

Implementation of Computer Vision Methods for Estimation of the Collapse Curve and Bubble Size Distribution in Asphalt Foams

Omar Parra, Ms. Candidate¹, Enrique Estupiñan, M.Sc.², Sandra Campagnoli, M.Sc.³

¹Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, Colombia, omar.parra@escuelaing.edu.co

²Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, Colombia, enrique.estupinan@escuelaing.edu.co

³Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, Colombia, sandra.campagnoli@escuelaing.edu.co

Abstract– This article presents the preliminary results of the implementation of artificial vision and image processing techniques in order to obtain conventional parameters to characterize asphalts such as the expansion ratio (ER by - Expansion Ratio) and the half-life (HL by - Half Life), in addition to unconventional parameters such as the collapse curve and the bubble size distribution (BSD by - Bubble Size Distribution) of an asphalt foam. The ER and HL can be obtained from the collapse curve, therefore, to estimate this curve, a 2D method based on the image geometry is proposed. For the estimation of the bubble size and therefore the BSD, a method based on Maximally Stable Extremal Regions is proposed. The results indicate that the method for height estimation gives good results for what is valid and in terms of estimating the bubble size, the method works, but requires adjustments to obtain better results.

Keywords — ER, HL, BSD, Deep estimation, Image processing

Digital Object Identifier (DOI):
<http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2020.1.1.571>
ISBN: 978-958-52071-4-1 ISSN: 2414-6390

Implementación de Métodos de Visión por Computador para la Estimación de la Curva de Colapso y la Distribución de Burbujas en Espumas Asfálticas

Omar Parra, Ms. Candidate¹, Enrique Estupiñan, M.Sc.², Sandra Campagnoli, M.Sc.³

¹Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, Colombia, omar.parra@escuelaing.edu.co

²Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, Colombia, enrique.estupinan@escuelaing.edu.co

³Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, Colombia, sandra.campagnoli@escuelaing.edu.co

Abstract– Este artículo presenta los resultados preliminares de la implementación de técnicas de visión artificial y procesamiento de imágenes con el fin de obtener parámetros convencionales para caracterizar asfaltos como lo son la relación de expansión (ER por - Expansion Ratio) y la vida media (HL por - Half Life), además de parámetros no convencionales como la curva de colapso y la distribución de tamaño de burbujas (BSD por - Bubble Size Distribution) de una espuma asfáltica. La ER y la HL se pueden obtener a partir de la curva de colapso, por lo que para estimar dicha curva se plantea un método 2D basado en la geometría de la imagen. Para la estimación del tamaño de burbujas y por lo tanto la BSD se plantea un método basado en Maximally Stable Extremal Regions. Los resultados indican que el método para estimación de altura da buenos resultados por lo que es válido y en cuanto a la estimación del tamaño de burbujas, el método funciona, pero requiere ajustes para obtener mejores resultados.

Keywords-- ER; HL; BSD; Estimación de profundidad; Procesamiento de imágenes.

I. INTRODUCCIÓN

El asfalto espumado es una técnica usada en ingeniería civil para producir mezclas tibias asfálticas (WMA del inglés *Warm Mix Asphalt*) mediante la adición de agua al asfalto que se encuentra entre 100 y 150 grados centígrados aproximadamente. La técnica contribuye a mejorar el cubrimiento de los agregados por la espuma, la trabajabilidad y la facilidad de compactación de la mezcla, además de aumentar el desempeño frente al deterioro causado por el agua, la deformación permanente y la fatiga de los pavimentos. Además, esta técnica permite una mayor tolerancia en la especificación de los agregados y por esta razón los procesos constructivos pueden ser de muy alto rendimiento con una reducción de costos [1], [2].

Para usar de manera eficiente el asfalto espumado, es necesario entender y caracterizar las propiedades y características que puedan afectar la producción y el desempeño de las mezclas. Esta caracterización se hace convencionalmente con los parámetros relación de expansión (ER del inglés *Expansion Ratio*) y vida media (HL del inglés *Half Life*) los cuales fueron propuestos en los años 70 [3].

