

DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y CALIBRACIÓN DE UN PERMEÁMETRO LCS
PARA MEZCLAS ASFÁLTICAS DRENANTES

(MEDIDO IN SITU Y EN LABORATORIO)

JUAN DAVID OREJUELA JIMÉNEZ
CESAR ADOLFO HERNÁNDEZ PACHÓN

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ D.C.

2018

DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y CALIBRACIÓN DE UN PERMEÁMETRO LCS
PARA MEZCLAS ASFÁLTICAS DRENANTES
(MEDIDO IN SITU Y EN LABORATORIO)

JUAN DAVID OREJUELA JIMÉNEZ
CESAR ADOLFO HERNANDEZ PACHÓN

PROYECTO DE GRADO

DIRECTOR: PhD. ING. JUAN CARLOS RUGE

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA

FACULTAD DE INGENIERÍA

INGENIERÍA CIVIL

BOGOTÁ D.C.

2018



Atribución-NoComercial 2.5 Colombia (CC BY-NC 2.5)

La presente obra está bajo una licencia:
Atribución-NoComercial 2.5 Colombia (CC BY-NC 2.5)

Para leer el texto completo de la licencia, visita:
<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/2.5/co/>

Usted es libre de:



Compartir - copiar, distribuir, ejecutar y comunicar públicamente la obra
hacer obras derivadas

Bajo las condiciones siguientes:



Atribución — Debe reconocer los créditos de la obra de la manera especificada por el autor o el licenciante (pero no de una manera que sugiera que tiene su apoyo o que apoyan el uso que hace de su obra).



No Comercial — No puede utilizar esta obra para fines comerciales.

Nota de aceptación:

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

DEDICATORIA

A Dios por la sabiduría que nos ha brindado, a nuestro director de grupo, docentes, personas que nos ayudaron y asesoraron en el desarrollo de nuestro proyecto, a nuestras familias por apoyarnos en este arduo camino de aprendizaje de construir conocimiento.

RESUMEN

Este trabajo de grado se realizó con el fin del diseño, construcción y calibración de un permeámetro LCS para mezclas asfálticas drenantes, utilizado para medir la infiltración de este tipo de pavimento. Para ellos se procedió a investigar la norma INVIAS que regula este equipo en Colombia. Se pudo observar los materiales y dimensiones que el equipo requiere para dar inicio a la fabricación de las partes que estos componen.

Con el fin de realizar el análisis de la infiltración en mezclas asfálticas drenantes, utilizadas para disminuir problemas de sobrecostos, hidropneumático y recarga de acuíferos; se investigaron las normas y características del permeámetro LCS, utilizado para medir este parámetro.

Se investigó las características del tipo de pavimento al cual este equipo realiza ensayos para realizar la fabricación de estas y verificar el buen funcionamiento de este.

Se hizo el análisis de los resultados y de la probeta de pavimento MDC1 con la que se realizaron los ensayos, verificando que estuvieran de acuerdo a la probeta de pavimento ensayada concluyendo su funcionamiento.

Palabras claves: Infiltración, permeámetro LCS, mezclas asfáltica, mezcla drenante.

ABSTRACT

This degree work was carried out for the purpose of the design, construction and calibration of a LCS permeameter for draining asphalt mixtures, used to measure the infiltration of this type of pavement.

They proceeded to investigate the standard INVIAS, which regulates this team in Colombia. Materials could be observed and dimensions the equipment required to give began the manufacture of these component parts.

In order to make the analysis of infiltration in draining asphalt mixtures, used to reduce problems of cost overruns, hydrofoils and recharge of aquifers; the rules and characteristics of the LCS permeameter, used to measure this parameter were investigated.

We investigated the characteristics of the type of pavement to which this equipment performs tests to make the manufacture of these and check the proper operation of this.

The analysis results and the test piece of pavement MDC1 which were the trials, verifying that they were according to the tested specimen of pavement concluding its operation was made.

Key words: infiltration, LCS permeameter, asphalt mixtures, draining mixture.

CONTENIDO

	pág.
1. INTRODUCCIÓN.	12
2. OBJETIVOS.	13
2.1. GENERAL.....	13
2.2. ESPECÍFICOS.....	13
3. ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN.....	14
4. MARCO TEÓRICO.....	16
5. ALCANCES Y LIMITACIONES.	23
5.1. ALCANCE.....	23
5.2. LIMITACIONES	23
6. ESTADO DEL ARTE.	24
7. METODOLOGÍA.....	26
7.1. FASE DE INVESTIGACIÓN.	26
7.2. FASE DE EJECUCIÓN.....	26
7.2.1. PERMEÁMETRO LCS.	26
7.2.2. PLACAS DE PAVIMENTO.....	29
7.3. FASE DE ENSAYOS.....	38
7.3.1. CALCULO VOLUMEN DE VACÍOS COMUNICANTES.	38
7.3.2. ENSAYO PERMEÁMETRO LCS.	40
8. RESULTADOS.....	41
8.1 VOLUMEN DE VACÍOS TOTALES.	41
8.2 PERMEÁMETRO LCS.....	43
9. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	47
10. NORMATIVIDAD.....	54
11. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	55
12. MANUAL DE USO.	56
13. BIBLIOGRAFÍA.	57
14. ANEXOS.....	59
15. REGISTRO FOTOGRÁFICO.....	64

LISTA DE IMÁGENES

	pág.
Imagen 1 Hidroplaneo.....	14
Imagen 2 Recarga de agua en subsuelo	15
Imagen 3 Flujo de agua en estructura de pavimento poroso	17
Imagen 4 Firmes permeables con infiltración	17
Imagen 5 Firmes permeables con almacenamiento	18
Imagen 6 Firmes permeables con drenaje diferido	18
Imagen 7 Dimensiones permeámetro LCS	20
Imagen 8 Equipo permeámetro LCS.....	21
Imagen 9 Funcionamiento pavimento poroso	22
Imagen 10 Infiltrómetro Cántabro Portátil	24
Imagen 11 Permeámetro de pared flexible	25
Imagen 12 Tubo de acrílico y base de apoyo	27
Imagen 13 Pesa tórica	28
Imagen 14 Goma celular.....	28
Imagen 15 Tapón.....	29
Imagen 16 Elementos para ensayo punto de ablandamiento	33
Imagen 17 Montaje ensayo punto de ablandamiento	34
Imagen 18 Muestras de ensayo para penetración al baño maría a 25°C	35
Imagen 19 Montaje ensayo de penetración	35
Imagen 20 Viscosímetro Saybolt	37
Imagen 21 Equipo para fabricación de placas de pavimento.....	38

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1 Datos granulometría MDC-1	29
Tabla 2 Granulometría MDC-1	29
Tabla 3 Datos granulometría MDC-2	30
Tabla 4 Granulometría MDC-2.....	30
Tabla 5 Datos granulometría MDC-3	31
Tabla 6 Granulometría MDC-3.....	31
Tabla 7 Datos Ensayo Desgaste Máquina de Los Ángeles	31
Tabla 8 Resultados ensayo Equivalente de arena.....	32
Tabla 9 datos ensayo Punto de ablandamiento	33
Tabla 10 Datos Ensayo de penetración	34
Tabla 11 Aceites de Viscosidad nomalizada.....	36
Tabla 12 Porcentaje de los agregado por placa.....	41
Tabla 13 Densidades de los materiales	41
Tabla 14 calculo densidad aparente de las placas	42
Tabla 15 Calculo volumen de vacíos comunicantes	42
Tabla 16 Tiempo de infiltración por ensayo de permeámetro LCS de dos tipos de mezclas drenantes.....	43
Tabla 17 Granulometría MDC-1, MDC-2 y MDC-3	48
Tabla 18 Tiempos medios de infiltración por permeámetro LCS	51
Tabla 19 Granulometría mezclas drenantes	52
Tabla 20 Tiempo de infiltración por ensayo de permeámetro LCS de dos tipos de mezclas drenantes.....	52

LISTA DE GRAFICAS

	Pág.
Gráfico 1 Tiempos de infiltración MDC-1	44
Gráfico 2 Correlación coeficiente de permeabilidad vs tiempo de evacuación .	45
Gráfico 3 Granulometría MDC-2	49
Gráfico 4 Granulometría MDC-3	49
Gráfico 5 Granulometría MDC-1	50
Gráfico 6 Comparación granulometría MDC-1 con Mezcla drenante.....	50

1. INTRODUCCIÓN.

Desde los años 80's se han venido realizando estudios relacionados a los pavimentos drenantes con el objetivo de evitar problemas en los sistemas de drenaje que se han presentado, como lo son arrastre de sedimentos, escombros de gran tamaño, basura en las calles. Lo que provoca mayores costos en el tratamiento de las aguas residuales, mantenimiento a los sistemas de drenaje en un periodo más corto, entre otros. Con el fin de asegurar la seguridad de los usuarios debido al hidroplaneo además de disminuir problemas de inundaciones en zonas urbanas.

El equipo PERMEÁMETRO LCS verifica que el pavimento drenante cumpla las condiciones de permeabilidad para ser instalado en una zona urbana, el cual hacia los años 80's la Escuela Técnica de Ingenieros de Caminos de Santander, España, pudieron determinar la permeabilidad 'in situ'.

Los pavimentos drenantes son un sistema de drenaje que ha venido teniendo auge, usando mezclas bituminosas porosas, lo que permite la filtración del agua a través de ellos sin perjudicar la resistencia adecuada para el tránsito vehicular. Para analizar la capacidad de filtración que deben tener las mezclas bituminosas porosas, se requiere el equipo PERMEÁMETRO LCS que mida la capacidad de filtración, de acuerdo a las intensidades de las precipitaciones que presentan la zona. Esto permite saber la cantidad de vacíos adecuado para el diseño de la mezcla bituminosa.

La presente investigación pretende la elaboración del equipo PERMEÁMETRO LCS, la cual consiste en una base de apoyo circular en acero con orificio, un tubo cilíndrico incrustado en la abertura de la base de apoyo, un tubo cilíndrico circular transparente, una pesa con orificio la cual hará peso a la base de apoyo y un anillo de caucho bajo la base de apoyo con el fin de que el agua se filtre por los bordes.

Para ello deberemos tener en cuenta la norma INVIAS INV-E-796-13, la cual describe el procedimiento a seguir para realizar medidas de permeabilidad in-situ en las mezclas drenantes utilizadas en capas de rodadura y bermas y donde se ven reflejadas todas las dimensiones y características del equipo PERMEÁMETRO LCS.

2. OBJETIVOS.

2.1. GENERAL.

- Implementar un equipo permeámetro LCS que permita la medición in situ y experimental de la permeabilidad en mezclas asfálticas drenantes.

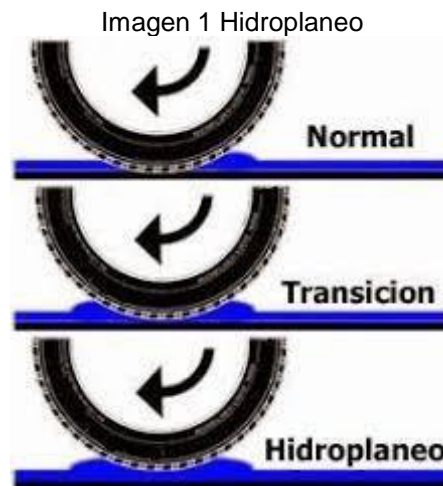
2.2. ESPECÍFICOS.

- Identificar los conceptos del permeámetro LCS, sus características y funcionamiento, por medio de la norma INVIAS (INV E – 796 – 13).
- Pretender la construcción de un permeámetro LCS para mezclas asfálticas drenantes.
- Poner en funcionamiento y calibrado un permeámetro LCS a disposición para el uso por parte de los estudiantes de ingeniería civil de la Universidad Católica de Colombia.

3. ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN.

Desde hace tres décadas se ha venido desarrollando nuevas investigaciones para la aplicación de nuevos firmes de pavimentos, con el fin de dar un mejor confort, seguridad al usuario, y eliminar problemáticas hidrológicas en zonas urbanas, sin dejar de un lado únicamente la resistencia de este. Estas investigaciones han traído consigo la implementación de nuevos equipos para realizar un análisis de las muestras, lo que ayuda a tener una cuantificación de los ensayos y sacar conclusiones.

