

EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO Y DINÁMICO DE MEZCLA ASFÁLTICA (MD-19) CON INCLUSIÓN DE AGREGADO GRUESO DE HORMIGÓN RECICLADO PRETRATADO

R.O. Hernández¹, M.S. Aranguren¹, V.A. Ulloa¹, F.A. Reyes¹

¹*Departamento de Ingeniería Civil, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia*
Corresponding author: Robinson Orlando, Hernández Hernández, ro_hernandez@javeriana.edu.co
Corresponding author: Mario Sebastián, Aranguren León, ma-aranguren@javeriana.edu.co

Abstract. El presente estudio evaluó el comportamiento mecánico y dinámico de cuatro mezclas asfálticas densas en caliente (MD19), tres de estas con sustitución sobre la fracción gruesa (retenida en el tamiz número 4) de agregado reciclado de concreto (ARC) proveniente de las losas de concreto de la ciudad de Bogotá y una mezcla patrón. El agregado natural (AN), ARC y el cemento asfáltico (CA) fueron caracterizados para identificar características físicas y mecánicas, el ARC fue pretratado en la máquina de Los Ángeles para remover parte de la capa de mortero adherido. Se evaluaron las siguientes muestras: 1) MD19 muestra convencional de control; 2) MD19-12.5; 3) MD19-21; 4) MD19-43 muestras con sustitución del 12.5%, 21% y 43% respectivamente del ARC pretratado (ARCP) sobre el AN. Las muestras fueron fabricadas según la metodología de diseño Marshall, adicionalmente se realizó un pretratamiento térmico antes de compactar, a las mezclas con inclusión de ARCP, para posteriormente ser evaluadas en el laboratorio estudiando su comportamiento ante el ahuellamiento, tracción indirecta, módulo resiliente y fatiga. A medida que aumentó el porcentaje de sustitución del ARCP sobre el AN, aumentó también el contenido óptimo de asfalto de las mezclas. Por otro lado, el aumento en la sustitución del ARCP aumentó el porcentaje de vacíos con aire y disminuyó el porcentaje de vacíos llenos de asfalto. La susceptibilidad a la humedad de las mezclas fabricadas aumentó con el aumento de sustitución del ARCP, la rigidez de las mezclas aumentó con la inclusión de ARCP, el comportamiento ante la deformación permanente mejoró para las mezclas MD19-12.5 y MD19-21, el comportamiento a la fatiga de las mezclas mejoró en la medida en que aumentó el porcentaje de sustitución de ARC y el contenido óptimo de asfalto (COA).

Keywords: Agregado reciclado de concreto, pretratamiento mecánico, pretratamiento térmico, mezcla asfáltica densa en caliente, agregado natural, diseño de mezcla.

Introduction

La extracción indiscriminada de agregados pétreos conduce a daños al paisaje, alteración de los ecosistemas, daños a la salud por contaminación del ambiente interior y exterior durante la producción, procesamiento, mantenimiento y demolición de materiales de construcción causados por emisiones, polvo y alérgenos de contacto. (Blankendaal, Schuur, & Voordijk, 2014). Dado que esta actividad también conduce al agotamiento de recursos naturales no renovables, surge la necesidad de reutilizar los materiales usados en el sector de la construcción.

Las actividades de construcción, demolición y reforma de edificaciones, obra civil y espacio público generan residuos los cuales se conocen como residuos de construcción y demolición (RCD). Estos materiales son considerados inertes no peligrosos (Castaño, Rodríguez, Lasso, Cabrera, & Ocampo, 2013). El crecimiento de la industria de la construcción ha incrementado considerablemente la producción de RCD, lo que ha intensificado los problemas derivados de procedimientos de administración inadecuados, como la disposición caótica y descontrolada de RCD, particularmente en las grandes ciudades. (Ossa, García, & Botero, 2016)

En el año 2012 a nivel mundial la generación de RCD alcanzó aproximadamente 3 mil millones de toneladas con una tendencia al aumento, la mayor parte de estos

desechos consiste en residuos de concreto con una tasa de reciclaje entre el 7% y el 90% (Akhtar & Sarmah, 2018).

Los residuos de construcción y demolición (RCD) son uno de los residuos más abundantes generados en la Unión Europea (UE), representando aproximadamente el 34,8% de la producción total de residuos (Eurostat, 2020), para el año 2016 la producción de RCD en la unión europea fue de 2503 millones de toneladas; haciendo el análisis de cada país miembro de la Unión Europea en cuanto a producción de RCD se evidencia que hay varios países en los que el porcentaje de producción de RCD con respecto a los demás residuos superan el 60%, tales como Holanda (68%), Malta (75%) y Luxemburgo (85%)

En Colombia los RCD equivalen al 40% de todos los residuos generados en el país, además teniendo en cuenta las ciudades de Bogotá, Medellín, Cali, Barranquilla, Manizales, Cartagena, Pereira, Ibagué, Pasto, Neiva, Valledupar y San Andrés, en el 2011 se generaban 22.270.338 toneladas de RCD (UPME & UIS, 2018)

Actualmente, en Bogotá se producen anualmente cerca de 32.000.000 de toneladas de Residuos de Construcción y Demolición - RCD,. (SDMA, 2020) . Por esta razón se ha decidido la utilización de agregados

de concreto reciclado ARC el cual básicamente es agregado obtenido de demoliciones de construcción (Al-Bayati, Das, Tighe, & Baaj, 2016) el cual según estudios realizados anteriormente se evidencia su utilización en losetas, andenes, bases y subbases (Cho, Choi, Yun, & Kim, 2011) (I. Pérez, 2012) (Herrador, 2011).