Además de los índices ya mencionados, la curva de colapso o curva de decaimiento y la distribución de tamaño de burbujas

(BSD del inglés *Bubble Size Distribution*), proporcionan información adicional para caracterizar espumas de asfalto. Existen algunas aproximaciones donde se han usado sensores de ultra sonido y laser [4], [5] para medir la evolución de la altura de la espuma en el tiempo para así establecer la curva de colapso. Para la determinación de la distribución de burbujas, se ha usado imágenes de rayos x, imágenes térmicas en el espectro del infrarrojo y captura de imágenes con cámaras digitales convencionales [6].

Este trabajo presenta los resultados obtenidos en relación con la estimación de los parámetros convencionales ER y HL, junto con la curva de colapso y la BSD usando técnicas de visión artificial 2D y 3D.

II. ESTADO DEL ARTE

A. Método tradicional para estimar ER y HL

El asfalto espumado se obtiene a partir de un proceso en el cual dentro de una cámara de expansión se inyecta una cantidad de agua (expresado como porcentaje de la masa de asfalto) y aire comprimido a una masa de asfalto caliente que normalmente se encuentra a una temperatura entre 100°C y 150°C [2]. Cuando el agua entra en contacto con el asfalto, se produce un intercambio de energía al punto de convertir las gotas de agua en vapor, el cual es forzado a introducirse en el asfalto dentro de la cámara de expansión. De inmediato, esta mezcla es liberada mediante una válvula y el vapor encapsulado se expande formando burbujas que son contenidas por la tensión superficial del asfalto hasta alcanzar un estado de equilibrio. A medida que la espuma se enfría, el vapor dentro de las burbujas se condensa ocasionando el colapso y la desintegración de la espuma. Si el espumado se hace con menor cantidad de agua, el proceso en general es más lento y la expansión es menor [1].

En el laboratorio, la espuma asfáltica se descarga dentro de un balde, donde un operario mediante una varilla graduada (cada unidad de la varilla es un múltiplo del volumen inicial del asfalto) mide la expansión y otro operario con un cronómetro registra el tiempo transcurrido. Las mediciones que se realizan son: la relación de expansión que corresponde a la máxima expansión de la espuma respecto al volumen inicial y la vida media, la cual es el periodo de tiempo transcurrido desde el instante en que finaliza la descarga en el balde hasta el momento en el que la espuma alcanza la mitad de la expansión máxima.

Digital Object Identifier (DOI):

<http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2020.1.1.573>

ISBN: 978-958-52071-4-1 ISSN: 2414-6390

18th LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology: “Engineering, Integration, and Alliances for a Sustainable Development” “Hemispheric Cooperation for Competitiveness and Prosperity on a Knowledge-Based Economy”, July 27-31, 2020, Virtual Edition.

Es claro que las medidas dependen de la habilidad, experiencia y coordinación de los operarios, siendo esta una práctica aceptada y formal que entrega datos suficientes para aproximar una curva [7]. Sin embargo, por precisión y repetibilidad se puede mejorar la toma de las medidas con el uso de dispositivos de visión artificial.

Con los avances en la última década en la capacidad de procesamiento de los dispositivos electrónicos, las áreas de aplicación de visión artificial han ido en aumento en los últimos años. Algunas de estas áreas son: metrología de una escena, reconocimiento de objetos, navegación autónoma de robots, asistencia de conducción, control visual, entre muchas otras. La estimación de dimensiones, en particular de altura y profundidad o reconocimiento de formas son algunas de las tareas convencionales en muchas de las aplicaciones.

B. Estimación de profundidad con una cámara

La estimación de profundidad usando una sola cámara es un desafío, pues se está sujeto a distorsiones debidas a la perspectiva y la información del entorno se encuentra en un solo plano. A menudo se recurre a la geometría de la imagen o a patrones conocidos que junto con los parámetros de la cámara permiten establecer relaciones entre la imagen 2D y la vista actual en 3D [8].

