



Técnicas para caracterización de espumas de asfalto

Sandra Ximena Campagnoli-Martínez^a ■ Enrique Estupiñán-Escalante^b
■ Javier Evandro Soto-Vargas^c

Resumen: En la estabilización de suelos y en el reciclaje de pavimentos, se ha considerado que la relación de expansión y la vida media definen relativamente bien la calidad de las espumas de asfalto. Sin embargo, al aplicar la tecnología de los asfaltos espumados a la fabricación de mezclas tibias, se ha visto que estas propiedades no resultan suficientes para caracterizar la espuma y asegurar el cubrimiento completo de los agregados por el asfalto, una adecuada trabajabilidad y facilidad de compactación de la mezcla, así como un comportamiento apropiado de la mezcla en servicio. Este hecho ha motivado estudios concluyentes en la necesidad de establecer, además de la relación de expansión y de la vida media, la curva de colapso y la distribución de tamaños de las burbujas en una espuma de asfalto. Varios de estos estudios también recomiendan técnicas más seguras y confiables para la medida de las propiedades de la espuma. En este artículo, se resumen las técnicas que se están explorando en los laboratorios de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito para caracterizar espumas de asfalto fabricadas en planta de laboratorio WLB-10S. Tales técnicas incluyen medidas invasivas como la varilla graduada y el ensayo de colapso de la espuma de asfalto y no invasivas como el procesamiento de imágenes y el uso sensores infrarrojos. También, para mostrar el potencial de cada técnica, se presentan algunos resultados de las medidas obtenidas con su aplicación.

Palabras clave: asfalto espumado; relación de expansión; vida media; curva de colapso; burbujas de espuma; mezclas tibias.

Fecha de recepción: 19 de abril de 2018 **Fecha de aprobación:** 30 de noviembre de 2018

Cómo citar: S. X. Campagnoli-Martínez, E. Estupiñán-Escalante y J. E. Soto-Vargas, "Técnicas para caracterización de espumas de asfalto", *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, vol. 29(1), pp. 153-166. <https://doi.org/10.18359/rcin.3424>

-
- a** Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, Colombia. e-mail: sandra.campagnoli@escuelaing.edu.co. ORCID 0000-0002-5793-8046
- b** Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, Colombia. e-mail: enrique.estupinan@escuelaing.edu.co. ORCID 0000-0001-9002-0731
- c** Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, Colombia. e-mail: javier.soto@escuelaing.edu.co. ORCID: 0000-0001-7096-2828

Foamed Bitumen Characterization Techniques

Abstract: In soil stabilization and pavement recycling, the expansion ratio and half-life parameters have been considered to define foamed bitumen quality relatively well. However, when applying foamed bitumen technology in the production of warm mixtures, these properties are determined to be insufficient to characterize the foam and guarantee complete aggregate coverage from the bitumen, adequate workability, and easy mixture compaction, together with appropriate mixture behavior in service. This has led to conclusive studies on the need to establish, along with the expansion and half-life relation, the collapse curve and bubble size distribution in foamed bitumen. Several studies also recommend safer and more reliable techniques for measuring foam properties. Additionally, we summarize the techniques currently being explored by the testing laboratories at the Julio Garavito Colombian School of Engineering to characterize foamed bitumen produced in the WLB-10S laboratory foamed bitumen plant. These techniques include invasive measures, such as the calibrated dipstick and the foamed bitumen collapse test, along with non-invasive measures, such as image processing and using infrared sensors. Finally, the paper denotes the potential of each technique by revealing some results from the measurements obtained through their application.

Keywords: Foamed Bitumen; Expansion Ratio; Half-Life; Collapse Curve; Foam Bubbles; Warm Mixtures.

Técnicas para a Caracterização de Espumas de Asfalto

Resumo: Na estabilização de solos e reciclagem de pavimentos, tem sido considerado que a relação de expansão e a meia vida definem relativamente bem a qualidade das espumas de asfalto. No entanto, quando a tecnologia de espuma de asfalto é aplicada na produção de misturas mornas, estas propriedades resultam que são insuficientes para caracterizar a espuma e assegurar o recobrimento completo dos agregados pelo asfalto, uma adequada trabalhabilidade e a facilidade de compactação da mistura, assim como um comportamento apropriado da mistura em serviço. Estes fatos têm motivado estudos conclusivos na necessidade de se estabelecer, juntamente com a relação expansão e meia-vida, a curva de colapso e a distribuição do tamanho das bolhas na espuma de asfalto. Vários destes estudos também recomendam técnicas mais seguras e confiáveis para a medida das propriedades da espuma. Neste artigo, encontram-se resumidas as técnicas que estão sendo explorados pelos laboratórios da Escola Colombiana de Engenharia Julio Garavito para caracterizar espumas de asfalto fabricados na planta de laboratório WLB-10S. Estas técnicas incluem medidas invasivas como vareta calibrada e o teste de colapso da espuma de asfalto, assim como as medidas não invasivas, como processamentos de imagens e o uso de sensores infravermelhos. Também, para mostrar o potencial de cada técnica, estão sendo apresentados alguns resultados de medidas obtidas em sua aplicação.

Palavra chave: espuma de asfalto; razão de expansão; vida média; curva de colapso; bolhas de espuma; misturas mornas.

Introducción

En la industria de la construcción de carreteras, las tecnologías con cementos asfálticos espumados están experimentando un crecimiento acelerado. Tan solo, en relación con su aplicación en las mezclas asfálticas tibias (WMA, por sus siglas en inglés), la tecnología del espumado de asfalto por medios mecánicos está siendo preferida por la mayoría de los contratistas en lugar de otros productos comerciales y técnicas que usan ceras, surfactantes o aditivos minerales [1]. Para tener una idea de esta tendencia, en los Estados Unidos el espumado mecánico representó en 2014 el 84,5% de los 113,8 millones de toneladas de WMA producidas en ese año y en 2015 el 72% de los 119,8 millones de toneladas. Cabe resaltar que para estos mismos años la producción de WMA correspondió a poco menos de un tercio del total de las mezclas asfálticas fabricadas en ese país [2].

Aun cuando el volumen de aplicación de los cementos asfálticos espumados ha sido enorme, todavía no se conocen bien las propiedades de la espuma y su efecto sobre el comportamiento durante la manufactura, la aplicación y el servicio de las mezclas elaboradas con ellas.

