



Uso de agregado de pavimento asfáltico reciclado para un pavimento rígido

Use of recycled asphalt pavement aggregate for a rigid pavement

Guzmán-Ortiz Dulce Valeria

Universidad Autónoma de Querétaro

Posgrado de la Facultad de Ingeniería

Correo: dv.ortiz4@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0003-3618-1440>

Hernández-Zaragoza Juan Bosco

Universidad Autónoma de Querétaro

Posgrado de la Facultad de Ingeniería

Correo: bosco@uaq.mx

<https://orcid.org/0000-0002-5953-6446>

López-Lara Teresa

Universidad Autónoma de Querétaro

Posgrado de la Facultad de Ingeniería

Correo: lolte@uaq.mx

<https://orcid.org/0000-0001-7289-7919>

Horta-Rangel Jaime Moisés

Universidad Autónoma de Querétaro

Posgrado de la Facultad de Ingeniería

Correo: horta@uaq.mx

<https://orcid.org/0000-0003-4314-3848>

Giraldo-Posada Diego Alberto

Instituto Nacional de Vías

Estudios e Innovación, Colombia

Correo: diegiraldo@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-9331-3297>

Resumen

En México, el tránsito pesado con exceso de carga es el principal responsable del deterioro de los pavimentos, ha influenciado el consumo y explotación de los recursos naturales, y por ende, la rehabilitación de las carreteras y el uso del Reciclado de Pavimento Asfáltico (conocido por sus siglas en inglés RAP, *Reclaimed Asphalt Pavement*), el cual se ha presentado como una técnica para reducir lo antes mencionado y consiste en fresar el material de un pavimento flexible durante la rehabilitación de este. El objetivo del presente trabajo es reutilizar dicho RAP implementando el uso máquina de Desgaste de Los Angeles para recuperar el agregado fino, empleándolo en un pavimento rígido. Mediante los ensayos de resistencia a la compresión y tensión diametral se evaluaron diferentes mezclas: RAP en Condición Recuperado Lavado, LAV, y RAP en Condición Recuperado Sin Lavar, SL. Así mismo se evaluó una Mezcla de Control, MC, y el RAP en Condición Original, CO. Los agregados de las diferentes mezclas fueron cribados por el tamiz Núm. 8 para posteriormente hacer cilindros de concretos de 10 x 20 cm. Mediante los ensayos de resistencia a la compresión y tensión indirecta se evaluó el desempeño de los materiales en conjunto, no solamente dando el uso de estos agregados RAP, sino mostrando el trabajo de manera similar a los agregados vírgenes de arena. Los resultados indican un incremento de 3.97 % a compresión y un 7.3 % a la tensión indirecta con el material LAV.

Descriptores: Reciclado de pavimento asfáltico, resistencia, compresión, tensión indirecta, concreto hidráulico.

Abstract

In Mexico, heavy traffic with excess loads is the main cause of pavement deterioration, which has influenced the consumption and exploitation of natural resources, and therefore road rehabilitation. The use of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) has been presented as a technique to reduce the aforementioned, which consists of milling the material of a flexible pavement during its rehabilitation. The objective of this work is to reuse this RAP by implementing the use of the Los Angeles Wearing Machine to recover fine aggregate using it in a rigid pavement. The pavement is designed to be used for the rehabilitation of a flexible pavement, using the Los Angeles Wearing Machine to recover the fine aggregate for use in a rigid pavement. The aggregates of the different mixtures were sieved by the No. 8 sieve to make 10 x 20 cm concrete cylinders. The performance of the materials as a whole was evaluated by means of compression and indirect tensile tests, not only using these RAP aggregates, but also working in a similar way as the virgin sand aggregates. The results indicate an increase of 3.97 % in compression and 7.3 % in indirect tensile with the LAV material.

Keywords: Recycling asphalt pavement, resistance, compression, indirect tensile, hydraulic concrete.

INTRODUCCIÓN

De acuerdo con los datos del Instituto Nacional de Estadística y Geografía en México, en diciembre de 2019, la tasa de registro fue de 25.5 % de camiones de carga, 70.2 % de automóvil y tan solo 4.2 % de camión de pasajeros, así mismo, la Red Nacional de Caminos en diciembre de 2015 contaba con 98.5 % de red pavimentada asfaltada, mientras que solo 1.5 % correspondía al 1.5 % de concreto hidráulico. Si bien, las vías terrestres tienen a los pavimentos asfálticos como la principal opción para la red carretera, Martínez *et al.* (2013) mencionan que el concreto hidráulico a base de cemento Portland es el material más empleado para construcciones en el mundo.

De acuerdo con Gutiérrez *et al.* (2017) los pavimentos están constituidos por un conjunto de capas superpuestas relativamente horizontales compuestas por distintos materiales; de manera general existen dos principales tipos: los pavimentos rígidos y los flexibles. Los pavimentos rígidos de acuerdo con Baamonde *et al.* (2017) se definen como la constitución de una losa de concreto hidráulico, que distribuye las cargas sobre un área mayor de la subrasante por medio de toda la superficie de la losa. Mientras que Huang *et al.* (2004) definieron a los pavimentos flexibles como una carpeta asfáltica constituida de agregados pétreos y ligante asfáltico, que se apoya generalmente sobre dos capas no rígidas, transmitiendo las cargas de manera más concentrada y distribuyendo el total de la carga en menos áreas de apoyo. Gutiérrez *et al.* (2017) analizaron los vehículos que transitan por nuestras carreteras en 360 estaciones distribuidas en toda la red carretera nacional. En la Figura 1 se puede apreciar el porcentaje de vehículos sobrecargados en diferentes periodos y el exceso de carga máximo registrado respecto a lo permitido en la norma sobre el peso y dimensiones máximas con el que pueden circular los vehículos (NOM-012-SCT).

