



EVALUACIÓN A FATIGA POR FLEXIÓN DEL CONCRETO ASFÁLTICO: EMPLEANDO RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN (RCD)

Richard Raúl Josephia Santos

Alexandra Ossa López

Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México

Oscar Hugo Orozco Facundo

Consultor independiente

RESUMEN

La generación de Residuos de Construcción y Demolición (en adelante RCD) ha incrementado considerablemente a nivel mundial a inicios del siglo XXI. Debido a la falta de planificación para una adecuada gestión final de los mismos, se han ido depositando en vertederos, en muchas ocasiones, de forma incontrolada; produciendo impactos ambientales negativos y poniendo en riesgo la seguridad de los habitantes y sus bienes.

El cometido de este trabajo es evaluar el comportamiento en laboratorio de la vida a fatiga del concreto asfáltico elaborado con diferentes proporciones de RCD, así como de un concreto asfáltico convencional. Para tal efecto, se realizaron pruebas flexión en cuatro puntos bajo el criterio de la norma AASHTO T 321. Los resultados de estas pruebas son analizados de la manera tradicional (deterioro de la rigidez) y usando la Relación del Cambio de Energía Disipada (RDEC). Así mismo en este trabajo se evalúa el límite de endurecimiento (Fatigue endurance limit) de todos los concretos asfálticos sometidos a pruebas de fatiga. Los resultados del estudio muestran que la determinación de la ley de fatiga de los concretos asfálticos estudiados varían en función del método de análisis. Estos resultados indican además que la ley de fatiga así como el límite de endurecimiento de los concretos asfálticos son susceptibles al contenido de RCD con el cual se elabore el material.

Palabras clave: Residuos de Construcción y Demolición (RCD), Fatiga, Relación del Cambio de Energía Disipada (RDEC), parámetro PV, Límite de Endurecimiento.

Introducción

El crecimiento de la población y la industrialización han generado una enorme cantidad de desechos en todo el mundo, dichos desechos producidos por la edificación de diversas estructuras, obras de viviendas y demás infraestructura que propician el desarrollo económico y social de sus habitantes. Así mismo en las zonas urbanas se generan grandes cantidades de volúmenes de residuos de construcción y demolición, que causan un grave daño al medio ambiente por la falta de sitios para la disposición y también por la falta de planificación para una adecuada gestión final (Poon C.S., 2007).



De acuerdo a Monier *et al.* (2011), en 2006 los residuos de construcción y demolición en Europa eran de alrededor de 970 millones de toneladas lo que llevó a prestar una atención especial a la gestión de residuos, lo que tiene repercusiones políticas. Por otra parte en la mayoría de las ciudades de los países latinoamericanos son manejados inadecuadamente de esta manera se produce un impacto negativo en el medio ambiente y se pone en riesgo la seguridad de sus habitantes. En la Ciudad de México desde el año 2005 a 2014 se han reciclado, en la planta operada por “Concretos Reciclados”, aproximadamente 1.4 millones de toneladas de residuos de construcción (Normatividad del Distrito Federal Aplicada al reúso y reciclaje de Residuos de la Construcción y Demolición, 2014). Así mismo se estima que actualmente sólo el 4% de los RCD que se generan, son aprovechados (3% reciclaje y 1% reúso) (Cámara Mexicana de la Industria de la Construcción).

Así también para cada nueva obra de infraestructura se requieren enormes cantidades de agregados pétreos por lo que la tendencia actual es evitar la acumulación de residuos. Así mismo reducir en alguna medida el consumo de recursos naturales necesarios para producir agregados de modo de emplear en diferentes obras (Medina *et al.*, 2014). Por consiguiente los agregados que provienen de los desechos resultan una alternativa de reutilización en la edificación de estructuras, sustituyendo a los agregados naturales (agregados tradicionales) de una manera muy eficiente por su impacto ambiental y económico (Silva *et al.*, 2016).

De acuerdo a Silva *et al.* (2016), los agregados de residuos de construcción y demolición son producto: de los residuos de mampostería, residuos de concreto, producto de agregados reciclados mezclados y del material fresado de pavimentos, que contienen por lo general materiales contaminantes como ser: caucho, vidrio, plástico y madera que inciden en el comportamiento físico y mecánico del material. Así mismo de acuerdo a Pasandin A.R. y Pérez I. (2014), los concretos asfálticos fabricados a partir de residuos de construcción y demolición presentan propiedades de resistencia a fatiga muy similares a los concretos asfálticos tradicionales.

Por consiguiente en esta investigación lo que se pretende es experimentar el comportamiento a fatiga de los concretos asfálticos que contienen agregados de residuos de construcción. Así mismo evaluar la vida a fatiga bajo los enfoques de deterioro de rigidez y el enfoque de energía.

Materiales y método

Para caracterizar a fatiga el concreto asfáltico elaborado a partir de una HMA se fabricaron un total de 29 vigas prismáticas de 380 ± 6 mm de largo, 63 ± 2 mm de ancho y 50 ± 2 mm de espesor, tomando en cuenta combinaciones (en peso) de agregado mineral y agregado RCD en las siguientes proporciones: 100 – 0, 90 – 10, 80 – 20, 70 – 30 y 60 – 40. El primer número hace referencia al porcentaje en peso del agregado mineral y el segundo número al porcentaje en peso de RCD respectivamente, en concordancia a especificaciones estándares.



Materiales

En esta investigación se empleó un cemento asfáltico proveniente de la refinería Miguel Hidalgo del Estado de Hidalgo perteneciente al municipio de Tula de Allende, a 82 km al norte de la Ciudad de México. En la Tabla 1 se muestran los resultados de las pruebas de caracterización realizadas a dicho material, los cuales indican que el cemento asfáltico clasifica como un AC-20 (ASTM D 3381/3381M). Adicionalmente, se clasifica como un PG 64 – 22 de acuerdo a la norma AASHTO M320 – 10.

