

USO DE LÁSER 3D PARA AJUSTAR LA DOSIS DE LIGANTE EN TRATAMIENTOS SUPERFICIALES

Yorguo El Hachem¹, Natalia Zúñiga-García²,
Jorge Prozzi³

¹ Universidad de Texas en Austin, Estados Unidos, yorguo.elhachem@utexas.edu

² Universidad de Texas en Austin, Estados Unidos, nzuniga@utexas.edu

³ Universidad de Texas en Austin, Estados Unidos, prozzi@mail.utexas.edu (*autor correspondiente*)

**Presentado en el XX Congreso Ibero Latinoamericano del Asfalto (CILA) en Guadalajara, México,
Noviembre 2019.**

Resumen

Los tratamientos superficiales son los tratamientos preventivos para pavimento más populares y rentables utilizados en todo el mundo por las agencias de carreteras. Estos tratamientos aumentan la vida útil del pavimento y compensan un mayor deterioro. Su rendimiento se basa en el cálculo preciso de la tasa de aplicación del ligante asfáltico, que es directamente proporcional al volumen de vacíos tanto en la textura de la superficie existente como en los agregados. La subestimación o la sobreestimación de esta tasa da como resultado pérdida de agregado o exudación, que comprometen la seguridad para los conductores. Los métodos de diseño tradicionales determinan una tasa de aplicación de ligante preliminar basada solo en los vacíos de los agregados. Posteriormente, esta tasa se modifica empíricamente para tener en cuenta los vacíos en la textura de la superficie existente, que se estima visualmente o utilizando la prueba de parche de arena. La evaluación incorrecta de los vacíos es una de las principales causas de la falla del tratamiento superficial. En este estudio se utiliza un escáner láser 3D para medir de manera objetiva y automática los vacíos en la textura superficial existente, mejorar el diseño del tratamiento superficial y la automatización de la construcción. El procedimiento se probó en diferentes secciones y se comparó con la prueba del parche de arena. Los resultados preliminares indican que este procedimiento es confiable, repetible y objetivo. Elimina la dependencia del juicio personal y mejora el tratamiento superficial. En consecuencia, las agencias de carreteras podrían integrar el láser 3D dentro del proceso de riego de liga para medir los vacíos en la textura de la superficie durante la construcción y ajustar automáticamente la dosis.

Palabras Clave: preservación de pavimentos, tratamientos superficiales, láser 3D, textura superficial

1 Introducción

La infraestructura del pavimento desempeña un papel fundamental en el transporte de personas y bienes, facilitando los negocios y el comercio, y apoyando la economía. En 2016, más de 3,2 billones de millas recorridas en vehículos, en los Estados Unidos tuvieron lugar en las carreteras existentes (8,7 millones de millas), lo que hizo inevitable el deterioro del pavimento [1]. A medida que los pavimentos se deterioran con el tiempo y el uso, su rendimiento y calidad de conducción disminuyen. Esta caída es constante y baja en las edades tempranas de la vida del pavimento y aumenta significativamente con el tiempo. Para contrarrestar este efecto, se realizan actividades de mantenimiento proactivo y reactivo. Los estudios han demostrado que, aunque se requiere financiamiento por adelantado, un mantenimiento preventivo proactivo tiene un costo de ciclo de vida más bajo y mantiene un nivel de servicio más alto que una alternativa de reconstrucción reactiva [2, 3, 4]. Como se muestra en la Figura 1, un pavimento que recibe un mantenimiento preventivo adecuado experimenta fluctuaciones menores en su condición y continúa brindando un servicio adecuado. Al mantener una buena condición de pavimento, el mantenimiento preventivo mejora el componente sumamente importante que interesa a las agencias de transporte: la seguridad del conductor. Además, prolonga la vida útil del pavimento, mantiene una mejor calidad de conducción y reduce el costo indirecto del usuario de usar la carretera. Con el mantenimiento

reactivo, la condición del pavimento cae a niveles inaceptables e inservibles que serían más costosos de recuperar [5, 6].

Los tratamientos superficiales son reconocidos por las agencias de carreteras como las prácticas de conservación de pavimentos más viables [7, 8]. Si bien no necesariamente aumentan la capacidad estructural del pavimento, estos tratamientos corregirán daños menores, maximizan la vida útil, aumentan el rendimiento y mejoran la seguridad; lo cual incrementa la satisfacción del conductor [9]. A pesar de tener un objetivo similar, los tratamientos superficiales difieren en sus características específicas y procesos de realización. Los tratamientos superficiales siguen siendo los tratamientos preventivos más utilizados en todo el mundo debido a su bajo costo y alta durabilidad [10, 11, 12, 13]. En 1999, Hicks et al. examinó el costo y la vida útil esperada de los tratamientos de mantenimiento y descubrió que los tratamientos superficiales tienen la relación costo-beneficio más baja [14]. Sin embargo, el principal desafío en el diseño de tratamientos superficiales es la capacidad de usar los factores empíricos para corregir las condiciones específicas del sitio sin comprometer su rendimiento.

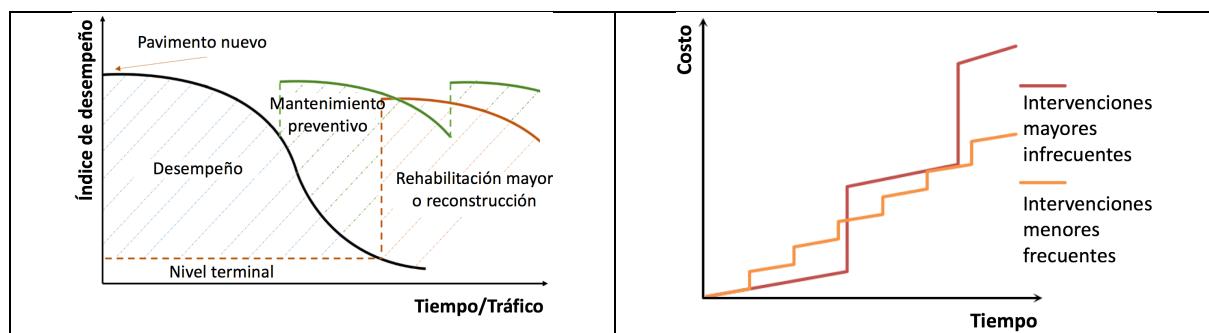


Figura 1. Desempeño y costo de los tratamientos preventivos y de rehabilitación a lo largo del tiempo