De los resultados expresados se puede concluir que, entre otros casos, los vehículos más usados para el movi-

miento de mercancías han sido camiones unitarios T3S3, y los doblemente articulados T3S2R4, particularmente estos últimos han aumentado con el paso de los años. Teniendo en cuenta los datos que se presentan en este estudio, se puede observar un sobre esfuerzo de gran magnitud en los pavimentos de nuestras carreteras, siendo una de las principales causas de su deterioro.

Baamonde *et al.* (2011) establecen que una de las causas principales del deterioro de los firmes de una carretera son las sobrecargas repetitivas del tránsito. Actualmente se han buscado y propuesto tecnologías alternas que toman en cuenta materiales para mejorar las características específicas como la resistencia a la flexión (módulo de rotura) en pavimentos, mostrando el parámetro con el que se diseña y evalúa el concreto, ya que posee una baja resistencia a la flexión respecto a la compresión en un orden de entre 10 % a 20 %, de acuerdo con Rivera (2000).

Reciclar el pavimento asfáltico no es algo novedoso, mundialmente la reducción de los recursos de un pavimento flexible se hace mediante el RAP. Fabela *et al.* (1999) definieron al RAP como el material recién fresado de un pavimento flexible durante la rehabilitación y construcción de este. Por ejemplo, en Hong-Kong se importa asfalto del extranjero y cada año se fresan cerca de 200,000 toneladas de mezcla asfáltica de las carreteras, que pueden aprovecharse en la construcción o rehabilitación de las mismas (Isaks *et al.*, 2015). Existe la necesidad de reutilizar el RAP debido a que se generan altos contenidos de recursos por reconstrucción o rehabilitación de carreteras, donde una de las posibles maneras de ampliar el uso del RAP sería incorporar el agregado en el cemento portland (Okafor, 2010).

Los estudios hechos por Delwar *et al.* (1997), Al-Oraimi *et al.* (2009), Okafor *et al.* (2010) y Hossiney y Tia (2010), han coincidido que la adición del ligante asfáltico al RAP reduce la resistencia del concreto, a pesar de esto, Hossiney y Tia (2010) analizaron distintas proporciones en el concreto hidráulico con agregado RAP eva-

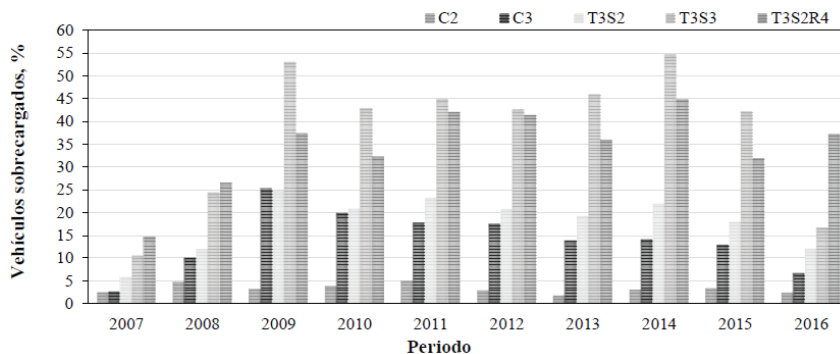


Figura 1. Registro de sobrecarga de los vehículos pesados

Fuente: Elaboración propia a partir de Gutiérrez *et al.* (2017)

luando su resistencia a la compresión y flexión, dando como resultado, que a medida en mayor aportación del contenido agua/cemento la compresión disminuía, encontrando que la resistencia a la compresión era de 25 MPa y evidenciando que el RAP es factible para emplearse en el concreto, convirtiéndose viable para resistencias medias y bajas. Esto coincide con Hossiney y Tia (2010) quienes investigaron la aportación de resistencias a la tensión, compresión, flexión y módulo elástico con diferentes contenidos de RAP a 0, 20, 40, 70 y 100%, teniendo como resultado que al aumentar el porcentaje de RAP disminuían sus resistencias. Así mismo, resaltan que las tensiones máximas en el concreto de cemento Pórtland disminuyeron a medida que se aumentaba el contenido de RAP, indicando que el uso del RAP podría ser una alternativa y uso para mejorar las propiedades en el pavimento de concreto.

En contraste con estos autores, quienes coinciden que el ligante asfáltico reduce la resistencia del concreto, se encuentra Okafor *et al.* (2010) quienes analizaron dos proporciones de 1:2:4 y 1:3:6 de cemento, arena y agregado RAP con relaciones de agua/cemento de 0.50, 0.60 y 0.70, estas mezclas las examinaron a compresión y flexión, teniendo como resultado que a medida que aumentan el contenido de agua/cemento la resistencia a la compresión disminuye en un 4.2 MPa y 1.5 MPa para la relación agua/cemento de 0.50 y 0.70, concluyendo

que la disminución de la resistencia, comparada con el concreto hidráulico patrón, se debe a la debilidad de unión entre el concreto hidráulico y el ligante asfáltico adherido al agregado.