Tabla 1 Caracterización del cemento asfáltico

Ensayos	Resultado	Especificación	Método de ensayo ASTM
Ligante original			
Viscosidad dinámica a 60 °C (Pa-s)	232	200 ± 40	D 2171
Viscosidad cinemática a 135 °C; (mm ² /s = 1 centistoke)	375	300 mínimo	D 2170
Viscosidad Saybolt-Furol a 135 °C (s)	231	120 mínimo	D 88
Penetración en décimos de mm a 25 °C, 100 g, 5 s	72	60 mínimo	D 5
Punto de inflamación, Copa Abierta de Cleveland (°C)	239	232 mínimo	D 92
Punto de combustión, Copa Abierta de Cleveland (°C)	274	-	D 92
Prueba anillo y esfera (°C)	48	48-56	D 36
Ductilidad a 25 °C, 5 cm/minuto, (cm)	90	-	D 113
Peso específico a 25 °C	1.025	-	D 70
Pérdida por calentamiento en la prueba de RTFOT (%)	0.53	1 máximo	D 2872
Del residuo de la prueba de la Película Delgada:			
Penetración en décimos de mm a 25 °C, 100 g, 5 s	40	-	D 5
Prueba anillo y esfera (°C)	55.2	-	D 36
Ductilidad a 25 °C, 5 cm/minuto, (cm)	51	50 mínimo	D 113

Por otra parte, el agregado mineral utilizado fue un basalto vesicular triturado proveniente del banco de materiales ubicado en el km 38.5 de la carretera federal México-Cuernavaca. Los agregados reciclados provienen de la demolición y desechos de la industria de la construcción, tales como agregado mineral de diferentes fuentes (43%) y yeso, concreto hidráulico y mortero (38%) y cerámica y ladrillo (19%), ver Figura 1 (Ossa *et al.*, 2016). En las Tablas 2, 3 y 4 se presentan los resultados de las propiedades de consenso, de origen y de rutina para las distintas combinaciones de agregados. Como se puede observar esta última tabla los resultados nos muestran que las partículas porosas en los materiales RCD inciden en la capacidad de absorción de las combinaciones de agregados reciclados.



Figura 1 Agregados basálticos vesiculares y RCD (Esparza L., 2016)

Tabla 2 Resultados de pruebas de consenso (García J. L., 2016)

Ensayo	Control	90 - 10	80 - 20	70 - 30	60 - 40	Especificación	Norma
Angularidad del agregado grueso (%)	100 / 100	100 / 100	100 / 100	100 / 100	100 / 100	95 / 90 mínimo	ASTM D 5821
Angularidad del agregado fino (%)	70	69	66	65	65	45 mínimo	ASTM C 1252
Partículas alargadas y planas	28	28	26	26	25	35 mínimo	ASTM D 4792
Equivalente de arena (%)	64	61	59	55	54	50 mínimo	ASTM D 2419

Tabla 3 Resultados de pruebas de origen (García J. L., 2016)

Ensayo	Control	90 - 10	80 - 20	70 - 30	60 - 40	Especificación	Norma
Desgaste de Los Ángeles (%)	22	24	26	26	28	30 máximo	ASTM C 131
Prueba de sanidad del agregado grueso (%)	1	N / A*	N / A*	N / A*	N / A*	15 máximo	ASTM C 88

* No aplica: debido a que el compuesto químico reacciona con el cemento portland adherido a las partículas de agregados RCD, desintegrando muy súbitamente las partículas. Por consiguiente, no es representativa.

Tabla 4 Resultados de la prueba de rutina (García J. L., 2016)

Tamiz	Gravedad específica aparente					% Absorción				
	Combinación de agregado mineral - RCD									
	100 - 0	90 - 10	80 - 20	70 - 30	60 - 40	100 - 0	90 - 10	80 - 20	70 - 30	60 - 40
1/2" a No. 4	2.712	2.705	2.689	2.675	2.662	2.930	3.300	4.160	4.940	5.650
No. 8 a Filler	2.773	2.767	2.754	2.742	2.730	4.910	5.360	6.360	7.280	8.120

2.2. Granulometría

En la Figura 2, se muestra la granulometría empleada para la fabricación de los especímenes prismáticos de concreto asfáltico en las que se utilizó diferentes combinaciones de RCD. Ésta granulometría tiene un tamaño máximo de 3/4" (19 mm) y un tamaño máximo nominal de 1/2" (12.5 mm). Para la selección de esta granulometría, se tomaron en cuenta las recomendaciones del Instituto del Asfalto (2001) para la elaboración de mezclas asfáltica densas.