“Una de estas investigaciones ha sido la implementación de pavimentos asfálticos drenantes (porosos), con el fin de eliminar el llamado hidropneumático, un efecto de deslizamiento producido en los vehículos cuando transitan a velocidades altas, debido a la capa de agua que se encuentra entre el neumático y la capa de rodadura, en zonas de fuertes precipitaciones, además de los problemas en los sistemas de drenajes urbanos”.¹



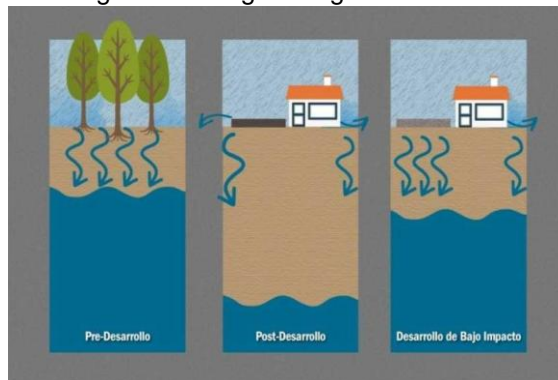
Fuente: <http://motosybicicletas.blogspot.com.co/2013/05/que-es-el-hidroplaneo.html>

Al realizar el diseño de un pavimento convencional, el cual es impermeable, se debe considerar el manejo de las aguas pluviales mediante sistemas de drenajes laterales.

“En las áreas urbanas se le debe dar una mayor importancia a esto dada la alta densidad poblacional presente. Lo que genera un cambio en el ciclo hidrológico, causando algunos problemas como: la sobrecarga de las redes mixtas de aguas residuales y pluviales, reducción de la capacidad de infiltración del suelo, disminución de la carga en acuíferos, aumento de los costos del tratamiento de aguas residuales, contaminación en los cuerpos de agua receptores por arrastre de contaminantes, entre otros”.²

¹MENESES, Jessica Brigeth. PÁEZ, Diego Alberto. Mezcla asfáltica permeable como parte de la estructura de pavimento a partir del uso y modificación de una mezcla drenante aplicado a vías rurales. Bogotá D.C. 2017. 70p. Trabajo de grado (Ingeniero Civil). Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Facultad tecnológica

Imagen 2 Recarga de agua en subsuelo



Fuente: <http://blog.360gradosenconcreto.com/concreto-permeable-desarrollo-urbano-de-bajo-impacto-2/>

“En algunos países europeos, desde los años 80’s, se han venido realizando diferentes estudios buscando el desarrollo de los pavimentos drenantes, especialmente en España y Francia. De Hecho, el ensayo INV-E-796-13 para medir la capacidad drenante de una mezcla asfáltica está basada en la norma española NLT-327/00. Esta norma describe el procedimiento a seguir para realizar la medida de permeabilidad in situ de las mezclas drenantes, dependiendo de su tipología, porosidad y grado de compactación”.³

El equipo PERMEÁMETRO LCS, el cual surgió a partir de los pavimentos drenantes, permite realizar un análisis de la capacidad drenante, con el fin de drenar aguas lluvias que se presenten en esta zona.

Este equipo es fundamental en el diseño de pavimento drenante, Ya que este brinda el resultado de aceptación o rechazo de una de las funcionalidades principales de un pavimento drenante, como su nombre lo indica.

²ARANGO, Samiel. Concreto permeable: desarrollo urbano de bajo impacto. {En línea}. {4 mayo de 2015}. Disponible en: <http://blog.360gradosenconcreto.com/concreto-permeable-desarrollo-urbano-de-bajo-impacto-2/>

³JUYAR MORA, German. PÉREZ CELY, Gabriel. Comparación de mezclas asfálticas drenantes fabricadas con asfalto modificado y sin modificar. En: Revista de la facultad de ingeniería. (Jul. 1991); p. 76-87

4. MARCO TEÓRICO.

“En EEUU estuvieron los pioneros en el desarrollo de las mezclas drenantes aproximadamente, en los años 40's, aplicaban capas de 2.5 cm aproximadamente, con el fin de renovar la textura deslizante, que aparecía al ir deteriorándose por la abrasión del tráfico. En Europa las mezclas drenantes fueron desarrolladas en Francia hacia el año 1968, donde se observó que al cabo de 10 años los sedimentos que colmataron los vacíos de la capa drenante, sin embargo, mantenía un nivel drenante aceptable. Hacia los años 70's la utilización de asfaltos modificados mejoró las características reológicas, teniendo así un mejor comportamiento mecánico-plástico, elástico y viscoso.

Debido a la confrontación de ventajas y desventajas, el desarrollo de pavimentos drenantes que venía realizando Francia estuvo bloqueado. Hasta 1985 fue retomado el desarrollo, sin embargo, España fue el primer país en investigar y analizar las mezclas drenantes en detalle”.⁴

“Desde ese momento inició una gran expansión del uso de mezclas drenantes en España, llegando a tener 10 millones de m² y al día de hoy aproximadamente existen 100 millones de m²”.⁵

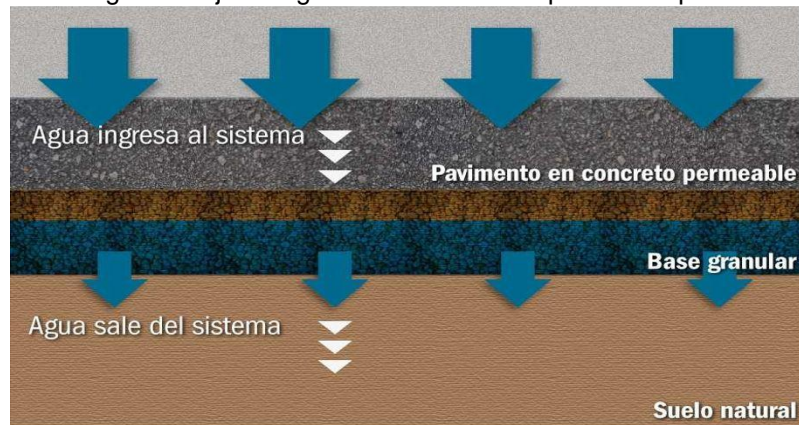
“Los pavimentos drenantes, es un Sistema Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS), compuesto de varias capas de materiales de construcción que permiten el paso del agua a través de estas, además de ofrecer la resistencia necesaria para resistir un tráfico determinado”.⁶

⁴CAMPOS CANESSA, Jaime Andres. Seguimiento y comparación del comportamiento de tramos con mezcla drenante, según zona geográfica y condiciones locales. Santiago de Chile, Chile. 2008. 120p. Trabajo de grado (Ingeniero Civil). Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas.

⁵JUÁREZ ALARCÓN, Ivy Eneida. AYALA LOZA, Marvin Emmanuel. Diseño de mezcla drenante con asfalto modificado disponible en El Salvador. Ciudad Universitaria, El Salvador. 2010. 273p. Trabajo de grado (Ingeniero Civil). Universidad de El Salvador. Facultad de Ingeniería y Arquitectura.

⁶ Intromac. Pavimentos drenantes. {En línea}. {6 marzo de 2015}. Disponible en: <http://www.intromac.com/wp-content/uploads/2015/03/Pavimentos-drenantes-Intromac.pdf>

Imagen 3 Flujo de agua en estructura de pavimento poroso

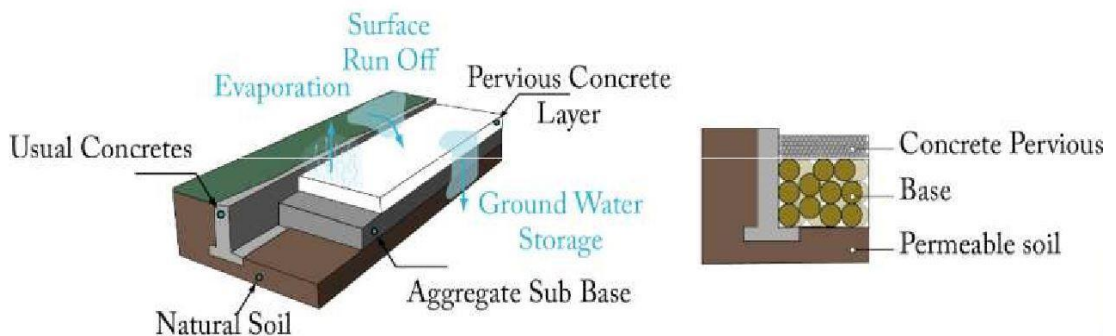


Fuente: <http://blog.360gradosenconcreto.com/concreto-permeable-desarrollo-urbano-de-bajo-impacto-2/>

Clasificación de pavimentos de acuerdo a la disposición final del agua:

- “Firmes permeables con infiltración: permiten la infiltración al terreno del agua con el objetivo de permitir la recarga de las reservas naturales de aguas subterráneas”.⁶

Imagen 4 Firmes permeables con infiltración



Fuente: Intromac (Marzo 2015). Jornada técnica pavimentos de hormigón en entornos urbanos y de edificación.

- “Firmes permeables con almacenamiento: permite el almacenamiento de un determinado volumen de agua en la capa subbase con el objetivo de su reutilización en usos no potables”.⁶

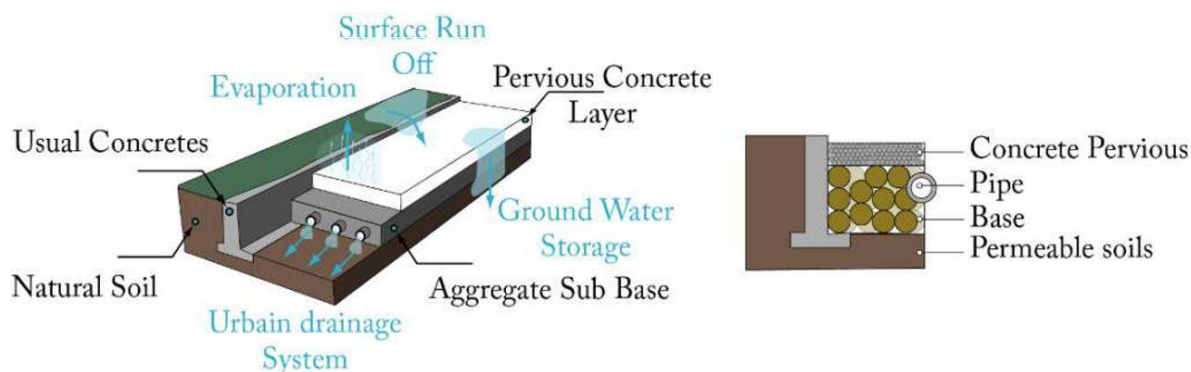
Imagen 5 Firmes permeables con almacenamiento



Fuente: Intromac (Marzo 2015). Jornada técnica pavimentos de hormigón en entornos urbanos y de edificación.

- “Firmes permeables con drenaje diferido: cuentan con un sistema de drenaje subterráneo con tuberías permeables con el objetivo de retardar el flujo de aguas pluviales, laminando las puntas de caudal en los sistemas de saneamiento a los que están conectados”.⁶

Imagen 6 Firmes permeables con drenaje diferido



Fuente: Intromac (Marzo 2015). Jornada técnica pavimentos de hormigón en entornos urbanos y de edificación.

El equipo ‘PERMEMAETRO LCS’ es un equipo que funciona para medir el tiempo que tarda una columna de agua variable en infiltrarse a través de un pavimento drenante, con el fin de determinar un constante de infiltración y obtener un % de vacíos del pavimento a ensayar n situ.