Debido a que el ligante asfáltico reduce la resistencia del concreto antes mencionado, Sing *et al.* (2017) presentaron la evaluación del agregado RAP en el concreto hidráulico, implementando una técnica para mejorar la calidad del agregado RAP mediante abrasión y desgaste, sus mezclas consistieron de RAP sucio (DRAP), RAP Lavado (WRAP) y Concreto de Agregado Natural (NAC). El RAP tratado (AB&AT) tuvo un mejor comportamiento, ya que mostró incremento en resistencia a la compresión en 9.74 % y 12.71 %, a la tensión en 2.66 % y 12.21 % y flexión en 6.05 % y 8.55 % en comparación con el concreto inclusivo DRAP y WRAP, respectivamente. Los resultados evaluados a los 28 días se muestran en la Tabla 1.

Empleando fibras de vidrio para mejorar la utilización de RAP, Hoyos *et al.* (2011) presenta la caracterización de un concreto tratado con fibra de vidrio y RAP, donde los resultados a compresión, Figura 2, incrementan a medida que el porcentaje de dosificación aumenta. Así mismo, se puede hacer una comparación entre el RAP y el RAP con fibra, los cuales en relación con sus resultados son similares. Por otro lado, al evaluar el módulo de elasticidad se dio cuenta que la inclu-

Tabla 1. Resultados de resistencias

Muestra	Compresión	Flexión	Tensión
	Mpa		
NAC	42.50	6.40	5.60
DRAP	33.00	4.60	3.45
WRAP	34.00	4.70	3.75
AB&AD	40.00	5.10	3.90

Fuente: Elaboración propia a partir de Sing *et al.* (2017)

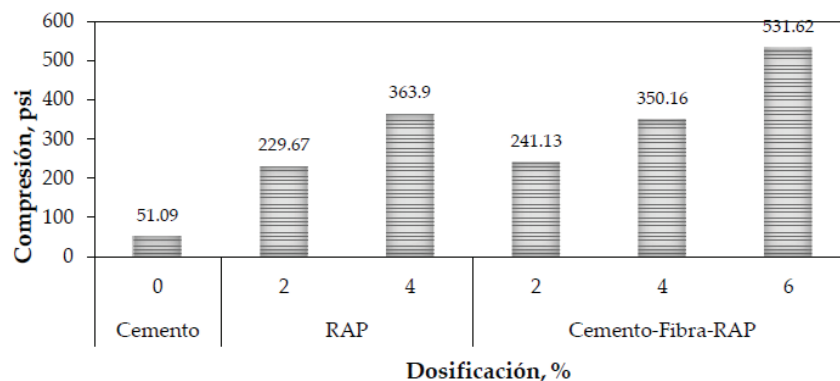


Figura 2. Resultados de fibras en concreto hidráulico

Fuente: Elaboración propia a partir de Hoyos *et al.* (2011)

sión de las fibras tuvo un efecto positivo en el cemento-RAP aumentando su módulo elástico. Concluyendo que en general es factible para utilizarlos en base y subbase.

Monti *et al.* (2016) reportan que la resistencia a la compresión y a la tensión con la adición de fibras al concreto hidráulico que contienen RAP, restauraría o incluso mejoraría la resistencia a la tensión del concreto. Así mismo, Hoyos *et al.* (2011) afirman que el uso de fibras de cemento adicionados al RAP es potencialmente ecológico y estructuralmente sólido para aplicaciones de base y subbase en pavimentos. Las investigaciones de Sing *et al.* (2017) permiten utilizar el Método de Abrasión y Desgaste para el procedimiento de separación del RAP y ligante asfáltico para aumentar la resistencia a la compresión, tensión y flexión, debido a que la adherencia del ligante asfáltico al agregado es la consecuencia de la disminución de resistencias en el concreto. Por lo anterior, en coincidencia a la problemática reportada por Monti *et al.* (2016) y las líneas de investigación expuestas en Hoyos *et al.* (2011), además de la poca práctica que se tiene del uso del RAP en el concreto hidráulico, la presente investigación considera hacer una separación del ligante asfáltico del agregado RAP a través del Método de Abrasión y Desgaste (reportado en Sing *et al.*, 2017) con el fin de hacerlas trabajar en conjunto como agregado fino e incluirlo al concreto hidráulico para mejorar la resistencia a la tensión y compresión de un pavimento rígido.

DESARROLLO

MÉTODOS Y PRUEBAS REALIZADAS

MATERIALES EMPLEADOS

Mediante la consulta de la norma ASTM C131 (2014) y la técnica de Sing *et al.* (2017), se modificaron algunos criterios de proceso para la recuperación del agregado fino RAP después de haber sido evaluado en distintas condiciones en la Máquina de Desgaste de Los Ángeles, MDA, se modificaron tiempos, contenido de agregado y carga abrasiva (estas modificaciones se presentan más adelante). Una vez determinados los criterios y separación del agregado fino RAP, se comprobaron las características de los materiales empleados para la elaboración de las mezclas a evaluar en resistencia a la compresión y tensión diametral en cilindros de concreto hidráulico de 10 x 20 cm.

