

RECICLAMIENTO DE ASFALTO PARA FABRICAR CARPETAS DE CONCRETO

Recycling Asphalt to Make Concrete Pavements

Dulce Valeria Guzmán Ortiz^{1*}, Juan Bosco Hernández Zaragoza

¹Universidad Autónoma de Querétaro

*Autor de correspondencia:
dv.ortiz4@gmail.com

RESUMEN

La constante explotación y consumo de recursos naturales para la construcción o rehabilitación de carreteras ha influido en el calentamiento global, es por ello que el Reciclado de Pavimento Asfáltico, también conocido como Reclaimed Asphalt Pavement (RAP, por sus siglas en inglés), se ha presentado como una técnica para reducir costos y consumo de los recursos naturales que consiste en fresar el material de un pavimento flexible durante la construcción y rehabilitación. El objetivo de este estudio fue evaluar el desempeño de las mezclas en resistencia a compresión y tensión diagonal de morteros de concreto hidráulico a los 3, 7 y 14 y 28 días de edad. Se trabajó con material RAP para separar la impregnación del material asfáltico mediante la máquina de Desgaste de Los Ángeles y se cribó el agregado para usarlo en dos diferentes mezclas RAP en Condición Recuperado Lavado (LAV) y RAP en Condición Recuperado Sin Lavar (SL), así mismo se evaluó una Mezcla de Control (CO) y el RAP en Condición Original (CO). Todas las muestras fueron cribadas por el tamiz No. 8 y compactadas en dos capas al darles 20 golpes a cada una en cilindros de 5*10 cm. Para cada material se hizo corrección por humedad por las absorciones de los agregados. Por un lado, los resultados obtenidos en laboratorio indican que la aportación de resistencias a compresión a los 28 días fue de 47.7 kg/cm², 62.2 kg/cm² y 74.8 kg/cm², de las mezclas CO, SL y LAV, observándose que la mezcla LAV obtuvo un incremento del 4.3% respecto a la Mezcla de Control (MC) que tuvo una resistencia de 71.8 kg/cm². Por otro lado, los resultados obtenidos de resistencia a la tensión diametral a los 28 días fueron de 10.2 kg/cm², 15.4 kg/cm² y 16.7 kg/cm², de los agregados de reciclado de pavimento asfáltico CO, SL y LAV son menores que la Mezcla Control (MC) de 21.0 kg/cm², donde se des-

taca que el material LAV es el que obtuvo una resistencia de 16.7 kg/cm², al ser el de mejor comportamiento, mejorando en un 38.9% y 7.3% respecto al CO y SL, lo que indica que es una posible aplicación de agregado como remplazo para un concreto hidráulico.

Palabras clave: reciclado de pavimento asfáltico, concreto hidráulico, resistencia, compresión, tensión diagonal.

ABSTRACT

The constant exploitation and consumption of natural resources for the construction or rehabilitation of roads has influenced on global warming. Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) has been presented as a technique to reduce costs and consumption of natural resources. The objective of this study was to evaluate the performance of the mixtures, in resistance to compression and diagonal tension presented in hydraulic concrete mortars, at 3, 7, 14 and 28 days of age. RAP material was used to separate the impregnation from the asphalt material using the Los Angeles Wear machine and the aggregate was screened to be used in two different RAP mixtures in Recovered Washed Condition (LAV) and RAP in Recovered Unwashed Condition (SL). A Control Mix (CO) and RAP in Original Condition (CO) were also evaluated. All samples were screened by sieve No. 8 and compacted in two layers giving 20 hits to each one in cylinders of 5*10 cm. For each material, moisture correction was made due to the absorption of the aggregates. On the one hand, the results obtained in the laboratory indicate that the contribution in resistance to compression at 28 days was 47.7 kg/cm², 62.2 kg/cm² and 74.8 kg/cm², of the mixtures CO, SL and LAV. Results showed that the mixture LAV obtained an increase of 4.3% with respect to the Control Mix (MC) that obtained a resistance of 71.8 kg/cm². On



the other hand, the results of resistance to diametral tension obtained at 28 days were 10.2 kg/cm², 15.4 kg/cm² and 16.7 kg/cm². Out of the asphalt pavement CO recycling aggregates, SL and LAV are smaller than the Control Mix (MC) of 21.0 kg/cm². It is emphasized that the material LAV is the one that obtained a resistance of 16.7 kg/cm², being the best behavior, improving in 38.9% and 7.3% with respect to CO and SL, which indicates that it is a possible application of aggregate as a replacement for a hydraulic concrete.