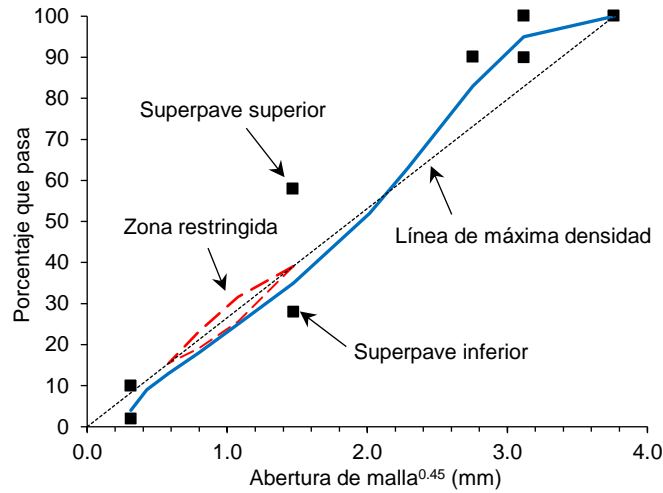


Figura 2 Granulometría

2.3. Diseño de la mezcla asfáltica

Para la ejecución de esta investigación, se utilizó el diseño de la mezcla asfáltica definido por García J. L., (2014) quien utilizando los mismos materiales pétreos y asfálticos, así como iguales características granulométricas, determinó un contenido óptimo de cemento asfáltico de 6.8% medido con respecto a la masa del agregado y un valor de TSR (*Tensile Strength Ratio*) de 85%. Dicho diseño se basó en la metodología *Superpave* establecida en la *Strategic Highway Research Program* (SHRP) (Asphalt Institute, 2001), se llevó a cabo para un tránsito (ESAL's) de 9.5×10^6 el cual corresponde al Nivel 2 de dicha metodología y es representativo de vialidades urbanas. En las Tablas 5 y 6, se presentan las especificaciones de compactación y de propiedades volumétricas que fueron tomadas en cuenta durante el diseño volumétrico de la mezcla asfáltica.

Tabla 5 Especificaciones de compactación para el nivel II (Asphalt Institute, 2001)

ESAL de diseño (millones)	Número de giros		
	Inicial	Diseño	Máximo
3 - 30	8	100	160

Tabla 6 Especificaciones de las relaciones volumétricas (Asphalt Institute, 2001)

ESAL de diseño (millones)	Densidad requerida (porcentaje de G_{mm})			VMA(*) Porcentaje mínimo Tamaño nominal máximo (mm)					VFA(**)	Proporción de polvo (Filler)
	$N_{inicial}$	$N_{diseño}$	$N_{máximo}$	37.5	25	19	12.5	9.5	mínimo	
mar-30	≤ 89.0	96	≤ 98.0	11	12	13	14	15	65-75	0.6 - 1.2

(*) Vacíos en el agregado mineral.

(**) Vacíos llenos de asfalto.

2.4. Elaboración de especímenes

En la elaboración de las vigas de concreto asfáltico en las que se aplicó agregados RCD, inicialmente los agregados dosificados se acondicionaron en un horno de convección a una temperatura de 170 °C (338 °F), la cual fue seleccionada cuidando de no exceder en más de 28 °C (82 °F) la temperatura de mezclado, por un periodo de 16 horas. Para la determinación de la temperatura de mezclado se tomaron en cuenta las recomendaciones del PROTOCOLO AMAAC esto es, 143 °C (289 °F) para un cemento asfáltico tipo PG 64-22. Después del mezclado, se llevó también a cabo el curado de la mezcla a la temperatura de compactación (135 ± 2 °C, 275 ± 36 °F) por un periodo de 240 ± 10 minutos, moviendo el material cada 30 minutos. Posterior al tiempo de curado se extrajeron las mezclas del horno e inmediatamente se procedió a su compactación en el compactador de rodillo liso, como se muestra en la Figura 3.



Figura 3 Compactación en el rodillo liso

Evaluación a fatiga por flexión del concreto asfáltico

3.1. Evaluación a la fatiga

El comportamiento a fatiga de los concretos asfálticos utilizados en pavimentos se ha estudiado durante varias décadas; sin embargo, todavía es un fenómeno poco entendido. El objetivo de la mayoría de los estudios de fatiga se concentra en investigar y predecir este comportamiento a fin de evitarlo o mitigarlo. La predicción de la vida a la fatiga del concreto asfáltico es un aspecto de gran relevancia en el diseño estructural de pavimentos. Así mismo el agrietamiento ocasionado por el daño acumulado debido al paso repetido de los vehículos suele iniciarse en la cota inferior de la carpeta asfáltica donde los esfuerzos y deformaciones a la tensión son más altos. Con el aumento del número de ciclos de carga, las grietas se propagan a la superficie manifestándose de manera longitudinal y transversal, formando un patrón comúnmente llamado agrietamiento tipo piel de cocodrilo. Entre los factores

que influyen para provocar el deterioro por fatiga son: las cargas de los vehículos (sobrecargas), incremento en el volumen del tránsito y las presiones de inflado de los neumáticos. Por consiguiente para tratar esta deficiencia la literatura técnica recomienda la utilización de asfaltos modificados (Fatemi A. y Yang L., 1998)

De acuerdo a Souliman *et al.* (2012), la literatura técnica hace referencia a dos conceptos principales para la definición de falla por fatiga que se utiliza para la interpretación de pruebas de flexión cíclica en el dispositivo de cuatro puntos, el primero de ellos se basa en el concepto de energía disipada y el segundo en el concepto de la degradación del módulo de rigidez del material.

3.2. Evaluación a fatiga bajo el enfoque de energía

Al aplicar carga a un material, se generan esfuerzos internos que llevan a deformarse al material. Sin embargo al retirar la carga del material los esfuerzos se eliminan y la deformación se recupera total o parcialmente. El área bajo la curva esfuerzo-deformación representa la energía del material. Así mismo se llama “bucle de histéresis” al proceso de carga y descarga. Por consiguiente, si el área que describe las curvas de carga y descarga coincide en su trayectoria, toda la energía aplicada en el material se recupera después de que se retire la carga. Si es el caso en que el área bajo la curva que los ciclos de carga y descarga generan no coincide, se registra una pérdida de energía en el material como se muestra en la Figura 4. Ésta energía se transforma en trabajo mecánico, generación de calor, o daños en el material. De modo que la diferencia de energía se conoce como energía disipada del material causado por los pasos de los vehículos (Carpenter *et al.*, 2003, Van Dijk y Vesser 1992, SHRP A-404 1994, Van Dijk 1975, Tayebali *et al.*, 1993, Tayebali *et al.*, 1992, Rowe G. M., 1993).

