

Ensayo a fatiga, implementando la Semi probeta (SCB), sobre mezclas asfálticas con diferentes modificadores del cemento asfáltico

Delbono, Héctor Luis; Gullino, Nicolás Ezequiel

Héctor Luis Delbono

hdelbono@frlp.utn.edu.ar

LEMaC, Centro de Investigaciones Viales, Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires, Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional La Plata, Argentina

Nicolás Ezequiel Gullino

LEMaC, Centro de Investigaciones Viales, Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires, Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional La Plata, Argentina

Ingenio Tecnológico

Universidad Tecnológica Nacional, Argentina

ISSN-e: 2618-4931

Periodicidad: Frecuencia continua
vol. 2, 2020

ingenio@frlp.utn.edu.ar

Recepción: 01 Julio 2020

Aprobación: 07 Julio 2020

URL: <http://portal.amelica.org/ameli/jatsRepo/266/2661113010/index.html>

Resumen: La fisuración de los pavimentos asfálticos es una de las causas más frecuentes de deterioro. Debido a las características reológicas de las mezclas asfálticas, su comportamiento a la fisuración es complejo de analizar, ya que el material se comporta de manera diferente frente a las solicitaciones climáticas y del tránsito. El presente trabajo tiene por objetivo determinar la resistencia a fatiga, mediante el ensayo SCB (Viga Semicircular Simplemente Apoyada) sobre mezclas asfálticas convencionales en caliente, dosificadas con mismos agregados y curva granulométrica, variando el cemento asfáltico. Se plantea una metodología de moldeo manual con martillo percutor, como alternativa a la que plantea la normativa internacional, donde utiliza el compactador giratorio. Los resultados señalan que una mezcla asfáltica CAC D19 con 4,3% de asfalto CA20 modificado con 2,66% de NFU y 2% de SBS, ofrece mejor comportamiento a la fisuración. Y que la metodología de moldeo manual propuesta ofrece buena alternativa cuando no se dispone del compactador giratorio.

Palabras clave: Resistencia a fatiga, Mezcla asfáltica, Ensayo SCB, Cemento asfáltico.

Abstract: Cracking of asphalt pavements is one of the most frequent causes of deterioration. Due to the rheological characteristics of asphalt mixtures, their crack behavior is complex to analyze, since the material behaves differently when faced with climatic and traffic stresses. The objective of this work is to determine fatigue resistance, by means of the SCB test (Simply Supported Semicircular Beam) on conventional hot asphalt mixtures, dosed with the same aggregates and a granulometric curve, varying the asphalt cement. A manual molding methodology with percussion hammer is proposed, as an alternative to that proposed by international regulations, where the rotary compactor is used. The results indicate that a CAC D19 asphalt mix with 4.3% CA20 asphalt modified with 2.66% NFU and 2% SBS, offers better cracking behavior. And that the proposed manual molding methodology offers a good alternative when the rotary compactor is not available.

Keywords: Resistance to fatigue, Asphalt mix, SCB Test, Asphalt Cement.

1. INTRODUCCIÓN

Las mezclas asfálticas están compuestas por la unión de agregados pétreos, gruesos y finos, y un ligante asfáltico.

Los daños en ellas son diversos y sus causas son especialmente ocasionadas por el flujo vehicular y ciertas condiciones medioambientales (temperatura, humedad, rayos UV, precipitaciones), las cuales aceleran el deterioro de la estructura del pavimento.

La resistencia a la fatiga es la resistencia a flexión bajo cargas repetidas del tránsito donde en un pavimento se manifiesta por una pérdida de rigidez y posteriormente por una fisuración generalizada conocida como piel de cocodrilo. Entre los factores que pueden influir en la resistencia a la fatiga de la mezcla están las características propias del pavimento como el espesor de las capas, donde capas con espesores insuficientes sufrirán una flexión excesiva y se agrietarán rápidamente, como también la granulometría y tipo del árido, el contenido de asfalto, grado de compactación, entre otros.

Ante estos problemas, se implementa en el LEMaC, Centro de investigaciones viales de la UTN FRLP, el ensayo SCB (Semi Circular Bending), que consiste en un procedimiento rápido y confiable (Paredes Chérrez, Reyes Ortiz y Camacho Tauta, 2014; Valdés, Pérez-Jiménez y Botella, 2009), cuyo objetivo principal es medir la energía de fractura a una temperatura especificada y la tenacidad de la mezcla asfáltica (Limón-Covarrubias, Avalos Cueva, Valdés Vidal, Reyes Ortiz, Adame Hernández y Galaviz González, 2019; Godoi Carbunck, 2017; Gourab y Prapoorna, 2016; ASTM D8044, 2016; Kim, Mohammad y Elseifi, 2012).

El presente trabajo refleja una comparación de los resultados bajo dos metodologías de moldeo diferente para una misma mezcla asfáltica y luego los resultados obtenidos bajo una misma metodología de moldeo sobre mezclas asfálticas dosificadas variando el cemento asfáltico.

Se elabora una mezcla convencional del tipo CAC D19 con 4,5% de asfalto CA20 que denominaremos MA1 conformando una probeta de dimensiones 150 mm de diámetro y 115 mm \pm 5 de altura, moldeada con el compactador giratorio de la empresa YPF. Luego, se confeccionaron probetas de similar dimensiones a la especificada anteriormente, mediante el moldeo con percutor manual en laboratorio, con variaciones del cemento asfáltico: mezcla CAC D19 con CA20 con 4,1% de asfalto (MA2), con CA20 + 8% NFU con 4,3% de asfalto (MA3), con CA20 + 2,66 % NFU + 2% SBS con 4,3% de asfalto (MA4) y CAC D19 con 4,3% de AM3 (MA5), los % son en peso.

El presente trabajo se encuentra enmarcado en el área de Tecnología de los Pavimentos Flexibles. Está Asociado al proyecto de investigación i+D titulado: Utilización de caucho reciclado de neumáticos fuera de uso en elementos de la construcción vial. Código: ECIFILP0007740TC.