Keywords: asphalt pavement recycling, hydraulic concrete, strength, compression, diagonal tension.

INTRODUCCIÓN

El crecimiento del parque vehicular en los últimos años (véase Figura 1) de acuerdo con la base de datos del Instituto Nacional de Estadística y Geografía [1] ha sido una de las causas del deterioro de los pavimentos, lo cual ha ocasionado la construcción y rehabilitación de nuevas carreteras [2], así como el consumo de numerosos recursos naturales.

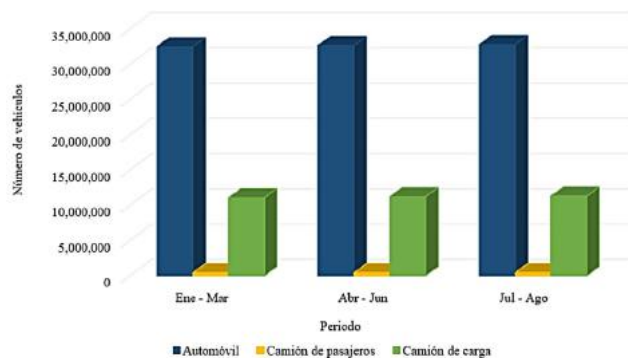


Figura 1. Vehículos de motor registrados en circulación.
Fuente: Elaboración propia a partir de [1].

En México se cuentan con 169,078 km de carreteras pavimentadas según datos recabados por la Secretaría de Comunicaciones

y Transporte (SCT), el Instituto Mexicano del Transporte (IMT) y el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). Por un lado, desde la década de 1960, la Ley de Vías Generales de Comunicación (LVGC) regula el peso y dimensiones de los vehículos de carga en México. Por otro lado, en 1992 el IMT publicó el primer estudio de pesos y dimensiones de los vehículos de carga. Con el fin de conocerlos para analizar el porcentaje de vehículos sobrecargados instalaron estaciones a nivel nacional [3]. De los datos expuestos se concluye que por el aumento de la sobrecarga de los vehículos incrementan los esfuerzos que se distribuyen en los pavimentos, lo que ocasiona uno de los tantos temas de deformaciones y deterioros de pavimentos (véase Figura 2).

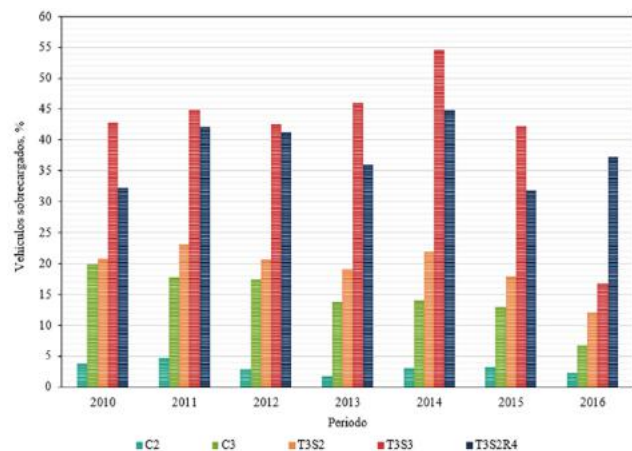


Figura 2. Porcentaje de vehículos sobrecargados a nivel nacional.

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos [3].

Las causas principales del deterioro de los firmes de un pavimento son las sobrecargas repetitivas del tránsito de acuerdo con Baamonde, Pérez y Herrador [4]. Los pavimentos están constituidos por un conjunto de capas superpuestas relativamente horizontales de distintos materiales. De manera general existen dos principales tipos: los pavimentos rígidos y los flexibles [5]. Por un lado, los pa-

vimientos rígidos están constituidos por una losa de concreto hidráulico, que distribuyen las cargas de los vehículos hacia las capas inferiores por medio de toda la superficie de la losa y las contiguas [6]. Por otro lado, Montejo [7] en su libro define a los pavimentos flexibles como una carpeta asfáltica de agregados pétreos y ligante asfáltico que se apoya generalmente sobre dos capas no rígidas, la base y la subbase.

