



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

Cuantificación de la Infiltración Superficial en Pavimentos Flexibles mediante Pruebas In-Situ

Tesis para obtener el grado de
**MAESTRO EN INFRAESTRUCTURA DEL
TRANSPORTE EN LA RAMA DE LAS VIAS
TERRESTRES**

Presenta:

Ing. Dante Uriel Contreras Ferreyra

Dirigida por:

Dr. Carlos Chávez Negrete



Morelia, Michoacán, noviembre de 2020

RESUMEN

Existen varios puntos por los cuales el agua puede ingresar a la estructura de un pavimento. Sin embargo, una de las principales vías de infiltración de agua es a través de los deterioros superficiales, como son los agrietamientos. Una vez que el agua se encuentra dentro del pavimento, produce daños tanto a la superficie de rodadura como a las capas de suelo que conforman a la estructura del pavimento. Por lo tanto, es importante cuantificar la cantidad de agua que ingresa a un pavimento, para posteriormente, estimar con mayor precisión el daño ocasionado y, además, contribuir al diseño del subdrenaje de los pavimentos. Para la obtención de la tasa de infiltración en pavimentos flexibles, en esta investigación se desarrolló un infiltrómetro de campo. Además, se realizaron varias pruebas “in-situ” en diversas vialidades ubicadas en el estado de Michoacán, México. La mayoría de estas pruebas se realizaron sobre superficies agrietadas. No obstante, a fin de conocer el impacto de los agrietamientos superficiales en la tasa de infiltración, se realizaron también pruebas en superficies sin grietas. Para lograr un análisis más completo en cuanto a los agrietamientos se refiere, se desarrolló un programa que, mediante el tratamiento de imágenes, permite conocer la extensión superficial de los agrietamientos en la superficie donde se realiza la evaluación de la infiltración. Finalmente, se presentan los resultados obtenidos, así como algunos puntos a resaltar como resultado de la investigación.

Palabras Clave

Tasas de infiltración, pavimentos agrietados, infiltrómetros, medición de agrietamientos.

ABSTRACT

There are many routes where the water enters a pavement structure. However, one of the main access is through the surface distresses, like fractures or cracks. Once the water is inside the pavement, it produces damages to both the asphalt and soil layers of the pavement. Therefore, it is important to measure the amount of water that infiltrates into pavements to subsequently, obtain an accurate assessment of the damage, and also, improve the subdrainage design. As part of this research, to measure the infiltration rate of flexible pavements, a field infiltrometer was developed. Furthermore, many field tests were performed over different roads of Michoacan, Mexico. Most of the testing was done on cracked surfaces. Nonetheless, to evaluate the influence of the cracking, some tests were also conducted on uncracked pavements. To accomplish a thorough analysis regarding the pavement cracking, a computational program was developed. Using digital image processing, this program measures the surface area of the cracks were the infiltration rate is evaluated. Lastly, the results obtained are shown as well as some important remarks of the research.

Keywords:

Infiltration rates, cracked pavements, infiltrometers, cracking measurements.

CONTENIDO

1	Introducción	6
1.1	Motivación	7
1.2	Objetivos.....	8
1.2.1	Objetivo general	8
1.2.2	Objetivos específicos	8
1.3	Metodología General	8
1.4	Resultados y aportaciones.....	9
2	Antecedentes	10
2.1	Mecanismos de agrietamiento	10
2.1.1	Medición de agrietamientos.....	15
2.2	Infiltración en pavimentos	16
2.2.1	Medición de la infiltración.....	18
2.2.2	Infiltrómetros de campo	21
2.2.3	Trabajos previos de infiltración en agrietamientos	25
2.3	Deterioro del pavimento debido al aumento del contenido de agua.....	32
2.3.1	Deterioro de la superficie de rodadura	32
2.3.2	Deterioro de las capas granulares en el pavimento.....	35
3	Materiales y métodos	40
3.1	Introducción	40
3.2	Diseño del infiltrómetro.....	40
3.2.1	Funcionamiento de los Frascos de Mariotte	44
3.2.2	Instrumentación del Frasco de Mariotte.....	47
3.3	Algoritmo para cálculo de área en agrietamientos.....	54

3.3.1	Parámetros iniciales	56
3.3.2	Depuración de píxeles de las grietas	60
3.3.3	Conversión de área de contornos y resultados del algoritmo.....	61
3.3.4	Validación estadística del algoritmo	63
3.4	Descripción de la prueba de infiltración de pavimentos	67
4	Resultados de pruebas de campo.....	73
4.1	Sitio 1	74
4.2	Sitio 2.....	75
4.3	Sitio 3.....	78
4.4	Sitios 4 y 5	80
4.5	Sitios 6 y 7	85
4.6	Sitio 8.....	90
4.7	Análisis general de resultados.....	92
5	Conclusiones y trabajo futuro	97
5.1	Conclusiones del diseño del equipo.....	97
5.2	Conclusiones del programa para agrietamientos	97
5.3	Conclusiones del procedimiento de la prueba de infiltración.....	98
5.4	Conclusiones de los resultados de las experimentaciones	100
5.5	Trabajo futuro	101
6	Bibliografía.....	103
7	Anexo A – Determinación de precisión del sensor	107
8	Anexo B – Datos para la validación del procesamiento de agrietamientos	108

1 INTRODUCCIÓN

Todo pavimento está compuesto por diferentes capas cuya función es brindar soporte al camino ante las cargas impuestas por el paso de vehículos. Estas capas se diseñan con base a parámetros índice y mecánicos de los materiales, tales como densidades, módulos elásticos, esfuerzos externos actuantes, entre otros (Huang, 1993). No obstante, algunos factores externos como la inclusión no premeditada de agua pueden generar modificaciones en las condiciones iniciales con las que fue diseñado el pavimento, lo cual comúnmente ocasiona una disminución de sus características mecánicas y un reblandecimiento interno de sus partículas, deteriorándose toda la estructura además de exhibir deformaciones no recuperables (Dawson, 2008). Este fenómeno es evidente en época de lluvias, que es la temporada en la cual se deterioran más los pavimentos en comparación con el periodo de estiaje (Chen et al. 2004). Usualmente, la entrada de agua al pavimento se da desde la superficie por efecto de la gravedad, siendo las grietas el principal conducto de esta infiltración (Cedergren et al. 1972, Christopher et al. 2006).

El agrietamiento sucede con cierta frecuencia en pavimentos envejecidos; sin embargo, también puede presentarse en pavimentos con poco tiempo de construcción; cuando se tiene un diseño inadecuado o deficientes procesos constructivos. Existen varias causas por las que se puede agrietar superficialmente un pavimento, así como diferentes patrones y geometrías de grietas (Valdés et al. 2012). La combinación entre el origen, geometría y patrones de las grietas genera una gran diversidad de aberturas superficiales (Miranda, 2010). En la actualidad es común encontrar una gran diversidad de pavimentos flexibles diseñados con diferentes granulometrías, densidades, porcentaje de vacíos, etc., lo que hace que cada clase de pavimento tenga un valor de permeabilidad determinado, además de una susceptibilidad específica al agrietamiento (Chen et al. 2004).

Englobando lo descrito anteriormente, es necesario cuantificar la magnitud de la infiltración a través de las grietas. Para tal efecto, en este trabajo se propone la medición de la tasa de infiltración superficial en pavimentos mediante pruebas “in-situ”, sobre pavimentos de vialidades tanto de bajos como de elevados volúmenes de tránsito, ubicadas en el estado de Michoacán, México. Puesto que en la actualidad no se tiene una normativa oficial o

procedimiento de prueba estandarizado en México, para la realización de las mediciones de la infiltración superficial, se diseñó un equipo de campo basándose en los procedimientos y dispositivos descritos en otras normativas, como son la ASTM C1701, ASTM D3385 y el permeámetro desarrollado por el National Center for Asphalt Technology (NCAT).

Cabe señalar que, durante dicha etapa de experimentación, a fin de lograr una amplia gama de condiciones de prueba, se evaluaron pavimentos de diferente índole y con distintas superficies de rodadura. Asimismo, en la mayoría de los pavimentos se realizaron ensayos tanto en superficies agrietadas como en superficies sin grietas. Para lograr un análisis más completo acerca de la influencia de los agrietamientos en la tasa de infiltración en pavimentos, se implementó un programa computacional que permite obtener la extensión superficial de las grietas situadas en la zona donde se evalúa la infiltración. Este programa se basa en el procesamiento de imágenes, las cuales son capturadas desde el infiltrómetro de campo con un dispositivo móvil. En dicho procesamiento, se delimitan los píxeles de la fotografía que corresponden a las grietas, para posteriormente, encontrar su área superficial.

Una vez cuantificada la magnitud de la infiltración superficial de los pavimentos, será posible conocer, entender y cuantificar con más detalle el deterioro en los pavimentos debido al aumento en el contenido de agua a causa de la infiltración. De igual manera, la estimación de dicha infiltración contribuirá al diseño del subdrenaje de nuevos pavimentos, logrando así caminos más duraderos ante el problema de la infiltración.

1.1 MOTIVACIÓN

Existen varios lineamientos por los cuales se motiva y se justifica el presente tema de investigación. Primeramente, la infiltración y el subsecuente deterioro mecánico de los pavimentos es un problema práctico que se tiene en muchas vialidades. Esto se evidencia más en las temporadas de lluvias, que es el periodo durante el cual los pavimentos se deterioran mucho más en comparación con las temporadas de secas, debido a los problemas y deficiencias de los sistemas de drenaje y subdrenaje.

Conjuntamente, en la actualidad no se tiene una cuantificación o estimación de la magnitud de la infiltración superficial en superficies de rodadura de pavimentos típicos en nuestro país. Además, algunos de los procedimientos y equipos recomendados para la

evaluación de la infiltración “in-situ” presentan algunas limitaciones, al mismo tiempo que carecen de una certeza total en la medición de la infiltración.

Centrándose en los agrietamientos, un alto porcentaje de los pavimentos en la actualidad presentan grandes extensiones de superficies agrietadas. Estas condiciones favorecen la infiltración superficial, incrementándose así el deterioro del pavimento. Por lo que resulta importante conocer cuantitativamente el impacto de los agrietamientos en la magnitud de la infiltración.

Una vez cuantificado el nivel de infiltración y conociendo la dependencia de las propiedades de las capas del pavimento con el contenido de agua, se podrá estimar de manera más precisa el daño en los pavimentos, lo cual contribuye a tener una mejor caracterización de los pavimentos y subsecuentemente se podrá generar un banco de información que coadyuve al diseño de nuevos pavimentos más duraderos ante el deterioro causado por la infiltración.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo general

Estimar la cantidad de agua que se infiltra en un pavimento a través de las grietas superficiales mediante ensayos de campo, para valorar el potencial de deterioro del pavimento y el control de calidad de la carpeta asfáltica.

1.2.2 Objetivos específicos

- Determinar la geometría superficial de las grietas.
- Desarrollar y construir un infiltrómetro para pavimentos.
- Determinar la tasa de infiltración superficial en distintas condiciones.

1.3 METODOLOGÍA GENERAL

Para solucionar la problemática planteada en esta investigación, se proponen los siguientes pasos metodológicos:

1. Diseño y construcción de un infiltrómetro de campo. Tomando como base lo establecido en las normativas internacionales (ASTM-D3385 y ASTM-C1701) se

propone el desarrollo de un equipo de campo, así como un procedimiento de prueba, con el objetivo de lograr un ensayo eficiente y eficaz, además de buscar la aplicabilidad en diferentes superficies de pavimentos

2. Caracterización geométrica de los agrietamientos mediante tratamiento de imágenes. Dicha caracterización se realizará mediante el tratamiento de imágenes de la superficie del pavimento a través de un algoritmo computacional capaz de calcular el área de la zona agrietada sujeta a la infiltración. Estas imágenes son capturadas desde el infiltrómetro de campo mediante un dispositivo móvil.
3. Evaluación de la tasa de infiltración superficial de los pavimentos agrietados a través de la técnica “Constant Head” y “Double Ring”. Una vez caracterizada la superficie por la cual ingresa el agua al pavimento, se ejecutarán mediciones de campo utilizando el infiltrómetro desarrollado. Dichas mediciones se realizarán sobre superficies con y sin grietas, a fin de conocer la influencia de los agrietamientos en la magnitud de la tasa de infiltración superficial.

1.4 RESULTADOS Y APORTACIONES

- Infiltrómetro que permita cuantificar la tasa de infiltración superficial en pavimentos de diferentes características.
- Programa computacional que permite obtener la extensión superficial de las grietas en un pavimento.
- Base de datos, de la región de Morelia, de tasas de infiltración típicas medidas sobre superficies de rodadura de diferente índole.

2 ANTECEDENTES

Actualmente, la mayoría de las publicaciones acerca de la infiltración en pavimentos han sido elaboradas con el fin de servir como parámetro para el diseño de los mecanismos de subdrenaje en una vialidad, sin considerar la degradación de la resistencia del pavimento que lleva consigo la infiltración. Similarmente, las publicaciones que describen la influencia de la variación en los contenidos de agua en el comportamiento mecánico del pavimento, no consideran un valor preciso del incremento de la humedad ocasionado por la infiltración superficial.

2.1 MECANISMOS DE AGRIETAMIENTO

El agrietamiento en pavimentos flexibles es un fenómeno que está gobernado por diferentes factores: los relacionados directamente con la superficie de rodadura asfáltica y otros que se deben a agentes externos a ésta. Algunos de los factores que dependen de la carpeta asfáltica son los materiales que la componen, el espesor de la capa y el proceso constructivo por el cual se coloca, etc. En cambio, los agentes externos que intervienen en el proceso de agrietamiento son principalmente dos: las cargas impuestas al pavimento y las condiciones climáticas (Valdés et al. 2012). Debido a estos factores se producen las grietas en los pavimentos flexibles, dentro de las cuales se distinguen los siguientes tipos:

- Agrietamiento por fatiga. Este tipo de agrietamiento consiste en una serie de grietas interconectadas, causadas por la falla de un material ante cargas repetidas o de fatiga producidas por las cargas vehiculares sobre una carpeta asfáltica. Usualmente se presentan en la zona de rodadura de las llantas (también llamada “huella”) generándose desde el fondo de la capa asfáltica, que es la zona donde se producen los principales esfuerzos de tensión (“bottom-up cracking”). Después se propagan hasta la superficie, pudiéndose observar en forma de una o más grietas longitudinales. Si se continúan aplicando cargas de fatiga a una superficie agrietada, se pueden desarrollar grietas en diferentes direcciones ocasionando que

estas se interconecten entre sí, lo que comúnmente se conoce como “piel de cocodrilo” (Fig. 2-1), (Miranda, 2010; Zevallos, 2018). Una vez que la superficie del pavimento exhibe esta interconexión de grietas, es posible que se generen desprendimientos de fragmentos delimitados por dichas grietas (Zevallos Gamarra, 2018). Si bien estas grietas se propagan desde el fondo de la carpeta asfáltica, en algunos casos también se pueden iniciar desde la superficie hacia el fondo (“top-down cracking”). Este mecanismo de agrietamiento se da en pavimentos de mayor espesor gracias a la combinación de esfuerzos de tensión y de corte en la interface entre el pavimento y el neumático, y al efecto térmico que se da en la superficie del pavimento (Valdés et al. 2012; Islam & Tarefder 2017).

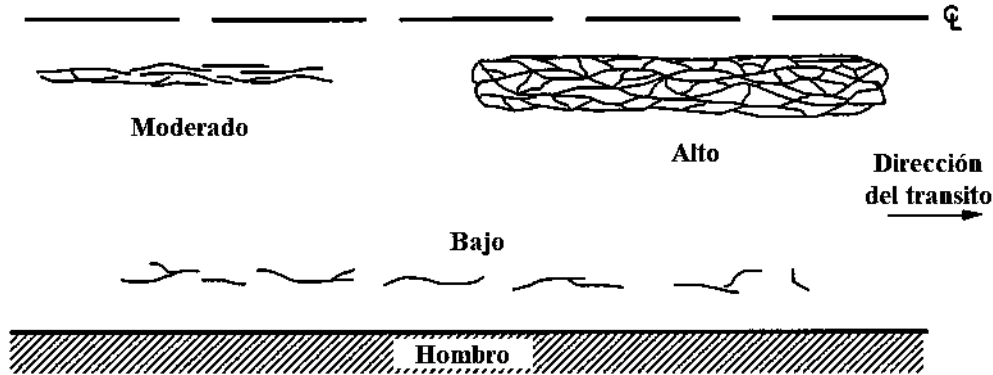


Fig. 2-1 Agrietamientos por fatiga y sus severidades (Miller & Bellinger, 2014)

- Agrietamiento por reflexión. Este tipo de agrietamiento se da cuando se construye un nuevo pavimento flexible sobre un pavimento rígido o en reencarpetamientos en pavimentos muy deteriorados. Cuando se coloca una carpeta asfáltica sobre un pavimento rígido con juntas o grietas, estas aun estarán sujetas a movimientos impuestos por las cargas vehiculares, generando un punto débil en la nueva carpeta y propiciando así que las juntas del pavimento rígido se proyecten hacia la superficie (Fig. 2-2). Este mismo efecto se puede producir cuando se utiliza una base estabilizada con cemento susceptibles a presentar grietas por contracción

(Adaska & Luhr 2004) o bien, cuando se tiende una nueva superficie de rodadura asfáltica sobre una más antigua y con grietas existentes (Valdés et al. 2012).



Fig. 2-2 Agrietamiento por reflexión (Miller & Bellinger, 2014)

- Agrietamiento longitudinal. Las grietas longitudinales se caracterizan por presentar una orientación paralela al eje del camino. Pueden generarse a partir de tres diferentes escenarios. Cuando la grieta se encuentra sobre el eje de la calzada, son causadas por una inadecuada junta constructiva entre los tendidos de la carpeta. En cambio, si la grieta se observa sobre la zona de huella de los neumáticos del vehículo, el agrietamiento se debe a problemas estructurales de las capas del pavimento o a las primeras etapas del agrietamiento por fatiga. Finalmente, si las grietas se desarrollan en otras zonas del pavimento su origen será causado por contracciones térmicas producidas en el pavimento cuando se tienen temperaturas bajas (Fig. 2-3) (Valdés et al. 2012; Islam & Tarefder 2017).

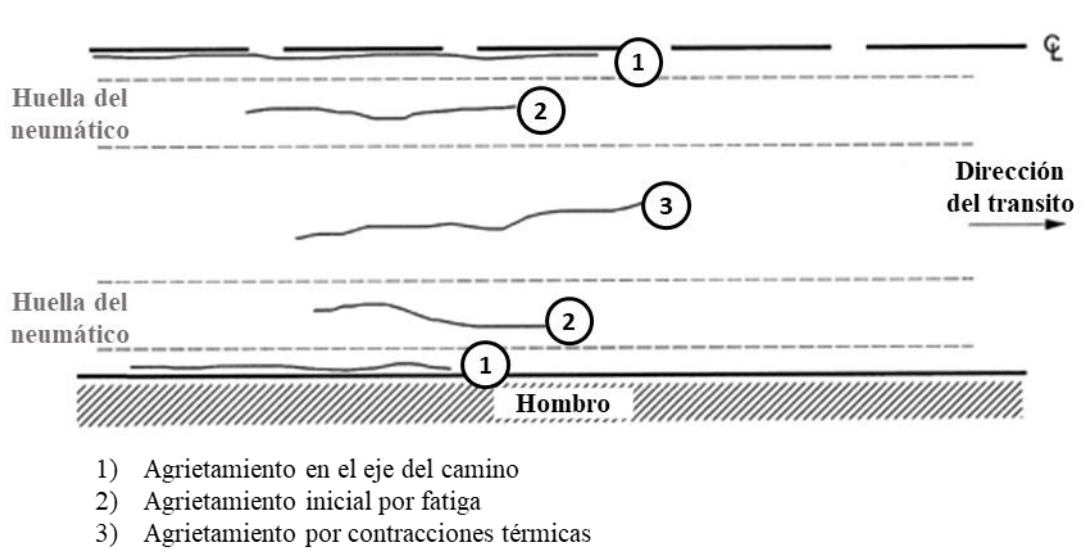


Fig. 2-3 Tipos de agrietamientos longitudinales (Miller & Bellinger, 2014)

- Agrietamiento transversal. Su mecanismo de propagación es muy similar al de las grietas longitudinales, diferenciándose únicamente por su ubicación en la superficie del pavimento, la cual es perpendicular al eje del camino (Fig. 2-4). Generalmente aparecen como consecuencia de los efectos térmicos sobre las mezclas con alta rigidez (Valdés et al. 2012).



Fig. 2-4 Agrietamiento transversal (Miller & Bellinger, 2014)

- Agrietamiento en bloque. Puesto que tanto las grietas longitudinales como transversales pueden compartir su origen, estas pueden llegar a coincidir en la superficie, formando fragmentos rectangulares en el pavimento de entre 0.1 y 10 m² (Fig. 2-5) (Valdés et al. 2012). Este tipo de agrietamientos es un indicativo de las mezclas envejecidas, puesto que estas son más susceptibles a agrietarse debido a su endurecimiento. Si bien es similar en la formación de grietas conectadas al agrietamiento por fatiga, el agrietamiento en bloque comúnmente aparece en zonas del pavimento que no son sometidas a carga (Miranda, 2010).

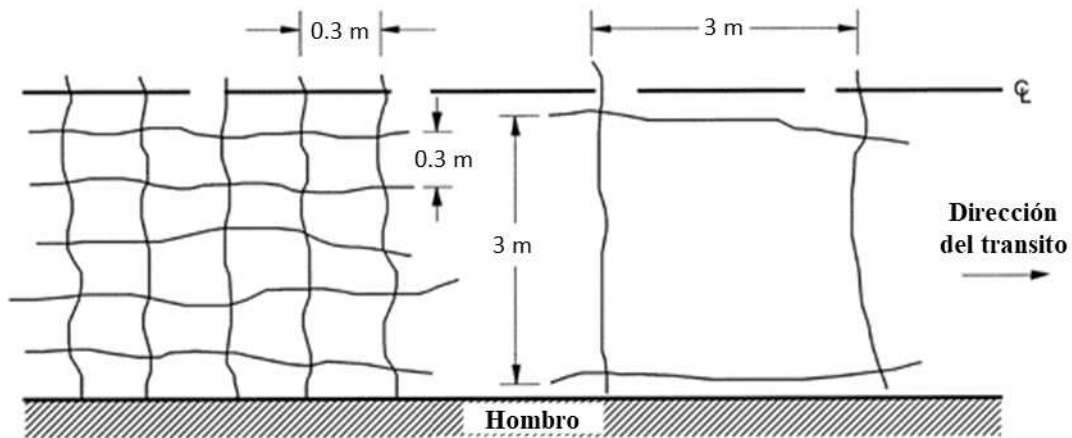


Fig. 2-5 Dimensiones típicas de agrietamientos en bloque (Miller & Bellinger, 2014)

- Agrietamiento de borde. Estas grietas o fisuras se presentan en las proximidades de los bordes laterales del pavimento, y son debidas a la ausencia de hombros pavimentados, o también a una compactación o confinamiento no adecuado de la base en los extremos de la sección (Fig. 2-6). También se pueden producir por el ingreso de agua en esta misma zona lateral del pavimento (Valdés et al. 2012).

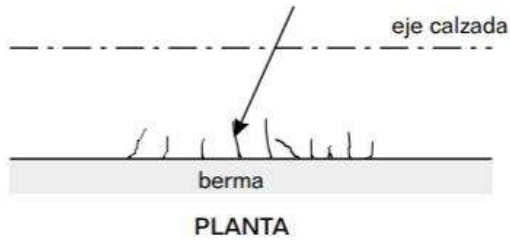


Fig. 2-6 Agrietamiento de Borde (Dirección de vialidad, 2003)

2.1.1 Medición de agrietamientos.

En la normativa actual de la SCT (N-CSV-CAR-1-03-008/18), se establecen algunos procedimientos para la evaluación de los deterioros superficiales en pavimentos. Entre tales deterioros se incluyen los agrietamientos de la superficie en pavimentos asfálticos. Los tres procedimientos que se enuncian en esta normativa son mediante inspección visual (M-MMP-4-07-016/17), con equipo escáner (M-MMP-4-07-014/17) y con equipo laser (M-MMP-4-07-015/17).

Como su nombre lo indica, la inspección visual de los deterioros consiste en realizar levantamientos de campo de los deterioros utilizando herramientas de mano como aparatos de medición para los agrietamientos (marcadores, flexómetros, odómetros, etc.), por lo que no se tiene una gran precisión en la recopilación de los datos y tampoco se pueden abarcar grandes áreas. Asimismo, se requiere de cierta experiencia del personal para la adquisición de datos.

En contraste, los equipos escáner y laser brindan una mayor precisión en la medición de los agrietamientos. Por lo regular, estos equipos son montados en la parte trasera de un automóvil, lo que permite desplazar fácilmente el equipo sobre el pavimento y realizar rápidamente barridos de tomas de lecturas, agilizando el procedimiento en campo. Ambos equipos permiten clasificar los agrietamientos encontrados, además de determinar su severidad y calcular su área. Los equipos escáner se basan en la captura continua de imágenes de la superficie del pavimento con una cámara de alta resolución. Estas imágenes pueden

abarcar una sección de pavimento de hasta 1.26 m de largo por 2.24 m de ancho (Porrás & Castañeda, 2012). Para facilitar la captura de las imágenes, se emplean proyectores de luz para contribuir en la iluminación del pavimento. Posteriormente las imágenes capturadas son procesadas a través de un programa computacional para obtener las características geométricas de los agrietamientos.

A diferencia de los equipos escáner, los equipos laser no capturan fotografías, sino determina las características de los agrietamientos a través de la emisión de un haz de luz láser, midiendo el tiempo que tarda el haz en viajar hasta la superficie y regresar al sensor del láser. Estos haces de luz se producen de uno o varios sensores, y son capaces de medir la distancia que recorre la luz en millones de veces por segundo, lo cual permite obtener una imagen tridimensional de toda la superficie del pavimento (Fraunhofer IPM, 2012). Gracias a la precisión de estos sensores, el vehículo puede llegar a desplazarse hasta una velocidad de 100 km/hr.

2.2 INFILTRACIÓN EN PAVIMENTOS

Durante el diseño, construcción y mantenimiento de caminos, un elemento a considerar es la presencia de agua en el pavimento, puesto que tiene una influencia significativa en la capacidad estructural, la funcionalidad y en los costos de operación del pavimento. La presencia y cantidad de agua en pavimentos depende de muchos factores, como: la precipitación de la zona, el drenaje, el diseño estructural, el estado de la superficie del pavimento y de los hombros, y los materiales que componen a las capas del pavimento, las terracerías y el subsuelo (Dawson, 2008). En consecuencia, el agua puede entrar a la estructura del pavimento (Fig. 2-7), siendo las vías más comunes las siguientes (Christopher et al. 2006; Yilmaz & Sargin, 2012, Dawson, 2008):

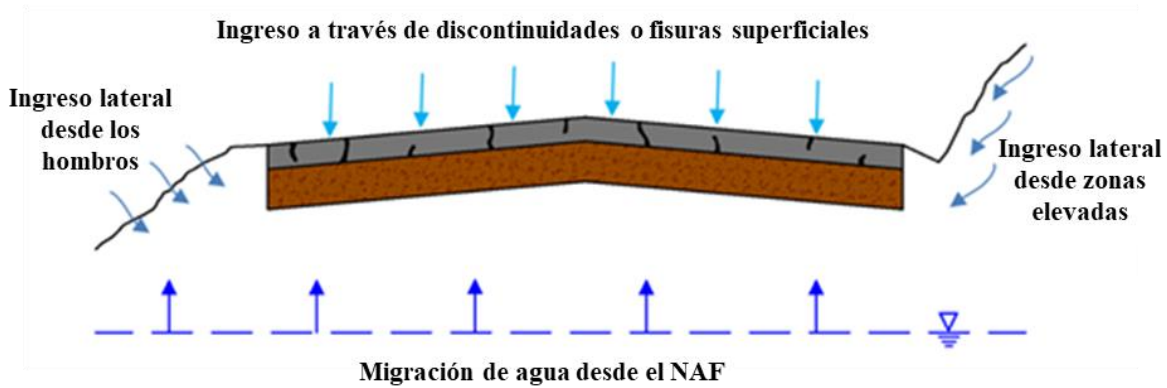


Fig. 2-7 Fuentes de infiltración de agua en pavimentos (basada en Christopher et al. 2006)

- Infiltración de agua a través de daños superficiales, grietas o juntas no selladas sobre el pavimento. Cabe señalar que, tratándose de un pavimento flexible, el agua también puede ingresar a través de la interconexión de los vacíos de aire contenidos en la capa asfáltica del pavimento (Hamzah et al. 2015). Se considera que esta interconexión se da en mezclas asfálticas con contenidos de vacíos mayores al 8% (Dawson, 2008).
- Ingreso lateral al pavimento por medio de los bordes u hombros del pavimento. El nivel de infiltración dependerá de la permeabilidad, la compactación, inclinación y el drenaje del material que subyace a los hombros.
- Infiltración de agua desde una zona lateral más elevada. Un claro ejemplo de este tipo de infiltración se da en los pavimentos cuya sección transversal comprende un corte lateral. Al igual que en el caso anterior dependerá de las propiedades del material y del gradiente hidráulico.
- Migración de agua freática. Este flujo de agua se puede dar por tres diferentes mecanismos: ascensión del NAF, ascensión capilar en el terreno natural o en las terracerías, o evaporación del agua freática desde el subsuelo (Huang, 1993).