2. DESARROLLO

2.1. Obtención de la Mezcla

Las mezclas se fabrican empleando áridos de la cantera Piatti y asfaltos proveídos por la empresa YPF.

La Tabla 1 presenta las dosificaciones correspondientes a cada tipo de mezcla asfáltica diseñada.

TABLA 1
Dosificaciones

Mezcla	Materiales para la mezcla CAC D19		Dosif. Total (%)	Peso total dosif. (g)
MA1	Material 1	06:20	30,56	1528
	Material 2	00:06	53,48	2674
	Material 3	CAL	2,2	109,83
	Material 4	06:12	9,26	463,18
	Asfalto	CA-20	4,5	225
	Total			100
MA2	Material 1	06:20	47,95	2397,5
	Material 2	12:20	8,63	431,6
	Material 3	00:06	38,36	1918
	Material 4	CAL	0,96	48
	Asfalto	CA-20	4,1	205
	Total			100
MA3	Material 1	06:20	47,85	2392,5
	Material 2	12:20	8,61	430,7
	Material 3	00:06	38,28	1914
	Material 4	CAL	0,96	47,9
	Asfalto	CA-20 +8%NFU	4,3	215
	Total			100
MA4	Material 1	06:20	47,85	2392,5
	Material 2	12:20	8,61	430,7
	Material 3	00:06	38,28	1914
	Material 4	CAL	0,96	47,9
	Asfalto	CA-20 +2%SBS +2,66NFU	4,3	215
	Total			100
MA5	Material 1	06:20	47,85	2392,5
	Material 2	12:20	8,61	430,7
	Material 3	00:06	38,28	1914
	Material 4	CAL	0,96	47,9
	Asfalto	AM3	4,3	215
	Total			100

2.2. Moldeo de la probeta

2.2.1. Mezcla MA1

Se provee la mezcla dosificada en el laboratorio del LEMaC a YPF. Se fabrica la probeta, de dimensiones 150 mm de diámetro y 115 mm \pm 2 mm de altura, compactada mediante compactador giratorio, Figura 1, según la normativa BS EN 12697-31:2019 (BSEN 12697-31, 2019) bajo las siguientes condiciones de moldeo:

- Presión de compactación durante los primeros 5 giros: 600 Kpa \pm 60 Kpa
- N° de giros: 95
- Presión de compactación después de los primeros 5 giros: 600 Kpa \pm 18 Kpa
- Cantidad de mezcla: 4800 g
- Velocidad de base giratoria: 30 Rpm \pm 0,5 Rpm
- Temperatura de mezclado: 155° C
- Temperatura de compactación: 145° C



FIGURA 1
Compactador Giratorio de YPF; Mezcla MA1.

Obtenida la probeta de 150 mm de diámetro y 115 mm \pm 2 mm de altura, se determina la densidad, luego se procede a cortar en el centro, obteniendo una probeta de 50 mm \pm 2 mm de espesor con un diámetro de

150 mm, descartando las partes externas. Luego, se corta al centro de la probeta, obteniendo 2 partes iguales, Figura 2.

Sobre el plano sometido a máxima tracción, en la mitad de la semi probeta se realiza una entalladura de unos 3 mm, cuyo objetivo es inducir el plano de falla durante el ensayo.

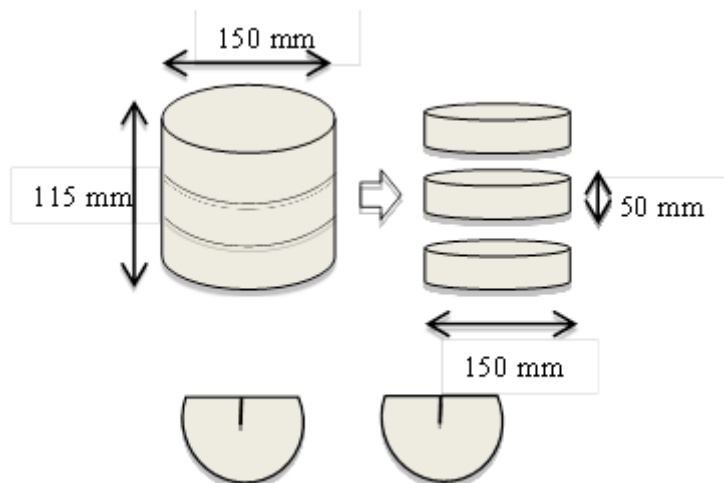


FIGURA 2
Dimensiones y obtención de la probeta central.

Por último, en una de las caras diametrales, se pinta con cal diluida en agua con el fin de obtener un contraste para la visualización del avance de las fisuras en el momento de la ejecución del ensayo hasta la finalización del mismo.

La densidad de la probeta MA1 moldeada mediante compactador giratorio resultó de $2,204 \text{ kg/m}^3$. Mientras que la densidad en laboratorio resultó de $2,441 \text{ kg/m}^3$.

2.2.2. Mezclas MA2, MA3, MA4 y MA5

Se confeccionan las probetas de 4800 g cada una, de 150 mm de diámetro y $115 \text{ mm} \pm 2 \text{ mm}$ de altura utilizando un martillo percutor, con base circular, aplicando presión en la posición 7 de velocidad, durante un tiempo de 2 minutos, generando una especie de amasado, buscando simular el compactador giratorio, Figura 3 y Figura 4. Al utilizar cementos asfálticos distintos, se debe establecer diferentes temperaturas de mezclado y compactación.