El pavimento flexible como bien ya se mencionó está formado de agregados pétreos y ligante asfáltico. El ligante asfáltico fue conocido cerca del año 2500 a.C. en Egipto y México fue uno de los primeros países en trabajarlas hacia los años 70 [8]. Se han realizado investigaciones sobre los métodos de remoción en pavimentos flexibles, entre los que destacan el fresado y la escarificación [9]. Dentro de la historia del pavimento, es importante mencionar que reciclar el pavimento no es algo novedoso, debido a que existen indicios de reciclaje de pavimento asfáltico cerca de 1900 [10] y mundialmente la reducción de los recursos de un pavimento flexible se hace mediante el RAP. En Hong-Kong se importa asfalto del extranjero, y cada año se fresan cerca de 200,000 toneladas de RAP [11], los cuales se aprovechan en la construcción y/o rehabilitación de los mismos. Hacia la década de los 70, se menciona que por el aumento del costo del petróleo se dio la necesidad de reciclar los pavimentos asfálticos, sin embargo, para esa década no existía experiencia del uso del RAP y, debido a esto, prácticamente los pavimentos procesados con RAP eran desconocidos [12]. El RAP tiene ciertas ventajas y se estima una baja del 25% en costos, y 7000 toneladas por kilómetro recuperando de los pavimentos flexibles con métodos de reciclado [13].

Se ha indicado que el concreto rígido a base de cemento Portland (CPP) es el material más utilizado para construcciones en el mundo [14]. Uno de los primeros estudios sobre el uso del RAP en los pavimentos rígi-

dos se enfocó en la factibilidad de usar RAP como agregado en un concreto rígido [15]. Algunos estudios hechos en el concreto hidráulico con agregados de RAP han coincidido que la película de asfalto, que cubre a los agregados de RAP, reduce la resistencia del concreto hidráulico [15], [16], [17], [18].

A pesar de estos indicadores, Hossiney [18] revisó dos proporciones de cemento, arena y agregado RAP con relaciones de agua/cemento de 0.50, 0.60 y 0.70. Estas mezclas fueron analizadas a compresión y flexión, lo que dio como resultado que a medida que aumentan el contenido de agua/cemento la resistencia a la compresión disminuía en un 4.2 MPa y 1.5 MPa para la relación agua/cemento de 0.50 y 0.70. Con lo anterior se concluyó que la resistencia a la compresión que encontraron con agregado RAP fue de 25 MPa, por lo que evidencian que el RAP es factible para usar en el concreto y puede convertirse en un elemento viable para generar agregados de media y baja resistencia.

Por el contrario, Bida, Danraka y Ma'ali [19] trabajaron con muestras de RAP como remplazo parcial, con agregados finos de 0 a 100% a intervalos de 20% y con lo que tuvieron resultados a la compresión a los 28 días de 28.4, 26.3, 26.0, 22.5, 21.3 y 18.4 MPa, respectivamente. Hossiney, Tia y Bergin [18] evaluaron el concreto a 0, 10, 20 y 40% de RAP, indicando que a los 28 días se obtuvo una resistencia de 34.54, 30.91, 21.98 y 16.85, respectivamente. Por medio de estas dos investigaciones se concluye que, aunque disminuyan las resistencias, se podría generar una mejora en el desempeño del concreto que contenga RAP.

A pesar de la diversidad de estudios realizados y de considerar que la película de asfalto es la que reduce la resistencia del concreto hidráulico. Sing, Ransinchung y Kumar [20] presentaron una técnica de mejora para el comportamiento del agregado RAP con concreto hidráulico mediante abrasión y desgaste. Sus mezclas consistieron de RAP grueso



recuperada después de la abrasión y dieron incrementos de la resistencia a la compresión del concreto en un 9.74%, a la tensión en un 20.66% y a la flexión en un 6.05% en comparación con el empleo de concreto inclusivo lavado (WRAP) y sucio (DRAP). En consecuencia, la presente investigación reutilizó el agregado RAP como arena (< No. 8) en concreto hidráulico, al implementar la técnica de abrasión y desgaste [21] en distintas condiciones. Con el fin de disminuir la explotación de recursos naturales y de aportar a la sostenibilidad, se realizó una revisión de la bibliografía y se evaluó el desempeño de las mezclas en resistencia a la compresión y tensión diametral.

METODOLOGÍA

Sing, Ransinchung y Kumar [20] evaluaron la técnica “abrasión y desgaste” para eliminar las capas contaminantes (película de asfalto, película de polvo rígido y película de polvo suelto), ya que facilita el desprendimiento fuerte de la película del asfalto lo que aseguraría una adecuada unión entre las partículas de agregado y cemento.

