



Asociación Mexicana  
del Asfalto, A. C.

# EVALUACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD A LA HUMEDAD DE MEZCLAS ASFÁLTICAS ELABORADAS CON RCD

Maribel Hernández 1, Alexandra Ossa 2

<sup>1</sup> Instituto de Ingeniería UNAM, Ciudad de México, México, MHernandezGon@iingen.unam.mx

<sup>2</sup> Instituto de Ingeniería UNAM, Ciudad de México, México, AOssaL@iingen.unam.mx

## Resumen

El aumento en la generación de residuos de construcción y demolición (RCD) a nivel mundial ha desencadenado una crisis medioambiental. Este problema surge debido a la creciente demanda de espacios para su disposición final y a la sobreexplotación de recursos naturales para la obtención de materiales vírgenes. En respuesta a esto, algunos países han implementado medidas para reciclar y reutilizar los RCD en diversas actividades constructivas, incluyendo la elaboración de concreto asfáltico.

Sin embargo, los agregados provenientes de RCD, particularmente aquellos obtenidos de la trituración de concreto, presentan propiedades distintas en comparación con los agregados vírgenes debido a que estos presentan un recubrimiento de cemento, que puede facilitar la aparición de mecanismos de daño por humedad, debilitando la unión adhesiva entre los agregados y el cemento asfáltico. Por lo tanto, resulta crucial evaluar la susceptibilidad al daño por humedad en concretos asfálticos que contienen RCD.

En esta investigación se evaluó la susceptibilidad a la humedad de concretos asfálticos fabricados con agregado virgen y con diferentes porcentajes de RCD al 10% y 30%. Se simularon condiciones de envejecimiento mediante un proceso de inmersión en agua por periodos de 3 y 6 meses, así como condiciones sin envejecimiento. Los resultados mostraron que los especímenes con 10% de RCD y aquellos fabricados con material virgen no presentaron cambios significativos en la resistencia a la tensión indirecta. En contraste, los especímenes con 30% de RCD experimentaron un incremento en estos valores, incluso después del proceso de envejecimiento. Este aumento en la resistencia puede atribuirse a la presencia de partículas cementantes en la fracción fina del agregado reciclado.

Así mismo, se observó un aumento en los valores de TSR en los especímenes elaborados con algún porcentaje de RCD. Sin embargo, en todos los casos estudiados, estos valores fueron inferiores al límite establecido por la normativa.

**Palabras Clave:** Mezcla asfáltica, Durabilidad, RCD, IDT, TSR.

## 1 Introducción

El desarrollo mundial de la industria de la construcción ha propiciado la sobreexplotación de recursos naturales y la producción de grandes cantidades de residuos de difícil gestión. Durante la construcción y demolición de edificios, carreteras, aceras, puentes y otras infraestructuras, se consumen grandes cantidades de recursos naturales y al mismo tiempo se generan grandes volúmenes de residuos. Estos residuos son denominados como Residuos de Construcción y Demolición (RCD), están compuestos principalmente por bloques de concreto, mortero, ladrillos, concreto simple y armado, restos de fresado de concreto asfáltico, cerámica, yeso y madera [23].

La gestión de los Residuos de Construcción y Demolición (RCD) representa uno de los principales desafíos que enfrentan actualmente las grandes ciudades a nivel mundial, ya que requieren amplias áreas de almacenamiento para los residuos generados. Para mitigar los impactos ambientales causados por estos residuos, se han buscado alternativas como la reutilización y el reciclaje. Estas estrategias



**Asociación Mexicana  
del Asfalto, A. C.**

no solo ayudan a reducir la demanda de espacio de almacenamiento, sino que también contribuyen a disminuir las emisiones de CO<sub>2</sub>, ahorrar energía y reducir la extracción de materiales pétreos vírgenes utilizados en la construcción [22].

En México, la situación de los residuos de construcción y demolición (RCD) es preocupante. La falta de conciencia sobre la importancia de una gestión adecuada de estos residuos, junto con la escasa implementación de prácticas de reutilización y reciclaje, han incrementado el problema. Actualmente, la Ciudad de México es la única entidad del país que cuenta con una normativa local específica para regular estos residuos y ha instalado seis plantas de tratamiento y aprovechamiento de RCD. No obstante, a pesar de estos esfuerzos, los porcentajes de reutilización y reciclaje siguen siendo bajos.

En respuesta a la problemática mundial de los RCD, en los últimos años se han realizado investigaciones enfocadas en el uso de estos residuos como agregados pétreos en diversas aplicaciones. Estas incluyen la elaboración de concreto hidráulico, bases hidráulicas, rellenos de distintos tipos, fabricación de ladrillos, concreto asfáltico, entre otros. Los estudios han demostrado que los RCD poseen un gran potencial para ser reutilizados y reciclados en múltiples actividades de construcción. Una de las estrategias más viables para integrar grandes cantidades de estos residuos es en la construcción de carreteras, ya que estos proyectos demandan grandes volúmenes de materiales pétreos [18].

Sin embargo, las investigaciones realizadas en este campo han demostrado que los agregados provenientes de los RCD presentan propiedades físicas, químicas y mecánicas distintas a las de los agregados pétreos vírgenes. Por lo tanto, es fundamental ampliar estas investigaciones para verificar su idoneidad como agregados en la elaboración de concretos asfálticos [22].

Para lograr esto, es esencial comprender aspectos clave como la interacción de los RCD con los componentes de la mezcla asfáltica, principalmente su interacción con el cemento asfáltico. Los agregados reciclados de RCD suelen tener un recubrimiento de cemento, lo que resulta en una mayor porosidad, menor densidad y una mayor absorción en comparación con los agregados pétreos vírgenes. Estas características impactan en el diseño y el rendimiento de los concretos asfálticos que incorporan este tipo de agregados [24].

Como consecuencia de esta situación, la adherencia entre el cemento asfáltico y los agregados reciclados puede ser deficiente, lo que podría comprometer la durabilidad del concreto asfáltico especialmente cuando está expuesto a ambientes húmedos [25]. Es fundamental identificar y ajustar el porcentaje óptimo de sustitución de los RCD para garantizar que las propiedades mecánicas del concreto asfáltico no se vean afectadas negativamente. Determinar este equilibrio es crucial para asegurar que los concretos asfálticos que incorporan RCD mantengan su integridad estructural y rendimiento a largo plazo [22].