- Temperatura de mezclado MA2: 155° C
- Temperatura de compactación MA2: 145° C
- Temperatura de mezclado MA3: 165° C
- Temperatura de compactación MA3: 155° C
- Temperatura de mezclado MA4 y MA5: 175° C
- Temperatura de compactación MA4 y MA5 de 165° C

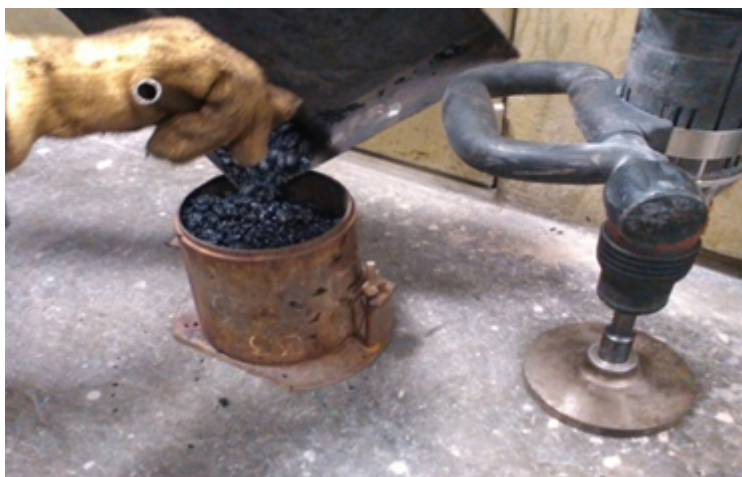


FIGURA 3
Colocación de la mezcla en el molde.



FIGURA 4
Moldeo manual de las mezclas asfálticas mediante martillo percutor.

Se analizan las densidades tanto en la etapa de la dosificación y luego del moldeo, Tabla 2.

TABLA 2
Densidades de las probetas obtenidas en la etapa de dosificación y moldeo con martillo percutor.

Probeta	Densidades dosificación (kg/m ³)	Densidades Moldeo (kg/m ³)
CA 20	2,441	2,438
CA 20 + 8% NFU	2,431	2,427
CA-20 + 2% SBS + 2,66% NFU	2,351	2,367
AM3	2,300	2,330

2.3. Ejecución de ensayo

Se acondiciona la probeta previamente a 20° C durante 2 hs. Luego se la coloca centrada y simplemente apoyada sobre una estructura diseñada que consiste en 2 rodillos, separados una distancia de 120 mm, es decir, igual al 80% de la longitud del diámetro, Figura 5.

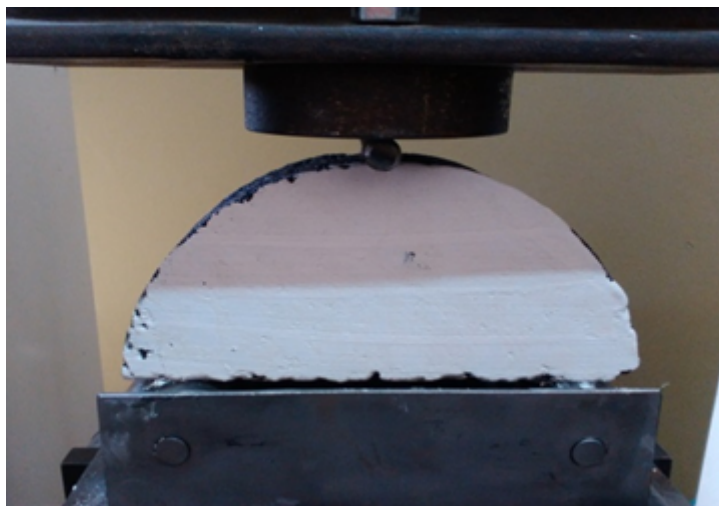


FIGURA 5
Probeta para ser ensayada.

Se ejecuta el ensayo utilizando el equipo EMIC, aplicando una fuerza constante en el centro de la luz de la semi probeta, a una velocidad de 0,5 mm/min hasta finalizar la ejecución del mismo, Figura 6.



FIGURA 6
Equipo EMIC para ejecución de ensayo.

Se determina como una prueba válida siempre y cuando la fisura termine dentro de una zona igual al 10% del diámetro de la probeta tomada desde el centro del plano de carga, Figura 7. En caso de que esto no ocurra, se descarta la probeta ensayando posteriormente otras muestras.

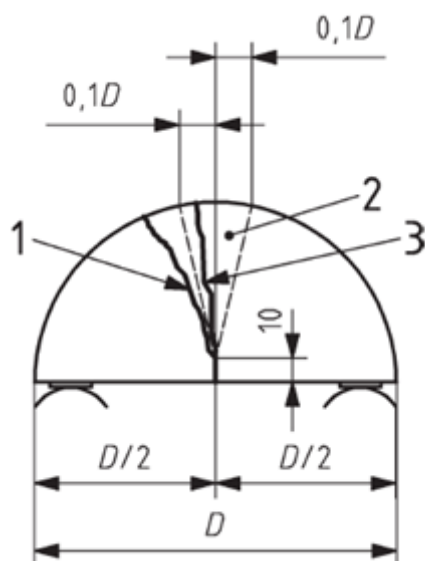


FIGURA 7
Zona aceptación o rechazo del ensayo.
Fuente: BS EN 12697-44 (2010).

dónde:

1. Ensayo rechazado
2. Área de aprobación
3. Ensayo aprobado

Para todos los casos los resultados resultaron válidos, por lo que se pudo establecer una curva Carga-Deformación, registrada por el software del equipo EMIC, del cual se obtuvo información como: la Carga Máxima que puede soportar la probeta, la Deformación a Carga Máxima y la Deformación a Rotura de la misma, pudiendo realizar un estudio del comportamiento de las mezclas asfálticas ensayadas.

La Figura 8 (Mezcla MA2) y Figura 9 (Mezcla MA5) muestran la fisura dentro de la zona de aceptación.