En la caracterización de las espumas de asfalto para su aplicación en la estabilización de suelos o en el reciclaje de pavimentos, se emplea tradicionalmente la técnica de la varilla graduada para medir los dos parámetros básicos que definen su calidad: la relación de expansión máxima ($ER_{m\acute{a}x}$, por sus siglas en inglés) y la vida media (HL, por sus siglas en inglés). La $ER_{m\acute{a}x}$ se define como la relación entre el volumen máximo alcanzado por la espuma y el volumen ocupado por la misma masa de asfalto sin agua o espuma en él, mientras que la HL corresponde al tiempo —medido en segundos— que tarda la espuma en colapsar desde su máximo volumen hasta la mitad de este.

Aun cuando el método de la varilla es simple y práctico, es impreciso y sus resultados son altamente dependientes de la destreza de la persona que ejecuta las lecturas.

Reconociendo que la $ER_{m\acute{a}x}$ y la HL no son suficientes para caracterizar una espuma de asfalto, los estudios recientes proponen determinar y

evaluar la variación en el tiempo de la ER conocida como la curva de colapso o de decaimiento de la espuma (DC, por sus siglas en inglés) y la distribución del tamaño de las burbujas (BSD, por sus siglas en inglés), de tal forma que estas propiedades puedan usarse para obtener mejores indicadores de la calidad de una espuma de asfalto, como el índice de espumado (FI, por sus siglas en inglés) y la velocidad de colapso de la espuma en condición semiestable, valor de K.

También, debido a que el método tradicional de la varilla graduada presenta limitaciones, se han ideado técnicas de medida más seguras y confiables junto con los protocolos de ensayo, de tal forma que puedan implementarse para una mejor caracterización de las espumas de asfalto [3-9].

Aprovechando la experiencia de los laboratorios de suelos y pavimentos de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito en la caracterización de las espumas de asfalto y la capacidad del programa de Ingeniería Electrónica, se están explorando diferentes técnicas para la obtención de la DC y de la BSD de espumas de asfalto, fabricadas en planta de laboratorio WLB-10S. En este trabajo, se presentan los resultados preliminares que se han obtenido en la caracterización de espumas de asfalto, empleando tanto técnicas invasivas como el método tradicional de la varilla graduada y el ensayo de colapso de la espuma de asfalto (AFCT, por sus siglas en inglés), así como no invasivas, entre ellas, el procesamiento de imágenes y el uso de sensores infrarrojos.

Propiedades asociadas con la calidad de una espuma de asfalto

Curva de colapso o curva de decaimiento

Varias investigaciones se han desarrollado con el propósito de evaluar el comportamiento de una espuma de asfalto en el tiempo y proponer parámetros que, junto con la $ER_{m\acute{a}x}$ y la HL, permitan caracterizar la espuma y valorar el efecto de diferentes factores, entre ellos, el tipo de asfalto, la

temperatura, las concentraciones de agua y de aditivos, y la presión de aire, y así lograr optimizar los procesos de fabricación y la calidad de la espuma.

La representación gráfica de la variación de la ER en el tiempo se conoce como la curva de colapso o curva de decaimiento (DC, por sus siglas en inglés) de la espuma. Diferentes modelos de comportamiento de las espumas de asfalto con el tiempo se encuentran en la literatura técnica: algunos de los modelos propuestos siguen una función exponencial (ecuación (1)), similar a la presentada por el decaimiento de isótopos [3]; otros se aproximan a una función de tipo potencial (ecuación (2)), en particular para aquellos asfaltos que presentan ER superiores a 15 [10]; y otros modelos más refinados, obtenidos mediante análisis de regresión no lineales, se ajustan a funciones potenciales de 4 parámetros (ecuación (3)) o exponenciales de tres parámetros (ecuación (4)), dependiendo del tipo de asfalto, tal y como se indica en la tabla 1 y en las figuras 1a y 1b [11].

El estudio de la curva de colapso para diferentes espumas de asfalto ha dado lugar a la obtención de parámetros que, en principio, la caracterizan más apropiadamente, como son:

- El índice de espumado (FI): definido por [3] como el área entre la curva de la ER en función del tiempo y una ER constante de 4, en que se estima se encuentran viscosidades comprendidas entre 0,2 y 0,55 Pa.s, apropiadas para realizar la mezcla de los agregados pétreos con el asfalto mientras este

se encuentra en estado de espuma. Un asfalto con mayor FI es capaz de almacenar más energía en la espuma mientras está temporalmente en el rango de viscosidades de mezcla que uno con menor FI [3-5, 12-13].

- La velocidad de colapso de la espuma en condición semiestable, valor de K: obtenido tomando los datos alejados de la zona inicial de la curva de colapso que se presenta en los primeros segundos después del espumado, zona donde las burbujas son inestables. El valor de K se determina ajustando la curva de colapso a una curva de tipo exponencial de la forma $ER(t) = 1 + ce^{-kt}$, para una ER medida después de 10 s de haberse iniciado el espumado del asfalto [7].

En la figura 2, se presentan varias curvas de colapso en que se puede apreciar el efecto que factores como el tipo de asfalto, la temperatura, la concentración de agua (FWC, por sus siglas en inglés) y la presión de aire tienen sobre su forma y, por supuesto, sobre las características y la calidad de la espuma [11]. Como se puede ver en esta figura, el tipo de asfalto y la FWC son los factores que tienen mayor influencia.

La evaluación de las curvas de colapso y de los parámetros asociados permite optimizar las FWC, comparar aditivos y establecer sus dosificaciones, definir si estos se usan, seleccionar asfaltos y establecer las condiciones de fabricación de la espuma, como temperatura, presión de aire y tipo de boquilla, entre otras.

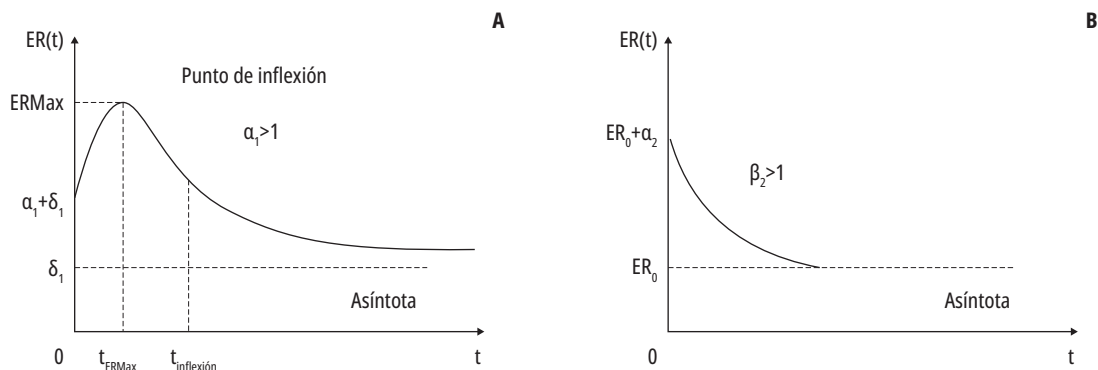


Figura 1. Curvas típicas de colapso de las espumas de asfalto: a) Función potencial, b) Función exponencial. Fuente: Adaptadas de [11].