### 1.1 Evaluación de la Susceptibilidad a la Humedad de los Concretos Asfálticos

El daño por humedad en las mezclas asfálticas se define como la pérdida prematura de resistencia y durabilidad causada por la presencia de humedad [20]. Este fenómeno ha sido objeto de numerosos estudios debido a su impacto en la integridad y vida útil de los concretos asfálticos. Distintos investigadores se han centrado en desarrollar protocolos de pruebas de laboratorio confiables para predecir la sensibilidad de estos materiales a la humedad.

En 1978, Lottman introdujo un procedimiento de ensayo para predecir los daños inducidos por la humedad en los concretos asfálticos. Este método fue posteriormente modificado y estandarizado por la American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) [27].

La normativa AASHTO T283 describe el proceso de prueba para determinar la susceptibilidad a la humedad en concretos asfálticos. Esta norma establece la fabricación de dos conjuntos de especímenes: uno en condición seca y otro en condición húmeda. Para los especímenes en estado



Asociación Mexicana  
del Asfalto, A. C.

húmedo, el procedimiento de acondicionamiento que incluye varios pasos:(a) saturación en agua al vacío, Los especímenes se saturan con agua utilizando un método de vacío para asegurar que el agua penetre adecuadamente en los poros.; (b) congelación, posteriormente, se congelan a una temperatura -18°C durante 16 horas; (c) calentamiento, en un baño de agua a 60°C durante 24 horas;(d)enfriamiento, finalmente, se enfrían en un baño de agua a 25°C durante por al menos 1 hora pero no más de 2 horas..

Una vez completado este proceso de acondicionamiento, se mide la resistencia a la tensión indirecta ( $S_t$ ) para ambos conjuntos de especímenes. Para obtener esta medida, todos los especímenes se someten a una carga de compresión diametral a una velocidad de 50 mm/min a una temperatura de 25°C.

La resistencia a la tensión indirecta ( $S_t$ ) se calcula utilizando la ecuación 1:

$$S_t = \frac{2000P}{\pi t D} \quad (1)$$

donde:  $S_t$ =resistencia a la tensión indirecta en kPa; P= carga máxima en N; t=espesor de la probeta en mm; y D=diámetro de la probeta en mm.

La relación de la resistencia a la tensión indirecta (TSR) se calcula utilizando la ecuación 2:

$$TSR = \frac{S_2}{S_1} \times 100 \quad (2)$$

donde: TSR=relación de la resistencia a la tensión indirecta en %  $S_1$ =resistencia a la tensión indirecta promedio del conjunto seco en kPa,  $S_2$ =resistencia a la tensión indirecta promedio del conjunto húmedo en kPa. La especificación AASHTO T283 establece un mínimo de 80% de TSR.

## 1.2 Proceso de envejecimiento por inmersión en agua.

Cuando la humedad penetra en los poros del concreto asfáltico, se produce un daño que puede manifestarse mediante el desprendimiento de agregados, fenómeno conocido como ravelling o stripping (Lytton, 2002). Este daño se produce por el debilitamiento de la unión entre el agregado y la película de cemento asfáltico, resultando en fallas de tipo cohesiva o adhesiva. La falla adhesiva ocurre cuando la película asfáltica se desprende de la superficie del agregado. Por otro lado, la falla cohesiva se presenta cuando el concreto asfáltico pierde rigidez interna [19].

La infiltración de humedad en el concreto asfáltico puede ocurrir de diversas formas, siendo tres los mecanismos de transporte más comunes. El primer mecanismo se presenta cuando el agua de las precipitaciones se infiltra en la carpeta asfáltica, provocando el flujo de agua a través de los macroporos conectados en la superficie de rodadura Figura 1(a).

El segundo mecanismo sucede cuando un pavimento asfáltico está en contacto con un entorno húmedo, afectando principalmente en las capas inferiores. En esta situación, se produce un ascenso capilar que permite que el agua se infiltre a través de los vacíos interconectados del concreto asfáltico, Figura 1(b).

Finalmente, el tercer mecanismo se refiere a la presencia de agua en el interior de los agregados incluso antes de la construcción de la superficie de rodadura. Esto puede deberse a procedimientos inadecuados de secado de los agregados pétreos Figura 1(c) [21].



Asociación Mexicana  
del Asfalto, A. C.

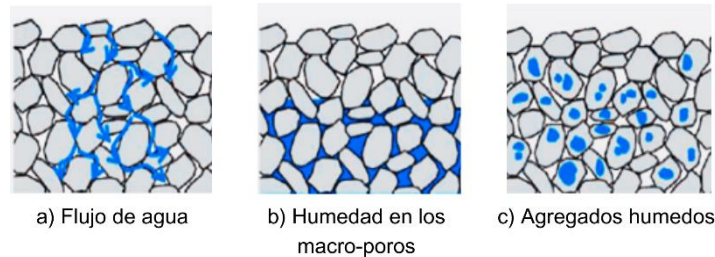


Figura 1. Modos de transporte de humedad [21].

Debido a los efectos perjudiciales que la humedad puede causar en los concretos asfálticos, resulta esencial evaluar la durabilidad de estos materiales, especialmente cuando se utilizan agregados provenientes de Residuos de Construcción y Demolición (RCD). Los pavimentos asfálticos, a lo largo de su vida útil, están constantemente expuestos a los efectos de intemperismo, lo que contribuye a su envejecimiento ocasionando daños significativos, como la pérdida de resistencia y durabilidad.

## 1.2 Objetivo

Evaluar la susceptibilidad a la humedad de los concretos asfálticos, fabricados con diferentes porcentajes de Residuos de Construcción y Demolición (RCD) en proporciones del 10% y 30%. Esta evaluación se realizará tanto en especímenes envejecidos como no envejecidos, mediante su inmersión en agua durante períodos de 3 y 6 meses.