Los materiales empleados en dicho estudio se obtuvieron de la Planta Pavimentar S.A en Medellín, Colombia de donde se obtuvo el agregado pétreo RAP. En la Tabla 2 se observan los materiales obtenidos.

SELECCIÓN DEL MATERIAL

CUARTEO Y CRIBADO

La selección del material para los agregados MC, CO, SL y LAV se llevó a cabo mediante el cuarteo de los materiales conforme a la norma ASTM C702 (2018). Esta norma permite reducir las muestras grandes de agregado al tamaño adecuado para el ensayo a evaluar, en donde los pasos a seguir son: dividir la muestra en cuatro partes (Figura 3a), con una brocha apartar los cuar-

Tabla 2. Material empleado para la elaboración de mezclas

Condición	Identificación	Particularidad
Agregados Pétreos	MC	Agregados Pétreos, obtenido de la Planta Pavimentar S. A.
RAP Original	CO	RAP, obtenido del Hueco de la Planta Pavimentar S. A.
RAP Recuperado Sin Lavar	SL	RAP recuperado, obtenido de la incorporación de CO en la MDA Sin Lavar
RAP Recuperado Lavado	LAV	RAP recuperado, obtenido de la incorporación de CO en la MDA Lavado

Fuente: Elaboración propia

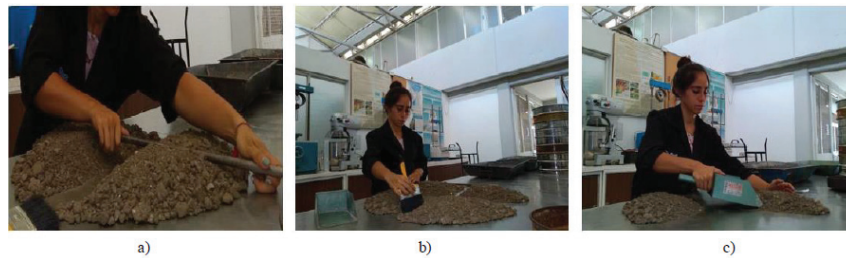


Figura 3. Cuarteo de agregados pétreos
Fuente: Elaboración propia

teos (Figura 3b) y tomar dos cuarteos de forma diagonal (Figura 3c). Para el cribado se procedió a tamizar los materiales conforme a la norma ASTM C136 (2014). Los agregados MC y CO se cribaron por el tamiz Núm. 8, asimismo se tomaron agregados de CO para ser procesado en la MDA, el cual se cribó en dos partes: RAP grueso (> 4.75 mm) y RAP fino (< 4.75 mm).

RECUPERACIÓN DE AGREGADO FINO RAP

El proceso de recuperación del agregado fino RAP se hizo implementando la MDA para obtener la arena LAV y SL (Figura 4). Conforme a modificaciones de criterio aplicados al proceso descrito en la norma ASTM C131 (2014) y con el fin de obtener la separación del ligante del agregado pétreo, las modificaciones se basaron en diferentes pruebas de tiempo, para así obtener el mayor agregado fino posible recuperado. En la Tabla 3 se desglosa el proceso a seguir que indica la norma y los criterios que se modificaron.

CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES

Se realizó la caracterización de los agregados pétreos para fabricar el concreto hidráulico obtenido del centro de producción de la empresa Pavimentar, en Medellín, Colombia, conforme a la normativa SCT:

- M.MMP.2.02.020/18 Granulometría de los agregados pétreos
- M.MMP.2.02.023/18 Masa volumétrica de los agregados pétreos

ELABORACIÓN DE ESPÉCIMENES

Mediante el método *Standard practice for selecting proportions for normal, heavyweight, and mass concrete*, ACI 211.1-91 (2009), se diseñó una mezcla con resistencia a la compresión $f'c = 250$ kg/cm² con la que se esperó una resistencia a la tensión diagonal mínima de 12.5 kg/cm², y así evaluar su resistencia a compresión y tensión sin agregado RAP y poder comparar posteriormente los

resultados con adición de agregado fino RAP. Para ambos casos, se empleó el mismo diseño de la mezcla. Para las tres mezclas a ser comparadas se sustituyó la arena virgen por los tres materiales RAP en sus distintas condiciones CO, SL y LAV.

A partir del diseño de la mezcla, se obtuvo la proporción de cemento, arena, grava y agua para el volumen calculado de concreto para cada muestra. De acuerdo con el diseño experimental se realizaron 7 muestras de cilindros de concreto hidráulico conforme a la norma mexicana NMX-C-159-ONNCE-2016 para su ensaye a resistencia a la compresión y tensión diagonal, respectivamente, a edades de 7, 14 y 28 días. La primera muestra se elaboró con agregados pétreos vírgenes, mientras que las otras 6 consistieron de agregado virgen grueso y agregado fino RAP en sus diferentes condiciones CO, SL y LAV. La mezcla consistió en 5.1 kg de cemento Portland con 3.1 litros de agua para conservar la relación agua: cemento de 0.62. Debido a que la elaboración de las muestras se realizó en distintas jornadas, se llevó a cabo la corrección por humedad de los agregados para la cantidad de agua tanto para la arena como para la grava (Ecuación 1).

$$a = (w - abs) \text{ kg} / 100 \quad (1)$$

Donde:







- a = cantidad de agua por agregar o quitar al diseño de la mezcla, kg
- w = humedad del agregado, %
- abs = absorción del agregado, %
- kg = cantidad calculada del agregado en el diseño de la mezcla, kg

Finalmente:

$$a_{\text{final}} = a_{\text{inicial}} - (a_{\text{grava}} + a_{\text{arena}})$$

- a_{final} : cantidad de agua por agregar o quitar al diseño original, kg

Tabla 3. Obtención del agregado fino RAP en Condición LAV y SL

Proceso	Normativa	Modificación
1. Preparación de MDA 	Verificar que la máquina esté libre de cualquier otro material	--
2. Incorporación del material RAP CO a MDA 	Incorporar 5 kg con base al tamaño nominal del agregado	Introducir de 10 a 12 kg de agregado sin importar su tamaño nominal
3. Incorporación a la MDA de carga abrasiva 	Con base al tamaño nominal del agregado se elige cuánta carga abrasiva se incorporará, estas con un diámetro entre 46 - 48 mm y con masa entre 390 - 445 gr	Incorporar 14 esferas con las mismas especificaciones de diámetro y masa que indica la norma
4. Desgaste de material 	Girar la MDA a una velocidad de 30 a 33 rpm durante 15 min	Girar la MDA durante 20 min a la misma velocidad que indica la norma
5. Recuperación de material 	Retirar carga abrasiva y material de MDA	--
6. Lavado 	Lavar el material por el tamiz Núm. 12	Lavado del material LAV por el tamiz 3/4" y Núm. 200 para retirar el polvo
7. Tamizado 	Cribar el material por el tamiz Núm. 12 y descartar todo lo que pasa en el tamiz	Cribar el material LAV por el tamiz Núm. 8 descartando lo que pasa en el tamiz Núm. 200. Para el material SL se criba por el tamiz Núm. 8 dejando lo que paso el tamiz Núm. 200
8. Secado 	Secar el material en el horno a una temperatura de 100°C durante 24 ± 4 horas	--

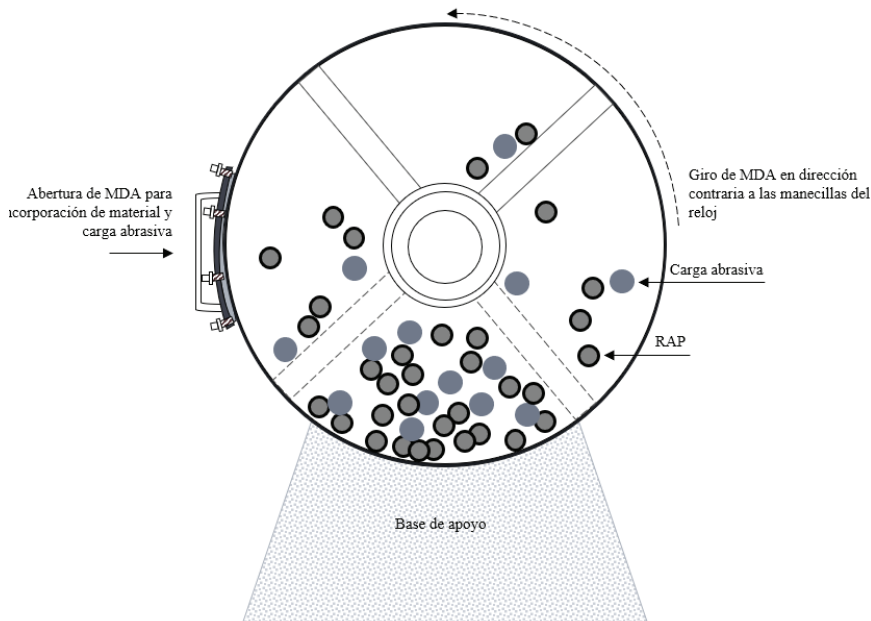


Figura 4. Vista de Máquina de Desgaste de Los Ángeles con incorporación de RAP y carga abrasiva

Fuente: Elaboración propia



Figura5. Fabricación de especímenes

Fuente: Elaboración propia

Para cada muestra se realizó la prueba de revenimiento tal y como lo establece el Método de Muestreo y prueba de materiales (M.MMP.2.02.056-2006), obteniendo en todos los ensayos resultados favorables de acuerdo con el diseño de mezcla. Cada espécimen se curó conforme a la norma de elaboración y curado de especímenes de concreto (NMX- C-159-ONNCCE-2016), (Figura 5).

ENSAYOS DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN

De acuerdo con la norma para determinar la resistencia a la compresión (NMX-C-083-ONNCCE-2014) se realizaron ensayos a 7, 14 y 28 días para determinar la resistencia de los cilindros de concreto. En la Ecuación 2 se presenta la fórmula para la determinación de la resistencia a la compresión conforme lo indica la norma.

$$f'c = P \text{ máx} / S \quad (2)$$

Donde:

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

P = carga máxima aplicada, kg

S = área de la sección transversal del espécimen, cm²

ENSAYOS DE RESISTENCIA A LA TENSIÓN

De acuerdo con la norma de resistencia a la tensión de cilindros de concreto (M-MMP-2-02-059-2004) se realizaron ensayos a 7, 14 y 28 días para determinar la resistencia a la tensión diagonal de los cilindros de concreto. Esta norma permite determinar la resistencia del concreto hidráulico mediante la compresión dia-

metral en especímenes cilíndricos moldeados. El cálculo de la resistencia se determinó conforme a la Ecuación 3 que presenta la norma (Figura 6).