2 Métodos de diseño de tratamientos superficiales

El proceso de construcción de los tratamientos superficiales consiste en la colocación una cantidad específica de ligante asfáltico sobre la superficie del pavimento existente, seguido por una capa de agregados, que posteriormente es compactada. El ligante asfáltico sella cualquier grieta en el pavimento existente, impermeabiliza la superficie, mantiene los agregados en su lugar y mantiene unido el nuevo sistema al existente [15]. Inmediatamente después de rociar el ligante, los agregados se extienden y se compactan para enriquecer la macrotextura de la superficie y proporcionar una resistencia al deslizamiento adecuada [9, 16, 17]. El rendimiento de este sistema dual está directamente relacionado con la estimación adecuada de las dosis del material, especialmente la tasa de aplicación del ligante asfáltico. La cantidad de ligante necesaria es proporcional al volumen de vacíos tanto en la textura de la superficie existente como en la capa de agregados. La evaluación inadecuada de los vacíos en el sistema conduce a una cantidad inadecuada de ligante. Un tratamiento superficial mal diseñado compromete la seguridad de los usuarios debido a daños como la pérdida de agregado y la exudación [18]. La pérdida de agregado es causada por una cantidad insuficiente de ligante para mantener los agregados en su lugar. Estos agregados se desprenden debido a los vehículos que atraviesan y son lanzados a los siguientes vehículos. El efecto contrario se conoce como exudación donde los agregados están totalmente cubiertos por la cantidad sobreestimada de ligante. El desbordamiento del ligante crea una superficie resbaladiza, que tiene una resistencia al deslizamiento muy baja y una mayor probabilidad de causar un accidente vial [17, 18]. La estimación inexacta de los vacíos en la textura de la superficie existente es uno de los contribuyentes principales de los cálculos erróneos de la tasa de aplicación del ligante asfáltico. Las siguientes secciones discuten cómo los métodos de diseño tradicionales calculan la tasa de aplicación del ligante asfáltico y tienen en cuenta los vacíos en la textura de la superficie existente.

2.1 Métodos cualitativos

2.1.1 Método Hanson, Nueva Zelanda (1935)

Según F. M. Hanson, la tasa de aplicación del ligante asfáltico se determina de manera que una porción suficiente de los vacíos en los agregados se rellena con ligante asfáltico para mantener la capa gruesa de una piedra en su lugar, evitando la exudación y la perdida de agregado. Según la experiencia de Hanson, los agregados se mantendrán si el ligante ocupa entre el 50% y el 70% de los vacíos. Además, el volumen de vacíos en los agregados disminuye con el tiempo. Como se muestra en la Figura 2, los agregados están sujetos a compactación a corto plazo utilizando rodillos que reducen el volumen de vacíos del 50% al 30%. A esto le sigue una compactación continua a largo plazo por el tráfico donde los vacíos finalmente ocupan el 20% de la profundidad compactada.

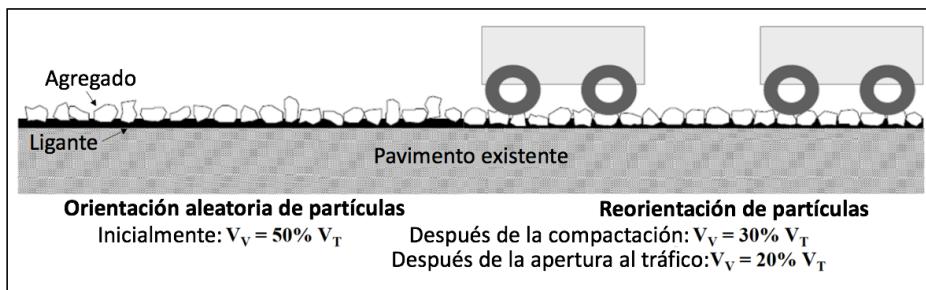


Figura 2. Orientación de las partículas de agregado durante la construcción

2.1.2 Método Kearby, Estados Unidos (1953)

El método de Kearby sugiere que la tasa de aplicación del ligante asfáltico depende del porcentaje de vacíos en los agregados, la dureza de los agregados y los vacíos en la textura de la superficie existente. Sin embargo, la tasa de aplicación real se calcula en función del grosor promedio del tratamiento superficial, el porcentaje de incrustación de agregados y el porcentaje de vacíos en los agregados, que se determina en el laboratorio. Kearby no proporcionó ninguna guía sobre cómo corregir los vacíos en la textura de superficie existente [21]. En su lugar, se requieren inspecciones visuales para corregir las tasas de solicitud según la experiencia y el criterio personal [17, 22].

2.1.3 Método McLeod, Canadá (1969)

El método de McLeod primero calcula la tasa de aplicación del ligante asfáltico como una función de la dimensión mínima promedio (DMP) de los agregados y el volumen de vacíos en ellos. En consecuencia, se aplica un factor de corrección para tener en cuenta los vacíos en la textura de la superficie existente. Estos factores de corrección se determinan a partir de una tabla basada en una calificación visual de la textura de la superficie [23, 24].

2.1.4 Método Kearby Modificado, Estados Unidos (1981)

Epps et al. modificó el método de diseño de Kearby incorporando los factores de corrección que faltaban en el método original. Este método de diseño calcula los vacíos en los agregados según las pruebas de laboratorio de peso unitario suelto seco y gravedad específica seca. La tasa de aplicación del ligante asfáltico se determina en función del grosor promedio de la capa del tratamiento superficial, la profundidad de incrustación deseada y la proporción experimentada de vacíos en los agregados. Posteriormente, se aplican correcciones empíricas para los vacíos en la textura de superficie existente [24, 25]. Se requiere un buen juicio de ingeniería para proporcionar una evaluación de la condición de la superficie existente y adoptar el factor de corrección recomendado.