El suministro de las crecientes demandas de recursos naturales no renovables en la actualidad se ubica como uno de los principales desafíos que enfrenta la industria mundial del pavimento en sus esfuerzos por construir y mantener pavimentos asfálticos de mezcla en caliente (Gedik, 2020). Es por esto que este estudio considera importante determinar la viabilidad del uso de agregados de hormigón reciclado (ARC) provenientes de las losas de concreto de Transmilenio de la ciudad de Bogotá en la fabricación de mezclas asfálticas en calientes (MD-19), a diferentes porcentajes de sustitución y con asfalto de penetración 60/70 mediante la evaluación del comportamiento mecánico y dinámico de la mezcla, así como la caracterización de sus componentes constitutivos en función del cumplimiento de las especificaciones técnicas IDU-2018.

Dada la escasez creciente de los agregados pétreos explotados en canteras y los efectos negativos que esta actividad causa al medio ambiente, el uso de ARC se perfila cada vez más como una alternativa ambientalmente amigable que requiere de la integración de la industria de la construcción y la academia en búsqueda de alternativas viables para su gestión, tratamiento y aplicación en escenarios específicos.

Se realizó una revisión detallada donde se encontraron resultados confortantes con respecto al desempeño de mezclas densas en caliente con inclusión de ARC (I. Pérez, 2012) (Zulkati, Wong, & Sun, 2013) (Sanchez-Cotte, y otros, 2020) (Jitsangiam, Nusit, Nikraz, & Leng, 2021) (Tahmoorian, Samali, & Mirzababaei, 2020) (Daquan, y otros, 2018) (Rubiano Murcia & Lancheris Ovalle, 2020) (Contreras Zartha, Forero Castaño, & Rojas Roza, 2019) en donde se realiza una sustitución a distintos porcentajes del agregado natural.

Según (Acosta Alvarez, Alonso Aenlle & Tenza-Abril 2020) las propiedades de las mezclas asfálticas fabricadas con inclusión de ARC varían en función de la fuente de producción, el proceso de producción y las características originales del agregado del ARC. De aquí la necesidad de realizar estudios particulares de los ARC provenientes de diferentes orígenes y procesos, así como de las mezclas asfálticas fabricadas a partir de estos.

Teniendo esto en cuenta, surge la necesidad de realizar la evaluación del comportamiento mecánico y dinámico, así como la caracterización de los componentes constitutivos de mezclas asfálticas fabricadas con sustitución de agregados provenientes del reciclaje de las losas de concreto del sistema de transporte Transmilenio, para de esta manera plantear

un posible uso de estos agregados cuando llegue el momento de remover estas capas de pavimento.

Diferentes estudios han demostrado la posibilidad de usar ARC en la fabricación de mezclas asfálticas, empleando tratamientos previos para la remoción o mejoramiento de las propiedades del mortero adherido a los agregados, debido a que este mortero puede actuar en detrimento de las propiedades mecánicas y dinámicas de la mezcla (Lee, Du, & Shen, 2012) (Kareem, Nikraz, & Asaid, 2018) (Zhu, Wu, Zhong, & Wang, 2012) (Pasandín & Pérez, 2013) (Al-Bayati, y otros, 2016) (Gedik, 2020) Con estos pretratamientos se han logrado obtener propiedades de las mezclas asfálticas comparables con las fabricadas a partir de agregados vírgenes, sin embargo, algunos de estos pretratamientos encontrados involucran la utilización de equipos especializados y el uso de productos químicos que pueden resultar costosos a la hora de escalar el proceso. Es por esto que este trabajo plantea la elección de pretratamientos adecuados que se pueda implementar en una planta para producción de mezcla asfáltica.

Los pretratamientos planteados consisten en uno mecánico inicial para tratar el ARC y uno térmico a la mezcla antes de compactar. El pretratamiento mecánico consiste en hacer una representación a pequeña escala en el laboratorio de lo que puede suceder si se toma el ARC y se introduce por el tambor secador de una planta para producción de mezcla asfáltica sin que esté encendido el quemador, pero si el exhaustor, esta simulación se realizará en el laboratorio con ayuda de la máquina de Los Ángeles sin utilizar las esferas. Para esto se tendrá en cuenta que la máquina de Los Ángeles tiene un diámetro de 0.71 m, gira a una velocidad de 30 rpm a 33 rpm (INVIAS, 2013). Además, según (AASHTO, FAA, & Engineers, 2000) el tambor secador de una planta para producción de mezcla asfáltica tiene un diámetro que varía entre 1.8 m a 3 m, esta gira a una velocidad de 5 rpm a 10 rpm y el tiempo de residencia de los agregados en el tambor varía de 2 min a 8 min; teniendo en cuenta los anteriormente mencionado se elige un tiempo de pretratamiento de 3.3 minutos en la máquina de Los Ángeles lo que equivale a 105 revoluciones. Por otro lado, se plantea un calentamiento durante cuatro horas a 170 °C de la mezcla antes de compactar como el realizado por (Jullien, y otros, 2010), este calentamiento podría llevarse a cabo en los silos de la planta para producción de mezcla asfáltica. (Jullien, y otros, 2010) encontraron que casi el 97% de la energía usada en una planta para producción de mezcla asfáltica es usada en calentar y secar los agregados, teniendo en cuenta que este trabajo no plantea en el pretratamiento el calentamiento de los agregados en el tambor secador, solamente se usaría un porcentaje mínimo de la energía requerida para la producción de

la mezcla asfáltica al momento de pasar el ARC por el tambor secador.

1. Materiales y Métodos

Los agregados naturales triturados provienen del río Guayuriba y de la cantera de Fusca. El cemento asfáltico (60-70) proviene de la planta productora de Apiay. Los ARC son producto de la demolición de las losas de concreto del sistema de transporte Transmilenio de la ciudad de Bogotá, estos agregados fueron sometidos a un proceso de trituración con un trituradora de mandíbula de pequeña escala en la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito y posteriormente pretratados en la máquina de Los Ángeles para remover parte de la capa de mortero adherido, tomando en cuenta lo realizado por (Bastidas-Martínez, Rondón-Quintana, & Zafra-Mejía, 2019) (Dilbas, Çakır, & Atiş, 2019) (Purushothaman, Amirthavalli, & Karan, 2015) el pretratamiento se realizó sin esferas por un periodo de 3.3 minutos (105 revoluciones) a una velocidad comprendida entre 30 rpm y 33 rpm para simular el tambor secador de una planta para producción de mezcla asfáltica. Este pretratamiento fue seleccionado teniendo en cuenta valores reportados por (NAPA, 1995) (USACE & FAA, 2000), en cuanto a diámetros típicos de tambores secadores en plantas para producción de mezcla asfáltica, tiempo de residencia de los agregados y velocidades de giro.