## 2 Materiales y diseño de mezclas

### 2.1 Materiales

Para la fabricación de las mezclas asfálticas, se utilizaron dos tipos de agregado pétreo. El agregado pétreo virgen seleccionado fue basalto vesicular, mientras que el agregado procedente de RCD, fue proporcionado por una planta de reciclaje, el cual estaba compuesto principalmente por residuos de elementos de concreto hidráulico triturado.

Se diseñó una curva granulométrica densa para los tres diseños estudiados, siguiendo la metodología Superpave. La curva granulométrica fue establecida con un tamaño máximo nominal de 12.5 mm, como se observa en la Figura 2. En las Tablas 1 y 2 se muestran los resultados de las pruebas de origen y consenso realizadas tanto al agregado pétreo virgen como al RCD, respectivamente.



Asociación Mexicana  
del Asfalto, A. C.

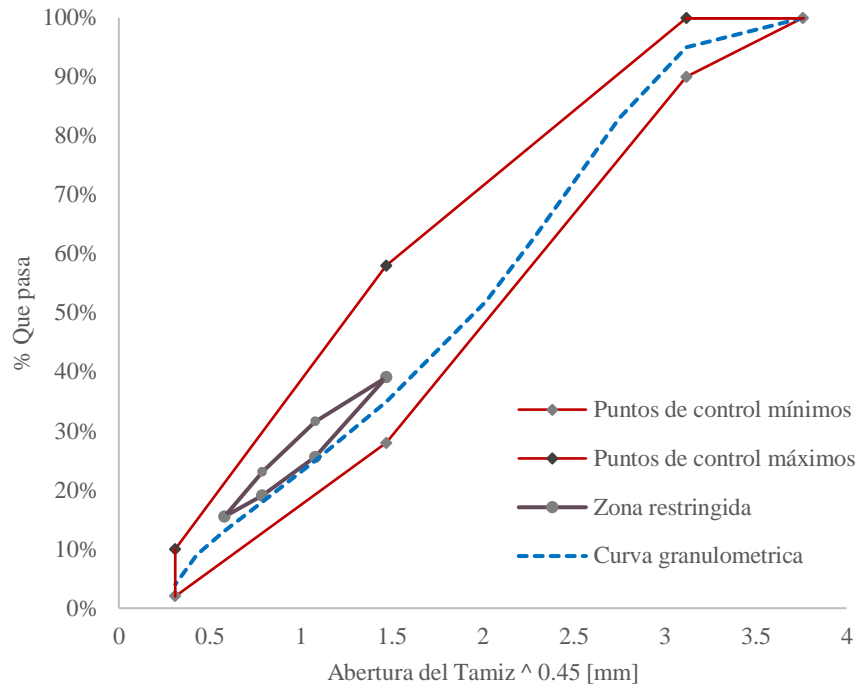


Figura 2. Granulometría de diseño

Tabla 1. Pruebas de origen y consenso del agregado pétreo virgen.

Prueba	Agregado grueso		Agregado fino	
	Prueba	Resultado	Prueba	Resultado
Gravedad específica	ASTM C127	2.583	ASTM C128	2.404
Absorción	AASHTO T85	2.09%	AASHTO T84	5.00%
Contenido de vacíos no compactados			ASTM C1252	40.5 %
Equivalente de arena			ASTM D2419	72.70%
Partículas fracturadas	ASTM D5821	75%		
Partículas alargadas y lajeadas	ASTM D4791	14%		
Desgaste de los ángeles	ASTM C131	19.57%		
Intemperismo acelerado	ASTM C88	6.10%		



Asociación Mexicana  
del Asfalto, A. C.

Tabla 2. Pruebas de origen y consenso del agregado RCD.

Prueba	Agregado grueso		Agregado fino	
Gravedad específica	ASTM C127	2.045	ASTM C128	2.162
Absorción	AASHTO T85	9.79%	AASHTO T84	9.00%
Contenido de vacíos no compactados			ASTM C1252	49.9 %
Equivalente de arena			ASTM D2419	0.552
Partículas fracturadas	ASTM D5821	61%		
Partículas alargadas y lajeadas	ASTM D4791	7%		
Desgaste de los ángeles	ASTM C131	29.76%		

El cemento asfáltico convencional empleado fue de grado PG 64-22 y se sometió a una caracterización de consenso según su viscosidad (ASTM D2171). Dicha caracterización se muestra en la Tabla 3.

Tabla 3. Caracterización del cemento asfáltico.

Prueba	Valor	ASTM Estándar
Penetración a 25° C, 100 g, 5 s; 10-1 mm mínimo.	68	D-2171
Punto de inflamación de Cleveland; °C, mínimo.	280	D-92
Punto de reblandecimiento; °C.	55	D-1525
Viscosidad Saybol-Furol a 135° C; s, mínimo.	120	D4402
Grado de rendimiento PG	64-22	D- 6373-16
Viscosidad rotacional Brookfield a 135°C (Pa. s)	0.346	AASHTO T 316

## 2.2 Diseño de mezcla asfáltica

En esta investigación se fabricaron tres tipos de mezcla asfálticas. La primera fue una mezcla de referencia, compuesta con 100% de agregado virgen. En las otras dos mezclas se sustituyó un porcentaje de agregado pétreo virgen por RCD en porcentajes del 10% y el 30%.

En total, se fabricaron 54 probetas cilíndricas, cada una con un diámetro de 150 mm y un espesor de 95 mm. Para cada tipo de mezcla, se prepararon 18 probetas, distribuidas en 6 probetas por cada periodo de envejecimiento. Las condiciones de diseño de cada grupo de especímenes se presentan en la Tabla 4.



Asociación Mexicana  
del Asfalto, A. C.

Tabla 4. Requerimientos volumétricos.

Parámetro	Valor		
	Mezcla control	10% RCD	30% RCD
Va %	4	4	4
VAM	14	14	14
VFA	65-78	65-78	65-78
% Óptimo de cemento asfáltico	6	6	7

## 2.3 Etapa experimental

### 2.3.1 Proceso de envejecimiento de especímenes por inmersión en agua

Para comprender los efectos de la humedad en el desempeño de los concretos asfálticos elaborados con agregados procedentes de RCD, se sometieron los especímenes a un proceso de envejecimiento mediante inmersión en agua a temperatura constante por periodos de 3 y 6 meses.