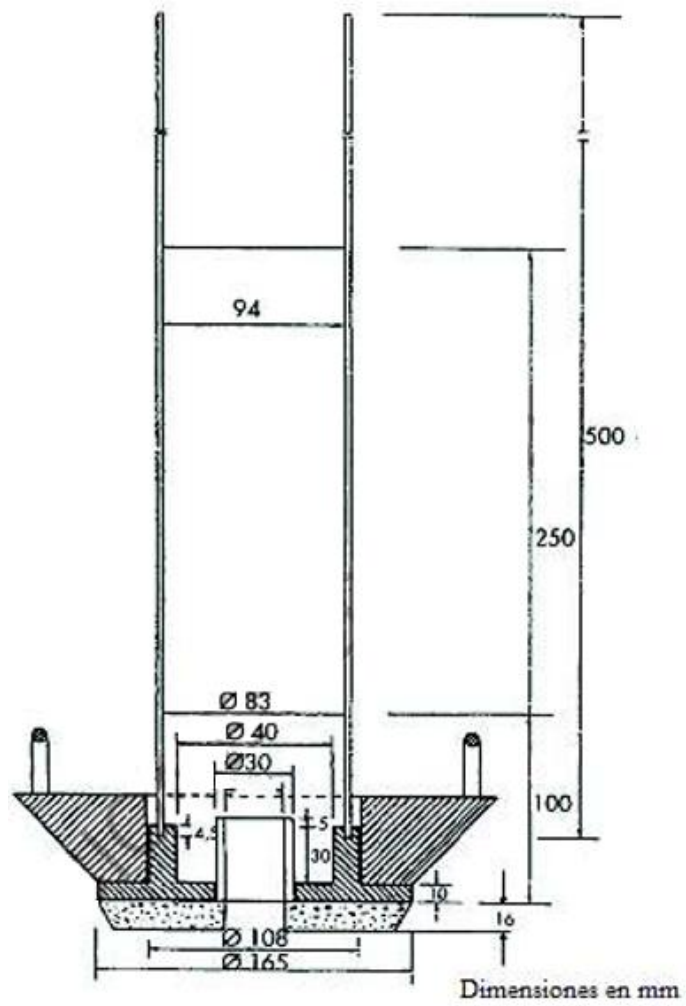
“El permeámetro LCS es un equipo que nos ayuda a obtener la permeabilidad de las mezclas drenantes in situ, constituido por los siguientes elementos principalmente”:⁷

- Una base de apoyo, formada por una probeta rígida circular de acero, de 165 mm de diámetro y 10 mm de espesor, con un orificio circular en su centro, de 40 mm de diámetro.
- Un tubo cilíndrico circular, de unos 40 mm de diámetro exterior, 30 mm de diámetro interior y 45 mm de altura, incrustado.
- Un tubo cilíndrico transparente de 94 mm de diámetro interior y unos 500 mm de altura, unido rígidamente y con cierre estanco a la base de apoyo. El tubo lleva marcadas dos señales de medida, grabadas en toda su periferia y situadas respectivamente a 100 y 350 mm del fondo de la base de apoyo.
- Una pesa tórica de 20 ± 0.5 kg de masa, cuyo orificio y base permitan un apoyo estable sobre la probeta circular.
- Un anillo circular estanco de caucho celular de 16 mm de espesor, que se adapte perfectamente a las irregularidades superficiales del pavimento para impedir el escape superficial del agua durante el ensayo. Para ello, su deformación o reducción de espesor bajo la carga de la pesa tórica deberá ser de 8 ± 0.5 % a los 30 segundos de carga, alcanzando una deformación final constante de 12 ± 0.5 % a los 5 minutos.
- También incorpora una varilla de acero inox. con un tapón en la punta que sirve para taponar el orificio de agua de 30mm durante el montaje del ensayo.

En la Imagen 7 se puede observar las dimensiones que componen las partes del permeámetro LCS.

⁷ INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Especificaciones y Normas. Actualización 2013. Bogotá D.C.

Imagen 7 Dimensiones permeámetro LCS



Fuente: (Especificaciones y Normas INVIAS - INV E 796-13)

Imagen 8 Equipo permeámetro LCS



Fuente: Especificaciones y Normas INVIAS - INV E 796-13

Este equipo nos ayuda a determinar la capacidad drenante de una mezcla bituminosa porosa que está constituida por agregados de granulometría mal graduado (diámetros uniformes), bajo contenido de arena y ligante (cemento asfáltico), logrando un porcentaje de vacíos entre 20% y 25%.

Imagen 9 Funcionamiento pavimento poroso



Fuente: <http://blog.360gradosenconcreto.com/concreto-permeable-desarrollo-urbano-de-bajo-impacto-2/>

Estos pavimentos traen grandes beneficios al manejo de aguas lluvias, ya que ayuda a reducir gastos en obras de drenaje, aumentando la seguridad de los vehículos, además de reducir la contaminación de las aguas superficiales que escurren cuando se tiene un pavimento convencional.

Estos pavimentos porosos pueden ser construidos tanto en caliente como en frío. La textura debida a la composición del pavimento drenante genera una mayor fricción de contacto entre neumático y capa de rodadura lo que genera una mayor seguridad para el vehículo.

Las principales aplicaciones de los pavimentos porosos son las siguientes:

- Acceso vehicular: accesos residenciales, servicios y caminos de acceso, cunetas, cruces y sendas de fuego.
- Estabilización de taludes y control de erosiones.
- Campos deportivos.
- Parqueaderos.
- Accesos peatonales.
- Senderos de bicicletas y ecuestres

5. ALCANCES Y LIMITACIONES.

5.1. ALCANCE

En este trabajo de investigación abordaremos las características y modo de operación del Permeámetro LCS, con el fin de realizarlo e implementarlo en el laboratorio, basados en las medidas estandarizadas en la norma (INVIAS-E-796-13), dependiendo de las mezclas disponibles, realizar diferentes ensayos para comprobar el óptimo funcionamiento de este.

El estudio se realizó para pavimentos de mezcla en caliente, espesor de 4 cm, y 27 cm X 27 cm, con una relación de vacíos entre el 20 % y 25%, tal como lo indica el artículo 453 del INVIAS.

5.2. LIMITACIONES

Dada la baja implementación de este tipo de asfaltos en el país, no se cuenta con gran variedad de proveedores especializados, ocasionando que para el desarrollo del proyecto los ensayos se realizarán con la mezcla MDC1, MDC2 y MDC3.

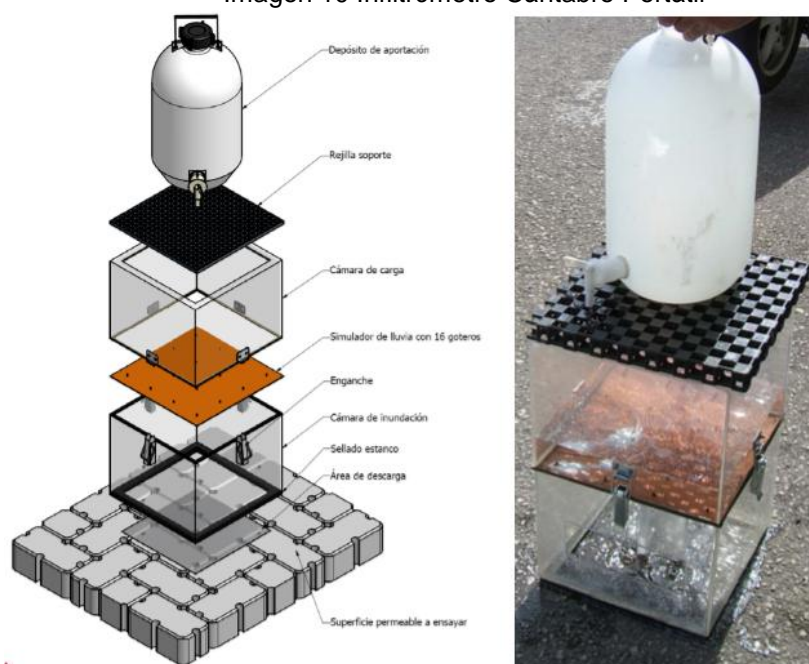
El bajo desarrollo de este tipo de pavimentos en Colombia causa que no se encuentren proveedores este con un proceso industrializado para la fabricación de las piezas.

Buscar los proveedores idóneos con el fin de realizar las partes del permeámetro LCS o de posibles ensayos que no se puedan realizar en la universidad, con el fin de optimizar el tiempo y la calidad de los ensayos.

6. ESTADO DEL ARTE.

Si bien el permeámetro LCS nos ayuda a calcular coeficiente de infiltración, en la actualidad existe otro tipo de ensayo que simula mejor una condición de lluvia con un caudal e intensidad fijada a la cual será sometido el pavimento y obteniendo resultados más confiables. “Este ensayo se llama Infiltrómetro Cántabro Portátil (ICP). Fue diseñado para este tipo de simulaciones, está formado por cuatro partes principales: cámara de inundación, simulador de lluvia, cámara de carga y recipiente de recarga. Este ensayo de acuerdo a las normas INVIAS vigentes no se encuentra en su normatividad”.⁸

Imagen 10 Infiltrómetro Cántabro Portátil



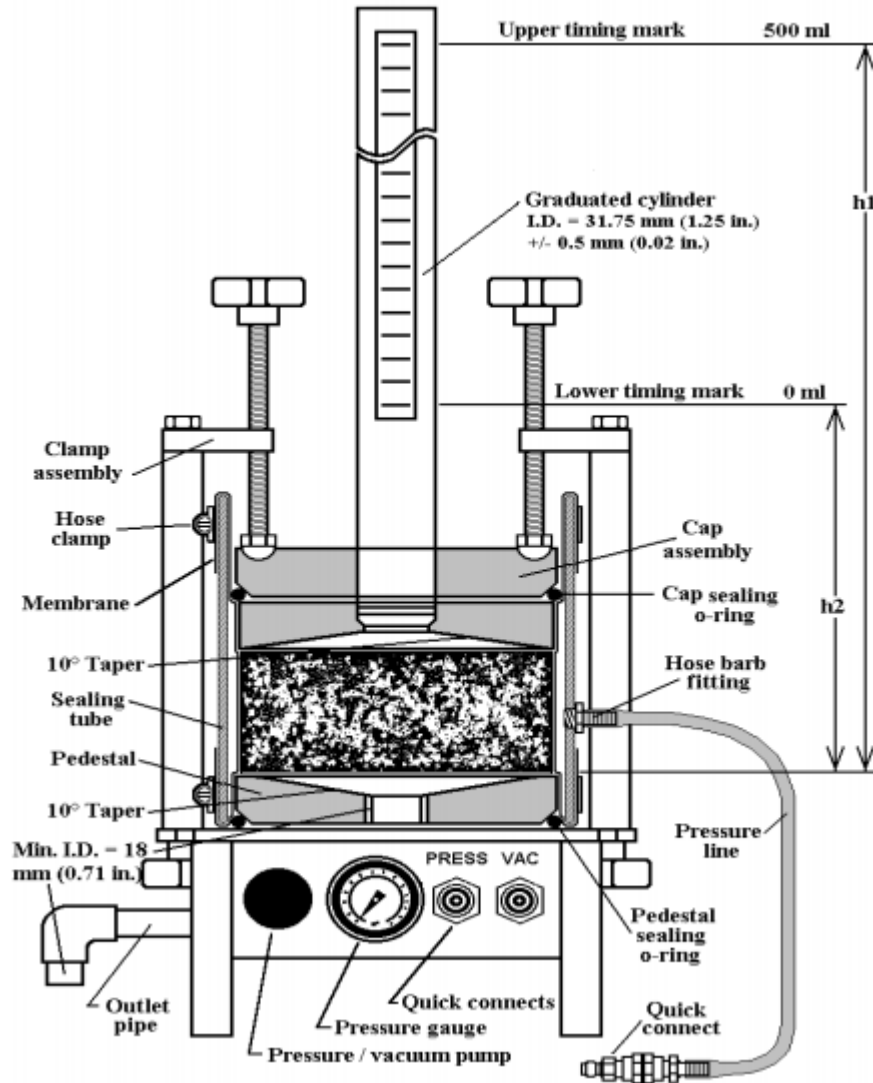
Fuente: Rodríguez Hernández Jorge (2008)

Por otro lado, en la normatividad INVIAS INV-E-805-13 se encuentra otro equipo llamado “Permeámetro de Pared Flexible”. “Su funcionamiento consiste en medir el tiempo que tarda en alcanzar un cambio en la carga hidráulica de un tubo graduado, con el fin de determinar el coeficiente de permeabilidad de la muestra,

⁸ RODRÍGUEZ HERNANDEZ, Jorge. Estudio, análisis y diseño de secciones permeables de firmes para vías urbanas con un comportamiento adecuado frente a la colmatación y con la capacidad portante necesaria para soportar tráficos ligeros. Santander, España. 2008. 515p. Tesis Doctoral (Doctor). Universidad de Cantabria.

siendo similar al del PERMEAMETRO LCS, sin embargo, en este la muestra se encuentra en condiciones distintas”.⁹

Imagen 11 Permeámetro de pared flexible



Fuente: Florida DOT FM 5-565

⁹ FLORIDA DEPARTMENT OF TRANSPORTATION. Normas. Actualización 2015. Gainesville, Florida. DOT FM 5-565

7. METODOLOGÍA.

7.1. FASE DE INVESTIGACIÓN.

Consistió en el estudio del artículo 400-13, 453-13 y 414-13 del INVIAS respecto a la elaboración de una capa de mezcla asfáltica de tipo drenante, preparada y colocada en caliente, con el fin de determinar los agregados pétreos y el material tipo ligante a utilizar para la realización de diferentes probetas, buscando cumplir las especificaciones técnicas requeridas.