El AN, el CA y el ARC pretratado (ARCP) y sin pretratar (ARCS) fueron caracterizados con ensayos por triplicado según la especificación IDU-620-18. Adicional a esto se halló el grado PG del cemento asfáltico, según la norma INV E 750-13. Los resultados de la caracterización se encuentran en las tablas 1, 2, 3 y 4 donde se evidencia el cumplimiento del CA con los lineamientos de la especificación IDU-200-2018. Adicional a esto el AN, ARCP y el ARCS cumplen con los requerimientos de la especificación IDU-620-2018 para nivel de tránsito T3 a excepción del ensayo de desgaste en la máquina de Los Ángeles, en el que los resultados para el ARCS y el ARCP fueron 29.6 y 27.1 respectivamente, con lo que cumplen con las exigencias para un nivel de tránsito T2.

La sustitución del ARCP sobre el agregado natural se realizó en la fracción gruesa de la mezcla con porcentajes de 12.5% (% retenido acumulado tamiz 1/2"), 21% (% retenido acumulado tamiz 3/8") y 43% (% retenido acumulado tamiz número 4) sobre el peso total de los agregados de la mezcla.

La mezcla asfáltica en caliente fue fabricada de acuerdo con la especificación técnica IDU-620-2018. Se realizaron 4 diseños de mezcla asfáltica, el primero para la mezcla sin contenido de ARCP y los siguientes

tres para mezclas con sustitución de 12.5%, 21% y 43% de ARCP sobre el agregado natural. Las MDC con contenido de ARCP fueron pretratadas mediante un precalentamiento de 4 horas antes de la compactación a la temperatura de mezcla (148 °C a 154 °C), este pretratamiento podría ser realizado en los silos de una planta para producción de mezcla asfáltica.

La resistencia a la tracción indirecta de las mezclas diseñadas se evaluó con 28 probetas tipo marshall según la norma (ASTM D4867-INV E 725-13), este ensayo consistió en medir la resistencia a la tracción indirecta en estado seco (RT s) y saturado (RT h) de las muestras tipo Marshall fabricadas con el COA, para con esto hallar la relación húmedo seco de estas resistencias (RRT), se utilizaron seis probetas por cada mezcla, de estas seis se ensayaron tres en estado seco y tres en estado saturado. Las muestras que se ensayaron en estado saturado se sometieron a un vacío de 70 kPa durante 5 minutos, luego de verificar su saturación los especímenes se acondicionaron en un baño de agua destilada a 60 °C durante 24 horas, después de esto se acondicionaron en un baño de agua a 25 °C durante 1 hora para finalmente ser ensayados.

El comportamiento dinámico se evaluó con los ensayos de Módulo Resiliente (UNE-EN 12697-26:2019 – INV E 749-13), Ahuellamiento (UNE-EN 12697-25:2019) y Fatiga (UNE-EN 12697-24:2019 - INV E 808-13). El módulo resiliente se evaluó con el equipo Nottingham Asphalt Tester (NAT) aplicando la carga en forma de honda haversiana a temperaturas de 10, 20 y 30°C, con frecuencias de 2.5, 5 y 10 Hz, por cada mezcla se emplearon 3 probetas tipo Marshall. El ahuellamiento se evaluó en el equipo NAT con 3 probetas tipo Marshall para cada mezcla fabricada, A estas probetas se les aplicaron pulsos de carga de tipo cuadrático sin confinamiento lateral, con periodos de carga y de reposo de 1 ± 0.05 s, el ensayo se realizó a una frecuencia de 0.5 Hz, hasta llegar a la aplicación de 3600 pulsos, la carga aplicada fue de 724 ± 14 N a una temperatura de ensayo de 50 °C. Los puntos de las leyes de fatiga se encontraron usando probetas trapezoidales sometidas a movimientos sinusoidales en su parte superior hasta que disminuyó el módulo complejo a la mitad de su valor inicial, el ensayo realizó con una frecuencia de 10 Hz, temperatura ambiente (20°C) y desplazamientos de 220 μ m, 150 μ m y 90 μ m, se fabricaron 12 probetas por cada mezcla diseñada.

Para evaluar si el ARCP produjo efectos estadísticamente significativos sobre el comportamiento de las mezclas asfálticas fabricadas se realizaron análisis de varianza ANOVA con prueba F y un nivel de confiabilidad del 95%, en estos análisis si $F > F_{0.05}$ las variaciones en los parámetros evaluados son significativas.

Tabla 1. Caracterización del cemento asfáltico

Ensayo	Resultado	Req*	Norma
Viscosidad a 135 °C	350.4 Pa-s	Min. 300	AASHTO T316-*06
Punto de ablandamiento	48.6 °C	Min. 46- Max. 54	ASTM D36
Penetración	60.8(0.1mm)	Min. 60	ASTM D 5-06
Punto de Ignición	339°C	Min. 232	ASTM D 92-11
Pérdida por calentamiento	0.32%	Max. 0.8	ASTM D 2872-04
Penetración del residuo	55.2 mm	Min. 54	Astm d 5-06
Incremento del punto de ablandamiento	6.6°C	Max. 9	ASTM D 36
Ductilidad	61 cm	Min. 50	ASTM D 113-07
Reología con reómetro de corte dinámico	64°C – 25° C	XXX	AASHTO T 315-09

*Requerimiento especificación IDU-620-2018.