Para estimar altura o profundidad usando una sola cámara, se pueden usar cámaras calibradas o cámaras sin calibración, pero se deben incluir modelos de error adecuados [9].

Teniendo en cuenta que a medida que un objeto se aleja de la cámara, su tamaño en píxeles se reduce; si se tiene una medida de referencia en el mismo plano, se pueden estimar las dimensiones de dicho objeto. Basados en esto, en [10], se realiza estimación de altura de espuma asfáltica haciendo uso de la geometría de la escena. Asumiendo que el plano en el que se encuentra la cámara es paralelo al plano del suelo, se determina una curva de calibración entre altura y la razón entre diámetro y píxeles de la espuma. Se realiza el realce de bordes y luego una segmentación de la espuma manualmente, se estima su diámetro en píxeles, y con la relación entre diámetro y píxeles se calcula la altura.

C. Estimación de profundidad con imágenes estéreo

Para estimar profundidad con imágenes estereoscópicas, la idea es usar múltiples imágenes de la misma escena, pero desde diferentes ubicaciones para poderlas relacionar y obtener la disparidad que se define como el desplazamiento relativo de la imagen formada de un objeto en 2 o más vistas. Para un sistema estereoscópico, se tienen al menos 2 cámaras separadas espacialmente y la disparidad resulta ser una función de la profundidad; esta se encuentra al hacer coincidir los puntos correspondientes de los objetos en cada imagen [11].

Algunos de los métodos de estéreo visión consisten en usar: múltiples cámaras paralelas que enfocan la misma escena, una cámara que realiza un paneo tomando múltiples imágenes moviéndose en una trayectoria que puede ser definida o arreglos de una sola cámara con espejos y lentes que enfocan una escena y producen varias imágenes en el mismo sensor. La idea en cada

uno de estos métodos es tener 2 o más imágenes con diferentes puntos de vista para construir la escena en 3 dimensiones [11].

Para construir el mapa de disparidad se debe realizar la correspondencia estéreo (*stereo matching*) entre las imágenes para determinar que parte de una imagen corresponde a que parte en otra imagen para transformar posiciones 2D en profundidades 3D. Para esto se han desarrollado diversos algoritmos que pueden ser clasificados en algoritmos de tipo local y tipo global y dependiendo de su resultado en aquellos que producen una salida densa y los que producen una salida dispersa. En los primeros se realiza una operación por ventanas (un segmento de la imagen) y basados en los valores de intensidad se calcula la disparidad dentro de esta región. Estos métodos son sensibles a las oclusiones (parte de la escena está bloqueada, la continuidad del objeto no se observa). Los globales definen la energía obtenida en la imagen y buscan minimizar una función de costo relacionada con la energía [12].

D. Detección de Burbujas

El proceso de identificación de objetos en una imagen generalmente requiere una etapa de extracción de características que describen el objeto; por lo que se debe analizar cuales características son perceptivamente significativas o relevantes. Luego de esto se debe estimar que tan bien definen dichas características el objeto y diseñar el algoritmo que obtenga las características [13].

La detección de burbujas mediante técnicas de visión artificial puede llevarse a cabo usando visión 2D. Para una buena detección se requiere un buen contraste entre la superficie de estas y el fluido que las contiene, por lo que es usual usar iluminación para lograr que las burbujas se resalten al reflejar más luz ya sea por iluminación directa o por iluminación que se tiene atrás de la escena [14].

Algunos algoritmos que pueden ser utilizados para la detección de burbujas en general son: Espectro de textura, que consiste en aplicar filtros espaciales que logran obtener características de textura en cada pixel para una posterior clasificación, algoritmo *Watershed*, que se basa en la idea de simular flujos de agua en una representación topográfica de la intensidad de la imagen, el algoritmo devuelve la imagen segmentada donde todos los puntos en un mismo valle tienen la misma etiqueta (suele tener problemas de sobre-segmentación). Otras técnicas incluyen aproximaciones basadas en detección de bordes, binarización y operaciones morfológicas o gradientes, redes neuronales y clasificadores difusos [15].