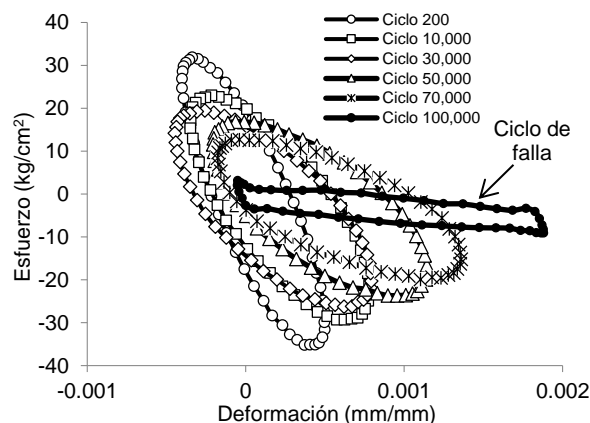


Figure 4 Diferentes bucles de histéresis en la curva esfuerzo-deformación

3.2.1. Método Carpenter

El método de Carpenter utiliza el cambio de la energía disipada para relacionar el daño acumulado y la vida a fatiga. Éste método define que la falla a fatiga ocurre

en el ciclo de carga en el cual los valores de la relación del cambio de energía (RDEC) definida por la ecuación 1 deja de ser constante (Carpenter *et al.*, 2003). El parámetro RDEC es considerado por algunos autores como un parámetro apropiado para el análisis del comportamiento a fatiga de concretos asfálticos (Shen *et al.*, 2006):

$$RDEC = \frac{DE_{n+1} - DE_n}{DE_n} \quad (1)$$

Donde: DE_n = energía disipada en el ciclo de carga n ; DE_{n+1} = energía disipada en el ciclo de carga $n + 1$.

La representación gráfica de los valores de RDEC en función del número de ciclos de aplicación de carga, describen la curva de daño del material, la cual presenta una forma de U. De acuerdo a Carpenter *et al.* (2003), la curva se divide en tres etapas e indican como la energía se transforma o disipa.

Etapa 1: se caracteriza por un descenso muy súbito de la curva. Este descenso en el valor de RDEC obedece en parte a la orientación de las moléculas y la tixotropía del material (Ghuzlan K.A. y Carpenter S.H., 2000, Shen S., Chiu H. M. y Huang H., 2010).

Etapa 2: la trayectoria de la curva de daño tiende a ser horizontal durante un prolongado número de ciclos de carga, reflejando que el material ha sufrido un daño interno por el efecto repetido de la carga, el cual se hace evidente por la aparición de microfisuras. El valor de RDEC en esta etapa es llamado PV del inglés *plateau value* (valor de meseta).

Finalmente la etapa 3: se caracteriza por un aumento del valor de RDEC indicando que el material comienza a tener un daño por fatiga. Bajo este enfoque el punto de falla (N_f) se define como el número de ciclos de carga donde el cambio en la relación de energía comienza incrementarse súbitamente como se muestra en la Figura 5.

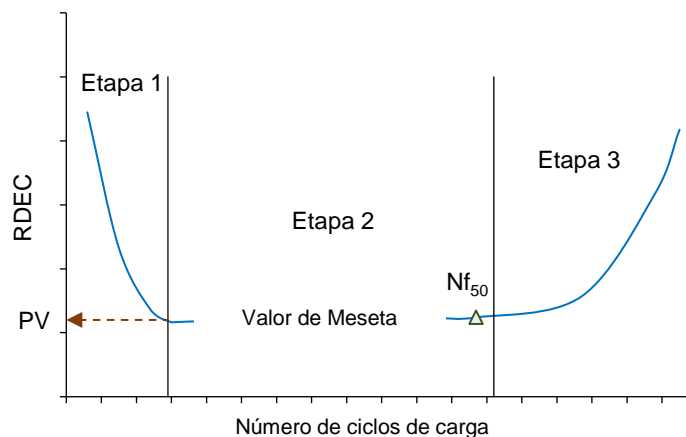
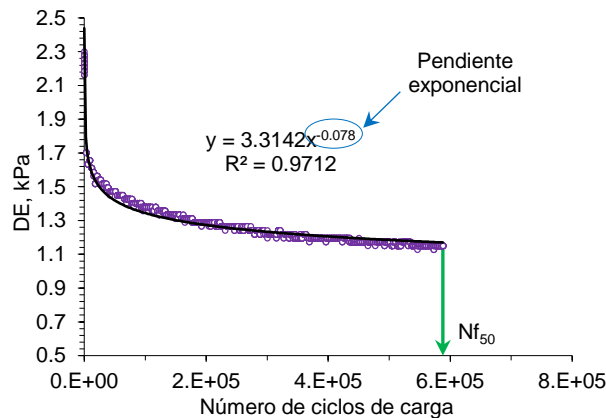


Figura 5 Ejemplo típico de RDEC versus ciclos de carga (Carpenter *et al.*, 2003)

De acuerdo a Tayebali *et al.* (1993), Ghuzlan K.A. (2001) y Carpenter *et al.* (2003), el parámetro PV, puede representarse con el valor de RDEC que corresponde al ciclo de carga donde se presenta un 50% de degradación de la rigidez inicial del material (Nf_{50}) y es por ello que para determinar el valor de PV, pueden emplearse las Ecuaciones 2 y 3. Estas ecuaciones son aproximadamente iguales en pruebas de fatiga para bajas deformaciones/daño (Shen S. y Carpenter S.H., 2007). Así mismo dichas ecuaciones dependen de la pendiente exponencial, k , de la curva ajustada energía disipada (DE) versus ciclos de carga, como se muestra en la Figura 6. El punto de falla definido, Nf_{50} , puede obtenerse fácilmente de los ensayos estándar de fatiga (Tayebali *et al.*, 1993 y Ghuzlan K.A., 2001).