Si bien son múltiples las formas por las que puede ingresar el agua al pavimento, comúnmente la principal fuente de infiltración es mediante las grietas, vacíos de la mezcla asfáltica, juntas o bordes de los hombros (Christopher et al. 2006; Varveri et al. 2015).

2.2.1 Medición de la infiltración

Una de las formas de evaluar la capacidad de infiltración, así como el funcionamiento hidráulico en los pavimentos es mediante la medición de la permeabilidad en la superficie del pavimento (Li et al. 2013). Esta permeabilidad generalmente se representa por el coeficiente de permeabilidad o conductividad hidráulica “*k*” (Dawson, A., 2008). Con este coeficiente “*k*” es posible aplicar la Ley de Darcy, cuya finalidad es medir la velocidad del flujo en un medio poroso. Matemáticamente se expresa como:

$$v = k i \quad (1)$$

donde *v* es la velocidad del flujo [L/T]; *k* es el coeficiente de conductividad hidráulica [L/T] e *i* representa el gradiente hidráulico en la dirección del flujo. Se debe precisar que esta formulación solo es aplicable para medios porosos saturados homogéneos donde únicamente se tiene un régimen hidráulico laminar (Cooley, 1999). No obstante, esta formulación es frecuentemente empleada para definir el flujo de agua en suelos y pavimentos (Dawson, A., 2008; Das, 2001; Li et al. 2013).

El coeficiente “*k*” utilizado en la ecuación de Darcy se puede obtener experimentalmente, ya sea mediante pruebas de campo o de laboratorio. En las mediciones de campo, los aparatos para medir esta permeabilidad reciben el nombre de infiltrómetros o permeámetros. Actualmente existen principalmente dos metodologías experimentales de campo que son: pruebas de carga hidráulica constante (“Constant head”) y de carga hidráulica variable (“Falling head”) (Das, 2001). La principal diferencia entre estas dos variantes es la presión de la columna de agua que se ejerce sobre la superficie de prueba y la forma en que se registra la tasa de infiltración (Cooley, 1999).

En los infiltrómetros tipo “Falling Head” se tiene un tirante inicial a una altura determinada, y una vez que comienza el proceso de infiltración dicho tirante comienza a descender hasta un nuevo tirante establecido o bien, hasta que toda el agua se haya infiltrado (Fig. 2-8) (Lucke et al 2014). Por consiguiente, la disminución del tirante también provocará un decremento de la presión hidrostática en la superficie de infiltración.

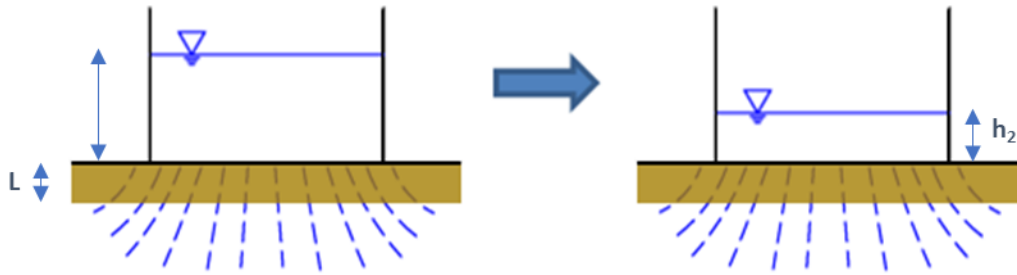


Fig. 2-8 Infiltrómetro tipo "Falling Head"

Para conocer la tasa de infiltración, se registra la velocidad con la que disminuye el nivel del agua entre dos cotas dentro del infiltrómetro en un intervalo de tiempo predefinido (Cooley, 1999). La expresión matemática para definir el coeficiente "k" en este tipo de infiltrómetros es:

$$k = \frac{a L}{A t} \ln \frac{h_1}{h_2} \quad (2)$$

Donde: a representa el área del contenedor donde se produce la disminución del tirante [L^2], L la longitud del material donde se efectúa la infiltración [L], A el área donde se produce la infiltración, h_1 el tirante inicial, h_2 el tirante final, y t el intervalo de tiempo durante el cual se produce la disminución de los tirantes.

Los infiltrómetros de tipo "Constant Head" se basan en mantener constante el nivel de agua en el infiltrómetro. Esto se logra utilizando un dispositivo externo capaz de proveer agua al infiltrómetro conforme se disminuya el tirante por efecto de la infiltración (Fig. 2-9) (Lucke et al 2014). Como consecuencia, la presión hidrostática no se modificará durante la ejecución de la prueba, teniendo así condiciones más controladas de infiltración. En cuanto a la tasa de infiltración se refiere, se registra la cantidad de agua necesaria que se vierte en el infiltrómetro para mantener constante el tirante por unidad de tiempo. El coeficiente "k" queda definido por la expresión (Das, 2001):

$$k = \frac{V L}{h A t} \quad (3)$$

Donde V es el volumen de agua necesaria para mantener el tirante constante [L^3], L la longitud del material [L], h representa la diferencia de alturas entre el nivel del tirante y material de infiltración [L], A el área donde se produce la infiltración [L^2] y t el tiempo de la prueba [T].

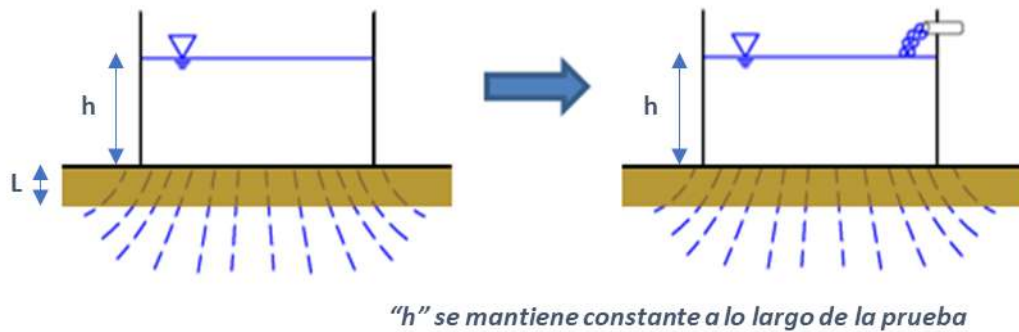


Fig. 2-9 Infiltrómetro tipo “Constant Head”

Si bien algunas investigaciones han descubierto diferencias en los resultados de permeabilidad obtenidos por estos dos diferentes métodos (Awadalla, 2015; Cooley, 1999; Lucke et al. 2014), otros autores afirman que ambas técnicas son aplicables para medir la infiltración en la superficie del pavimento, así como el coeficiente de conductividad “ k ” (Li et al. 2013). Sin embargo, se ha demostrado que los infiltrómetros de tipo “Constant head” producen resultados más conservadores en comparación con los de tipo “Falling Head” (Li et al. 2013). Por lo general, se recomienda aplicar la metodología de las pruebas tipo “Constant Head”, en medios con alta conductividad hidráulica o permeabilidad tales como materiales granulares, pavimentos de concreto o prefabricados permeables y mezclas asfálticas abiertas (Awadalla, 2015; Cooley, 1999), debido a que se necesita un intervalo de tiempo considerable para generar una descarga significativa de volumen para materiales relativamente impermeables (Cooley, 1999). En contraparte, en materiales tales como suelos finos o carpetas asfálticas con poco contenido de vacíos se sugiere utilizar un infiltrómetro tipo “Falling head” (Awadalla, M., 2015; Das, 2001).

2.2.2 Infiltrómetros de campo

2.2.2.1 Permeámetro NCAT (Cooley, L. A., 1999; Li et al. 2013).

Este tipo de equipo sigue la variante de ensayo “Falling head”, y se utiliza en la evaluación de la permeabilidad de las mezclas asfálticas en pavimentos. El equipo se llena hasta una altura inicial y se registra el tiempo con que decrece el tirante inicial. Como particularidad, este dispositivo está compuesto por cuatro niveles con diferentes diámetros para medir la infiltración del agua en materiales con permeabilidades distintas. El nivel inferior es donde el equipo tiene un mayor diámetro y es utilizable para medir la conductividad hidráulica de materiales muy permeables (capas de rodadura de granulometría abierta), ya que al tener un mayor diámetro permite un mayor flujo de agua. En contra parte, los niveles superiores presentan una reducción en el diámetro del equipo y se usan para materiales menos permeables (mezclas de granulometría densa y poco contenido de vacíos) (Fig. 2-10). Esta reducción en el diámetro permite tener lecturas más precisas en la disminución del nivel del agua (gasto de infiltración) ya que en los materiales poco permeables no se tiene un gran volumen de infiltración y, en consecuencia, el tirante decrece más lentamente.

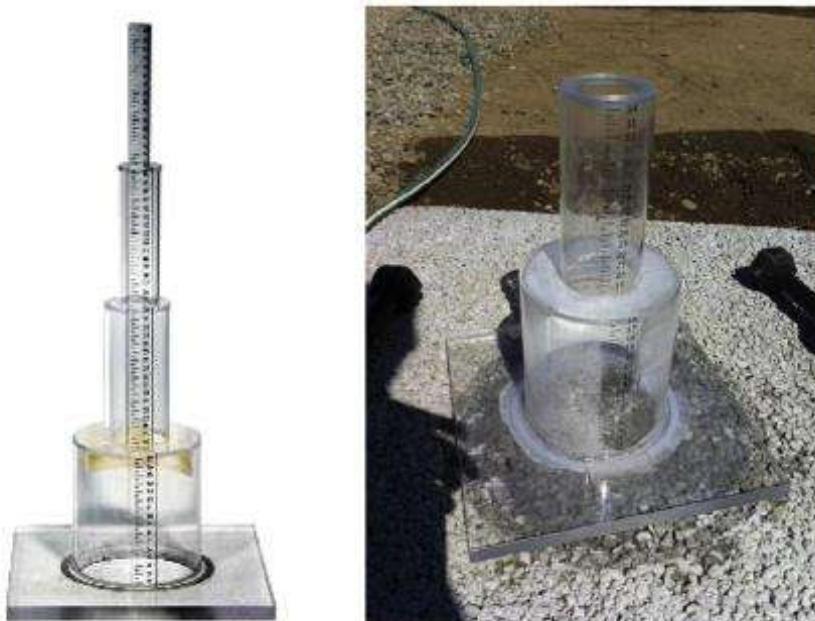


Fig. 2-10 Permeámetro NCAT (Li et al 2013)

Un aspecto importante de todos los infiltrómetros es el sellado del dispositivo para evitar fugas de agua entre la superficie del medio y el borde del equipo. Usualmente el permeámetro del NCAT utiliza gomas de caucho, silicón o parafinas para prevenir estos escurrimientos. Además, es recomendable utilizar placas de carga metálicas ya sea circulares o cuadradas para generar mayor presión de contacto del dispositivo a la superficie de prueba y mejorar el sellado.

Si bien este dispositivo permite realizar mediciones en casi cualquier superficie, para el caso de estudio de infiltración en agrietamientos no se garantiza su correcta aplicación, ya que es complicado garantizar el sellado del equipo con la superficie agrietada, facilitando el escurrimiento del agua a través de las grietas.

2.2.2.2 Infiltrómetro de la ASTM C1701/C1781

El infiltrómetro establecido en las normativas ASTM C1701 y ASTM C1781 fue desarrollado principalmente para medir la capacidad de infiltración de los concretos permeables y se basa en la variante de ensayo “Constant Head”. El infiltrómetro consiste en un anillo hecho de un material rígido e indeformable (anillo metálico o más común de PVC) con dos marcas internas de graduación situadas a 10 y 15 mm respectivamente (Fig. 2-11). Dada su configuración, este tipo de infiltrómetro también es conocido como infiltrómetro tipo “single ring”. Para el sellado, es recomendable utilizar silicón, gomas de caucho, plastilinas o una mezcla a base de bentonita. Cuando se realiza una prueba en capas de suelo, se puede hincar el anillo para un mejor sellado. Para ejecutar la prueba, se requieren 3.6 lts de agua, los cuales se vierten dentro del anillo, a una razón tal, que el tirante del agua dentro del anillo se mantenga siempre entre las dos marcas internas; hasta que se hayan utilizado en su totalidad los 3.6 lts de agua. El vertido constante del agua en el infiltrómetro puede realizarse manualmente o con algún dispositivo hidráulico que pueda mantener el nivel de agua constante (flotadores hidráulicos o frascos de Mariotte).

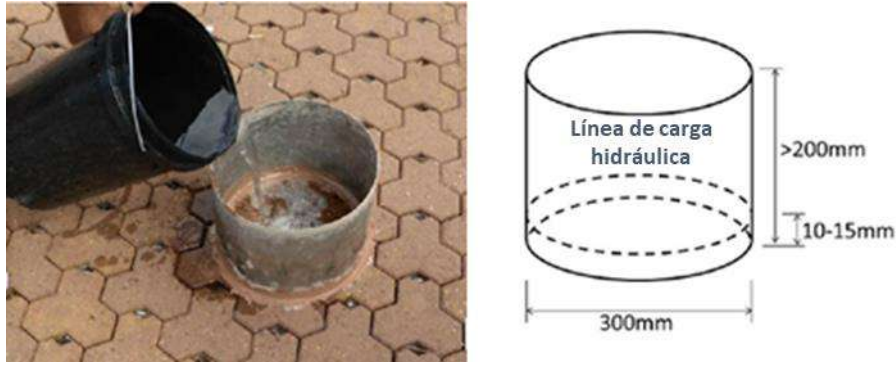


Fig. 2-11 Infiltrómetro "Single Ring" (Lucke et al 2015)

Aunque este tipo de infiltrómetro es muy utilizado en pavimentos, presenta algunas complicaciones prácticas. Dado que en la mayoría de las ocasiones esta prueba se ejecuta vertiendo agua manualmente y sin ayuda de algún dispositivo externo, es complicado mantener el tirante constante a lo largo de la prueba, ya que se tiene una mayor probabilidad de cometer algún error por parte del operador, ocasionando que no siempre se tenga una carga hidráulica constante. Además, el anillo utilizado no es de gran espesor, ni tiene la configuración tal para agregar placas de carga extra que propicien una mayor presión de contacto, por lo que se puede incurrir en un sellado deficiente.

2.2.2.3 Infiltrómetro ASTM D3385

Una de las características del flujo dentro de una masa es que no se sigue una única dirección de flujo. Este fenómeno sucede tanto en suelos como en pavimentos, ya que a pesar de que el agua ingresa verticalmente desde la superficie, una vez dentro del material su propagación depende de su estructura interna como son el tamaño, la cantidad y la interconexión de los vacíos, la granulometría, etc., ocasionando que el flujo comience a distribuirse en todas direcciones, de manera tanto horizontal como vertical. Esta propagación no uniforme puede generar una cierta incertidumbre al momento de caracterizar la infiltración del material en estudio. Esto igualmente sucede cuando se realizan pruebas de infiltración utilizando el permeámetro del NCAT o el infiltrómetro establecido por las normativas ASTM C1701/C1781. Si bien este fenómeno se puede reducir incrementando las

dimensiones del equipo para abarcar una mayor área de infiltración (Li et al 2013), en ninguno de los casos se tiene un mecanismo plenamente confiable que aumente la posibilidad de tener flujo unidireccional dentro del material.

Como consecuencia, se desarrolló la prueba de la ASTM D3385, la cual parte del mismo principio del infiltrómetro de la ASTM C1701, pero con la diferencia que utiliza dos anillos en lugar de uno solo, siendo un anillo del doble del diámetro del otro (“double ring”). Los anillos se acomodan de tal forma que el anillo de menores dimensiones se coloca en el centro del anillo más grande. Ambos anillos se llenan hasta el mismo tirante y se mantienen bajo ese mismo nivel durante toda la prueba, tomando las lecturas del anillo interior (Fig. 2-12). El razonamiento de esta metodología es que la infiltración que se da a causa del anillo externo generará una barrera dentro del material que inhiba el flujo horizontal del agua que ingresa desde el anillo interior, forzando a que el agua que ingresa desde este anillo tenga una dirección de flujo unidimensional y vertical, lo cual será más aproximado a lo establecido en la ecuación de Darcy.

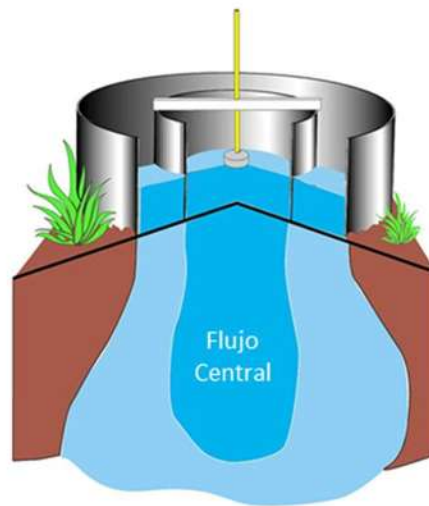


Fig. 2-12 Infiltrómetro “Double ring” (Yolcubal et al. 2004)

2.2.3 Trabajos previos de infiltración en agrietamientos

2.2.3.1 Mediciones de campo

Ridgeway, H. H. (1976) y Cedergren H. R. (1972) fueron los primeros autores en estimar la cantidad de agua que se infiltra a través de las zonas agrietadas de un pavimento, tomando como base criterios empíricos. Ridgeway H. H. (1976) estableció que la permeabilidad de las zonas no agrietadas en los pavimentos es insignificante, en comparación con aquellas que presentan juntas o grietas. Subsecuentemente, realizó experimentaciones de campo sobre pavimentos agrietados relativamente envejecidos (8 a 15 años) durante las temporadas de verano y otoño, considerando un intervalo de dimensiones lineales de grietas. Las mediciones de infiltración se obtuvieron agregando una delgada capa de agua a una caja sin fondo, colocada sobre una grieta longitudinal y registrando la tasa a la cual ocurría la infiltración. Los resultados de sus pruebas se observan en la Tabla 2-1. De estas experimentaciones, Ridgeway determinó que las tasas de infiltración en pavimentos flexibles agrietados dependen de cuatro factores: El gasto que permite la grieta, la cantidad de agrietamiento presente en el pavimento, el área o superficie que drena cada grieta; y la intensidad y la duración de la lluvia. No obstante, esta investigación no abunda en otras formas de agrietamiento cuya geometría no sea exclusivamente lineal.

Tabla 2-1 Resultados de pruebas de infiltración de Ridgeway (1976)

Sitio	Longitud de grieta (cm)	Tasa de infiltración (cm ³ /h/cm de grieta)	
		Verano 1974	Otoño 1974
1	160	9	28
2	107	620	230
3	183	100	56
4	241	56	37
5	152	2	2
6	208	37	-
7	147	19	84

Tasa de infiltración media = 100 cm³/h/cm de grieta

En Dawson (2008) y Taylor (2004), se muestra como a partir de la tasa de infiltración media en grietas individuales, es posible deducir la tasa de infiltración por área de pavimento. Para tal deducción, se toma como base la propuesta para la ejecución de acciones de conservación hecha por Baldwin et al. (1997), la cual establece que cuando el 10% de la superficie del pavimento se encuentra agrietada, la magnitud de las grietas equivaldrá 0.002 cm de grieta por cm² de pavimento. Este contexto representa la condición más crítica para el cálculo de la infiltración en grietas, si es que estas tienen las mismas dimensiones en toda la superficie del pavimento (Taylor, 2004). Asumiendo esta condición, la tasa de infiltración por área de un pavimento agrietado quedará definida por la expresión (Dawson, 2008):

$$IR_{max} = 0.02 * i_c \quad (4)$$

Donde IR_{max} representa la infiltración máxima anticipada (l/h/m²), e i_c es la infiltración medida a través de una grieta en específico (cm³/h/cm de grieta). Sustituyendo el valor de infiltración promedio cuantificado por Ridgeway en la ecuación anterior (100 cm³/h/cm), se obtiene una tasa de infiltración media por área igual a 2 l/h/m² de pavimento.

Por otra parte, Cedergren H. R. (1972), considera que la cantidad de infiltración que se da en un pavimento agrietado no depende en sí de la geometría del agrietamiento, sino es un porcentaje de las precipitaciones que se tienen en la zona donde se ubica el pavimento. Los porcentajes son de 33 a 50% en pavimentos flexibles y 50 a 67 % en pavimentos rígidos. Esta zonificación la representa en un mapa que contiene la tasa de frecuencia de precipitación en los Estados Unidos. Por consiguiente, la infiltración a través de las grietas se obtiene multiplicando dicha tasa por un coeficiente que dependerá del tipo de pavimento (flexible o rígido).

A diferencia de las investigaciones del diseño del subdrenaje de una vialidad, Taylor, J. V. (2004) cuantificó la infiltración con el objetivo de conocer la lixiviación y la cantidad de contaminantes que ingresan a un pavimento disueltos en un fluido a través de las grietas. Al igual que Ridgeway, H. H. (1976), presenta un dispositivo el cual se coloca sobre una zona de grietas y suministra una cantidad determinada de agua a las grietas, mediante la metodología “Constant Head”, midiendo la tasa con la que el agua entra al pavimento. Para la ejecución de sus pruebas de campo, Taylor, J. V. (2004) realizó sus mediciones en siete

sitios distintos dentro del campus de la Universidad de Nottingham, y considerando algunos tipos de deterioros superficiales, como agrietamientos por fatiga, agrietamientos longitudinales y bacheos. Para la cuantificación de la tasa de infiltración en las zonas de agrietamientos longitudinales, Taylor utilizó el mismo enfoque que da lugar a la ecuación (4). Los resultados de sus mediciones se muestran en la Tabla 2-2, obteniendo una tasa de infiltración media equivalente a 3.33 l/h/m² de pavimento agrietado.

Tabla 2-2 Resultados de pruebas de infiltración de Taylor (2004)

Sitio	Tipo de deterioro	Grado de severidad	Infiltración en áreas con "piel de cocodrilo" (l/h/m ²)	Infiltración en áreas con grietas longitudinales (l/h/m ²)
1a	Agrietamiento por fatiga ("piel de cocodrilo")	Medio	0.00	-
1b	Agrietamiento por fatiga ("piel de cocodrilo")	Medio	0.00	-
2	Agrietamiento longitudinal	Medio	-	2.70
3	Agrietamiento longitudinal en el borde de un bacheo	Buen bacheo pero sin sellado en los bordes	-	0.22
4	Bacheo (sobre zanja de servicio) y ligero desprendimiento de partículas	Bajo	8.78	-
5	Bacheo (sobre zanja de servicio)	Nulo	4.88	-
6a	Agrietamiento por fatiga ("piel de cocodrilo") con ligero desprendimiento de partículas	Medio	8.70	-
6b	Agrietamiento por fatiga ("piel de cocodrilo") con ligero desprendimiento de partículas	Medio	3.52	-
7a	Agrietamiento por fatiga ("piel de cocodrilo") con ligero desprendimiento de partículas	Medio	2.04	-
7b	Agrietamiento por fatiga ("piel de cocodrilo") con ligero desprendimiento de partículas	Medio	2.50	-

Tasa de infiltración media = 3.33 l/h/m²

Si bien esta investigación contempla las grietas longitudinales y los agrietamientos por fatiga, no presenta un análisis completo en cuanto a las mediciones de las geometrías de las grietas se refiere. Otra carencia de esta publicación es la nula diversificación de pavimentos sobre los cuales se ejecuta la prueba, ya que únicamente considera pavimentos que se encuentran dentro del campus de la Universidad de Nottingham, donde la mayoría de las secciones y tipos de pavimentos son prácticamente iguales.

2.2.3.2 Propuestas numéricas y analíticas

Algunos otros autores han abordado el tema de la infiltración en pavimentos desde otra perspectiva que no involucra pruebas de campo, sino plantean soluciones teóricas que consideran las propiedades hidráulicas de los materiales que conforman al pavimento, y el flujo de agua que ingresa a este a través de deterioros superficiales.

En las investigaciones realizadas por Cyr & Chiasson (1999), y Espinoza et al (2005) se presentan simulaciones, mediante la técnica de elementos finitos, de la distribución del flujo de infiltración en el interior de un pavimento, considerando algunos valores relacionados con las precipitaciones, además de las propiedades hidráulicas de los materiales. Primeramente, Cyr & Chiasson (1999) definieron únicamente dos regiones de infiltración superficial: un par de grietas de 0.5 cm de ancho (una ubicada en el centro del carril y otra en el hombro del pavimento) y otra zona ubicada al borde del camino. Sobre la zona de grietas colocó una carga hidráulica de 5 cm, y en el borde del camino una precipitación de 105 mm/día, además de un nivel freático situado a una profundidad de 2.5 m. (Fig. 2-13).

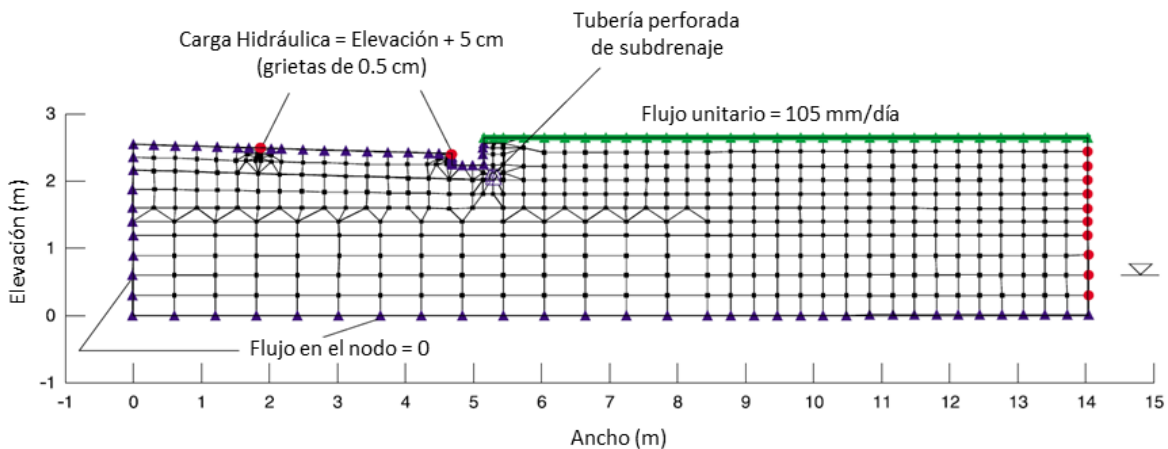


Fig. 2-13 Malla de elementos finitos y condiciones de frontera (Cyr & Chiasson, 1999)

Bajo estas condiciones, evaluó el flujo y la distribución del agua considerando diferentes tipos y materiales para el drenaje, con el objetivo de determinar cuál es el drenaje óptimo que brinda el mejor desempeño ante el flujo de infiltración. Como resultado de estas simulaciones, Cyr & Chiasson (1999) determinaron que el uso de una capa drenante bajo la carpeta de granulometría abierta incrementa significativamente la cantidad de agua que ingresa a las capas del pavimento y al terreno de soporte de este, además de demostrar que un buen diseño de un sistema de drenaje puede prevenir la saturación del material de la base.

Tomando un enfoque similar, en la publicación realizada por Espinoza et al (2005) se simuló la infiltración en un pavimento, aplicando una solución numérica bidimensional a la ecuación de Richards, con el propósito de encontrar el estado crítico al cual el pavimento empieza a fallar. Dicho estado crítico se definió como el punto en el que toda una sección vertical de la capa base del pavimento llega a un estado de “casi-saturación” (grado de saturación $S_r \geq 0.85$). Esta investigación toma en consideración dos tipos de deterioros superficiales: grietas longitudinales y baches, ubicados en el centro del pavimento y con un ancho de 4 y 200 mm respectivamente. En cuanto a las precipitaciones, se estipularon 4 escenarios de lluvia: fuerte y continua, fuerte y regular, intermitente y fuerte, y lluvia intermitente y regular; que representan diferentes valores de caudal y de periodo de tiempo simulado. Respecto a la geometría y características del pavimento, se tomó como base las especificaciones de una vialidad inhabilitada perteneciente a la Red Federal de Carreteras Mexicanas, situada en el estado de Hidalgo, México. En tal camino, se realizó un muestreo para obtener las propiedades índices e hidráulicas de los materiales con pruebas de laboratorio, además de realizar una prueba de permeabilidad (siguiendo los procedimientos establecidos por la SCT) sobre la carpeta existente en una zona sin agrietar, la cual demostró que la superficie de la carpeta asfáltica era prácticamente impermeable.