Tabla 1. Algunos modelos de comportamiento del colapso de una espuma de asfalto propuestos en la literatura

Ecuación 1	Ecuación 2	Ecuación 3	Ecuación 4
$ER(t) = ER_m e^{-\frac{\ln 2}{HL} \times t}$	$ER(t) = \frac{ER_m}{2} \left(\frac{t}{HL}\right)^{-\alpha}$	$ER(t) = (\alpha_1 + \beta_1 t) \gamma_1 + \delta_1$	$ER(t) = ER_0 + (\alpha_2 \exp(-t/\beta_2))$
Donde: ER(t) = Relación de Expansión en un instante t, ERm = Relación de Expansión máxima medida HL = Vida Media (segundos) t = Tiempo (segundos)	Donde: ER(t) = Relación de Expansión en un instante t, ERm = Relación de Expansión máxima medida HL = Vida Media (segundos) t = Tiempo (segundos)	Donde: ER(t) = Relación de Expansión en un instante t, $\alpha_1, \beta_1, \delta_1, \gamma_1$ = constantes t = Tiempo (segundos)	Donde: ER(t) = Relación de Expansión en un instante t, ER0 = Asíntota α_2, β_2 = constantes t = Tiempo (segundos)

Fuente: Elaboración propia.

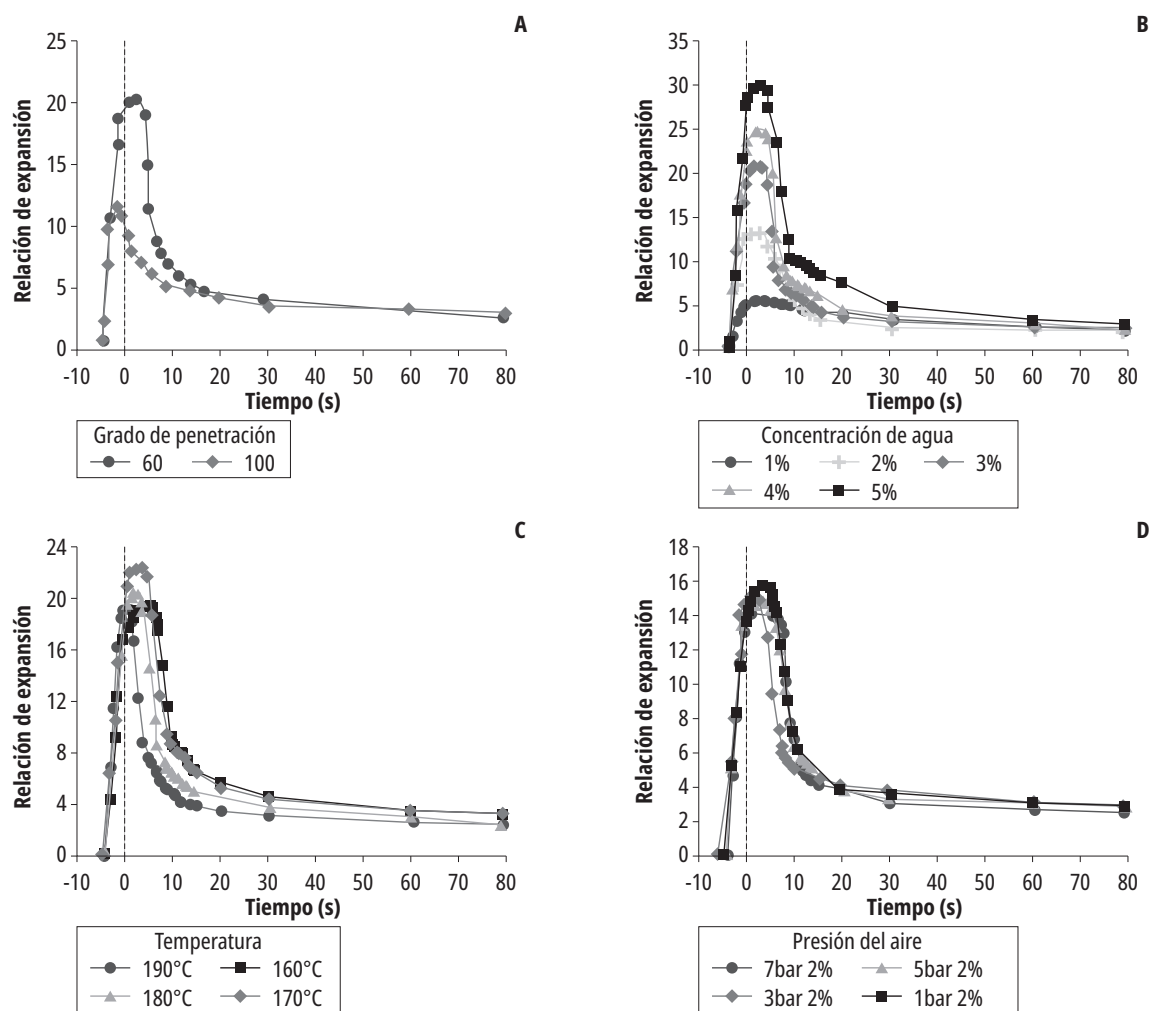


Figura 2. Efecto sobre la curva de colapso de a) Tipo de asfalto, b) FWC, c) Temperatura y d) Presión de aire. Fuente: Adaptadas de [11].

Distribución del tamaño de burbujas

Al igual que las propiedades de colapso, se reconoce que la BSD y su variación en el tiempo son otros parámetros esenciales para la caracterización de una espuma de asfalto. La ER por sí sola no provee información sobre la BSD, ya que diferentes distribuciones pueden estar ocupando un igual volumen total y, por consiguiente, dar lugar a una misma ER de la espuma de asfalto.

