

# APLICACIÓN DEL PROCESAMIENTO DE IMÁGENES PARA EVALUAR EL COLAPSO Y EL TAMAÑO DE BURBUJAS DE ESPUMAS DE ASFALTO

Sandra X. Campagnoli M.<sup>1</sup>, Enrique Estupiñán E.<sup>2</sup>, Omar A. Parra U.<sup>3</sup>, Dairo S. Puentes P.<sup>4</sup>,  
Allex E. Álvarez<sup>5</sup>, Oscar J. Reyes-Ortiz<sup>6</sup>

<sup>1</sup> Escuela Colombiana de Ingeniería, Ak 45 No 205-59 (autopista norte), Edificio Laboratorios, Bogotá D.C., Colombia, [sandra.campagnoli@escuelaing.edu.co](mailto:sandra.campagnoli@escuelaing.edu.co)

<sup>2</sup> Escuela Colombiana de Ingeniería, Ak 45 No 205-59 (autopista norte), Edificio Laboratorios, Bogotá D.C., Colombia, [enrique.estupinan@escuelaing.edu.co](mailto:enrique.estupinan@escuelaing.edu.co)

<sup>3</sup> Escuela Colombiana de Ingeniería, Ak 45 No 205-59 (autopista norte), Edificio Laboratorios, Bogotá D.C., Colombia, [omar.parra-u@mail.escuelaing.edu.co](mailto:omar.parra-u@mail.escuelaing.edu.co)

<sup>4</sup> Escuela Colombiana de Ingeniería, Ak 45 No 205-59 (autopista norte), Edificio Laboratorios, Bogotá D.C., Colombia, [dairo.puentes@escuelaing.edu.co](mailto:dairo.puentes@escuelaing.edu.co)

<sup>5</sup> Universidad del Magdalena, Carrera 32 No 22-08, Bloque VIII, Oficina 6-Piso 2, Santa Marta, Colombia, [allexalvarez@yahoo.com](mailto:allexalvarez@yahoo.com)

<sup>6</sup> Universidad Militar Nueva Granada, Carrera 11 No 101-80, Edificio F, Laboratorio Ingeniería Civil, Bogotá D. C., Colombia, [oscar.reyes@unimilitar.edu.co](mailto:oscar.reyes@unimilitar.edu.co)

## Resumen

La curva de colapso y la distribución de tamaños de burbujas (BSD – por *Bubble Size Distribution*) pueden proporcionar índices adicionales a los convencionalmente empleados—Relación de Expansión (ER – por *Expansion Ratio*) y Vida Media (HL – por *Half Life*)—para caracterizar espumas de asfalto. La ER y la HL se pueden obtener con técnicas simples como la varilla graduada, mientras que la curva de colapso y la BSD requieren para su determinación de técnicas más elaboradas, como las basadas en visión artificial. En este artículo, se muestran las curvas de colapso junto con BSDs, obtenidas a partir del procesamiento de imágenes de espumas de asfalto producidas empleando asfalto de Barrancabermeja 80-100 <sup>1</sup>/<sub>10</sub> mm, fabricadas en planta de laboratorio WLB-10S, a temperaturas y concentración de agua variables, con el objeto de evaluar su incidencia en las propiedades de la espuma. También, se describen los protocolos seguidos para la captura y el procesamiento de imágenes y finalmente se dan recomendaciones preliminares para poder implementar esta técnica de visión artificial en la caracterización de espumas de asfalto. Los resultados sugieren que tanto la curva de colapso como el análisis de BSDs permiten realizar definiciones más específicas de la temperatura y concentración de agua óptimas para fabricar espumas de asfalto.

**Palabras Clave:** Asfalto espumado, colapso, distribución de tamaño de burbujas, visión artificial, mezcla tibia

## 1 Introducción

Dentro del componente ambiental asociado con la sostenibilidad de las obras de construcción, mantenimiento, y rehabilitación de carreteras, tanto el aprovechamiento de los recursos naturales, como la reducción del consumo de energía y de las emisiones de gases de efecto invernadero constituyen los requisitos fundamentales. Debido a que las técnicas de construcción en las que se aplican los asfaltos espumados apuntan al cumplimiento de estos requisitos, estos materiales son motivo de numerosos estudios e investigaciones y están ganando mayor aceptación alrededor del mundo.

Tan solo, en relación con su aplicación en las mezclas asfálticas tibias – WMA (por sus siglas en inglés a partir de *Warm Mix Asphalt*), la tecnología del espumado de asfalto por medios

mecánicos, está siendo preferida por la mayoría de 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 Estados Unidos el espumado mecánico representó en el 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].

Con el propósito de usar de manera eficiente el asfalto espumado en las WMA y, en general, en todas sus aplicaciones, es necesario entender sus propiedades y características que puedan afectar la producción y el desempeño de las mezclas que se elaboren con él. Por ejemplo, con la introducción de la tecnología de los asfaltos espumados en las WMA, el cubrimiento de los agregados por la espuma, la trabajabilidad y la facilidad de compactación de la mezcla, así como el desempeño frente al deterioro inducido por el agua, o frente a la deformación permanente y a la fatiga, se constituyen en los aspectos a analizar en relación con la incidencia que puede tener la calidad de la espuma.

Sin embargo, a pesar del crecimiento importante que ha experimentado la tecnología de los asfaltos espumados en las WMA, actualmente no se tienen claramente estandarizadas las propiedades y características de la espuma que resultan más relevantes para definir su calidad. En este sentido, además de la Relación de Expansión (ER) y la Vida Media (HL)—parámetros típicamente empleados en la caracterización de una espuma asfáltica—de manera más sistemática se han comenzado a considerar como indicadores de calidad de la espuma, a pesar de que uno de ellos fue propuesto por Jenkins [3] hace más de 15 años, la curva de colapso y la distribución del tamaño de burbujas – BSD (por sus siglas en inglés *Bubble Size Distribution*).

Para determinar la curva de colapso y la BSD de una espuma de asfalto, no se cuenta con técnicas ni herramientas estandarizadas, aun cuando ya se encuentran documentos técnicos que contienen estudios y propuestas a este respecto [4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12]. Técnicas de emisión acústica o sensores de ultra sonido, infrarrojo y principalmente laser, han sido empleados para medir de manera continua y precisa, la evolución de la altura de la espuma en el tiempo y así establecer su curva de colapso, mientras que micro-tomografías con rayos X, calorimetría de barrido diferencial, microscopios de baja potencia y, en especial, cámaras digitales se han empleado para capturar imágenes y establecer a partir de su análisis el tamaño de las burbujas y la distribución de las mismas presentes en la espuma de asfalto. En la práctica, se han utilizado mayoritariamente dos instrumentos independientes, uno para determinar la curva de colapso y otro para determinar la BSD de una espuma de asfalto.