Como resultados, Espinoza et al. (2005) concluyeron que la distribución interna de agua en un pavimento no solo depende de la cantidad de agua a la que este se somete, sino también del ancho del deterioro superficial. En consecuencia, el nivel de infiltración observado en los baches fue considerablemente mayor que el registrado en las grietas longitudinales, inclusive establece que ni siquiera el escenario más fuerte de lluvia logra humedecer notablemente una proporción importante de la capa de base en el pavimento.

Estos resultados se observan gráficamente en la Fig. 2-14, en donde en la primera ilustración se observa la distribución del agua por debajo de un bache bajo condiciones de lluvia intermitente y regular, con un periodo de simulación de 19 días; mientras que la segunda ilustración corresponde a una grieta bajo una lluvia continua y fuerte durante 42 días. Las curvas representan el potencial mátrico [m] y la zona de color negro es la parte del pavimento que se encuentra “casi saturada”.

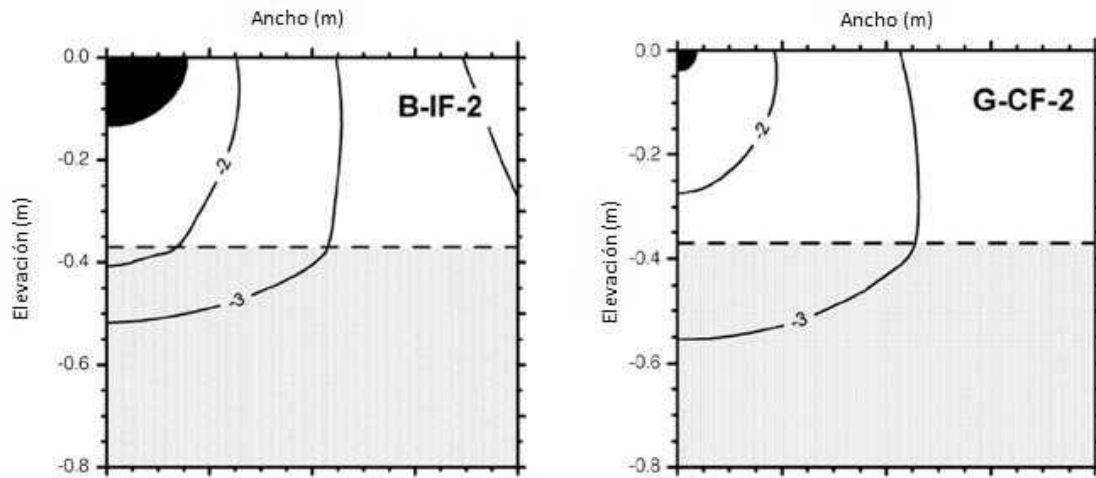


Fig. 2-14 Distribución del agua de infiltración en un bache y en una grieta (Espinoza et al. 2005)

En cuanto a propuestas de carácter analítico, basándose en la teoría de flujo a través de un medio poroso y en la ley cúbica de Poiseuille en un medio agrietado, Dan, H. C. et al (2017) presenta un modelo que, a diferencia de los autores mencionados anteriormente, tiene como objetivo cuantificar la tasa de infiltración de agua en un pavimento con grietas, en unidades de longitud/tiempo. Este modelo contempla diferentes parámetros del pavimento tales como longitud, ancho y distribución de las grietas superficiales; espesor y permeabilidad de las capas (de rodadura y drenante), y la geometría de la sección del pavimento. Además, considera la presencia de un nivel freático a partir del cual, obtiene el gradiente hidráulico al que se somete la estructura del pavimento, mediante la siguiente ecuación.

$$J = \frac{(B - x) \tan \theta + T_1 + T_2 - h}{T_1} \quad (5)$$

Donde B es el ancho del pavimento [L], $\tan \theta$ es la pendiente transversal de la capa de drenaje, T_1 y T_2 son los espesores de la capa superficial y de la capa de drenaje respectivamente [L], h es la carga hidráulica sobre la capa de drenaje [L] y x representa una sección del ancho del pavimento [L]. Algunos de estos parámetros, además de la sección del pavimento considerada por Dan, H. C. et al. (2017), se muestran en la Fig. 2-15.

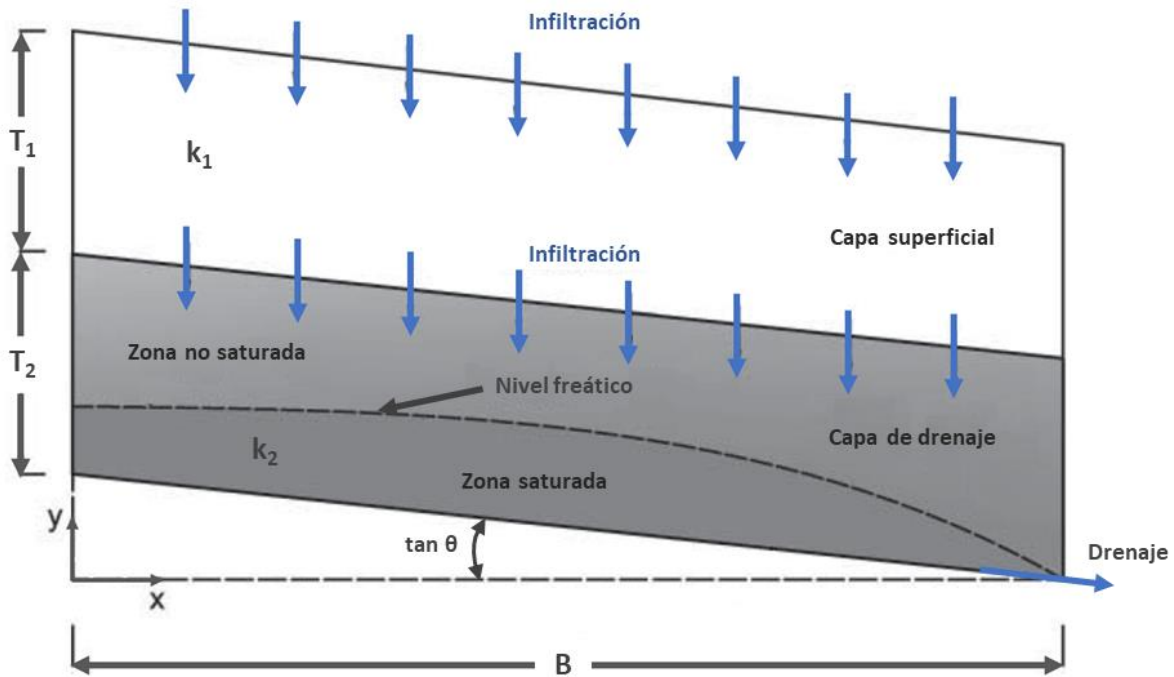


Fig. 2-15 Sección y parámetros analizados por Dan, H. C. et al. (2017)

Una vez establecidas las condiciones de flujo y de acuerdo con el principio de conservación de masa, que establece que la cantidad de agua que ingresa al pavimento, tanto por las grietas (q_1) como por la misma porosidad de la capa superficial (q_2), es igual a la cantidad de agua que permea por la capa drenante, se puede escribir la ecuación (6).

$$Q = \int_0^B (q_1 + q_2) dx \quad (6)$$

Resolviendo esta ecuación que representa el balance de agua en las capas, obtiene una ecuación capaz de determinar la tasa de infiltración por unidad de ancho y de longitud de un

pavimento agrietado. Con dicho modelo, Dan, H. C. et al (2017) concluye que el ancho de grieta es el principal factor que afecta la cantidad de agua que se infiltra en la estructura de un pavimento. No obstante, esta formulación omite ciertas cuestiones prácticas, como son la presencia de material de relleno en las grietas, la integración de más capas en el pavimento, y la presencia de agua superficial. Por último, el modelo presentado carece de validación tanto experimental como de investigación de campo.

2.3 DETERIORO DEL PAVIMENTO DEBIDO AL AUMENTO DEL CONTENIDO DE AGUA

Los cambios en el contenido de agua en las capas del pavimento, especialmente incrementos de este contenido, combinados con las cargas vehiculares y ciclos de hielo-deshielo pueden reducir significativamente el periodo de servicio de los pavimentos (Dawson, 2008). Este incremento del contenido de agua debido a la infiltración afecta tanto la superficie de rodadura como las capas granulares del pavimento y las terracerías. A continuación, se describen los principales deterioros en estas capas.

2.3.1 Deterioro de la superficie de rodadura

Los principales mecanismos de deterioro debidos al incremento en el contenido de agua en las capas de rodadura asfálticas pueden tener tres orígenes distintos, los cuales son fallas en el material asfáltico, fallas en la interfaz asfalto-agregados y fallas derivadas de las cargas vehiculares (Hamzah et al. 2015). Los dos primeros tipos de falla se perciben visiblemente como una disgregación o desprendimiento de partículas (Fig. 2-16).

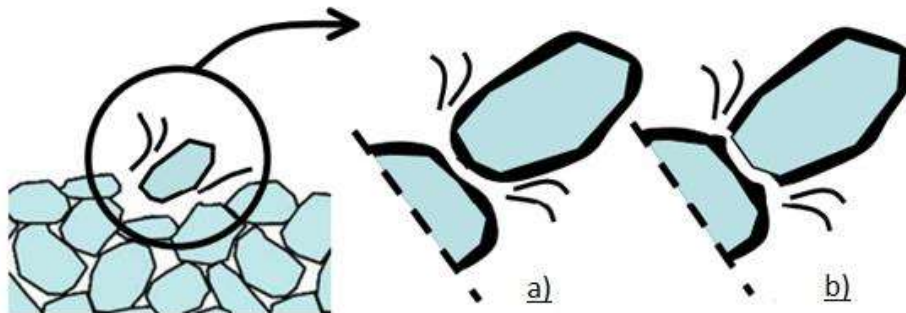


Fig. 2-16 Desprendimiento de partículas (Kringos et al. 2008)

La falla en el material asfáltico se da debido a los flujos del agua dentro de la mezcla asfáltica. Estos flujos generan erosión en la superficie del asfalto, causando una desintegración y una subsecuente pérdida del material asfáltico en la mezcla (Fig. 2-17 a). Cuando esta pérdida de asfalto perdura, se pueden generar zonas con poca cohesión en la matriz del asfalto, llegando a provocar fisuras en el asfalto que pueden desencadenar pérdida de partículas de la mezcla (Kringos et al. 2008). Similarmente, la falla en la interfaz del agregado con el asfalto se da cuando la mezcla asfáltica está sujeta a un ambiente húmedo. Bajo estas condiciones, el agua puede ingresar en el asfalto por medio de difusión hasta llegar a la zona de interacción con el agregado (Fig. 2-17 b), debilitando la adhesión del asfalto con el agregado hasta generar la separación completa de estos dos elementos (Dawson, 2008; Kringos et al. 2008).



Fig. 2-17 Deterioro del material asfáltico (Tarefder & Zaman, 2009)

Otro mecanismo de deterioro de la superficie de rodadura es el que está relacionado con el aumento de la presión de poro debido al paso de las cargas vehiculares. Una vez que el agua ha ingresado al pavimento desde la superficie ya sea por agrietamientos o discontinuidades, el paso de los vehículos presiona esta agua hacia el interior del pavimento, lo que facilita el escurrimiento del agua a través de la interfaz entre la capa asfáltica y la capa de base granular. Cuando se repite el paso de los vehículos sobre el pavimento, se generará una presión vertical hacia las capas del pavimento; sin embargo, ahora se tiene agua confinada en la estructura del pavimento. Dado que una de las características del agua es su incompresibilidad, en respuesta a la carga vertical aplicada el agua ejercerá un empuje hacia

las paredes del material que la confinan. A causa de dicho empuje, disminuyen los esfuerzos efectivos de las capas saturadas de suelo que tenderán a deformarse, antes de que se disipe dicha presión del agua. Conforme se repite este proceso, la mezcla asfáltica se debilita hasta que se generan agrietamientos por fatiga o incluso desprendimientos de fragmentos de mezcla asfáltica o baches, como se aprecia en la Fig. 2-18 (Dawson, 2008; Wang et al. 2019; Lay, 2009).

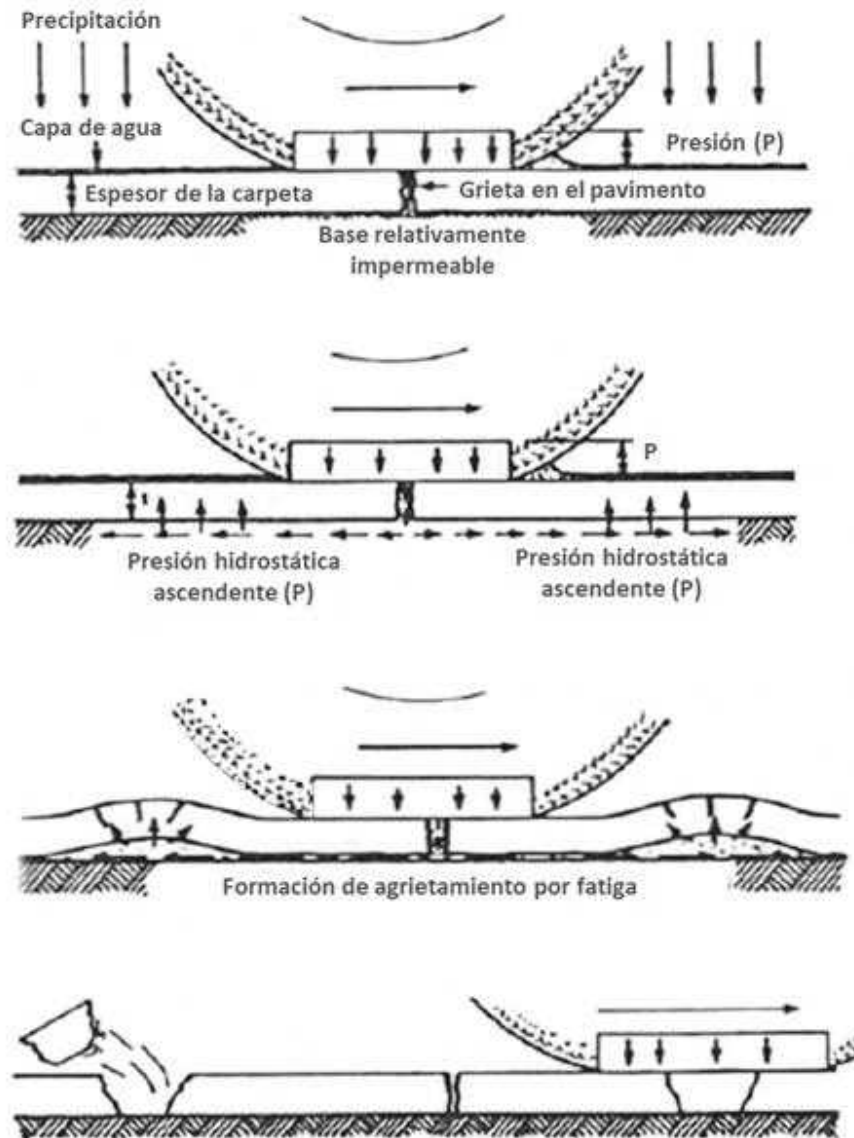


Fig. 2-18 Formación de baches debidos a la presión de poro (Dawson, 2008)

2.3.2 Deterioro de las capas granulares en el pavimento.

Es común que en estos agrietamientos se perciba material fino de la base, este se puede erosionar a causa de la elevación de la presión del agua, ocasionando que las partículas finas disueltas en el agua viajen hacia la superficie. A este fenómeno se le conoce como migración de finos (Lay, 2009).

Por otro lado, muchas fallas del pavimento son resultado directo de la entrada de agua en las capas gruesas del pavimento o en las capas de soporte de las terracerías. De acuerdo con el principio de esfuerzos efectivos de Terzaghi que Bishop (1959) extendió para suelos parcialmente saturados, cuando ingresa agua en los materiales compactados no saturados, se tiene un incremento en la presión del agua (disminución de la succión) y a su vez una reducción de los esfuerzos efectivos, los cuales se definen como la fuerza por unidad de área transmitida entre las partículas del suelo. Dichos esfuerzos efectivos son los responsables de soportar los esfuerzos cortantes que se aplican al suelo, puesto que el agua tiene una resistencia nula al cortante (Terzaghi, 1943).

A partir de lo enunciado por Terzaghi, tanto la resistencia como el módulo de elasticidad de los materiales granulares del pavimento y de las terracerías disminuirá. La pérdida de resistencia y de rigidez puede llevar en algunos casos extremos al desarrollo de roderas y a otras formas de deformación superficial. Las condiciones más críticas ocurrirán cuando se tenga un material granular poco compactado con susceptibilidad al congelamiento o se tengan arcillas expansivas capaces de producir cambios volumétricos (Dawson, 2008).

En pavimentos, el módulo elástico que se utiliza se deduce de la Fig. 2-19. Cuando un suelo es sometido a un esfuerzo cíclico (σ_d), este presenta una considerable deformación permanente (ϵ_p) y un cierto porcentaje de deformación recuperable (ϵ_r). Conforme el número de ciclos de carga aumenta, la deformación permanente tenderá a disminuir hasta un número de cargas tal que toda la deformación que sufra el material será prácticamente recuperable (Huang 1993). Considerando este comportamiento del suelo, podemos definir el módulo resiliente, cuya expresión matemática es:

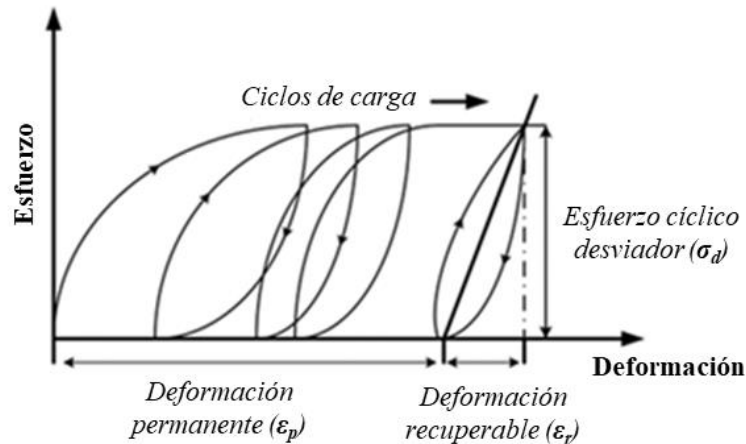


Fig. 2-19 Respuesta del suelo ante un esfuerzo cíclico desviador (Han & Vanapalli, 2016)

$$M_R = \sigma_d / \varepsilon_r \quad (7)$$

donde σ_d representa el esfuerzo desviador $[M/L^2]$, y ε_r es la deformación elástica o recuperable.

De acuerdo con numerosas investigaciones, se ha comprobado que el módulo resiliente disminuye a causa del incremento en el contenido de agua de un material, ocasionando una pérdida en su capacidad de respuesta elástica ante la aplicación de cargas cíclicas (Fig. 2-20) (Ekblad & Isacsson, 2006; Naji, 2018; Yang et al. 2005).

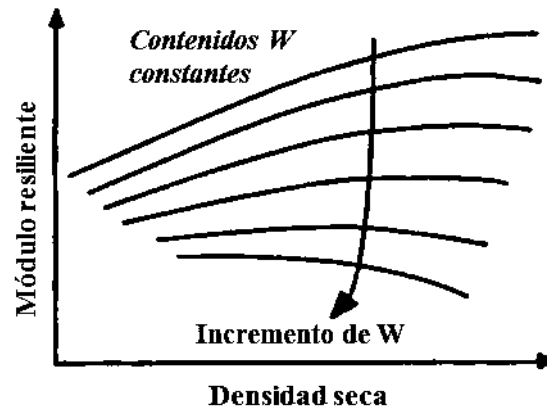


Fig. 2-20 Relación entre el M_r y el contenido de agua (Guía de diseño AASHTO, 2004)

A la par del descenso del módulo resiliente, las deformaciones permanentes serán propensas a incrementarse debido al aumento en el contenido de agua de un material. Freeme & Servas (1985) realizaron pruebas sobre cuatro materiales granulares de diferente calidad, los cuales eran sujetos a varias aplicaciones de carga, registrando su deformación permanente, como se muestra en la Fig. 2-21. Estos materiales se clasificaron de acuerdo a lo establecido en la publicación sudafricana “TRH14, Guidelines for Road Construction Materials”. El material con la clave G1 representa una grava producto de la trituración de roca sana, el suelo G4 corresponde a una grava de origen natural sin trituración contaminado de finos plásticos, y los materiales G2 y G3 representan materiales intermedios a los anteriores. Durante la experimentación, una vez que las deformaciones permanentes se estabilizaban, se permitía el ingreso de agua en los materiales. Esta acción reactivaba la deformación permanente ante las aplicaciones de carga, siendo esta más crítica en los materiales de menor calidad (ver Fig. 2-21). Posteriormente, la remoción de agua por drenaje volvía a permitir la estabilización de dichas deformaciones.

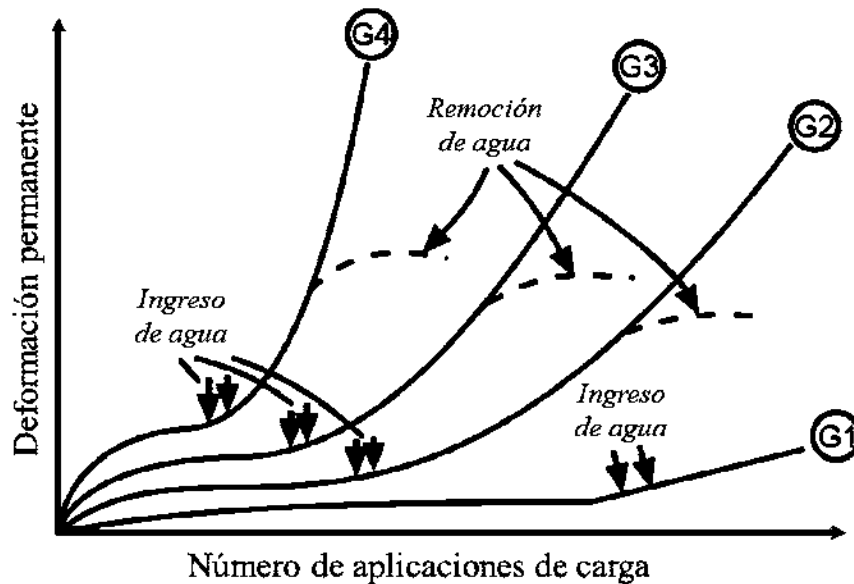


Fig. 2-21 Influencia del agua en las deformaciones permanentes y aplicaciones de carga en materiales granulares (Freeme & Servas, 1985) citada por Brown (1996)

En la “Guía de diseño empírico-mecanicista para pavimentos nuevos o rehabilitados”, se necesita establecer como valor de entrada para el diseño el valor del módulo de resiliencia de las capas estructurales del pavimento. Sin embargo, puesto que este valor es susceptible a variar por cambios ambientales y de contenido de agua en los materiales del pavimento, se implementó un factor de ajuste por efectos ambientales denominado “ F_{env} ”. Este factor se determina gracias a un modelo climático llamado EICM (Enhanced Integrated Climatic Model), el cual forma parte del software de la Guía AASHTO, y tiene como objetivo considerar el efecto del ambiente y las propiedades hidráulicas en las capas estructurales del pavimento. Por consiguiente, se obtiene un nuevo módulo resiliente definido por la expresión:

$$M_R = F_{env} * M_{Ropt} \quad (8)$$

donde M_{Ropt} representa el módulo resiliente obtenido del ensaye de especímenes en condiciones óptimas (densidad seca máxima y contenido de humedad óptimo) y en cualquier estado de esfuerzos. No obstante, para la obtención de este factor es necesaria una gran

cantidad de información hidrológica, meteorológica y ambiental de la zona, así como conocer las propiedades hidráulicas de los materiales a utilizar; específicamente los parámetros relacionados con la obtención de las curvas características agua-suelo (SWCC), como son permeabilidades, contenidos volumétricos de agua, etc.

3 MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 INTRODUCCIÓN

A fin de obtener una solución general al problema de la infiltración en los pavimentos flexibles, esta investigación propone realizar mediciones de campo de tal fenómeno en pavimentos con grietas superficiales, considerando las características geométricas de estas. Para cumplir tal objetivo, se desarrolló un equipo de campo que parte de algunos de los principios de los infiltrómetros mencionados en el apartado 2.2.2. Como particularidad, este equipo se instrumentó para lograr una buena precisión en la medición de la tasa de infiltración. Los componentes y la instrumentación del equipo desarrollado se detallan en la sección 3.2. En cuanto a la caracterización geométrica de los agrietamientos se refiere, se implementó un algoritmo computacional capaz de procesar fotografías de las grietas y obtener el área superficial de estas. Dichas fotografías son capturadas con un dispositivo móvil sobre la superficie donde se lleva a cabo la medición de la infiltración. El algoritmo desarrollado se explica a detalle en el apartado 3.3. Por último, se presenta la metodología que se sigue para cada ensayo de campo con el infiltrómetro.

3.2 DISEÑO DEL INFILTRÓMETRO

En las etapas preliminares del desarrollo del equipo, se realizaron varias pruebas de campo utilizando diversos materiales y configuraciones, tomando como base los infiltrómetros utilizados en otras investigaciones y normativas. Como resultado de estas experimentaciones y de la revisión del estado del arte, se decidió adoptar la variante de ensayo “Constant head”, además de una configuración tipo “Double ring”. Bajo estas premisas, se diseñó la propuesta del equipo, cuyos elementos se describen a continuación y se muestran en la Fig. 3-1.

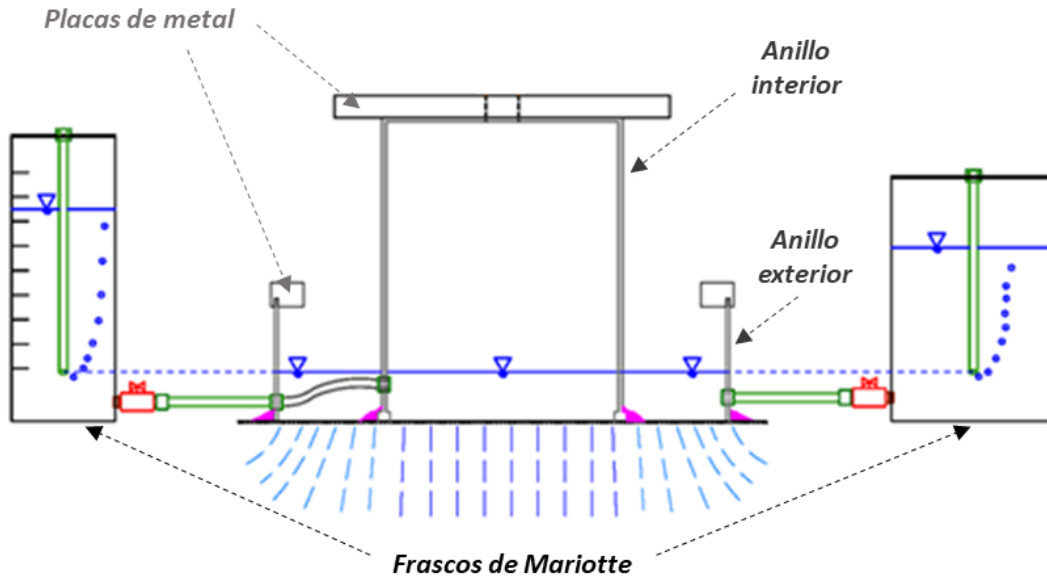


Fig. 3-1 Esquema del infiltrómetro desarrollado

1. Anillo interior (Fig. 3-2). Formado a partir de una sección tubular de PVC con 27.7 cm de diámetro interior y una altura de 36 cm. Además, con el objetivo de mejorar la aplicación del material para el sellado, en la parte inferior se implementó un aro con el cual se incrementa la superficie de contacto con el pavimento. En la parte superior del anillo, se instaló un disco de metal con un peso de 25 kg con el propósito de aumentar la presión de contacto entre el anillo y la superficie del pavimento. En dicho disco, se adaptó la base para la captura de fotografías de la superficie agrietada. Gracias a esta base, todas las fotografías serán capturadas desde la misma posición.



Fig. 3-2 Anillo interior con placa metálica

2. Anillo exterior (Fig. 3-3). Tomando como base la teoría del infiltrómetro de la norma ASTM D3385, se propone el uso de un anillo exterior que contribuya a producir un flujo de infiltración vertical en el anillo interno. Dicho anillo está hecho de material acrílico con un diámetro interior de 54.8 cm y una altura de 20 cm. Al igual que en el anillo interior, se adecuó un disco de metal de 10 kg en la parte superior del anillo.