2.1.5 Métodos Australiano, Británico, Francés y Sudafricano (2005, 20016, 2017 y 2007)

La filosofía detrás de estos métodos de diseño es que hay una tasa de aplicación de ligante predefinida probada para funcionar bien en condiciones de sitio "de referencia" [26, 27, 28, 29, 30]. Posteriormente,

se aplican correcciones para tener en cuenta las diferentes condiciones específicas del sitio, incluido el volumen de vacíos en la textura de la superficie existente, entre otros. Para estimar el volumen de vacíos en la textura de la superficie existente, los australianos, franceses y sudafricanos confían en la profundidad media de la textura (PMT) medida por la prueba del parche de arena [26, 28, 29]; mientras que los británicos confían en "una evaluación subjetiva que debe ser realizada por una persona experimentada" [27]. Por lo tanto, fue hasta la década de 2000 que se incorporó un método de caracterización de textura en algunos diseños de capas selladas.

2.2 Métodos cuantitativos

Existe un consenso entre los diferentes métodos de diseño de que los vacíos en la textura de la superficie desempeñan un papel clave en el diseño de los tratamientos superficiales. Diferentes agencias han intentado determinar la tasa de aplicación del ligante según el volumen de vacíos en los agregados, como se representa en la Figura 3a. Sin embargo, se basan en diferentes métodos subjetivos para estimar los vacíos en la textura de la superficie existente (ilustrada en la Figura 3b) para corregir empíricamente las tasas de aplicación. Como se muestra en la Figura 3c, la textura de la superficie existente proporciona un excedente de vacíos en exceso a los contabilizados al considerar la matriz agregada en una superficie plana. Algunos métodos de diseño se basan en medir la PMT obtenida de la prueba del parche de arena como una estimación del volumen de vacíos en la superficie existente. Muchos estudios han probado la variabilidad de esta prueba y concluyeron que la variación es significativa y depende del operador. Las variaciones identificadas fueron causadas principalmente por errores humanos y de muestreo. Los hallazgos también indican que el parche de arena tiene una mala repetitividad y una reproducibilidad aún menor [31, 32]. Por lo tanto, se requiere un procedimiento objetivo e independiente del operador capaz de cuantificar con precisión el volumen de vacíos en la textura de la superficie. En consecuencia, los vacíos medidos deben incorporarse en los métodos de diseño para evitar estimaciones incorrectas de la tasa de aplicación del ligante y, en última instancia, un diseño deficiente.

3 Metodología

El desafío de diseñar tratamientos superficiales ha sido la confiabilidad de usar factores empíricos para corregir las condiciones específicas del sitio, como los vacíos en la textura de la superficie, sin comprometer el rendimiento. Con los avances recientes en la amplificación de la luz mediante la tecnología de emisión de radiación estimulada (láser), las agencias de carreteras, los departamentos de transportes y los institutos de investigación se están preparando para mejorar y emplear tales desarrollos que podrían contribuir a mejorar los diseños del tratamiento superficial. La ventaja de utilizar la tecnología láser es la capacidad de capturar datos 3D de superficies de pavimento utilizando una operación no destructiva, rápida y simple. Estos versátiles láseres se pueden usar tanto en el laboratorio como en el campo para el diseño, la garantía de calidad y el control de calidad. El objetivo de este estudio es emplear el escáner láser 3D, desarrollado en la Universidad de Texas en Austin, para cuantificar de manera precisa, automática y objetiva el volumen de vacíos en la textura de la superficie existente e incorporarlo en los métodos de diseño de tratamientos superficiales existentes para mejorar el cálculo de la tasa de aplicación del ligante. Para lograr el objetivo de este estudio, los pasos, que se enumeran a continuación, fueron necesarios:

- Realización de pruebas de campo para recopilar exploraciones en 3D de diferentes secciones de pavimento utilizando el sistema láser y medir el PMT utilizando el parche de arena para cumplir con los métodos de diseño existentes;
- Desarrollar el algoritmo que determina el volumen de vacíos en el modelo de superficie 3D escaneado y comparar los resultados con los del parche de arena;
- Ajuste de los métodos de diseño existentes.

3.1 Prototipo de escáner láser 3D

Las tecnologías modernas no destructivas, como los láseres, se están introduciendo en varios procesos para aumentar la precisión de los datos recopilados y disminuir el tiempo de prueba. El prototipo, que se muestra en la Figura 4a, es el escáner láser de alta velocidad 3D utilizado en este estudio para escanear la superficie del pavimento existente para determinar el volumen de vacíos en su textura. El láser lineal emite una luz azul con una longitud de onda de 405 nm. Esta línea se compone de 800 puntos que están separados por 300 μm transversalmente. La luz se refleja desde la superficie del pavimento y es captada por el detector. El sistema láser se basa en la técnica de triangulación, que también se muestra en la Figura 4a, para calcular la altura de la superficie escaneada, en mm, siempre que la superficie se encuentre dentro del rango de medición, 300 ± 145 mm. Como se ilustra en las Figuras 4b y 4c, la configuración del sistema consiste en una plataforma de acero con un controlador de movimiento lineal. El láser se monta en el marco, lo que le permite viajar sobre la superficie del pavimento a una velocidad controlada y capturar los datos tridimensionales. En este estudio, la velocidad se establece en 8 mm/s, y la frecuencia del láser utilizada es de 1 KHz. Por lo tanto, los escaneos en la dirección longitudinal se toman cada 8 μm . El láser está conectado a una computadora que almacena los datos en una hoja de cálculo. Los datos pueden procesarse y combinarse para crear una réplica en 3D de la superficie del pavimento, como se representa en la Figura 5d. Estudios de investigación paralelos, realizados por Kouchaki et al., demostraron que el prototipo de láser 3D desarrollado tiene una alta precisión y repetitividad y asegura mejoras significativas sobre los métodos de medición tradicionales [33, 34, 35].