En [16] se usa segmentación dinámica que consiste en tener una imagen suavizada de referencia para luego realizar una segmentación inicial por umbralización local y determinar candidatos a burbuja y posteriormente se clasifican dichas regiones basados en el criterio de que una burbuja contiene dos picos de intensidad. En [17] se procesan imágenes de burbujas en masas para pasteles con el fin de obtener la distribución del tamaño de las burbujas. Se aplican filtros inicialmente para reducir el ruido y posteriormente se usa umbralización adaptativa para hacer una segmentación inicial y finalmente aplicar *Watershed*; las imágenes tienen buen contraste y se obtienen buenos resultados en la detección de burbujas.

En [5], se realiza la medición de burbujas en espuma asfáltica, se usa una cámara 2D para capturar imágenes y procesarlas posteriormente. La captura se realiza con flash y dado que las burbujas tienden a ser esféricas, el centro y los bordes de la burbuja se saturan, esta cualidad se aprovecha para detectar la circunferencia externa y medir el diámetro. Cabe resaltar que la detección de las circunferencias se realiza usando la transformada de Hough, pero manualmente se realizan ajustes a la detección y puesto que en los primeros segundos las burbujas son inestables, el análisis se realiza 15 segundos después de la descarga.

Otro método relacionado con imágenes que se ha implementado para medir el diámetro de las burbujas en espumas asfálticas- es tomografía computarizada, en la que se congela la espuma asfáltica usando baños de nitrógeno, pero obtener una imagen puede tardar hasta 30 minutos con un alto costo [5].

III. MÉTODOS

A. Método para la recolección de imágenes

Antes de realizar el ensayo con la espuma se realiza una calibración de la cámara Fujifilm Real 3D W3, al cual tiene una resolución de 1280x720 píxeles. De igual manera se definió la altura a la que se localizaba la cámara sobre el trípode, 90 cm del suelo y se definió la iluminación general del laboratorio, no se usa luces adicionales o flash para la toma del video; se toma 24 cuadros por segundo, sin zoom óptico ni “digital”. Se calienta el bitumen en el tanque, se realiza “el disparo” en el balde y se traslada a la base del trípode bajo la cámara. El video se registra desde el momento en que la espuma está ingresando al balde, es decir antes de colocar el balde bajo la cámara. Luego de la toma del video se separan los videos para generar los videos izquierdo y derecho y así poder realizar la estimación de la altura 2D y la estimación de la distribución de burbujas. Cabe resaltar que los valores de humedad y temperaturas usados son valores típicos en estos ensayos y que el propósito de este trabajo es comparar los valores obtenidos en cuanto a HR y HL mediante el método de la varilla y el método 2D, así como presentar los resultados en cuanto a la distribución del tamaño de las burbujas. La caracterización del desempeño de las mezclas asfálticas está fuera del alcance de este trabajo.

B. Método 2D para estimación de altura

El método consiste en establecer la relación que existe entre la altura de la espuma y el diámetro actual de la espuma en píxeles. Para cada video se determina la medida en píxeles del diámetro del balde y del diámetro final de la espuma luego de colapsar como se muestra en la Fig. 1. Con estos puntos se establece una función de altura en términos del diámetro.

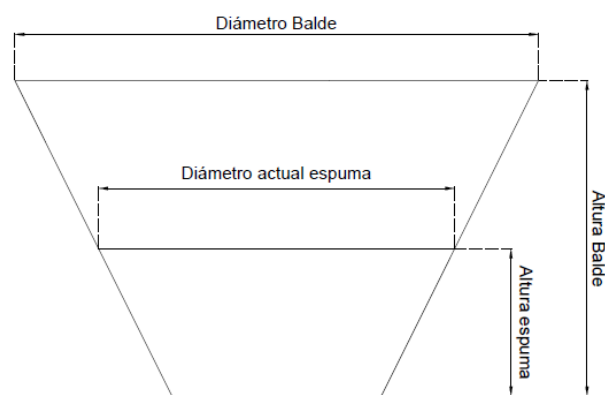


Fig. 1. Imagen en perspectiva del balde

A cada cuadro del video se le aplica un pre procesamiento que elimina el fondo de la imagen y mejora el contraste para luego marcar de forma manual el diámetro de la masa de espuma asfáltica y poder así obtener la altura de la espuma en distintos puntos del video. A partir de los puntos obtenidos se obtienen la ER y la HL.