Dado lo anterior, en las normas INVIAS, la información correspondiente a las características de los materiales a utilizar para la fabricación de dichas probetas con el objetivo de que cumplan técnicamente.

Finalmente, en esta fase se tuvo claro los parámetros técnicos y dimensiones del permeámetro LCS establecidas en la norma INV-796-13, para la fabricación de cada una de las partes que componen el equipo.

7.2. FASE DE EJECUCIÓN.

7.2.1. PERMEÁMETRO LCS.

Para la fabricación de cada una de las partes del equipo, se buscó asesoría de un profesional en el área quien fue el puente entre los proveedores y nosotros para la ejecución del mismo. Se elaboraron cada una de las partes buscando cumplir con las dimensiones especificadas en la norma.

Para la base y la pesa tórica, se trabajó con un especialista en el área de la metalurgia quien transformo de la materia en bruto estas piezas.

En el caso del tubo en acrílico se contactó un fabricante de productos acrílicos con el fin de encontrar un cilindro del diámetro especificado.

La adquisición goma celular se obtuvo a través de un proveedor de caucho celular con el fin de que le suministro del material cumpliera con la deformación que requiere este.

El tapón se ensambló utilizando una varilla de longitud superior al tubo de acrílico y un corcho de goma.

DESCRIPCIÓN DE LAS PARTES DEL PERMEÁMETRO LCS

El Tubo de acrílico, sirve para retener el agua que será ensayada por el pavimento y el cual contiene una cinta métrica para tomar las medidas de inicio y fin, además de la cantidad de agua a ensayar.

La base aparte de brindar soporte y estabilidad, es el que bajó la pesa tórica que ejerce presión a la goma celular.

La goma celular funciona como un sello sobre la superficie irregular del pavimento que es ensayado, con el fin de que el agua no se infiltre por los bordes del base.

La función que cumple la pesa tórica es ejercer una fuerza sobre la base para que la goma celular se ajuste a la irregularidad de la superficie del pavimento.

Tapón, es el que mantiene el agua dentro del tubo de acrílico, ajustándose al orificio de salida del agua.

Imagen 12 Tubo de acrílico y base de apoyo



Fuente: Propia

Imagen 13 Pesa tórica



Fuente: Propia

Imagen 14 Goma celular



Fuente: Propia

Imagen 15 Tapón



Fuente: Propia

7.2.2. PLACAS DE PAVIMENTO.

ENSAYO DE GRANULOMETRÍA (INV-E-123-13)

Se fue tamizando el material y separando las cantidades de cada tamiz para realizar las mezclas asfálticas (MDC-1, MDC-2 Y MDC3), de igual manera para el ensayo de máquina de los ángeles.

Tabla 1 Datos granulometría MDC-1

GRANULOMETRÍA MDC-1		
CONTENIDO DE ASFALTO	%	5
PESO PLACA	gr	6800
PESO AGREGADO	gr	6460
PESO ASFALTO	gr	340

Tabla 2 Granulometría MDC-1

TAMIZ	DIAMETRO (mm)	PESO RETENIDO (gr)	PORCENTAJE RETENIDO (%)	RETENIDO - ACUMULADO (%)	PASA (%)
1"	25.000	0.0	0.0	0.0	100.0
3/4"	19.000	646.0	10.0	10.0	90.0
1/2"	12.500	904.4	14.0	24.0	76.0

TAMIZ	DIAMETRO (mm)	PESO RETENIDO (gr)	PORCENTAJE RETENIDO (%)	RETENIDO - ACUMULADO (%)	PASA (%)
3/8"	9.500	484.5	7.5	31.5	68.5
#4	4.750	1130.5	17.5	49.0	51.0
#10	2.000	904.4	14.0	63.0	37.0
#40	0.425	1130.5	17.5	80.5	19.5
#80	0.180	452.2	7.0	87.5	12.5
#200	0.075	484.5	7.5	95.0	5.0
FONDO		323.0	5.0	100.0	0.0
		6460.0			

Fuente: Propia

Tabla 3 Datos granulometría MDC-2

GRANULOMETRÍA MDC-2		
CONTENIDO DE ASFALTO	%	5
PESO PLACA	gr	6800
PESO AGREGADO	gr	1140
PESO ASFALTO	gr	60

Fuente: Propia

Tabla 4 Granulometría MDC-2

TAMIZ	DIAMETRO (mm)	PESO RETENIDO (gr)	PORCENTAJE RETENIDO (%)	RETENIDO - ACUMULADO (%)	PASA (%)
1"	25.000	0.0	0.0	0.0	0.0
3/4"	19.000	0.0	0.0	0.0	100.0
1/2"	12.500	142.5	12.5	12.5	87.5
3/8"	9.500	96.9	8.5	21.0	79.0
#4	4.750	250.8	22.0	43.0	57.0
#8	2.380	228.0	20.0	63.0	37.0
#40	0.425	199.5	17.5	80.5	19.5
#100	0.150	79.8	7.0	87.5	12.5
#200	0.075	74.1	6.5	94.0	6.0
FONDO		68.4	6.0	100.0%	0.0
		1140.0			

Fuente: Propia

Tabla 5 Datos granulometría MDC-3

GRANULOMETRÍA MDC-3		
CONTENIDO DE ASFALTO	%	5
PESO PLACA	gr	6800
PESO AGREGADO	gr	1140
PESO ASFALTO	gr	60

Fuente: Propia

Tabla 6 Granulometría MDC-3

TAMIZ	DIAMETRO (mm)	PESO RETENIDO (gr)	PORCENTAJE RETENIDO (%)	RETENIDO - ACUMULADO (%)	PASA (%)
1"	25.000	0.0	0.0	0.0	0.0
3/4"	19.000	0.0	0.0	0.0	0.0
1/2"	12.500	0.0	0.0	0.0	0.0
3/8"	9.500	0.0	0.0	0.0	100.0
#4	4.750	273.6	24.0	24.0	76.0
#8	2.380	273.6	24.0	48.0	52.0
#40	0.425	336.3	29.5	77.5	22.5
#100	0.150	96.9	8.5	86.0	14.0
#200	0.075	74.1	6.5	92.5	7.5
FONDO		85.5	7.5	100.0	0.0
		1140.0			

Fuente: Propia

ENSAYO DE DESGASTE EN LA MAQUINA DE LOS ANGELES (INV-E-218-13)

Se mezclan las cuatro porciones de material cada una de 1250gr, se colocan en la máquina de los ángeles con 12 esferas a 500 revoluciones por minutos durante 15 minutos, al finalizar el ensayo se saca el material, se tamiza por el tamiz No.12 y se procede a secar en el horno a 110°C. Una vez secado se pesa el material y se calcula el porcentaje con respecto al peso inicial 5000g.

Tabla 7 Datos Ensayo Desgaste Máquina de Los Ángeles

ÍTEM	UNIDAD	VALOR
PESO MATERIAL TOTAL	gr	5000
TAMIZ 1/2" - 3/4"	gr	1250
TAMIZ 3/4" - 1/2"	gr	1250
TAMIZ 1/2" - 3/8"	gr	1250
TAMIZ 3/8" - 1/4"	gr	1250

ÍTEM	UNIDAD	VALOR
CANTIDAD DE ESFERAS	Und.	12
REVOLUCIONES	rev/min.	500
TIEMPO	min.	15
PESO MATERIAL DESPUÉS DE ENSAYO	gr	4180
DESGASTE	%	16.4

Fuente: Propia

ENSAYO DE EQUIVALENTE DE ARENA (INV-E-133-13)

Se tamiza por el tamiz No.4 una cantidad de 1000gr, se agrega la cantidad de agua necesaria para llevarlo a una condición húmeda, se coloca en cada probeta un volumen de solución stock de 10", se procede a introducir el material en la probeta, se deja en reposo 10 minutos, una vez culminado este tiempo se agita por 45 segundos, después de agitado se adiciona solución de stock hasta llevarlo a 15" irrigando el material, se deja en reposo 20 minutos , al cabo de los 20 minutos se lee el valor de la arcilla, se introduce el vástago y se toma la lectura de arena, con estos dos valores determinamos el porcentaje de finos que tiene el material.

Tabla 8 Resultados ensayo Equivalente de arena

EQUIVALENTE DE ARENA					
ENSAYO	No.	1	2	3	4
LECTURA DE ARCILLA	PULGADAS	12.2	12.5	12.4	12.5
LECTURA DE ARENA	PULGADAS	13.0	12.9	13.0	13.2
LECTURA DE ARENA REAL	PULGADAS	3.0	2.9	3.0	3.2
EQUIVALENTE DE ARENA	%	23.1	22.5	23.1	24.2
EQUIVALENTE DE ARENA PROMEDIO	%	23.23			

Fuente: Propia

PUNTO DE ABLANDAMIENTO EN MATERIALES BITUMINOSOS (NORMA INV-E-712-13)

Se toman dos anillos con cemento asfalto, estos se introducen en un Baker con agua destilada hasta que estos queden sumergidos. A continuación, se colocan las esferas en el centro de cada anillo y se enciende la llama esperando que la temperatura aumente en el agua hasta que las esferas desciendan y lleguen a la marca inferior, inmediatamente se toma la temperatura final.

Tabla 9 datos ensayo Punto de ablandamiento

ENSAYO DE PUNTO DE ABLANDAMIENTO, MÉTODO ANILLO Y BOLA		
TEMPERATURA INICIAL	°C	15
TEMPERATURA FINAL ENSAYO 1	°C	47
TEMPERATURA FINAL ENSAYO 2	°C	48
TEMPERATURA FINAL PROMEDIO	°C	47.5

Fuente: Propia

Imagen 16 Elementos para ensayo punto de ablandamiento



Fuente: Propia

Imagen 17 Montaje ensayo punto de ablandamiento



Fuente: Propia

ENSAYO DE PENETRACION DE LOS MATERIALES BITUMINOSOS (NORMA INV-E-706-13)

Se toma una cantidad de 500 gr de material bituminoso en su punto de ablandamiento, se colocan en tres recipientes de volumen conocido y se dejan enfriar, se mantienen en un baño de maría para mantener una temperatura de 25 °C. Una vez instalado el recipiente en su soporte se deja caer la aguja en caída libre dejando que penetre el material bituminoso por 5 segundos, se toma la lectura, este procedimiento se repite al menos tres veces. El promedio es el valor de la penetración del material bituminoso.