Una vez fabricados, los especímenes se colocaron en un contenedor con agua a una temperatura controlada de 25°C, como se muestra en la Figura 3. Para evitar la relajación de esfuerzos durante el proceso de ambientación, los especímenes fueron confinados con un aro de PVC.

Para este estudio, los especímenes se dividieron en tres grupos distintos. El Grupo 1 consistió en especímenes de control que no fueron sometidos al proceso de envejecimiento por inmersión. El Grupo 2 incluyó especímenes que se sumergieron en agua durante un período de 3 meses, mientras que el Grupo 3 estuvo compuesto por especímenes sumergidos en agua por un período de 6 meses.



Figura 3. Proceso de envejecimiento de especímenes



Asociación Mexicana  
del Asfalto, A. C.

### 2.3.2 Acondicionamiento de especímenes para ensayo de Resistencia a la Tensión Indirecta.

La durabilidad de los concretos asfálticos en estudio se evaluó utilizándola prueba de Resistencia a la Tensión Indirecta, conforme al procedimiento establecido por la normativa AASHTO-T283. Esta prueba se diseñó para determinar si la humedad, el tiempo de exposición a ella y el contenido de RCD tienen efectos perjudiciales en la durabilidad de los concretos asfálticos. Para ello, se compararon los valores de resistencia a la tensión indirecta (IDT) y la susceptibilidad a la humedad (TSR) entre los especímenes acondicionados y no acondicionados. Los especímenes se clasificaron en tres grupos: Grupo 1, Grupo 2 y Grupo 3, basados en su grado de ambientación. Cada uno de estos grupos se subdividió adicionalmente para satisfacer los requisitos del proceso de acondicionamiento necesario para la prueba. Por ejemplo, el Grupo 1, compuesto por 6 especímenes, se subdividió en dos grupos: 1A, que incluye especímenes acondicionados, y 1NA, que contiene especímenes no acondicionados, como se muestra en la Figura 4. Este procedimiento de subdivisión se aplicó de manera consistente a cada uno de los grupos de estudio.

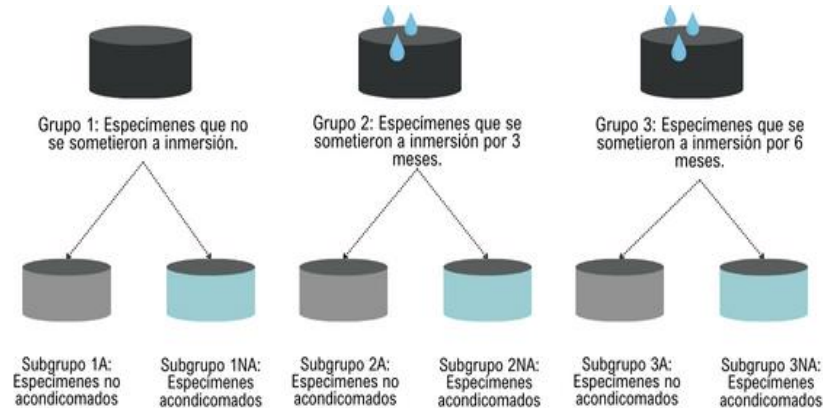


Figura 4. Grupos de especímenes.

De acuerdo con la normativa, los especímenes acondicionados deben someterse a una serie de procesos específicos antes de la prueba de Susceptibilidad a la humedad:

(1) Saturación por vacío: Los especímenes se deben saturar al vacío, alcanzando un nivel de saturación entre el 70% y el 80%.

(2) Ciclo de congelamiento: Posteriormente, deben pasar por un ciclo de congelamiento durante al menos 16 horas a una temperatura de  $-18^{\circ} \pm 3^{\circ} \text{C}$ .

(3) Baño de agua caliente: Tras el ciclo de congelamiento, los especímenes se colocan en un baño de agua a  $60^{\circ} \text{C}$  durante  $24 \pm 1$  horas.

(4) Acondicionan final: Antes de realizar la prueba, los especímenes se deben acondicionar en un horno a  $25^{\circ} \pm 0.5^{\circ} \text{C}$  por una hora.

El subgrupo 1A, correspondiente al Grupo 1, fue sometido al proceso de acondicionamiento completo, como se muestra en la Figura 5. Esto incluyó la saturación por vacío, el ciclo de congelamiento, el baño de agua caliente y el acondicionamiento final en el horno. En contraste, subgrupos 2A y 3A, pertenecientes a los Grupos 2 y 3 respectivamente, siguieron un procedimiento diferente. Tras completar sus periodos de ambientación de tres y seis meses, estos especímenes se colocaron en un horno a una temperatura de  $25^{\circ} \text{C}$  hasta alcanzar el grado de saturación especificado por la normativa, como se muestra en la Figura 6. Una vez lograda la saturación requerida, los





Asociación Mexicana  
del Asfalto, A. C.

especímenes fueron sometidos a los procesos de acondicionamiento descritos en los incisos (2), (3) y (4) de congelamiento, baño de agua caliente y acondicionamiento final.



Figura 5. Acondicionamiento de especímenes (1) Saturación al vacío, (2) Ciclo de congelamiento, (3) Baño de agua, (4) Acondicionamiento en horno a 25°C.



Figura 6. Secado de especímenes hasta lograr una saturación del 70% al 80 %.

Para el subgrupo 1NA, perteneciente al Grupo 1, los especímenes se colocaron en un horno a  $25^{\circ} \pm 0.5^{\circ} \text{C}$  durante 1 hora antes de la prueba. En cuanto a los subgrupos 2NA y 3NA, que forman parte de los Grupos 2 y 3 respectivamente, estos especímenes, después de su proceso de inmersión, fueron retirarlos del contenedor con agua y también se colocaron en el horno a  $25^{\circ} \pm 0.5^{\circ} \text{C}$ . Estos especímenes se mantuvieron en el horno hasta alcanzar un nivel de saturación del 20% al 40%. Luego, se ambientaron adicionalmente en el horno a la misma temperatura durante 1 hora antes de proceder con la prueba. Tras estos procesos de acondicionamiento y ambientación, se realizó el ensayo de Resistencia a la Tensión Indirecta (IDT) en todos de los grupos de estudio, como se muestra en la Figura 7.