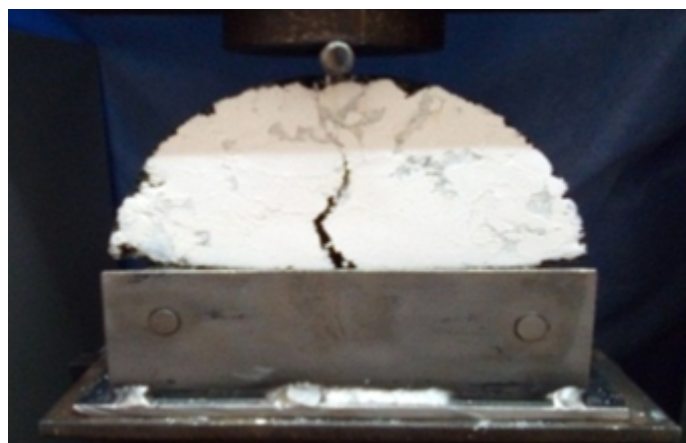


FIGURA 8
Mezcla probeta central MA2.

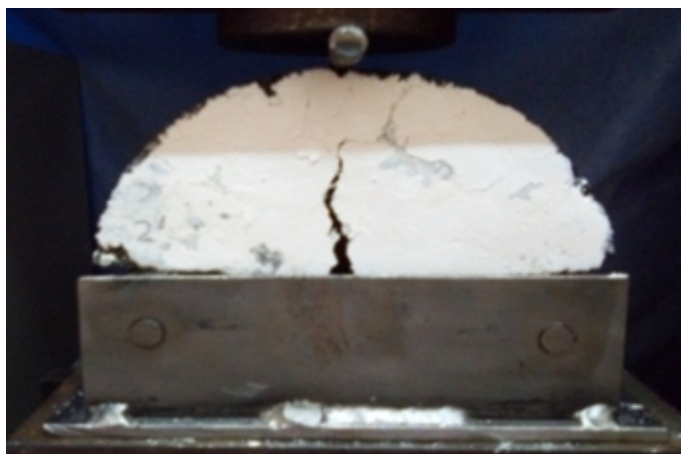


FIGURA 9
Mezcla probeta central MA5.

2.4. Parámetros a estudiar

Extrayendo los resultados del software de ensayo, volcándolos a una planilla excel, se procesan los datos determinando los siguientes parámetros:

2.4.1. Trabajo de fractura

El trabajo de fractura (W_f) se calcula como el área bajo la curva Carga-Deformación mediante la ecuación (1).

$$W_f = \int_0^{df} F(x) dx \quad [1]$$

dónde:

- W_f : trabajo de fractura
- F : fuerza en función de la deformación
- x : deformación
- df : deformación total

2.4.2. Energía de fractura

La energía de fractura (E_f) se calcula, ecuación (2), dividiendo el trabajo de fractura por el área del ligamento de la probeta antes de la prueba, Figura 10.

$$E_f = \frac{W_f}{A_{lig}} \quad [2]$$

dónde:

- E_f : Energía de fractura
- W_f : Trabajo de fractura
- A_{lig} : Área del ligamento

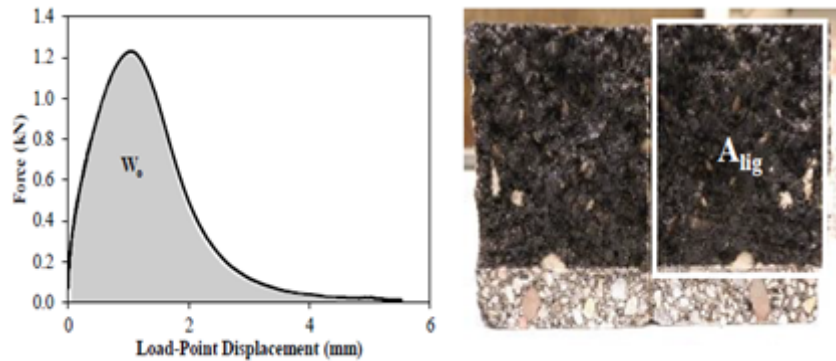


FIGURA 10
Trabajo de fractura y área del ligamento.

Fuente: Nsengiyumva G. (2015).

2.4.3. Índice de tenacidad

Se define como la energía disipada en el período de relajación, multiplicada por un factor de fragilidad, el cual corresponde al desplazamiento realizado desde la carga máxima, F_{max} , hasta que la carga ha caído a la mitad de su valor máximo.

Este índice de tenacidad (I_T) tiene como finalidad, determinar la capacidad que posee la mezcla de mantener unidos sus componentes una vez que ya ha alcanzado su resistencia máxima, se determina mediante la ecuación 3.

$$I_T = \frac{W_D - W_{F_{max}}}{A_{lig}} \times (\Delta_{mdp} - \Delta_{F_{max}}) \quad [3]$$

dónde:

- I_T : Índice de tenacidad ($J/m^2 \cdot mm$)
- W_D : Trabajo total realizado (N-mm)
- $W_{F_{max}}$: Trabajo realizado hasta la carga máxima (N-mm)
- Δ_{mdp} : deformación a $\frac{1}{2} F_{max}$ post pico (mm)
- $\Delta_{F_{max}}$: deformación a F_{max} (mm)
- A_{lig} : Área del ligamento (m^2)

2.4.4. CMOD (crack mouth opening displacement)

Se considera CMOD a la abertura en la superficie de la grieta, medida como la diferencia entre la apertura original y la distancia de apertura final de la semi probeta, Figura 11 y Figura 12.

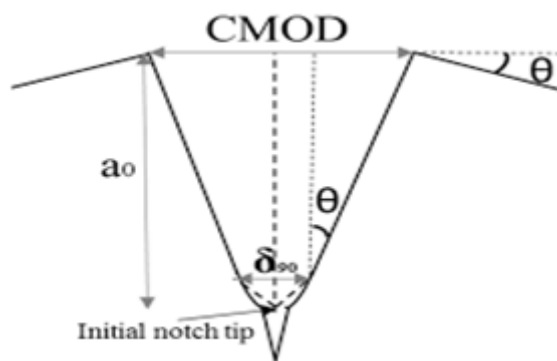


FIGURA 11
Medición del CMOD.