$$PV = \frac{1 - \left(1 + \frac{100}{Nf_{50}}\right)^k}{100} \quad (2)$$

$$PV = -\frac{k}{Nf_{50}} \quad (3)$$



3.3. Evaluación a fatiga bajo el enfoque de la rigidez

- Norma AASHTO T 321

La norma AASHTO T 321 “*Determining the Fatigue Life of Compacted Hot Mix Asphalt Subjected to Repeated Flexural Bending*”, utiliza el criterio de degradación de rigidez para definir la falla por fatiga del material. Considera que el número de ciclos a la falla es aquel durante el cual, la rigidez del material representa el 50% del valor inicial.

3.4. Ensayo de fatiga por flexión en cuatro puntos

El objetivo de este ensayo es determinar la resistencia a la fatiga de las vigas de concreto asfáltico extraídas de las secciones de capa asfáltica analizada o de muestras elaboradas en el laboratorio. Los ciclos de aplicación de carga sobre la muestra hasta la falla obtenidos por este ensayo son usados para determinar la resistencia a la fatiga de las capas de concreto asfáltico afectadas con cargas de tráfico real. Dicho ensayo puede ejecutarse bajo condiciones de esfuerzo o deformación controlada. Durante la prueba la viga se apoya en 4 puntos y recibe la carga en los dos centrales (Figuras 7). En los dos puntos externos, existe una restricción vertical del movimiento lo que hace que la viga presente flexión. El comportamiento obtenido equivale al de una viga isostática sometida a flexión pura (Momento puro) entre estos dos puntos intermedios.



Figura 7 Apoyo en 4 puntos y distribución de carga

A partir del ensayo experimental se pueden determinar los siguientes parámetros:

Esfuerzo a la tensión máxima

$$\sigma_t = \frac{3aP}{bh^2} \quad (4)$$

Donde: σ_t = esfuerzo a la tensión máxima, en Pa; a = espaciamiento centro a centro entre las abrazaderas (Cox: 0.1190 m; IPC: 0.1185 m); P = carga aplicada por actuador, en N; b = promedio del ancho de la muestra, en m; h = promedio de la altura de la muestra, en m.

Deformación máxima a la tensión:

$$\varepsilon_t = \frac{12\delta h}{3L^2 - 4a^2} \quad (5)$$

Donde: ε_t = deformación máxima a la tensión, en m/m; δ = máxima deflexión en el centro de la viga, en m; a = el espacio entre las abrazaderas de su interior, 0.357/3 m, (0.119m); L = longitud de la barra entre las abrazaderas exteriores, 0.357 m.

Rigidez a la flexión:

$$S = \sigma_t / \varepsilon_t \quad (6)$$

Donde: S = rigidez a la flexión.

3.5. Límite de endurecimiento a fatiga (FEL, Fatigue endurance limit)

La existencia de un límite de endurecimiento a fatiga fue propuesta por Monismith *et al.* (Monismith *et al.*, 1970). El límite de endurecimiento se define como la una amplitud de deformación por debajo del cual el concreto asfáltico no presenta daños significativos por fatiga cuando es sometido a un ilimitado número de ciclos de carga (NCHRP, 2010). De acuerdo al reporte 646 de la NCHRP (2010), se utiliza el modelo expresado en la Ecuación 7 para determinar el límite de endurecimiento a fatiga de laboratorio.

$$FEL = \hat{y}_0 - t_\alpha s \sqrt{1 + \frac{1}{n} + \frac{(x_0 - \bar{x})^2}{S_{xx}}} \quad (7)$$

Donde: \hat{y}_0 = log de la predicción del nivel de deformación ($\mu\varepsilon$); t_α = valor de la distribución; t para $n - 2$ grados de libertad = 1.9432 para $n = 8$ con $\alpha = 0.05$; s = estimación de la desviación estándar a partir del análisis de regresión, también se hace referencia al error estándar del Microsoft Excel; n = número de muestras = 8; $x_0 = \log 50,000,000 = 7.69897$; \bar{x} = promedio del *log* de los resultados a la vida a fatiga; $S_{xx} = \sum_{i=1}^n (x_0 - \bar{x})^2$ (Nota: log de vida a fatiga).

Resultados y Discusión

En las Tablas 7 y 8, se presentan los ciclos de carga en los que presenta un estado de falla de los especímenes de concretos asfálticos en los que se utilizó agregados reciclados de construcción y demolición hasta un 40%, bajo los enfoques de degradación de la rigidez (AASHTO T 321) y el enfoque de energía (Carpenter S.H.), como se puede observar dichos enfoques presentan resultados muy similares. Así mismo, dichas tablas no presentan en la totalidad de los resultados obtenidos para las diferentes amplitudes de deformaciones; debido a que los especímenes fabricados no cumplían con especificaciones estándares.