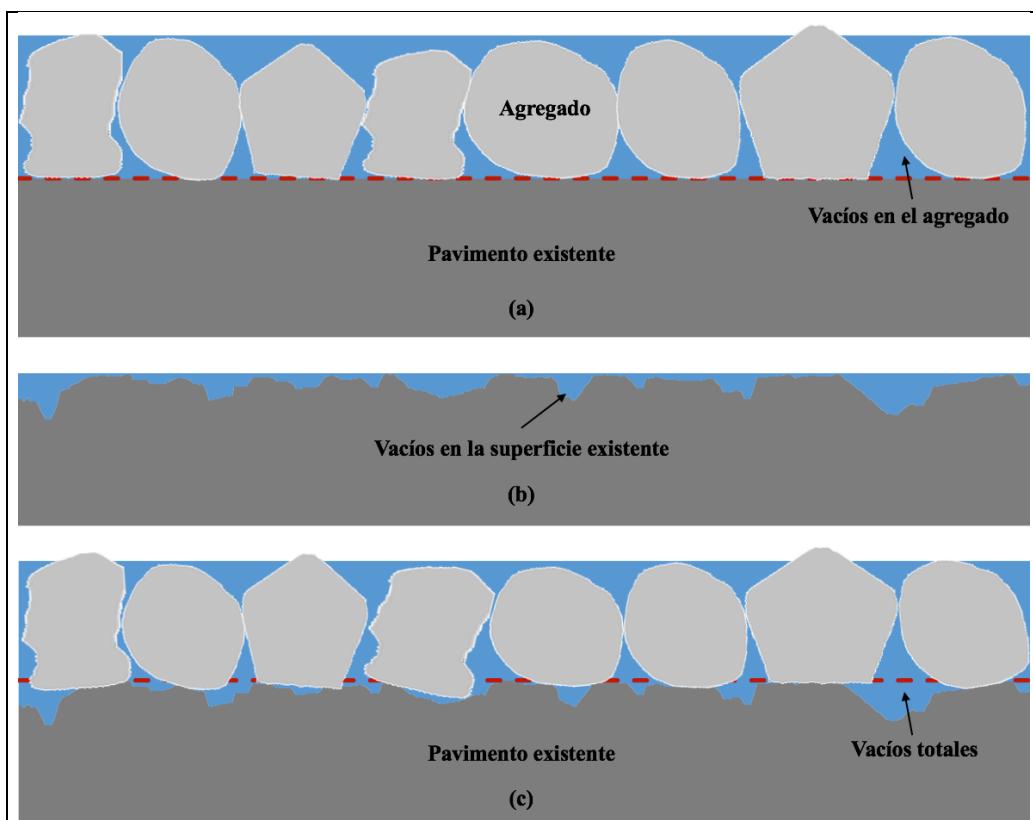


Figura 3. Cambio en la proporción de vacíos con el tiempo

3.2 Proceso de medición y pruebas

Este estudio se realizó en nueve secciones de pavimento con diferentes diseños de mezcla. En cada sección del pavimento, se seleccionaron dos o tres ubicaciones donde se realizó un parche de arena de acuerdo con la norma ASTM E965 [36], seguido de un escaneo láser. Para limitar cualquier sesgo generado por la falta de homogeneidad de la superficie, el parche de arena se realizó en la misma ubicación que la exploración láser, como se ilustra en la Figura 4d.

3.2.1 Filtrado de datos

Los datos recopilados se filtraron para obtener un modelo 3D para la superficie del pavimento. El proceso de filtrado, que se muestra en la Figura 5, incluye descartar o corregir los puntos muertos, que se muestran en azul, que no fueron capturados por el detector en los extremos de la línea láser. Posteriormente, se restan las pendientes en las direcciones transversal y longitudinal. Finalmente, el ruido se elimina de los datos y se aplica un filtro de medios 2D para corregir los valores atípicos evidentes.



Figura 4. a) Especificaciones del láser y triangulación b) Prototipo de escáner láser 3D c) Configuración de prueba de campo d) Ejemplo del área de prueba

3.2.1 Plano de referencia y volumen de vacíos

Algunos métodos de diseño ajustan la tasa de aplicación del ligante estimando el volumen de vacíos en la textura de la superficie utilizando la PMT obtenido del parche de arena [20, 26, 28, 29]. La PMT proporciona un valor promedio de las desviaciones de la superficie del pavimento de una superficie plana verdadera [36]. Sin embargo, el parche de arena es una prueba subjetiva y dependiente del operador. Por lo tanto, investigaciones anteriores intentaron reemplazar la prueba del parche de arena con dispositivos basados en láser que eliminan el sesgo asociado con el operador. Estos estudios escanearon la superficie del pavimento y demostraron que se requiere un punto de referencia, línea o plano para el cálculo de la PMT. Por ejemplo, el algoritmo del analizador de carreteras automático se basa en el punto máximo como referencia para estimar la PMT de un perfil de carretera. Sin embargo, las puntas, los escombros o algunas piedras grandes pueden sesgar el punto de referencia y sobreestimar

los resultados. Cuando se trata del diseño del tratamiento, el plano de referencia debe imitar la carpeta que fluye sobre la superficie del pavimento y llena casi todos los vacíos. La superficie, mostrada en la Figura 5a, no es homogénea, por lo que se consideraron elementos cuadrados más pequeños (30 por 30 mm) de la textura de la superficie. El tamaño considerado permite determinar la macrotextura, que tiene una longitud de onda de entre 0,5 y 50 mm. Cada cuadrado tiene su propio plano de referencia basado en las alturas de los datos que contiene. La Figura 5 muestra la superficie escaneada en 3D con una de las regiones cuadradas para ilustración. El tamaño de los elementos cuadrados se puede cambiar para satisfacer las necesidades del usuario y los datos disponibles.