Mediante la consulta presentada por Sing, Ransinchung y Kumar [21] y la norma ASTM C131 [22], se modificaron algunos criterios de proceso para la recuperación de arena RAP después de haber evaluado diferentes condiciones en la Máquina de Desgaste de Los Ángeles y de modificar con ello los tiempos, contenido de RAP y carga abrasiva a incorporar en la Máquina. Dichas condiciones se presentan más adelante. Una vez establecidos estos criterios y la separación de la arena RAP, se procedió a determinar las características de los materiales para elaborar las mezclas y así evaluar su desempeño a resistencia a la compresión y tensión diametral de morteros. En la Tabla 1 se pueden

observar los materiales empleados, su identificación y la característica del material.

Tabla 1. Arena empleada para elaborar las mezclas

Nombre Arena	Identificación	Característica
Arena de Control	MC	Arena obtenida del banco de materiales Saldarriaga, Santiago de Querétaro, Qro.
RAP Condición Original	CO	RAP obtenido de la Infraestructura del Estado de Querétaro, Qro.
RAP Recuperado Sin Lavar	SL	RAP Recuperado obtenido de la incorporación de CO en la Máquina de Desgaste de Los Ángeles Sin Lavar
RAP Recuperado Lavado	LAV	RAP Recuperado obtenido de la incorporación de CO en la Máquina de Desgaste de Los Ángeles Lavado

Proceso de selección del material

Reducción

El proceso de selección del material para los agregados de arena LAV, SL, MC y CO se hizo mediante el cuarteo de los materiales, donde se divide la muestra en cuatro partes (Figura 3a), posteriormente, con una brocha se apartan los cuarteos (Figura 3b) y se toman dos cuarteos de forma diagonal (Figura 3c), de acuerdo con la norma ASTM C702 [23] que permite reducir las muestras grandes de agregado al tamaño adecuado para el ensayo a ser evaluado.

(a)



(b)



(c)



Figura 3. Cuarteo de material RAP en Condición Original. Fuente: Elaboración propia

Cribado

Después de reducir el material adecuado LAV, SL, MC y CO se procedió a tamizarlos, conforme a la norma ASTM C136 [24]. Por

un lado, los materiales MC y CO se cribaron por el tamiz No. 8 (véase Figura 4a). Por otro lado, el material RAP a ser procesado se fraccionó en 2 partes (véase Figura 4b): RAP grueso ($> 4,75$ mm) y RAP fino ($< 4,75$ mm).

(a)



(b)



Figura 4. Cribado de material.
Fuente: Elaboración propia

Recuperación de arena RAP

Los pasos del proceso de recuperación de arena RAP se llevó a cabo al implementar la máquina de Desgaste de Los Ángeles, la cual fue elegida para obtener arena LAV y SL (véase Figura 5), conforme a la norma ASTM C131 [22]. Se modificaron algunos criterios del proceso con el fin de obtener la mayor cantidad de arena separada



del ligante asfáltico del agregado grueso. En la Tabla 2 se desglosa el procedimiento con base en la norma y los criterios modificados.

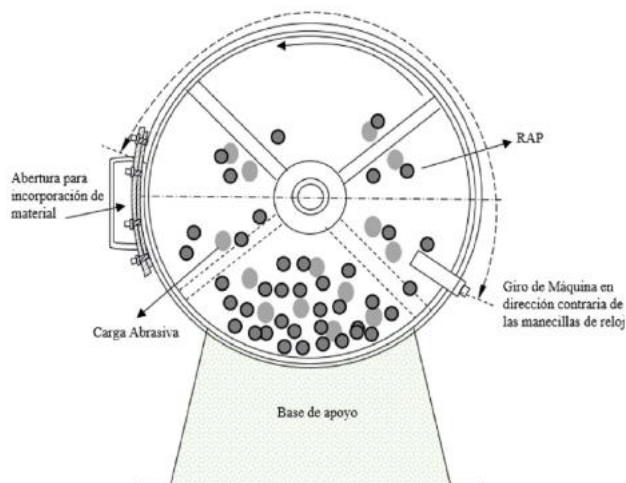


Figura 5. Vista de Máquina de Desgaste de Los Ángeles con incorporación de RAP y carga abrasiva.
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2. Proceso de recuperación conforme a la norma y modificación.
Fuente: Elaboración propia

Procedimiento	Norma	Criterio Modificado
a) Preparación Máquina (Figura 6a)	Limpiar y verificar que no se encuentre ningún otro material dentro de esta.	NO
b) Incorporación de material (Figura 6b)	Vaciar 5 kg de acuerdo con el tamaño nominal del agregado	Sí Se introdujeron de 10 a 12 kg de agregado RAP en Condición Original sin importar su tamaño nominal.
c) Incorporación de carga abrasiva (Figura 6c)	De acuerdo con el tamaño nominal del agregado se introduce la cantidad de carga abrasiva con un diámetro de 46 a 48 mm de diámetro y cada una con una masa de 390 a 445 gr.	Sí Se incorporaron 14 esferas de carga abrasiva, con un diámetro y peso conforme a la norma.