Tabla 2. Caracterización de agregados gruesos

Ensayo	AN	ARCS	ARCP	R T3*	Norma
Desgaste Los Ángeles	18.1%	29.6%	27.1%	Max. 25	ASTM 131-06
Micro Deval	12.1%	17.2%	16.5%	Max. 20	ASTMD 6928-10
10% De Finos seco	269 KN	167 KN	173 KN	Min. 110	SABS MET 842
10 % De Finos Húmedo/Seco	80 %	78%	79%	Min. 75	SABS MET 842
Impurezas	0.04%	0.1%	0.08%	Max. 0.5	UNE 146130
Partículas Fracturadas en 1 cara	96%	99%	99%	Min. 90	ASTM D 5821-01

Partículas Fracturadas en 2 caras	86%	98%	97%	Min. 75	ASTM D 5821-01
Partículas planas y alargadas	2.9%	9.2%	8.9%	Max. 10	ASTM D 4791-10

*Requerimiento especificación IDU-620-2018.

2. Resultados y Discusión

En general los resultados de los ensayos realizados al ARC mejoraron con el pretratamiento mecánico, sin embargo, para el caso del ensayo de desgaste en la máquina de Los Ángeles no se logró que el agregado cumpliera con las exigencias normativas para un nivel de tránsito T3, por otro lado, estos resultados de desgaste en los agregados reciclados están por debajo de los encontrados por (Bastidas-Martínez, y otros, 2019) (Dimitriou, Savva, & Petrou, 2018) (Pasandín, y Perez, 2013) (Zhu, y otros 2012). En cuanto al pretratamiento mecánico, se encontró que después de este, los ARC experimentaron un desgaste de 4.6% en promedio.

Tabla 3. Caracterización del agregado fino

Ensayo	Resultado	Req*	Norma
Angularidad	48%	Min. 45	ASTM C 1252-06
Adhesividad del ligante asfáltico a los agregados	10	Min. 4	NLT 355/93

*Requerimiento especificación IDU-620-2018.

Tabla 4. Caracterización de la llenante mineral

Ensayo	Resultado	Req*	Norma
Peso unitario aparente	0.6 g/cm ³	0.5-0.8	BS 812:Part 2
Diferencia entre el punto de ablandamiento 60% llenante 40% asfalto	10.4°C	10-20	ASTM D36

*Requerimiento especificación IDU-620-2018.

Como se observa en la tabla 5, a medida que aumentó el contenido de ARCP en la mezcla disminuyó la densidad bulk (Gmb), dicha disminución fue de 4.7%, esto se le atribuye a la menor gravedad específica y mayor porosidad el mortero adherido (Pasandín, y Perez, 2013) (Sanchez-Cotte, y otros, 2020). Con el aumento del ARCP aumentó también el contenido óptimo de asfalto (COA) en un 14% lo que causó la disminución de la relación estabilidad flujo en un 19%, resultados similares fueron encontrados por (Acosta Alvarez, y otros 2020) (Nejad, Azarhoosh, & Hamed, 2013) (Purushothaman y otros., 2015). Las figuras 1 y 2 muestran que para la mezcla MD19-12.5 respecto a la mezcla patrón, los vacíos con aire (Va) disminuyeron y los vacíos llenos de asfalto (VFA) aumentaron, esto se le atribuye al pretratamiento térmico realizado puesto que al calentar la mezcla el asfalto penetra en parte de la capa del mortero adherido, aumentando los VFA y disminuyendo los Va. Luego, en la medida en que aumentó el porcentaje de sustitución del ARCP los vacíos con aire aumentaron y los vacíos llenos de asfalto disminuyeron debido a que con el aumento del ARCP en la mezcla, aumentó también la cantidad de mortero adherido que no alcanzó a ser penetrado por el asfalto a pesar del pretratamiento térmico.

Tabla 5. Resultados diseño de mezcla: MP= MD19, 12%=MD19-12.5, 21%=MD19-21, 43%=MD19-43

	MP	12%	21%	43%
E(N)	19169	16335	15200	15200
F(m)	3.3	2.9	3.0	3.0
E/F (KN/mm)	5.8	5.6	5.1	5.1
Gmb (g/cm ³)	2.34	2.29	2.27	2.23
Va (%)	5.5	5.3	5.5	5.9
VAM (%)	15.5	15.4	16.2	16.7
VFA (%)	65.0	65.7	66.0	65.0
COA (%)	5.0	5.0	5.3	5.7

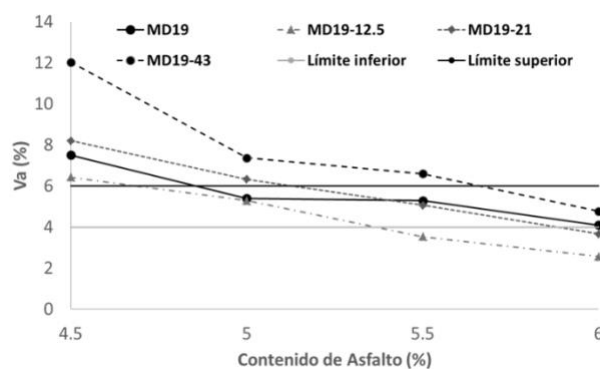


Fig 1. Vacíos con aire vs contenido de asfalto.

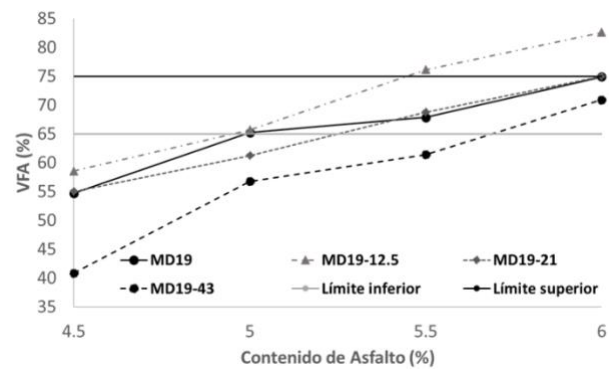


Fig 2. Vacíos llenos de asfalto vs contenido de asfalto.