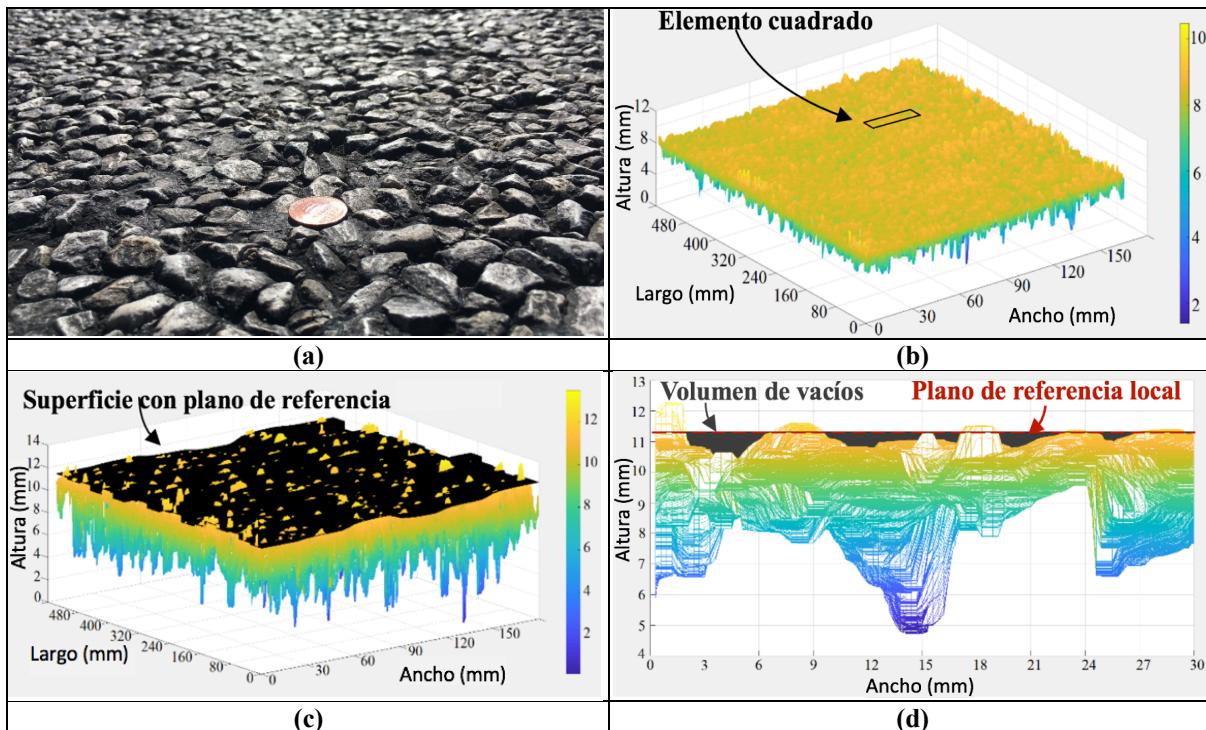


Figura 5. a) Superficie escaneada b) Datos sin procesar c) Datos filtrados d) Superficie descendente e) Superficie con plano de referencia f) Vista 2D de los vacíos en la textura superficial en un cuadrado

4 Resultados

4.1 Determinando el plano de referencia

El propósito detrás de los planos de referencia, que son locales para cada cuadrado de 30 mm, es calcular el volumen de los vacíos en la textura de la superficie existente y simular el ligante dentro de estos vacíos. Se realizaron varias simulaciones de los planos de referencia a diferentes percentiles, y el volumen respectivo de vacíos se calculó como se muestra en la Tabla 1 y se compiló con la PMT.

Los volúmenes vacíos de macrotextura obtenidos por el láser siguen la misma tendencia que los estimados utilizando el parche de arena sin ningún valor atípico evidente. Aunque, los valores no coinciden con precisión, están dentro de la variabilidad normal del parche de arena. Para valores de PMT bajos (superficies más suaves), el volumen medido de vacíos con el láser es muy cercano a la PMT estimado. Sin embargo, la variabilidad del parche de arena aumenta a niveles más altos de PMT a medida que se vuelve más desafiante para el operador extender la arena, y se observan diferencias significativas. Desafortunadamente, no hay investigaciones que se centren en determinar el volumen de vacíos en la textura de la superficie para comparar el modelo desarrollado. Sin embargo, vale la pena mencionar que el prototipo desarrollado puede imitar el flujo de ligante dentro de los vacíos de superficie existentes y es altamente repetible y reproducible.

Se generaron varias representaciones gráficas del flujo de ligante en la superficie para visualizar la referencia apropiada necesaria para determinar el volumen de vacíos en la superficie del pavimento existente. La Figura 6 muestra una vista lateral del pavimento escaneado con el plano de referencia en cuatro niveles percentiles diferentes de la profundidad de la superficie. El volumen de vacíos en la textura de la superficie, resaltado en negro, se calcula como el volumen entre la superficie escaneada y el plano de referencia. El percentil 98 muestra el plano más prometedor y consistente para simular el flujo del ligante y calcular el volumen de vacíos en la textura de superficie existente. Por lo tanto, el plano de referencia de toda la superficie escaneada es la colección de los percentiles 98 de cada uno de estos bloques de datos más pequeños, como se representa en las Figura 5.

Tabla 1. Volumen de vacíos en texturas de las superficies existentes

Sección de prueba	SPT MTD (mm)	Volumen de vacíos V_{ES} (L/m ²) con referencia al plano a				
		Perc. 95	Perc. 96	Perc. 97	Perc. 98	Perc. 99
Speedway (1)	0.64	0.52	0.54	0.57	0.61	0.66
Speedway (2)	0.63	0.52	0.54	0.56	0.59	0.63
FM 1431 (1)	1.24	1.46	1.50	1.55	1.62	1.72
FM 1431 (2)	1.34	1.46	1.50	1.55	1.61	1.70
FM 1431 (3)	1.24	1.60	1.65	1.70	1.77	1.87
FM 1626 (1)	0.75	0.64	0.66	0.69	0.72	0.78
FM 1626 (2)	0.73	0.67	0.69	0.71	0.75	0.80
FM 1626 (3)	0.68	0.69	0.71	0.74	0.78	0.84
IH 20 (1)	2.33	2.62	2.72	2.82	2.93	3.08
IH 20 (2)	2.29	2.33	2.41	2.50	2.61	2.76
IH 20 (3)	2.10	2.57	2.66	2.75	2.88	3.05
RM 12 (1)	0.45	0.39	0.41	0.43	0.46	0.51
RM 12 (2)	0.47	0.39	0.40	0.42	0.45	0.51
RM 12 (3)	0.47	0.39	0.41	0.43	0.46	0.51
SH 36 (1)	2.23	2.27	2.33	2.41	2.51	2.66
SH 36 (2)	2.04	2.21	2.27	2.35	2.45	2.61
SH 36 (3)	2.09	2.34	2.41	2.50	2.61	2.76
SH 195 (1)	1.60	1.39	1.44	1.50	1.58	1.70
SH 195 (2)	1.78	1.50	1.55	1.60	1.67	1.77
SH 195 (3)	2.16	1.59	1.64	1.70	1.78	1.90
US 84 (1)	1.07	0.88	0.94	1.00	1.08	1.18
US 84 (2)	1.18	0.93	0.99	1.06	1.14	1.23
US 84 (3)	1.24	1.02	1.07	1.13	1.21	1.31
US 181 (1)	1.36	1.22	1.26	1.32	1.38	1.46
US 181 (2)	1.33	1.12	1.15	1.20	1.25	1.33
US 181 (3)	1.24	1.29	1.33	1.38	1.44	1.54