Procedimiento	Norma	Criterio Modificado
d) Proceso de desgaste (Figura 6d)	Hacer girar la máquina a una velocidad de 30 a 33 rpm durante 15 minutos.	Sí Se giró la máquina durante 20 minutos con la misma velocidad especificada en la norma. Al contar con más material se dejó mayor tiempo en la máquina.
e) Recuperación (Figura 6e)	Retira la carga abrasiva y el material de la máquina.	NO
f) Lavado (Figura 6f)	Lavar el material por el tamiz No. 12	Sí Se lavó el material LAV por el tamiz ¾" y No. 200 para quitar la película de polvo.
g) Cribado (Figura 6g)	Cribar por el tamiz No. 12 y descartar todo lo que pasa por este tamiz.	Se cribó el material LAV por el tamiz No. 8, descartando lo que pasa por el tamiz No. 200. Para el material SL se cribó por el tamiz No. 8 dejando el polvo que pasa el tamiz No. 200.
h) Secado (Figura 6h)	Secar el material en el horno a una temperatura de 100 °C durante 24 ± 4 horas.	NO



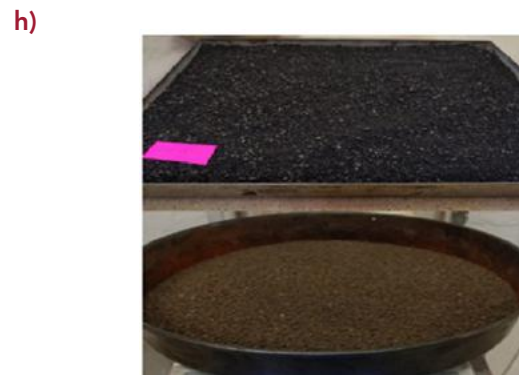


Figura 6. Proceso de recuperación de arena LAV y SL. Fuente: Elaboración propia.

Característica de los materiales

Se evaluaron las propiedades de los materiales, tales como se muestran en la Tabla 3 con sus respectivas normas empleadas.

Tabla 3. Características de los materiales.
Fuente: Elaboración propia.

Materiales	Norma	Característica
MC, CO, SL, LAV	ASTM C128 [25]	Gravedad específica
		Absorción [%]

Elaboración de especímenes

Se trabajó para todas las mezclas una relación cemento:arena de 1:6 y relación agua:cemento de 0.90 para el volumen calculado. Mediante la norma NMX-C-159-ONNCE [26] se desarrollaron los especímenes para evaluar su desempeño a compresión y tensión diagonal. Una vez con los datos de las mezclas, se procedió a elaborar 96 especímenes en cilindros de 5*10 cm (Figura 7a), compactados en dos capas dando 20 golpes a cada una para sacar el aire atrapado (Figura 7b). Finalmente se curaron los especímenes en agua a 25 ± 3 °C para ser evaluados a sus distintas edades (Figura 7c).



a)



b)



c)



Figura 7. Elaboración de especímenes.

Fuente: Elaboración propia

Resistencia a la compresión

De acuerdo con la norma NMX-C-061-ONNCE [27] se evaluaron 48 especímenes de concreto para su ensaye de resistencia a la compresión (Figura 8) a edades de 3, 7, 14 y 28 días. El cálculo para su resistencia se evaluó conforme la Ecuación 1 de la norma, de la siguiente manera.

$$f'c = (P \text{ máx}) / S \quad (1)$$

Donde:

$f'c$ = Resistencia a la compresión, kg/cm²

P = Carga máxima aplicada, kg

S = área de la sección transversal del espécimen, cm²



Figura 8. Evaluación de resistencia a la compresión.

Fuente: Elaboración propia.

Resistencia a la tensión diagonal

La evaluación de la resistencia a la tensión diametral se hizo conforme a la norma M-MMP-2-02-059 [28], es decir, se evaluaron 48 especímenes de concreto para su ensaye de resistencia a la tensión a edades de 3, 7, 14 y 28 días (véase Figura 9). Esta norma permite determinar la resistencia del concreto hidráulico mediante la compresión diametral en especímenes cilíndricos moldeados, con una relación altura/diámetro 2 a 1. El cálculo para su resistencia se evaluó con base en la Ecuación 2 de la norma, de la siguiente manera.

$$f'c = \frac{P \text{ máx}}{s} \quad (2)$$

Donde:

T = Resistencia a la tensión por compresión diametral, kg/cm²

P = Carga máxima aplicada, kg

l = Longitud promedio del espécimen, cm
 d = Diámetro promedio del espécimen, cm



Figura 9. Evaluación de resistencia a la tensión.
Fuente: Elaboración propia

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Característica de los agregados

Las propiedades de los agregados se muestran en la Tabla 7.