A este respecto es importante recordar el concepto de *superficie específica-área de la superficie de la partícula*, en este caso de la burbuja, expresada normalmente por unidad de masa o por unidad de volumen. La superficie específica es inversamente proporcional al radio de las burbujas, es decir, que, a medida que disminuye su tamaño, se tiene una mayor superficie específica y, por tanto, más área expuesta disponible para un mejor cubrimiento de todas las partículas del agregado pétreo. Un cálculo simple permite ver que, cuando el radio de la burbuja se reduce de 5 mm a 0,25 mm, la superficie total de las burbujas que ocupan un mismo volumen total se incrementa veinte veces, mientras que la ER permanece constante.

Lo anterior explica la importancia de poder medir la BSD en una espuma de asfalto, principalmente cuando se van a usar en la elaboración de mezclas asfálticas tibias o semitibias, en las que un cubrimiento completo de los agregados por el asfalto es fundamental. Así lo han reconocido diferentes investigadores, quienes usando métodos analíticos (p. ej., la ley de Stokes) y herramientas tecnológicas, como rayos X, calorimetría de barrido diferencial, microscopios de baja potencia y principalmente cámaras de video, han medido la BSD y su variación en el tiempo, y evaluado el efecto de factores como el tipo de asfalto, la temperatura, la FWC y los aditivos sobre esta propiedad y, por consiguiente, sobre la calidad de la espuma [7, 14-20].

Las conclusiones de algunos estudios muestran que a mayor temperatura aumenta el tamaño de las burbujas y que la morfología de su formación depende más del tipo de cemento asfáltico que de la temperatura [17-18], que a bajas FWC se obtienen burbujas de menor diámetro [19] y que una porción significativa de las burbujas que contribuyen a la expansión del asfalto tienen diámetros aproximados del orden de 1 mm [20]. En la figura 3, se muestra una manera de representación de las curvas de distribución de tamaño de burbujas.

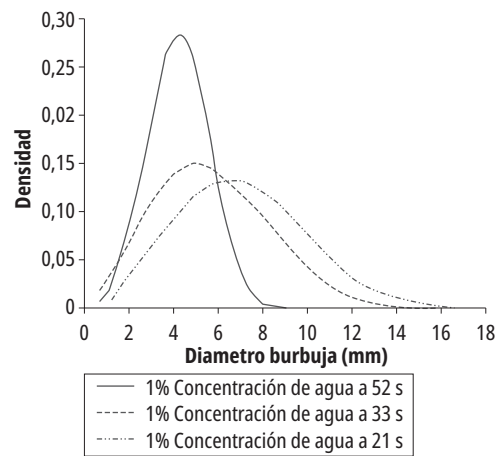


Figura 3. Distribución del tamaño de burbujas de la espuma en diferentes instantes. Fuente: Adaptada de [7].

Materiales y condiciones de fabricación de las espumas

En este estudio, se evaluaron las características de espumado de cuatro cementos asfálticos clasificados por grado de penetración 60/70 y 80/100, procedentes de Apiay (A) y de Barrancabermeja (B). Las características generales de los cementos asfálticos se resumen en la tabla 2.

Las espumas de asfalto fueron fabricadas en planta piloto WLB-10S a temperaturas de 140°C y 160°C, usando FWC del 2,5 y del 3,5%, bajo una presión de aire constante de 3,5 bares.

Tabla 2. Características de los asfaltos usados en el estudio

Característica	A 60/70	A80/100	B 60/70	B 80/100
Penetración (0,1 mm)	68	83	63	96
Punto de ablandamiento (°C)	50,6	49	50	48
Índice de penetración	-0,3	-0,17	-0,65	-0,01
Viscosidad absoluta (P)	3250	2020	3290	1780
Pérdida de masa (%)	0,5157	0,6357	0,2979	0,7255

Fuente: Elaboración propia.

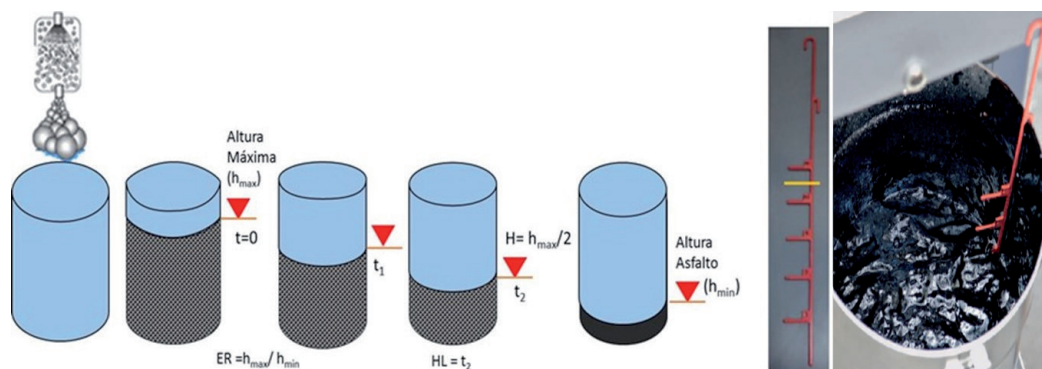


Figura 4. Método de la varilla graduada. Fuente: Elaboración propia.

Técnicas de medida de las características de espumado y resultados

Técnicas de medida invasivas

Método de la varilla graduada

La técnica consiste en introducir dentro de un recipiente de sección conocida que contiene la espuma una varilla metálica para registrar en ella la longitud en la que queda impregnada con asfalto. La varilla está graduada con varios segmentos metálicos que se encuentran separados entre sí de manera uniforme, tal y como se puede apreciar en la figura 4. La distancia de separación entre graduaciones corresponde a un número de veces la altura del asfalto sin espumar, lo que permite establecer la ER_{max} . Por observación directa, el operador de la varilla indicará los instantes en que la espuma alcanzó la altura máxima y colapsó hasta la mitad de esta, de tal forma que el tiempo, en segundos, transcurrido entre estos corresponde a la HL.

