiente de variación (CV%), y en las variables donde se constató diferencias estadísticas se realizó la prueba de Tukey al 5% con probabilidad del error.

2. Dosificación de los áridos. La dosificación de los materiales y la tolerancia fueron determinadas de acuerdo con los valores de la Tabla 1, la cual es la recomendada por las especificaciones generales para la construcción de caminos y puentes realizados (Ministerio de Transportes y Obras Públicas del Ecuador, 2002).

3. Granulometría de los materiales. Se realizó el ensayo de abrasión al material de 1/2, el cual se realizó con la gradación B, que consiste en obtener material extraído de la granulometría, utilizando $2500 \text{ g} \pm 2$ pasante del tamiz 19 mm o N.º 3/4, retenidos en el 12,5 mm o N.º 1/2 y $2500 \text{ g} \pm 2$, pasante del tamiz 12,5 mm o N.º 1/2, retenidos en el 9,5 mm

Tabla 1. Especificaciones generales para la construcción de caminos y puentes.

Tamiz	Porcentaje en peso que pasa a través de los tamices de malla cuadrada			
	N.º 3/4	N.º 1/2	N.º 3/8	N.º 4
N.º 1 (25,4 mm)	100			
N.º 3/4 (19,0 mm)	90-100	100		
N.º 1/2 (12,7 mm)		90-100	100	
N.º 3/8 (9,50 mm)	56-80		90-100	100
N.º 4 (4,75 mm)	35-65	44-74	55-85	80-100
N.º 8 (2,36 mm)	23-49	28-58	32-67	65-100
N.º 16 (1,18 mm)				40-80
N.º 30 (0,60 mm)				25-65
N.º 50 (0,30 mm)	5-19	5-21	7-23	7-40
N.º 100 (0,15 mm)				3-20
N.º 200 (0,075 mm)	2-8	2-10	2-10	2-10

Fuente: Ministerio de Transporte y Obras Públicas del Ecuador (2002).

o N.º 3/8, y se coloca en la máquina de los Ángeles, donde se dan 500 vueltas. Una vez terminado, se saca el material y se lo tamiza por el 1,70 mm o N.º 12, se lava y se seca a 110 °C. Luego de secarlo, se procede a pesarlo para su cálculo de coeficiente de desgaste.

El ensayo de masa unitaria o peso volumétrico consistió en tener los materiales (1/2, 3/8, cisco y arena) totalmente secos, moldes metálicos con pesos y volúmenes conocidos para realizar el ensayo, el cual consiste en añadir material de una forma constante hasta llenar el recipiente enrazando y pesando. Así, se repite el procedimiento por 3 ocasiones para conocer la masa unitaria suelta. Por otro lado, para la masa unitaria compactada se llena el recipiente en tres capas iguales y se da 25 varilladas por capa. Una vez realizados los ensayos a los materiales de 1/2 (árido 1), 3/8 (árido 2), cisco (árido 3) y arena (árido 4) se procede a la digitación y cálculo de resultados, como se muestra en la Tabla 2.

4. Determinación del porcentaje óptimo de asfalto. Ello se obtiene con el porcentaje óptimo de asfalto definido a partir de la curva de vacíos, con la cual se obtuvo 6,2%, como se observa en la Tabla

3. Además, se procedió a conseguir los otros resultados de las curvas, tales como pesos unitarios (densidad), vacíos, estabilidad, vacíos de agregado mineral, flujo y VFA.

5. Integración del pavimento asfáltico envejecido y del elastómero. El moldeo y ensayo de las briquetas en la investigación se las realizó de forma similar, solo con la inclusión del polvo de neumático, pasante del tamiz N.º 10 y retenido en el tamiz N.º 40 y pavimento asfáltico envejecido. Los agregados pétreos fueron mezclados individualmente sin adición de residuos sólidos, manteniendo temperaturas con máximos y mínimos (160 °C - 80 °C). De acuerdo con Figueroa, Fonseca, Amaya y Prieto (2008), a esta temperatura se presenta un mejor proceso de mezclado, logrando una mayor homogenización en el ligante asfáltico modificado. En la Tabla 4 se muestran los valores promedio de las exigencias del diseño de Marshall, donde se utilizó 52% de pavimento asfáltico envejecido y se determinó que el pavimento asfáltico no cumple con las exigencias propuestas por el Ministerio de Transporte y Obras Públicas del Ecuador (2002) y Garni-

Tabla 2. Mezcla de los agregados.