Gravedad específica y absorción de los agregados

Como se observa en la Tabla 4, por un lado, la gravedad específica bruta de LAV (2.90) tuvo una mejor condición que el CO (2.02) y SL (2.20), lo que se atribuye al proceso de recuperación por medio del desgaste que desprendió el polvo y la película de asfalto de los agregados de RAP en Condición Original. Por otro lado, la absorción que obtuvo el CO de 2.40 % se adjudica a la presencia del polvo adherido en las partículas.

Tabla 4. Propiedades de los agregados.
Fuente: Elaboración propia.

Caract.	MC	CO	SL	LAV
Gravedad específica	2.80	2.02	2.20	2.90

Caract.	MC	CO	SL	LAV
Absorción promedio [%]	1.50	2.40	1.90	1.70

Distribución granulométrica

Los porcentajes acumulados de la distribución granulométrica (véase Figura 10) del agregado CO muestran una distribución muy variable por el fresado que se dispone de los pavimentos, así mismo, los agregados SL y LAV presentan una mejor distribución. Los agregados cumplen con los criterios para los tamaños de 16 mm o menor de acuerdo con la norma IS:383 [29].

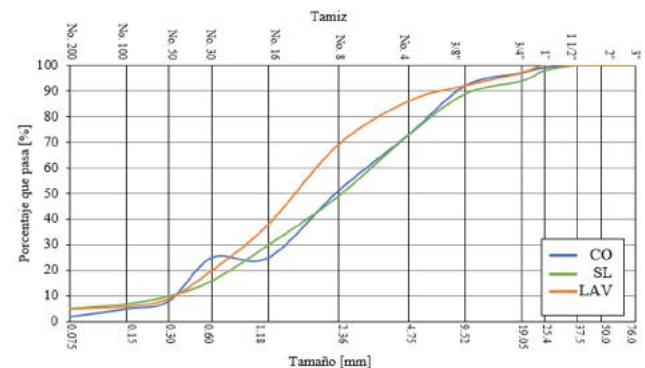


Figura 10. Distribución granulométrica de agregados. Fuente: Elaboración propia.

Desempeño de la mezcla

Resistencia a la compresión

En cuanto a la evaluación del desempeño de los especímenes a los 28 días, en la Tabla 5 se puede observar que disminuyó la resistencia de la mezcla CO y SL, un 33.95% y 13.39% respecto a la mezcla, y que se incrementó en un 4.30% la resistencia a compresión de la mezcla LAV. Este resultado probablemente se puede atribuir al lavado, secado y a la mejora de unión entre las partículas.



Finalmente se observó que a los 28 días la mezcla LAV obtuvo una resistencia de 74.88 kg/cm², lo que indica que podría utilizarse como un Mortero Tipo II de acuerdo con la norma NMX-C-486-ONNCE [30].

Tabla 5. Resultados de resistencia a la compresión a los 28 días.
Fuente: Elaboración propia.

Mezcla	Resistencia a la compresión kg/cm ²
MC	71.79
CO	47.42
SL	62.18
LAV	74.88

Resistencia a la tensión diametral

En la Tabla 6 se presentan los resultados de resistencia a la tensión evaluada a los 3, 7 y 14 días de las diferentes mezclas. Se observó que se redujo su resistencia en 51.61%, 26.69% y 20.83% para CO, SL y LAV, respectivamente, en referencia a la mezcla MC. Con estos resultados se puede determinar que el beneficiar el RAP con la Recuperación del Agregado Arena Lavado (LAV) podría ser una manera de incrementar el desempeño del concreto con agregados de RAP.

Tabla 6. Resultados de resistencia a la tensión a los 28 días

Mezcla	Resistencia a la tensión kg/cm ²
MC	17.89
CO	9.98
SL	13.35
LAV	13.73

CONCLUSIONES

Se realizaron 3 mezclas diferentes de mortero con el objetivo de evaluar el desempeño de

cada una de ellas en resistencia a la compresión y tensión diametral, comparadas con una mezcla patrón MC. Por un lado, la gravedad específica de CO (2.02) y SL (2.20) fue menor respecto al agregado MC (2.80), mientras que para el LAV se mantuvo con un valor muy similar, con 2.90. Por otro lado, la absorción de los agregados CO (2.70) y SL (1.94) incrementó respecto al MC (1.50), mientras que el agregado LAV obtuvo un valor de 1.67, por lo que se concluye que tiene propiedades similares el agregado LAV respecto al agregado MC. Al eliminar los contaminantes y el polvo provocado por el fresado y desgaste se reduce la gravedad específica.