Asociación Mexicana  
del Asfalto, A. C.

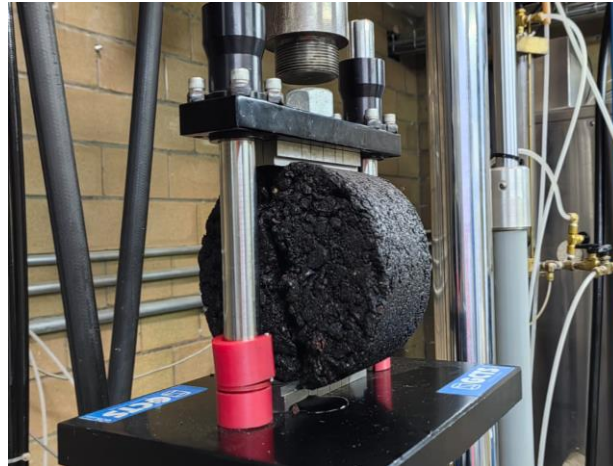


Figura 7. Ensayo de Resistencia a la Tensión Indirecta.

### 3 Resultados

#### 3.1 Tensión Indirecta IDT y Susceptibilidad a la humedad (TSR)

La Figura 8 presenta un resumen de los valores de resistencia a la tensión indirecta (IDT) para todos los casos estudiados, calculados mediante la ecuación 1. Aquí se observa que hay una relación directa entre el aumento de la Resistencia a la Tensión Indirecta y el porcentaje de Residuos de Construcción y Demolición (RCD) en la mezcla. Los valores más altos de IDT se encuentran en los concretos asfálticos que contienen un 30% de agregado de RCD.

Esta tendencia es consistente en todos los grupos de estudio: tanto en los especímenes del Grupo 1 (1A y 1NA) que no fueron sometidos a envejecimiento, como en los especímenes del Grupo 2 (2A y 2NA) y Grupo 3 (3A y 3NA), que fueron envejecidos durante 3 y 6 meses respectivamente. La observación indica que, independientemente del proceso de acondicionamiento y envejecimiento, la inclusión de un mayor porcentaje de RCD en las mezclas asfálticas mejora su resistencia a la tensión indirecta.



Asociación Mexicana  
del Asfalto, A. C.

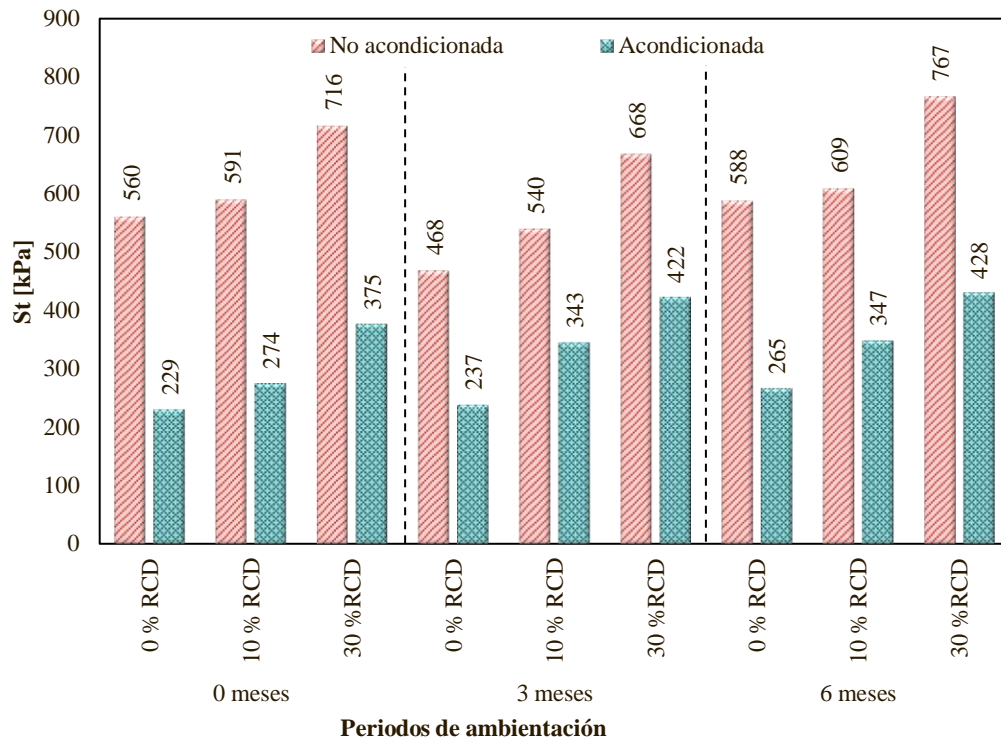


Figura 8. Resistencia a la tensión indirecta

En la Figura 8 se muestra un ligero aumento en los valores de Resistencia a la Tensión Indirecta (IDT) en los especímenes del Grupo 3, que fueron sometidos a un proceso de envejecimiento por inmersión durante un periodo de 6 meses. Este incremento es especialmente notable cuando se comparan con los especímenes que no fueron sometidos a envejecimiento y con aquellos que fueron ambientados durante 3 meses. El aumento de la resistencia se observa tanto en los especímenes acondicionados como en los no acondicionados. Esto puede atribuirse a la presencia de partículas cementantes en la fracción fina de los agregados provenientes de Residuos de Construcción y Demolición (RCD). Durante el proceso de inmersión prolongada, estas partículas se hidratan y activan su potencial cementante, lo que refuerza la resistencia de los concretos asfálticos que contienen estos agregados. En contraste, los especímenes que fueron ambientados durante 3 meses (Grupo 2) mostraron una disminución en los valores de IDT en comparación con los especímenes no sometidos a envejecimiento (Grupo 1). Esta disminución fue evidente únicamente en los especímenes no acondicionados. Por otro lado, los especímenes acondicionados del Grupo 2 exhibieron un aumento en los valores de IDT en comparación con los especímenes que no fueron ambientados. Además, este aumento en la resistencia tiende a incrementarse con la prolongación del periodo de ambientación, lo que sugiere que el acondicionamiento juega un papel significativo en la mejora de la resistencia, especialmente con periodos de envejecimiento más largos.