En este trabajo, se aplicó el procesamiento de imágenes capturadas con una cámara digital de alta resolución (1280 x 720 píxeles y velocidad de captura de 24 cuadros por segundo) para caracterizar las espumas de un asfalto convencional de penetración 80-100  $1/10$  mm, proveniente de la refinería de Barrancabermeja, Colombia. Estas espumas fueron fabricadas en planta de laboratorio WLB-10S, a temperaturas y concentración de agua variables. En el artículo, se presentan los resultados de ER y HL utilizando tanto la técnica de la varilla graduada como el procesamiento de imágenes, así como las curvas de colapso y las BSD de las espumas, lo que corresponde al aspecto central del estudio.

## 2 Caracterización de las espumas de asfalto

### 2.1 Relación de Expansión (ER) y Vida Media (HL) - parámetros convencionales

Los métodos actuales empleados para evaluar las características de espumado de los cementos asfálticos se basan en dos parámetros empíricos básicos: la ER y la HL, los cuales fueron propuestos a inicios de los años 70 [7].

La ER, definida como el volumen máximo alcanzado por la espuma relativo al volumen original del asfalto sin espumar, es un indicativo indirecto de la viscosidad y está relacionada con la capacidad de humectación de las partículas de agregado por el asfalto y con la trabajabilidad y

la facilidad de compactación de las mezclas [13,14]. Por su parte, la HL, es una medida de la estabilidad de la espuma y generalmente se asocia con el tiempo disponible para la producción de la mezcla, mientras el asfalto—con viscosidad reducida—permanece en forma de espuma. La HL, se define como el tiempo, en segundos, que la espuma de asfalto requiere para colapsar desde la máxima expansión hasta la mitad de ésta [13, 14].

Tanto la ER como la HL dependen del origen y tipo de asfalto, de su temperatura durante el proceso de espumado, de la velocidad de descarga de la espuma, del uso de aditivos, y como es suficientemente reconocido, varían principalmente con la concentración de agua (FWC) (por sus siglas en inglés a partir de *Foaming Water Content*)—típicamente la ER aumenta y la HL disminuye con el incremento en la FWC—.

Tradicionalmente, la ER se mide insertando, próxima a la pared del recipiente que recibe la espuma, una varilla graduada, mientras con un cronómetro se registra el tiempo, en segundos, que tarda la espuma en colapsar desde su máximo volumen hasta la mitad de éste para así obtener la HL. Estas medidas son simples y prácticas, pero sus resultados se ven afectados por la habilidad y experiencia del operador, siendo cuestionables su precisión y repetibilidad [15].

## 2.2 Curva de colapso y parámetros asociados

También conocida como curva de decaimiento de la espuma, es la representación gráfica del cambio de la altura de la espuma en el tiempo o, en otras palabras, es equivalente a la curva que muestra la reducción que presenta la ER en el tiempo. Quizás fue Jenkins en 2000 el primero en proponer el análisis de la forma de la curva de colapso de una espuma de asfalto [3] y en definir un parámetro asociado a ella, como indicador de calidad de la espuma, conocido como el *Índice de Espumado*, FI (por sus siglas en inglés a partir de *Foam Index*); este índice corresponde al área comprendida entre la curva de colapso y una ER constante de 4. De acuerdo con Jenkins [3, 9] y con Jenkins y Van de Ven [16], un asfalto con un alto FI es capaz de almacenar mayor energía en la espuma mientras se encuentra temporalmente en el rango de viscosidades apropiadas para elaborar la mezcla.

Posterior a Jenkins, varios autores han propuesto modelos para aproximar el comportamiento de colapso de las espumas de asfalto, que en general corresponden a funciones de tipo potencial y principalmente de tipo exponencial [17, 15, 18]. Por ejemplo, Abreu et al. [18] encontraron para las espumas obtenidas a partir de asfaltos de penetración 50, 75, y 170  $1/10$  mm y de 50  $1/10$  mm más aditivo, los comportamientos de colapso definidos por las ecuaciones 1 a 3 ((1) para el asfalto más blando, (2) para los asfaltos más duros, y (3) para el asfalto duro aditivado).

$$ER = g + \frac{h - g}{1 + 10^{-j \times (k-t)}} \quad (1) \quad ER = a \times e^{-\frac{t}{b}} + c \times e^{-\frac{t}{d}} + f \quad (2) \quad ER = m \times e^{-\frac{t}{n}} - p \quad (3)$$

donde a, b, c, d, f, g, h, j, k, m, n, y p son coeficientes obtenidos experimentalmente, y t es el tiempo.

Otro parámetro asociado a la curva de colapso de las espumas de asfalto y que se ha propuesto como indicador de su calidad, es denominado el *Valor de K*, el cual representa la pendiente de la curva o la velocidad de colapso en donde se tiene una condición semi-estable [5]. En la literatura técnica se encuentran muy limitadas referencias sobre este parámetro, por lo que no se consideró en el presente estudio.

## 2.3 Distribución del Tamaño de Burbujas – BSD

Al igual que las propiedades de colapso, se reconoce que la BSD y su variación en el tiempo de vida de la espuma, son otros parámetros esenciales para la caracterización de una espuma de asfalto, particularmente para su aplicación en WMA.

Es claro, que entre menor sea el tamaño de las burbujas, se tendrá en un mismo volumen—es decir para igual ER—una mayor superficie específica y por consiguiente una mayor área expuesta disponible para cubrir las partículas de agregado. Lo anterior, muestra que la ER por sí sola no define completamente la calidad de una espuma de asfalto. Diversos estudios muestran la influencia del tipo de asfalto, de la temperatura y la FWC, entre otros factores, en el tamaño de las burbujas y en la morfología de su formación [8, 19, 6, 12, 4, 5].

### 3 Selección de las condiciones óptimas para fabricar la espuma de asfalto

En la práctica, se busca establecer las condiciones de temperatura, FWC, y concentración de aditivos, de ser necesarios, que den lugar en la espuma de asfalto a una ER máxima y a una HL suficientemente larga para garantizar el mezclado homogéneo con los agregados. Tradicionalmente, el procedimiento que se ha popularizado con este objetivo, aplicado esencialmente a las técnicas de estabilización de suelos y al reciclaje de pavimentos, es el propuesto por la Wirtgen GmbH [14]. Sin embargo, este procedimiento no orienta sobre como seleccionar la temperatura para la optimización de la calidad de la espuma, y como otros procedimientos propuestos [20, 21], solo tiene en cuenta la ER y la HL, que como se indicó, por si solas no son indicativas de la calidad de una espuma de asfalto. Como complemento de los parámetros anteriores, el FI obtenido de la curva de colapso se puede emplear para evaluar la calidad de una espuma de asfalto, a ser usada en una aplicación específica.