C. Método para encontrar burbujas.

Para encontrar las burbujas se hace uso del método *Maximally Stable Extremal Regions* (MSER) introducido en [18]. El proceso del algoritmo se puede describir de la siguiente manera: 1) se establece que los píxeles con niveles de gris inferiores a un umbral serán negros y los píxeles por encima serán blancos, 2) luego se hace un barrido de negro a blanco moviendo el umbral. Lo que se obtiene es que inicialmente la imagen es toda blanca, pero luego irán apareciendo regiones que pueden ir creciendo hasta que finalmente la imagen se vuelve negra a medida que se aumenta el umbral. 3) El conjunto de todas las regiones conectadas que aparecieron en todo el proceso son las regiones máximas y de estas regiones las que permanecieron estables en determinado rango de intensidades (parámetro del algoritmo) se dice que son máximamente estables y por ende son las MSER [19]. Cabe resaltar que se les llama extremas porque los píxeles dentro de un MSER tienen una mayor o menor intensidad que los píxeles en el borde.

Como aparece en la Fig. 2, el proceso para encontrar las burbujas comienza con la mejora de imagen, luego se elimina el fondo y se define la región de interés (ROI). Se obtienen las posibles regiones en donde hay burbujas y se clasifican teniendo en cuenta su área, intensidad promedio y excentricidad. Luego se realiza el conteo y finalmente se obtiene la distribución de burbujas (BSD).

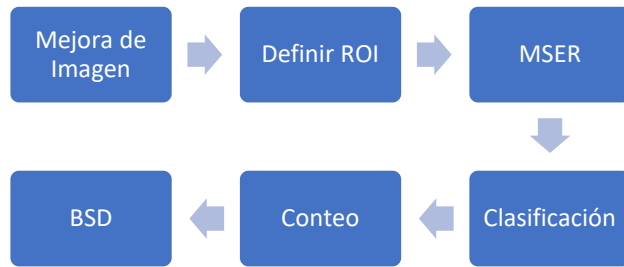


Fig. 2. Algoritmo detección de burbujas

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En esta sección se muestran y analizan los resultados obtenidos al aplicar las técnicas descritas anteriormente a los videos capturados de mezclas con humedad de 2.5% y temperaturas de 140, 150 y 160°C para estimar la curva de colapso, la ER, la HL de cada mezcla y la distribución de burbujas en instantes de tiempo determinados.

A. Estimación de la curva de colapso, ER y HL

Con el método de la varilla graduada se obtienen únicamente dos puntos que se usan para ajustar curvas de tipo exponencial y caracterizar así las espumas asfálticas. Con el método 2D descrito anteriormente se logran obtener más puntos en el tiempo que permiten obtener un comportamiento más acertado del colapso de la espuma como se observa en la Fig. 3.

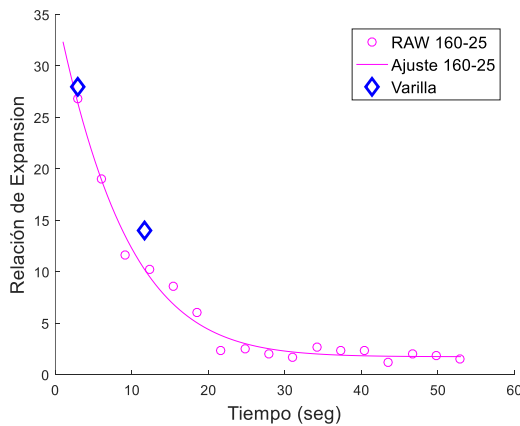


Fig. 3: Comparación método imágenes y varilla

Con el método 2D se realiza el procesamiento de 3 videos y se ajusta una función de tipo exponencial como se muestra en (1) para obtener la curva de colapso. Las curvas de colapso obtenidas se muestran en la Fig. 4 y a partir del coeficiente de

determinación se puede decir que el ajuste es bastante bueno. Al analizar el error de ajuste se obtiene que el error máximo es de alrededor de 30% y en promedio es de 15%.