Asociación Mexicana  
del Asfalto, A. C.

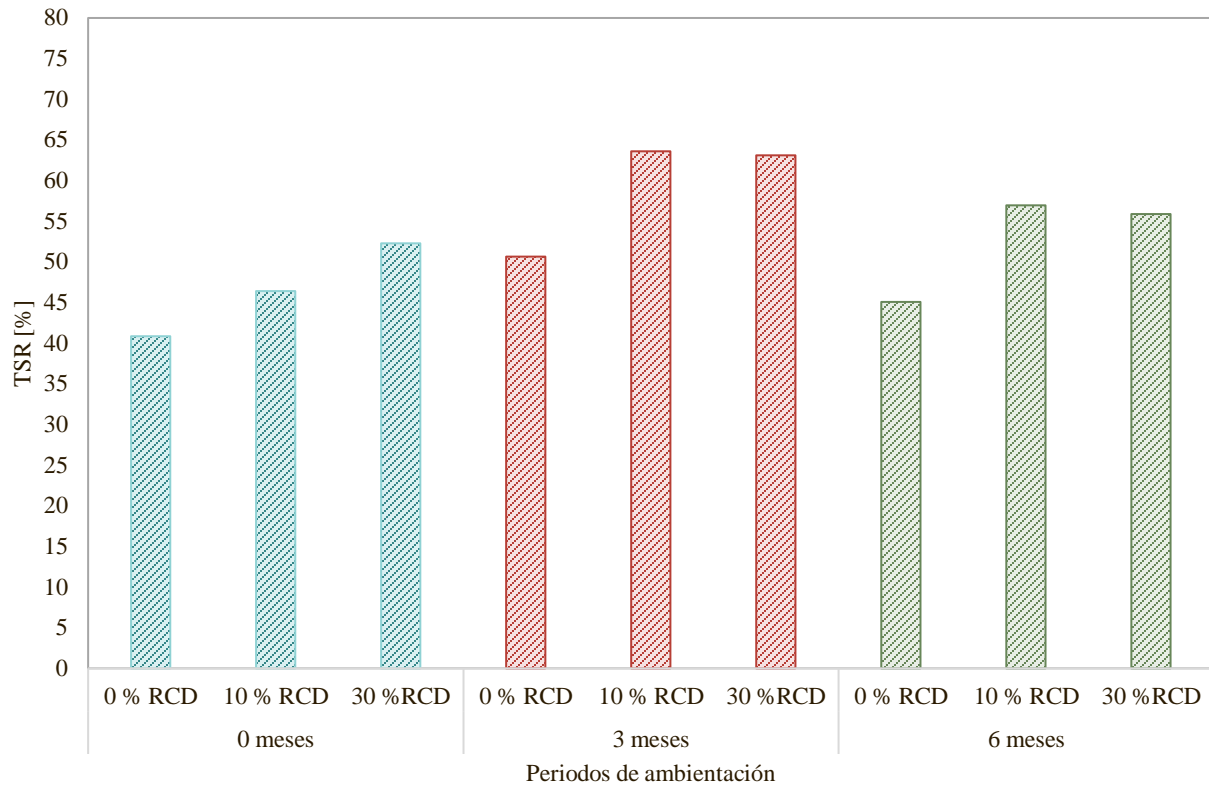


Figura 9. Relación de la resistencia a la tensión indirecta (TSR)

En la Figura 9 se presentan los valores de la relación de resistencia a la tensión indirecta (TSR) para todos los casos estudiados, obtenidos mediante la ecuación 2. En los especímenes del Grupo 1, que no fueron sometidos al envejecimiento, se observa un ligero aumento del TSR conforme aumenta el porcentaje de Residuos de Construcción y Demolición (RCD) en la mezcla.

Por otro lado, en los especímenes del Grupo 2, que fueron sometidos al proceso de envejecimiento por inmersión durante 3 meses, se registró un incremento en los valores de TSR para los tres tipos de mezclas. Esto se debe a que los especímenes acondicionados mostraron una mejora en la resistencia a la tensión indirecta del conjunto acondicionado presentaron un incremento en comparación con los especímenes no envejecidos, mientras que los valores de resistencia a la tensión indirecta en comparación con los no envejecidos, mientras que los especímenes no acondicionados no mostraron cambios significativos respecto a los valores observados en los especímenes no envejecidos. En este mismo grupo, se observó que los especímenes con 10% y 30% de RCD presentaron valores de TSR similares.

En los especímenes del Grupo 3, sometidos al proceso de envejecimiento por inmersión durante 6 meses, se observó que, al igual que en el Grupo 2, los especímenes con 10% y 30% de RCD mostraron valores de TSR similares. Sin embargo, en general, los valores de TSR mostraron una disminución en comparación con los del Grupo 2. Esto se debe a que los valores de resistencia a la tensión indirecta de los especímenes acondicionados de los Grupos 2 y 3 fueron similares. No obstante, los especímenes no acondicionados del Grupo 3 mostraron un ligero aumento en la de resistencia a la



Asociación Mexicana  
del Asfalto, A. C.

tensión indirecta en comparación con los del Grupo 2, debido al tiempo de ambientación, que activó el potencial cementante de las partículas contenidas en la fracción fina de los agregados reciclados.