Ensayo de colapso de la espuma de asfalto

El AFCT fue propuesto por [5] para determinar la DC de las espumas de asfalto. Es un ensayo, en el que, basados en principios elementales de la física, una esfera cubierta por una película de asfalto y suspendida de un sistema de poleas con un contrapeso, al entrar en contacto con la superficie de la espuma, se adhiere a esta siguiendo la misma trayectoria de su caída durante el colapso [15]. Mediante grabación de video, se registra el desplazamiento horizontal que presenta un indicador colocado sobre una escala que, de acuerdo con la configuración del sistema, será igual al desplazamiento vertical que experimenta la esfera en su descenso con la espuma de asfalto. El análisis del desplazamiento del indicador en las imágenes capturadas en el video, a los intervalos de tiempo deseados —en este estudio cada 0,5 s—, permitirá construir la curva de colapso de la espuma ensayada. Por la geometría y la capacidad del sistema, el tiempo total de análisis es de 20 s y la masa de asfalto inyectada para espumado es de 100 g.

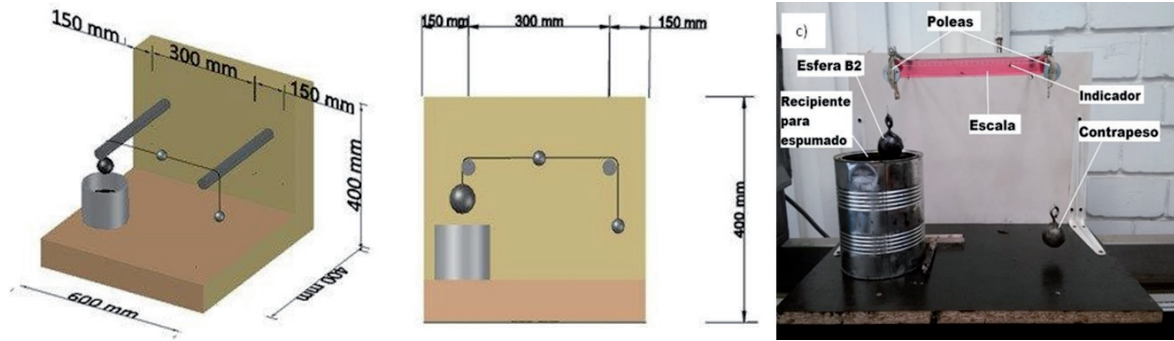


Figura 5. (a) y (b) Dimensiones y elementos del sistema, (c) Sistema adaptado en el estudio. Fuente: Adaptadas de [15].

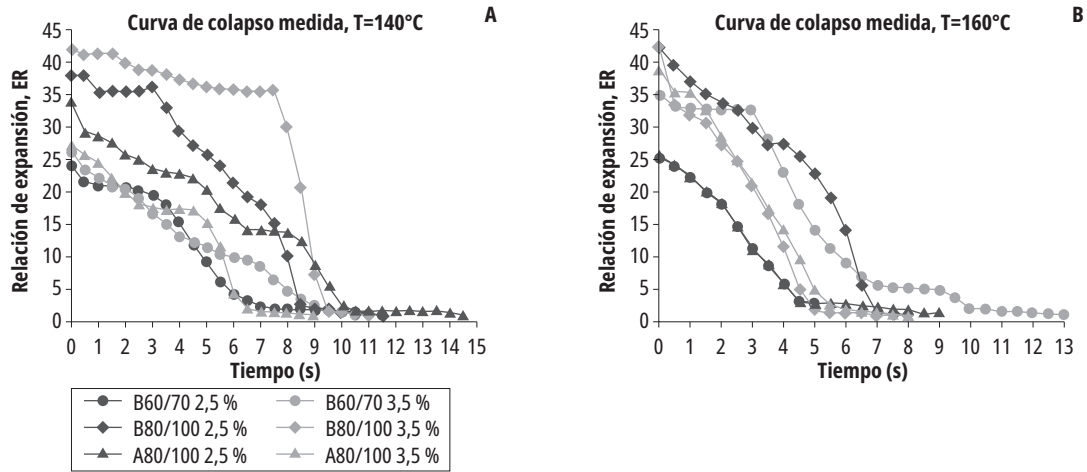


Figura 6. Curvas de colapso determinadas por el método AFCT. Fuente: Elaboración propia.

En las figuras 5a y 5b, se muestra la configuración geométrica y los elementos del sistema ideado por [5]; y en la figura 5c, una imagen del sistema adaptado en este estudio. Las curvas de colapso, para los asfaltos identificados como A80-100, B60-70 y B80-100 bajo las condiciones de temperatura (140°C y 160°C) y FWC (2,5 y 3,5%) evaluadas, se pueden apreciar en los gráficos de la figura 6. No se incluyen los resultados de la espuma de asfalto A60-70, debido a que para las condiciones de ensayo su expansión superó la capacidad del recipiente de medida.

En la tabla 3, se resumen los resultados de $RE_{m\acute{a}x}$ y HL, obtenidos por las técnicas de medida mencionadas hasta acá. Se incluye el FI calculado asumiendo un decaimiento de la espuma exponencial, tal como el propuesto por [3-4] y el producto $HL \cdot ER_{m\acute{a}x}$ que también sirve como un indicador de

la calidad de la espuma, cuando las curvas se apartan del modelo exponencial.

Técnicas de medida no invasivas

Análisis de imágenes

En este estudio, la técnica de análisis de imágenes está siendo aplicada inicialmente para determinar la BSD que se presenta en la superficie de la espuma de asfalto, en diferentes instantes, durante su colapso. Se ha seleccionado un dispositivo móvil con posibilidad de tomar videos en alta definición con una cámara de 8 MP, a una altura de 1 m del recipiente en el que se vierte la espuma, sin necesidad de cambiar la forma convencional de iluminación que se tiene en el laboratorio.

Como método de clasificación de las burbujas de acuerdo con su tamaño, se usa una técnica

Tabla 3. Resultados de $ER_{m\acute{a}x}$, HL y FI obtenidos por las t\u00e9cnicas de medida varilla graduada y AFCT