$$T = 2 P / \pi l d \tag{3}$$

Donde:

- T = Resistencia a la tensión por compresión diametral, kg/cm^2
- P = Carga máxima aplicada, kg
- l = Longitud promedio del espécimen, cm
- d = Diámetro promedio del espécimen, cm



Figura 6. Ensayo de resistencia a la tensión y compresión
Fuente: Elaboración propia

DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES

GRANULOMETRÍA DE LOS AGREGADOS

Con base en los resultados de la distribución granulométrica del material MC de los agregados gruesos y finos, respectivamente (Figuras 7 y 8), se observó que contaba con una distribución adecuada para trabajar en el diseño de la mezcla control y poder proceder a hacer el diseño experimental.

De acuerdo con los porcentajes acumulados (Figura 9), se observó que el agregado CO mostró una falta de tamaños en la distribución, ocasionada por el fresado que se dispone de los pavimentos asfálticos. Por un lado, los agregados SL y LAV presentan una mejor distribución y, por otro lado, los agregados cumplen con los criterios para los tamaños de 16 mm o menor, de acuerdo con la norma IS: 383 (1970).

ELABORACIÓN DE ESPÉCIMENES

Para la fabricación de las mezclas, este trabajo se basó en el diseño de la MC, por lo que se obtuvieron las cantidades de acuerdo con el Diseño ACI 211.1-91 (2009). En la Tabla 4 se observan los datos de diseño para una resistencia de $250 \text{ kg}/\text{cm}^2$ en donde se cambió el agregado fino para las mezclas CO, SL y LAV.

En el ensayo de resistencia a la compresión con agregado fino RAP, a edad final de 28 días, se observó un in-

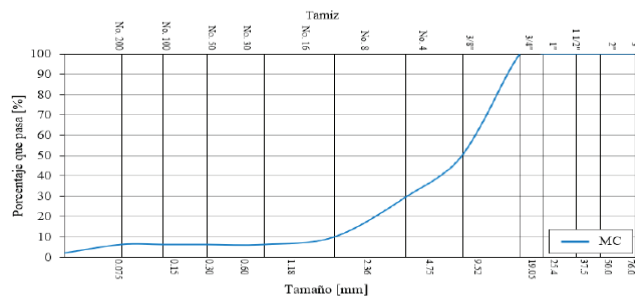


Figura 7. Distribución granulométrica del agregado grueso MC
Fuente: Elaboración propia

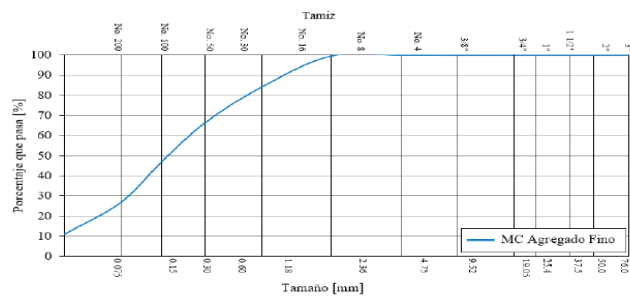


Figura 8. Distribución granulométrica del agregado fino MC
Fuente: Elaboración propia

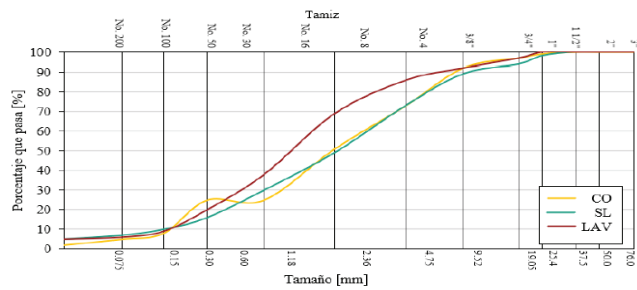


Figura 9. Distribución granulométrica de agregados finos RAP
Fuente: Elaboración propia

Tabla 4. Diseño de mezcla

Datos	Consideraciones	
Revenimiento	8	cm
TMN	20	
Sin aire incluido		
f'c	250	kg/cm ³
Módulo de finura	2.5	
Densidad de la grava	2.813	
Densidad de la arena	2.75	
Densidad del cemento	3.15	
Masa volumétrica de grava	1777	kg/cm ³
Masa volumétrica de arena	1731	kg/cm ³
Material	Cantidades por 1 m ³	
Cemento	322.58	kg
Agua	200	kg
Arena	789.2	kg
Grava	1155.05	kg

Fuente: Elaboración propia

cremento de la muestra LAV mejorando su resistencia respecto a la muestra control, MC. En la Tabla 5 se observa el resumen de las resistencias a compresión de las mezclas, donde se puede ver que el material LAV tiene un comportamiento favorable en la resistencia.

Tabla 5. Resumen de las resistencias a compresión de las mezclas

Edad días	MC kg/cm ²	CO kg/cm ²	SL kg/cm ²	LAV kg/cm ²
7	198.02	175.25	192.53	205.15
14	238.26	201.46	231.31	236.15
28	259.48	202.032	244.64	259.79

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 6 se puede observar el comportamiento en porcentaje de la disminución o incremento de la resis-

tencia a los 28 días de cada muestra comparada con la Muestra Control, MC, donde se observa que el material LAV tiene un comportamiento similar al MC.