En todos los casos estudiados, la relación de resistencia a la tensión indirecta (TSR) es inferior al límite establecido por la normativa, la cual indica que esta relación debe ser, como mínimo, del 80%. Sin embargo, este límite está establecido para concretos asfálticos convencionales, elaborados con agregados vírgenes y sometidos únicamente al proceso de acondicionamiento que establece la norma AASHTO T283. A pesar de que los valores de TSR obtenidos en los concretos asfálticos elaborados con RCD no cumplen con los límites establecidos en la normativa, se observa un buen comportamiento en estos concretos asfálticos. Esto es notable considerando que fueron elaborados con agregados procedentes de RCD y sometidos a un proceso de envejecimiento mediante inmersión en agua, lo cual afectó los valores de resistencia a la tensión indirecta, especialmente en los especímenes acondicionados. En los especímenes no acondicionados, estos valores se incrementaron, incluso en los concretos asfálticos sometidos a un ambiente húmedo por periodos prolongados. Sin embargo, esta situación resultó en la obtención de relaciones de resistencia a la tensión indirecta inferiores al 80%.

### 3.2 Inspección visual de especímenes ensayados

Tras la realización de la prueba de Resistencia a la Tensión Indirecta (IDT), se llevó a cabo una inspección visual de los especímenes fallados para identificar los tipos de fallas presentadas en cada uno de ellos. Las Figuras 12, 13 y 14 se muestran los especímenes fallados correspondientes a cada uno de los casos estudiados.

En la Figura 12, se observa que los especímenes fabricados con un 100% de agregado virgen presentaron predominantemente una falla adhesiva. Esta falla se caracteriza por el desprendimiento de la película de cementos asfáltico del agregado, lo cual sugiere una debilidad en la unión en la interfase.

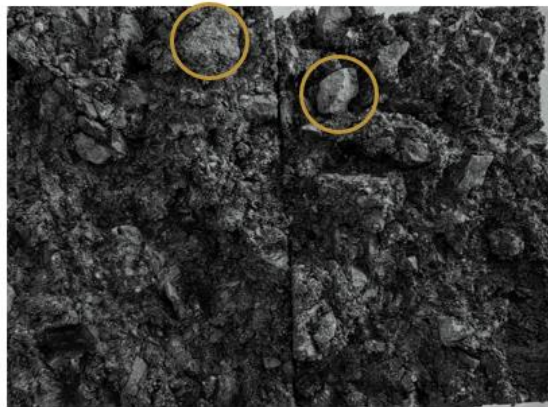


Figura 12. Falla especímenes elaborados con 0% RCD.

En la Figura 13 y 14, se muestran las fallas observadas en los especímenes fabricados con 10% y 30 % de RCD. Ambos grupos de especímenes mostraron predominantemente una falla cohesiva. Este tipo de falla se caracteriza por la pérdida de cohesión dentro de la mezcla, lo que indica una disminución en la rigidez del concreto asfáltico. Además de la falla cohesiva, se observó que los especímenes con RCD presentaban fracturas en los propios agregados reciclados. Esta fractura de los agregados sugiere que los materiales reciclados pueden contener zonas de debilidad interna, las cuales



Asociación Mexicana  
del Asfalto, A. C.

contribuyen significativamente a la falla del espécimen. La presencia de estas zonas de debilidad interna podría ser un factor crucial que influye en la durabilidad y el comportamiento estructural de los concretos asfálticos cuando se utilizan agregados de RCD.



Figura 13. Falla especímenes elaborados con 10% RCD.

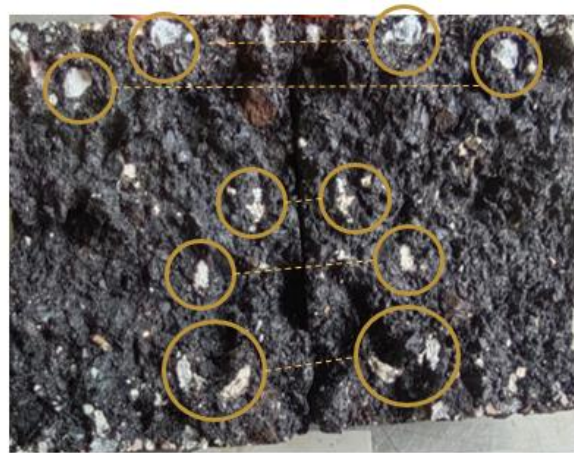


Figura 14. Falla especímenes elaborados con 30% RCD.

#### 4 Conclusiones

En esta investigación se elaboraron concretos asfálticos de granulometría densa en los que el agregado pétreo fue sustituido por diferentes porcentajes de Residuos de Construcción y Demolición (RCD). La durabilidad de estas mezclas se evaluó tras someterlas a un proceso de envejecimiento por inmersión en agua y acondicionadas como lo establece la norma AASHTO T283. Los resultados obtenidos se compararon con el comportamiento de un concreto asfáltico convencional.

Los resultados mostraron que los concretos asfálticos con mayor porcentaje de RCD (30%) presentaron valores más altos de resistencia a la tensión indirecta (IDT) en comparación con los concretos asfálticos fabricados sin RCD y aquellos que contenían 10% de RCD. Este aumento de la resistencia a la tensión indirecta (IDT) puede atribuirse a la presencia de partículas cementantes en la fracción fina de los agregados reciclados. Estas partículas, que incluyen morteros y polvos resultantes de la trituración de los RCD, se hidratan al entrar en contacto con el agua durante el proceso de envejecimiento, activando su potencial cementante.



**Asociación Mexicana  
del Asfalto, A. C.**

La utilización de agregados reciclados de demolición (RCD) contribuye significativamente a mejorar las propiedades mecánicas del concreto asfáltico, proporcionando mayor resistencia y durabilidad en comparación con las mezclas que emplean agregados pétreos vírgenes o con menor contenido de RCD. Esta mejora se refleja también en los valores de la relación de resistencia a la tensión indirecta (TSR), ya que los concretos asfálticos elaborados con RCD muestran valores más altos de TSR incluso después de ser sometidos al proceso de envejecimiento por inmersión en agua.