CARACTER\u00cdSTICAS DE ESPUMA DE ASFALTO POR M\u00c9TODO												
Tipo de Asfalto	M\u00e9todo de medici\u00f3n	Contenido de Agua (%)	T = 140 \u00b0C					T = 160 \u00b0C				
			Expansi\u00f3n ER	V. Media (s) HL	C	Indice de Espumado (s)	Producto HL*ER	Expansi\u00f3n ER	V. Media (s) HL	C	Indice de Espumado (s)	Producto HL*ER
A 60/70	Varilla	2,5	25	20,7	0,84	683	518	29	17,8	0,74	790	521
	Graduada	3,5	24	24,7	0,86	717	594	32	12,8	0,70	741	404
	Mec\u00e1nico	2,5	NP	NP	NP	NP	NP	NP	NP	NP	NP	NP
	AFCT	3,5	NP	NP	NP	NP	NP	NP	NP	NP	NP	NP
A 80/100	Varilla	2,5	16	18,2	0,79	361	298	32	9,8	0,68	682	317
	Graduada	3,5	18	20,5	0,80	438	369	33	11,4	0,75	714	372
	Mec\u00e1nico	2,5	34	5,6	0,93	208	189	36	3,5	0,89	155	126
	AFCT	3,5	27	5,2	0,98	269	292	39	3,5	0,89	171	136
B 60/70	Varilla	2,5	23	12,8	0,75	480	289	20	8,6	0,65	365	170
	Graduada	3,5	21	14,2	0,78	452	298	27	11,6	0,71	572	308
	Mec\u00e1nico	2,5	24	4,5	0,92	109	108	26	3,0	0,88	88	77
	AFCT	3,5	26	4,1	0,91	113	108	35	5,0	0,93	197	175
B 80/100	Varilla	2,5	23	13,4	0,79	479	302	26	9,3	0,68	516	242
	Graduada	3,5	21	16,9	0,80	488	354	28	11,3	0,75	577	309
	Mec\u00e1nico	2,5	38	6,5	0,95	276	249	42	5,0	0,92	251	211
	AFCT	3,5	42	8,5	0,98	395	359	42	3,0	0,91	168	126

NP: La espuma super\u00f3 la capacidad del recipiente de medida.

Fuente: Elaboraci\u00f3n propia.



Figura 7. Procesamiento de la imagen de la superficie de la espuma cerca de la $ER_{m\acute{a}x}$. Fuente: Elaboraci\u00f3n propia.

no lineal basada en la ling\u00fc\u00edstica: la l\u00f3gica difusa. Esta t\u00e9cnica se fundamenta en reglas de inferencia del tipo *modus ponens* (*Si antecedente Entonces consecuencia*) [21]. En estas reglas, se pueden usar diversas caracter\u00edsticas de la imagen segmentada, como el \u00e1rea estimada, el per\u00edmetro o la similitud con figuras geom\u00e9tricas como c\u00edrculos o elipses. En la figura 7, se presentan los pasos para

el procesamiento de la imagen de la parte central del recipiente que contiene la espuma, en un instante cercano al momento en el que se alcanza la expansi\u00f3n m\u00e1xima, y en la figura 8 se puede ver el resultado del an\u00e1lisis de acuerdo con la clasificaci\u00f3n de tama\u00f1os de burbuja establecida, a partir de la que es posible obtener los resultados que se presentan en la tabla 4.

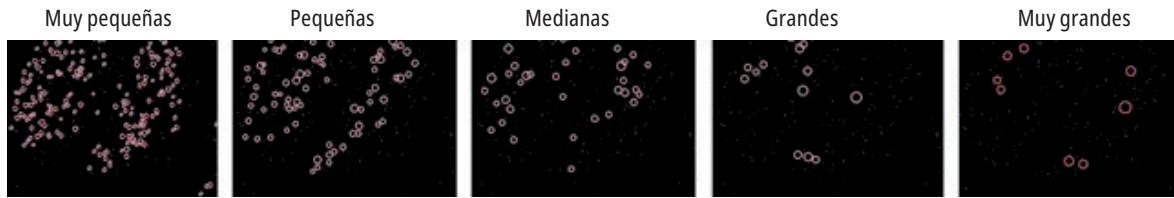


Figura 8. Clasificación de los tamaños de las burbujas en una imagen. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4. Distribución de burbujas en la superficie de la espuma en un instante dado

Grupo	Cantidad de burbujas	Distribución (%)
Muy pequeñas	227	62
Pequeñas	66	18
Medianas	48	13
Grandes	15	4
Muy grandes	9	3
Total	365	100

Fuente: Elaboración propia.

Sensor infrarrojo

Para la obtención de la DC mediante una técnica no invasiva, se utilizó un sensor infrarrojo ubicado directamente bajo la boquilla de espumado que se encuentra en la planta WLB-10S. El sistema consta, básicamente, de un computador de placa reducida (Raspberry Pi) y un sensor infrarrojo con un rango de 15 a 100 cm, que apunta a una sección del recipiente donde se realiza la descarga de la espuma (figura 9). Este sistema a su vez está subdividido en un sistema de calibración, uno de registro de valores y uno de procesamiento y presentación de resultados.

El sistema de calibración se realiza previamente a los ensayos, consistente en preparar el sistema para transformar los valores analógicos arrojados por el sensor en un valor que indique la distancia de la espuma con respecto al sensor. Para esta calibración, se realizó el promedio de 500 capturas de valores por cada medida (15 a 100 cm), lo que dio como resultado un archivo de calibración que será usado en las etapas siguientes.

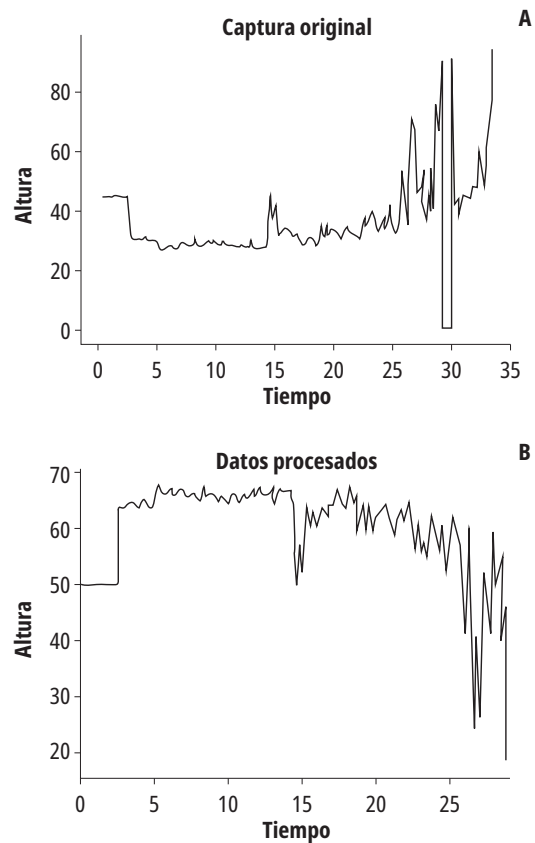
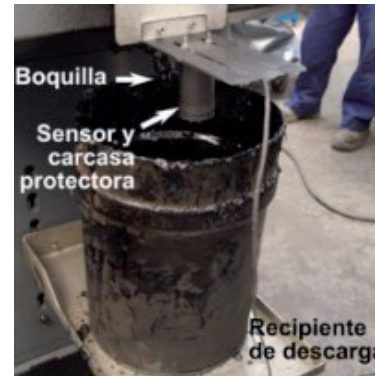


Figura 9. Montaje del sistema con sensor infrarrojo y presentación de resultados. Fuente: Elaboración propia.