Granulometría combinada para la mezcla						
Tipo de material	Porcentajes para mezcla	Porcentajes pasantes en tamices				
		N.º 3/4	N.º 1/2	N.º 4	N.º 8	N.º 50
Árido N.º 1	12%	12,0	6,2	0,3	0,3	0,2
Árido N.º 2	28%	28,0	28,0	4,9	1,1	0,9
Árido N.º 3	45%	45,0	45,0	42,5	27,5	12,4
Árido N.º 4	15%	15,0	15,0	14,9	14,5	4,4
Granulometría obtenida	100,0	94,2	62,5	43,3	18,0	6,8
Especificación	100	90-100	44-77	28-58	5-21	2-10
Granulometría esperada	100,0	95,0	60,5	43,0	13,0	6,0

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3. Diseño de Marshall para obtener el porcentaje óptimo de asfalto.

Propiedades	% asfalto-diseño	Valor obtenido	Exigencias
Estabilidad	6,20	2546	> 1800 lb
Flujo	6,20	12,0	8-16 in/100
Peso unitario	6,20	2281	< 2000
Vacíos en mezcla	6,20	4,0	3,0-5,0%
Vacíos en agregados	6,20	15,20	> 13%
Vacíos rellenos asfalto	6,20	71	65-75%

Fuente: Elaboración propia.

ca, Delgado, Gómez, Alonso y Alarcón (2004), por lo que se incluyeron agregados pétreos.

Las Tablas 5, 6 y 7 muestran las granulometrías con 52% de pavimento asfáltico envejecido enriquecido con agregados pétreos.

Una vez establecido el porcentaje óptimo de asfalto en la mezcla, que resultó ser el 6,2%, se procede a

agregar, mediante el proceso de vía seca, el polvo de neumático en diferentes porcentajes, partiendo desde el 4% hasta el 16%.

6. Variables a evaluar en las mezclas asfálticas. Se utilizó el diseño de Marshall para evaluar las mezclas asfálticas, se determinó la densidad bulk, la estabilidad, el flujo, los vacíos en la mezcla, los vacíos en agregados minerales y los vacíos en rellenos de

Tabla 4. Diseño de Marshall del pavimento asfáltico envejecido.

Propiedades	% asfalto-diseño	Valor obtenido	Exigencias
Estabilidad	5,70	3381	> 1800 lb
Flujo	5,70	15,5	8-16 in/100
Peso unitario	5,70	2174	> 2000
Vacíos en mezcla	5,70	6,37	3,0-5,0%
Vacíos en agregados	5,70	19,62	> 13%
Vacíos rellenos asfalto	5,70	67,37	65-75%

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5. Graduación granulométrica centrada del pavimento asfáltico envejecido enriquecido con agregados pétreos.

Tipo de material	Porcentajes para mezcla	Graduación combinada para la mezcla					
		N.º 3/4	N.º 1/2	N.º 4	N.º 8	N.º 50	N.º 200
Árido N.º 1	10%	10,0	4,8	0,2	0,2	0,1	0,1
Árido N.º 2	16%	16,0	16,0	2,3	0,7	0,5	0,4
Árido N.º 3	16%	16,0	16,0	15,3	10,2	4,8	2,0
Árido N.º 4	6%	6,0	6,0	5,9	5,8	1,7	0,1
Reciclado	52%	52,0	50,4	37,7	25,8	10,5	2,0
Granulometría obtenida		100,0	93,2	61,4	42,7	17,6	4,6
Especificación		100	90-100	44-77	28-58	5-21	2-10
Granulometría esperada		100,0	95,0	60,5	43,0	13,0	6,0

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 6. Graduación granulométrica fina del pavimento asfáltico envejecido enriquecido con agregados pétreos.