Fig. 3-3 Anillo exterior

3. Frascos de Mariotte (Fig. 3-4). La función de estos contenedores es proveer de agua de manera ininterrumpida y mantener la carga hidráulica constante durante la prueba, por lo que cada anillo tiene su propio frasco alimentador. Ambos frascos están acondicionados de tal manera que permiten otorgar una carga hidráulica constante de aproximadamente 10 cm., empero, este valor puede variar ligeramente con base a la pendiente presente en la zona de prueba. El funcionamiento hidráulico de estos frascos se explica detalladamente en el apartado 3.2.1.

Puesto que uno de los objetivos de esta investigación es acoplar la caracterización geométrica de las grietas con la tasa de infiltración. Únicamente se registra la salida de volumen de agua del frasco que abastece al anillo interior, ya que sobre el área delimitada por este anillo se realiza el cálculo del área de las grietas. Dicho frasco está instrumentado con el objetivo de obtener un registro continuo y en tiempo real de las lecturas de salida de volumen de agua del frasco. La adecuación de este sensor al frasco de Mariotte se describe en el apartado 3.2.2.

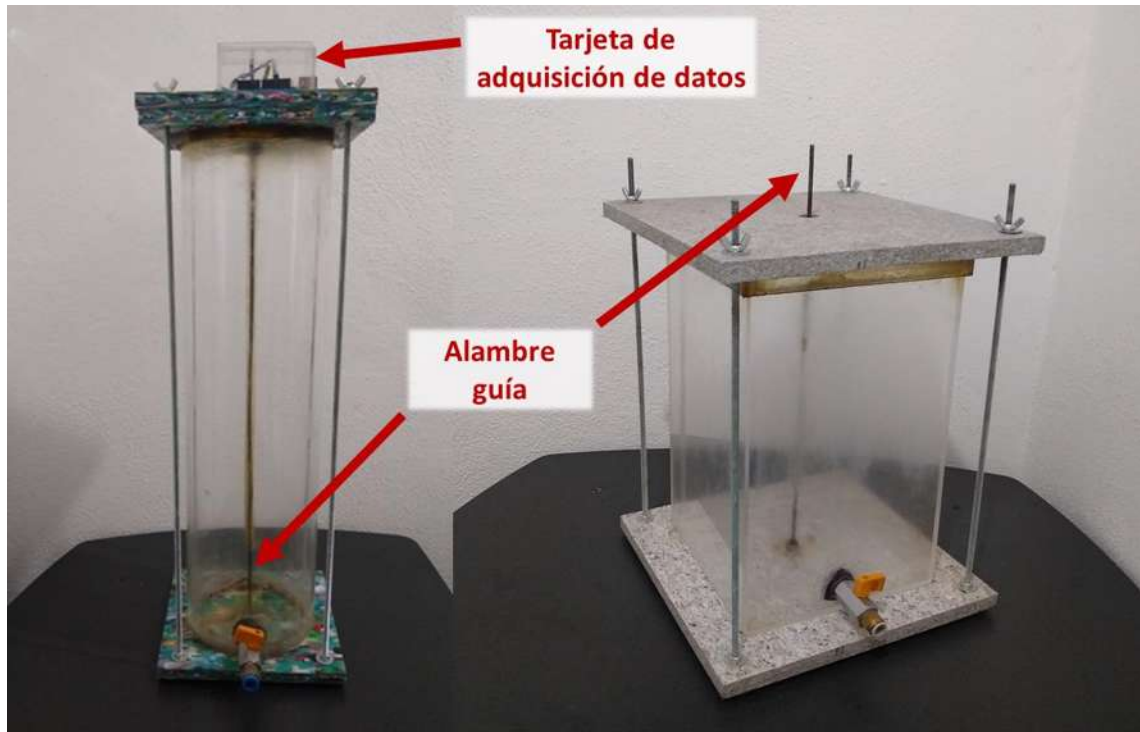


Fig. 3-4 Frascos de Mariotte

A diferencia de los infiltrómetros mencionados previamente, se propone utilizar plastilina como material de sellado de los bordes de los anillos sobre el pavimento. Este material es muy maleable y de fácil aplicación, además no necesita tiempos de secado como el silicón, ni preparación previa como en el caso de las mezclas a base de bentonita.

3.2.1 Funcionamiento de los Frascos de Mariotte

Un frasco de Mariotte es un dispositivo cuya función es propiciar el flujo de un líquido a una carga hidráulica o velocidad constante (Kireš, M., 2006). Fue desarrollado por el físico francés Edme Mariotte, y consiste en un frasco o contenedor lo suficientemente rígido para evitar deformaciones por disminución de presiones en su interior. Este contenedor está equipado con un tubo de entrada de aire, colocado por lo regular en la tapa del frasco hasta una altura a la cual se desea mantener la carga hidráulica. También el frasco cuenta con una salida de agua (ya sea una válvula, tubería o manguera) situada entre el fondo del recipiente y el extremo inferior del tubo de entrada de aire (Fig. 3-5).

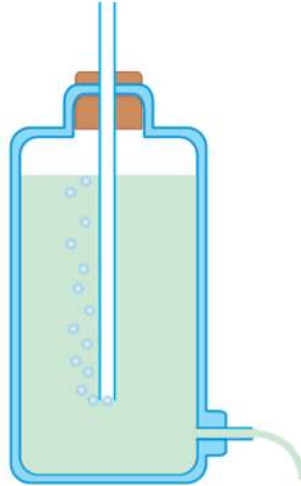


Fig. 3-5 Esquema de un frasco de Mariotte (Kireš, M., 2006)

Para lograr la carga hidráulica constante, los frascos de Mariotte utilizan los siguientes fundamentos hidráulicos. Supóngase un contenedor con agua sellado herméticamente con un tubo de entrada de aire, como se observa en la Fig. 3-6 a. Inicialmente, el tirante del agua en el contenedor tendrá una altura igual tanto por dentro como por fuera del tubo. Al estar sellado el contenedor, el aire que se encuentra atrapado por encima del nivel del agua quedará con una presión (P_s) igual a la presión atmosférica. Si se genera una salida u abertura a una altura ubicada entre el fondo del recipiente y la parte inferior del tubo de entrada de aire (Fig. 3-6 b), este orificio tendrá una presión hidrostática definida por la diferencia de alturas entre la superficie libre de agua y el orificio (H_a), propiciando la salida de agua. Una vez que el agua sale del recipiente, y dado que este se encuentra sellado, la presión del aire que se encuentra en el contenedor (P_s) comienza a disminuir. Como dicha presión es ahora menor que la atmosférica, el nivel de agua descenderá más rápidamente por el tubo de entrada de aire, pues este se encuentra comunicado con la atmosfera (Fig. 3-6 b).

Al llegar el nivel del agua hasta el extremo inferior del tubo de entrada de aire, el valor de P_s se habrá disminuido lo equivalente a la presión de la columna de agua, definida por la diferencia de alturas entre la superficie libre del agua que existía originalmente y el extremo inferior del tubo (H_b , ver Fig. 3-6 c). Sin embargo, como el agua continúa saliendo

del contenedor, la presión interna del recipiente seguirá tendiendo a disminuir; no obstante, puesto que la presión P_s ya alcanzó su mínimo valor crítico (el valor de la columna de agua H_b), la despresurización del contenedor producirá una succión de aire a través del tubo, el cual entrará al recipiente en forma de burbujas formando un balance para evitar la disminución de P_s por debajo de su valor crítico. Por lo tanto, P_s llegará al valor final definido por la ecuación:

$$P_s = P_{atm} - (\gamma_w * g * H_b) \quad (9)$$

Donde P_{atm} es la presión atmosférica, γ_w es el peso volumétrico del agua y g es la aceleración de la gravedad. Debido a la entrada de aire, ahora la presión que existe en el fondo del tubo es igual a la atmosférica, por lo que se obtiene una nueva referencia en la diferencia de alturas para la salida de agua por el orificio, siendo esta diferencia definida entre la altura del orificio y la altura de la superficie libre del agua en el tubo de entrada de aire (H_c , ver Fig. 3-6 c). En consecuencia, mientras el agua se encuentre por encima del fondo del tubo, esta diferencia permanecerá constante permitiendo tener una carga hidráulica fija equivalente a la altura H_c (ver Fig. 3-6 c).

Gracias a este principio hidráulico, los frascos de Mariotte son dispositivos idóneos para la aplicación de los infiltrómetros tipo “Constant Head”. En la Fig. 3-6 c, la carga hidráulica impuesta por el frasco de Mariotte se puede transmitir hacia otros instrumentos, que en el caso de esta investigación corresponden a los anillos tanto interior como exterior. Como se expuso anteriormente, mientras el nivel del agua en el frasco no descienda por debajo del tubo de entrada de aire, el tirante en los anillos se mantendrá constante.

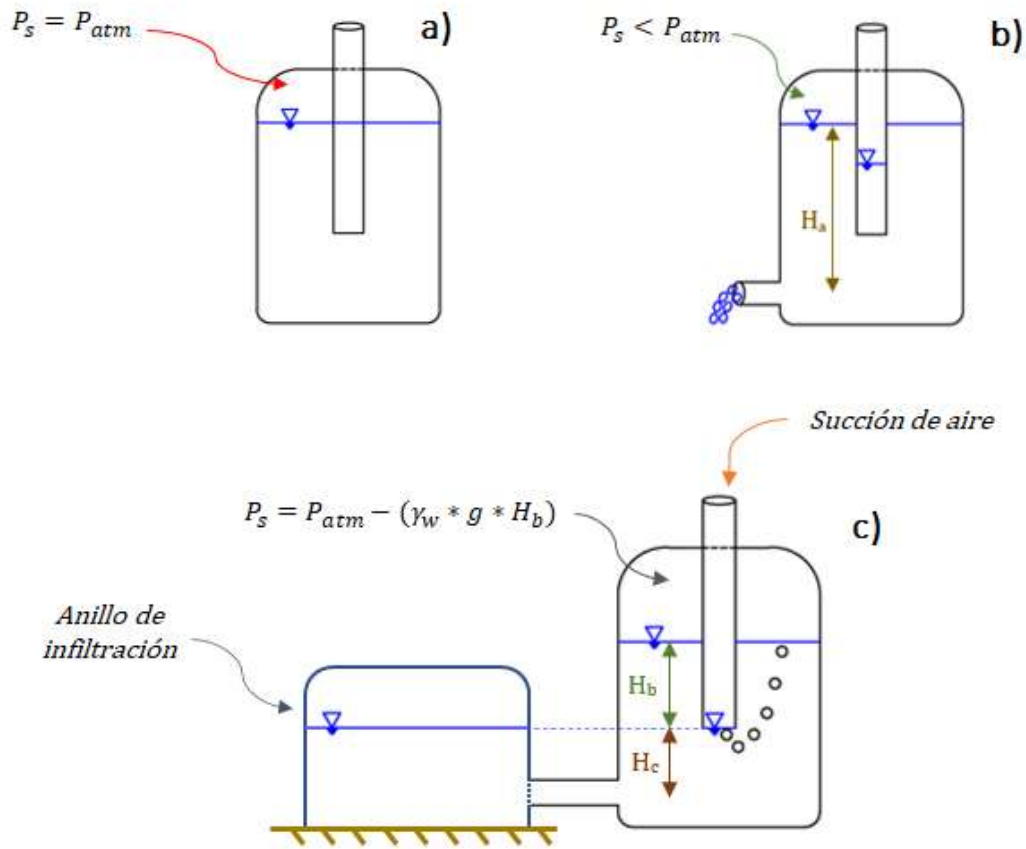


Fig. 3-6 Funcionamiento hidráulico del frasco de Mariotte

3.2.2 Instrumentación del Frasco de Mariotte

Como se mencionó anteriormente, se instaló un sensor para registrar continuamente las lecturas de la salida del agua del frasco de Mariotte que abastece al anillo interior. El sensor es de tipo ultrasónico modelo HC-SR04 (Fig. 3-7 a), el cual, incorpora un par de transductores de ultrasonido. Un transductor emite una onda de ultrasonido y el otro capta el rebote de dicha onda (Fig. 3-7 b). Posteriormente, se utiliza la velocidad del sonido (≈ 340 m/s) y el tiempo que tarda la onda sonora en ir y regresar al objeto para conocer la distancia que existe entre los transductores y el objeto, mediante la ecuación (10).

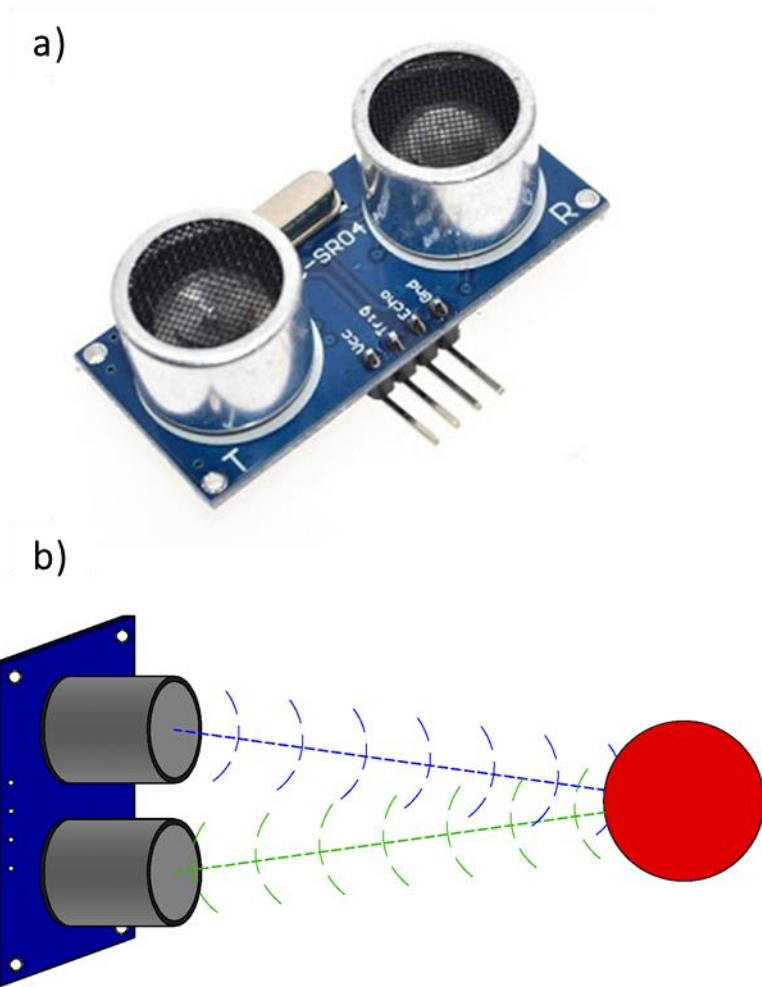


Fig. 3-7 Fotografía y representación esquemática del funcionamiento del sensor HC-SR04 (fotografía extraída del sitio web <https://naylampmechatronics.com/>)

$$Distancia = Velocidad_{sonido} * Tiempo_{retorno de onda} \quad (10)$$

De acuerdo con el fabricante, el sensor HC-SR04 permite realizar hasta 1 lectura cada 50 milisegundos (20 lecturas por segundo) y es capaz de obtener la distancia a la que se encuentra algún cuerpo en un rango de 2 a 400 cm, con una precisión de ± 0.3 cm. Puesto que ambos transductores trabajan a una frecuencia de 40 KHz, las frecuencias de las ondas generadas por el sensor son inaudibles para el ser humano.

Para el caso del frasco de Mariotte, se instaló el sensor mencionado en la parte inferior de la tapa, procurando sellarlo completamente a fin de no perder la hermeticidad del frasco. Desde esta posición, el sensor puede registrar la variación en el tirante de agua en el frasco, la cual subsecuentemente se utiliza para calcular la cantidad saliente de agua hacia el anillo interno (Fig. 3-8).

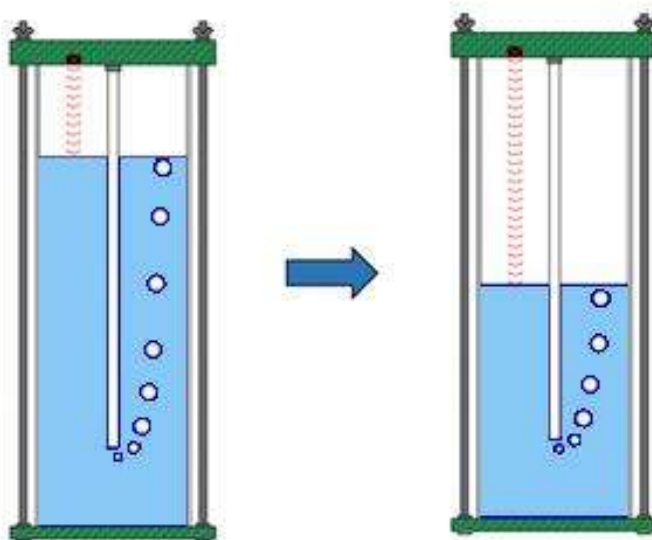


Fig. 3-8 Ubicación y funcionamiento del sensor en el frasco de Mariotte

Además del sensor HC-SR04, en la parte superior del frasco se montó una tarjeta Arduino UNO™ conectada al sensor (Fig. 3-9). Dicha tarjeta, además de alimentar de energía al sensor (5 Vcc), funciona como un microcontrolador y permite la transmisión de datos a un ordenador por medio de una conexión USB.

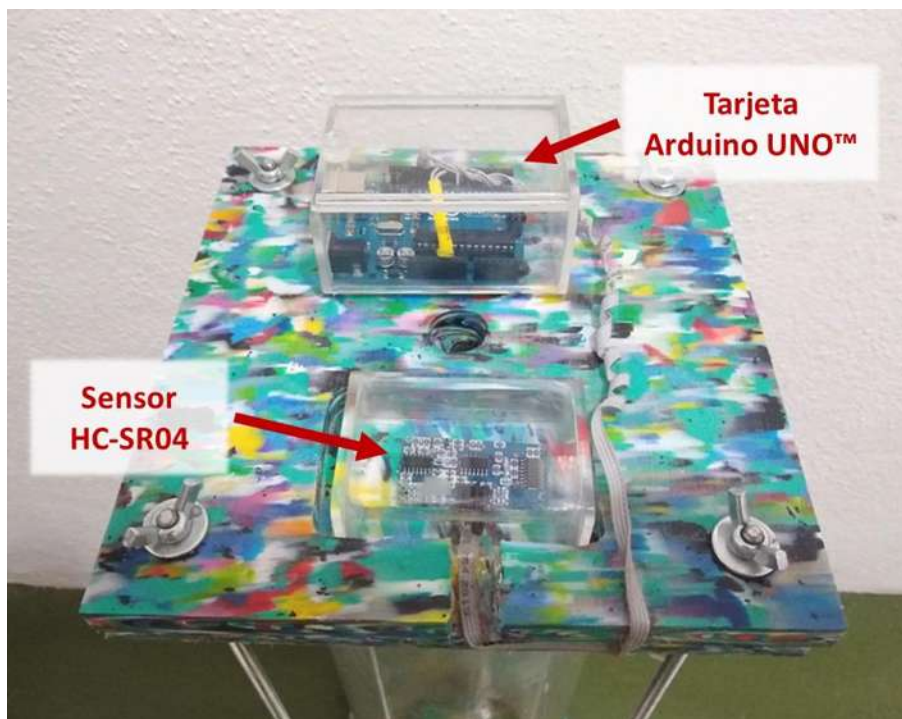


Fig. 3-9 Montaje del sensor HC-SR04 y de la tarjeta Arduino UNO en el frasco de Mariotte

Ya en el ordenador, se implementó un algoritmo computacional en el lenguaje de programación Python™ para la adquisición y procesamiento de los datos provenientes del sensor. Con fines de tener una buena precisión, se establece en este algoritmo que el sensor realice sus lecturas a una tasa de 1 lectura cada 200 milisegundos (5 lecturas/segundo). No obstante, puesto que en el interior del frasco Mariotte se generan burbujas que provocan turbulencia en la superficie del agua, se tiene una gran variabilidad en las lecturas del sensor debido a dicha turbulencia. Para abatir esta variabilidad, el algoritmo implementado realiza un promedio en el valor de las lecturas cada 3 segundos, lo cual reduce considerablemente la variabilidad en las lecturas del sensor. En la Fig. 3-10, se observa una comparativa del efecto que tiene realizar el promedio mencionado contra obtener y graficar los valores de las lecturas sin ningún tratamiento.

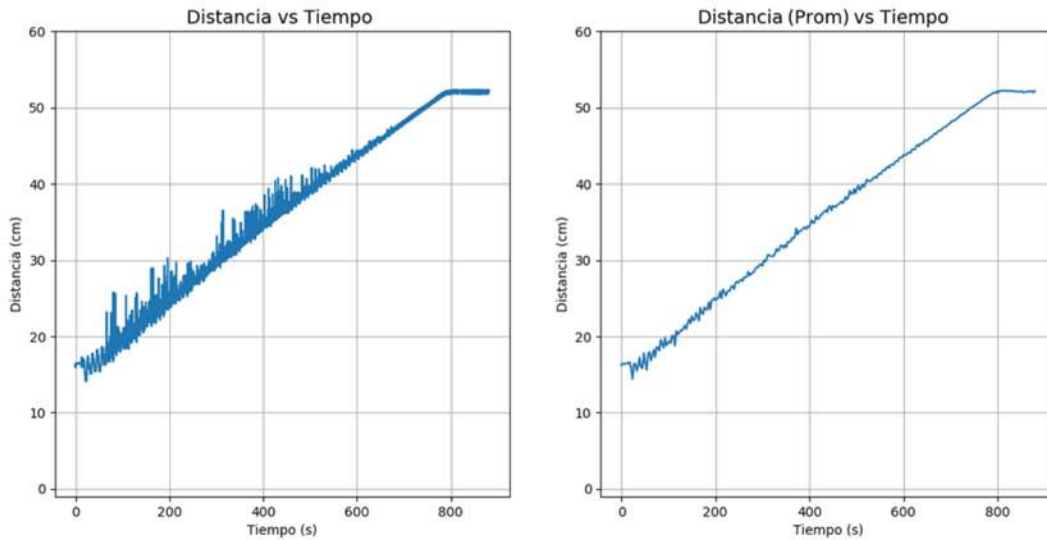


Fig. 3-10 Disminución de la variabilidad de las lecturas del sensor

Si bien el fabricante establece que el sensor tiene una precisión de ± 0.3 cm, se tomaron diferentes lecturas de variación del tirante empleando el sensor ultrasónico y se cotejaron con las mediciones reales de tales variaciones de tirante, a fin de conocer la precisión que se tiene para la experimentación de esta investigación. Este análisis se muestra gráficamente en la Fig. 3-11. Los valores de este análisis comparativo se muestran a detalle en el Anexo A.

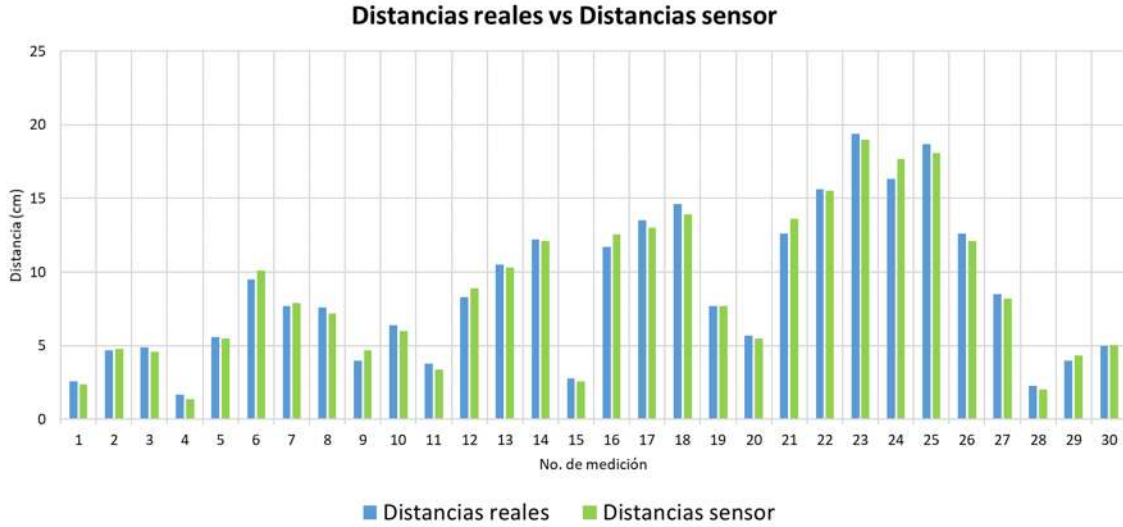


Fig. 3-11 Comparación de variaciones de tirante reales y obtenidos con el sensor

En la Fig. 3-11 se observa que existe una pequeña diferencia, en promedio se obtuvo que la variación entre las lecturas con el sensor y la diferencia de tirante real es de ± 0.4 cm. El error resultó ser 0.1 cm mayor que lo establecido por el fabricante. Como se enunció anteriormente, es probable que esta diferencia se deba a la turbulencia en la superficie de agua generada por las burbujas en el frasco de Mariotte.

Las mediciones de la gráfica de la Fig. 3-11 se utilizaron para calibrar el sensor, como se muestra en la Fig. 3-12. En dicha gráfica se puede apreciar que a pesar de tener una variación en las lecturas de ± 0.4 cm, se tiene una correlación lineal aceptable entre los datos, ya que tanto la pendiente de la línea de tendencia como los coeficientes R^2 y r son muy cercanos a la unidad.

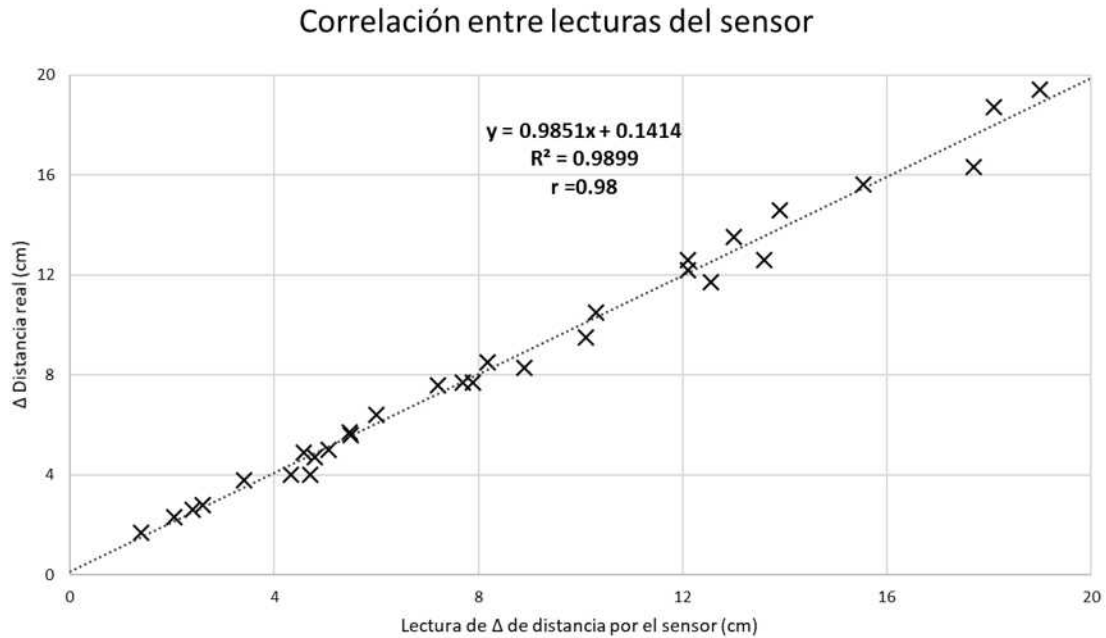


Fig. 3-12 Correlación entre variaciones de tirante reales y obtenidos con el sensor

Una vez que se tiene el registro de la variación del tirante de agua en el frasco, es posible conocer el volumen de agua saliente, ya que el frasco posee un área transversal constante equivalente a 162.07 cm². Este valor se multiplica por la diferencia de alturas entre la lectura inicial del sensor y otra lectura posterior, obteniendo así el volumen de agua saliente del frasco. En la Fig. 3-13 se muestra un ejemplo de una gráfica resultante del algoritmo, la cual contiene las lecturas desde que el frasco está cercano a su máxima capacidad hasta su vaciado.