Basado en un análisis ANOVA de una variable, se encontró que la reducción de la estabilidad fue significativa ($F=13.7 > F_{0.05}=4.1$), esta reducción puede atribuirse al aumento de los Va (ver figura 1), disminución de los VFA (ver figura 2) que indica menor cantidad de partículas cubiertas de asfalto a pesar del pretratamiento térmico, estas partículas no cubiertas para el caso de los ARCP son de menor calidad y generan un menor desempeño de la mezcla en la resistencia a las cargas monotónicas impuestas.

En la figura 3 se presenta el comportamiento de las mezclas diseñadas en el ensayo de tracción indirecta en estado seco, húmedo y la relación de resistencias a la tensión (RRT). Como se esperaba la mezcla patrón tuvo el mejor desempeño, se observa que a medida que el porcentaje de sustitución del ARCP aumenta, la resistencia a la tracción indirecta disminuye, tanto en estado seco como saturado, resultados similares fueron reportados por (Pasandín et al., 2013) (Sanchez-Cotte et al., 2020).

Para las mezclas MP, MD19-12.5 y MD19-21 el valor de RRT está por encima de 80%, valor mínimo exigido en especificación IDU-620-18, la mezcla MD19-43 tiene un valor de RRT de 78.1% que se encuentra por debajo de mínimo exigido en la especificación antes mencionada.

La reducción de la resistencia a la tracción indirecta y del RRT se puede atribuir a que con el aumento de la sustitución del ARCP incrementa la cantidad de mortero adherido (material de menor calidad) presente en la mezcla y aumenta la cantidad de agregado reciclado que no cumple con el valor mínimo exigido (25% según especificación IDU-620-18) en el ensayo de desgaste en la máquina de Los Ángeles, esto genera la disminución de Gmb, aumento de los Va y disminución de los VFA. Por otro lado, como lo reporta (Sanchez-Cotte, y otros 2020), durante los procesos de mezcla y compactación el ARC se puede fracturar, generando una mayor área superficial que podría no ser cubierta completamente por el asfalto, generando así

una menor resistencia a la tracción indirecta en la medida que aumenta el porcentaje de sustitución de ARCP.

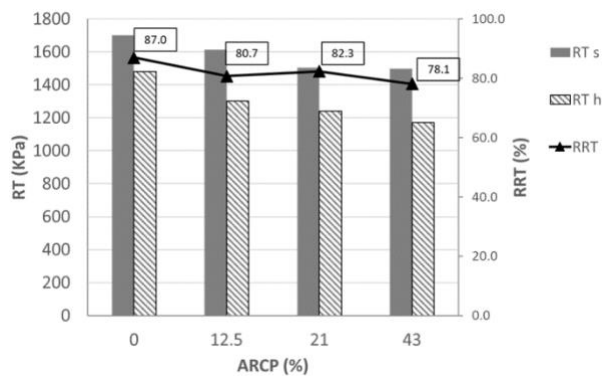


Fig 3. Resultados tracción indirecta.

Los resultados obtenidos en este ensayo deben ser tomados con cautela, puesto que las variaciones para los ensayos realizados estuvieron por encima de la variación mínima permitida de 159 kPa en la norma INV E 725-13, la alta variación en los resultados puede ser atribuida a la heterogeneidad de ARCP debido a la capa de mortero adherido a este.

Dos análisis ANOVA de una variable fueron realizados para determinar el efecto del porcentaje de ARCP (0%, 12.5%, 21% y 43%) en la resistencia a la tracción indirecta en estado seco y saturado. Los resultados indican que tanto para los ensayos realizados en estado seco ($F=47.3 > F_{0.05}=4.1$) como para los realizados en estado húmedo ($F=8.6 > F_{0.05}=4.1$) el porcentaje de ARCP tiene un efecto significativo en la resistencia a la tracción indirecta.

En la figura 4 se pueden observar las curvas maestras de los módulos resiliente, realizadas para las cuatro mezclas estudiadas, utilizando el Nottingham Asphalt Tester (NAT), donde se hicieron pruebas a temperaturas de 10°C, 20°C y 30°C. Además se utilizaron frecuencias de 2,5 Hz, 5Hz y 10 HZ.

Para la construcción de la curva maestra se utilizó la ecuación sigmoideal de Arrhenius que se muestra a continuación, utilizando una temperatura de referencia de 20°C.

Los resultados obtenidos en los ensayos de módulo resiliente (ver figura 5) evidencian que las mezclas con sustitución de ARCP tuvieron valores de módulo por encima de mezclas típicas (3600 MPa a 20°C y 10Hz), según lo reportado por (Reyes Lizcano, 2003). Con respecto a la mezcla patrón los valores del módulo resiliente aumentaron 34%, 23% y 25% para las mezclas MD19-12.5, MD19-21 y MD19-43 respectivamente, para temperatura de 20°C y

frecuencia de 10 Hz. En general las mezclas con inclusión de ARCP tuvieron un mejor comportamiento en el ensayo de módulo resiliente, teniendo en cuenta que la sustitución del ARCP sobre el AN se realizó por masa y que la gravedad específica del ARCP es menor que la del AN, esto pudo generar la inclusión de un mayor número de partículas que a su vez generaron mayor contacto y fricción intergranular en el esqueleto mineral, aumentando así los valores del módulo resiliente, sin embargo como se observa en la figura 1, en la medida que aumenta el porcentaje de sustitución, aumenta también el contenido de V_a , lo que genera también la disminución del módulo resiliente, resultados similares fueron reportados por (Rondón-Quintana, y otros 2019).

Solo para el caso de temperatura de 10°C y 43% de sustitución los valores del módulo resiliente disminuyeron para todas las frecuencias ensayadas, respecto a la mezcla MD19, resultados similares fueron reportados por (Sanchez-Cotte., et al 2020) quienes encontraron que para un 45% de sustitución de ARC el módulo resiliente disminuye respecto a la mezcla con agregado natural y a las mezclas con porcentajes de sustitución menores a una temperatura de 20°C, por otro lado (Pasandín y Perez, 2013), encontró que a bajas temperaturas (10°C y 0°C) el módulo resiliente disminuye respecto a otras mezclas con inclusión de ARC para 30% de sustitución. Lo anterior indica que para bajas temperaturas y altos porcentajes de sustitución los valores del módulo resiliente disminuyen.