Tabla 7 Resumen de resultados de la prueba a fatiga según AASHTO

ID	Nivel de deformación	Vacíos de aire	AASHTO Ciclo falla	Vacíos de aire	AASHTO Ciclo falla	Vacíos de aire	AASHTO Ciclo falla	Vacíos de aire	AASHTO Ciclo falla	Vacíos de aire	AASHTO Ciclo falla
	($\mu\epsilon$)	(%)	Mezcla control	(%)	90 - 10	(%)	80 - 20	(%)	70 - 30	(%)	60 - 40
V1	400	3,61	834779	4,11	848090	5,50	412365	4,09	281010	4,40	165010
V2	400	4,32	982228	3,36	643146	4,80	584014				
V3	500	3,64	771967	3,38	428764			4,47	177010	3,96	136658
V4	500	3,94	305962					3,94	138010		
V5	600	3,8	269875	3,50	206292	6,17	81009	3,51	51010	3,74	51010
V6	600	4,07	172635							4,37	33003
V7	750	4,60	114519	4,48	37753	3,21	60000	3,78	29050	3,69	18598
V8	750	4,17	37698			6,09	24000			3,96	18010

Tabla 8 Resumen de resultados de la prueba a fatiga según enfoque de energía

ID	Nivel de deformación	Vacíos de aire	Carpenter Ciclo falla	Vacíos de aire	Carpenter Ciclo falla	Vacíos de aire	Carpenter Ciclo falla	Vacíos de aire	Carpenter Ciclo falla	Vacíos de aire	Carpenter Ciclo falla
	($\mu\epsilon$)	(%)	Mezcla control	(%)	90 - 10	(%)	80 - 20	(%)	70 - 30	(%)	60 - 40
V1	400	3,61	951998	4,11	872596	5,50	448939	4,09	297762	4,40	173052
V2	400	4,32	1030497	3,36	679952	4,80	629192				
V3	500	3,64	804790	3,38	497101			4,47	188693	3,96	141752
V4	500	3,94	342105					3,94	154424		
V5	600	3,80	311218	3,50	214844	6,17	104231	3,51	56357	3,74	59293
V6	600	4,07	179592							4,37	39778
V7	750	4,60	118315	4,48	46029	3,21	80157	3,78	36185	3,69	21562
V8	750	4,17	46523			6,09	32692			3,96	22295

En la Figura 8 se presentan los valores promedio de los ciclos de carga de falla de los concretos asfálticos en las que se empleó agregados reciclados de construcción y demolición, así como de la mezcla de control, para los cuatro niveles de deformación (400, 500, 600 y 750 $\mu\epsilon$) de acuerdo a los criterios de falla especificado por AASHTO y el enfoque de energía (Carpenter S.H.). Esta figura muestra que conforme el porcentaje de RCD incrementa reduce la vida a fatiga del material.

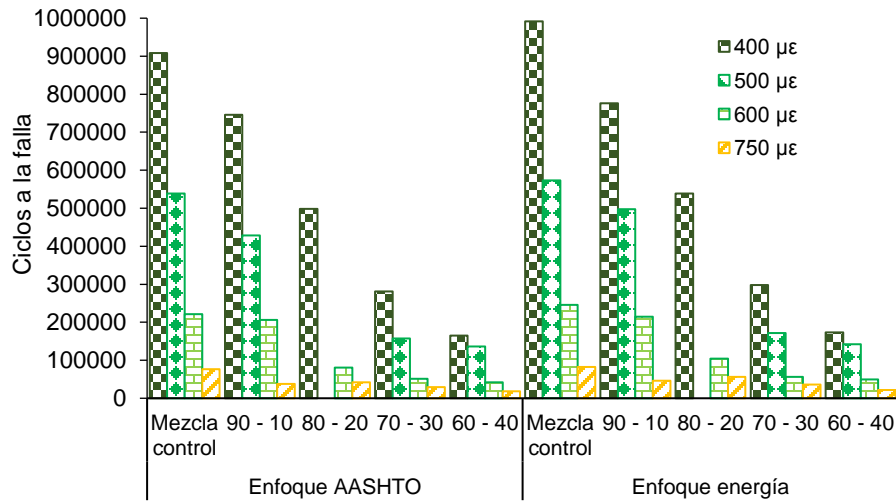


Figura 8 Promedio de ciclos hasta la falla por nivel de deformación y tipo de la mezcla

En la Figura 9 se presentan los valores de límite de endurecimiento a fatiga (FEL) para los enfoques de rigidez y energía. Éstos valores se determinaron a través de la Ecuación 7. Esta figura muestra en general que la aplicación de los agregados de residuos de construcción y demolición inciden en los valores del límite de endurecimiento del concreto asfáltico de manera significativa, a mayores porcentajes de RCD disminuye el valor de FEL el cual como se mencionó anteriormente representa el valor de la deformación por tensión en que el concreto asfáltico presentará una elevada vida a fatiga. Dichos resultados indican que podrán ser construidas carpetas asfálticas con diferentes porcentajes de RCD cuya vida a fatiga puede ser elevada si durante el diseño del pavimento se limita la deformación por tensión en la parte inferior de la capa a valores cercanos al FEL. Cabe mencionar que en la determinación del porcentaje de RCD para la construcción de una capa asfáltica deberán ser evaluados otros aspectos fundamentales como la susceptibilidad al daño por humedad y resistencia a la deformación permanente el concreto asfáltico, los cuales para las mezclas estudiadas en esta investigación fueron previamente evaluados por Ossa *et al.*, (2016).