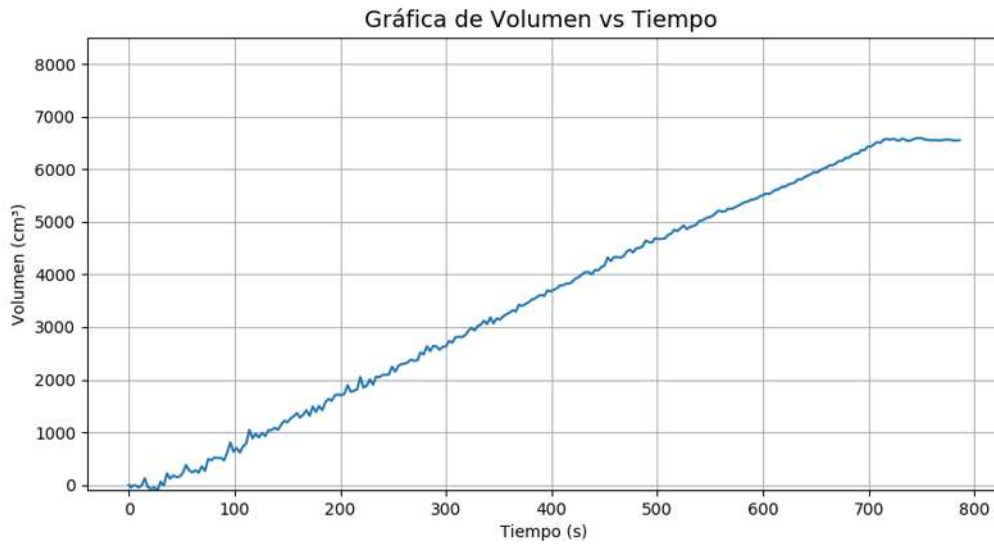


Fig. 3-13 Gráfica representativa del vaciado de agua en el frasco de Mariotte

3.3 ALGORITMO PARA CÁLCULO DE ÁREA EN AGRIETAMIENTOS

El algoritmo para la caracterización geométrica de los agrietamientos se realizó utilizando como plataforma el lenguaje de programación “Python™”, y tiene como primicia encontrar y delimitar los pixeles correspondientes a las grietas de una fotografía para obtener su extensión superficial. Esta delimitación se logró gracias a la implementación de la librería computacional “OpenCV” (Open Source Computer Vision Library). Dicha librería explora la visión artificial, utilizando algoritmos de tipo “Machine Learning” los cuales permiten realizar varios procesos digitales como análisis de video, detección de objetos, procesamiento de imágenes, manipulación de objetos tanto en 2D como en 3D, estereoscopía, etc. Además, es ejecutable en distintos lenguajes de programación como C++, Java, Matlab, Python, entre otros (<https://opencv.org/>). Para el desarrollo del algoritmo de las grietas, se centró la aplicación de esta librería en la detección de objetos y en el procesamiento de imágenes, utilizando algunos parámetros e interfaces interactivas.

En la Fig. 3-14, se presenta gráficamente el diagrama de flujo del algoritmo desarrollado. Al inicio del algoritmo, se requiere como primera entrada la imagen de la superficie agrietada capturada en el infiltrómetro. Posteriormente, se inicia un primer ciclo

para la detección de la grieta, en el cual se establecen ciertos parámetros iniciales de entrada que, mediante su manipulación, se obtiene una detección preliminar de los pixeles de las grietas. En seguida, se ingresa a un segundo ciclo cuya finalidad es depurar los pixeles encontrados, eliminando los contornos de los pixeles no deseados. Finalmente, se genera una imagen con los pixeles delimitados de las grietas además de los resultados encontrados. A continuación, se presentan con mayor detalle los elementos que definen al algoritmo.

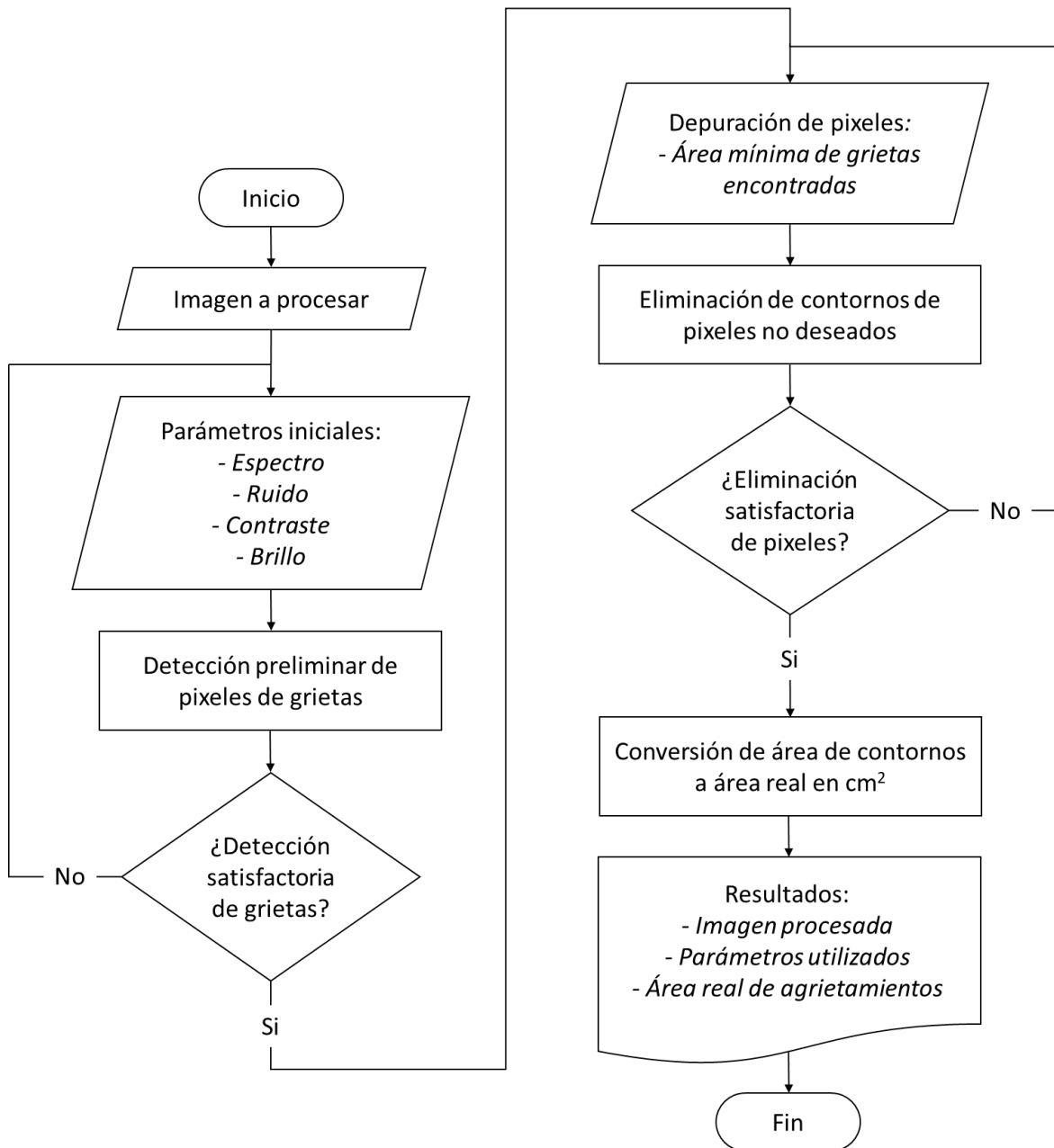


Fig. 3-14 Algoritmo para el cálculo de áreas agrietadas.









3.3.1 Parámetros iniciales

Los parámetros de entrada que forman parte del primer ciclo para la detección de las grietas en la imagen son: Espectro, Ruido, Contraste y Brillo. Estos parámetros se explican a continuación.

3.3.1.1 Espectro

En las fotografías tomadas desde el infiltrómetro, generalmente las grietas exhiben la coloración más oscura dentro de toda la imagen, puesto que la iluminación exterior no alcanza a entrar en su totalidad al interior de la grieta. Siguiendo este principio se establece el parámetro denominado como “Espectro”, el cual permite detectar las grietas en la imagen gracias a su tonalidad oscura. Este parámetro se basa en el sistema de color “RGB”, el cual establece que todos los colores se componen por tres colores primarios: rojo, verde y azul; cada uno teniendo un rango de aportación de 0 hasta 255. Como se puede ver en la Tabla 3-1, cuando la aportación de los tres colores base o primarios es igual a 0, el color producido es el negro; mientras que cuando la aportación de estos colores es de 255, se obtiene el color blanco, quedando todos los demás colores comprendidos entre estos rangos.

Tabla 3-1 – Ejemplo de clasificación de colores RGB

	R, G, B		R, G, B
	(255,0,0)		(153,102,51)
	(0,255,0)		(255,255,255)
	(0,0,255)		(166,166,166)
	(255,255,0)		(0,0,0)

En la Fig. 3-15, se muestra la gráfica de la composición de los tres colores primarios “RGB” en una fotografía típica tomada en el infiltrómetro. Puesto que el fondo del infiltrómetro es de color blanco, se observa un notable aumento en la cantidad de píxeles

cuando estos se acercan a su valor máximo de 255; no obstante, se puede apreciar una gran similitud entre la aportación de los colores primarios, similar a lo que sucede en las imágenes que se encuentran en escala de grises.

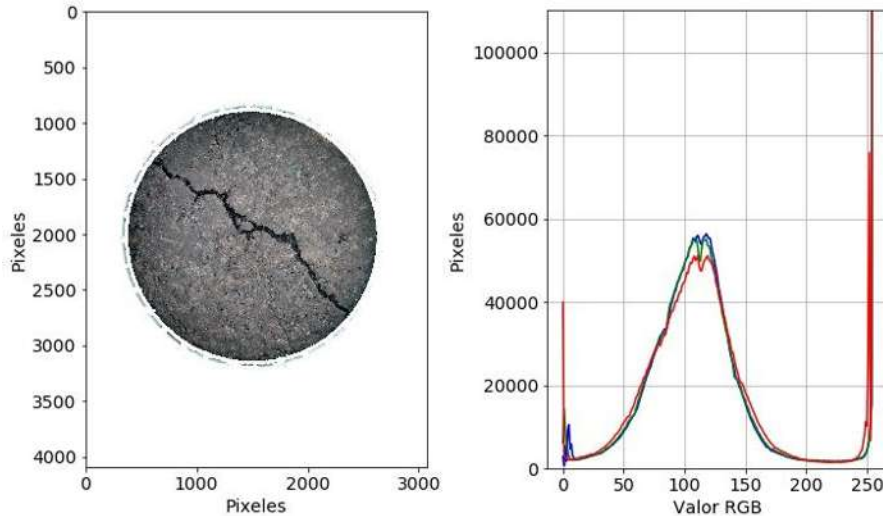


Fig. 3-15 Composición de colores RGB en fotografías de grietas

Tomando como base lo descrito en el párrafo anterior, el parámetro “Espectro” delimita el valor de aportación de los colores primarios RGB. El valor de cada color primario se considera igual, debido a que en la Fig. 3-15, se detectó que las aportaciones de cada color son similares. Cuando se utiliza un valor de espectro de 29 (ver Fig. 3-16), se consideran los píxeles con valor RGB comprendido entre 0 y 29, esto produce que los píxeles de tonalidades claras se eliminen y queden los negros que son los que componen la grieta. Para fines de delimitación los píxeles negros, se cambian a blancos, que contrastan con el fondo negro (ausencia de color), para poder verlos y delimitar la grieta.

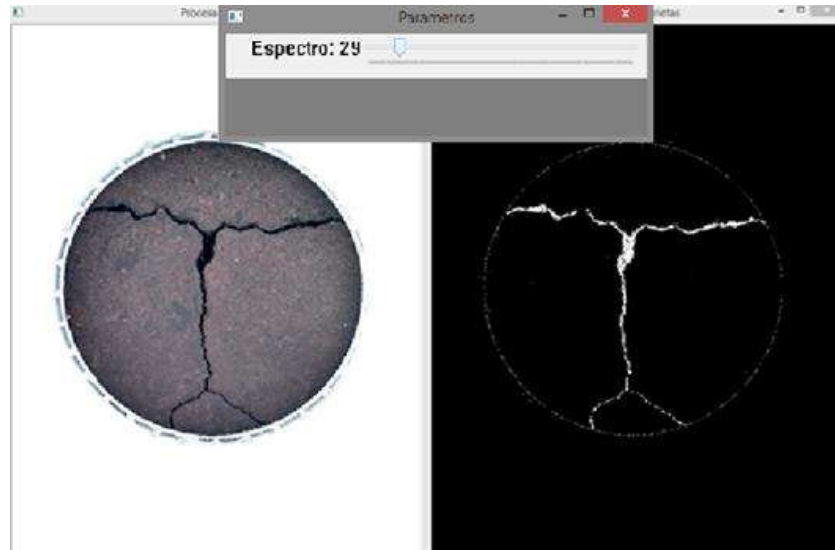


Fig. 3-16 Implementación del parámetro "Espectro"

3.3.1.2 Ruido

El siguiente parámetro definido como “Ruido”, tiene como función difuminar el color de los píxeles en la imagen a través de un efecto conocido como “Desenfoque Gaussiano”, que consiste en mezclar ligeramente los colores de los píxeles cercanos entre sí, generando así el difuminado (Fig. 3-17). Como consecuencia de este mezclado entre píxeles cercanos, se puede delimitar de manera más detallada el contorno de la grieta, además de minimizar la intervención de otros píxeles en la imagen del mismo color de la grieta pero que no formen parte de ella, como pueden ser algunos agregados de la carpeta asfáltica, la sombra de los bordes del infiltrómetro, manchas existentes sobre la superficie del pavimento, etc.



Fig. 3-17 Implementación del parámetro "Ruido"

3.3.1.3 Contraste y Brillo

Finalmente, en esta primera etapa de variables de entrada, se establecen los parámetros de “Contraste” y “Brillo”. Estos parámetros generan una combinación de la imagen original con una copia de esta, la cual puede ser más oscura o clara dependiendo del valor que se asigne a los parámetros mencionados. Dicha combinación produce una modificación en la iluminación de la imagen original, permitiendo incrementar el brillo de imágenes muy oscuras o viceversa (Fig. 3-18). Ambos parámetros son de gran utilidad cuando se procesan imágenes con agrietamientos muy pequeños o con poca iluminación. Al igual que en el parámetro “Ruido”, con la implementación de estos dos parámetros se favorece la eliminación de los pixeles que no constituyen a la grieta, aunque también se pueden sesgar algunos pixeles de esta, por lo que queda a criterio del usuario su uso.

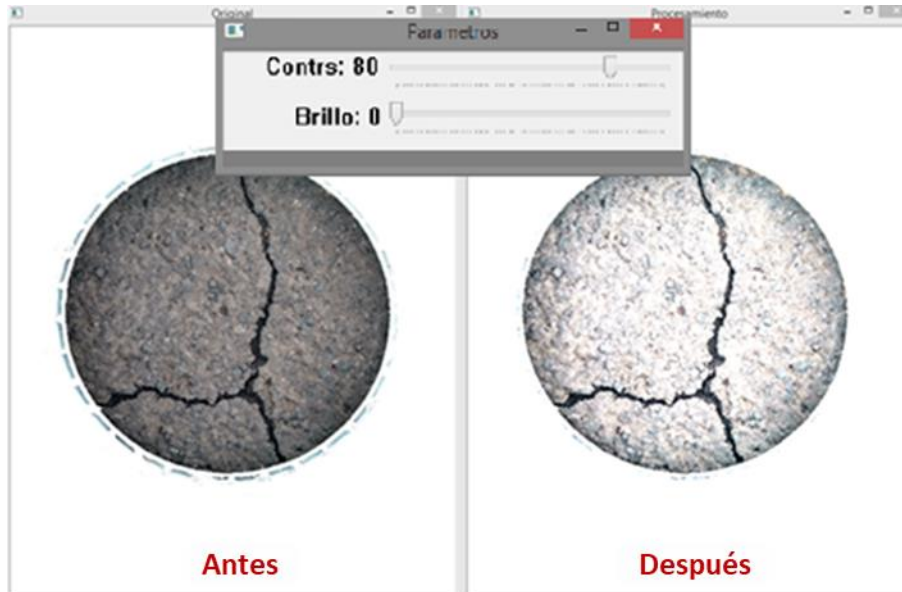


Fig. 3-18 Implementación de los parámetros "Contraste" y "Brillo"

Con el ingreso de estos cuatro parámetros iniciales, se realiza la detección de los píxeles que conforman la grieta en la imagen, formando cúmulos de píxeles sobre los cuales se pueden trazar contornos a su alrededor. Cabe señalar que, si estos parámetros no definen adecuadamente el contorno de las grietas, se pueden modificar hasta que se tenga una detección de grietas satisfactoria.

3.3.2 Depuración de píxeles de las grietas

Una vez concluido el proceso de detección preliminar de la grieta, es posible que se hayan incluido otros cúmulos de píxeles o contornos que no pertenecen a la grieta, los cuales generalmente son pequeños y corresponden a otros elementos oscuros dentro de la imagen; que no se hayan podido suprimir debidamente con la manipulación de los parámetros previamente establecidos. Para sustraer estos contornos no deseados, se inicia un segundo ciclo en donde introduce una nueva variable de entrada llamada "Área mínima", que como su nombre lo indica, establece un valor mínimo del área en píxeles de los contornos resultantes del proceso de detección de grietas, descartando todos aquellos contornos cuya área sea menor a la asignada en esta variable. Por ende, se podrán eliminar los pequeños

contornos que no pertenezcan a las grietas, resultando en una depuración más precisa de los píxeles de las grietas; no obstante, es posible que también se descarten superficies de grietas pequeñas durante este proceso de eliminación (Fig. 3-19). De manera similar a los cuatro parámetros iniciales, el valor del “Área mínima” se puede modificar tantas veces sea necesario.

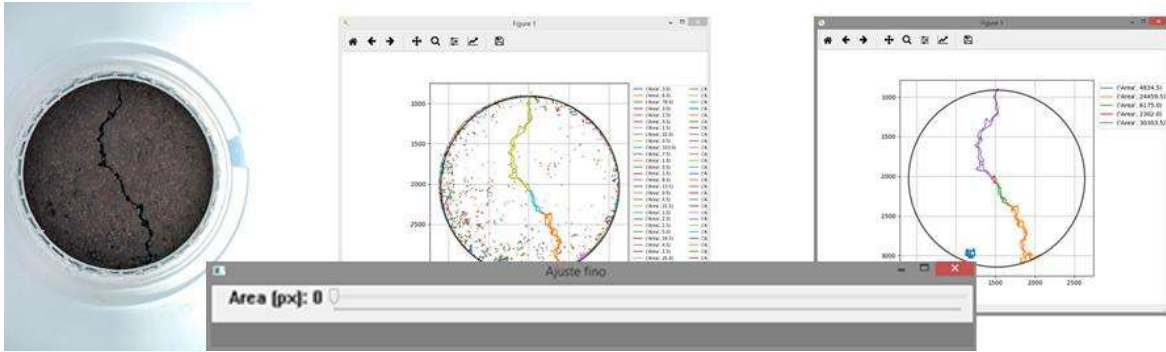


Fig. 3-19 Implementación del parámetro "Área mínima"

3.3.3 Conversión de área de contornos y resultados del algoritmo

Después de eliminar las áreas de los contornos no deseados, únicamente quedarán las áreas de los contornos remanentes correspondientes a las grietas. Sin embargo, estas áreas aún se encuentran en unidades de píxeles, siendo necesaria su conversión a unidades de medida de superficie real. Para lograr esto, se toma como referencia física el perímetro del anillo, el cual tiene un diámetro constante de 27.7 cm. Puesto que todas las fotografías son tomadas desde la misma posición y con la misma resolución (3072 x 4096 píxeles), la referencia del perímetro del anillo no se verá afectada geoméricamente en las fotografías. En consecuencia, se detectó que digitalmente el diámetro del anillo es igual a 2170 píxeles, para la cámara fotográfica utilizada. Obteniendo el área tanto física como en píxeles del anillo interior, es posible establecer una regla de tres para determinar el área del agrietamiento en unidades de cm², quedando definida por la siguiente ecuación:

$$\text{Área real}_{grieta} = \frac{\text{Área digital}_{grieta} * \text{Área real}_{anillo}}{\text{Área digital}_{anillo}} \quad (11)$$

Donde $\text{Área digital}_{\text{grieta}}$ es la suma de las áreas de los contornos digitales de las grietas en unidades de píxeles, $\text{Área real}_{\text{anillo}}$ es el área real del anillo interior (602.628 cm^2), y $\text{Área digital}_{\text{anillo}}$ es el área del anillo en la fotografía digital ($3,698,361.411$ píxeles).

Finalmente, se imprime la imagen con los contornos resultantes trazados perimetralmente en color rojo (Fig. 3-20), así como un resumen de los valores de parámetros utilizados y como resultado final, se emite una aproximación del área real en cm^2 de los contornos o grietas de la imagen y un porcentaje de la superficie agrietada (Fig. 3-21).

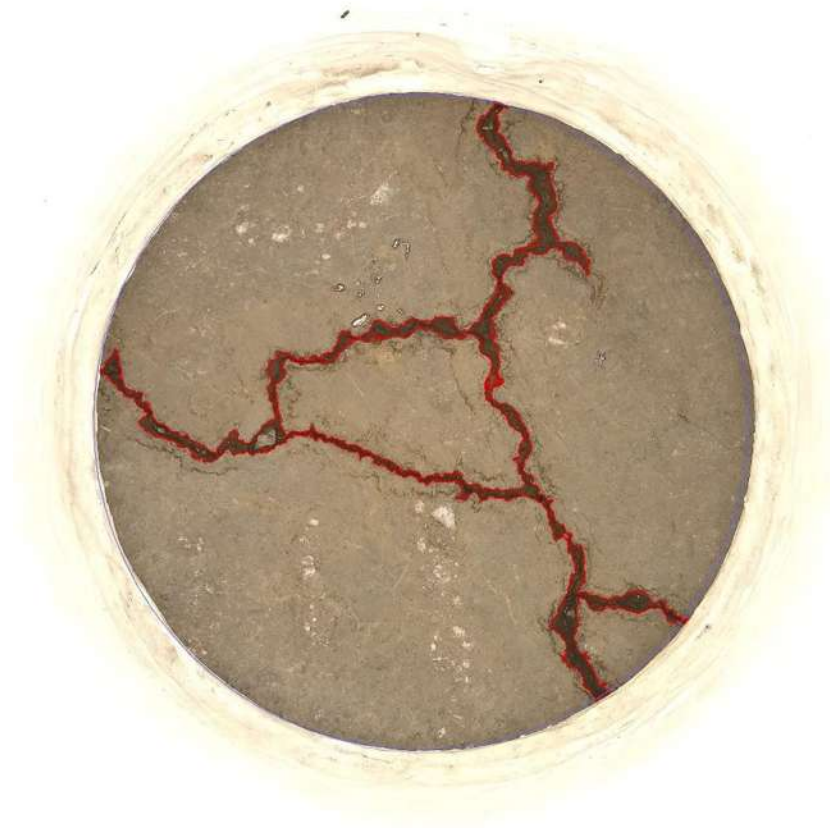


Fig. 3-20 Contornos detectados por el algoritmo

Imagen procesada:

C:/Users/Dante/Dropbox/Dante TesisM/02 Tesis/05 Pruebas/Atecuaro/Atecuaro 5/areas/Atecuaro 5 - Foto 1.jpg

Parámetros utilizados:

Espectro: 116

Ruido: 7

Contraste: 45

Brillo: 18

Área mínima de grietas (píxeles): 4074

Área:

Área agrietada: 46.437 cm²

Porcentaje de área agrietada: 7.71%

Fig. 3-21 Resultados del algoritmo

3.3.4 Validación estadística del algoritmo

Con el fin de validar los resultados obtenidos por el algoritmo desarrollado y cuantificar el error en la medición del área de los agrietamientos, se realizó un análisis de 30 fotografías tomadas sobre polígonos de color oscuro con áreas conocidas (Fig. 3-22). Los resultados del procesamiento de estas fotografías y de la validación del algoritmo se muestran en el Anexo B.

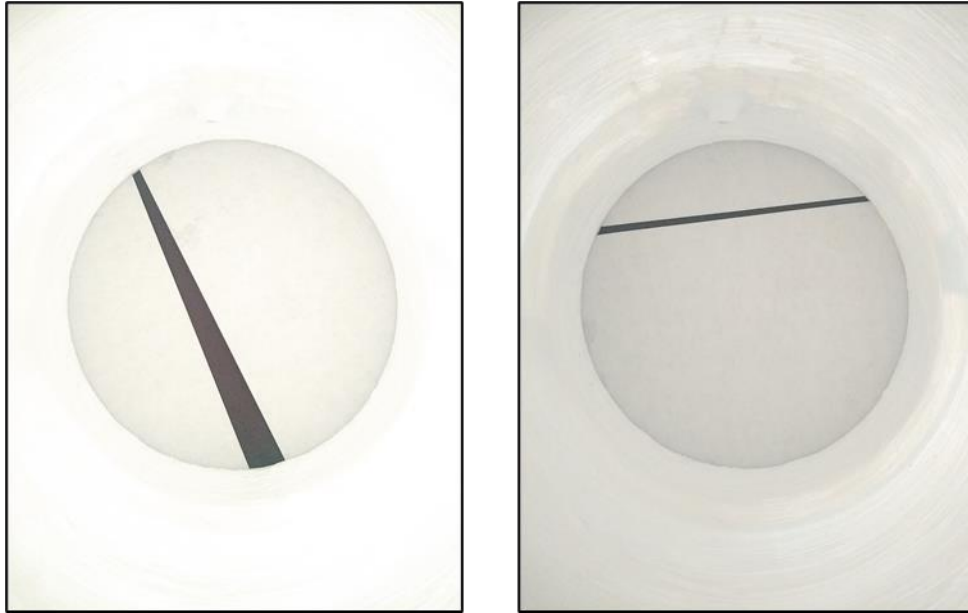


Fig. 3-22 Ejemplos de fotografías tomadas para la validación del algoritmo

Conjuntamente, se capturaron 3 fotografías por cada polígono bajo diferentes condiciones de iluminación, a fin de conocer la variación en los resultados, como se observa en la Fig. 3-23. Una vez procesadas las imágenes con diferentes iluminaciones, se obtuvo una desviación estándar promedio en los resultados de área de 0.521 y un coeficiente de variación de 0.964%. Lo cual demuestra que sin importar las condiciones de iluminación con las que se tome la fotografía, se obtendrán resultados similares y con poca dispersión.

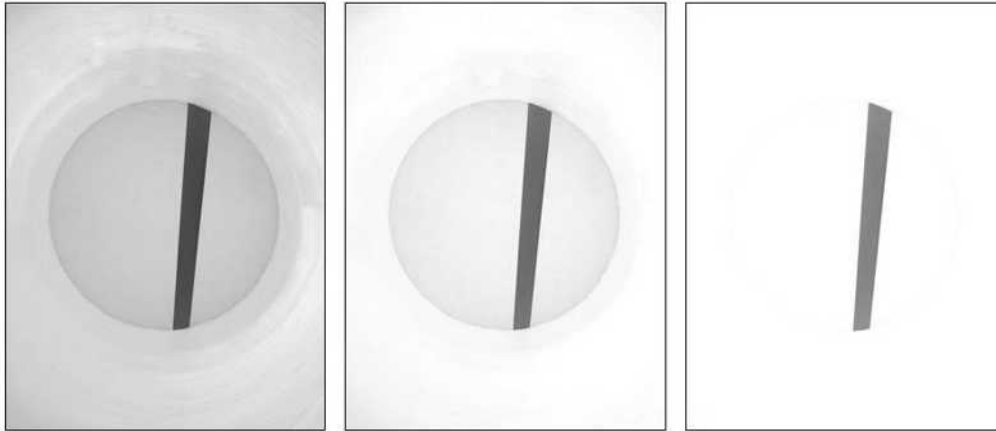


Fig. 3-23 Fotografías tomadas bajo diferentes escenarios de iluminación

En cuanto a la comparación de los resultados del algoritmo con el área real del polígono, se realizó un promedio de los resultados obtenidos por las 3 fotografías con diferente iluminación. Estos resultados fueron graficados contra los valores reales de las áreas de los polígonos para conocer su correlación, ver Fig. 3-24. En esta gráfica, se observa la gran similitud que existen entre los resultados del algoritmo y las áreas reales de los polígonos, puesto que la línea de tendencia entre estos puntos tiene un comportamiento lineal cuya pendiente es muy cercana a 1, además de existir un coeficiente R^2 muy cercano también a la unidad.