Tabla 10 Datos Ensayo de penetración

ENSAYO DE PENETRACIÓN		
ASFALTO ENSAYADO	Clasificación	80 -100
TEMPERATURA DEL AGUA	°C	25
SOBRE PESO	gr	100
TIEMPO DE CAIDA LIBRE	Segundos	5
PENETRACIÓN 1	0.1 mm	90
PENETRACIÓN 2	0.1 mm	88
PENETRACIÓN 3	0.1 mm	91
PROMEDIO	0.1 mm	90

Fuente: Propia

Imagen 18 Muestras de ensayo para penetración al baño maría a 25°C



Fuente: Propia

Imagen 19 Montaje ensayo de penetración



Fuente: Propia

VISCOSIDAD SAYBOLT (INV-E-714-13)

Se coloca un tapón de caucho en la boquilla del recipiente, se eleva la temperatura del depósito de aceite en el equipo controlando la temperatura, se coloca cemento asfáltico dentro del recipiente, elevando la temperatura hasta llegar a 54°C, se coloca el matraz bajo el recipiente, se retira el tapón de caucho y se toma el tiempo en que el asfalto llene el matraz hasta la marca de 60 ml, el cual tomó 120 segundos en llegar hasta dicha medida, por lo que de acuerdo a la siguiente tabla corresponde a una viscosidad de 310 mm²/s.

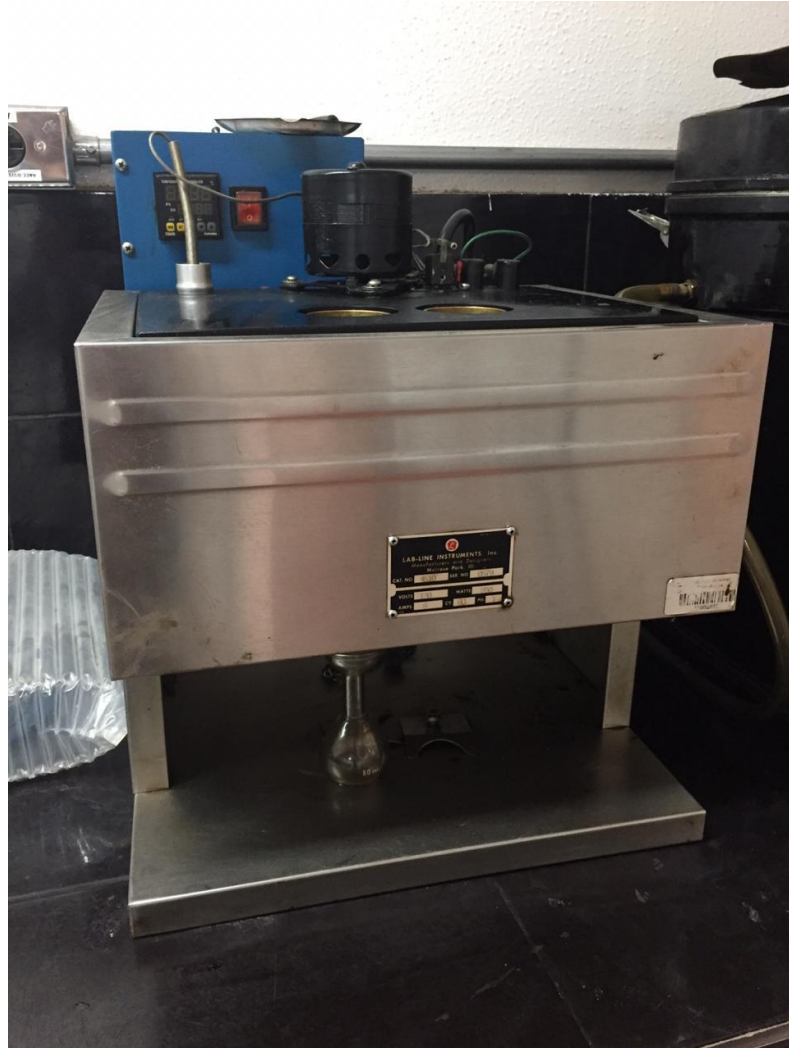
Tabla 11 Aceites de Viscosidad normalizada

Tabla 714A - 1. Aceites de viscosidad normalizada

ACEITE DE VISCOSIDAD NORMALIZADA	A 37.8° C (100° F)		A 98.9° C (210° F)		A 50.0° C (122° F)	
	SSU	mm ² /s	SSU	mm ² /s	SSU	mm ² /s
S3	36	3.0	-	-	-	-
S6	46	6.0	-	-	-	-
S20	100	20	-	-	-	-
N26	130	27	-	-	-	-
N35	170	35	-	-	-	-
N44	220	48	-	-	-	-
S60	280	60	-	-	-	-
N75	380	82	-	-	-	-
N100	500	110	-	-	-	-
N140	720	160	-	-	-	-
S200	925	200	105	20	-	-
N250	1300	280	140	29	-	-
N350	1570	340	160	32	-	-
N415	2180	470	200	41	-	-
S600	-	-	240	50	120	310
S2000	-	-	360	72	-	-

Fuente: INV-E-714-13

Imagen 20 Viscosímetro Saybolt



Fuente: Propia

COMPACTACIÓN DE LA MEZCLA

Se tiene una cantidad de 6460 gr de agregado cumpliendo la granulometría de la mezcla MDC-1, MDC-2 y MDC-3, se toma la cantidad correspondiente al 5% del peso total del agregado a utilizar, se procede a mezclar hasta que esta quede homogénea, previamente se prepara el molde engrasado. Una vez la mezcla caliente en el molde inmediatamente se le coloca la máquina vibradora sobre la mezcla y se deja por tres minutos hasta que esta quede compactada, se retira la compactadora. Finalmente, la placa elaborada se deja por 24 horas y al otro día se desmonta del molde.

Imagen 21 Equipo para fabricación de placas de pavimento



Fuente: Propia

7.3. FASE DE ENSAYOS.

7.3.1. CALCULO VOLUMEN DE VACÍOS COMUNICANTES.

Para el cálculo del volumen de vacíos totales de las placas a estudiar se llevó a cabo el siguiente procedimiento, especificado en la tesis Doctoral “*ASFALTOS E MISTURAS MODIFICADAS COM MATERIAIS ALTERNATIVOS*” del Ing. PhD. Juan Gabriel Bastidas Martínez¹⁰, el cual se describe a continuación:

El volumen de vacíos totales se compone de los vacíos comunicantes o efectivos, vacíos semi-efectivos y los vacíos ineficaces.

Para el cálculo del volumen de vacíos totales se utiliza la ecuación (1)

$$Vv = \frac{DMT - d}{DMT} * 100 \quad (1)$$

¹⁰BASTIDAS MARTINEZ, Juan Gabriel. *ASFALTOS E MISTURAS MODIFICADAS COM MATERIAIS ALTERNATIVOS*, Brasilia. 2017. 242p. Tesis de doctorado (Geotecnia). Universidad de Brasilia. Facultad de Tecnología. Departamento de Ingeniería civil y ambiental.

Donde:

DMT= Densidad Máxima Teórica (g/cm³)

d= densidad aparente (g/cm³)

La Densidad Máxima Teórica (DMT) se determina utilizando la ecuación(2)

$$DMT = \frac{100}{\frac{\%ag}{dag} + \frac{\%am}{dam} + \frac{\%f}{df} + \frac{\%la}{dla}} \quad (2)$$

Donde

%(ag, am, f, la) = porcentaje del agregado: grueso (grava), medio (arena), Filer (pasa 200) y ligante asfáltico.

d (ag, am, f, la) = masa específica real de cada uno de los agregados: grueso (grava), medio (arena), Filer (pasa 200) y ligante asfáltico.

La densidad aparente (d) se obtiene utilizando la ecuación(3)

$$d = \frac{Ma}{\frac{Maf}{dagua} - \frac{Mi}{dagua} - \left(\frac{Mf}{df}\right)} \quad (3)$$

Donde:

Ma= peso de la placa a estudiar seca al aire (g).

Maf= peso de la placa a estudiar seca al aire + película de PVC (g).

Mi = peso de la placa a estudiar + película de PVC sumergidos en agua (g).

Mf= peso de la película de PVC (g)

df = peso específico de la película de PVC(0.47 g/cm³).

Para determinar el volumen de vacíos comunicantes, primero debemos determinar el volumen de la placa+ vacíos ineficaces (Va), para esto se utiliza la ecuación (4)

$$Va = \frac{Ma - Mi}{dagua} \quad (4)$$

Donde:

Va= Volumen de la placa+ vacíos ineficaces (cm³)

Ma= Peso de la placa a estudiar seca al aire (g).

Mi= peso de la placa a estudiar inmersa en agua después de un (1) minuto de sumergirla

d agua= densidad del agua(g/cm³)

Posterior a esto, determinamos el volumen de vacíos comunicantes utilizando la ecuación (5)

$$V_{vc} = \frac{V - V_a}{V} * 100 \quad (5)$$

Donde:

V_{vc} = Volumen de vacíos comunicantes (%)

V = volumen geométrico (cm^3)

V_a = Volumen de la placa+ vacíos ineficaces (cm^3)

7.3.2. ENSAYO PERMEÁMETRO LCS.

Finalmente, con el permeámetro LCS montado y listo para usarse, se realizaron los ensayos del equipo con cada una de las probetas previamente realizadas, con el fin de determinar su correcto funcionamiento, se comprobó que con la mezcla MDC1 el dispositivo logra trabajar funcionalmente.

El procedimiento que se realizó en los ensayos fue el siguiente:

1. Se prepara el espécimen a ensayar el cual es puesto sobre una base estable.
2. Posteriormente se coloca el caucho celular y el equipo PERMEMAMETRO LCS sobre este.
3. Se toma la cantidad de agua necesaria para que esta alcanza una medida en la escala métrica del tubo transparente de 427 mm y unos 10 cm más.
4. Se retira el tapón del equipo y se deja saturar la muestra.
5. Se vuelve a cargar el tubo transparente con la misma cantidad de agua anterior, y se toma el tiempo que esta tarda en infiltrarse a través del espécimen.
6. Se repite el ensayo para obtener una cantidad representativa la cual corresponde a aproximadamente 10 ensayos.

8. RESULTADOS.

8.1 VOLUMEN DE VACÍOS TOTALES.

1. Organizando los porcentajes de los agregados de cada una de las placas obtuvimos lo siguiente:

Tabla 12 Porcentaje de los agregado por placa

PLACA	Porcentaje agregados (%)			
	grueso	medio	filler	ligante
MDC-1	46,55	43,7	4,75	5
MDC-2	40,85	48,45	5,7	5
MDC-3	22,8	65,08	7,12	5

Fuente propia

- * Se utilizaron los siguientes valores para las densidades

Tabla 13 Densidades de los materiales

Material	Densidad (g/cm ³)
Agregado grueso	2,642
agregado medio	2,598
filler	2,719
Ligante asfáltico	1,044
agua(15,6°C)	0,99
Filme PVC	0,47

Fuente: Bastidas Martínez, Juan Gabriel. Asfaltos e Misturas Modificadas com Materiais Alternativos¹¹

¹¹BASTIDAS MARTINEZ, Juan Gabriel. ASFALTOS E MISTURAS MODIFICADAS COM MATERIAIS ALTERNATIVOS, Brasilia. 2017. 242p. Tesis de doctorado (Geotecnia). Universidad de Brasilia. Facultad de Tecnología. Departamento de Ingeniería civil y ambiental.

2. Se realizaron los cálculos para determinar la densidad aparente (d) de cada una de las placas utilizando la ecuación (3).

Tabla 14 calculo densidad aparente de las placas

PLACA	Masa placa en aire	Masa placa + Filme PVC en aire	Masa placa sumergida	Masa placa + filme PVC sumergida	masa filme	d
	(g)	(g)	(g)	(g)	(g)	(g/cm ³)
MDC-1	5085.40	5100.90	2969.20	2311.69	15.50	1.83
MDC-2	5397.10	5427.80	2976.90	2704.50	30.70	2.01
MDC-3	5238.20	5270.79	2449.80	2180.20	32.59	1.72

Fuente propia

3. Posterior a esto, se realizó los cálculos respectivos para determinar el volumen de vacíos comunicantes de las placas.