$$f(t) = c_1 e^{-\left(\frac{t-c_2}{c_3}\right)^2} + c_4 e^{-\left(\frac{t-c_5}{c_6}\right)^2} \quad (1)$$

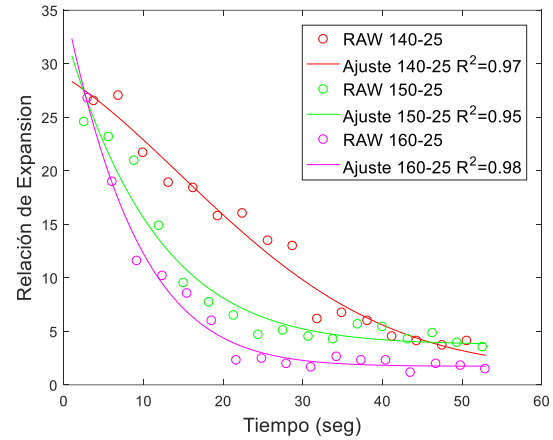


Fig. 4 Curva de colapso

Con los datos obtenidos al aplicar el método 2D, se obtienen los parámetros de ER y la HL que se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1: Tabla resumen ER y HL

Video	Varilla		Single Camera		Error Relativo	
	ER	HL	ER	HL	ER	HL
140-2.5	20	21.5	26.54	26.94	-32.7%	-25.3%
150-2.5	25	14.2	24.57	13.42	1.7%	5.5%
160-2.5	28	11.7	26.81	10.56	4.3%	9.7%

Los valores de ER y HL encontrados usando procesamiento de imágenes son similares a los obtenidos con el método de la varilla, por lo que se puede decir que el procedimiento es válido.

La magnitud relativamente del error en el video 140-2.5 puede deberse a que cuando la temperatura es baja, las expansiones tienden a ser menores y las variaciones se hacen más notables. Por otro lado, el método de la varilla con el que se está comparando puede presentar errores, tanto en la toma manual de los datos como al momento de la transcripción de la información.

B. Estimación de la distribución de burbujas

Al aplicar el procesamiento a una imagen para encontrar burbujas, se obtienen resultados como los que se muestran en la Fig. 5, en la cual se señalan las burbujas encontradas mediante círculos de color rojo.