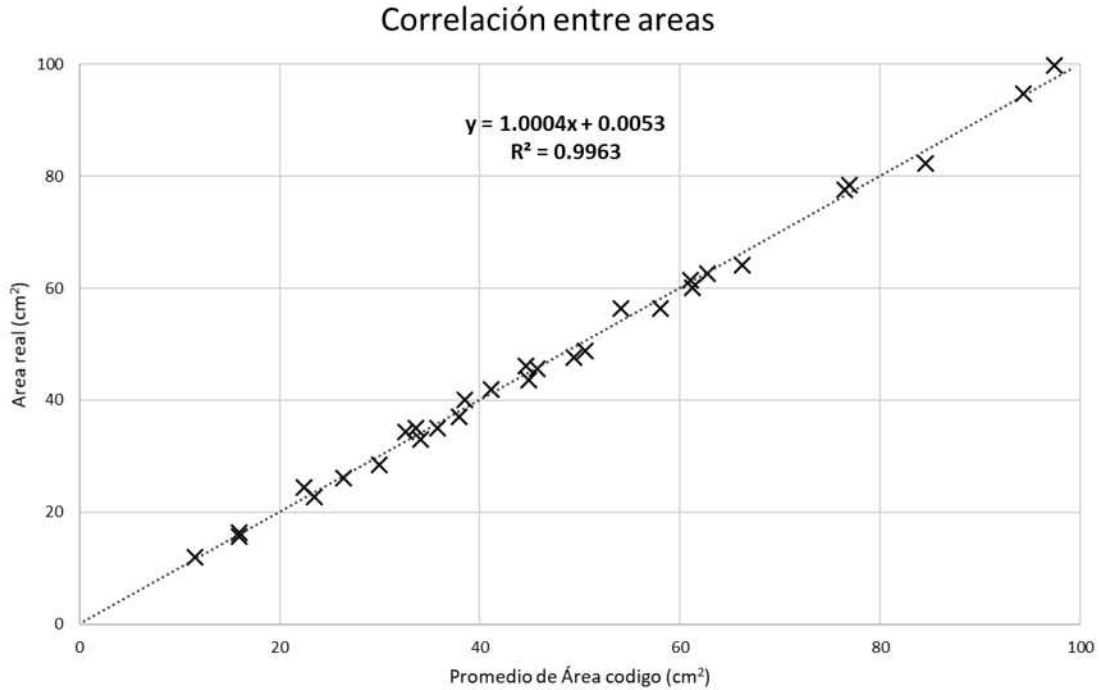


Fig. 3-24 Correlación entre medidas reales y medidas obtenidas con el algoritmo

Asimismo, se determinó el error absoluto y el error relativo de las mediciones de área utilizando las siguientes formulaciones:

$$Error_{abs} = |Valor\ real - Valor\ medido| \quad (12)$$

$$Error_{rel} = \frac{|Valor\ real - Valor\ medido|}{Valor\ real} \quad (13)$$

En promedio de los 30 polígonos, se obtuvo un error absoluto de 1.17 cm² y un error relativo de 2.77%, con lo que se concluye que el algoritmo presenta una aproximación en sus resultados de 100±2.77%, la cual es una buena precisión para estimar el área de los agrietamientos en términos ingenieriles.

3.4 DESCRIPCIÓN DE LA PRUEBA DE INFILTRACIÓN DE PAVIMENTOS

Adjuntamente a las pruebas de los prototipos, materiales utilizados y el diseño del infiltrómetro propuesto, se siguieron diferentes procedimientos para la ejecución de la prueba de infiltración en campo, hasta definir una rutina que brindase un buen desempeño del equipo. En esta sección se describe a profundidad el procedimiento determinado para la prueba de campo para la infiltración en pavimentos, partiendo desde el montaje “*in situ*” del equipo hasta la obtención de resultados.

Como primer paso, se debe preparar la superficie donde se llevará a cabo la prueba, para lo cual se debe remover polvo o basura presente a fin de mejorar el sellado del equipo con el pavimento. De igual manera, es necesario remover de manera superficial cualquier material de relleno excedente del interior de la grieta (Fig. 3-25).



Fig. 3-25 Preparación y limpieza de la superficie

Una vez realizada la limpieza de la superficie de prueba, se observa el contraste visual que existe entre el pavimento y las grietas. Puesto que el algoritmo implementado para la caracterización geométrica de las grietas se basa en el tratamiento de imágenes de grietas con tonalidades de color oscuras, se debe garantizar tal escenario, por lo que de ser necesario se administrará agua hacia el interior de la grieta. Este humedecimiento de la grieta provoca que estas adquieran momentáneamente un color oscuro, como se muestra en la Fig. 3-26.



Fig. 3-26 Humedecimiento de grietas

Terminada la preparación de la superficie y de las grietas, se capturan las fotografías de la zona agrietada a probar, para lo cual se coloca en posición el anillo interno y se monta la cámara sobre la base ubicada en la parte superior del anillo (Fig. 3-27). Es recomendable capturar imágenes bajo diferentes condiciones de iluminación, con el fin de obtener un promedio de los resultados del procesamiento de imágenes.



Fig. 3-27 Captura de fotografías de grietas

A continuación, se dispone el material de sellado (plastilina) sobre los dos anillos y se sitúan concéntricamente en el pavimento. Una vez acomodados, se presionan firmemente contra el pavimento y se coloca material de sellado adicional en la periferia exterior de los anillos. Al finalizar el sellado de los anillos, es conveniente verter un poco de agua en el interior de estos para observar si existe alguna fuga y comprobar el funcionamiento del sellado (Fig. 3-28).



Fig. 3-28 Verificación del sellado del equipo

Al mismo tiempo, se llenan de agua los dos frascos de Mariotte a utilizar y se realizan las conexiones hidráulicas con los anillos. De igual manera, se conecta el frasco de Mariotte instrumentado a un ordenador portátil para la ejecución del algoritmo que registra las lecturas del sensor. En seguida, se vacía agua manualmente al interior de los anillos hasta lograr un tirante cercano a la carga hidráulica establecida por los frascos de Mariotte (10 cm aproximadamente), con la finalidad de lograr un mejor rendimiento durante la prueba de los frascos y evitar su rápido vaciado. Una vez dispuestos todos los equipos, se tendrá una configuración similar a la mostrada en la foto de la Fig. 3-29.



Fig. 3-29 Acomodo final del equipo en campo

A continuación, se ejecuta el programa en el ordenador y se abren las válvulas de paso de los frascos, comenzando así la prueba. Conforme el agua sale del frasco de Mariotte instrumentado hacia el anillo interno, se muestra en el programa en tiempo real el cambio del tirante en centímetros en el frasco (Δh), el tiempo transcurrido de la prueba en segundos (t) y el volumen de agua saliente en centímetros cúbicos (V), siendo estos dos últimos los valores que se van graficando a lo largo de la prueba (Fig. 3-30).

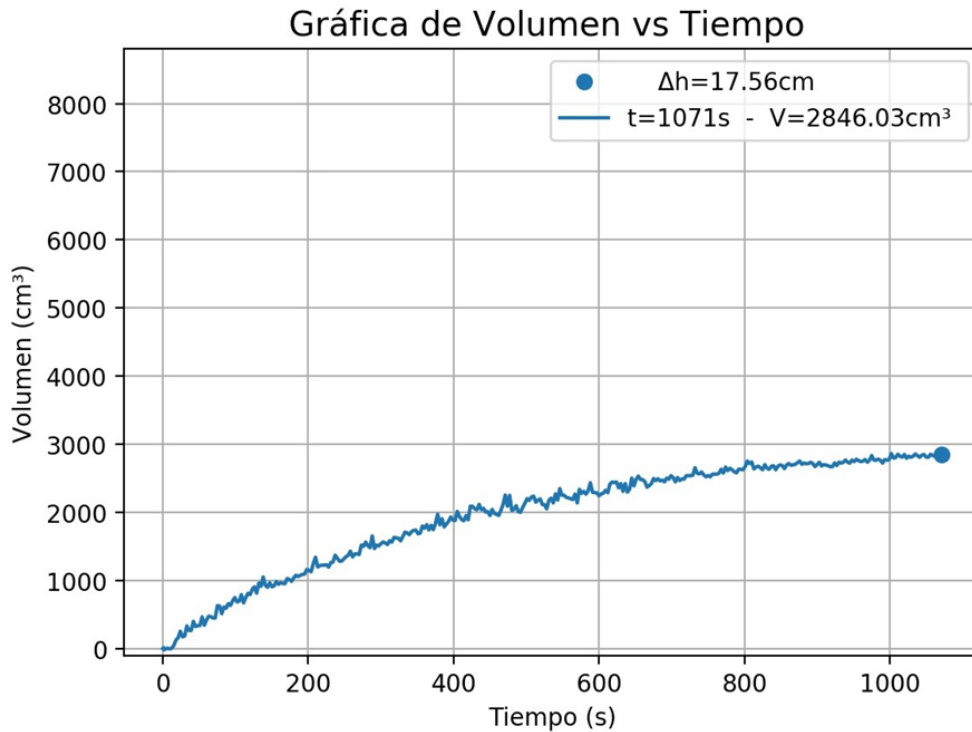


Fig. 3-30 Gráfica desplegada por el programa durante la ejecución de la prueba

Finalmente se debe observar la gráfica en el ordenador, dando por terminada la prueba una vez que no se exhiban cambios significativos en la pendiente de la gráfica durante un tiempo considerado. Bajo este escenario, se detiene el programa imprimiéndose una gráfica final, sobre la cual se ajustan líneas de tendencia con diferentes tiempos correspondientes al segmento lineal de las lecturas obtenidas. Por último, se guardan los resultados en un archivo con formato .CSV. La pendiente de estas líneas de tendencia representa la tasa a la cual se infiltra el agua en el pavimento. Posteriormente, se realiza un promedio de estas tasas para conocer la infiltración media. En la Fig. 3-31 se muestra un ejemplo de una gráfica de resultados al término de una prueba. Adicionalmente, si se requiere conocer el gasto de infiltración por área de pavimento, únicamente se divide la tasa de infiltración promedio sobre el área donde se cuantificó esta infiltración, siendo esta el área del anillo interior que es 602.628 cm^2 .

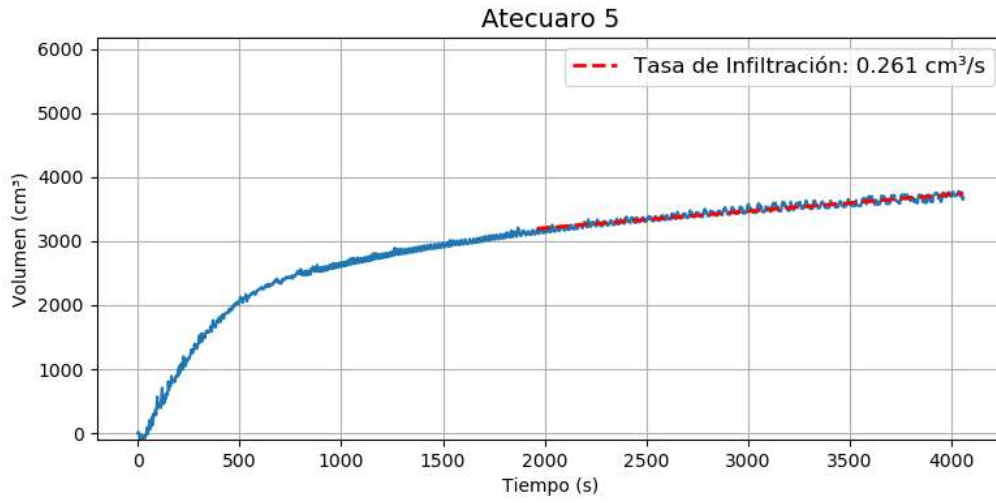


Fig. 3-31 Gráfica final de lecturas y tasa de infiltración en una prueba típica

4 RESULTADOS DE PRUEBAS DE CAMPO

Para la evaluación de la infiltración media en pavimentos flexibles, se realizaron pruebas en 8 zonas de estudio en diversas vialidades dentro de los municipios de Morelia y Pátzcuaro, Michoacán; comprendiendo pavimentos de diferentes características tales como estacionamientos, carreteras de bajo tránsito, tronques de autopistas, y autopistas de reciente construcción. Las ubicaciones de estas vialidades se encuentran señaladas en el mapa de las Fig. 4-1 y Fig. 4-2. Cabe señalar que, exceptuando a los pavimentos nuevos, en todos los demás lugares se ejecutaron pruebas tanto en zonas agrietadas como en zonas sin agrietar, esto con el objetivo de obtener una comparativa y observar que tanto aumenta la infiltración de agua debido a los agrietamientos superficiales.



Fig. 4-1 Ubicación de los sitios de prueba en el municipio de Morelia, Mich.



Fig. 4-2 Ubicación de los sitios de prueba en el municipio de Pátzcuaro, Mich.

4.1 SITIO 1

El primer sitio de pruebas corresponde al Estacionamiento de Rectoría, ubicado dentro de las instalaciones de Ciudad Universitaria de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. En este lugar se realizaron un par de ensayos que sirvieron como pruebas piloto para comprobar el correcto funcionamiento de todo el equipo y del programa para las lecturas del sensor. En cuanto al pavimento se refiere, se encontró una carpeta asfáltica relativamente envejecida de 4 cm de espesor, conformada visiblemente por partículas gruesas y con poco contenido de finos y de material asfáltico, similar a las mezclas asfálticas realizadas por el sistema de riegos. Los agrietamientos encontrados en este pavimento se clasifican como grietas aleatorias reminiscentes a los agrietamientos en bloque, con cierta presencia de material de relleno en su interior. En la Fig. 4-3 se observa una fotografía del agrietamiento del lugar tomada desde el anillo interior del infiltrómetro.



Fig. 4-3 Fotografía de grieta en las pruebas del Estacionamiento de Rectoría de la UMNSH

Los resultados de las pruebas realizadas en este lugar se muestran en la Tabla 4-1, en donde se observa que para esta carpeta si bien el gasto de infiltración es mayor en el área agrietada, no se tiene una gran diferencia respecto al área que se encuentra sin agrietar. Esto se explica gracias al tipo de carpeta que se tiene en el lugar, que como se mencionó en el párrafo anterior, está conformada únicamente por riegos de emulsión asfáltica y pétreos, con poco espesor y capacidad estructural favoreciendo el fácil acceso a la entrada de agua en toda la mezcla.

Tabla 4-1 Resultados de las pruebas en el Estacionamiento de la UMSNH

Código de Prueba	Área agrietada		Carga Hidráulica (cm)	Gasto de infiltración promedio (cm ³ /s)	Tasa de infiltración por área de pavimento (l/h/m ²)
	cm ²	%			
Estacionamiento 1	25.235	4.190	12.0	0.339	20.25
Estacionamiento 2	0.000	0.000	12.0	0.300	17.92

4.2 SITIO 2

El segundo lugar de la experimentación se trató de la Antigua carretera Morelia-Pátzcuaro. Hasta hace aproximadamente 25 años, esta vialidad tenía una amplia demanda

4 - RESULTADOS DE PRUEBAS DE CAMPO

vehicular, puesto que era una de las principales conexiones con la capital del estado. No obstante, a raíz de la remodelación de la Carretera Federal 14, este camino quedó prácticamente relegado, con pocas cargas de tránsito y sirviendo únicamente como vía de acceso a la Presa de Cointzio y a las demás comunidades aledañas. Por consiguiente, el pavimento que se tiene actualmente tiene reencarpetamientos (5 cm de espesor de la última sobrecarpeta) y un gran deterioro superficial, exhibiendo un alto grado de agrietamiento por fatiga en todo lo ancho de la sección, tal y como se observa en la Fig. 4-4. Es preciso mencionar que, por la misma falta de mantenimiento del pavimento, un gran porcentaje de las grietas encontradas contenían en su interior material de relleno de diferente índole, como arcilla, material vegetal, escombros, etc.



Fig. 4-4 Agrietamiento por fatiga en la Antigua Carretera Morelia-Pátzcuaro

En este lugar se realizaron 3 pruebas sobre superficies con grietas (ver Fig. 4-5) y solo 1 prueba sobre una superficie no agrietada (ver Fig. 4-6), puesto que como se mencionó anteriormente en su mayoría el pavimento se encuentra muy agrietado. Como se observa en la Tabla 4-2, los resultados de las pruebas muestran una buena correlación

4 - RESULTADOS DE PRUEBAS DE CAMPO

agrietamiento/infiltración, ya que en el sitio con mayor área agrietada se presentó la mayor tasa de infiltración, siendo esta condición la obtenida en la prueba denominada “Presa 1”, con valores de 11.27% de área agrietada y una tasa de infiltración por área de 16.19 l/m/m². En cambio, la prueba “Presa 3”, realizada sobre una superficie con 0% de agrietamiento registró una infiltración considerablemente menor, equivalente a 1.93 l/m/m². Los valores de los ensayos restantes se encuentran comprendidos entre los valores previamente mencionados, tanto de superficie agrietada, como de gasto de infiltración.

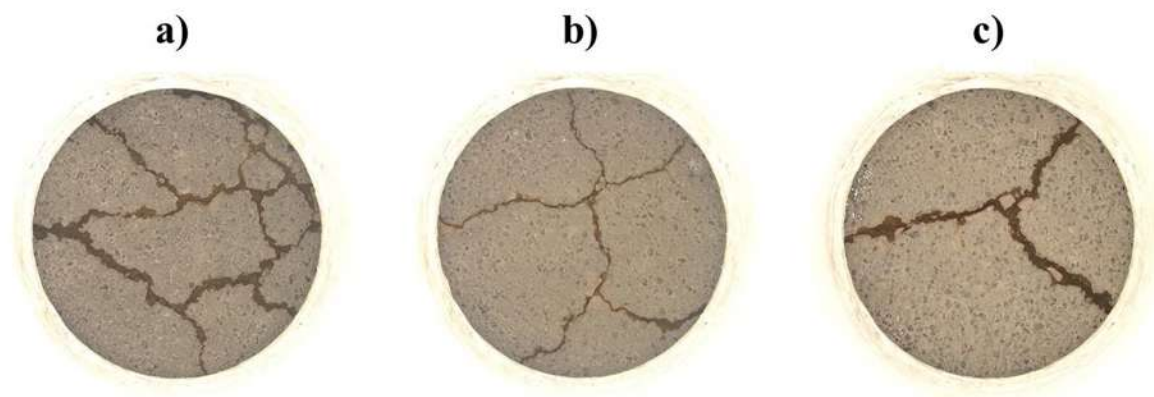


Fig. 4-5 Agrietamientos de las pruebas en la Antigua carretera Morelia-Pátzcuaro. a) Prueba “Presa 1”, b) Prueba “Presa 2”, c) Prueba “Presa 4”



Fig. 4-6 Sitio de prueba “Presas 3”.

Tabla 4-2 Resultados de las pruebas en la Antigua Carretera Morelia-Pátzcuaro

Código de Prueba	Área agrietada		Carga Hidráulica (cm)	Gasto de infiltración promedio (cm ³ /s)	Tasa de infiltración por área de pavimento (l/h/m ²)
	cm ²	%			
Presas 1	67.923	11.270	15.5	0.271	16.19
Presas 2	21.122	3.503	11.0	0.039	2.33
Presas 3	0.000	0.000	10.5	0.032	1.93
Presas 4	36.856	6.113	11.0	0.094	5.64

4.3 SITIO 3

La tercera zona de estudio fue la “Avenida Atécuaro”, la cual también es una vía de baja afluencia vehicular que comunica a la ciudad de Morelia con la tenencia de Atécuaro. El pavimento de este lugar se trata de una carpeta asfáltica de 4 cm notablemente envejecida, sobre la cual se tiene un tendido de riego de sello con una edad de aproximadamente 5 meses al momento de la ejecución de las pruebas. Sin embargo, este riego no abarcó en su totalidad el ancho de la sección, dejando en un costado del camino un espacio de aproximadamente 1 m, quedando expuestas algunas de las afectaciones estructurales de la carpeta envejecida

4 - RESULTADOS DE PRUEBAS DE CAMPO

tales como roderas y agrietamientos por fatiga. Estas condiciones dieron lugar a que se tuvieran diferentes escenarios de experimentación (Fig. 4-7 a), realizando pruebas en la zona no agrietada y sin riego (Fig. 4-7 b), en la zona agrietada sin riego (Fig. 4-7 c), y en la zona del riego de sello (Fig. 4-7 d).

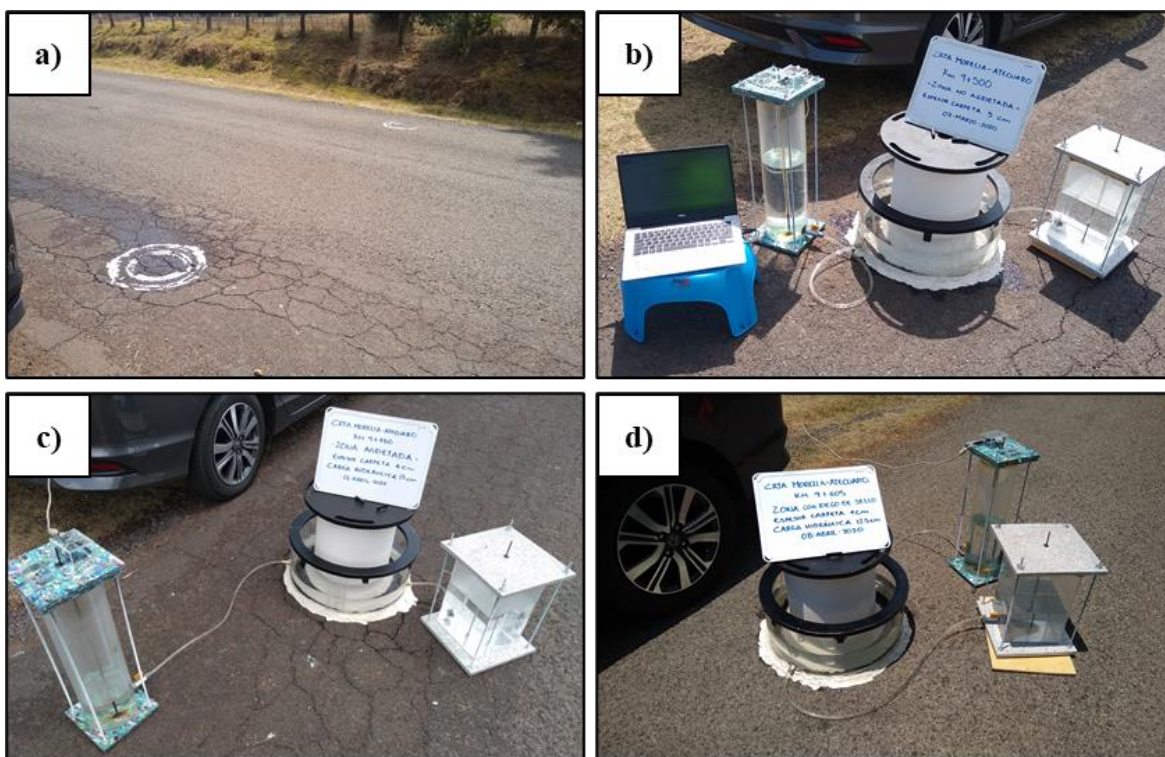


Fig. 4-7 Experimentaciones sobre la Avenida Atécuaro

La Tabla 4-3 contiene los valores obtenidos de las experimentaciones en esta región. La prueba denominada “Atécuaro 3” corresponde a la zona sin agrietar y sin estar recubierta con el riego de sello; las pruebas “Atécuaro 1”, “Atécuaro 2” y “Atécuaro 5” a las zonas agrietadas sin riego; y finalmente las pruebas “Atécuaro 6” y “Atécuaro 7” se tratan de la zona donde se realizó el tendido del riego. Como se observa, en estas últimas pruebas se presenta una infiltración muy baja, teniendo como valor promedio 0.815 l/m/m^2 , el cual es mucho menor comparado con el valor de 19.28 l/m/m^2 obtenido en su prueba similar, pero sin el riego (prueba “Atécuaro 3”). Esta disparidad demuestra la eficiencia y la impermeabilidad que brinda el tratamiento superficial realizado. En contraparte, los ensayos

4 - RESULTADOS DE PRUEBAS DE CAMPO

realizados sobre las superficies agrietadas son las que exhibieron una mayor tasa de infiltración, llegando a tener hasta un valor de 42.56 l/m/m².

Tabla 4-3 Resultados de las pruebas en la Avenida Atécuaro

Código de Prueba	Área agrietada		Carga Hidráulica (cm)	Gasto de infiltración promedio (cm ³ /s)	Tasa de infiltración por área de pavimento (l/h/m ²)
	cm ²	%			
Atécuaro 1	82.183	13.640	11.0	0.303	18.08
Atécuaro 2	36.440	6.047	11.0	0.713	42.56
Atécuaro 3	0.000	0.000	10.5	0.323	19.28
Atécuaro 5	48.046	7.973	15.0	0.235	14.04
Atécuaro 6 (sello)	0.000	0.000	11.5	0.000	0.00
Atécuaro 7 (sello)	0.000	0.000	12.5	0.027	1.63

4.4 SITIOS 4 Y 5

Los siguientes sitios de pruebas se encuentran en el entronque de la Carretera Federal de Cuota 14D (también conocida como Autopista Siglo XXI) y la Carretera Federal 120, en el municipio de Pátzcuaro, Michoacán. Durante el desarrollo de esta investigación, en dicho lugar se estaban llevando a cabo acciones de construcción y remodelación del entronque, así como un nuevo cuerpo adicional en la Autopista, ocasionando el cierre parcial de algunas de las vialidades del entronque. Esta situación permitió la realización de las pruebas en esta zona, no solo en los segmentos inhabilitados sino también en los tramos de las nuevas vialidades que se encontraban sin apertura al tráfico, como se observa en la Fig. 4-8. Las fotografías a) y b) muestran la ejecución de pruebas sobre los tramos inhabilitados de la autopista; mientras que las fotografías c) y d) corresponden a las pruebas en los nuevos pavimentos.



Fig. 4-8 Pruebas realizadas en las inmediaciones de la Carretera Federal 14D

Primeramente, se ejecutaron dos conjuntos de pruebas en dos diferentes segmentos que se encontraban cerrados parcialmente. En ambos lugares se encontraron carpetas asfálticas de 10 cm de espesor, con algunos deterioros. Siendo los agrietamientos en bloque los principales patrones de agrietamientos, con algunas ligeras manifestaciones de grietas por fatiga, como se observa en la Fig. 4-9. Debido al paso de los vehículos y maquinaria de construcción, en muchos casos se encontraron que las grietas tenían una gran cantidad de material de relleno como escombros y arenas finas. En otros casos se detectaron otros materiales como arcillas o materiales vegetales, los cuales al humedecerse para hacer el resultado de grietas formaban lodo.



Fig. 4-9 Agrietamientos observados en el Entronque de la Carretera Federal 14D

Los resultados obtenidos en el primer tramo inhabilitado se exponen en la Tabla 4-4. En este tramo se realizaron un total de 9 pruebas, siendo 2 pruebas ejecutadas en superficies no agrietadas y 7 pruebas restantes en diferentes agrietamientos; empero, de estas 7 pruebas se descartaron 2 (“Autopista 5” y “Autopista 6”); debido a que estos sitios de prueba se encontraban sobre un acceso a un puente vehicular y contaban con una gran pendiente tanto transversal como longitudinal (Fig. 4-10). Lo que dificultaba el correcto sellado de los anillos con el pavimento y favorecía el escurrimiento descontrolado de agua por las grietas, dando como resultado gastos de infiltración elevados por la gran demanda de agua a los frascos de Mariotte.



Fig. 4-10 Escenario del sitio de las pruebas “Autopista 5” y “Autopista 7”

4 - RESULTADOS DE PRUEBAS DE CAMPO

El resto de los ensayos se ejecutaron sin ningún obstáculo, obteniendo una infiltración promedio en las zonas sin grietas de 3.725 l/m/m². Mientras que en las pruebas de superficies agrietadas se encontraron valores de infiltración que van desde 8.16 hasta 52.09 l/m/m², con agrietamientos de entre 4 y 6% de superficie.

Tabla 4-4 Resultados de las pruebas en el primer Entronque a Pátzcuaro- Carretera Federal 14D

Código de Prueba	Área agrietada		Carga Hidráulica (cm)	Gasto de infiltración promedio (cm ³ /s)	Tasa de infiltración por área de pavimento (l/h/m ²)
	cm ²	%			
Autopista 1	0.000	0.000	10.0	0.110	6.57
Autopista 2	28.501	4.730	10.0	0.178	10.60
Autopista 3	33.729	5.595	13.0	0.336	20.06
Autopista 4	0.000	0.000	14.0	0.015	0.88
Autopista 5*	6.959	1.150	10.0	3.000	179.22
Autopista 6*	11.051	1.835	10.0	9.000	537.66
Autopista 7	29.071	4.825	12.0	0.872	52.09
Autopista 8	26.377	4.377	12.0	0.137	8.16
Autopista 9	25.354	4.205	9.0	0.468	27.96

**Pruebas descartadas debido a la pendiente excesiva del pavimento y el gran flujo de agua por la grieta*

El otro conjunto de ensayos en este mismo entronque se muestra en la Tabla 4-5. En esta zona se realizaron 7 pruebas, las cuales exceptuando la prueba “Entronque Autopista 5”, presentan similitud con algunos de los valores obtenidos en el sitio anterior, teniendo una infiltración promedio en las zonas sin agrietamientos de 0.995 l/m/m², un rango de 7.39 a 25.93 l/m/m² en áreas con grietas, y un porcentaje de agrietamiento de hasta 5.807%.