Tabla 15 Calculo volumen de vacíos comunicantes

PLACA	DMT	Vv	Va	Volumen	Vvc
	(g/cm ³)	(%)	(cm ³)	(cm ³)	(%)
MDC-1	2.44	25.16	2152.12	2916.00	26.20
MDC-2	2.44	17.61	2459.19	2916.00	15.67
MDC-3	2.43	29.49	2831.11	2916.00	2.91

Fuente propia

8.2 PERMEÁMETRO LCS.

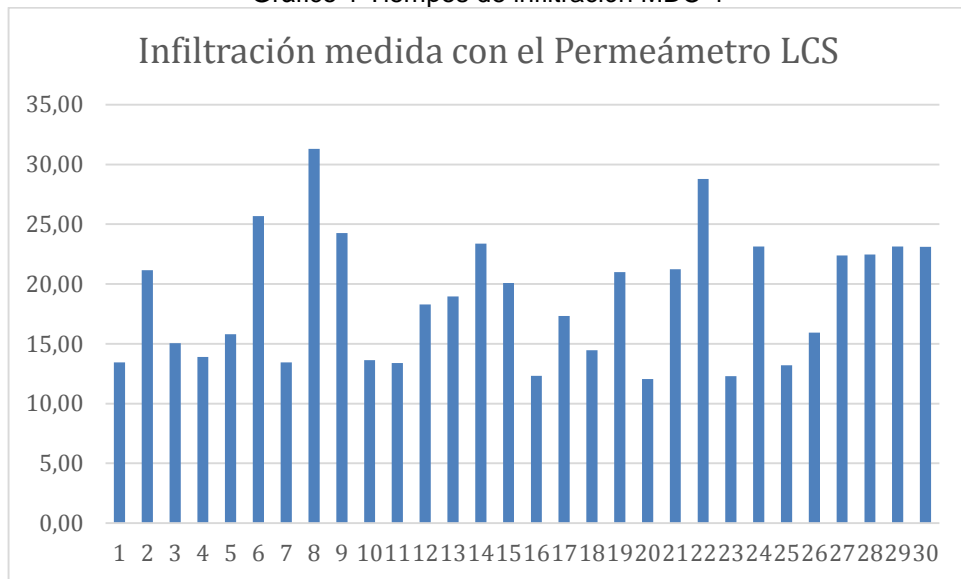
Se realizaron los 30 ensayos con agua potable en diferentes puntos de la probeta MDC1 para una mejor distribución de los ensayos con el fin de obtener resultados más reales del tiempo de infiltración de la tabla que son los siguientes:

Tabla 16 Tiempo de infiltración por ensayo de permeámetro LCS de dos tipos de mezclas drenantes

No. Ensayo	Ubicación del eje del equipo		Tiempo (s)
	X (cm)	Y (cm)	
1	17.0	10.0	13.44
2	19.0	16.4	21.16
3	13.5	15.0	15.05
4	9.5	17.6	13.90
5	7.0	9.2	15.79
6	11.0	9.5	25.67
7	17.0	8.5	13.45
8	19.2	16.5	31.30
9	13.5	17.0	24.26
10	9.2	16.5	13.63
11	10.0	12.3	13.39
12	12.6	14.5	18.29
13	15.5	10.5	18.96
14	16.0	15.0	23.39
15	12.5	17.0	20.09
16	10.5	16.5	12.32
17	8.5	12.4	17.32
18	8.7	8.7	14.45
19	13.5	10.0	20.99
20	18.0	8.0	12.06
21	19.5	13.0	21.24
22	19.5	16.0	28.80
23	7.5	9.3	12.30
24	7.8	13.7	23.13
25	7.5	9.2	13.19
26	11.7	17.4	15.94
27	13.7	13.2	22.40
28	13.7	13.2	22.47
29	13.7	13.2	23.14
30	13.7	13.2	23.11
Promedio (s)			18.82

Fuente: Propia

Gráfico 1 Tiempos de infiltración MDC-1



Fuente: Propia

Acorde con la ecuación (6) para el cálculo del porcentaje de vacíos del pavimento (%v) extraída de la norma INV-E-796-13 obtuvimos el siguiente resultado:

$$\ln k = 7.624 - 1.348(T) \quad (6)$$

Dónde: K: Coeficiente de permeabilidad, $\text{cm/s} \times 10^{-2}$

T: Tiempo de evacuación del agua, s

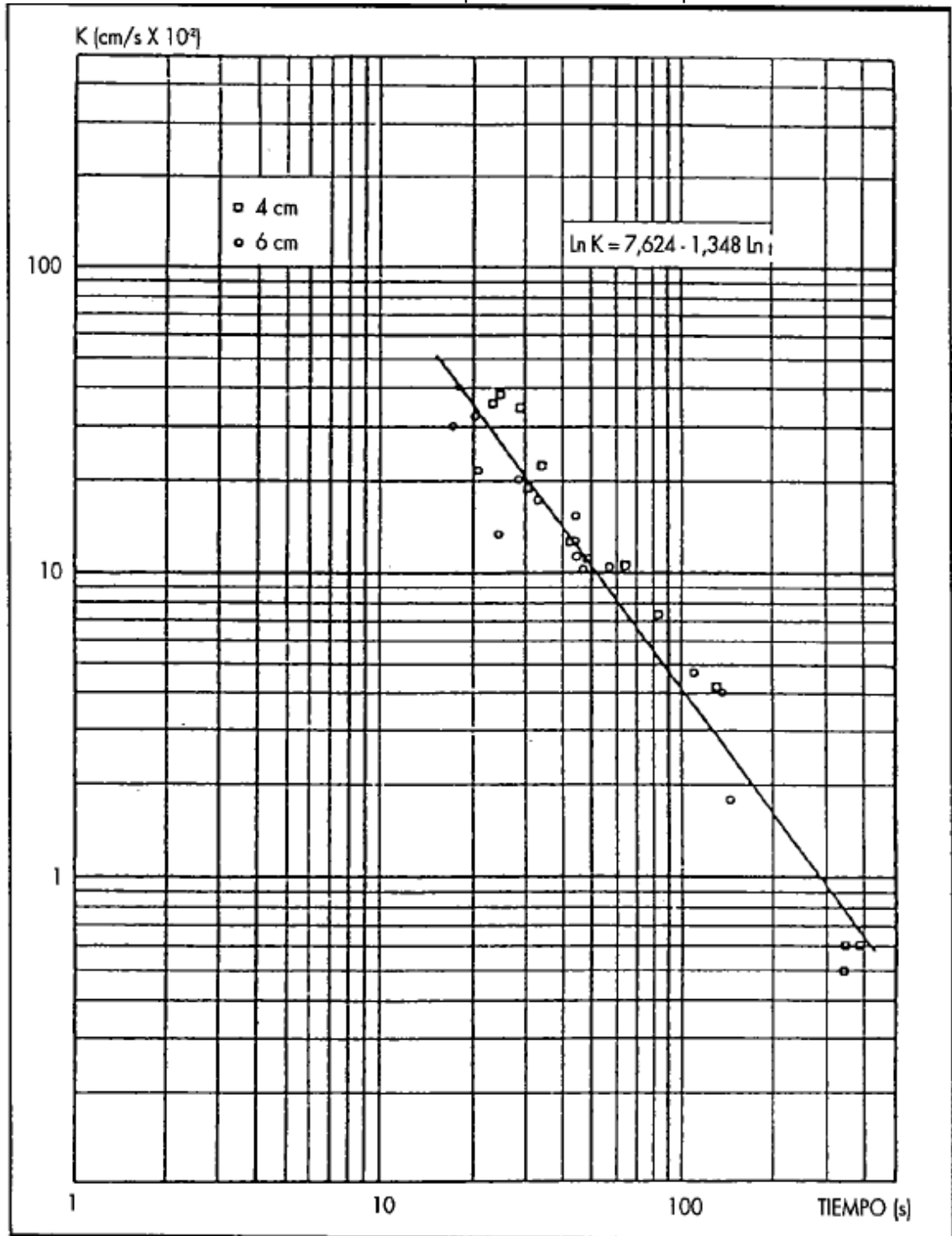
$$\ln k = 7.624 - 1.348 \ln (18.82)$$

$$\ln k = 3.67$$

De acuerdo con la tabla de correlación de coeficiente de permeabilidad - tiempos de la norma INV-E-796-13.

Realizando la función inversa de logaritmo natural nos da un resultado de $39.16 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$.

Gráfico 2 Correlación coeficiente de permeabilidad vs tiempo de evacuación



Fuente: NTL 327/00

Además, el % de vacíos de la probeta se calcula usando la ecuación (7):

$$Va = \frac{58.6}{T^{0.305}} \quad (7)$$

Dónde: Va: Contenido de vacíos con aire en la capa drenante ensayada, %

T: Tiempo de evacuación del agua, s

$$Va = \frac{58.6}{18.82^{0.305}}$$

$$Va = 23.94\%$$

9. ANÁLISIS DE RESULTADOS.

Actualmente este equipo no es un producto de venta en Bogotá D.C., por lo que se procedió a fabricar el equipo según especificaciones de INVIAS.

Una vez fabricado el equipo se evidenciaron diferencias mínimas en las dimensiones especificadas en la norma, las cuales no afectan el resultado del ensayo debido que no alteran la presión hidrostática de cabeza variable con la que funciona el equipo, ni el diámetro de salida de la columna de agua:

- Una base de apoyo, formado por una probeta rígida circular de acero, 164.54mm de diámetro y 18.78mm de espesor, con un orificio circular en su centro, de 29.50mm de diámetro.
- Un tubo cilíndrico circular, de unos 30.50mm de diámetro exterior, 29.50mm de diámetro interior y 48mm de altura.
- Un tubo cilíndrico transparente de 89.36mm de diámetro interior y unos 500 mm de altura, unido rígidamente y con cierre estanco a la base de apoyo. El tubo lleva marcadas dos señales de medida, grabadas en toda su periferia y situadas respectivamente a 150 y 427mm del fondo de la base de apoyo.
- Una pesa tórica de 20.908 kg de masa.
- Un anillo circular estanco de caucho celular de 8.61mm de espesor, que se adapta perfectamente a las irregularidades superficiales del pavimento e impide el escape superficial del agua durante el ensayo. Para ello, su deformación o reducción de espesor fue medida bajo la carga de la pesa tórica la cual nos dio un 10.62% de deformación a los 30 segundos de carga, alcanzando una deformación final constante de 12.69% a los 5 minutos y el que tiende a ser constante si deformarse más.

Estas diferencias aquí presentadas no afectan el funcionamiento del equipo ya que teniendo en cuenta el principio básico con el cual este funciona que es una presión hidrostática variable, la presión que genera la columna de agua viene dada por la ecuación de peso específico del líquido por la profundidad.

Para facilidad de la toma de datos se elevó la marca inferior a 150mm, dado que la pesa tórica dificulta la toma de datos.

Sin embargo, la diferencia del diámetro interno del tubo transparente hace que el volumen de agua a infiltrar varíe, por lo cual se realiza un ajuste a la marca superior del tubo transparente quedando finalmente en 427mm con el fin de contrarrestar la variación de volumen.

En el caso de la pesa tórica la cual ayuda a ejercer presión al anillo de caucho celular, con el fin de que se adapte a la superficie y funcione como un sello alrededor del agujero por donde desciende el agua. El peso de este quedó finalmente con 408 gr por encima del descrito en norma, sin embargo, este peso adicional ayuda al anillo celular se adapte mucho mejor en superficie más rugosas como la es la de la mezcla drenante, sin que llegue al aplastamiento del caucho celular.

El caucho celular se deforma 10.62% a los 30 segundos y 12.69% a los 5 minutos más que el indicado en la norma, pero es una deformación que deja de incrementarse y este porcentaje adicional ayuda a adoptarse un poco mejor a este tipo de superficies como la del pavimento drenante.