El sistema de registro (o captura) de valores consiste en el almacenamiento de las medidas de distancia y tiempo de muestra. En este sistema, por cada valor almacenado, se toma el promedio de cinco capturas, tomando la marca de tiempo en la tercera de ellas. El resultado final es la captura de aproximadamente 20 muestras por segundo, y la generación de un archivo que incluye los datos de distancia y tiempo de muestra. Finalmente, el sistema de procesamiento y presentación de resultados lee los datos obtenidos en el proceso de captura, y hace un tratamiento que consiste en invertir los datos, para que la gráfica se vea ascendente (de manera similar al ascenso de la espuma). Esta primera versión presenta una gráfica con el total de los valores capturados, y una gráfica con secciones limitadas, en que se cree están los datos de interés, además presenta el punto máximo, y otros datos que dan alguna información para el análisis posterior (figura 9).

Análisis de resultados

Técnicas invasivas

Las curvas de colapso obtenidas con el AFCT se apartan del modelo de comportamiento de tipo exponencial propuesto por [3], como puede apreciarse en la figura 10. En general, las expansiones medidas son superiores a la definida por el modelo para tiempos inferiores a la HL, invirtiéndose el

comportamiento una vez superado este instante. Por otro lado, para varios de los asfaltos analizados, en especial para la temperatura de 140°C, se obtienen espumas que presentan curvas de colapso escalonadas, con una expansión que se mantiene relativamente constante en un intervalo de tiempo, como también se muestra en la figura 10.

Al comparar los resultados de la $ER_{máx}$ y la HL obtenidos con las técnicas de medida invasivas, se aprecia claramente el efecto que sobre ellas tiene la masa de asfalto que se espuma, 500 g cuando se emplea la varilla graduada y 100 g en el AFCT, así como el tamaño de los recipientes en los que se realizan las medidas. Aun cuando el número de ensayos son actualmente limitados, en principio, no se presenta una correlación directa entre los resultados de estas dos pruebas y la tendencia general es a obtener mayores ER y menores HL con el ensayo AFCT.

Técnicas de medida no invasivas

En la etapa inicial del estudio, tanto el análisis de imágenes para determinar la BSD como la técnica de medida con sensor infrarrojo para la obtención de la DC de las espumas de asfalto arrojan resultados que se consideran satisfactorios, pero no definitivos.

En el sistema con el sensor infrarrojo implementado, se presentan gráficas ilustrativas del ensayo, cuya forma es acorde con el comportamiento

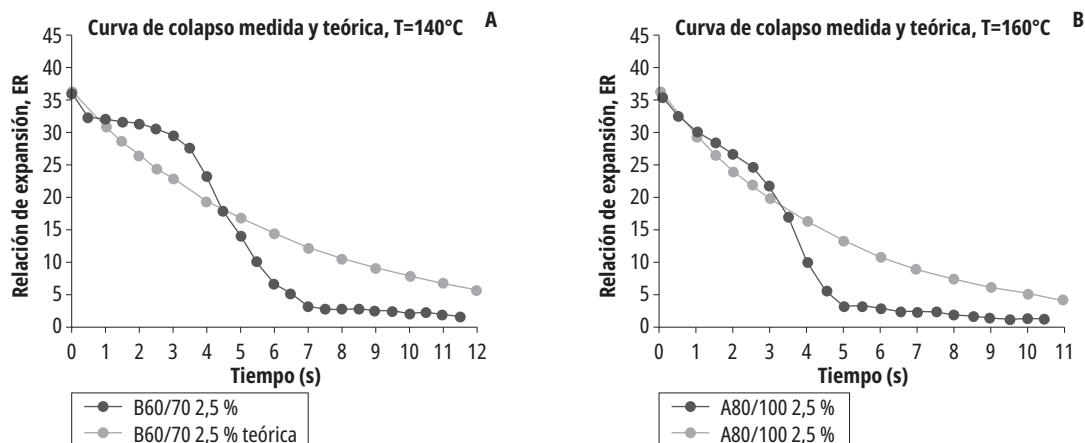


Figura 10. Curvas de colapso medidas con el AFCT comparadas con modelo exponencial propuesto por [3]. Fuente: Elaboración propia.

de la espuma; sin embargo, algunos valores numéricos son dudosos. Se cree que existen diversos problemas que afectan la lectura del sensor, entre ellos, la forma de dispersión de la espuma.

Conclusiones y recomendaciones

Muchos de los protocolos de ensayo usados para caracterizar las espumas que se fabrican en diferentes industrias se encuentran contemplados en las normas ASTM. Sin embargo, estos no resultan aplicables para la evaluación de las espumas de asfalto debido a la naturaleza opaca de este, a las altas temperaturas que se manejan en su producción y a que debido a la disminución de la temperatura la velocidad de disipación de la espuma es variable con el tiempo.

La medida de las propiedades de las espumas de asfalto apunta a la aplicación de técnicas no invasivas, como las que emplean imágenes de video, el uso de láser o de infrarrojos, diseñadas de tal forma para que sean sencillas, se minimicen los protocolos de ensayo, sean aplicables tanto para efectuar medidas en campo como en laboratorio, con equipos de fácil consecución y bajo costo, con la suficiente sensibilidad para detectar diferencias en las medidas y, finalmente, pero no menos importante, para que sean seguras para los operadores.

Aun cuando el objetivo principal del estudio no es evaluar la calidad de las espumas de asfalto usadas para probar las diferentes técnicas, los resultados confirman la influencia que tienen el tipo de asfalto, la FWC y la temperatura en la calidad de las espumas.

El método de la varilla graduada es útil para determinar la $ER_{m\acute{a}x}$ y la HL, pero no permite conocer la estabilidad de la espuma con el tiempo. Para este propósito, podría complementarse la caracterización de la espuma con el AFCT, que, aun cuando no correlaciona directamente con el método tradicional, resulta simple de implementar y sus resultados pueden servir también como indicadores de la calidad de la espuma.