Según la especificación IDU-621-18 para mezclas de alto módulo el valor mínimo es de 10000 MPa a 20°C y 10 Hz. Por lo que, si bien es cierto, las mezclas con ARCP estudiadas no son de alto módulo, si tienen valores cercanos a este tipo de mezclas (9631 MPa para MD19-12.5, 8867 MPa para MD19-21 y 8989 MPa para MD19-43), esto es beneficioso, teniendo en cuenta lo reportado por (Khalid, 2000) que indica que mezclas con valores elevados del módulo resiliente tienen una vida útil más prolongada cuando se utilizan en capas gruesas.

Dos análisis ANOVA de dos variables fueron realizados para determinar el efecto del porcentaje de sustitución del ARCP (0%, 12.5%, 21% y 43%), de la temperatura de ensayo (10°C, 20°C y 30°C) y de las frecuencias utilizadas (2.5 Hz, 5 Hz y 10 Hz) sobre los resultados del módulo resiliente. El primer análisis se realizó teniendo en cuenta porcentajes de sustitución y temperaturas para una frecuencia de ensayo de 10 Hz. Se encontró que tanto el porcentaje de sustitución ($F=5.7 > F_{0.05}=4.8$) como la temperatura ($F=161.4 > F_{0.05}=5.14$) tienen un efecto significativo en los valores del módulo resiliente.

El segundo análisis se realizó teniendo en cuenta porcentajes de sustitución y frecuencias para una temperatura de ensayo de 20°C.

Se encontró que tanto el porcentaje de sustitución ($F=159.9 > F_{0.05}=4.8$) como la frecuencia ($F=176.7 > F_{0.05}=5.14$) tienen un efecto significativo en los valores del módulo resiliente.

Los resultados del ensayo de deformación permanente se muestran en la figura 6. Para este ensayo se obtuvieron resultados de deformación axial acumulada, velocidad de fluencia y módulo de fluencia, donde se compararon con la norma UNE-EN 12697-25:2019 la cual establece el rango para la deformación axial acumulada en donde se encuentra un intervalo de $0,05 < \epsilon_n < 0,6 \mu\epsilon$. Se observa que las mezclas con inclusión de ARC al 12,5% y 21% presentan una mayor resistencia a la deformación con respecto a la muestra patrón, en contraste a estos resultados se evidencia que la mezcla con sustitución de 43% de ARC presenta el peor comportamiento respecto a la resistencia a la deformación comparada con la mezcla patrón y la demás mezclas con inclusión de ARCP y comparando con los límites de la norma se puede ver que el resultado obtenido a 3600 ciclos fue de $1,18 \mu\epsilon$ y el límite superior establecido es de $0,6 \mu\epsilon$.

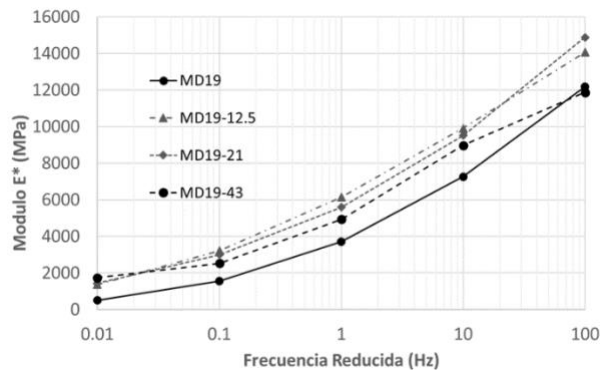


Fig 4. Curvas Maestras Módulo Resiliente.

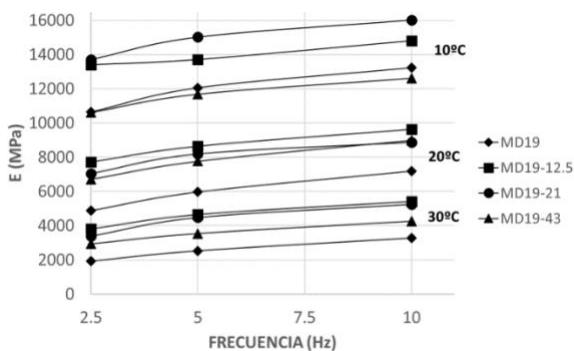


Fig 5. Resultados Módulo Resiliente.

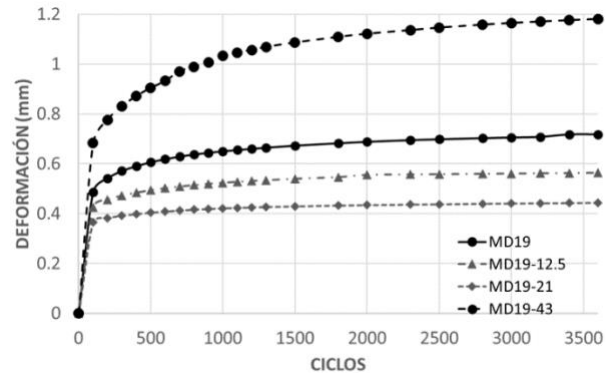


Fig 6. Resultados ahuellamiento.

Se evidencia que los resultados obtenidos en el ensayo de modulo resiliente y de deformación permanente están relacionados observando que las sustituciones de 12,5% y 21% presentan mayor resistencia a la deformación y un aumento en el MR con respecto a la mezcla patrón.

Un análisis ANOVA de una variable fue realizado para determinar el efecto del porcentaje de ARCP (0%, 12.5%, 21% y 43%) en la deformación permanente a 3600 ciclos. Los resultados indican que el contenido de ARCP tiene un efecto significativo en la deformación permanente ($F=140.5 > F_{0.05}=4.1$)

La figura 7 muestra las leyes de fatiga para las mezclas estudiadas, estas leyes analizan la deformación que se presenta en una muestra trapezoidal después de la aplicación a deformación constante (desplazamientos de 220 μm , 150 μm y 90 μm) de un millón de ciclos de carga ϵ_6 , así como la pendiente de la curva de fatiga obtenida (b), estos valores se encuentran en la tabla 6.