Jenkins [3], recomendó valores de FI para diferentes aplicaciones del asfalto espumado, entre ellas las WMA, y propuso una metodología para identificar las combinaciones de ER y HL para las cuales se logra superar el FI especificado, la cual ha sido acogida por otros investigadores [18]. En la Figura 1, se muestra un ejemplo de aplicación para una WMA; donde  $t_s$  corresponde al tiempo de descarga de la espuma, definido por la masa de asfalto tratada y el caudal de operación de la planta de espumado del laboratorio y, el área sombreada representa el área donde las combinaciones de ER y HL dan lugar a un FI mayor a 180 s. Este valor es el mínimo recomendado por Jenkins [3] para una espuma de asfalto con la que se logra una adecuada trabajabilidad en las etapas de mezclado y de compactación de la WMA. En otras palabras, las condiciones de temperatura y de FWC para las que la ER y la HL se encuentran en la zona sombreada, resultan apropiadas para fabricar la espuma de asfalto, pudiendo seleccionarse aquellas que den lugar al FI más alto.

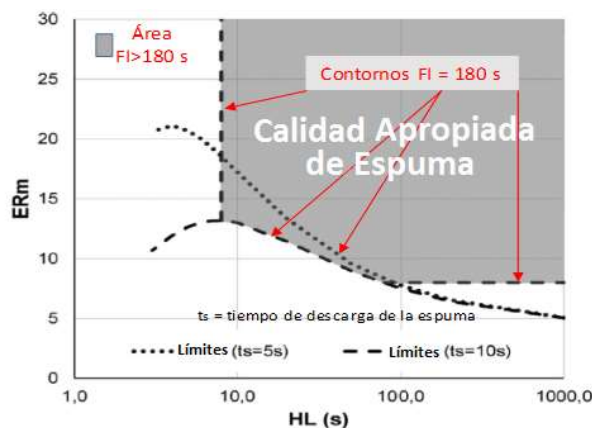


Figura 1 Selección de las condiciones de temperatura y FWC para cumplir con un FI mínimo especificado

### 4 Materiales

En el presente estudio se usó un cemento asfáltico procedente de la refinería de Barrancabermeja, Colombia, clasificado por penetración como 80-100  $1/10$  mm. Las propiedades del mismo están

conformes con las especificaciones que a este respecto fija el Instituto Nacional de Vías de la República de Colombia, [22].

## 5 Condiciones de fabricación de las espumas de asfalto

La espuma de asfalto se produjo en una planta de laboratorio modelo Wirtgen WLB -10S. Para el espumado se trabajaron tres temperaturas de calentamiento del cemento asfáltico (140, 150, y 160°C) y cuatro FWC (1.5, 2.5, 3.5, y 4.5%), aplicando una presión de aire constante de 3.5 Bares.

Para cada una de las condiciones de temperatura y FWC indicadas se trabajó con una masa de 500 gramos de asfalto, para la cual se requiere de un tiempo de descarga,  $t_s$  de 10 s en la planta de laboratorio. Las espumas así fabricadas se dispensaron en un recipiente metálico de 20 litros y diámetro 280 mm, en donde con la ayuda de una varilla graduada y un cronómetro, se determinaron la ER y la HL (medidas por triplicado, para tomar un promedio). Sobre una cuarta muestra, con la ayuda de la cámara digital, se capturaron las imágenes que fueron procesadas para determinar la curva de colapso y las BSD en diferentes instantes de la vida de la espuma.

## 6 Procedimientos para la captura y el procesamiento de imágenes

Para la captura de imágenes se emplea una cámara digital de alta resolución (1280 x 720 pixeles) y velocidad de captura de 24 cuadros por segundo. La cámara se instala en un trípode de tal forma que se ubica a una altura de 0,80 m del suelo, nivelada, y enfocando toda la superficie interior del recipiente, de altura y diámetro conocidos, que contiene la espuma de asfalto. Algunas veces, puede ser necesario el uso de un soplador de aire caliente para evitar que los vapores que emanan de la espuma de asfalto empañen el lente de la cámara.

### 6.1 Medida de la altura de la espuma

Para obtener la altura de la espuma se realiza una toma con la cámara para determinar los planos del fondo y del borde superior del recipiente que contiene la espuma. En estos dos planos se establecen las circunferencias y se realizan los cálculos necesarios para estimar la razón entre pixeles y centímetros en cada plano (ecuación 4), teniendo el diámetro del recipiente medido en pixeles ( $D_{pixeles}$ ) y en centímetros ( $D_{cm}$ ).

$$P2cm = \frac{D_{pixeles}}{D_{cm}} \quad (4)$$

Experimentalmente, se encontró en este estudio que la relación entre la altura de la espuma de asfalto con respecto al fondo del recipiente,  $h$ , y la relación  $P2cm$  puede ser aproximada linealmente de la siguiente manera:

$$h = m * P2cm + b \quad (5)$$

$$m = \frac{h_{max}}{P2cm_{h_{max}} - P2cm_{h_{fondo}}} \quad (6)$$

$$b = h_{max} P2cm_{h_{max}} * m \quad (7)$$

donde  $h_{max}$  es la altura del recipiente,  $P2cm_{h_{max}}$  y  $P2cm_{h_{fondo}}$  son la relación entre pixeles y centímetros a la altura del recipiente y en el fondo del recipiente, respectivamente.

La medida del diámetro en pixeles se determina mediante el procesamiento de las imágenes, ajustando una circunferencia a la superficie de la espuma de asfalto en cada instante de tiempo como se muestra en la Figura 2.

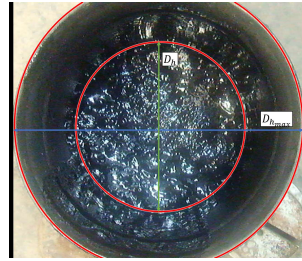


Figura 2 Relaciones geométricas para estimar la altura de la espuma

## 6.2 Medida de la Distribución del Tamaño de Burbujas – BSD

El procesamiento de video e imágenes se realiza con los siguientes pasos (ver Figura 3): 1) conversión de la imagen a color a una imagen en escala de grises, 2) adaptación del histograma—las partes oscuras de la imagen se aclaran y las muy blancas se oscurecen para ver detalles en las mismas—, 3) binarización de la imagen de manera que solo existen dos valores—negro (0) y blanco (255) en toda la imagen—, 4) extracción de los bordes usando un procedimiento conocido como erosión, en el cual primero se reduce el área de los blancos—los óvalos de las burbujas—y se resta de la imagen original, permitiendo ver solamente los bordes, y 5) se engloban en un rectángulo los óvalos encontrados de manera que se obtenga el área, los diámetros equivalentes y las excentricidades de cada elemento segmentado.