“Además el equipo no requiere ningún tipo de calibración ya que cuenta con las marcas respectivas para realizar la medición del tiempo del tiempo de infiltración del volumen correspondiente”.¹²

Por facilidades del desarrollo del proyecto el equipo fue realizado con una probeta MDC-1, MDC-2 y MDC-3 de dimensiones de 4cm x 27cm x 27cm y un porcentaje de cemento asfáltico convencional 80-100 de 5%. En el caso de la MDC-2 y MDC-3 las características granulométricas según la norma INVIAS ARTÍCULO 450-13, se muestran en las tablas a continuación:

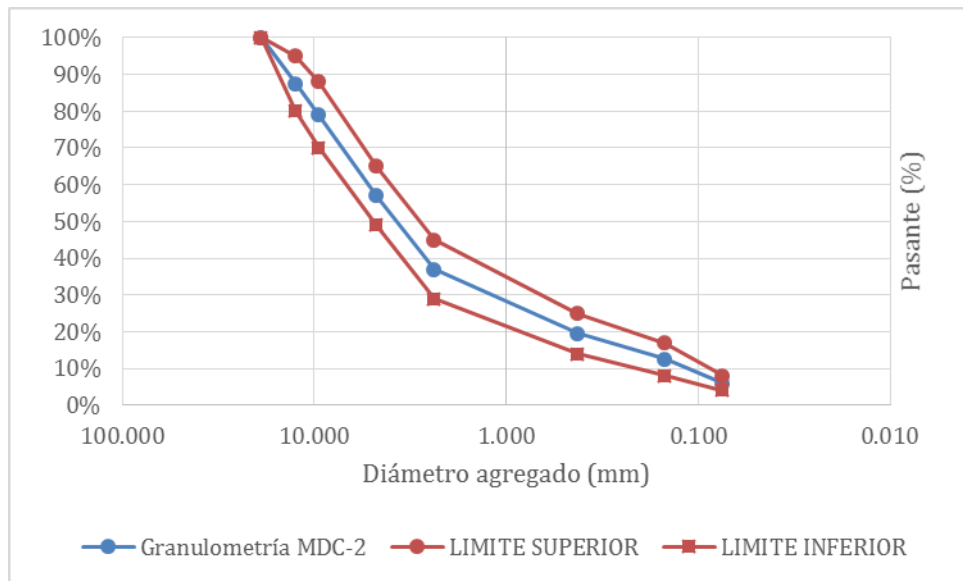
Tabla 17 Granulometría MDC-1, MDC-2 y MDC-3

TIPO DE MEZCLA		TAMIZ (mm / U.S. Standard)									
		37.5	25.0	19.0	12.5	9.5	4.75	2.00	0.425	0.180	0.075
		1 ½"	1"	¾"	½"	3/8"	No. 4	No. 10	No. 40	No. 80	No. 200
		% PASA									
DENSEA	MDC-25		100	80-95	67-85	60-77	43-59	29-45	14-25	8-17	4-8
	MDC-19			100	80-95	70-88	49-65	29-45	14-25	8-17	4-8
	MDC-10					100	65-87	43-61	16-29	9-19	5-10

Fuente: Artículo 450-13 INVIAS

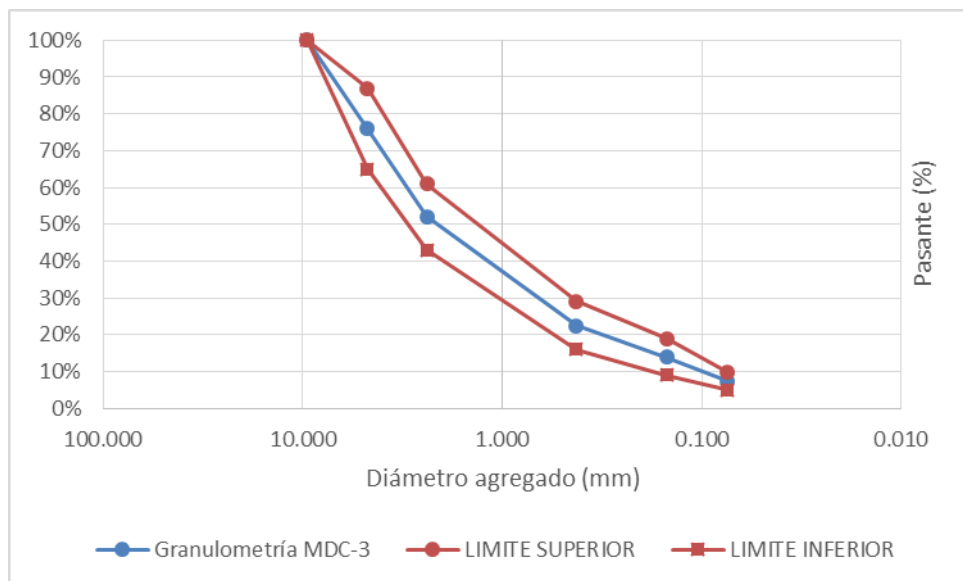
¹² RODRÍGUEZ HERNANDEZ, Jorge. Estudio, análisis y diseño de secciones permeables de firmes para vías urbanas con un comportamiento adecuado frente a la colmatación y con la capacidad portante necesaria para soportar tráficos ligeros. Santander, España. 2008. 515p. Tesis Doctoral (Doctor). Universidad de Cantabria.

Gráfico 3 Granulometría MDC-2



Fuente: Propia

Gráfico 4 Granulometría MDC-3



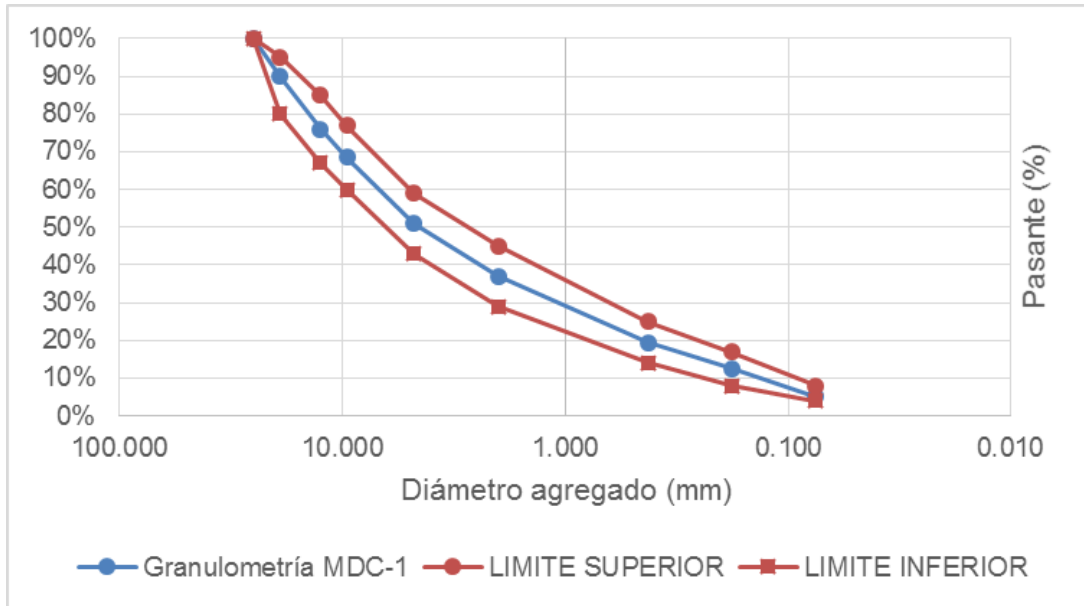
Fuente: Propia

Se puede observar que la graduación se vuelve más fina, lo que permite un mejor grado de compactación y una mejor transmisión de las cargas, sin embargo, esto impide la infiltración del agua, lo que no permite evaluar este parámetro en este tipo de pavimentos.

No obstante, a lo anterior, se realizó el ensayo de estas dos probetas dejándolas por 5 minutos y se pudo apreciar que el nivel de agua en la marca superior del equipo no descendió, por lo que se concluye que este ensayo no es funcional para muestras con granulometrías tan cerradas.

La probeta MDC-1, tiene las siguientes características granulométricas según la norma INVIAS ARTÍCULO 450-13:

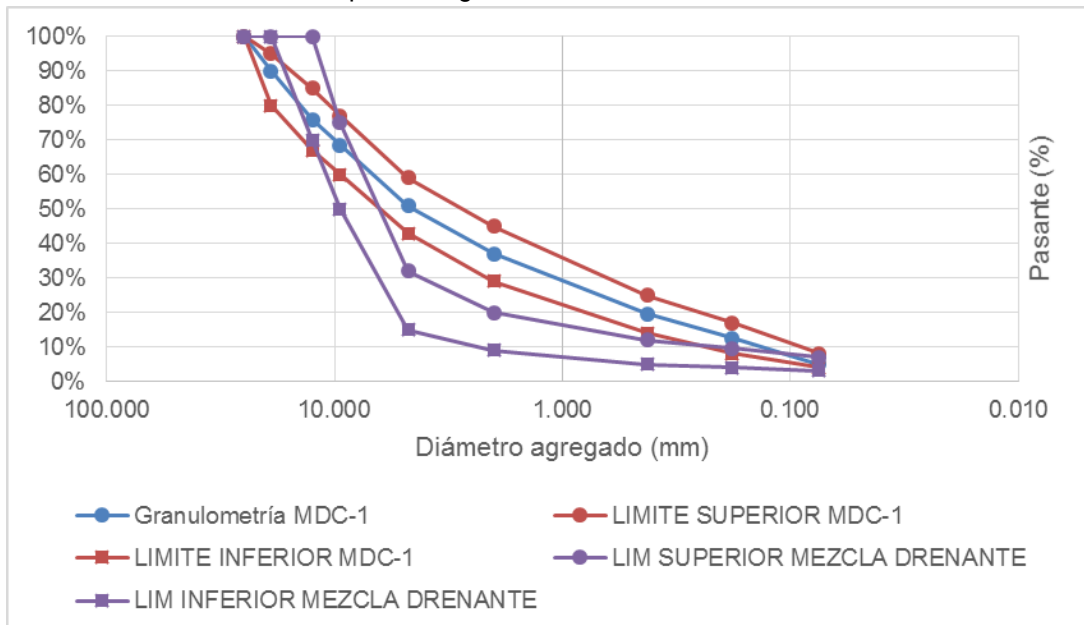
Gráfico 5 Granulometría MDC-1



Fuente: Propia

A continuación, se presenta la comparación de la granulometría de la mezcla drenante con la MDC1:

Gráfico 6 Comparación granulometría MDC-1 con Mezcla drenante



Fuente: Propia

Se puede notar que en el tamiz No.10 (2mm) pasa un porcentaje de 29-45%, lo que significa que tiene una capacidad menor de infiltración, en comparación con la mezcla drenante que en el tamiz No.10 (2mm) solo pasa del 9-20% de la muestra ensayada, lo que se puede concluir que la mezcla drenante tiene una gradación más continua en comparación a la MDC-1, lo que ayuda a que este pavimento tenga una mejor infiltración.

Teniendo en cuenta el gráfico anterior se ingresa con el valor promedio que fue de 18.82 segundos. Ahora bien, el valor anterior resulta de la función inversa de logaritmo natural a $\ln k=3.67$, siendo esta la función de euler elevado al valor a invertir, dándonos como resultado 39.16×10^{-2} cm/s que es la velocidad de descenso del nivel de agua al interior del tubo cilíndrico transparente al igual que el coeficiente de permeabilidad del pavimento drenante.

“Una mezcla drenante se considera deficiente cuando el tiempo de infiltración se encuentra sobre de los doscientos segundos y apreciable cuando se encuentra por debajo de los 100 segundos. Una mezcla bituminosa recién instalada debe ser menor de los cincuenta segundos, preferiblemente entre los veinticinco y treinta y cinco segundos. (Pérez y Calzada 1990)”.¹³

Teniendo en cuenta los siguientes resultados encontrados en la tesis doctoral del Ing. Jorge Rodríguez Hernández (2008) sobre los tiempos de infiltración:

Tabla 18 Tiempos medios de infiltración por permeámetro LCS
Tabla III-7. Tiempos de infiltración obtenidos con el permeámetro LCS sobre las probetas de mezcla bituminosa a ensayar con el ICF.

Probeta	Tiempo medio entre marcas (s)	Estimación de los huecos en mezcla (%)	Superficie de ensayo
1	33,0	20,2	Cara INFERIOR
2	15,7	25,2	Cara INFERIOR
3	27,3	21,3	Cara INFERIOR
4	11,1	28,1	Cara SUPERIOR
5	8,9	30,0	Cara SUPERIOR
6	13,7	26,3	Cara SUPERIOR
MEDIA	18,3	25,2	MEDIA

Fuente: Rodríguez Hernández Jorge, Estudio, análisis y diseño de secciones permeables de firmes para vías urbanas con un comportamiento adecuado frente a la colmatación y con la capacidad portante necesaria para soportar tráfico ligeros.¹³

¹³ RODRÍGUEZ HERNANDEZ, Jorge. Estudio, análisis y diseño de secciones permeables de firmes para vías urbanas con un comportamiento adecuado frente a la colmatación y con la capacidad portante necesaria para soportar tráfico ligeros. Santander, España. 2008. 515p. Tesis Doctoral (Doctor). Universidad de Cantabria.