La incorporación del agregado CO y SL en el concreto redujo las resistencias a compresión, al dar como resultado a los 28 días una resistencia de 47.42 kg/cm² y 62.18 kg/cm², respectivamente, en comparación con la resistencia de MC que fue de 71.79 kg/cm². Asimismo, el agregado LAV obtuvo una resistencia a la compresión de 74.88 kg/cm² al incrementar en un 4.30%, en comparación con la resistencia de la mezcla MC. De lo anterior se puede concluir que el uso de los materiales CO y SL, debido a la resistencia obtenida a compresión y por la norma NMX-C-486-ONNCE-2014, se puede clasificar como un mortero Tipo III con una resistencia promedio superior a los 60 kg/cm² y como Tipo II para las mezclas MC y LAV, con una resistencia promedio superior a 110 kg/cm².

En lo que respecta al desempeño de la mezcla en resistencia a la tensión, las mezclas CO, SL y LAV obtuvieron resistencias de 10.18 kg/cm², 15.43 kg/cm² y 16.63 kg/cm², al reducirse en un 51.61%, 26.69% y 20.83%, respectivamente, en referencia a la mezcla MC con una resistencia de 21.05 kg/cm².

En lo que respecta al desempeño de la mezcla en resistencia a la tensión diametral de la mezcla LAV, en comparación con la mezcla CO, presentó un aumento de un 38.90%. La resistencia a la tensión incrementó en un 36.67%, en comparación con las mezclas CO, de lo cual se puede concluir nuevamente

que los contaminantes en la mezcla fresada de RAP en Condición Original, la película de asfalto y los polvos ocasionan una reducción considerable en el concreto.

El uso de agregados RAP en el concreto hidráulico dio resultados favorables en lo que respecta al agregado LAV, puesto que se adquirió un comportamiento similar al agregado MC en propiedades de gravedad específica y absorción al beneficiar el desempeño de la mezcla en resistencia a la compresión y tensión. Los estudios actuales podrían ser aplicados para reducir la explotación de recursos naturales y ser utilizados como arena incorporada al concreto hidráulico.

El reutilizar, reducir y reciclar materiales puestos en obra contribuye a reducir la contaminación. En el proceso de reciclado, por lo general, se utilizan menos recursos para fabricar los materiales que cuando se parte de materiales de recursos naturales. De la misma manera, disminuirían los escombros de pavimentos por rehabilitaciones o reconstrucción de carreteras. Por la alta demanda, suelen llenarse rápidamente los lugares apropiados para estos materiales, simplemente se desechan en lugares no apropiados.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco al Consejo Nacional de Ciencias y Tecnología por su apoyo durante toda esta investigación.

REFERENCIAS

[1] Instituto Nacional de Estadísticas y Geografía. "Vehículos de motor registrados en circulación" [Online]. Available: <http://www.beta.inegi.org.mx/temas/vehiculos/> Consultado el 25 de septiembre 2018.

[2] D. Campos, *Diseño y Evaluación del Desempeño Mecánico de una Base Hidráulica Reciclada Mediante la Tecnología de*

Asfalto Espumado: Santiago de Querétaro, C.U. Querétaro: Universidad Autónoma de Querétaro, 2017.

[3] J. Gutiérrez, V. Soria y M. Dorado. "Estudio estadístico de campo del autotransporte nacional", Documento Técnico No.71 IMT, pp. XVIII – 134, 2017.

[4] A. Baamonde, I. Pérez y M. Herrador. "Geosintéticos en carreteras: Planteamientos para su Aplicación en las capas de firme", Universidad de Coruña, pp. 1 – 9, 2011.

[5] H. Rondón and F. Reyes, *Pavimentos: materiales, construcción y diseño*, ed., ECOE, Ed. Colombia, 2015.

[6] A. Montejó, "Ingeniería de Pavimentos para Carretera," Universidad Católica de Colombia, Bogotá, 2002.

[7] A. Montejó, "Ingeniería de Pavimentos: Fundamentos, estudios básicos y diseño," Universidad Católica de Colombia, Bogotá, 2010.