Sin embargo, en todos los casos estudiados, los valores de TSR fueron inferiores al límite establecido por la normativa, que es del 80% para concretos asfálticos elaborados con materiales convencionales. A pesar de esto, se observó un buen comportamiento en estos concretos asfálticos, considerando que fueron elaborados con agregados provenientes de RCD y sometidos al proceso de envejecimiento por inmersión en agua. Este proceso afectó considerablemente los valores de resistencia a la tensión indirecta, especialmente en los especímenes acondicionados, y, por lo tanto, en los porcentajes de TSR. Durante la inspección visual de los especímenes sometidos a la prueba de Resistencia a la Tensión Indirecta (IDT), se observó que los especímenes fabricados con un 10% y un 30% de Residuos de Construcción y Demolición (RCD) mostraron fracturas en la porción gruesa de los agregados reciclados. A pesar de estas fracturas, los resultados indicaron que la exposición prolongada a un ambiente húmedo no afectó negativamente los valores de IDT en los especímenes que contenían RCD. Este comportamiento positivo se puede atribuir al contenido de partículas cementantes en la fracción fina de los agregados reciclados. Al entrar en contacto con el agua, estas partículas se hidratan, aumentando la resistencia de los concretos asfálticos y contribuyendo a mantener la integridad estructural de la mezcla, incluso bajo condiciones de humedad prolongada.

Además, durante el proceso de caracterización de los materiales, se constató que los agregados derivados de RCD presentan porcentajes de absorción significativamente mayores en comparación con los agregados pétreos vírgenes. Esta propiedad influyó notablemente en el diseño de las mezclas. Como resultado, el porcentaje óptimo de asfalto en los concretos asfálticos elaborados con un 30% de RCD aumentó en un 1% en comparación con aquellos elaborados con un 10% de RCD y con los que no contenían RCD. Este hallazgo subraya la importancia de considerar el tipo de agregado utilizado en el diseño de mezclas asfálticas, ya que los altos porcentajes de absorción pueden influir directamente en las propiedades y el desempeño de la mezcla.

Por lo tanto, es crucial ajustar el contenido de asfalto en función de la absorción de los agregados para asegurar la cohesión y durabilidad adecuadas de las mezclas asfálticas que incorporan RCD. Esto garantiza que, incluso con agregados reciclados, las mezclas asfálticas mantengan un rendimiento comparable o superior a las fabricadas con agregados vírgenes.

## REFERENCIAS

- [1] AASHTO T 283-14. (2015). Standard Method of Test for Resistance of Compacted Asphalt Mixtures to Moisture-Induced Damage.
- [2] AASHTO T316, (2022). Standard Method of Test for Viscosity Determination of Asphalt Binder Using Rotational Viscometer.
- [3] ASTM International, (2001). ASTM D5821 Standard test methods for determining the percentage of fractured particles in coarse aggregate.
- [4] ASTM International, (2006). ASTM C1252 Standard test methods for uncompacted void content of fine aggregate.
- [5] ASTM International, (1999). ASTM D4791 Standard Test Method for flat particles or flat and elongated particles in coarse aggregate.



**Asociación Mexicana  
del Asfalto, A. C.**

- [6] ASTM International, (2014). ASTM C131 Standard test methods for resistance to degradation of small-size coarse aggregate by abrasion and impact in the Los Angeles Machine.
- [7] ASTM International, (2018). ASTM C88 Standard test methods for sand equivalent value of soils and fine aggregate
- [8] ASTM International, (2002). ASTM D2419 Standard test methods for soundness of aggregate by use of sodium sulfate or magnesium sulfate
- [9] ASTM International, (2015). ASTM C127-15 Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate.
- [10] ASTM International, (2015). ASTM C128-15 Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate.
- [11] ASTM International, (2008). ASTM D2171 Standard Test Method for Viscosity of Asphalts by Vacuum Capillary Viscometer.
- [12] ASTM International, (2018). ASTM D92 Standard Test Method for Flash and Fire Points by Cleveland Open Cup Tester.
- [13] ASTM International, (2017). ASTM D1525 Standard Test Method for Vicat Softening Temperature of Plastics.
- [14] ASTM International, (2023). ASTM D6373 Standard Specification for Performance-Graded Asphalt Binder.
- [15] ASTM International, (2023). ASTM D4402 Standard Test Method for Viscosity Determination of Asphalt at Elevated Temperatures Using a Rotational Viscometer
- [16] Asphalt Institute, 2001. Superpave Mix Design. Superpave. Series No. 2 (SP-02). Asphalt Institute, Lexington, KY.
- [17] Caro S., Masad E., Bhasin A. y Little D.N. (2008) “Moisture susceptibility of asphalt mixtures, Part 1: mechanisms”, *International Journal of Pavement Engineering*, 9:2, 81-98.
- [18] 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*, Volume 161.
- [19] Hicks et al., (2003). “Moisture Sensitivity of Asphalt Pavements: a National Seminary. Topic 1: Introduction and Seminar Objectives”, *Transportation Research Board*.
- [20] Kiggundu, B. y Roberts F. (1988). “Stripping in HMA Mixtures: State of the art and critical review of the test methods. NCAT.
- [21] Kringos N., et al., (2008). “Modelling of combined physical–mechanical moisture-induced damage in asphaltic mixes, Part 1: governing processes and formulations”, *International Journal of Pavement Engineering*, 9:2, 115-128.
- [22] Mills-Beale J. y You Z. (2010). “The mechanical properties of asphalt mixtures with Recycled Concrete Aggregates”, *Construction and Building Materials*, Volume 24, Issue 3.
- [23] Ossa A., García J.L., Botero E. (2016). “Use of recycled construction and demolition waste (CDW) aggregates: A sustainable alternative for the pavement construction industry”, *Journal of Cleaner Production*, Volume 135.
- [24] Paranavithana S. y Mohajerani A. (2006). “Effects of recycled concrete aggregates on properties of asphalt concrete”, *Resources, Conservation and Recycling*, Volume 48, Issue 1.
- [25] Pasandín A. y Pérez I. (2014). “Adhesion of Recycled Concrete Aggregates, Demolition Debris, and Asphalt”, *Petroleum Science and Technology*, 32:21, 2584-2591.
- [27] Solaimanian et al., (2003). “Moisture Sensitivity of Asphalt Pavements: a National Seminary. Topic 3: Test Methods to Predict Moisture Sensitivity of Hot-Mix Asphalt Pavements”, *Transportation Research Board*.