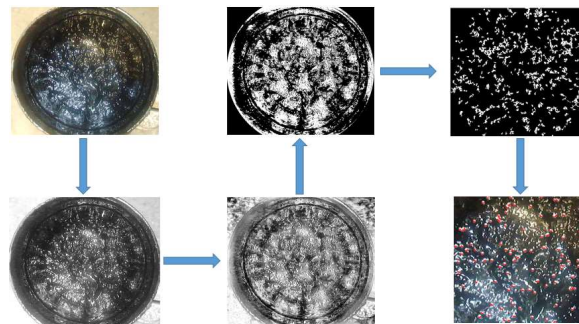


Figura 3 Procedimiento para el procesamiento de imágenes

Para obtener la BSD se realiza el histograma de cada cuadro tomado (24 por segundo), descartando aquellos donde se obtuvieron menos de 100 burbujas y áreas menores a 5x5 píxeles. La distribución final de tamaños de burbujas por segundo, es el promedio de los resultados encontrados en los 24 cuadros, para cada uno de los diámetros comprendidos entre 2 y 20 mm. Finalmente, con la información así obtenida, se realiza una curva de frecuencias acumuladas de los diámetros de burbujas más finos.

## 7 Resultados y discusión

### 7.1 Relación de Expansión (ER) y Vida Media (HL) obtenidas por la técnica de la varilla graduada

Bajo las condiciones de temperatura y FWC evaluadas, se obtuvieron espumas con ERs que variaron desde 12 (a 140°C y FWC de 1,5%) hasta 36 (a 150°C y FWC de 4,5%) y HLs que se encontraron entre 10 s (a 160°C y FWC de 4,5%) y 35 s (a 140°C y FWC de 1,5%), medidas empleando la técnica de la varilla graduada. En la figura 4(a) se muestra el comportamiento de la ER y de la HL frente a la FWC para la temperatura de 150°C, el cual es representativo del comportamiento general documentado—la ER aumenta con la FWC, mientras que la HL presenta un comportamiento inverso—. En la figura 4(b), se recogen los resultados de todas las ER y HL

obtenidas. De estos datos se concluye que la espuma más estable, con mayores HL, se obtuvo a 140°C y que con cualquiera de las condiciones de temperatura y FWC, con este asfalto, se logran espumas de buena calidad, considerando los valores mínimos de ER y HL establecidos por diferentes autores [3, 13,14, 21].

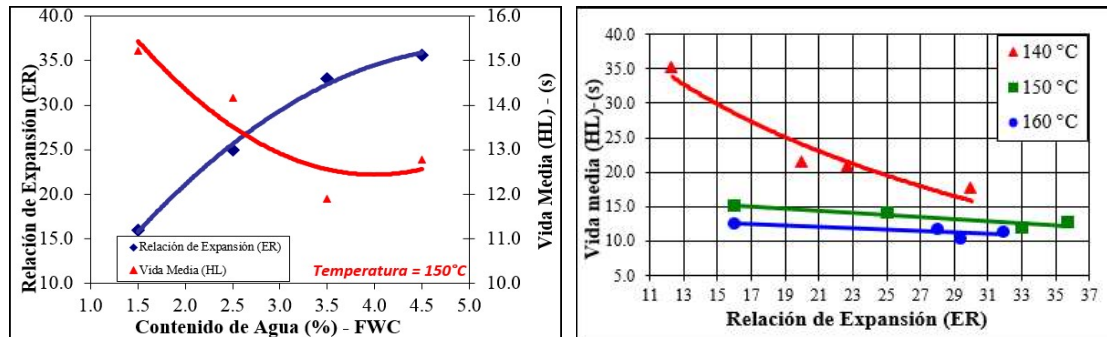


Figura 4 (a) Variación de la ER y la HL con la FWC a 150°C, (b) ER y HL para las diferentes temperaturas y FWC

## 7.2 Curvas de colapso y modelos de comportamiento de las curvas de colapso

En la Figura 5 se presentan las curvas de colapso obtenidas mediante el procesamiento de imágenes, que se consideran representativas de las espumas de asfalto fabricadas con las diferentes temperaturas y FWC. Las figuras se organizaron de forma que sea posible apreciar los efectos en la curva de colapso debidos a la variación de la FWC o de la temperatura. Como se desprende de la observación de estos datos, con una FWC de 4,5% no se presentan cambios muy significativos en las curvas de colapso con la temperatura, como si sucede con una FWC de 2,5%. Las curvas de colapso a 160°C se observan ordenadas con la variación en el FWC, mientras que a 140°C esto no sucede.

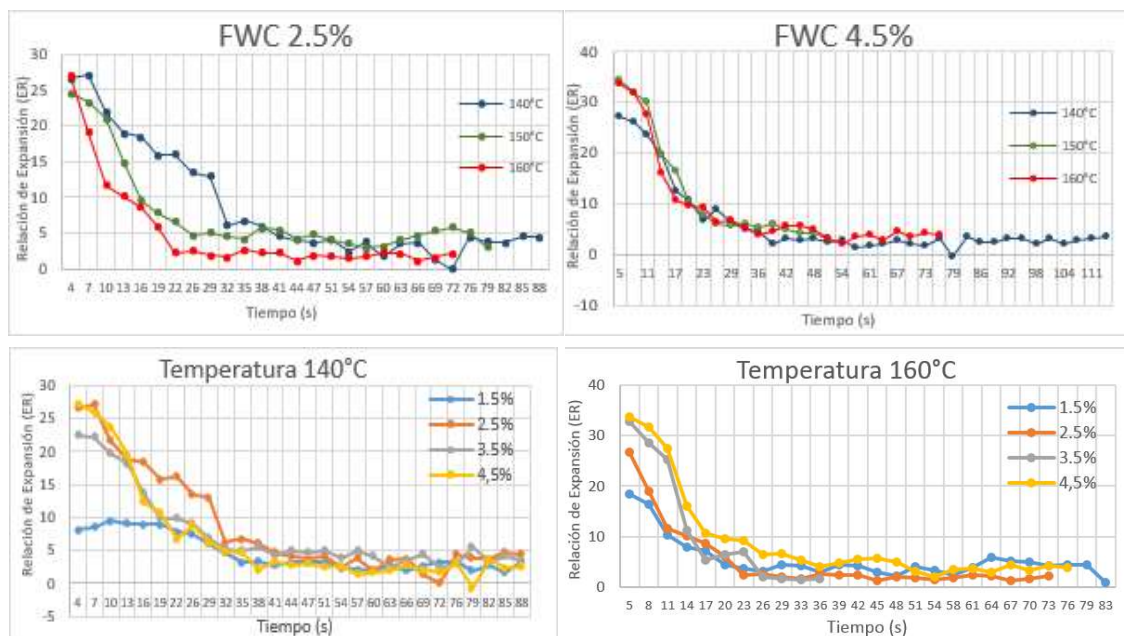


Figura 5 Curvas de colapso representativas para diferentes condiciones de temperatura y FWC

En términos generales, se encuentra que las espumas de asfalto fabricadas bajo las diferentes temperaturas y FWC exhiben un comportamiento definido por Jenkins [3] como una expansión lenta y un colapso gradual. Los datos obtenidos para las espumas del asfalto analizado se ajustan

bastante bien a la ecuación 1. En la Figura 6 se presentan series de datos representativas que muestran el ajuste de los datos experimentales a las ecuaciones (1) a (3); en la tabla 1, que se muestra más adelante, se indican los coeficientes de relación,  $R^2$ , obtenidos. Los valores de  $R^2$  varían entre 0,89 y 0,99 para la ecuación (1), la cual resulta ser la de mejor ajuste para todas las condiciones de temperatura y FWC evaluadas.