4.2 Incorporación del volumen total de vacíos en los métodos de diseño existentes

El rendimiento del diseño del tratamiento superficial está directamente relacionado con la estimación adecuada de la tasa de aplicación de ligante requerida. Casi todas las técnicas actuales miden los vacíos en la capa de agregados, determinan la tasa y corrigen la textura de la superficie utilizando estimaciones de vacíos como la PMT. Dado que la tasa del ligante es una función de los vacíos en el sistema de revestimiento de sellado, la capacidad de medir el volumen total de vacíos mejora la estimación de la tasa de aplicación. Al mismo tiempo, la textura de la superficie existente es muy variable a lo largo del ancho y la longitud de la sección de la carretera. Los métodos convencionales se basan en probar algunas ubicaciones dentro del sitio de trabajo y en la aplicación de una tasa para todos. Esto deja las ubicaciones de textura rugosa con el ligante subestimado y las áreas de textura suave con el ligante sobreestimado,

comprometiendo el rendimiento del tratamiento. Sin embargo, el láser puede mitigar este desafío midiendo la textura de la carretera en varias ubicaciones, si no en todas, y modificando la tasa de aplicación en consecuencia.

Para mejorar el cálculo de la tasa de aplicación, el volumen medido de vacíos en la textura de la superficie existente debe agregarse al volumen estimado de vacíos en la matriz de agregado antes de calcular la tasa de aplicación del ligante. Esto elimina la necesidad de corregir empíricamente la textura de la superficie existente. La siguiente discusión presenta las modificaciones necesarias para dos métodos de diseño existentes para mejorar el cálculo de la tasa de aplicación.

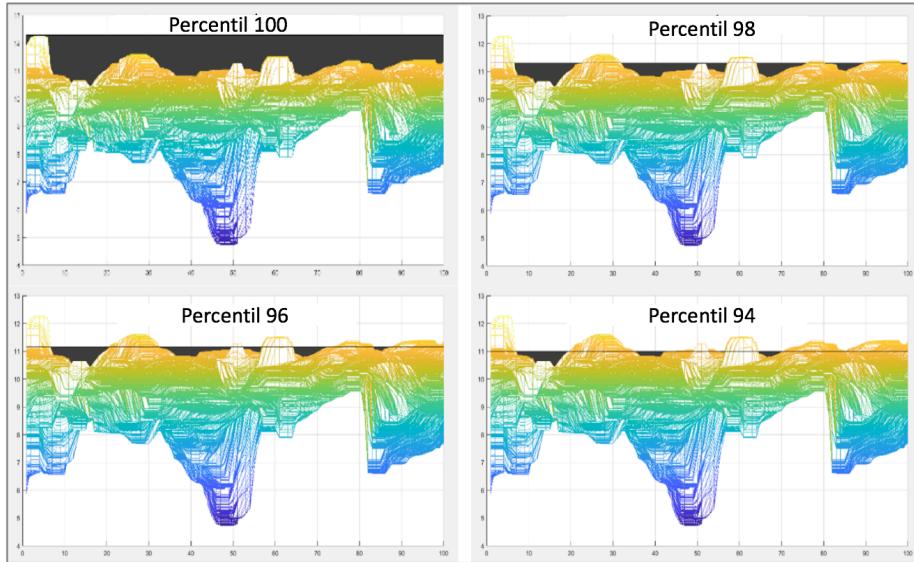


Figura 6. Vacíos de textura simulados rellenos por ligante hasta cuatro planos de referencia diferentes

4.2.1 Método Hanson

La investigación de Hanson encontró que el volumen de vacíos en la matriz de agregados compactados es el 20% del volumen total del tratamiento superficial compactado y viene dado por:

$$V_{V_{\text{Agg}}} = 20\% \text{ of Compacted Aggregate Volume} = 0.2 \times \frac{\text{DMP}}{1000} \quad (1)$$

donde $V_{V_{\text{Agg}}}$ es el volumen de vacíos en la matriz de agregados en m^3/m^2 , y DMP es la dimensión mínima promedio de los agregados en mm. Nota: El volumen agregado compactado tiene una profundidad compactada de DMP en un área de 1m^2 .