[8] R. Rodríguez, V. Castaño and M. Martínez, "Emulsiones Asfálticas," Instituto Mexicano del Transporte, Sanfandila, 2001.

[9] M. Fabela, J. Jaworski and A. Lozano, "Proceso de Remoción de Carpetas Asfálticas," Instituto Mexicano del Transporte, Sanfandila, 1999.

[10] R. Izaks, V. Haritonovs and M. Zaumanis, "Bituminous Mixtures and Pavements VI. First trial to design up to 50% recycled hot mix asphalt in Latvia," London, United Kingdom: A.F. Nikolaidis, 2015.

[11] H. Gui-Ping and W. Wing-Gun, "Effects of moisture on strength and permanent deformation of foamed asphalt mix incorporating RAP materials," *Construction and Building Materials*, vol. 22. 2006.

[12] D. Newcomb, E. Brown, and J. Epps, *Designing HMA Mixtures with High RAP Content. A Practical Guide*, National Asphalt Pavement Association, 2007.

[13] S. Marini, "Reciclado de Pavimentos Asfálticos en Frío," Centro de Investigaciones Viales, Universidad Tecnológica Nacional, 2006.



[14] G. Martínez, M. Martínez and E. Martínez, "Concreto Polimérico Reforzado con Fibras de Luffa," *Información Tecnológica*, vol. 24. 2013.

[15] M. Delwar, M. Fahmy and R. Taha, "Use of Reclaimed Asphalt Pavement as an Aggregate in Portland Cement Concrete," *ACI Mater. J.*, pp. 251–256, 1997

[16] S. Al-Oraimi, H.F. Hassan and A. Hago. "Recycling of reclaimed asphalt pavement in Portland cement concrete". *J. Eng. Res.* 6, 37–45, 2009

[17] F.O. Okafor "Performance of Recycled Asphalt Pavement as Coarse Aggregate in Concrete," *Leonardo Electronic J. Prac. Techno.*, 17, 47–58, 2010.

[18] N. Hossiney, M. Tia, "Concrete Containing RAP for Use in Concrete Pavement," *Int. J. Pavement Res. Technol.* 3, 251–258, 2010.

[19] S.M. Bida, M. Danraka and J.M. Ma'ali, "Performance of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) as a Replacement of Fine Aggregate in Concrete," *International Journal of Science and Research*, 2013.

[20] K. Kim, M. Tia and J. Greence, "Analysis of Jointed Plain Concrete Pavement Containing RAP," *International Journal of Latest Engineering Research and Applications (IJERIA)*, vol 1, pp 38 – 47, 2016.

[21] S. Singh, G.D. Ransinchung and P. Kumar, "An economical processing technique to improve RAP inclusive concrete properties," *Construction and Building Material*, vol. 148, 2017.

[22] American Society of Testing Material (ASTM) C131. "Standard Test Method for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine" ASTM International, 2014.

[23] American Society of Testing Material (ASTM) C702. "Standard Practice for Reducing Samples of Aggregate to Testing Size" ASTM International, 2018.

[24] American Society of Testing Material (ASTM) C136. "Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates" ASTM International, 2014.

[25] American Society of Testing Material (ASTM) C128. "Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate" ASTM International, 2015.

[26] Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación. NMX-C-159-ONNCE. "Elaboración y Curado de Especímenes de Ensayo". [Online]. Available: [https://www.onnccce.org.mx/index.php/es/venta-normas/fichas-tecnicas/](https://www.onnccce.org.mx/index.php/es/venta-normas/fichas-tecnicas/Recuperado el 08 de julio de 2019) Recuperado el 08 de julio de 2019.

[27] Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación. NMX-C-061-ONNCE. "Determinación de la Resistencia a la Compresión de Cementantes Hidráulicos". [Online]. Available: <https://www.onnccce.org.mx/index.php/es/venta-normas/fichas-tecnicas/> Recuperado el 08 de julio de 2019.

[28] Normativa para la Infraestructura del Transporte M-MMP-2-02-059. "Resistencia a la Tensión en Cilindros de Concreto", SCT-IMT, México, 2004.

[29] IS 383, Specification for Coarse and Fine Aggregates from Natural Sources for Concrete, Bureau of Indian Standard, New Delhi, 1970.

[30] Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación. NMX-C-159-ONNCE. "Mampostería – Mortero para uso Estructural – Especificaciones y Métodos de Ensayo". [Online]. Available: <https://www.onnccce.org.mx/index.php/es/venta-normas/fichas-tecnicas/> Recuperado el 08 de julio de 2019.