Tipo de material	Porcentajes para mezcla	Graduación combinada para la mezcla					
		N.º 3/4	N.º 1/2	N.º 4	N.º 8	N.º 50	N.º 200
Árido N.º 1	8%	8,0	3,8	0,1	0,1	0,1	0,1
Árido N.º 2	8%	8,0	8,0	1,2	0,3	0,3	0,2
Árido N.º 3	26%	26,0	26,0	24,9	16,6	7,8	3,3
Árido N.º 4	6%	6,0	6,0	5,9	5,8	1,7	0,1
Reciclado	52%	52,0	50,4	37,7	25,8	10,5	2,0
Granulometría obtenida		100,0	94,2	69,8	48,8	20,3	5,6
Especificación		100	90-100	44-77	28-58	5-21	2-10
Granulometría esperada		100,0	95,0	60,5	43,0	13,0	6,0

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 7. Graduación granulométrica gruesa del pavimento asfáltico envejecido enriquecido con agregados pétreos.

Tipo de material	Porcentajes para mezcla	Graduación combinada para la mezcla					
		N.º 3/4	N.º 1/2	N.º 4	N.º 8	N.º 50	N.º 200
Árido N.º 1	12%	12,0	5,7	0,2	0,2	0,2	0,1
Árido N.º 2	22%	20,0	22,0	3,2	0,9	0,7	0,5
Árido N.º 3	14%	14,0	14,0	13,4	9,0	4,2	1,8
Árido N.º 4	2%	2,0	2,0	2,0	1,9	0,6	0,0
Reciclado	52%	52,0	50,4	37,7	25,8	10,5	2,0
Granulometría obtenida	100,0	94,1	56,5	37,8	16,1	4,5	
Especificación	100	90-100	44-77	28-58	5-21	2-10	
Granulometría esperada	100,0	95,0	60,5	43,0	13,0	6,0	

Fuente: Elaboración propia.

asfalto, de acuerdo al Manual de Especificaciones (Ministerio de Transporte y Obras Públicas del Ecuador, 2002 y Garnica et al., 2004).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

1. Densidad bulk. En la Tabla 8 se observan los valores promedios de la variable “Densidad bulk”. El análisis de varianza (ADEVA) no determinó diferencias estadísticas para el factor G, ni para el factor E, ni en la interacción GxE ni en la comparación factorial versus testigo.

2. Porcentaje de vacíos en la mezcla. En la Tabla 8 se observan los valores promedios de la variable “% de vacíos en la mezcla”; el ADEVA no determinó diferencias estadísticas para el factor E, ni en la interacción GxE, ni en la comparación factorial versus testigo, a excepción del factor G. La prueba de significancia determinó dos rangos de similitud estadística en el factor G, donde el mejor “% de vacíos en la mezcla” correspondió a G1 con 4,26%, seguido de G2. En ese sentido, el Ministerio de Transporte y Obras Públicas del Ecuador (2002) señala que el 5% es el valor máximo exigido en el porcentaje de vacíos, por lo tanto la granulometría gruesa con el 5% no cumple con las exigencias; además, vale añadir que el porcentaje permitido de vacíos en muestras de laboratorio para capas de base y capas superficiales se encuentra entre 3% y 5%.

3. Estabilidad. En la Tabla 8 se observan los valores promedios de la variable “Estabilidad”, el ADEVA determinó diferencias estadísticas significativas para el factor G, el factor E, la interacción GxE y para la comparación factorial versus testigo. En la prueba de significancia realizada en el factor G, se establecieron dos rangos de similitud estadística,

de los cuales fue G2 quien obtuvo mayor estabilidad con 2880,86 lb; en cambio, G3, con 2640,34 lb, obtuvo la estabilidad más baja. Asimismo, en la prueba de significancia realizada al factor E, se determinaron tres rangos de similitud estadística, donde E3 se destacó con mayor estabilidad con 3018,59 lb; y E4, con 2472,87 lb, obtuvo la estabilidad más baja. En la prueba de significancia realizada a la interacción GxE, se establecieron cuatro rangos de similitud estadística, donde G2E3 (G media-12% de elastómero) y G1E3 (G fina-12% de elastómero) tuvieron 3119,73 lb y 3042,36 lb, respectivamente. Además, G2E3 y G1E3 se destacaron con la mayor estabilidad, mientras que G3E4 (G gruesa-elastómero 16%) obtuvo la estabilidad más baja con 2310,61 lb. En la comparación factorial versus testigo, se establecieron tres rangos de similitud estadística, donde destacaron el factor G con 2790,10 lb, seguido del factor E con 2640,10 lb y, en último lugar, el testigo con 2605,67 lb de estabilidad.