4 - RESULTADOS DE PRUEBAS DE CAMPO

Tabla 4-5 Resultados de las pruebas en el segundo Entronque a Pátzcuaro- Carretera Federal 14D

Código de Prueba	Área agrietada		Carga Hidráulica (cm)	Gasto de infiltración promedio (cm ³ /s)	Tasa de infiltración por área de pavimento (l/h/m ²)
	cm ²	%			
Entronque Autopista 1	0.000	0.000	10.0	0.014	0.84
Entronque Autopista 2	32.669	5.420	10.0	0.177	10.57
Entronque Autopista 3	23.101	3.835	10.0	0.303	18.07
Entronque Autopista 4	0.000	0.000	10.0	0.019	1.15
Entronque Autopista 5a*	13.297	2.210	10.0	3.174	189.63
Entronque Autopista 5b*				1.935	115.58
Entronque Autopista 6	35.000	5.807	10.0	0.434	25.93
Entronque Autopista 7	34.094	5.660	12.0	0.124	7.39

*2 pruebas en el mismo sitio; gasto de infiltración promedio: 1.957 cm³/s (116.91 l/h/m²)

La prueba “Entronque Autopista 5” presentó cierta particularidad, ya que en su primera etapa tuvo una gran demanda de agua al frasco de Mariotte, llegando a requerir un gasto de 3.174 cm³/s, lo que provocó que rápidamente se vaciara el frasco. Por esta razón, inmediatamente después de terminada la primera prueba, se ejecutó una segunda prueba en el mismo sitio sin mover de lugar el equipo, solo volviendo a llenar los frascos de Mariotte y reiniciando las lecturas del sensor. En esta segunda prueba se tuvo un menor gasto de infiltración obteniéndose en promedio un valor de 1.935 cm³/s. Finalmente se unieron los datos de las lecturas de las dos pruebas en una sola gráfica, para lograr un análisis completo (Fig. 4-11) obteniendo así una infiltración promedio de 116.91 l/m².

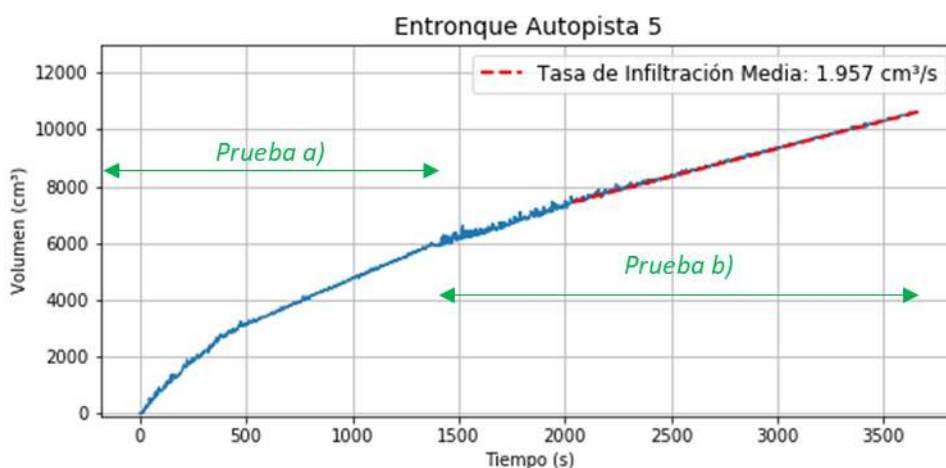


Fig. 4-11 Gráfica de los resultados de la prueba “Entronque Autopista 5”

Este valor es considerablemente mayor a los obtenidos hasta el momento en la experimentación; observando a detalle el contexto del sitio de prueba es que este valor parece ser razonable. En la Fig. 4-12 se presentan un par de fotografías de la disposición del equipo y la zona de la prueba al término de esta. En estas imágenes se observa como las grietas cercanas a la superficie donde se ejecutó la prueba comenzaron a presentar cierta humedad, lo que indica una interconexión que existe entre las grietas al interior del pavimento, de tal forma que en este escenario el flujo de agua al cual se somete una grieta puede emerger en otra grieta aledaña.



Fig. 4-12 Flujo en grietas aledañas durante prueba “Entronque Autopista 5”

4.5 SITIOS 6 Y 7

Continuando con la experimentación en esta región y aprovechando la remodelación de la Carretera Federal 14D. Se llevaron a cabo una serie de pruebas sobre los pavimentos nuevos, siendo estos el pavimento del nuevo cuerpo carretero de la autopista, y la nueva vialidad que da salida de esta carretera hacia la ciudad de Pátzcuaro, en el sentido Morelia-Uruapan. En el primero se realizaron 4 ensayos en zonas de distintos cadenamientos distribuidos a lo largo del tramo comprendido entre el entronque a Pátzcuaro y la caseta de cobro “Zirahuén”, mientras que en el pavimento de la salida de la Autopista se realizaron

4 - RESULTADOS DE PRUEBAS DE CAMPO

pruebas en dos sitios. Ambas vialidades están compuestas por la misma sección estructural, contando con tres capas en el pavimento: carpeta asfáltica de granulometría abierta, base tratada con asfalto y una base hidráulica tratada con cemento; y con tres capas relativas a las terracerías: subrasante, subyacente y terraplén. En la Fig. 4-13 se exhibe una fotografía de las capas del pavimento (carpeta y bases).

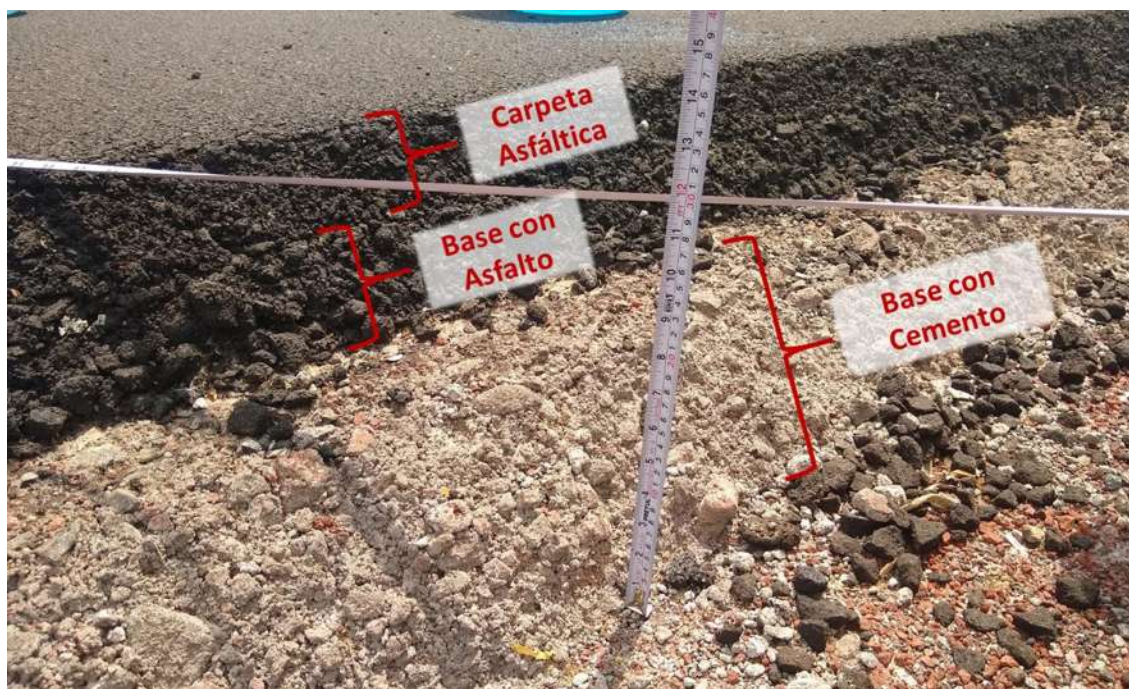


Fig. 4-13 Capas del pavimento en el nuevo cuerpo y salida de la Carretera Federal 14D

Dado que estas vialidades son nuevas y aún no han sido abiertas a la circulación del tránsito, el pavimento en cuestión no presenta ninguna clase de deterioro, por lo que todas las pruebas realizadas en estas zonas tienen condiciones similares con una nula presencia de agrietamientos. En la Fig. 4-14 se observa una fotografía típica tomada desde el anillo interior que muestra las condiciones en las que se encontraba la superficie del pavimento al momento de realizar la prueba.

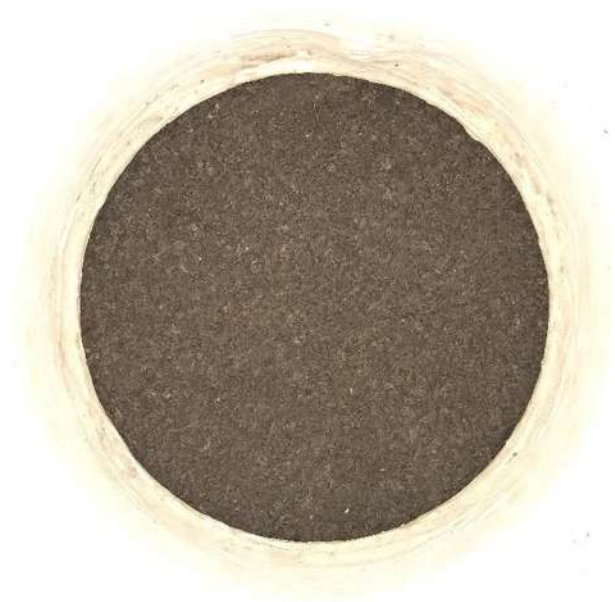


Fig. 4-14 Superficie del pavimento en el nuevo cuerpo y salida de la Carretera Federal 14D

Durante el desarrollo de las pruebas sobre estas vialidades, al tratarse de pavimentos compuestos con una mezcla asfáltica abierta, en muchos casos se presentó una cierta peculiaridad respecto al flujo de agua de infiltración. Al momento de realizar el vaciado manual de agua en los anillos, esta masa de agua comenzaba a brotar en la superficie periférica de donde se tenía instalado el equipo, como se observa en la Fig. 4-15. Este flujo contribuía a la rápida infiltración de este primer vaciado de agua, llegando a tal grado que esta cantidad de agua penetrara en su totalidad al pavimento.



Fig. 4-15 Brote del agua a la superficie en los pavimentos de la autopista

Dicho escenario permaneció una vez que se habilitaba el suministro de agua por parte de los frascos de Mariotte, llegando incluso a producirse una infiltración en el pavimento a un gasto mayor al que los frascos son capaces de suministrar agua a los anillos ($\approx 12.63 \text{ cm}^3/\text{s}$), generando que en las etapas iniciales del ensayo difícilmente se mantuviera constante el tirante en los anillos. Por consiguiente, en la mayoría de las pruebas realizadas se tomó un enfoque similar al de la prueba “Entronque Autopista 5”, realizando varias pruebas en el mismo espacio de pavimento, sin afectar la disposición de los anillos y reabasteciendo de agua a los frascos alimentadores, uniendo las lecturas de cada prueba individual en una sola gráfica para así obtener un valor medio de la tasa de infiltración (Fig. 4-16).

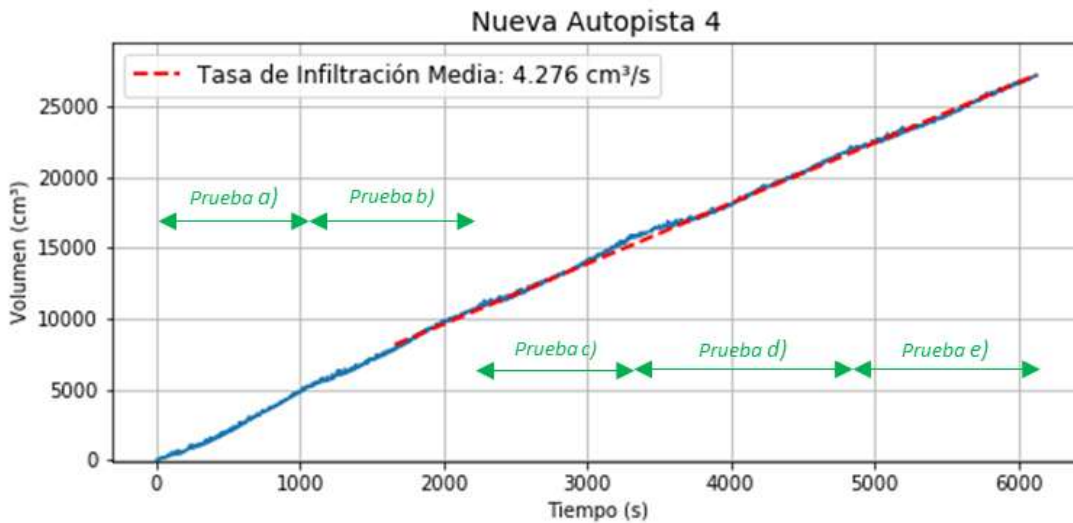


Fig. 4-16 Gráfica de los resultados de la prueba “Nueva Autopista 4”

Estas grandes demandas de agua observadas durante la ejecución de los ensayos se ven reflejadas con los datos obtenidos por el equipo, como se observan en las Tabla 4-6 y Tabla 4-7, las cuales contienen los resultados de las pruebas realizadas sobre el nuevo cuerpo carretero y la salida a Pátzcuaro respectivamente. Tales resultados son en su mayoría notablemente mayores que los obtenidos en las experimentaciones anteriores, llegando a registrarse tasas de infiltración de hasta 305.03 l/h/m^2 . No obstante, estos valores parecen tener coherencia una vez que se pone a consideración el tipo de pavimento sobre el cual se

4 - RESULTADOS DE PRUEBAS DE CAMPO

realizaron estos ensayos, dado que la carpeta utilizada en estos pavimentos está hecha con una mezcla abierta, las cuales son conocidas por sus características drenantes, siendo esto lo que da origen a las elevadas tasas de infiltración superficial obtenidas.

Tabla 4-6 Resultados de las pruebas en el nuevo cuerpo de la Carretera Federal 14D

Código de Prueba	Área agrietada		Carga Hidráulica (cm)	Gasto de infiltración promedio (cm ³ /s)	Tasa de infiltración por área de pavimento (l/h/m ²)
	cm ²	%			
Nueva Autopista 1	0.000	0.000	8.0	5.106	305.03
Nueva Autopista 2	0.000	0.000	9.0	0.278	16.62
Nueva Autopista 3a*	0.000	0.000	10.0	7.406	442.43
Nueva Autopista 3b*				2.467	147.36
Nueva Autopista 3c*				1.826	109.09
Nueva Autopista 4a**	0.000	0.000	9.0	5.593	334.13
Nueva Autopista 4b**				4.960	296.33
Nueva Autopista 4c**				5.231	312.50
Nueva Autopista 4d**				4.589	274.15
Nueva Autopista 4e**				4.367	260.88

*3 pruebas en el mismo sitio; gasto de infiltración promedio: 1.924 cm³/s (114.94 l/h/m²)

**5 pruebas en el mismo sitio; gasto de infiltración promedio: 4.276 cm³/s (255.45 l/h/m²)

Tabla 4-7 Resultados de las pruebas en la Salida a Pátzcuaro de la Carretera Federal 14D

Código de Prueba	Área agrietada		Carga Hidráulica (cm)	Gasto de infiltración promedio (cm ³ /s)	Tasa de infiltración por área de pavimento (l/h/m ²)
	cm ²	%			
Salida Autopista 1a*	0.000	0.000	9.5	8.375	500.32
Salida Autopista 1b*				4.063	242.69
Salida Autopista 1c*				3.292	196.65
Salida Autopista 1d*				3.225	192.66
Salida Autopista 1e*				3.749	223.95
Salida Autopista 1f*				4.241	253.37
Salida Autopista 2a**	0.000	0.000	10.0	6.223	371.76
Salida Autopista 2b**				5.265	314.53
Salida Autopista 2c**				5.033	300.67
Salida Autopista 2d**				4.738	283.03
Salida Autopista 2e**				4.375	261.36

*6 pruebas en el mismo sitio; gasto de infiltración promedio: 3.632 cm³/s (216.98 l/h/m²)

**5 pruebas en el mismo sitio; gasto de infiltración promedio: 4.718 cm³/s (281.85 l/h/m²)

4.6 SITIO 8

Finalmente, el último sitio de pruebas es una vialidad situada en el cadenamiento 50+000 de la misma Carretera Federal 14D. Este pequeño tramo de aproximadamente 100 m de longitud sirvió como acceso al nuevo cuerpo de la ampliación de la autopista, mientras se desarrollaban los trabajos de construcción en la zona, estando en servicio durante varios meses en el sentido de circulación Uruapan-Morelia (Fig. 4-17 a). Consecuentemente, este tramo se vio sometido a las cargas vehiculares de los usuarios de la autopista, siendo estas compuestas en un alto porcentaje por vehículos pesados o de carga. Esto produjo algunos deterioros en el camino como ciertas roderas y agrietamientos por fatiga, como se observa en la Fig. 4-17 b. A diferencia de los agrietamientos por fatiga observados en las vialidades anteriores, estos agrietamientos visiblemente tenían una apertura menor y una profundidad mayor, además de escasa presencia de material de relleno.

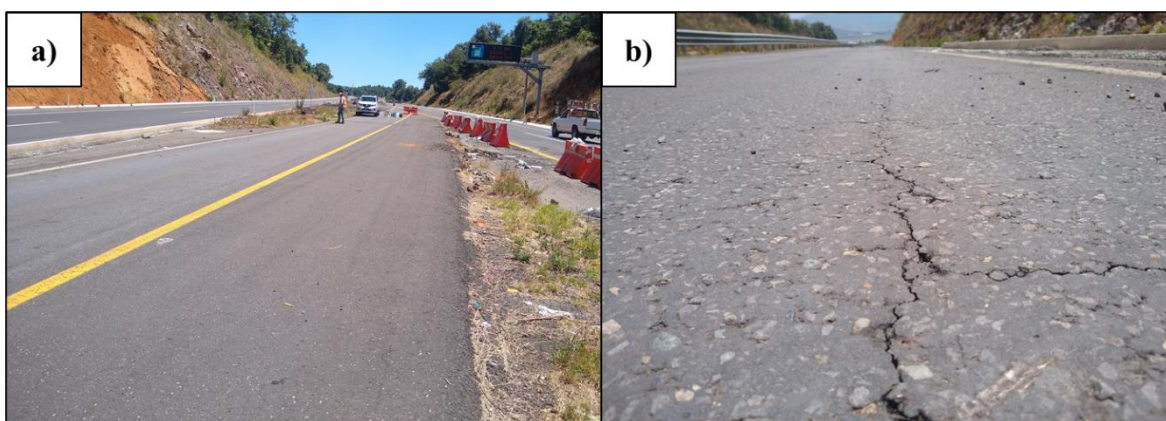


Fig. 4-17 a) Tramo de pruebas del Acceso a la Autopista; b) Agrietamiento por fatiga en el tramo

Los valores de infiltración obtenidos en esta vialidad se muestran en la Tabla 4-8. Excluyendo los resultados de la prueba “Acceso Autopista 5”, los demás valores presentan cierta similitud con los obtenidos en algunas de las otras vialidades, como en la Avenida Atécuaro y en la zona de entronques de la Autopista, con tasas de infiltración muy bajas en las superficies no agrietadas y cercanos a 20 l/h/m^2 en las zonas con un porcentaje de agrietamiento. En lo que respecta a la prueba anteriormente mencionada, se tuvo una considerable demanda de agua, por lo que se realizaron dos pruebas en el mismo punto de la vía. Esta demanda de agua fue ocasionada gracias a las condiciones de apertura y profundidad

4 - RESULTADOS DE PRUEBAS DE CAMPO

de la grieta, las cuales impedían tener un correcto sellado de los anillos con el pavimento, permitiendo que se produjera flujo de agua no solo vertical, sino también lateral a través de estas grietas, generando fugas y escurrimientos de agua hacia el exterior del equipo (ver Fig. 4-18).

Tabla 4-8 Resultados de las pruebas en el Acceso de la Carretera Federal 14D

Código de Prueba	Área agrietada		Carga Hidráulica (cm)	Gasto de infiltración promedio (cm ³ /s)	Tasa de infiltración por área de pavimento (l/h/m ²)
	cm ²	%			
Acceso Autopista 1	0.000	0.000	12.0	0.021	1.24
Acceso Autopista 2	7.209	1.200	10.0	0.391	23.37
Acceso Autopista 3	0.000	0.000	9.0	0.025	1.49
Acceso Autopista 4	12.626	2.093	12.0	0.316	18.90
Acceso Autopista 5a*	8.013	1.330	12.0	1.545	92.30
Acceso Autopista 5b*				1.208	72.17

**2 pruebas en el mismo sitio; gasto de infiltración promedio: 1.241cm³/s (74.14 l/h/m²)*



Fig. 4-18 Prueba "Acceso Autopista 5"

4.7 ANÁLISIS GENERAL DE RESULTADOS

En general, entre los 8 sitios de prueba se realizaron 37 ensayos de campo, cuyos resultados se muestran en la Tabla 4-9.

Tabla 4-9 Resultados de las pruebas de campo

Código de Prueba	Área agrietada		Carga Hidráulica (cm)	Gasto de infiltración promedio (cm ³ /s)	Tasa de infiltración por área de pavimento (l/h/m ²)
	cm ²	%			
Estacionamiento 1	25.235	4.190	12.0	0.339	20.25
Estacionamiento 2	0.000	0.000	12.0	0.300	17.92
Presa 1	67.923	11.270	15.5	0.271	16.19
Presa 2	21.122	3.503	11.0	0.039	2.33
Presa 3	0.000	0.000	10.5	0.032	1.93
Presa 4	36.856	6.113	11.0	0.094	5.64
Atécuaro 1	82.183	13.640	11.0	0.303	18.08
Atécuaro 2	36.440	6.047	11.0	0.713	42.56
Atécuaro 3	0.000	0.000	10.5	0.323	19.28
Atécuaro 5	48.046	7.973	15.0	0.235	14.04
Atécuaro 6 (sello)	0.000	0.000	11.5	0.000	0.00
Atécuaro 7 (sello)	0.000	0.000	12.5	0.027	1.63
Autopista 1	0.000	0.000	10.0	0.110	6.57
Autopista 2	28.501	4.730	10.0	0.178	10.60
Autopista 3	33.729	5.595	13.0	0.336	20.06
Autopista 4	0.000	0.000	14.0	0.015	0.88
Autopista 7	29.071	4.825	12.0	0.872	52.09
Autopista 8	26.377	4.377	12.0	0.137	8.16
Autopista 9	25.354	4.205	9.0	0.468	27.96
Entronque Autopista 1	0.000	0.000	10.0	0.014	0.84
Entronque Autopista 2	32.669	5.420	10.0	0.177	10.57
Entronque Autopista 3	23.101	3.835	10.0	0.303	18.07
Entronque Autopista 4	0.000	0.000	10.0	0.019	1.15
Entronque Autopista 5	13.297	2.210	10.0	1.957	116.91
Entronque Autopista 6	35.000	5.807	10.0	0.434	25.93
Entronque Autopista 7	34.094	5.660	12.0	0.124	7.39
Nueva Autopista 1	0.000	0.000	8.0	5.106	305.03
Nueva Autopista 2	0.000	0.000	9.0	0.278	16.62
Nueva Autopista 3	0.000	0.000	10.0	1.924	114.94
Nueva Autopista 4	0.000	0.000	9.0	4.276	255.45
Salida Autopista 1	0.000	0.000	9.5	3.632	216.98
Salida Autopista 2	0.000	0.000	10.0	4.718	281.85

Desglosando las 37 pruebas de campo, se tienen 20 ensayos sobre superficies agrietadas y 17 sobre superficies sin grietas, de las cuales 6 corresponden a un pavimento con una capa superficial de granulometría abierta. Asimismo, se tienen un par de pruebas sobre una carpeta hecha por el sistema de riegos, tanto en superficie con grietas como sin ellas.

Analizando los resultados de las pruebas sobre agrietamientos, se observa una gran diversidad en la magnitud de la infiltración superficial, llegando a tener un rango de hasta aproximadamente 120 l/h/m²; no obstante, la mayoría de los valores se encuentran entre un rango de 10 a 40 l/h/m², teniendo un valor promedio de 26.66 l/h/m². En la Fig. 4-19, se muestran gráficamente estos resultados, siendo evidente que no se tiene una clara correlación proporcional entre el porcentaje de área de grieta y la tasa de infiltración. Esto se debe principalmente a que, como se encontró a lo largo de la experimentación de campo, la geometría del agrietamiento no es el único factor que influye en la tasa de infiltración, sino también otros factores adicionales como son la presencia de relleno y profundidad de la grieta, así como las condiciones internas de la estructura del pavimento.

Enfocándose en los diferentes tipos de pavimentos estudiados, se puede observar un cierto patrón en los resultados. Los pavimentos que corresponden a vialidades de mayores especificaciones (pruebas en “Autopista”, “Entronque Autopista” y “Acceso Autopista”) así como también la prueba realizada sobre la carpeta hecha con riegos asfálticos (prueba “Estacionamiento”), presentaron mayores tasas de infiltración con porcentajes de agrietamiento menores, en comparación con los ensayos sobre los pavimentos de vialidades con poco tránsito (pruebas de la “Presa” y “Atécuaro”).

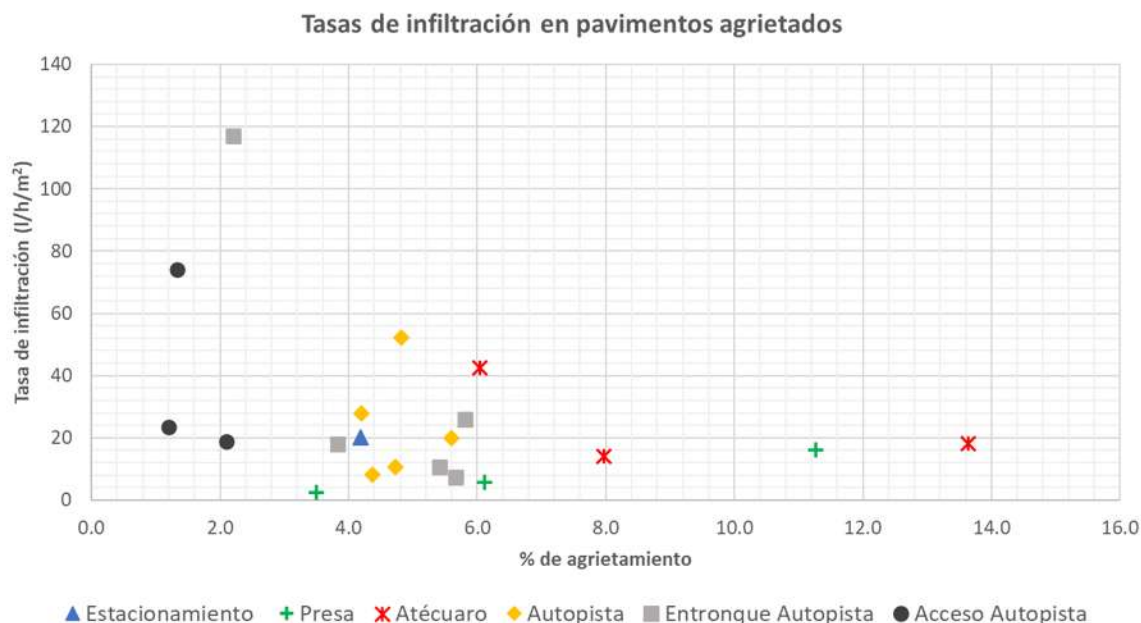


Fig. 4-19 Tasas de infiltración en pavimentos agrietados

En cuanto a los ensayos sin agrietamientos se refiere, debido al contexto de la experimentación, estos se subdividen de acuerdo al tipo de pavimento teniendo así dos grupos principales, pavimentos envejecidos y pavimentos nuevos con una mezcla de granulometría abierta. En la Fig. 4-20 se muestran los resultados de las pruebas sobre los pavimentos envejecidos. En estos ensayos, se obtuvo una infiltración menor en comparación con las superficies con grietas, además de un menor rango de valores, estando comprendidos entre 0 y 19.28 l/h/m². De las pruebas sobre estas condiciones se registró una tasa promedio de 4.81 l/h/m².

Contrario a lo observado en las pruebas sobre superficies agrietadas, los pavimentos de carreteras de mayores especificaciones presentaron menores tasas de infiltración que los pavimentos de vialidades de baja importancia. Cabe resaltar que la implementación de un tratamiento superficial, como lo es el riego de sello, disminuyó notablemente la tasa de infiltración en un pavimento sin grietas (Atécuaró).