Tabla 6. Porcentaje de incremento o disminución de la resistencia

MC kg/cm ²	CO kg/cm ²	SL kg/cm ²	LAV kg/cm ²
--	- 22.13 %	- 5.72 %	+ 3.97 %

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 10 se resume la resistencia a la compresión de todas las muestras, tanto la de control, MC, como las que fueron evaluadas con RAP en sus distintas condiciones, donde se observa que la disminución de los materiales CO y SL tienen una evolución menor que la muestra MC, así mismo se comprobó que la muestra

LAV en su evolución se hace notoria por su incremento a la primera edad de ensaye (7 días). Teniendo en cuenta esto, alcanzó un 3.97 % más de resistencia a la compresión, siendo un valor suficiente para considerarse como concreto de buena resistencia.

Luego de ensayar la resistencia a la tensión, en la edad final de 28 días se observó un incremento de la muestra LAV mejorando su resistencia, respecto a la muestra control, MC. En la Figura 11 se presentan los resultados de resistencia a la tensión evaluada a los 7, 14 y 28 días de las diferentes mezclas. Se observó que se redujeron las resistencias en 9.2 %, 6.0 % para CO y SL, respectivamente, de acuerdo con la mezcla MC. De los 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.

CONCLUSIONES

Al realizar las pruebas para obtener el desempeño de las cuatro diferentes mezclas de concreto, se pudo observar una buena distribución de los agregados, debido a las fallas longitudinales que se tuvieron en las probetas.

Por un lado, los resultados obtenidos para la probeta de control en resistencia a la compresión indicaron un $f'c$ de 253 kg/cm^2 mientras que las mezclas RAP en Condición Original y RAP en Condición Recuperado Sin Lavar dio como resultado una disminución de 22.14 % y 5.72 % en resistencia a la compresión, respecto a la muestra de control. Por otro lado, el RAP en Condición Recuperado Lavado incrementó un 3.98, %.

En lo que respecta a los resultados obtenidos de resistencia a la tensión de la mezcla Recuperada en Condición Lavado (LAV) dio 28.3 kg/cm^2 donde cabe señalar que, al ser adicionado al concreto, mejora la re-

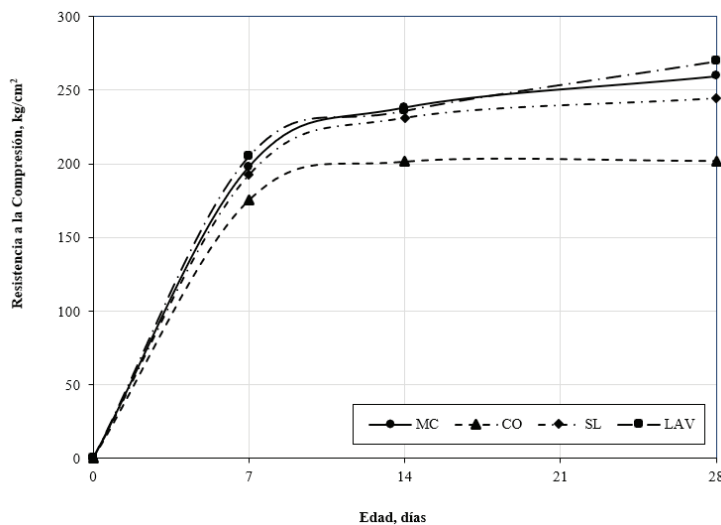


Figura 10. Evolución de la resistencia a compresión del concreto hidráulico
Fuente: Elaboración propia

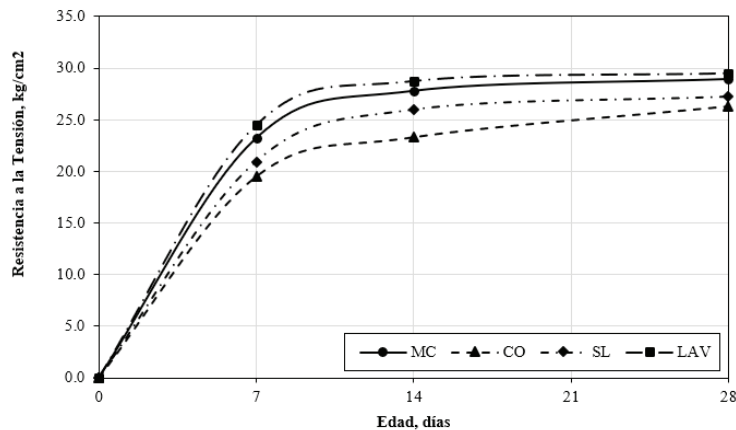


Figura 11. Evolución de resistencia a la tensión del concreto hidráulico
Fuente: Elaboración propia

sistencia a los 28 días de edad, en comparación con las otras mezclas que dieron 25.4 kg/cm² y 27.8 kg/cm², RAP en Condición Original y RAP en Condición Recuperado Sin Lavar, respectivamente.