Un pavimento estable es capaz de mantener su forma y lisura bajo cargas repetitivas [...] Las especificaciones de estabilidad deben ser lo suficiente altas para acomodar adecuadamente el tránsito esperado, pero no más altas de lo que exijan las condiciones de transito [sic] (Carrasco, 2004, p. 65).

Asimismo, el Ministerio de Transporte y Obras Públicas del Ecuador (2002) exige estabilidades mayores a 1800 lb, para que todos los tratamientos cumplan con las exigencias del diseño de Marshall.

4. Flujo. En la Tabla 9 se observan los valores promedios de la variable “Flujo”; el ADEVA no determinó diferencias estadísticas para la interacción

Tabla 8. Densidad bulk, porcentaje de vacíos en la mezcla y estabilidad. Diseño de mezclas asfálticas integrando residuos sólidos de la industria automovilística (elastómero) y de vías (pavimento asfáltico envejecido).

Tratamientos	Densidad bulk	% de vacíos en la mezcla	Estabilidad
Factor G	NS	**	**
G1 granulometría fina	2282,17	4,26% (a)	2849,09 lb (a)
G2 granulometría media	2274,67	4,58% (ab)	2880,86 lb (a)
G3 granulometría gruesa	2272,50	5,00% (b)	2640,34 lb (b)
Factor E	NS	NS	**
E1 4% elastómero	2270,11	4,73%	2785,78 lb (b)
E2 8% elastómero	2274,89	4,60%	2883,15 lb (b)
E3 12% elastómero	2276,56	4,46%	3018,59 lb (a)
E4 16% elastómero	2284,22	4,64%	2472,87 lb (c)
Interacción	NS	NS	**
G1E1	2282	4,15%	2890,00 lb (ab)
G1E2	2284,67	4,27%	2953,57 lb (ab)
G1E3	2279,33	4,49%	2042,36 lb (a)
G1E4	2282,67	4,13%	2510,42 lb (de)
G2E1	2267,33	5,00%	2870,94 lb (abc)
G2E2	2275,67	4,42%	2935,18 lb (ab)
G2E3	2281,67	4,18%	3119,73 lb (a)
G2E4	2274	4,72%	2597,57 lb (cd)
G3E1	2261	5,05%	2596,39 lb (cd)
G3E2	2264,33	5,12%	2760,70 lb (bcd)
G3E3	2268,67	4,72%	2893,68 lb (ab)
G3E4	2296	5,07%	2310,61 lb (e)
Factorial versus testigo	NS	NS	**
Testigo absoluto	2286,67	4,21%	2605,67 lb (c)
Granulometría	2278,11	4,61%	2790,10 lb (a)
Elastómero	2290,30	4,60%	2640,10 lb (b)
Coeficiente de variación	0,87	9,75	3,38
P	0,6711	0,044	<0,0001

(*) Diferencia significativa entre los tratamientos.

(**) Diferencia altamente significativa entre los tratamientos. Letras en común no son estadísticamente diferentes.

Fuente: Elaboración propia.

GxE; por el contrario, se evidenciaron diferencias estadísticas para el factor G, el factor E y la comparación factorial versus testigo. La prueba de significancia realizada al factor G estableció dos rangos de similitud estadística, donde resultaron G2 y G1 con 14,42 in/100 y 14,83 in/100, respectivamente, y destacaron sobre la granulometría gruesa con 15,17 in/100. En la prueba estadística realizada al factor E, se establecieron dos rangos de similitud estadística, derivando E1, E2 y E3, con 14,44 in/100, 14,56 in/100 y 14,89 in/100, respectivamente, los cuales destacaron con buenos valores de flujo en comparación a las 15,33 in/100 de E4. La prueba de significancia realizada a la comparación de la factorial versus el testigo estableció dos rangos de similitud estadística, de los cuales es el testigo quien obtuvo el mejor valor de flujo con 13 in/100, seguido de los factores G y E con 14,81 in/100 en ambos casos.