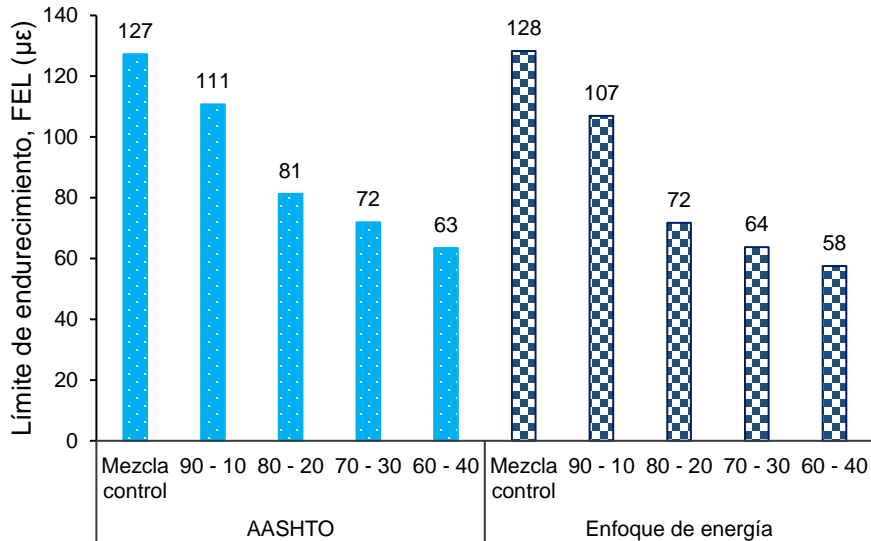


Figura 9 Límite de endurecimiento de fatiga

La Figura 10 compara los valores del parámetro PV de los diferentes concretos asfálticos en las que se aplicó agregados RCD en diferentes porcentajes. De acuerdo a esta figura los valores del parámetro PV tienden a aumentar el porcentaje de RCD, lo que indica que de acuerdo al enfoque de energía los concretos asfálticos elaborados se hacen más susceptibles al daño por fatiga en la medida que aumentó los porcentajes de RCD. Así mismo para relacionar las amplitudes de deformación y los valores del parámetro PV se utilizó la función potencial, debido a que se consiguió un ajuste de curva adecuado.

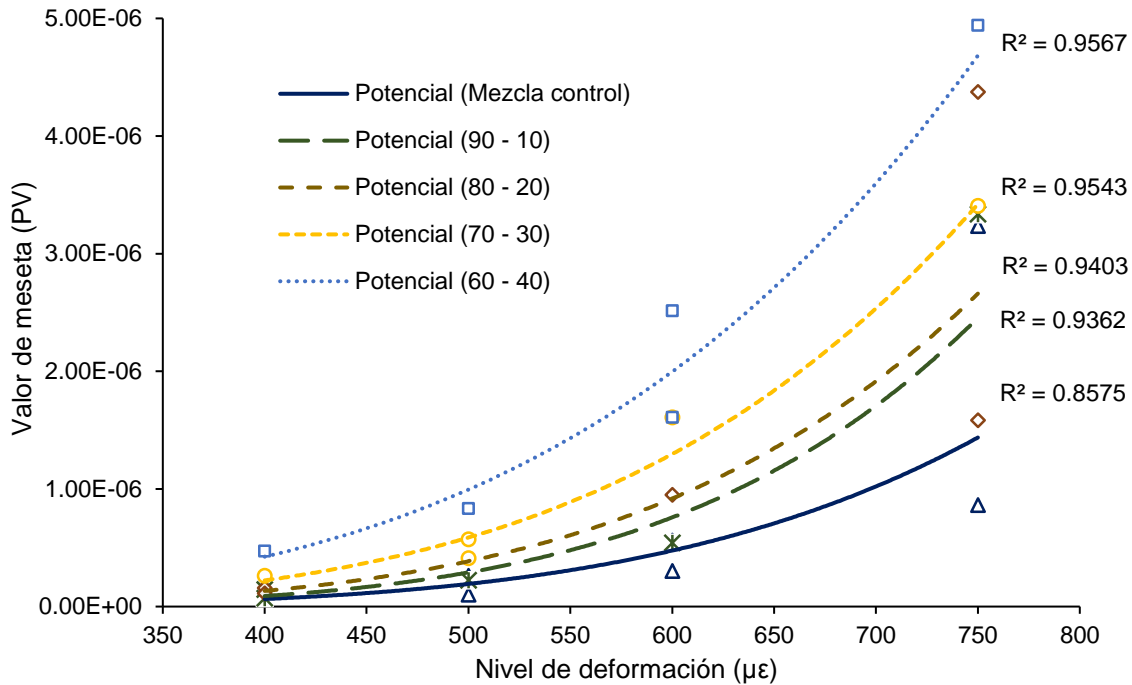


Figura 10 Relación entre el valor PV y el nivel de deformación

Conclusiones

En esta investigación se evaluó el comportamiento de fatiga del concreto asfáltico que contienen agregados de residuos de construcción y demolición hasta un 40%, así como un concreto asfáltico tradicional, basados en los conceptos de deterioro de la rigidez y disipación de la energía (DE). De acuerdo a los resultados obtenidos y el análisis realizado, se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- La inclusión de agregados de residuos de construcción y demolición en el concreto asfáltico reduce la resistencia a fatiga del material.
- También los resultados indican que el límite de endurecimiento de los concretos asfálticos son susceptibles al contenido de RCD con el cual se elabore el material. No obstante, podrán ser construidas carpetas asfálticas con diferentes porcentajes de RCD que podrían alcanzar una vida a la fatiga elevada si durante el diseño del pavimento se limita la deformación por tensión en la parte inferior de la capa a valores cercanos al FEL. Cabe mencionar que en la determinación del porcentaje de RCD para la construcción de una capa asfáltica deberán ser evaluados otros aspectos fundamentales como la susceptibilidad al daño por humedad y resistencia a la deformación permanente el concreto asfáltico.
- Los valores del parámetro PV incrementan considerablemente conforme se incrementa el porcentaje de los agregados provenientes de los residuos de construcción y demolición.



AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la planta de Asfaltos de la Ciudad de México y a la empresa Concretos Recicladados S.A. de C.V. por la donación de los materiales utilizados en esta investigación.

REFERENCIAS

AASHTO, (2014). Determining the Fatigue Life of Compacted Hot Mix Asphalt Subjected to Repeated Flexural Bending. AASHTO designation T 321.