Las técnicas de análisis de imágenes para determinar la BSD y de infrarrojos para obtener las

curvas de colapso, que se están implementando en este estudio, colaborarán con una caracterización más completa de las espumas de asfalto y con evaluar el efecto de diferentes parámetros sobre su calidad.

Agradecimientos

Se agradece a la Industria Colombiana de Asfaltos S. A. S. (IncoAsfaltos), por el suministro de las muestras de asfalto especialmente diseñadas para el estudio, al ingeniero Dairo Puentes Penagos y a los estudiantes Carlos Eduardo Gutiérrez Robayo del programa de Ingeniería Civil, y a Omar Andrés Parra Urrego de la Maestría en Ingeniería Electrónica de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito por su soporte en el desarrollo de los ensayos.

Referencias

- [1] F. Yin, E. Arámbula-Mercado y D. Newcomb, "Effect of laboratory foamer on asphalt foaming characteristics and foamed mixture properties", *International Journal of Pavement Engineering*, vol. 18, no. 4, pp. 358-366, 2017. <https://doi.org/10.1080/10298436.2015.1088151>
- [2] K. R. Hansen y A. Copeland, *Asphalt pavement industry survey on recycled materials and warm-mix asphalt usage: 2014*. Lanham: National Asphalt Pavement Association, 2015.
- [3] K. J. Jenkins, M. F. C. Van de Ven y J. L. A. De Groot, "Characterisation of foamed bitumen", en *7th Conference on asphalt pavements for Southern Africa*, pp. 1-18, 1999. <https://doi.org/10.1080/10298430601149676>
- [4] K. J. Jenkins, "Mix design considerations for cold and half-warm bituminous mixes with emphasis of foamed bitumen", tesis doctoral, Stellenbosch University, Stellenbosch, Sudáfrica, 2000.
- [5] K. J. Jenkins y M. F. C. van de Ven, "Guidelines for the mix design and performance prediction of Foamed bitumen mixes", en *20th South African Transport Conference*, Sudáfrica, 2001.
- [6] M. F. Saleh, "Characterisation of foam bitumen quality and the mechanical properties of foam stabilised mixes", en *Proceedings of the 10th International Conference on Asphalt Pavements*, Quebec, Canadá, 2006.
- [7] D. E. Newcomb, E. Arambula, F. Yin, J. Zhang, A. Bhasin, W. Li y Z. Arega, *Properties of foamed asphalt for warm mix asphalt applications*. Transportation Research Board, 2015.

- [8] F. Yin, E. Arámbula-Mercado y D. Newcomb, "Mix design procedure for foamed asphalt mixtures", *Road Materials and Pavement Design*, vol. 17, no. 4, pp. 946-957, 2016. <https://doi.org/10.1080/14680629.2015.1132633>
- [9] B. K. Bairgi y R. Tarefder, "Analysis of foaming properties of asphalt binder through a laser based non-contact method", en *ASME 2017 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, American Society of Mechanical Engineers*, Tampa, Estados Unidos, pp. 1-6, 2017. doi:10.1115/IMECE2017-71228
- [10] D. Lesueur, H. Clech, A. Brosseaud, C. Such, B. Ca-zacliu, B. Koenders, P.-J. Cérino y Bonvallet, J., "Foamability and foam stability", *Road Materials and Pavement Design*, vol. 5, no. 3, pp. 277-302, 2004. <https://doi.org/10.1080/14680629.2004.9689973>
- [11] G. P. He y W. G. Wong, "Decay properties of the foamed bitumens", *Decay Properties of the Foamed Bitumens*, vol. 20, no. 10, pp. 866-877, dic., 2006. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.06.027>
- [12] J. Zhang, E. Arambula, D. Newcomb, A. Bhasin y D. Little, "Effects of Asphalt Source, Asphalt Grade, and Inclusion of Additives on Asphalt Foaming Characteristics", *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, vol. 2505, pp. 76-83, 2015. <https://doi.org/10.3141/2505-10>
- [13] J. Harvey y K. F. Chou, Eds., *Airfield and Highway Pavements 2015: Innovative and Cost-Effective Pavements for a Sustainable Future*. American Society of Civil Engineers, 2015. <https://doi.org/10.1061/9780784479216>
- [14] Z. He y W. Lu, "Research on the properties of road building materials treated with foamed bitumen in China", en *Proceedings of the 8th Conference on Asphalt Pavements for Southern Africa (CAPSA'04)*, Sun City, Sudáfrica, pp. 2-9, 2004. <https://doi.org/10.1.1.580.7124>
- [15] H. Ozturk, "Quantification of quality of foamed warm mix asphalt binders and mixtures", tesis doctoral, Michigan State University, Estado Unidos, 2013.
- [16] B. W. Hailesilassie, P. Schuetz, I. Jerjen, M. Hugener y M. N. Partl, "Dynamic X-ray radiography for the determination of foamed bitumen bubble area distribution", *Journal of Materials Science*, vol. 50, no. 1, pp. 79-92, 2015. <https://doi.org/10.1007/s10853-014-8568-6>
- [17] B. W. Hailesilassie, P. Schuetz, I. Jerjen, A. Bieder, M. Hugener y M. N. Partl, "Evolution of bubble size distribution during foam bitumen formation and decay", *Asphalt Pavements: Proceedings of the International Conference on Asphalt Pavements, ISAP 2014*. Boca Ratón: CRC Press, 2014, pp. 1233-1240.
- [18] B. W. Hailesilassie, M. Hugener, A. Bieder y M. N. Partl, "New experimental methods for characterizing formation and decay of foam bitumen", *Materials and Structures*, vol. 49, no. 6, pp. 2439-2454, jun., 2016. <https://doi.org/10.1617/s11527-015-0659-6>
- [19] G. Martinez-Arguelles, F. Giustozzi, M. Crispino y G. W. Flintsch, "Investigating physical and rheological properties of foamed bitumen", *Construction and Building Materials*, vol. 72, pp. 423-433, dic., 2014. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.09.024>
- [20] Z. Arega, A. Bhasin y W. Li, "Parametric analysis of factors that affect asphalt binder foaming characteristics", *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 27, no. 12, pp. 0401-5052, dic., 2015. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001329](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001329)
- [21] J. P. Aurrand-Lions, L. Fournier, P. Jarri, et al., "Application of fuzzy control for ISIS vehicule braking", en *Proceedings of Fuzzy and Neuronal Systems, and Vehicule applications'91*, 1991.