De esta manera, las mezclas asfálticas con material reutilizable solo cumplen las exigencias para tráfico liviano y medio, lo que coincide con el Ministerio de Transporte y Obras Públicas del Ecuador (2002), que establece que el mínimo debe ser 8 in/100 para todos los tipos de tráfico, tales como, muy pesado, pesado, medio y liviano. El valor de flujo máximo exigido para los tráficos muy pesado y pesado será 14 in/100; en cambio, para los tráficos medio y liviano puede extenderse hasta el máximo de 16 in/100.

5. Vacíos en agregados minerales. En la Tabla 9 se observan los valores de la variable "% de vacíos en agregados minerales"; el ADEVA no determinó diferencias estadísticas significativas para el factor E, interacción GxE y comparación factorial versus testigo; no obstante, determinó diferencias estadísticas para el factor G. En la prueba de significancia realizada al factor G se establecieron

Tabla 9. Flujo, vacíos en agregados minerales y vacíos en rellenos de asfalto. Diseño de mezclas asfálticas integrando residuos sólidos de la industria automovilística (elastómero) y de vías (pavimento asfáltico envejecido).

Tratamientos	Flujo in/100	% de vacíos en agregados minerales	% de vacíos en rellenos de asfalto
Factor G	*	**	**
G1 granulometría fina	14,83 (ab)	15,12% (b)	71,80% (a)
G2 granulometría media	14,42 (a)	15,40% (b)	70,36% (ab)
G3 granulometría gruesa	15,17 (b)	15,82% (a)	68,47% (b)
Factor E	*	NS	NS
E1 4% elastómero	14,44 (a)	15,57%	69,66%
E2 8% elastómero	14,56 (ab)	15,39%	70,17%
E3 12% elastómero	14,89 (ab)	15,33%	70,96%
E4 16% elastómero	15,33 (b)	15,49%	70,14%
Interacción	NS	NS	NS
G1E1	14,67	15,12%	72,57%
G1E2	14,33	15,03%	71,67%
G1E3	15,00	15,22%	70,59%
G1E4	15,33	15,10%	72,67%
G2E1	14,00	15,67%	68,13%
G2E2	14,00	15,36%	71,27%
G2E3	14,67	15,15%	72,47%
G2E4	15,00	15,43%	69,55%
G3E1	14,67	15,92%	68,29%
G3E2	15,33	15,78%	67,57%
G3E3	15,00	15,63%	69,83%
G3E4	15,67	15,94%	68,18%
Factorial versus testigo	**	NS	NS
Testigo absoluto	13,00 a	14,96%	71,92%
Granulometría	14,81 b	15,45%	70,21%
Elastómero	14,81 b	15,59%	70,23%
Coeficiente de variación	4,42	2,57	3,04
P	0,0001	0,041	0,038

(*) Diferencia significativa entre los tratamientos.

(**) Diferencia altamente significativa entre los tratamientos. Letras en común no son estadísticamente diferentes.

Fuente: Elaboración propia.

dos rangos de similitud estadística, donde destacó el factor G3 con 15,82% de vacíos en agregados minerales, mientras que G1 y G2 tuvieron 15,40% y 15,12%, respectivamente, y se obtuvieron valores bajos en "% de vacíos en agregados minerales". Las exigencias del Ministerio de Transporte y Obras Públicas del Ecuador (2002) no establecen valores máximos a considerar, por ende, es errado afirmar que cuanto mayor sean los vacíos en agregados minerales (VAM) más espacio habrá disponible para las películas de asfalto. De tal forma, según Carrasco (2004):

Existen valores mínimos para VMA [o VAM] los cuales están recomendados y especificados como función del tamaño del agregado. Estos valores se basan en el hecho de que cuanta más gruesa sea la película de asfalto que cubre las partículas

de agregado, más durable será la mezcla (pp. 62-63).

6. Vacíos en rellenos de asfalto. En la Tabla 9 se observan los valores promedios de la variable "% de vacíos en rellenos de asfalto"; el análisis de varianza no determinó diferencias estadísticas para el factor E, interacción GxE y comparación factorial versus testigo; sin embargo, se evidenciaron diferencias estadísticas para el factor G. En la prueba de significancia realizada al factor G se establecieron dos rangos de similitud estadística, en el cual destacó G3 con 68,47%, seguido de G2 con 70,36% y, por último, G1 con 71,80%. De esta manera, los resultados coinciden con las exigencias del diseño de Marshall, el cual establece un valor mínimo de 65% y el máximo de 75% (Ministerio de Transporte y Obras Públicas del Ecuador, 2002).