Se pudo observar que la muestra RAP en Condición Recuperada Lavada mejora la resistencia en sus dos evaluaciones: resistencia a la tensión y compresión, de acuerdo con la muestra RAP en Condición Recuperada Sin Lavar, y RAP en Condición Recuperada Lavada. Así mismo, se puede destacar que el material RAP en Condición Lavado podría ser una aplicación de agregado como remplazo para un concreto hidráulico.

Al reutilizar, reducir y reciclar los materiales puestos en obra, RAP, se crean nuevos productos con distintos tratamientos y propiedades que sean factibles para la utilización y construcción de carreteras, evitando el uso de recursos naturales. En el proceso de reciclado, por lo general se utilizan menos recursos para la fabricación de los materiales que cuando se parte de materiales de recursos naturales, lo que disminuiría los rellenos de escombros de pavimentos por rehabilitaciones de carreteras por nuevas construcciones. Sin embargo, por la alta demanda, suelen llenarse rápidamente los lugares apropiados para estos materiales o simplemente se desechan en lugares no apropiados.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco al Consejo Nacional de Ciencias y Tecnologías y a la Empresa Pavimentar S.A. por su apoyo durante toda esta investigación

REFERENCIAS

- ACI Committee 211.1-91 (2009). Standard practice for selecting proportions for normal, heavyweight, and mass concrete. Farmington Hills, USA: American Concrete Institute, p. 38.
- Al-Oraimi, S., Hassan, H.F. & Hago, A. (2009). Recycling of reclaimed asphalt pavement in Portland cement concrete. *Journal of Engineering Research*, 6, 37-45. <http://dx.doi.org/10.24200/TJER.VOL6ISS1PP37-45>
- ASTM C131 International (2014). Standard test method for resistance to degradation of small-size coarse aggregate by abrasion and impact in the Los Angeles Machine.
- ASTM C702 International (2018). Standard practice for reducing samples of aggregate to testing size.
- ASTM C136 International (2014). Standard test method for sieve analysis of fine and coarse aggregates.
- Baamonde, A., Pérez, I. & Herrador, M. (2011). *Geosintéticos en carreteras: Planteamientos para su aplicación en las capas de firme*. Universidad de Coruña, pp. 1-9.
- Delwar, M., Fahmy, M. & Taha, R. (1997). Use of reclaimed asphalt pavement as an aggregate in Portland cement concrete. *ACI Materials Journal*, 94(3), 251-256.
- Fabela, M., Jaworski, J. & Lozano, A. (1999). *Proceso de remoción de carpetas asfálticas*. Instituto Mexicano del Transporte, Sanfandila.
- Gutiérrez, J., Soria, V. & Dorado, M. (2017). Estudio estadístico de campo del autotransporte nacional. Documento Técnico Núm.71 IMT, XVIII, p. 134.
- Huang H. Y. (2004). *Pavement analysis and design*. United States of America: Ed. Pearson Prentice Hall.
- Hossiney, N. & Tia, M. (2010). Concrete containing RAP for use in concrete pavement. *Int. J. Pavement Res. Technol.*, 3(5), 251-258.
- Hoyos, L.R, Puppala, A. J. & Ordóñez, C. A. (2011). Characterization of cement-fiber-treated reclaimed asphalt pavement aggregates: Preliminary investigation. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 23(7), pp. 52-115
- Izaks, R., Haritonovs, V. & Zaumanis, M. (2015). *Bituminous mixtures and pavements VI. First trial to design up to 50 % recycled hot mix asphalt in Latvia*. London, United Kingdom: A.F. Nikolaidis.
- IS 383 (1970). Specification for coarse and fine aggregates from natural sources for concrete, Bureau of Indian Standard, New Delhi.
- M.MMP.2.02.020. (2018). Método de muestreo y prueba de materiales. Finura del Cemento por el Método del Tamiz. SCT.
- M.MMP.2.02.023. (2018). Métodos de muestreo y prueba de materiales. Masa Volumétrica de los Agregados Pétreos. SCT.
- M.MMP.2.02.056. (2006). Método de muestreo y prueba de materiales. Revenimiento del Concreto Fresco. SCT.
- M-MMP-2-02-059 (2004). Normativa para la infraestructura del transporte. Resistencia a la Tensión en Cilindros de Concreto, SCT-IMT, México.
- Martínez, G., Martínez, M. & Martínez, E. (2013). Concreto polimérico reforzado con fibras de Luffa. *Información Tecnológica*, 24(4), 15-16. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642013000400008>
- Monti, A., Shen, H. & Khodair, Y. (2016). Characteristics of self-consolidating concrete with RAP and SMC. *Construction and Building Material*, 102, 564-573. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.11.007>
- NMX-C-159-ONNCE. (2016). Elaboración y curado de especímenes de ensayo. Industria de la Construcción, ONNCE.
- NMX-C-083-ONNCE. (2014). Determinación de la resistencia a la compresión de especímenes. Industria de la Construcción, ONNCE.
- Okafor, F. O. (2010). Performance of recycled asphalt pavement as coarse aggregate in concrete. *Leonardo Electronic J. Prac. Technol.*, 17, 47-58.
- Rivera L., G. A. (2000). *Resistencia del concreto*. Cap. 6, pp. 121-151.
- Singh, S., Ransinchung, G.D. & Kumar, P. (2017). An economical processing technique to improve RAP inclusive concrete properties. *Construction and Building Material*, vol. 148, 734-747. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.030>