Asphalt Institute, (2001). Superpave Mix Design. Superpave. Series No. 2 (SP-02). Asphalt Institute, Lexington, KY.

Cámara Mexicana de la Industria de la Construcción. Presentación "Plan de Manejo de Residuos de la Construcción y Demolición". www.cmic.org.

Carpenter S. H., Ghuzlan K., y Shen S., (2003). "Fatigue Endurance Limit for Highway and Airport Pavements". Transportation Research Record: Journal, No. 1832, pp. 131-138.

Fatemi A. y Yang L., (1998). "Cumulative Fatigue Damage and Life Prediction Theories: a Survey of The State of The Art for Homogeneous Materials". Int. J. Fatigue Vol. 20. No. 1, pp. 9-34, 1998. Elsevier Science Ltd.

García J. L., (2014). "Empleo de Residuos de Concreto y Demolición (RCD) en la Construcción de Carpetas Asfálticas". Tesis de investigación para optar al título de Maestro en Ingeniería Civil. Instituto Politécnico Nacional, Unidad Zacatenco, Sección de Estudios de Posgrado e Investigación. 166 p.

Ghuzlan K.A., (2001). "Fatigue Damage Analysis in Asphalt Concrete Mixtures Based Upon Dissipated Energy Concepts" Ph.D. Thesis, University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, IL.

Ghuzlan K.A., Carpenter S.H., (2000). "Energy-derived, damage-based failure criterion for fatigue testing". Transportation research record: Journal of the transportation research board 1723 (1) (2000) 141-149.

Medina C., Zhu W., Howind T., Sánchez de Rojas M.I., Frías M., (2014). Influence of Mixed Recycled Aggregate on the Physical e Mechanical Properties of Recycled Concrete. J. Clean. Prod. 68, 216-225.

Monier V., Hestin M., Trarieux M., Mimid S., Domröse L., Van Acoleyen M., Hjern P., Mudgal S., (2011). Study on the management of construction and demolition waste in the EU.

Monismith C.L., Epps J. A., Kasianchuk D. A. and McLean D. B., (1970). "Asphalt Mixture Behavior in Repeated Flexure". Report No. TE 70-5, Institute of Transportation and Traffic Engineering, University of California, Berkeley.

Normatividad del Distrito Federal Aplicada al reúso y reciclaje de Residuos de la Construcción y Demolición, (2014). Primer Encuentro de Residuos de la Construcción y Demolición en el Distrito Federal. Ciudad de México, 08 de Octubre de 2014.

Ossa A., García J.L. and Botero E., (2016). Use of Recycled Construction and Demolition Waste (CDW) Aggregates: A Sustainable Alternative for the Pavement



Construction Industry. Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, México. *Journal of Cleaner Production* 135 (2016) 379-386.

Pasandin A.R. and Pérez I., (2014). Mechanical Properties of Hot-Mix Asphalt Made with Recycled Concrete Aggregates Coated with Bitumen Emulsion. *Construction and Building Materials*. Volume 55, 31 March 2014, Pages 350-358.

Poon C.S., (2007). Reducing Construction Waste. *Waste Management* 27: 1715-1716.

Prowell B.D., Brown E.R., Anderson R.M., Sias-Daniel J., Von Quintus H., Shen S., Carpenter S.H., Bhattacharjee S. & Maghsoodloo S., (2010). "Validating the Fatigue Endurance Limit for Hot Mix Asphalt". NCHRP Report 646, Transportation Research Board, Washington, D.C.

Rowe G. M., (1993). "Performance of Asphalt Mixtures in the Trapezoidal Fatigue Test. *Association of Asphalt Paving Technologists*". Vol. 62, pp. 344-384.

Shen S. and Carpenter S.H., (2007). An Energy Approach for Airport Pavement Low Damage Fatigue Behavior. Civil and Environmental Engineering Department University of Illinois at Urbana-Champaign. Urbana, IL 61802 USA.

Shen S., Airey G.D., Carpenter S.H. and Huang H.A., (2006). "Dissipated Energy Approach to Fatigue Evaluation". *International Journal of Road Materials and Pavement Design*, 7 (1), 85-92.

Shen S., Chiu H.M., Huang H., (2010). "Characterization of fatigue and healing in asphalt binders". *Journal of Materials in Civil Engineering* 22 (9) (2010) 846-852.

SHRP-A-404, (1994). "Fatigue Response of Asphalt-Aggregate Mixes". Asphalt research program. Institute of Transportation Studies, University of California, Berkeley and Strategic Highway Research Program, National Research Council.

Silva R. V., De Brito J. y Dhir R.K., (2016). Performance of Cementitious Renderings and Masonry Mortars Containing Recycled Aggregates from Construction and Demolition Wastes. *Construction and Building Materials* 105 (2016) 400-415. journal homepage: www.elsevier.com/locate/conbuildmat.

Souliman W.A., Zeiada K.E., Kaloush and Mamlouk M.S., (2012). "Assessment of different flexure fatigue failure analysis methods to estimate the number of cycles to failure of asphalt mixtures". *Four-Point Bending – Pais & Harvey (Eds)*. © 2012 Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-0-415-64331-3. Arizona State University, Tempe, Arizona, US.

Tayebali *et al.*, (1993). "Modeling Fatigue Response of Asphalt Aggregate Mixtures". *Association of Asphalt Paving Technologists*, Vol. 62, pp. 385-421.

Van Dijk W., (1975). "Practical Fatigue Characterization of Bituminous Mixes". *Association of Asphalt Paving Technologists*, Vol. 44, p. 38.

Van Dijk W. and Vesser W., (1992). "The Energy Approach to Fatigue for Pavement Design". *Association of Asphalt Paving Technologists*, Vol. 46, pp. 1-40, 1977.