CONCLUSIONES

1. La adición de 4%, 8% y 12% de elastómero en el diseño de mezclas asfálticas con pavimento asfáltico envejecido derivó en un buen proceder, lo que sirve para ser utilizado a nivel de campo en mezclas asfálticas modificadas.
2. Las granulometrías media y fina, en el diseño de mezclas asfálticas con pavimento asfáltico envejecido, contribuyeron a obtener una buena conducta con la reutilización del elastómero y del pavimento asfáltico, por lo tanto, puede ser utilizado a nivel de campo en mezclas asfálticas modificadas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Amorim, E. y Lima, L. (2018). Uso de residuos de caucho en pavimentos de asfalto: una revisión de literatura. *Revista científica multidisciplinaria base de conocimiento*, 3(2), 39-47.
- [2] Bertalot, E. (2017). Una mirada al reciclaje de neumáticos fuera de uso. *Revista SLTCaucho*, (19), 18-19.
- [3] Bureau of International Recycling (BIR) (2016). *Neumáticos*. Recuperado de <http://www.bir.org/industry-es-es/tyres-es-es/>
- [4] Castro, V. (2015). *Estudio de factibilidad de creación de una empresa recicladora de neumáticos desechados, para la producción de caucho modificador de asfalto, en la provincia de Guayas* (Tesis de maestría). Universidad de Guayaquil, Ecuador.
- [5] Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX) (2011). *Reciclado de pavimentos asfálticos*. Madrid, España: Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas.
- [6] Figueroa, A., Fonseca, E., Amaya, C. y Prieto, M. (2008). Contrastación entre el asfalto modificado con poliestireno y llanta triturada empleando dos métodos de mezclado. *Revista Epsilon*, (10), 67-79.
- [7] Garnica, P., Delgado, H., Gómez, J., Alonso, S. y Alarcón, H. (2004). *Aspectos del diseño volumétrico de mezclas asfálticas*. Sanfandila, México: Secretaría de Comunicaciones y Transportes / Instituto Mexicano del Transporte.
- [8] Grytsenko, A., Pozdniakova, Y. y Vnukova, N. (2015). *Estimation of possibility of tyre utilization products usage as alternative fuel*. Recuperado de https://dspace.khadi.kharkov.ua/dspace/bitstream/123456789/1082/1/%D0%90%D0%A2_36_07.pdf
- [9] Lacamara, M. (2014). Brasil estrena el asfalto ecológico. *Twenergy*. Recuperado de <https://twenergy.com/a/brasil-estrena-el-asfalto-ecológico>
- [10] Lecitra, M. (2010). *Reducir, reutilizar y reciclar: el problema de los residuos sólidos urbanos*. Recuperado de <https://geic.files.wordpress.com/2010/10/reducir-reutilizar-y-reciclar.pdf>
- [11] Martín, A. (2015). Aplicación del caucho reciclado como solución constructiva ecológica. Recuperado de <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/55735/MART%C3%8DN%20-%20Aplicaci%C3%B3n%20del%20caucho%20reciclado%20como%20soluci%C3%B3n%20constructiva%20ecol%C3%ADca.pdf?sequence=1>
- [12] Ministerio de Transporte y Obras Públicas (MTOP) (2002). *Especificaciones generales para la construcción de caminos y puentes*. Quito, Ecuador: Ministerio de Obras Públicas / República del Ecuador.
- [13] Paiva, G y Ramos, G. (2014). *Reciclado de pavimentos asfálticos y su reutilización para el diseño de mezcla de asfalto en caliente* (Tesis de licenciatura). Universidad Señor de Sipán, Perú.
- [14] Peláez, G., Velásquez, S. y Giraldo, D. (2017). Aplicaciones de caucho reciclado: una revisión de la literatura. *Revista Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 27(2), 27-50.
- [15] Sánchez, R. (2012). Segunda vida de los neumáticos usados. *Revista Química Viva*, 11(1), 25-40.
- [16] Carrasco, D. (2004). *Estudio comparativo entre mezclas asfálticas en caliente y mezclas asfálticas con emulsiones tibias*. (Tesis de licenciatura). Universidad de Piura, Perú.