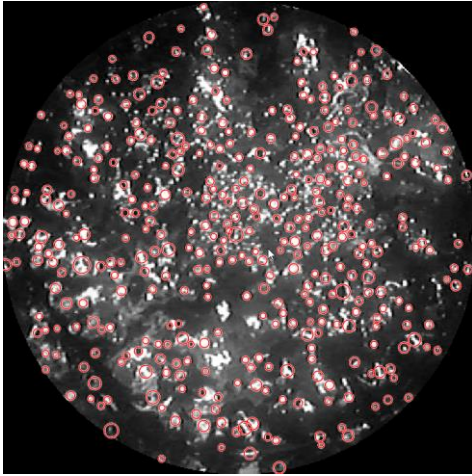


Fig. 5: Burbujas encontradas

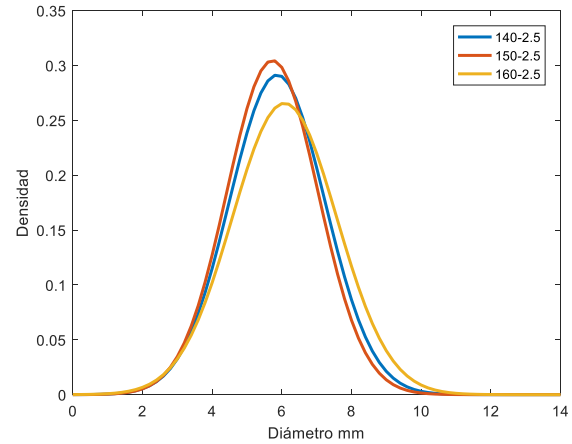


Fig. 6: BSD para distintas temperaturas

Para encontrar la BSD se ajusta una distribución normal a los datos de los diámetros de burbujas encontrados. Inicialmente se realiza el procesamiento en imágenes después del colapso de la espuma, cuando esta es más estable y se pueden apreciar de forma más clara las burbujas. Los resultados mostrados en la Tabla 2 y la Fig. 6 son el promedio de las BSD encontradas en los cuadros entre el segundo 43 y 44 de cada video.

Tabla 2: Parámetros BSD

Video	Media(mm)	Desv. Estándar(mm)
140-2.5	5.7421	1.2542
150-2.5	5.7197	1.3217
160-2.5	5.8396	1.3530

Se debe tener en cuenta que los colapsos son más rápidos a medida que se incrementa la temperatura, por lo que se escoge un instante tiempo en donde el colapso ya ha ocurrido en los 3 casos. Se observa que cuando la espuma ya ha colapsado y es estable los diámetros son similares para las 3 temperaturas, siendo un poco más grandes para la espuma con mayor temperatura, coincidente con la teoría que postula que las burbujas son de mayor diámetro cuando la espuma tiene temperatura más alta.

Para un mismo video se obtuvo la BSD para tres instantes de tiempo distintos: antes del colapso, durante el colapso y luego del colapso. Se evidencia que hay diferencias tanto en la forma de la BSD como en las medias. Los resultados se muestran en la Fig. 7.

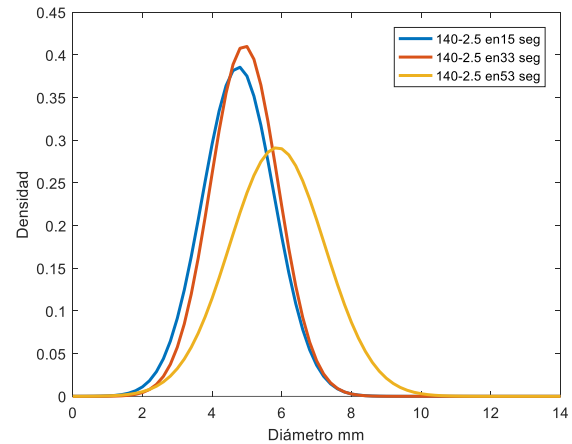


Fig. 7: BSD en distintos instantes de tiempo para 140°C

V. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos para la curva de colapso y los parámetros de ER y HL mediante el método 2D concuerdan con el método comúnmente aceptado de la varilla graduada. El retardo causado por el traslado del balde hasta posicionarlo debajo de la cámara puede explicar las diferencias que en general se presentan.

Los resultados de la BSD son buenos cualitativamente, pero el método requiere trabajo pues aún hay falsas detecciones y en ocasiones el tamaño de las burbujas es subestimado. Adicionalmente no se tiene un valor de referencia sobre la

cantidad promedio de burbujas por tamaño que se deberían encontrar en un instante determinado de tiempo.

Si hay mucha luz en la escena o hay cambios de intensidad durante la captura del video en ocasiones se generan errores durante el procesamiento de las imágenes.

VI. TRABAJO FUTURO

Refinar el método 2D para que la identificación del diámetro interno del balde sea automática y no requiera intervención del usuario.

Realizar pruebas con cambios en la iluminación con el fin de determinar si se resaltan de mejor manera las burbujas en general la espuma en el interior del balde.

Aprovechar los videos de la cámara izquierda y derecha para implementar un algoritmo de estimación de profundidad basado en la disparidad.