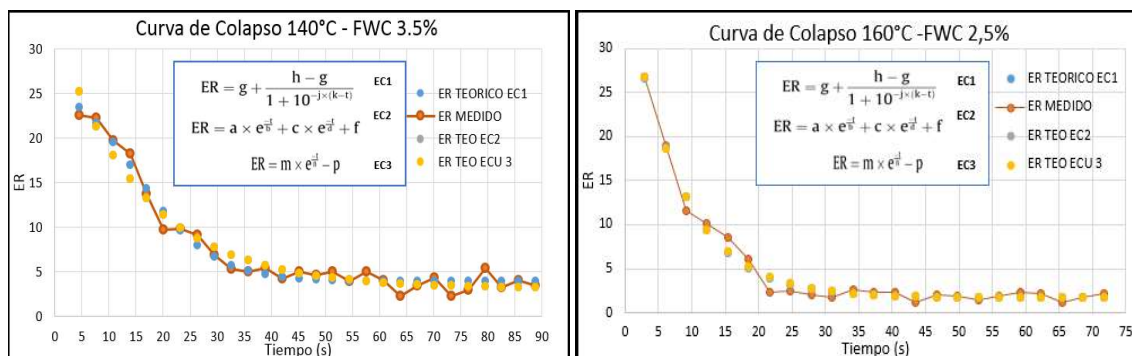


Figura 6 Modelos de comportamiento de las curvas de colapso

### 7.3 Comparación de la Relación de Expansión (ER) y Vida Media (HL), obtenidos mediante el procesamiento de imágenes y la técnica de la varilla graduada

En la figura 7 se presenta la comparación de las ER máximas (ERm) y de las HL obtenidas por la varilla graduada y por imágenes. A partir de estos datos es posible apreciar una buena correspondencia entre los resultados obtenidos mediante las dos técnicas de medida usadas en este estudio. En especial, sorprende la similitud entre los valores de la HL, dada la baja confiabilidad y repetitividad que se le atribuye al método de la varilla graduada.

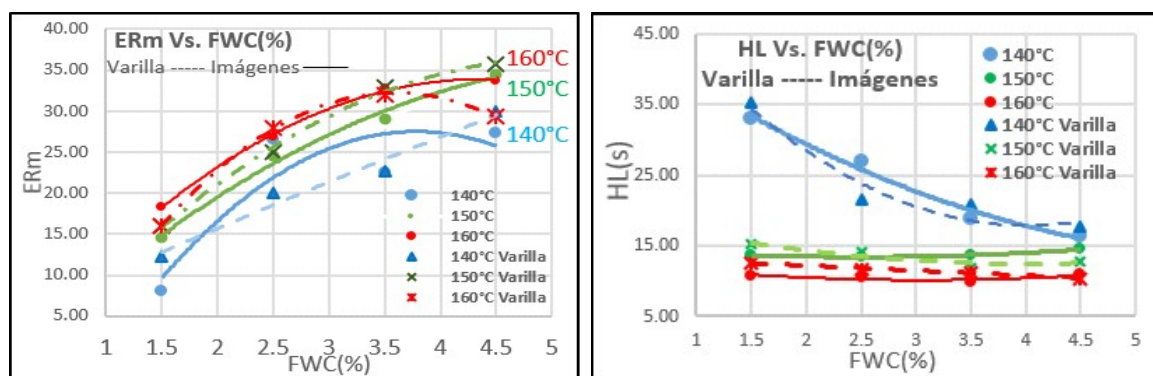


Figura 7 Comparación de las ER y de las HL obtenidos por la varilla graduada y por imágenes

### 7.4 Resumen de resultados asociados a la curva de colapso y selección de condiciones óptimas para el espumado del asfalto

En la tabla 1 se recogen los resultados derivados del análisis de la curva de colapso de las espumas fabricadas bajo las diferentes condiciones de temperatura y FWC. Se incluyen en ésta las medidas realizadas con la técnica de la varilla graduada, así como el producto de ER y HL—el cual también puede usarse como indicador de calidad de la espuma [21]—, el área bajo la curva de colapso y una ER de 4—ajustada para tener en cuenta el tiempo  $t_s$  de descarga de la espuma y así poder compararla con el FI calculado de acuerdo a lo definido por Jenkins [3]—, pudiéndose observar una buena correspondencia entre ellos.