Sin embargo, el volumen total de vacíos, $V_{V_{\text{Total}}}$, en la matriz del tratamiento superficial es la suma del volumen de vacíos en la matriz de agregado, $V_{V_{\text{Agg}}}$, y el volumen de vacíos en la textura de la superficie existente, $V_{V_{\text{ES}}}$. Por lo tanto, el volumen total de vacíos en el tratamiento superficial viene dado por:

$$V_{V_{\text{Total}}} = V_{V_{\text{Agg}}} + V_{V_{\text{ES}}} \quad (2)$$

La experiencia de Hanson con los tratamientos superficiales ha demostrado que los agregados se mantendrán en posición si el bitumen ocupa el 70% del volumen vacío. Sin embargo, Hanson no pudo explicar el volumen de vacío en la textura de superficie existente. En cambio, la tasa de aplicación se calcula en función del volumen de vacíos en los agregados. Alternativamente, el volumen de vacíos en

la textura de la superficie de salida puede incorporarse en la tasa de aplicación (TA) que se calcula en l/m^2 como:

$$TA = 0.7 \times V_{V_{\text{Total}}} = 0.14 \times ALD + 0.7 \times V_{V_{ES}} \quad (3)$$

4.2.4 Método Kearby Modificado

El método de Kearby modificado determina la tasa de aplicación de ligante en gal/yd^2 en función de la profundidad promedio de la malla, la profundidad de incrustación deseada y la proporción experimentada de vacíos en los agregados. En consecuencia, un factor de corrección para el tráfico predicho y otro factor para el volumen de vacíos en la textura de la superficie existente se aplican de la siguiente manera:

$$TA = 5.61E \left(1 - \frac{W}{62.4 \times G} \right) (T) + V \quad (4)$$

donde E es la profundidad de incrustación en pulgadas, que es un porcentaje de la profundidad promedio de la malla d, $\left(1 - \frac{W}{62.4 \times G} \right)$ es la proporción de vacíos en la matriz de agregados, W es el peso unitario de los agregados, G es el peso seco específico de los agregados, T es el factor de corrección del tráfico y V es la corrección empírica de la textura de la superficie existente en gal/yd^2 .

En lugar de la corrección empírica de la textura de la superficie existente, se puede utilizar el volumen total de vacíos para estimar la tasa de aplicación. La proporción de vacíos en la ecuación original, (Ecuación 4), es relevante para el volumen de vacíos encontrados en la matriz de agregados. Esta parte de la ecuación se reemplaza por una proporción de vacíos relevantes para todo el sistema de revestimiento de sellado de la siguiente manera:

$$\text{Prop. de vacíos} = 1 - \frac{\text{Volumen de sólidos}}{\text{Volumen total}} = 1 - \frac{\frac{W}{62.4 \times G} \times d}{d + V_{V_{ES}}} = 1 - \left\{ \frac{W}{62.4 \times G} \times \frac{d}{d + V_{V_{ES}}} \right\} \quad (5)$$

En consecuencia, la tasa de aplicación se calcula de la siguiente manera:

$$TA = 5.61E \left(1 - \left\{ \frac{W}{62.4 \times G} \times \frac{d}{d + V_{V_{ES}}} \right\} \right) (T) \quad (6)$$

donde $\left(1 - \left\{ \frac{W}{62.4 \times G} \times \frac{d}{d + V_{V_{ES}}} \right\} \right)$ es la proporción de vacíos en todo el sistema.

Esta filosofía de diseño propuesta permite a las agencias de carreteras y los departamentos de transporte estatales evaluar mejor la tasa de aplicación de ligante requerida y mejorar el rendimiento del sistema de tratamientos superficiales. La capacidad de incorporar un método automatizado y preciso para calcular el volumen de vacíos en la textura de la superficie existente (en lugar de depender de un juicio de textura subjetivo que dicta una corrección empírica) es una mejora significativa en el campo de la preservación del pavimento en general y el diseño automatizado de los tratamientos superficiales en específico. Esta mejora lleva a un mejor diseño y, en consecuencia, a ahorros significativos en dinero de contribuyentes.

5 Conclusiones y recomendaciones

El deterioro del pavimento es inevitable, por lo que se requieren tratamientos preventivos, como los tratamientos superficiales, para compensar de manera rentable este deterioro y extender la vida útil sin aumentar necesariamente la capacidad de carga. Este estudio revisó los principales métodos de diseño de los tratamientos superficiales que enfatizan los parámetros clave que afectan la tasa de aplicación del

ligante asfáltico. Existe un consenso entre los métodos de diseño de que la tasa de aplicación es una función del volumen de vacíos en el tratamiento superficial. Los métodos de diseño tradicionales calculan la tasa de aplicación en función del volumen de vacíos en la capa de agregados que se obtiene de las pruebas de laboratorio. Posteriormente se utiliza una corrección empírica para corregir el volumen de vacíos en la textura de la superficie existente, que se estima en base a inspecciones visuales o pruebas de parches de arena. En este estudio, se desarrolló un procedimiento innovador automatizado para mejorar el diseño de los tratamientos superficiales, específicamente el cálculo de la tasa de aplicación del ligante asfáltico. El proceso implica:

- Escanear la superficie del pavimento existente con un escáner láser 3D;
- Creación de modelos 3D generados por computadora de la textura de la superficie;
- Dividir la superficie en pequeños elementos cuadrados de dimensiones de macrotextura;
- Creación del plano de referencia para cada elemento cuadrado;
- Determinación del volumen de vacíos en cada elemento cuadrado;
- Calcular el volumen de vacíos en la superficie escaneada como la suma de vacíos de cada elemento.

Por lo tanto, el volumen de vacíos en la superficie del pavimento existente se puede incorporar a los métodos de diseño existentes para calcular la tasa de aplicación del ligante de forma objetiva, precisa y rápida. El uso de escaneos automatizados supera las inconsistencias y las limitaciones de las técnicas basadas en la experiencia y elimina la necesidad de factores de ajuste empíricos. Además, las agencias de carreteras y los departamentos de transporte estatales podrían montar el láser en su equipo de aplicación de ligante, tomar medidas de textura durante la fase de construcción y ajustar automáticamente la tasa de aplicación de ligante de forma transversal y longitudinal para adaptarse a la no homogeneidad de la superficie.