REFERENCIAS

- [1] G. J. Thenoux y A. Jamet, «Tecnología del asfalto espumado y diseño de mezcla,» *Revista Ingeniería de Construcción Pontificia Universidad Católica de Chile*, 2002.
- [2] EAPA, «The use of Warm Mix Asphalt,» 2010. [En línea]. Available: http://www.eapa.org/usr_img/position_paper/the_use_of_warm_mix_asphalt.pdf. [Último acceso: mayo 2018].
- [3] A. Apeageyi, «Evaluating Foamed Asphalt Stability Using Acoustic Emission Techniques,» *Materials in Civil Engineering*, vol. 25, p. 1291–1298, 2012.
- [4] Z. A. Arega, A. Bhasin, W. Li, D. E. Newcomb y E. Arambula, «Characteristics of Asphalt Binders Foamed in the Laboratory to Produce Warm Mix Asphalt,» *Materials in Civil Engineering*, vol. 26, pp. 1-10, 2014.
- [5] 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*, 1 ed., Washington, D.C.: Transportation Research Board, 2015.
- [6] B. Hailesilassie, P. Schuetz, I. Jerjen, A. Bieder, M. Hugener y M. Pratl, «Evolution of bubble size distribution during foam bitumen formation and decay,» de *Asphalt Pavements - Proceedings of the International Conference on Asphalt Pavements*, Raleigh, North Carolina, 2014.
- [7] G. He y W. Wong, «Decay properties of the foamed bitumens,» *Materials in Civil Engineering*, pp. 1291-1298, 2012.
- [8] A. Joglekar, D. Joshi, R. Khemani, S. Nair y S. Sahare, «Depth estimation using monocular camera,» *Computer science and information technologies*, p. 1758–1763, 2011.
- [9] M. Momenik, S. C. Diamantas, F. Ruggiero y B. Siciliano, «Height Estimation from a Single Camera View,» de *Proceedings of the International Conference on Computer Vision Theory and Applications*, Rome, Italy, 2012.
- [10] S. Campagnoli, E. Estupiñan, O. Parra, D. Puentes, A. Alvarez y O. Reyes, «Aplicación del procesamiento de imágenes para evaluar el colapso y el tamaño de burbujas de espumas de asfalto,» de *Memorias XIX CILA*, Medellín, Colombia, 2017.
- [11] J. Seal, D. Bailey y G. Sengupta, «Depth perception with a single camera,» de *1st International Conference on Sensing Technology*, Palmerston North, New Zealand, 2005.
- [12] D. Kumari y K. Kaur, «A Survey on Stereo Matching Techniques for 3D Vision in Image Processing,» *International Journal of Engineering and Manufacturing*, vol. 6, pp. 40-49, 2016.
- [13] V. Patraucean, «Detection and identification of elliptical structure arrangements in images: theory and algorithms,» Toulouse, Francia, 2012.
- [14] J. H. Kluytmans, «An airlift loop redox cycle reactor for alcohol oxidations: Hydrodynamics, mass transfer and reactor design,» *Knowledge, Technology and Policy*, 2003.
- [15] B. Lin, B. Recke, J. K. H. Knudsen y S. B. Jorgensen, «Bubble size estimation for flotation processes. Minerals Engineering,» *Minerals Engineering*, vol. 21, pp. 539-548, 2008.
- [16] B. Paz, M. Conde, J. Porteiro y M. Concheiro, «On the Application of Image Processing Methods for Bubble Recognition to the Study of Subcooled Flow Boiling of Water in Rectangular Channels,» *Sensors*, vol. 17, 2017.
- [17] N. Misra, R. Phalak y A. Martynenko, «A microscopic computer vision algorithm for autonomous bubble detection in aerated complex liquids,» *Journal of Food Engineerin*, vol. 238, pp. 54-60, 2018.
- [18] J. C. O. U. M. P. T. Matas, «Robust wide-baseline stereo from maximally stable extremal regions,» *Image and Vision Computing*, vol. 10, pp. 761-767, 2004.
- [19] K. R. S. Santosh, «Recent trends on image processing and pattern recognition,» *SPRINGER VERLAG*, vol. 1037, 2019.