Tabla 1. Resumen de resultados de ER, HL, y parámetros asociados

| T (°C) | FWC (%) | ER   |      | HL   |      | ERxHL |       | ÁREA<br>BAJO LA<br>CURVA<br>y ER>4<br>(s) * | FI (s) | $ER = g + \frac{h - g}{1 + 10^{-j \times (k - i)}}$ |         |       |         | $ER = a \times e^{\frac{d}{b}} + c \times e^{\frac{d}{b}} + f$ |        |        |        |        |
|--------|---------|------|------|------|------|-------|-------|---------------------------------------------|--------|-----------------------------------------------------|---------|-------|---------|----------------------------------------------------------------|--------|--------|--------|--------|
|        |         |      |      |      |      |       |       |                                             |        | (R²)                                                |         |       |         | (R²)                                                           |        |        |        |        |
|        |         | IMA  | VAR  | IMA  | VAR  | IMA   | VAR   |                                             |        | g                                                   | h       | j     | k       | a                                                              | b      | c      | d      | f      |
| 140    | 1.5     | 8.1  | 12.3 | 33.0 | 35.2 | 266.9 | 433.0 | 178.9                                       | 106.3  | 2.596                                               | 8.728   | 0.145 | 29.149  | 5.130                                                          | 33.018 | 5.130  | 33.018 | 1.124  |
|        |         |      |      |      |      |       |       |                                             |        | 0.9683                                              |         |       |         | 0.8385                                                         |        |        |        |        |
|        | 2.5     | 26.5 | 20.0 | 26.9 | 21.5 | 715.2 | 430.0 | 747.1                                       | 831.0  | 3.165                                               | 30.657  | 0.048 | 18.868  | 16.127                                                         | 20.889 | 16.407 | 20.889 | 1.931  |
|        |         |      |      |      |      |       |       |                                             |        | 0.9702                                              |         |       |         | 0.9498                                                         |        |        |        |        |
|        | 3.5     | 22.6 | 22.7 | 18.9 | 20.9 | 427.0 | 474.4 | 572.1                                       | 530.2  | 3.903                                               | 27.608  | 0.062 | 15.273  | 14.572                                                         | 16.003 | 14.572 | 16.003 | 3.134  |
| 150    |         |      |      |      |      |       |       |                                             |        | 0.9779                                              |         |       |         | 0.9607                                                         |        |        |        |        |
|        | 4.5     | 27.3 | 30.0 | 16.4 | 17.7 | 448.3 | 531.0 | 657.2                                       | 641.6  | 2.483                                               | 34.593  | 0.067 | 13.756  | 19.919                                                         | 13.589 | 19.919 | 13.589 | 2.026  |
|        |         |      |      |      |      |       |       |                                             |        | 0.9769                                              |         |       |         | 0.9588                                                         |        |        |        |        |
|        | 1.5     | 14.6 | 16.0 | 13.7 | 15.2 | 198.8 | 243.2 | 310.6                                       | 241.4  | 2.512                                               | 19.950  | 0.075 | 9.171   | 8.581                                                          | 11.695 | 8.615  | 13.018 | 2.234  |
|        |         |      |      |      |      |       |       |                                             |        | 0.8863                                              |         |       |         | 0.8805                                                         |        |        |        |        |
| 160    | 2.5     | 24.6 | 25.0 | 13.4 | 14.2 | 329.6 | 355.0 | 568.1                                       | 515.9  | 4.502                                               | 25.897  | 0.136 | 11.927  | 15.019                                                         | 10.563 | 14.764 | 10.563 | 3.869  |
|        |         |      |      |      |      |       |       |                                             |        | 0.9829                                              |         |       |         | 0.9419                                                         |        |        |        |        |
|        | 3.5     | 29.1 | 33.0 | 13.7 | 11.9 | 397.6 | 392.7 | 659.6                                       | 637.6  | 2.304                                               | 33.670  | 0.062 | 11.842  | 18.976                                                         | 12.452 | 18.723 | 12.452 | 1.359  |
|        |         |      |      |      |      |       |       |                                             |        | 0.9841                                              |         |       |         | 0.9467                                                         |        |        |        |        |
|        | 4.5     | 34.4 | 35.7 | 14.5 | 12.8 | 498.0 | 457.0 | 830.4                                       | 820.0  | 4.762                                               | 36.927  | 0.067 | 12.552  | 22.244                                                         | 13.006 | 21.990 | 13.006 | 1.925  |
| 160    |         |      |      |      |      |       |       |                                             |        | 0.9903                                              |         |       |         | 0.9560                                                         |        |        |        |        |
|        | 1.5     | 18.4 | 16.0 | 10.8 | 12.6 | 198.3 | 201.6 | 324.4                                       | 315.5  | 3.765                                               | 22.984  | 0.116 | 7.788   | 12.303                                                         | 7.396  | 11.991 | 7.396  | 2.234  |
|        |         |      |      |      |      |       |       |                                             |        | 0.9264                                              |         |       |         | 0.9100                                                         |        |        |        |        |
|        | 2.5     | 26.8 | 28.0 | 10.6 | 11.7 | 283.2 | 327.6 | 485.7                                       | 522.8  | 1.732                                               | 215.095 | 0.059 | -12.101 | 18.270                                                         | 7.925  | 17.970 | 7.925  | 1.694  |
|        |         |      |      |      |      |       |       |                                             |        | 0.9853                                              |         |       |         | 0.9852                                                         |        |        |        |        |
| 160    | 3.5     | 32.8 | 32.0 | 9.9  | 11.3 | 324.6 | 361.6 | 647.2                                       | 649.7  | 3.169                                               | 32.474  | 0.228 | 9.559   | 21.908                                                         | 10.994 | 21.608 | 10.994 | -1.888 |
|        |         |      |      |      |      |       |       |                                             |        | 0.9744                                              |         |       |         | 0.9388                                                         |        |        |        |        |
|        | 4.5     | 33.8 | 29.3 | 10.9 | 10.4 | 368.4 | 304.7 | 763.3                                       | 704.4  | 4.295                                               | 40.404  | 0.101 | 9.257   | 20.134                                                         | 10.660 | 19.835 | 10.660 | 3.338  |
|        |         |      |      |      |      |       |       |                                             |        | 0.9762                                              |         |       |         | 0.9596                                                         |        |        |        |        |

Nota: IMA: Imágenes. VAR: Varilla. \*Ajustada.

Para seleccionar las condiciones de temperatura y FWC óptimas para fabricar una espuma de la calidad apropiada para producir una WMA, se siguió el procedimiento expuesto en el numeral 3, empleando la representación gráfica que se muestra en la Figura 8. Con excepción de la espuma fabricada con una FWC de 1,5% y una temperatura de 140°C, se puede concluir que con todas las demás condiciones se obtienen espumas adecuadas para esta aplicación. Debido a que con una FWC de 2,5% y a una temperatura de 140°C se maximizan el FI, el producto de ERxHL y el área bajo la curva, se seleccionan estas condiciones como las óptimas para la fabricación de la espuma.

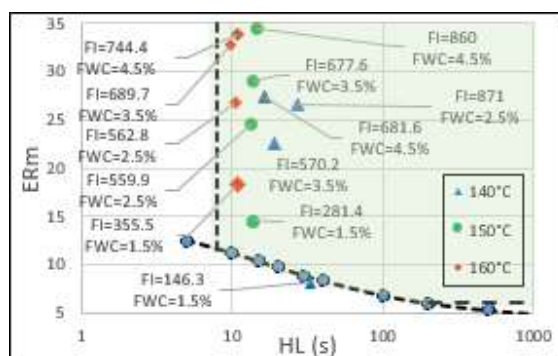


Figura 8 Diagrama para la selección de las condiciones de temperatura y FWC en función del FI

### 7.5 Análisis de la Distribución del Tamaño de Burbujas – BSD

El análisis de las imágenes para determinar las BSD's, se realizó en tres momentos durante el colapso de la espuma, tal y como se muestra en la Figura 9—etapa inicial (0 a 10 s), intermedia (15 a 25 s) y final (70 a 80 s)—. Se identificaron tamaños de burbujas en la superficie de la espuma en rangos que varían desde 2 mm a un poco más de 20 mm. Es de aclarar que el método presenta limitaciones debidas a la resolución de la cámara, con la que se estimó simultáneamente la altura de la espuma (i.e., curva de colapso), lo que restringe a 2 mm (10 píxeles) el tamaño mínimo de

burbuja que se pudo distinguir. Por otra parte, dado que la superficie de la espuma no es uniforme, con depresiones asociadas con la presión de la descarga de la espuma y el escape de vapor, se pueden generar errores en la detección de burbujas de mayor tamaño, que posiblemente son el resultado de un agrupamiento de ellas. Por lo tanto, es importante resaltar que existe incertidumbre en los valores extremos de los tamaños de burbujas encontrados.