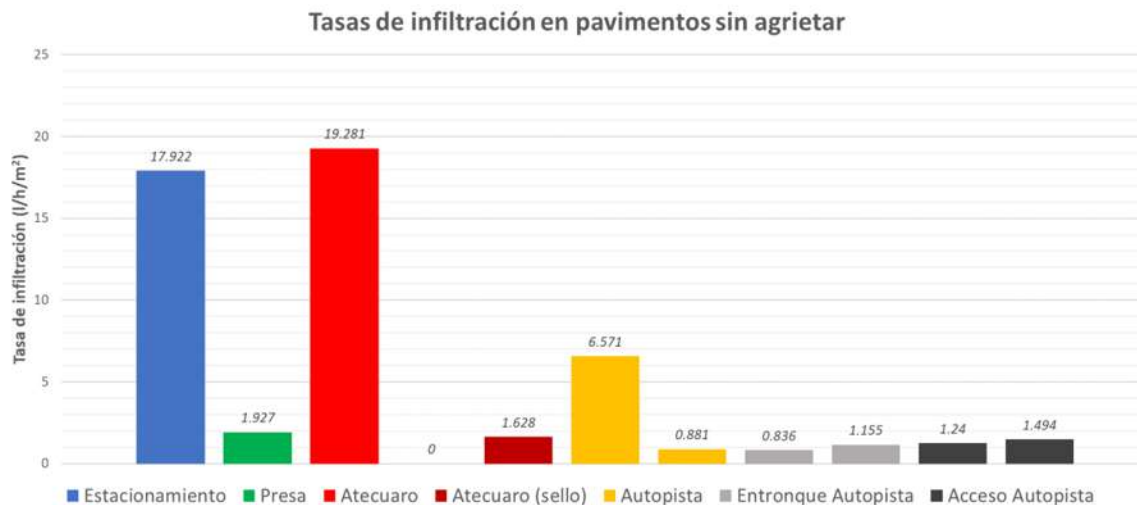


Fig. 4-20 Tasas de infiltración en pavimentos envejecidos sin agrietar

En contraste, gracias a su elevada drenabilidad, los valores de infiltración superficial en las mezclas abiertas son notablemente mayores a todos los observados anteriormente, llegando a registrar hasta un valor de infiltración igual a 305.03 l/h/m². Aunque también se presentó una tasa de infiltración de 16.62 l/h/m², la cual se podría considerar como un valor atípico, ya que en las experimentaciones posteriores no se volvió a presentar un resultado similar. Tomando en cuenta todas estas tasas de infiltración, se obtiene como valor medio una infiltración de 198.48 l/h/m².

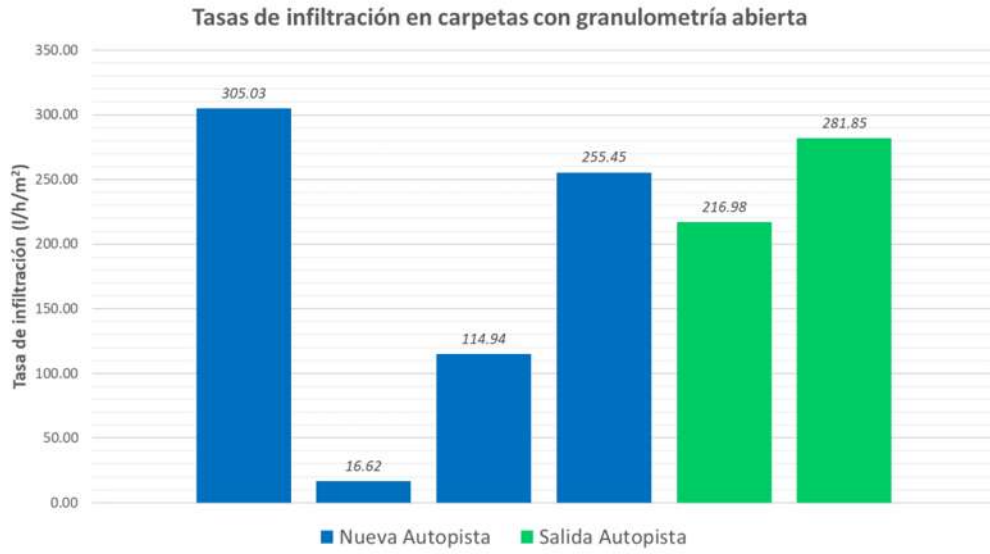


Fig. 4-21 Tasas de infiltración en carpetas con granulometría abierta

5 CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

En este trabajo, se propuso tanto el diseño como la aplicación de un infiltrómetro de campo, además de utilizar un programa computacional para la obtención del área superficial del agrietamiento en donde se realice la prueba. A continuación, se presentan los principales hallazgos y conclusiones que se observaron a lo largo de la investigación.

5.1 CONCLUSIONES DEL DISEÑO DEL EQUIPO

El infiltrómetro diseñado demostró tener una gran aptitud en los pavimentos flexibles, siendo relativamente fácil su puesta en ejecución. Además, no presentó ningún inconveniente o imprevisto a lo largo de toda la experimentación realizada en campo, denotando así su buen diseño. Únicamente, es necesario mencionar la necesidad de llevar a cabo un mantenimiento periódico tanto en el sellado de los anillos como en la hermeticidad de los frascos de Mariotte, a fin de preservar su correcto funcionamiento.

Respecto a su configuración, el uso de los anillos dobles permitió tener un flujo vertical de infiltración, evitando disminuir las variaciones debidas a posibles escurrimientos laterales en el equipo. Asimismo, gracias a la variante de ensayo “Constant head”, fue posible preservar condiciones estables y sin variación de presión hidrostática en los ensayos.

Otro aspecto importante del diseño de este equipo fue la instrumentación del frasco de Mariotte, con lo cual, se tiene la ventaja de tener lecturas de forma continua y en tiempo real, brindando resultados satisfactorios y disminuyendo así la incidencia de errores en las lecturas por parte de algún operador. La precisión del sensor utilizado demostró ser bastante buena a pesar de la turbulencia generada en el interior del frasco. Igualmente, la adecuación del promedio de lecturas cada 3 segundos redujo notablemente la variabilidad en las lecturas del sensor.

5.2 CONCLUSIONES DEL PROGRAMA PARA AGRIETAMIENTOS

El desarrollo de un programa para la obtención de la extensión superficial de las grietas en las pruebas, fue una parte importante en esta investigación. Tal programa fue

logrado a través del lenguaje de programación “Python™”, y de la librería “OpenCV” para el procesamiento de imágenes. Este programa demostró tener una gran confiabilidad en sus resultados, alcanzando una precisión de $100\pm 2.77\%$. Cabe señalar que dicha precisión no se ve afectada por las condiciones de iluminación con la que se capture la fotografía, ya que el programa presentó un coeficiente de variación muy pequeño en los resultados de fotografías de grietas con diferente luminosidad (0.964%).

Sin embargo, puesto que no es un programa que cuente con algoritmos automatizados, su manejo queda totalmente en manos del usuario, por lo que se debe tener cierta pericia en su utilización. Además, el programa está calibrado exclusivamente para la geometría del anillo interior del infiltrómetro desarrollado, y también para una resolución específica en las fotografías de 3072 x 4096 píxeles. Si se llegaran a modificar alguno de estos factores, será necesario un reajuste en el código del algoritmo.

5.3 CONCLUSIONES DEL PROCEDIMIENTO DE LA PRUEBA DE INFILTRACIÓN

El procedimiento implementado en la ejecución de las pruebas de campo, tomó como base algunos de los principios de las normativas mencionadas en el capítulo 2, en conjunción con algunas otras recomendaciones derivadas de la etapa experimental en el desarrollo de esta investigación. Este escenario, derivó en el desarrollo de una metodología relativamente sencilla para la ejecución de pruebas de infiltración sobre pavimentos. Empero, se encontraron ciertos aspectos a los cuales se debe prestar atención para lograr una buena ejecución de la prueba de infiltración en pavimentos.

Primeramente, debe trabajarse sobre una zona limpia y evitar las superficies húmedas, ya que estos factores afectan la adherencia del material de sellado entre el equipo y la superficie del pavimento. En cuanto a este material, y a diferencia de otros sellantes utilizados, la plastilina tuvo un desempeño aceptable además de contar con una fácil aplicación y una efectiva reutilización. Como particularidad, a lo largo de la ejecución de los ensayos, se observó que la plastilina tiene un mejor rendimiento cuando se calienta ligeramente antes de su aplicación. Con esto, se adquiere una mayor flexibilidad en la plastilina y se promueve la adherencia entre los anillos y la superficie del pavimento. No obstante, cuando se realizaba la prueba sobre agrietamientos muy profundos y estrechos, no

siempre se lograba sellar en su totalidad el escurrimiento del agua por la grieta con la plastilina, siendo este el único problema encontrado en la utilización de este material.

En lo concerniente a la captura de fotografías con el dispositivo móvil, a fin de lograr resultados certeros, debe asegurarse el correcto acomodo del dispositivo sobre la base del anillo, puesto que, si este no se encuentra alineado, se producirán ligeras variaciones en los resultados del programa. Adicionalmente, es necesario prestar atención al humedecimiento de las grietas, dado que cualquier otra superficie que no forme parte de la grieta y sea humedecida, tomará el mismo color que la grieta, pudiendo llegar a ser detectada por el programa como un agrietamiento más, ocasionando un error en la medición del área de la grieta.

Respecto a los frascos de Mariotte, es necesario cuidar su disposición en relación a la zona del pavimento donde se lleva a cabo la prueba, ya que la pendiente tanto transversal como longitudinal del pavimento, pueden ocasionar un ligero desnivel entre los frascos. Dicho desnivel puede ocasionar que no se tengan condiciones hidrostáticas iguales en los anillos interior y exterior, generando el incumplimiento del objetivo principal de la utilización de los anillos dobles.

Considerando estas particularidades, es posible la correcta ejecución del ensayo de infiltración. Sin embargo, durante el desarrollo de las pruebas de campo sobre pavimentos con elevadas tasas de infiltración (como son las mezclas tipo “open graded”), los frascos de Mariotte pueden presentar un rápido vaciado, sin llegar a las condiciones estables de flujo de infiltración. Para evitar esta situación, es necesario repetir la ejecución de la prueba en el mismo sitio, sin mover o modificar el acomodo del equipo; solamente reabasteciendo los frascos de Mariotte y reiniciando el programa del sensor. Esta repetición de la prueba se puede hacer tantas veces sea necesario, culminando hasta que no se perciba una variación importante en el volumen de infiltración. Finalmente, se deben unir las gráficas individuales emitidas por el algoritmo del sensor para así obtener un panorama global de tal prueba. Con esta metodología, se puede lograr un valor de infiltración superficial en prácticamente cualquier tipo de pavimento flexible.

5.4 CONCLUSIONES DE LOS RESULTADOS DE LAS EXPERIMENTACIONES

Como se mencionó anteriormente, las pruebas de campo se realizaron en diferentes tipos de pavimentos, como pavimentos de vialidades de bajo tránsito, carreteras de altas especificaciones, carpetas por el sistema de riegos, mezclas de granulometría abierta, y tratamientos superficiales, obteniendo resultados de diferente índole. Enfocándose en las pruebas realizadas sobre los pavimentos con riegos asfálticos, no se encontró una gran diferencia en los resultados de las superficies con o sin agrietamientos. Esto se puede explicar gracias a las pocas propiedades estructurales de este tipo de carpetas, las cuales permiten el acceso de agua hacia la estructura del pavimento. En contraste, el mejoramiento mediante un tratamiento superficial de un pavimento, puede abatir considerablemente el valor de la infiltración en cualquier tipo de pavimento.

En cuanto a los pavimentos de mayores especificaciones, se observó cierta particularidad, ya que las zonas agrietadas presentaron una mayor tasa de infiltración y un área de agrietamiento menor que los pavimentos de vialidades de bajo tránsito. Por el contrario, estos últimos tuvieron una mayor infiltración en las superficies sin grietas que los pavimentos de vialidades más relevantes. Sin embargo, como se demostró a lo largo de esta investigación, existen otros factores que inciden en la magnitud de la infiltración superficial de los pavimentos, como el material de relleno y la profundidad de los agrietamientos. Otro factor que se presentó durante la ejecución de ensayos, y que puede llegar a tener injerencia en la tasa de infiltración, es la interconexión de grietas en el pavimento. Un efecto similar a esta interconexión de grietas es el flujo de agua en la interfaz de la carpeta asfáltica con la capa de base del pavimento, lo cual también desencadenaría una mayor tasa de infiltración superficial.

De manera general, la tasa de infiltración promedio cuantificada en esta investigación sobre las superficies agrietadas de pavimentos, es igual a 26.66 l/h/m^2 . En contraparte, la tasa de infiltración promedio de las superficies sin agrietamientos equivale a aproximadamente a una sexta parte de este valor, teniendo una magnitud media de 4.81 l/h/m^2 . Sin embargo, todos estos valores son muy inferiores a los resultados observados en los pavimentos con mezclas asfálticas de granulometría abierta, en las cuales, se obtuvo una tasa de infiltración promedio de 198.48 l/h/m^2 . Cabe señalar que, durante el desarrollo de las pruebas sobre este

tipo de pavimentos, se suscitó un brote superficial de agua, lo cual pudo contribuir a tales valores elevados.

Igualmente, los resultados de las tasas de infiltración registrados durante esta investigación, son considerablemente mayores que los obtenidos en las mediciones hechas por Ridgeway H. H. (1976) y Taylor, J. V. (2004), cuyos valores promedio obtenidos son de 2 y 3.33 l/h/m² respectivamente. Incluso, el valor promedio de infiltración en las superficies de pavimento que se encuentran sin agrietamientos, es ligeramente mayor a estos datos. No obstante, existen algunos pocos valores obtenidos durante la experimentación, que si se asemejan a las tasas de infiltración previamente mencionadas.

5.5 TRABAJO FUTURO

Existen varias actividades que pudieran enriquecer los análisis realizados en esta investigación. Algunos de estos trabajos se exponen a continuación.

Se propone la ejecución de pruebas adicionales de infiltración sobre una mayor diversidad de pavimentos, abarcando diferentes superficies de rodadura y sobre vialidades diferentes con un espectro mayor de cargas vehiculares. Además, es sugerible volver a realizar los ensayos sobre algunos de los pavimentos estudiados, con el objetivo de conocer si las tasas de infiltración observadas se ven afectadas con el paso del tiempo.

Por otra parte, es necesario profundizar en el tema del material de relleno presente en los agrietamientos, ya que, durante la ejecución y obtención de resultados en las pruebas de campo, se detectó que dicho material tiene una gran influencia en la magnitud de la infiltración superficial. Por lo tanto, se sugiere tomar a consideración este factor en el desarrollo de pruebas futuras.

Como se expuso en el apartado de los antecedentes de este trabajo, muchos autores aplicaron un enfoque teórico y numérico al problema de la infiltración en pavimentos. Este enfoque se contrapone al de esta investigación, ya que la infiltración superficial en pavimentos se abordó desde un punto de vista práctico, con la realización de ensayos de campo. No obstante, en el futuro sería propicio realizar una comparación entre los resultados

5 - CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

obtenidos durante las pruebas hechas en esta investigación y los autores mencionados anteriormente, a fin de tener una mejor caracterización de la infiltración en los pavimentos flexibles.

6 BIBLIOGRAFÍA

- Adaska, W. S., & Luhr, D. R. (2004). “Control of reflective cracking in cement stabilized pavements”. In Proceedings of 5th International RILEM Conference on Cracking in Pavements (pp. 309-316)
- ASTM (2017) “Standard Test Method for Infiltration Rate of In Place Pervious Concrete”. ASTM C-1701, West Conshohocken, Pa.
- ASTM (2018) “Standard Test Method for Infiltration Rate of Soils in Field Using Double-Ring Infiltrometer”. ASTM D-3385, West Conshohocken, Pa.
- Awadalla, M. (2015). “Field and Laboratory Investigation of Asphalt Pavement Permeability” (Doctoral dissertation, Carleton University).
- Cedergren, H. R., O'Brien, K. H., Arman, J. A., & Cedergren, K. O. B. (1972). “Guidelines for the design of subsurface drainage systems for highway structural sections” (No. FHWA-RD-72-30; NTIS-PB220116). United States. Federal Highway Administration. Office of Research.
- Chen, J. S., Lin, K. Y., & Young, S. Y. (2004). “Effects of crack width and permeability on moisture-induced damage of pavements”, Journal of Materials in Civil Engineering.
- Christopher, B. R., Schwartz, C. W., Boudreaux, R., & Berg, R. R. (2006). “Geotechnical aspects of pavements” (No. FHWA-NHI-05-037). United States. Federal Highway Administration.
- Cooley, L. A. (1999). “Permeability of superpave mixtures: evaluation of field permeameters” (No. Report No: NCAT 99-1). National Center for Asphalt Technology.
- Cyr, R. Y., & Chiasson, P. (1999). “Modeling subsoil drainage systems for urban roadways”. Canadian Journal of Civil Engineering, 26(6), 799-809.
- Dan, H. C., Tan, J. W., Zhang, Z., & He, L. H. (2017). “Modelling and estimation of water infiltration into cracked asphalt pavement. Road Materials and Pavement Design” 18(3), 590-611
- Das, B. M. (2001). “Fundamentos de ingeniería geotécnica”. Thomson Learning.

- Dawson, A. (Ed.). (2008). “Water in road structures: movement, drainage & effects” (Vol. 5). Springer Science & Business Media.
- Dirección de Vialidad – Ministerio de Obras Públicas. 2003. Manual de Carreteras, Volumen 7 (Mantenimiento Vial), Chile.
- Ekblad, J., & Isacsson, U. (2006). “Influence of water on resilient properties of coarse granular materials”. Road materials and pavement design, 7(3), 369-404
- Espinoza-Meléndrez, J. A., Tamari, S., & Aguilar-Chávez, A. (2005). “Simulación de la infiltración del agua a partir de un daño en la carpeta de pavimento”. Ingeniería hidráulica en México, 20(4), 77-95.
- Fraunhofer Institute for Physical (2012) “Pavement Profile Scanner”, PPS, Alemania.
- Freeme, C. R., & Servas, V. (1985). “Advances in pavement design and rehabilitation”. Accelerated Testing of Pavements, CSIR, Pretoria.
- Han, Z., & Vanapalli, S. K. (2016). “State-of-the-Art: Prediction of Resilient Modulus of Unsaturated Subgrade Soils”. International Journal of Geomechanics, 16(4), 04015104.
- Hamzah, M. O., Kakar, M. R., & Hainin, M. R. (2015). “An overview of moisture damage in asphalt mixtures”. Jurnal Teknologi (Sciences & Engineering), 73(4), 125-131.
- Huang, Y. H. (1993). “Pavement analysis and design”.
- Islam, M. R., & Tarefder, R. A. (2017). “Contribution of Day-Night temperature fluctuation to Top-Down cracking in asphalt pavement”. Journal of Cold Regions Engineering, 32(1), 06017006.
- Kireš, M. (2006). “Mariotte bottle with side openings”. The Physics Teacher, 44(6), 388-389.
- Kringos, N., Scarpas, T., Kasbergen, C., & Selvadurai, P. (2008). “Modelling of combined physical–mechanical moisture-induced damage in asphaltic mixes, Part 1: governing processes and formulations”. International Journal of Pavement Engineering, 9(2), 115-128.
- Lay, M. G. (2009). “Handbook of road technology”. CRC Press.
- Li, H., Kayhanian, M., & Harvey, J. T. (2013). “Comparative field permeability measurement of permeable pavements using ASTM C1701 and NCAT permeameter methods”. Journal of Environmental Management, 118, 144-152.

- Lucke, T., Boogaard, F., & van de Ven, F. (2014). "Evaluation of a new experimental test procedure to more accurately determine the surface infiltration rate of permeable pavement systems". *Urban, Planning and Transport Research*, 2(1), 22-35.
- Lucke, T., White, R., Nichols, P., & Borgwardt, S. (2015). "A simple field test to evaluate the maintenance requirements of permeable interlocking concrete pavements". *Water*, 7(6), 2542-2554.
- Miller, J. S., & Bellinger, W. Y. (2014). "Distress Identification Manual for the Long-Term Pavement Performance project (Fifth Revised Edition)". No. FHWA-HRT-13-092
- Miranda, R. J. (2010) "Deterioros en pavimentos flexibles y rígidos", Tesis de grado de licenciatura, Universidad Austral de Chile
- Naji, K. (2018). "Resilient modulus–moisture content relationships for pavement engineering applications". *International Journal of Pavement Engineering*, 19(7), 651-660.
- Norma, N-CSV-CAR-1-03-008/18 (2018) "Determinación de los Deterioros Superficiales de los Pavimentos (DET)". SCT
- Manual, M-MMP-4-07-016/17 (2017) "Determinación de los Deterioros Superficiales de Pavimento por Inspección Visual". SCT
- Manual, M-MMP-4-07-014/17 (2017) "Determinación de los Deterioros Superficiales del Pavimento con Equipo Escáner". SCT
- Manual, M-MMP-4-07-015/17 (2017) "Determinación de los Deterioros Superficiales del Pavimento con Equipo Láser". SCT
- Porras, H. & Castañeda, E. A. (2012) "Detección automática de grietas de pavimento asfáltico aplicando características geométricas y descriptores de forma". *Revista INGE CUC*.
- Ridgeway, H. H. (1976). "Infiltration of Water Through the Pavement Surface". *Transportation Research Record* 616, 98-100.
- Tarefder, R. A., & Zaman, A. M. (2009). "Nanoscale evaluation of moisture damage in polymer modified asphalts". *Journal of Materials in Civil Engineering*, 22(7), 714-725.
- Taylor, J. V. (2004). "Migration of contaminants associated with pavement construction" (Doctoral dissertation, University of Nottingham).

- Terzaghi K., 1943. “Theoretical soil mechanics”, Chapman and Hall, London.
- Valdés, G., Pérez, F., & Calabi, A. (2012). “La fisuración en pavimentos asfálticos y sus mecanismos de deterioro”. *Revista Ingeniería de Obras Civiles*, 1, 27-37.
- Varveri, A., Zhu, J., & Kringos, N. (2015). “Moisture damage in asphaltic mixtures”. In *Advances in Asphalt Materials* (pp. 303-344). Woodhead Publishing.
- Wang, W., Wang, L., Xiong, H., & Luo, R. (2019). “A review and perspective for research on moisture damage in asphalt pavement induced by dynamic pore water pressure”. *Construction and Building Materials*, 204, 631-642.
- Yang, S.-R., Huang, W.-H., & Tai, Y.-T. (2005). “Variation of Resilient Modulus with Soil Suction for Compacted Subgrade Soils”. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1913(1), 99–106.
- Yilmaz, A., & Sargin, S., (2012) “Water effect on Deterioration of Asphalt Pavements” *Journal of Scie and Technology*, Vol 2, (1).
- Yolcubal, I., Brusseau, M. L., Artiola, J. F., Wierenga, P., & Wilson, L. G. (2004). “Environmental Physical Properties And Processes”. *Environmental Monitoring and Characterization*, 207–239.
- Yunus, N. Z. M., Wei, N. T., Yung, Y. C., Marto, A., Pakir, F., Hezmi, M. A., & Saari, R. (2014). “Effectiveness of Canlite and Probase Stabilized Laterite Soil Akademia Baru”. *Journal of Advanced Research Design*, 5(1), 17-30.
- Zevallos Gamarra, R. E. (2018). “Identificación y Evaluación de las fallas superficiales en los pavimentos flexibles de algunas vías de la ciudad de Barranca–2017”.

7 ANEXO A – DETERMINACIÓN DE PRECISIÓN DEL SENSOR

No. de lectura	Dist. Real (cm)	Dist. Sensor (cm)	Variación abs. entre distancias (cm)
1	2.6	2.4	0.2
2	4.7	4.8	0.1
3	4.9	4.57	0.33
4	1.7	1.4	0.3
5	5.6	5.5	0.1
6	9.5	10.1	0.6
7	7.7	7.9	0.2
8	7.6	7.2	0.4
9	4	4.7	0.7
10	6.4	6	0.4
11	3.8	3.4	0.4
12	8.3	8.9	0.6
13	10.5	10.3	0.2
14	12.2	12.1	0.1
15	2.8	2.6	0.2
16	11.7	12.55	0.85
17	13.5	13	0.5
18	14.6	13.9	0.7
19	7.7	7.7	0
20	5.7	5.48	0.22
21	12.6	13.6	1
22	15.6	15.54	0.06
23	19.4	19	0.4
24	16.3	17.7	1.4
25	18.7	18.1	0.6
26	12.6	12.1	0.5
27	8.5	8.18	0.32
28	2.3	2.04	0.26
29	4	4.32	0.32
30	5	5.06	0.06
			Variación Prom. (cm)
			0.40

8 - ANEXO B – DATOS PARA LA VALIDACIÓN DEL PROCESAMIENTO DE AGRIETAMIENTOS

8 ANEXO B – DATOS PARA LA VALIDACIÓN DEL PROCESAMIENTO DE AGRIETAMIENTOS

Poligono	Área real (cm ²)	Foto	Área Algoritmo (cm ²)	Prom. areas algoritmo (cm ²)	Desv. Std. areas algoritmo	Coef. Varición areas algoritmo (%)	Error absoluto área real y algoritmo (cm2)	Error relativo área real y del algoritmo (%)
1	62.61	a	62.487	62.789	0.403	0.642	0.179	0.286
		b	62.634					
		c	63.247					
2	94.67	a	94.020	94.331	0.493	0.523	0.339	0.358
		b	94.073					
		c	94.900					
3	34.37	a	32.904	32.614	0.374	1.147	1.756	5.108
		b	32.192					
		c	32.747					
4	16.33	a	15.970	15.939	0.035	0.220	0.391	2.392
		b	15.947					
		c	15.901					
5	45.65	a	45.827	45.704	0.312	0.682	0.054	0.119
		b	45.350					
		c	45.936					
6	28.43	a	30.058	29.908	0.255	0.852	1.478	5.200
		b	29.614					
		c	30.053					
7	15.74	a	16.007	15.991	0.014	0.086	0.251	1.597
		b	15.986					
		c	15.981					
8	37.05	a	37.878	37.897	0.038	0.101	0.847	2.286
		b	37.872					
		c	37.941					
9	22.79	a	23.315	23.500	0.173	0.735	0.710	3.117
		b	23.529					
		c	23.657					
10	24.51	a	22.160	22.446	0.256	1.143	2.064	8.420
		b	22.655					
		c	22.524					
11	35.03	a	33.731	33.659	0.087	0.259	1.371	3.915
		b	33.683					
		c	33.562					
12	11.94	a	11.481	11.487	0.119	1.033	0.453	3.797
		b	11.371					
		c	11.608					
13	32.99	a	34.104	34.097	0.124	0.364	1.107	3.357
		b	34.218					
		c	33.970					
14	26.16	a	25.931	26.367	0.381	1.446	0.207	0.790
		b	26.530					
		c	26.639					
15	48.81	a	50.581	50.502	0.072	0.142	1.692	3.467
		b	50.441					
		c	50.484					
16	64.19	a	65.395	66.261	0.751	1.134	2.071	3.226
		b	66.651					
		c	66.737					
17	41.86	a	41.139	41.105	0.068	0.166	0.755	1.803
		b	41.027					
		c	41.150					
18	56.33	a	58.043	58.017	0.244	0.420	1.687	2.995
		b	58.247					
		c	57.762					
19	35.01	a	35.708	35.793	0.466	1.302	0.783	2.237
		b	35.376					
		c	36.296					
20	47.71	a	48.904	49.385	0.447	0.905	1.675	3.511
		b	49.464					
		c	49.787					
21	43.68	a	44.816	44.885	0.092	0.205	1.205	2.758
		b	44.849					
		c	44.989					
22	56.42	a	54.435	54.111	1.260	2.328	2.309	4.093
		b	52.721					
		c	55.177					
23	40.14	a	37.826	38.475	0.650	1.688	1.665	4.148
		b	38.474					
		c	39.125					
24	77.58	a	76.090	76.474	0.367	0.480	1.106	1.425
		b	76.512					
		c	76.821					
25	99.78	a	98.573	97.416	2.474	2.539	2.364	2.369
		b	99.099					
		c	94.576					
26	78.46	a	76.245	76.976	1.129	1.466	1.484	1.891
		b	76.407					
		c	78.276					
27	61.41	a	60.624	61.074	0.412	0.674	0.336	0.547
		b	61.168					
		c	61.431					
28	60.09	a	61.546	61.212	1.556	2.541	1.122	1.867
		b	62.573					
		c	59.516					
29	82.3	a	83.221	84.513	1.963	2.323	2.213	2.689
		b	83.545					
		c	86.772					
30	46.18	a	43.992	44.614	0.614	1.377	1.566	3.391
		b	44.630					
		c	45.220					
					D.S. Prom.	C.V. Prom.	E. Abs. Prom.	E. Rel. Prom.
					0.521	0.964	1.175	2.772