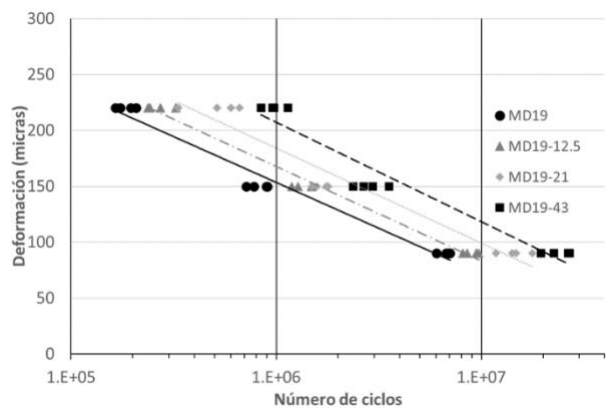


Fig 7. Leyes de fatiga.

Como se observa, a medida que aumenta el porcentaje de sustitución de ARCP hay una mejora en las leyes de fatiga en cuanto al ϵ_6 , se encontró que este valor mejoró

9.8%, 20.3% y 35.5% para las mezclas MD19-12.5, MD19-21 Y MD19-43 respectivamente, respecto a la mezcla patrón.

La mejora en el comportamiento a la fatiga de las mezclas analizadas se puede atribuir al aumento en el contenido óptimo de asfalto (Rondón Q & Reyes L, 2015) en la medida que aumentó el porcentaje de sustitución.

Resultados similares fueron reportados por (Nejad, Azarhoosh, & Hamedi, 2013) y (Pasandín A. R., 2017) quienes encontraron que a medida que aumentó el porcentaje de sustitución, aumentó también el COA y mejoró el comportamiento a la fatiga de dichas mezclas.

Tabla 6. Deformación al millón de ciclos (ϵ_6) y pendiente de curvas (b).

Muestra	$\epsilon_6(\mu\text{m})$	b
MD19	153	-0.24
MD19-12.5	168	-0.25
MD19-21	184	-0.27
MD19-43	207	-0.26

Conclusiones

El pretratamiento mecánico realizado removió parte de la capa de mortero adherido, sin embargo, no evitó que el contenido óptimo de asfalto aumentara al incluir ARCP con porcentajes de 21% y 43%, lo que a escala real significaría un aumento en los costos de producción de la mezcla asfáltica.

Los ensayos realizados para evaluar la susceptibilidad a la humedad de las mezclas mediante la tracción indirecta, indican que para los porcentajes de sustitución de 12.5% y 21% se cumple con requerimientos normativos locales mientras que para la sustitución del 43% no se cumple con dichos requerimientos, sin embargo, el valor del RRT está muy cercano al cumplimiento y se lograría utilizando un mejorador de adherencia o en su defecto encontrando un porcentaje de sustitución óptimo entre el 21% y 43%. Debido a la alta variabilidad de los resultados encontrados en este ensayo, se recomienda para futuros estudios la realización de un mayor número de ensayos que los contemplados por los requerimientos normativos.

Las mezclas densas en caliente se rigidizan con la inclusión de ARCP con porcentajes de 12.5% y 21% acercándose a valores mínimos de mezclas de alto módulo.

El aumento del 14% en el COA para la mezcla con sustitución de 43% de ARCP respecto a la mezcla patrón, llevó a un incremento superior al límite de 0,6% donde a 3600 ciclos obtuvo una deformación acumulada de 1,18%.

El contenido óptimo de asfalto aumentó con la inclusión del ARCP sobre el AN, dicho contenido influyó favorablemente en el comportamiento a la fatiga de las mezclas fabricadas, a pesar del aumento en los vacíos con aire.

Según los resultados obtenidos en los ensayos de comprobación de diseño se concluye que se puede sustituir hasta un 21% de AN por ARCP en mezclas densas en caliente (MD-19).

Referencias

- AASHTO, FAA, & Engineers, U. A. (2000). *Hot-mix Asphalt Paving Handbook 2000*. Washington, DC.
- Acosta Alvarez, D., Alonso Aenlle, A., Tenza-Abril, A., & Ivorra, S. (2020). Influence of partial coarse fraction substitution of natural aggregate by recycled concrete aggregate in hot asphalt mixtures. *Sustainability*, 12(1), 250.
- Akhtar, A., & Sarmah, A. (2018). Construction and demolition waste generation and properties of recycled aggregate concrete: A global perspective. *Journal of Cleaner Production*, 262-281.
- Al-Bayati, H., Das, P., Tighe, S., & Baaj, H. (2016). Evaluation of various treatment methods for enhancing the physical and morphological properties of coarse recycled concrete aggregate. *Construction and Building Materials*, 112, 284-298.
- Bastidas-Martínez, J., Rondón-Quintana, H., & Zafra-Mejía, C. (2019). Study of hot mix asphalt containing recycled concrete aggregates that were mechanically treated with a Los Angeles machine. *International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET)*, 10, 226-243.
- Blankendaal, T., Schuur, P., & Voordijk, H. (2014). Reducing the environmental impact of concrete and asphalt: a scenario approach. *Journal of cleaner production*, 66, 27-36.
- Castaño, J., Rodríguez, R., Lasso, L., Cabrera, A., & Ocampo, M. (2013). Gestión de residuos de construcción y demolición (RCD) en Bogotá: perspectivas y limitantes. *Tecnura*, 17(38), 121-129.
- Cho, Y. H., Choi, N. R., Yun, T., & Kim, I. (2011). The application of Recycled Concrete Aggregate (RCA) for Hot Mix Asphalt (HMA) base layer aggregate. *KSCCE Journal of Civil Engineering*, 15(3):473-478.
- Contreras Zartha, L., Forero Castaño, S., & Rojas Roza, L. (2019). Estudio de mezclas asfálticas densas con adición de agregados reciclados de concreto. *Repositorio Institucional Universidad Piloto de Colombia*.
- Daquan, S., Yang, T., Guoqiang, S., Qi, P., Fan, Y., & Xingyi, Z. (2018). Performance evaluation of asphalt mixtures containing recycled concrete aggregates. *International Journal of Pavement Engineering*, 19(5):422-428.
- Dilbas, H., Çakır, Ö., & Atiş, C. D. (2019). Experimental investigation on properties of recycled aggregate concrete