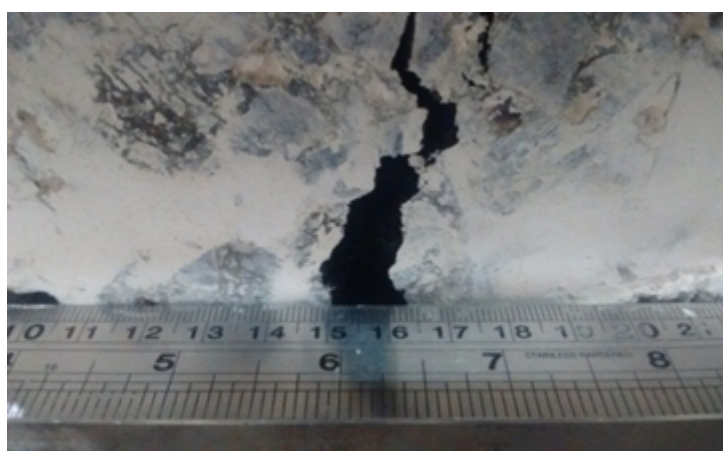


FIGURA 12
Determinación del CMOD mediante regla graduada.

3. RESULTADOS

De acuerdo con las curvas que proporciona el software de ensayo, Figura 13 a Figura 17, se obtiene mediante cálculos matemáticos realizados en Excel, los resultados de los parámetros mencionados en el punto 2.4, estos se reflejan en la Tabla 3. Se resaltan las probetas centrales por ejemplo, *CP5: Probeta 3 para la mezcla MA2*, Figura 14.

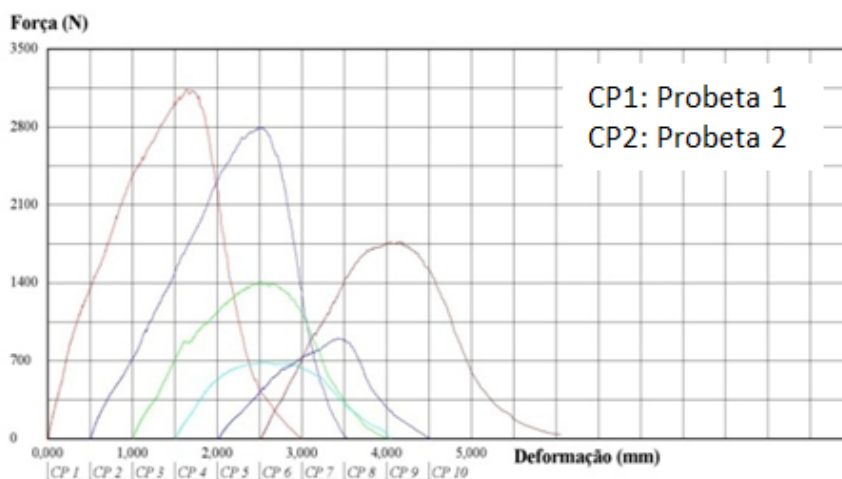


FIGURA 13
Mezcla MA1. Compactador giratorio.

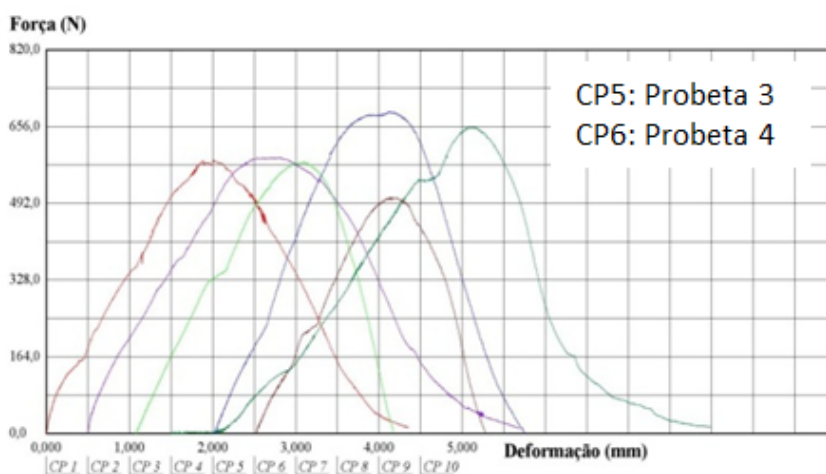


FIGURA 14
Mezcla MA2. Moldeo manual.

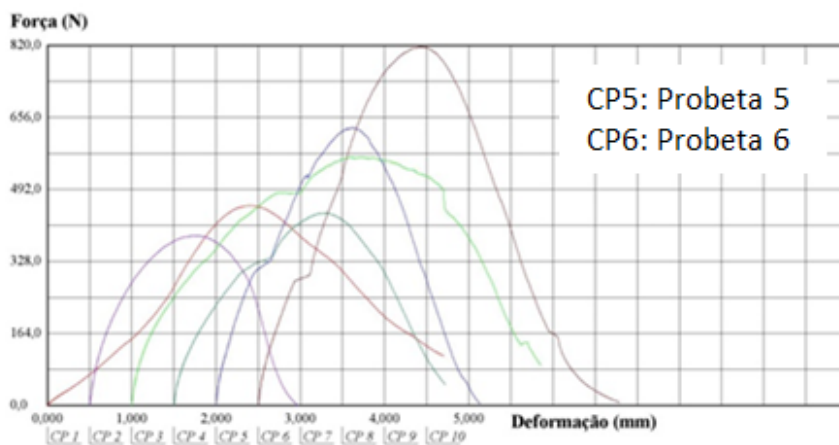


FIGURA 15
Mezcla MA3. Moldeo manual.