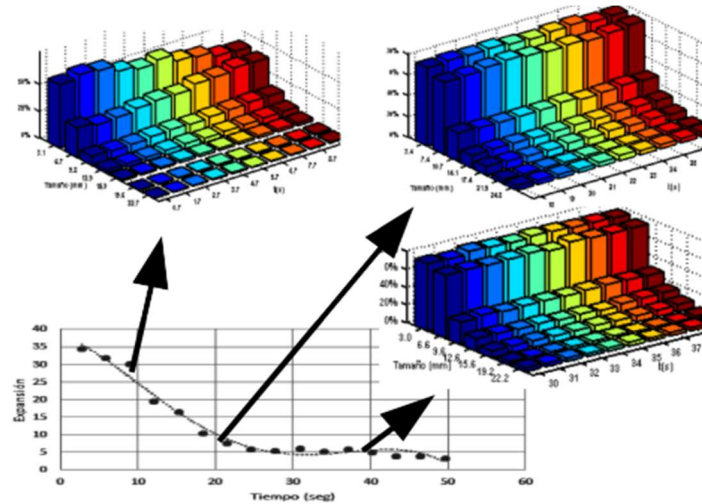


Figura 9 BSD's en diferentes momentos del colapso de la espuma

En la etapa inicial se halló una mayor proporción de burbujas con diámetros pequeños, del orden de 2 a 4 mm, que tiende a disminuir al finalizar esta etapa, presentándose un incremento en el número de burbujas de mayor tamaño (i.e., 5 a 8 mm). Este comportamiento es especialmente notorio a altas temperaturas (i.e., 160°C) y a altas FWC (i.e., 4.5%). Durante los 10 s de la etapa intermedia, en términos generales, no hay cambios apreciables en las proporciones de los diferentes diámetros, mostrándose un predominio de tamaños comprendidos entre los 5 y 8 mm. En la etapa final, al igual que en la intermedia, hay una cierta estabilidad en los tamaños que se concentran en los mismos diámetros. Por otro lado, al comparar los promedios obtenidos de la BSD en cada una de las etapas, como se muestra en la figura 10 (a), se encontró de manera sistemática que para todas las temperaturas y FWC evaluadas, se presenta una distribución de tamaños más fina al iniciar el colapso y más gruesa, o de burbujas de mayor diámetro, en la etapa final.

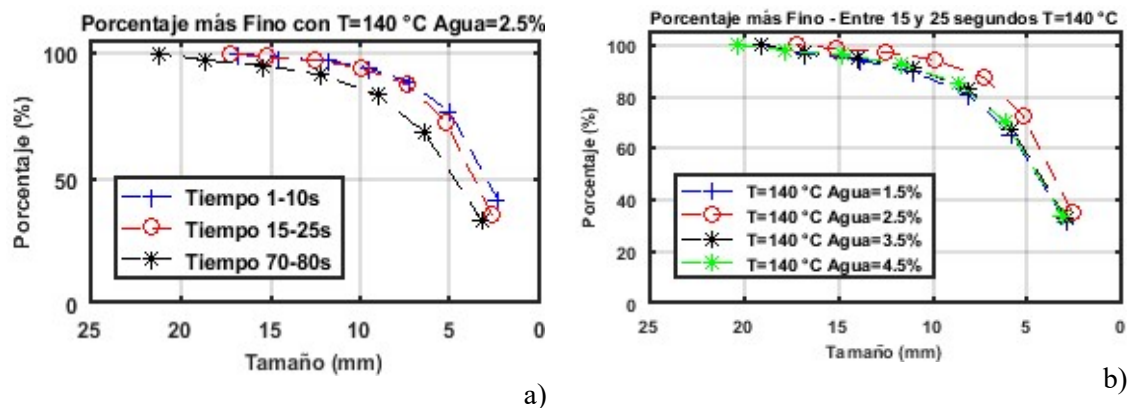


Figura 10 Variación de la BSD (a) En las etapas de colapso (b) Debido al FWC para una misma temperatura

Finalmente, en cuanto a la variación de la BSD con la FWC para una misma temperatura, se muestra en la Figura 10 (b) un comportamiento considerado atípico, pero que puede explicar la

selección de la temperatura de 140°C y de la FWC de 2,5% como las condiciones que dan lugar a la espuma más apropiada para elaborar una WMA. Como se aprecia en esta figura, con la FWC de 2,5% se obtuvo una distribución de tamaños de burbujas más finas, que posiblemente propician una mayor energía de la espuma, medida como el área bajo la curva de colapso por medio del FI.

## 8 Conclusiones

Para la caracterización del colapso y de la distribución del tamaño de las burbujas de una espuma de asfalto, de manera confiable y repetible, se puede usar el procesamiento de imágenes capturadas con una cámara digital de alta resolución. El procedimiento descrito en este trabajo se orientó a buscar una única herramienta, de manejo simple y de fácil adquisición, para caracterizar de forma más rigurosa una espuma de asfalto y obtener parámetros o índices de calidad que permitan: (i) entender el comportamiento de la espuma bajo condiciones variables de temperatura y concentraciones de agua y (ii) seleccionar las condiciones de fabricación de una espuma de la calidad apropiada para su aplicación, bien sea en procesos de estabilización de suelos, de reciclaje de pavimentos, o en técnicas de fabricación de WMA.

Sin embargo, resulta importante mencionar que resta todavía un trabajo importante por realizar en cuanto a la BSD y, muy especialmente, en el aparejamiento de los parámetros de calidad de la espuma con el desempeño de las mezclas que se elaboren con ella. Por ejemplo, en el caso de las WMA resulta necesario asociar la estabilidad y la expansión de la espuma con el cubrimiento total de los agregados por el asfalto (i.e., análisis de humectabilidad), la trabajabilidad y facilidad de compactación de las mezclas, y con su desempeño frente a la acción deletérea del agua, a la deformación permanente y a la fatiga.

Los resultados obtenidos de las curvas de colapso y de los parámetros asociados a ella, muestran que el procedimiento implementado en este estudio para la captura y para el procesamiento de las imágenes tomadas con una cámara digital de alta definición, resulta válido. Sin embargo, al usar la cámara como única herramienta para medir conjuntamente las alturas de la espuma y el tamaño de las burbujas presentes en su superficie, se encontraron dificultades, en especial, para la identificación de burbujas con diámetros inferiores a 2 mm.