- with optimized Ball Milling Method. *Construction and Building Materials*, 212, 716-726.
- Dimitriou, G., Savva, P., & Petrou, M. (2018). Enhancing mechanical and durability properties of recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 158, 228-235.
- Eurostat. (01 de 09 de 2020). *Eurostat*. Obtenido de <https://ec.europa.eu/eurostat/statistics->
- Gedik, A. (2020). A review on the evaluation of the potential utilization of construction and demolition waste in hot mix asphalt pavements. *Resources, Conservation and Recycling*, 161, 104956.
- Herrador, R., Pérez, P., Garach, L., & Ordóñez, J. (2011). Use of Recycled Construction and Demolition Waste Aggregate for Road Course Surfacing. *Journal of Transportation Engineering*, 138(2):182-190.
- I, P., AR, P., & J, G. (2012). Stripping in hot mix asphalt produced by aggregates from construction and demolition waste. *Waste management & research : the journal of the International Solid Wastes and Public Cleansing Association, ISWA*, 30 (1), pp. 3-11.
- INVIAS. (2013). Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras. Bogotá.
- Jitsangiam, P., Nusit, K., Nikraz, H., & Leng, Z. P. (2021). Dense-Graded Hot Mix Asphalt with 100% Recycled Concrete Aggregate Based on Thermal-Mechanical Surface Treatment. *Journal of materials in civil engineering*, p1-15. 15p.
- Jullien, A., Gaudefroy, V., Ventura, A., de La Roche, C., Paranhos, R., & Monéron, P. (2010). Airborne emissions assessment of hot asphalt mixing: methods and limitations. *Road materials and pavement design*, 11(1), 149-169.
- Kareem, A., Nikraz, H., & Asaid, H. (2018). Evaluation of the double coated recycled concrete aggregates for hot mix asphalt. *Construction and Building Materials*, 172, 544-552.
- Khalid, H. A. (2000). A comparison between bending and diametral fatigue tests for bituminous materials. *Materials and structures*, 33(7), 457-465.
- Lee, C., Du, J., & Shen, D. (2012). Evaluation of pre-coated recycled concrete aggregate for hot mix asphalt. *Construction and Building Materials*, 28(1), 66-71.
- NAPA. (1995). The fundamentals of the Operation and Maintenance of the Exhaust Gas System in a Hot Mix Asphalt Facility (Second Edition).
- Nejad, F. M., Azarhoosh, A. R., & Hamed, G. H. (2013). The effects of using recycled concrete on fatigue behavior of hot mix asphalt. *Journal of Civil Engineering and Management, Civil Engineering and Management*, .
- Ossa, A., García, J., & Botero, E. (2016). Use of recycled construction and demolition waste (CDW) aggregates: A sustainable alternative for the pavement construction industry. *Journal of Cleaner Production*, 379-386.
- Pasandín, A., & Pérez, I. (2013). Laboratory evaluation of hot-mix asphalt containing construction and demolition waste. *Construction and Building Materials*, 43, 497-505.
- Pasandín, A. R. (2017). Fatigue performance of bituminous mixtures made with recycled concrete aggregates and waste tire rubber. *Construction and Building Materials*, 157, 26-33.
- produced, S. i. (s.f.).
- Purushothaman, R., Amirthavalli, R., & Karan, L. (2015). Influence of treatment methods on the strength and performance characteristics of recycled aggregate concrete. *Materials in Civil Engineering*, 27(5), 04014168.
- Rondón Q, H., & Reyes L, F. (2015). *Pavimentos: materiales, construcción y diseño*. Bogotá: ECOE ediciones.
- Rubiano Murcia, R., & Lancheris Ovalle, L. (2020). Evaluación de la resistencia bajo carga monotónica de una mezcla asfáltica mdc-25 reemplazando parte de la fracción gruesa del agregado por concreto reciclado y estabilizado con cal. *Repositorio Universidad Distrital*.
- Sanchez-Cotte, E., Fuentes, L., Martínez-Arguelles, G., Rondon-Quintana, H., Walubita, L., & Cantero-Durango, J. (2020). Influence of recycled concrete aggregates from different sources in hot mix asphalt design. *Construction and Building Materials*, 259, 120427.
- SDMA. (04 de 09 de 2020). Obtenido de <http://www.ambientebogota.gov.co/es/web/escombros/resolucion>
- Tahmoorian, F., Samali, B., Yeaman, J., & Mirzababaei, M. (2020). Evaluation of volumetric performance of asphalt mixtures containing recycled construction aggregate (RCA). *International Journal of Pavement Engineering*, p1-15. 15p. 16.
- UPME, & UIS. (2018). Realizar un análisis del potencial de reutilización de minerales en Colombia y definir estrategias orientadas a fomentar su aprovechamiento por parte de la industria en el país bajo el enfoque de economía circular contrato interadministrativo. Bucaramanga.
- USACE, & FAA. (2000). *Hot-Mix Asphalt Paving Handbook 2000*. American Association of Highway and Transportation.
- Zhu, J., Wu, S., Zhong, J., & Wang, D. (2012). Investigation of asphalt mixture containing demolition waste obtained from earthquake-damaged buildings. *Construction and Building Materials*, 29, 466-475.
- Zulkati, A., Wong, Y. D., & Sun, D. D. (2013). Mechanistic Performance of Asphalt-Concrete Mixture Incorporating Coarse Recycled Concrete Aggregate. *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 25 Issue 9, p1299-1305. 7p.