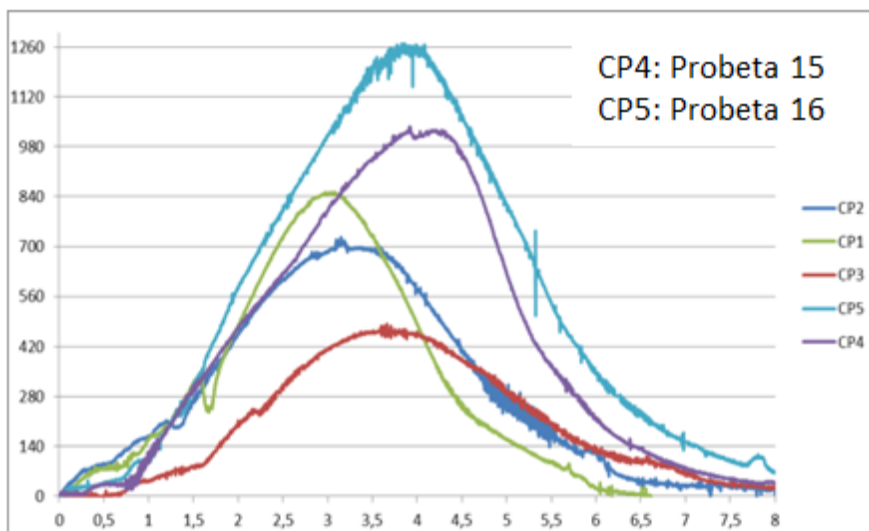


FIGURA 16
Mezcla MA4. Moldeo manual.

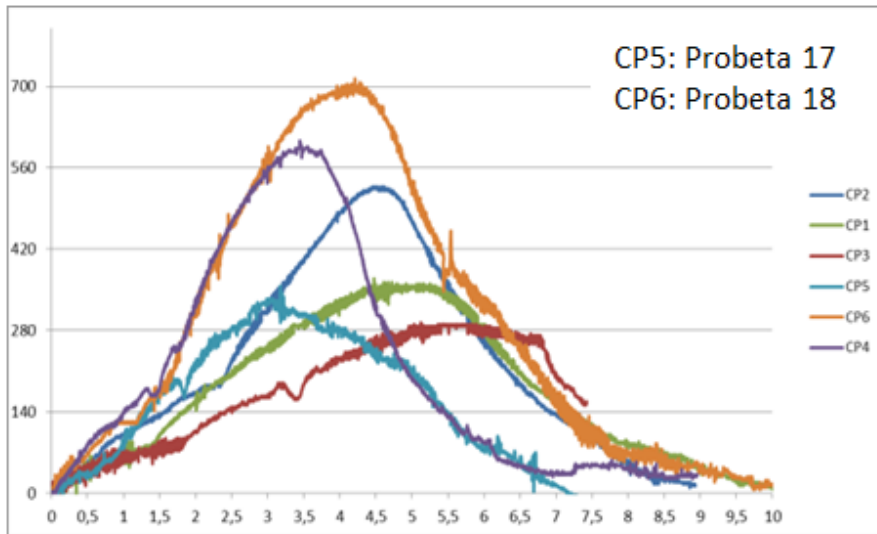


FIGURA 17
Mezcla MA5. Moldeo manual.

Se ensayan todas las probetas, tomando los especímenes centrales y de los extremos, Figura 13 a Figura 17, la Figura 18 presenta solo los especímenes centrales según normativa, para el caso de la metodología manual con martillo percutor.

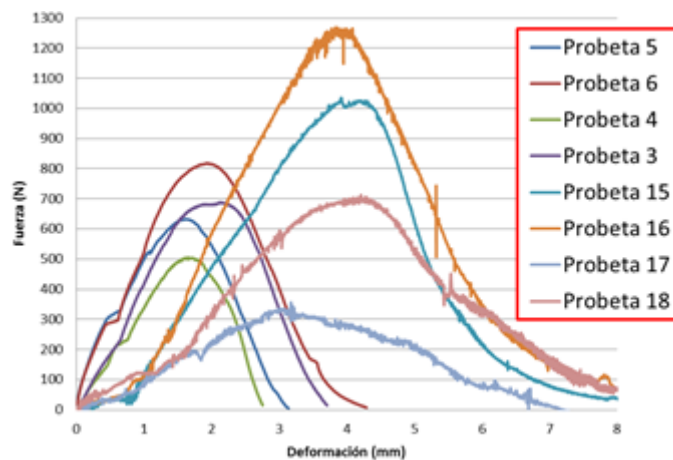


FIGURA 18
Curvas centrales; moldeo manual.






La Tabla 3 presenta los resultados de los ensayos realizados de resistencia a fatiga mediante la implementación del ensayo SCB sobre las diferentes mezclas asfálticas dosificadas con la variación del cemento asfáltico.

La probeta 1 y probeta 2, resaltadas en la Tabla 3, corresponden a las moldeadas con el compactador giratorio de YPF, las probetas restantes son las moldeadas mediante el martillo percutor manual en laboratorio.

TABLA 3
Resultados

Prob.	F_{max}	Def F_{max}	I_T	W_f	E_f	CMOD	
	N	mm	J/m ² .mm	N.mm	J/m ²	mm	
Centrales	1	3141,0	1,6	729,3	4822,9	1429,0	8
	2	2880,0	2,0	436,7	4402,5	1304,4	10
	3	688,4	2,1	154,3	1475,0	437,0	9
	4	505,4	1,7	75,9	815,0	241,5	8
	5	632,9	1,6	231,9	1170,0	346,7	7
	6	818,5	1,9	609,4	1849,0	547,9	9
Externas	7	584,6	2,0	75,2	280,0	124,4	7
	8	590,6	2,3	126,1	359,0	159,6	8
	9	580,7	2,1	249,7	904,0	401,8	9
	10	656,6	3,6	498,8	1604,0	712,9	10
	11	456,5	2,4	685,7	1196,0	531,6	8
	12	387,1	1,3	175,8	639,0	284,0	7
	13	566,8	2,6	611,3	1915,6	851,4	9
	14	439,3	1,8	244,9	918,4	408,2	8
Centrales	15	1035,0	3,9	178,6	2888,4	855,8	13
	16	1268,5	3,8	281,2	3637,1	1077,7	15
	17	356,6	3,2	244,9	1150,0	340,7	11
	18	713,1	4,2	189,2	2384,5	706,5	12
Externas	19	852,0	3,0	793,5	2151,9	956,4	9
	20	725,8	3,2	577,7	1949,1	866,3	9
	21	482,8	3,7	239,8	1303,3	579,2	9
	22	369,2	4,5	302,6	1476,0	656,0	13
	23	527,0	4,4	180,1	1660,3	737,9	12
	24	293,5	5,1	300,7	1326,2	589,4	15
25	605,8	3,4	422,7	1180,7	524,8	9	

dónde:

-  MA1
-  MA2
-  MA3
-  MA4
-  MA5

4. DISCUSIÓN

Se buscó establecer una metodología de moldeo manual mediante un equipo económico, simple de utilizar, que sea representativo a la de un compactador giratorio, lográndose con este procedimiento alcanzar densidades, entre las de dosificación y el moldeo, muy similares, pudiendo establecer que el moldeo implementado fue correcto. Sin embargo, una vez que la probeta central fue obtenida se evidenció que la distribución granulométrica de los áridos no era pareja en ambas caras, para una misma probeta, Figura 19 y Figura 20.



FIGURA 19
Distribución de áridos probetas centrales.



FIGURA 20
Diferencia granulométrica evidenciada en probetas exteriores.

La diferencia en la distribución granulométrica de las probetas evidencia, para una misma dosificación de mezcla asfáltica, la variabilidad de la fuerza máxima obtenida ($F_{max.}$), tanto en probetas centrales como en las probetas externas.

Por esta razón queda demostrado que los especímenes externos deben ser descartados de los resultados, debiendo utilizarse solo los especímenes centrales para los análisis.

Queda a futuro determinar si la dirección en la que la probeta es compactada, según la metodología manual adoptada, influye en las características de generar una probeta homogénea, donde el efecto de amasado impuesto, tratando de representar el moldeo del compactador giratorio, puede haber sido la causa de dicha variabilidad.

Según observaciones visuales realizadas a través de la cara expuesta pintada con cal, para determinar el recorrido de la fisura y la zona de aceptación del ensayo, la carga que toma cada probeta y el trabajo final desarrollado está sin duda, en función de la distribución granulométrica de los áridos, tipo y % de asfalto utilizado en la dosificación, como así también la temperatura de moldeo y energía de compactación empleada, como se pudo constatar en las dos alternativas de moldeo adoptadas. Al finalizar cada ensayo se observó que

la fisura de propagación recorre el camino más corto, bordeando el agregado que encuentra en su camino, Figura 21.

Los resultados obtenidos son sensibles a las variables de diseño mencionadas en el párrafo anterior. Se cree relevante tomar el tiempo de propagación de la fisura en estos ensayos, es un dato fácil de medir y posibilita comparativas entre diferentes muestras.

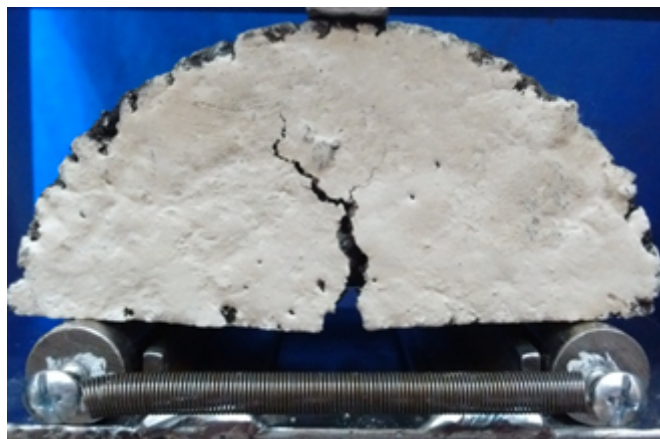


FIGURA 21

Desviación de la fisura en su recorrido al encontrar una partícula de árido.

El área de ligamento (A_{lig}) determinada para calcular la energía de fractura (E_f) tanto de las probetas centrales como de las externas es la siguiente:

Área del liga centrales: $0,050m \times 0,075m = 0,00375m^2$

Área del liga extremos: $0,030m \times 0,075m = 0,00225m^2$

La determinación del CMOD mediante regla graduada, es un parámetro que se determina una vez finalizado el ensayo, el mismo será obtenido a medida que se ejecuta el ensayo a partir de un LVDT (sensor de desplazamiento lineal), a través de un software de ensayo, el cual está en desarrollo conjuntamente con investigadores del CODAPLI (Centro de Investigación, Desarrollo e Innovación Tecnológica: Co diseño Aplicado), dependiente del departamento de sistemas de la UTN FRLP, el cual se encuentra enmarcado en el proyecto i+D titulado: Estudio y modelización de equipos, para la valoración de la fatiga en mezclas asfálticas, incluidos en la actual normativa europea". Código: ECUTNLP0004972.

5. CONCLUSIONES

De acuerdo a los resultados obtenidos de los diferentes ensayos SCB realizados a una temperatura de 20°C, a una velocidad de aplicación de carga de 0,5 mm/min y la definición de los parámetros especificados, se concluye:

La probeta 1 y probeta 2 de la mezcla MA1, CAC D19 con 4,5% de asfalto moldeadas con el compactador giratorio presentó en promedio una carga máxima de $F_{max} = 3010,5$ Newton, para una deformación de 1,8 mm, en promedio, presentando un energía de fractura (E_f) de $1366,7 J/m^2$ en promedio. Para este caso el control de densidad resultó de $2,204 kg/m^3$ después del moldeo con el compactador giratorio contra $2,441 kg/m^3$ obtenida en la dosificación.

Para la probeta 3 y la probeta 4, correspondientes a la mezcla MA2 compactada con martillo percutor, se obtuvo en promedio una carga $F_{max} = 596,9$ Newton, para una deformación de 1,9 mm en promedio, presentando una energía de fractura (E_f) de $339,3 J/m^2$ en promedio. Para este caso el control de densidad

resultó de $2,438 \text{ kg/m}^3$ después del moldeo con el martillo percutor contra $2,441 \text{ kg/m}^3$ obtenida en la dosificación.