6 Referencias

1. Federal Highway Administration (FHWA). *Highway Statistics 2016*. U.S. Department of Transportation, Bureau of Transportation Statistics, Washington, D.C., 2016.
2. Beatty, T. L., D. C. Jackson, D. A. Dawood, R. A. Ford, J. S. Moulthrop, G. D. Taylor, F. L. Danchetz, D. A. Blanck, J. M. Fay, D. S. Keough, L. M. Rodriguez, M. D. Voth and Z. L. Webb, *Pavement Preservation Technology in France, South Africa, and Australia*. Publication FHWA-PL-3-001. FHWA, U.S. Department of Transportation. American Association of State Highway and Transportation.
3. Johnson, A. M. *Best Practices Handbook on Asphalt Pavement Maintenance*. University of Minnesota Center for Transportation Studies, Minneapolis, 2000.
4. Zheng, W., J. L. Groeger, A. L. Simpson and G. R. Hicks. *Performance Evaluation of Various Rehabilitation and Preservation Treatments*. Publication FHWA-HIF-10-020.
5. Jiang, Y. J., *Long-Term Pavement Performance Program Pavement Performance Measures and Forecasting and The Effects of Maintenance and Rehabilitation Strategy on Treatment Effectiveness*.
6. Chen D., and J. Daleiden. *Lessons Learned from the Long-Term Pavement Performance Program and Several Recycled Sections in Texas*. Transportation Research Board, Washington, D.C., 2005.
7. Kutay, M. E., U. Ozdemir, D. Hibner, Y. Kumbargeri and M. Lanotte. *Development of an Acceptance Test for Chip Seal Projects*. Report No. SPR-1649, Michigan State University, Lansing, 2016.
8. Zoghbi, M., A. Ebrahimpour and V. Pothukutchi. *Performance Evaluation of Chip Seals in Idaho*. Publication FHWA-ID-10-190, Idaho Transportation Department, 2007.
9. Einarsson, I. T. *Chip Seals Examination of design and construction in two countries*. University of Washington, Seattle, 2009.

10. Serigos, P., A. Smit and J. Prozzi. *Performance of Preventive Maintenance Treatments for Flexible Pavements in Texas*. TxDOT Technical Report No: 0-6878-2. Center for Transportation Research.
11. Rahman, F., M. S. Islam, H. Musty and M. Hossain. Aggregate retention in chip seal. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2012.
12. Prozzi, J. A., and P. A. Serigos. Performance of Preventive Maintenance in Texas. Civil Engineering Conferencia en la Región Asiática CECAR7, Agosto 30-Septiembre 2, 2016., Waikiki, Hawaii, 2016.
13. Martinez, W., N. Garcia, A. Smit and J. A. Prozzi. Life-Cycle Cost Analysis of Pavement Preservation Techniques in Texas. 96th Annual Meeting of Transportation Research Board.
14. Hicks, R. G., S. B. Seeds and D. G. Peshkin. *Selecting a Preventive Maintenance Treatment for Flexible Pavements*. Research Report prepared for Foundation for Pavement Preservation.
15. Banerjee, A., A. Smit and J. A. Prozzi. Modeling the effect of environmental factors on evaporative water loss in asphalt emulsions for chip seal applications. *Construction and Building Materials*, Elsevier, 2012. Volume 27, pp. 158-164.
16. Ambarish, B. *Breaking and Curing Rates in Asphalt Emulsions*. PhD. Dissertation, The University of Texas at Austin, Austin, 2012.
17. Gransberg, D. D., and D. B. James. *Chip Seal Best Practices*. NCHRP Synthesis 342, Transportation Research Board, Washington D.C., 2005.
18. Pierce, L. M., and N. Kebede. *Best Practices: Chip seal performance measures*. Report No. WA-RD 841.1, Washington State Department of Transportation, Olympia, 2015.
19. Hanson, F. M. *Bituminous Surface Treatment of Rural Highways*. New Zealand Society of Civil Engineers, Wellington, 1935.
20. New Zealand Transport Agency. *Chipsealing in New Zealand*. Transit New Zealand, Road Controlling Authorities & Roading New Zealand, Wellington, 2005.
21. Kearby, J. P., *Tests and Theories on Penetration Surfaces*. Texas Highway Department, 1953.
22. Senadheera, S., D. Gransberg, and T. Kologlu. *Statewide Seal Coat Constructability Review*. Report No. TX-97/0-1787-3. Texas Tech University. Lubbock, Texas, 2000.
23. McLeod, N. W. *A General Method of Design for Seal Coats and Surface Treatments*. Association of Asphalt Paving Technologists, Toronto, 1969.
24. TxDOT. *Seal Coat and Surface Treatment Manual (2017)*. Texas Department of Transportation.
25. Epps, J. A., B. M. Gallaway, and C. H. Hughes. *Field Manual on Design and Construction of Seal Coats*. Research Report No. 214-25. Texas A&M Transportation Institute. College Station, Texas, 1981.
26. Alderson, A. *Update of the Austroads Sprayed Seal Design Method*.
27. Bateman, D. *Design Guide for Road Surface Dressing - Road Note 39 (Issue 7)*. TRL Limited, 2016.
28. Institut des Routes, des Rues et des Infrastructures de Mobilité. *Enduits superficiels d'usure*. Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement, Paris, 2017.
29. The South African National Roads Agency. *Design and Construction of Surfacing Seals*.
30. AFNOR. *Surface Dressing Requirements: French European Standard*. Association Francaise de Normalisation, La Plaine Saini-Denis, 2007.
31. El Hachem, Y. G., S. Kouchaki and J. A. Prozzi. Assessing the Variability of the Sand Patch Test and Determining the Limitation of its Use. 98th Transportation Research Board 2019 Annual Meeting.
32. Chamberlin, W. P., and D. E. Amsler, *Measuring Surface Texture by the Sand-Patch Method*. American Society for Testing and Material, West Conshohocken, 1982.
33. Kouchaki, S., H. Roshani, J. A. Prozzi and J. B. Hernandez. Evaluation of aggregates surface micro-texture using spectral analysis. *Journal of Construction and Building Materials*, 2017.
34. Kouchaki, S., H. Rosahni, J. A. Prozzi, C. Cordoba and J. B. Hernandez. Evaluation of a Line Laser Scanner to Improve the Measurement of Average Least Dimension in Chip Seal Design Methods. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2018.



35. Zuniga-Garcia, N., and J.A. Prozzi. High-Definition Field Texture Measurements for Predicting Pavement Friction. *Transportation Research Record*, 0361198118821598.
36. American Society of Testing and Material. *ASTM E956 Standard Test Method for Measuring Pavement Macrotexture Depth Using a Volumetric Technique*. ASTM International.