En este estudio, se obtuvo concordancia entre las ER y las HL medidas con la técnica de la varilla graduada y con el procesamiento de imágenes. La demora en el traslado del recipiente que contiene la espuma para colocarlo debajo de la cámara, podría explicar las HL menores obtenidas en general con el procesamiento de imágenes frente a las medidas por el operador con el cronómetro usando la técnica de la varilla graduada. Sin embargo, sorprende que las diferencias obtenidas en este parámetro con las dos técnicas de medida, es del orden de máximo 2 segundos.

Para el asfalto específico caracterizado, se aprecia que a la menor temperatura usada para el espumado (i.e., 140°C), la HL disminuye significativamente con el incremento en la FWC, mientras que, a las temperaturas de 150°C y 160°C, prácticamente permanece constante. Igualmente, a menor temperatura, se obtienen espumas más estables, es decir con mayores vidas medias; este comportamiento es especialmente notorio a 140°C. Las curvas de colapso se ajustan bastante bien a un modelo de tipo exponencial, igual al propuesto en otros estudios para un asfalto blando, con un comportamiento definido por una expansión lenta y un colapso gradual. Atendiendo las recomendaciones para la selección, a partir del FI, de las condiciones óptimas para el espumado, a 140°C y con una FWC de 2,5%, en principio se lograría con este asfalto una espuma de calidad apropiada para su aplicación en la fabricación de una WMA.

En cuanto a la BSD del asfalto evaluado, con las limitantes propias del sensor usado, se pudo establecer la evolución temporal del tamaño de las burbujas. Se observó que burbujas con diámetros menores o iguales a 2 mm están presentes en un alto porcentaje (35% a 40%) en todas las etapas del colapso de la espuma y, que los tamaños de 15 a 20 mm se desarrollan en menor proporción (del orden del 10%). Sin embargo, se recomienda realizar investigación adicional para refinar el instrumento y la técnica de detección de burbujas de tal forma que se puedan distinguir diámetros menores a 2 mm, que posiblemente son los que caracterizan mejor la espuma para su aplicación en una WMA.

## 9 Agradecimientos

Los autores agradecen a la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, y a las Vicerrectorías de Investigación de la Universidad del Magdalena y la Universidad Militar Nueva Granada (proyecto IMP-ING-2132) por el apoyo brindado para completar este estudio. Igualmente, extienden un agradecimiento especial a la compañía MPI por facilitar el material de prueba.

## 10 Referencias

- [1] F. Yin, E. Arámbula-mercado, and D. Newcomb, "Effect of laboratory foamer on asphalt foaming characteristics and foamed mixture properties," vol. 8436, no. January, 2016.
- [2] National Asphalt Pavement Association NAPA, "Asphalt Pavement Industry Survey on Recycled Materials and Warm-Mix Asphalt Usage," vol. 138. pp. 1–40, 2015.
- [3] K. J. Jenkins, "MIX DESIGN CONSIDERATIONS FOR COLD AND HALF-WARM BITUMINOUS MIXES WITH EMPHASIS ON FOAMED BITUMEN," no. September, 2000.
- [4] Z. A. Arega, A. Bhasin, W. Li, D. E. Newcomb, and E. Arambula, "Characteristics of Asphalt Binders Foamed in the Laboratory to Produce Warm Mix Asphalt," vol. 26, no. 11, pp. 1–10, 2014.
- [5] D. Newcomb *et al.*, *NCHRP - REPORT 807. Properties of Foamed Asphalt for Warm Mix Asphalt Applications*. Transportation research Board, 2015.
- [6] B. W. Hailesilassie, M. Hugener, A. Bieder, and M. N. Partl, "New experimental methods for characterizing formation and decay of foam bitumen," *Mater. Struct.*, vol. 49, no. 6, pp. 2439–2454, 2016.
- [7] A. Apeagyei, "Evaluating Foamed Asphalt Stability Using Acoustic Emission Techniques," *J. Mater. Civ. Eng.*, no. SEPTEMBER, pp. 1291–1298, 2012.
- [8] B. W. Hailesilassie, P. Schuetz, I. Jerjen, M. Hugener, and M. N. Partl, "Dynamic X-ray radiography for the determination of foamed bitumen bubble area distribution," *J. Mater. Sci.*, vol. 50, no. 1, pp. 79–92, 2014.
- [9] K. Jenkins, "Characterisation of foamed bitumen," *7th Conf. Asph. ...*, pp. 1–18, 1999.
- [10] H. Ozturk, "Quantification of quality of foamed warm mix asphalt binders and mixtures," Michigan State University, 2013.
- [11] M. Saleh, "Characterization of Foam Bitumen Quality and the Mechanical Properties of Foam Stabilized Mixes," *Univ. Canterbury. Civ. Eng.*, 2006.
- [12] G. Martinez-Arguelles, F. Giustozzi, M. Crispino, and G. W. Flintsch, "Investigating physical and rheological properties of foamed bitumen," *Constr. Build. Mater.*, vol. 72, pp. 423–433, Dec. 2014.
- [13] Asphalt Academy, *Technical Guideline : Bitumen Stabilised Materials A Guideline for the Design and Constructio of Bitumen Emulsion and Foamed Bitumen Stabilised Materials*, no. May. 2009.
- [14] Wirtgen GmbH, *Wirtgen Cold Recycling Techology*. 2012.
- [15] G. P. He and W. G. Wong, "Decay properties of the foamed bitumens," *Constr. Build. Mater.*, vol. 20, no. 10, pp. 866–877, 2006.
- [16] K. Jenkins and M. van de Ven, "GUIDELINES FOR THE MIX DESIGN AND PERFORMANCE PREDICTION," no. July, pp. 16–20, 2001.
- [17] D. Lesueur *et al.*, "Foamability and Foam Stability," *Road Mater. Pavement Des.*, vol. 5, no. 3, pp. 277–302, 2004.
- [18] L. P. F. Abreu, J. R. M. Oliveira, H. M. R. D. Silva, D. Palha, and P. V Fonseca, "Suitability of different foamed bitumens for warm mix asphalts with increasing recycling rates," *Constr. Build. Mater.*, vol. 142, pp. 342–353, 2017.
- [19] B. Hailesilassie, P. Schuetz, I. Jerjen, A. Bieder, M. Hugener, and M. Pratl, "Evolution of bubble size distribution during foam bitumen formation and decay," no. July 2015, 2014.
- [20] S. Campagnoli, "Características de Espumado de los cementos asfálticos Colombianos," *IV Congr. Nac. firmes, Segovia, España*, 1998.
- [21] D. Jones, P. Fu, and J. T. Harvey, "Full-depth pavement reclamation with foamed asphalt in California: Guidelines for project selection, design, and construction," no. March, 2009.
- [22] Instituto Nacional de Vías Ministerio de Transporte República de Colombia, *Especificaciones generales de construcción de carreteras*. 2013.