Ante esta variación en los resultados, utilizando diferentes metodologías de moldeo, creemos necesario realizar más experiencias utilizando el compactador giratorio.

Teniendo en cuenta solo las probetas centrales moldeadas con el martillo percutor en laboratorio, la mezcla asfáltica que mejor se comportó fue la mezcla MA4, CAC D19 con 4,3% de asfalto, con CA20 + 2,66 % NFU + 2% SBS. Se obtuvo una carga $F_{\max} = 1151,75$ Newton en promedio, brindando una energía de fractura (E_f) de $966,75 \text{ J/m}^2$, para una deformación de 3,9 mm en promedio.

Mientras que la mezcla que menor beneficio presentó fue la mezcla MA2, CAC D19 con cemento asfáltico CA20 con 4,1% de asfalto, donde se obtuvo una carga $F_{\max} = 596,9$ Newton, en promedio, brindando una energía de fractura (E_f) de $339,25 \text{ J/m}^2$.

Las curvas elaboradas mediante Excel de las probetas centrales moldeadas con el martillo percutor, Figura 18, deja en evidencia el comportamiento a la deformación experimentada de las diferentes mezclas. La deformación, hasta alcanzar la carga máxima, para las mezclas MA2 y MA3 alcanza los 2 mm aproximadamente, mientras que para las mezclas MA4 y MA5, la deformación a la carga máxima ronda los 4 mm, el doble a las anteriores. Esto se atribuye a la modificación del cemento asfáltico NFU+SBS y AM3 respectivamente, brindando mayor elasticidad a la estructura de la mezcla, haciendo más dúctiles las mismas, evidenciado también en la apertura final de la fisura generada, CMOD, de entre 11 y 15 mm a diferencia de las anteriores donde el CMOD indicó entre 7 a 9 mm. Tabla 3.

No se puede definir un valor que indique la respuesta de las mezclas a la fatiga por ser las primeras experiencias y no encontrarse en la bibliografía internacional diseños similares. Sin embargo, se puede decir que se comportan satisfactoriamente comparando los resultados con otras investigaciones de la bibliografía internacional consultada (Marina Muñoz, 2013), que indican una energía disipada de aceptación de 350 J/m^2 , para mezclas densas y semidensa en caliente, para temperaturas de compactación similar a las del presente trabajo, lo cual en promedio de las probetas centrales, estarían cumpliendo. Lo mismo para el índice de Tenacidad (IT) donde recomiendan que este sea mayor de $200 \text{ J/m}^2 \cdot \text{mm}$ para un valor admisible de $175 \text{ J/m}^2 \cdot \text{mm}$.

Esto dependerá desde ya, del tipo de modificador del cemento asfáltico utilizado en la dosificación de la mezcla asfáltica, lo cual permite modificar la cohesión a la estructura de la mezcla, otorgando mayor resistencia a la fisuración.

Si bien se entiende que el método de ensayo cuasi estático de SCB no representa el comportamiento real a fatiga que sufre una mezcla asfáltica en operación, se cree que proporciona parámetros confiables preliminares de la falla final y la resistencia a la fractura.

Si bien se trata de un ensayo cuasi estático, en el Centro de investigaciones viales, LEMaC, se vienen realizando pruebas SCB cíclicas para investigar el comportamiento a fatiga dinámica asociado a propiedades visco elásticas.

REFERENCIAS

- ASTM D8044 (2016). *Standard Test Method for Evaluation of Asphalt Mixture Cracking Resistance using the Semi-Circular Bend Test (SCB) at Intermediate Temperatures*. ASTM International.
- BSEN 12697-44 (2010). *Bituminous mixtures-Test methods for hot mix asphalt Part 44: Crack propagation by semi-circular bending test*. ISBN 978 0 580 63150 4. 20 p.
- BSEN 12697-31 (2019). *Bituminous Mixtures. Part 31. Test Methods Specimen Preparation By Gyrotory Compactor (British Standard)*. 30 p.

- Godoi Carbunck L. (2017). *Aplicação do ensaio de flexão em amostra semicircular para avaliação de trincamento de misturas asfálticas*. Tesis Mestre em Engenharia do Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 143 p.
- Gourab, S. y Prapoorna, B. (2016). Fracture properties of asphalt mixtures using semi-circular bending test: A state-of-the-art review and future research. *Construction and Building Materials*, 105, 103-112.
- Kim, M., Mohammad, L. N. y Elseifi, M. A. (2012). Characterization of Fracture Properties of Asphalt Mixtures as Measured by Semicircular Bend Test and Indirect Tension Test. *Journal of the Transportation Research Board*, (2296), 115-124.
- Limón-Covarrubias, P., Avalos Cueva, D., Valdés Vidal, G., Reyes Ortiz, O. J., Adame Hernández, R. O. y Galaviz González, J. R. (2019). Analisis of the Behavior of SMA Mixtures with Different Fillers Through the Semicircular Bend (SCB) Fracture Test. *Materials Basel*, 12(2), p. 288.
- Marina Muñoz, O. (2013). *Aplicación del ensayo Fénix para el diseño de mezclas bituminosas resistentes a la fisuración*. Tesis de Maestría en ingeniería civil de la Escuela de Caminos de Barcelona. 96 p.
- Nsengiyumva, G. (2015). Development of Semi-Circular Bending (SCB) Fracture Test for Bituminous Mixtures. *Engineering Theses, Dissertations, and Student Research*. Paper 87. 68 p.
- Paredes Chérrez, L. A., Reyes Ortiz, O. J. y Camacho Tauta, J. F. (2014). Comportamiento de mezclas asfálticas densas a partir del ensayo de viga semicircular simplemente apoyada. *Tecnura*, 18(41), 103-119.
- Valdés, G., Pérez-Jiménez, F. y Botella, R. (2009). Ensayo Fénix, una Nueva Metodología para Medir la resistencia a la Fisuración en Mezclas Asfálticas. *Revista de la Construcción*, 8(1), 114-125.