Adicional a lo anterior, se muestran los tiempos de infiltración de dos pavimentos con diferente granulometría:

Tabla 19 Granulometría mezclas drenantes

TABLE 1 GRADINGS

GRADING	% PASSING						
	20mm	12,5mm	10mm	5mm	2.5mm	0.63mm	0,08mm
P - 12	100	75-100	60-90	32-50	10-18	6-12	3-6
PA - 12	100	70-100	50-80	15-30	10-22	6-13	3-6

Fuente: Aurelio Ruiz, Roberto Alberola, Félix Pérez, Bartolomé Sánchez. Porous Asphalt Mixtures in Spain.¹⁴

Tabla 20 Tiempo de infiltración por ensayo de permeámetro LCS de dos tipos de mezclas drenantes

TABLE 5 PERMEABILITY (SANTANDER TEST SECTIONS)

Test Section	Permeability (seg)				
	Initial	4 Months	2 years	4 Years	9 Years
I	30	75	180	288	silting up
II	46	70	100	159	220

Fuente: Aurelio Ruiz, Roberto Alberola, Félix Pérez, Bartolomé Sánchez. Porous Asphalt Mixtures in Spain.¹⁴

Ahora bien, comparando el tiempo de infiltración de la mezcla drenante debe ser menor de 30 segundos para ser considerado un tiempo razonable de infiltración, contra los resultados arrojados por los ensayos de la probeta MDC1, podemos ver que se encuentra en rangos aceptables, lo que deja concluir que el equipo se encuentra en buenas condiciones de funcionamiento para realizar este ensayo y su uso en el laboratorio.

Teniendo en cuenta la ecuación para hallar el porcentaje de vacíos totales (eficaces, semi-eficaces e ineficaces), planteada en la tesis doctoral del Ing. Juan

¹⁴ RUÍZ, Aurelio. ALBEROLA, Roberto. PÉREZ, Félix. SÁNCHEZ, Bartolomé. Porous Asphalt Mixtures in Spain. En: Revista Transportation Research Record. No. 1265 (Nov 1990); p. 87-94.

Gabriel Bastidas Martínez¹⁵, además de la ecuación para el cálculo de vacíos publicado en la norma INV-E-796-13, se puede evidencia que la diferencia de los vacíos totales es mínima, siendo la calculada por la ecuación de la norma mencionada anteriormente 23.94% y la realizada por el ensayo de 25.16%, siendo el permeámetro una manera efectiva de calcular el porcentaje de vacíos totales de una muestra in situ ya que ambos ensayos se tienden a tomar el mismo tiempos para realizarse.

¹⁵BASTIDAS MARTINEZ, Juan Gabriel. ASFALTOS E MISTURAS MODIFICADAS COM MATERIAIS ALTERNATIVOS, Brasilia. 2017. 242p. Tesis de doctorado (Geotecnia). Universidad de Brasilia. Facultad de Tecnología. Departamento de Ingeniería civil y ambiental.

10. NORMATIVIDAD.

- INV-E 796-13 – PERMEABILIDAD IN SITU DE CAPAS ASFÁLTICAS DRENANTES CON EL PERMEÁMETRO LCS (LABORATORIO DE LA ESCUELA DE CAMINOS DE SANTANDER, ESPAÑA).
- INV-E-805-13 – MEDIDA DE LA PERMEABILIDAD DE MEZCLAS ASFÁLTICAS PARA PAVIMENTACIÓN EMPLEANDO UN PERMEÁMETRO DE PARED FLEXIBLE.
- ARTÍCULO 400-13 – INVIAS – DISPOSICIONES GENERALES PARA LA EJECUCION DE RIEGOS DE IMPRIMACIÓN, LIGA Y CURADO, TRATAMIENTOS SUPERFICIALES, SELLOS DE ARENA ASFALTO, LECHADAS ASFÁLTICAS, MEZCLAS ASFÁLTICAS EN FRIÓ Y EN CALIENTE Y RECICLADO DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS.
- ARTÍCULO 410-13 – INVIAS – SUMINISTRO DE CEMENTO ASFÁLTICO.
- ARTÍCULO 414-13 – INVIAS – SUMINISTRO DE CEMENTO ASFÁLTICO MODIFICADO CON POLÍMEROS.
- ARTÍCULO 450-13 – INVIAS - MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE DE GRADACIÓN CONTINUA (CONCRETO ASFÁLTICO).
- ARTÍCULO 453-13 – INVIAS – MEZCLA DRENANTE.
- NORMA TÉCNICA COLOMBIANA - NTC 1486

11. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- De acuerdo al método para el cálculo del porcentaje de vacíos planteado por el Ing. Juan Gabriel Bastidas Martínez la diferencia es mínima DE 1.22% en comparación al método del permeámetro LCS, lo que da certeza de la fiabilidad de este ensayo in situ.
- Los tiempos de infiltración obtenidos son acordes al porcentaje de vacíos que se obtuvo de la placa MDC-1.
- Se evidencia que la el porcentaje de vacíos comunicantes es mucho menor en las placas MDC-2 y MDC-3, lo que justifica que el agua no se infiltre en ellos.
- Al tener tiempos de infiltración menores en ciertas zonas, indican la presencia de un mayor porcentaje de vacíos eficaces y semi eficaces en dicha zona.
- Al comparar ambos porcentajes de vacíos totales, se puede concluir que el equipo se encuentra en correcto funcionamiento para su uso.
- Teniendo en cuenta los tiempos de infiltración citados por los autores sobre pavimentos drenantes ensayados, además del rango de porcentaje de vacíos que los pavimentos drenantes deben cumplir. Se puede concluir que la un pavimento MDC-1 puede funcionar como un pavimento drenante.
- Se recomienda realizar el ensayo en varios puntos de la muestra con el fin de obtener un resultado más fiable, ya que se pueden encontrar zonas más porosas que otras.
- Se recomienda realizar ensayos con la mezcla drenante según las especificaciones del INVIAS ARTÍCULO 453, para el cual fue diseñado el equipo, a pesar de que la MDC-1 tiene una buena capacidad de infiltración como se explicó anteriormente.
- Se recomienda seguir con la investigación y realizar una comparación de acuerdo a las capacidades mecánicas de un pavimento drenante en comparación de un pavimento MDC-1, con el fin de determinar cuál tiene mejor respuesta a cargas, periodo de diseño, mantenimiento y costo.
- Se recomienda que la investigación sea abordada a mayor profundidad ya que puede ser publicada en una revista de ingeniería de alto impacto.

12. MANUAL DE USO.

1. Se prepara el espécimen a ensayar el cual es puesto sobre una base estable, en caso de realizar el ensayo IN SITU, se selecciona un punto en el pavimento para realizar el ensayo.
2. Se ubica el anillo de caucho celular sobre el espécimen o en el punto elegido y el equipo PERMEMAMETRO LCS sobre este.
3. Se toma la cantidad de agua necesaria para que está alcance un nivel unos 15 cm sobre la marca superior (cinta verde) de medida del tubo transparente.
4. Se retira el tapón del equipo y se deja vaciar el tubo con el fin de saturar la muestra o el pavimento en el área circundante al punto.
5. Se llena nuevamente el tubo transparente con la misma cantidad de agua anterior, y se toma el tiempo en segundos en el cual el nivel de agua desciende desde la marca superior (verde) hasta la inferior (roja), siendo este, el tiempo que tarda en infiltrarse a través del espécimen o del pavimento.
6. Se repite el procedimiento anterior con el fin de obtener un número representativo de ensayos disminuyendo la dispersión de datos (se recomienda realizar aproximadamente 10 ensayos).

Recomendaciones:

- Verificar el estado del área o muestra a ensayar, buscando que no posea impurezas ajenas al estado original del pavimento
- Al momento de retirar el tapón del equipo, realizarlo suavemente para evitar el burbujeo, lo cual perjudica la toma de datos.
- Verificar que el equipo se encuentre bien ubicado sobre el anillo de caucho celular se encuentre bien ubicado.
- Verificar que el agua efectivamente se esté infiltrando y no fluya por la parte superficial del pavimento.
- Se recomienda no sacar el corcho por completo ni muy rápido del cilindro ya que al atravesar la lámina de agua la cual está descendiendo genera burbujeo lo dificulta tomar el inicio de tiempo en la marca superior.

13. BIBLIOGRAFÍA.

BUSTOS, c. Y TOLEDO P. G., Pore-level modeling of two – phase flow in three-dimensional pore networks, en preparación. 2002.

ARANGO, S. (2015, mayo 4). Blog 360 en Concreto.

BRIGGS, J. Performance assessment of porous asphalt for stormwater treatment. Master of Science thesis submitted to the University of New Hampshire. Durham, NH. 2009.

YONG, C.F., Deletic, A., Fletcher, T.D. and Grace, M.R. (2008). Paper presented at the 11th International Conference on Urban Drainage (ICUD), Edinburgh, UK.

JUYAR MORA German, PÉREZ CELY Gabriel (Julio de 1998). Comparación de mezclas asfálticas drenantes fabricadas con asfalto modificado y sin modificar.

BRIGETH MENESES Jessica, ALBERTO PÁEZ Diego (2017). Mezcla asfáltica permeable como parte de la estructura de pavimento a partir del uso y modificación de una mezcla drenante aplicado a vías rurales.

Yong, C. F. Delectic, A. Fletcher, & M. R. Grace. "Porous pavements: Evaluation of clogging in two accelerated laboratory studies in Melbourne. 2009.

Campos Canessa, J. A. (2008). Seguimiento y comparación del comportamiento de tramos con mezcla drenante, según zona geográfica y condiciones locales. Memoria para optar al título de ingeniero civil. Chile: Universidad de Chile.

AYALA Marvin Emmanuel, JUÁREZ Ivy Eneida (noviembre 2010). Diseño de mezcla drenante con asfalto modificado disponible en el salvador.

Intromac (marzo 2015). Jornada técnica pavimentos de hormigón en entornos urbanos y de edificación.

Especificaciones y Normas INVIAS - INV E 796-13.

GÓMEZ GONZÁLEZ, G., RODRÍGUEZ BENAVIDES, A., & TORRES, A. (2010). Durabilidad de las capacidades filtrantes de la capa de rodadura de un pavimento poroso rígido. XXIV Congreso Latinoamericano de Hidráulica, (p. 11). Punta del Este, Uruguay.

CABRERA J.G., DIXON J.R. Performance and Durability of Bituminous Materials Londres, Inglaterra. E & FN SPON (2005). Pagina 9.

Perez Cely, G., & Juyar Mora, G. (1998). Comparación de mezclas asfálticas drenantes fabricadas con asfalto modificado y sin modificar. Revista facultad de Ingeniería, universidad Nueva Granada.

LÓPEZ M Carol. (2013). Comportamiento mecánico de mezclas asfáltica drenante.

Yee Wan Yung Vargas (2013). Caracterización, diseño y verificación de una mezcla asfáltica drenante en caliente modificada con grano de llanta triturado y fibra kaltex.

Fernández-Barrera, A., Castro-Fresno, D., Rodríguez-Hernández, J., and Calzada-Pérez, M. (2008). "Infiltration Capacity Assessment of Urban Pavements Using the LCS Permeameter and the CP Infiltrometer." J. Irrig. Drain Eng. 134, SPECIAL ISSUE: Urban Storm-Water Management, 659–665.

SANTAMARIA CALLEJA Marcos, Rehabilitación y humanización de la carretera de la ronda norte en Ponferrada, Ponferrada –Documento No.3 Pliego de Prescripciones técnicas-, España., 2015, 35p, Proyecto fin de grado, Universidad de La Coruña.

RUÍZ, Aurelio. ALBEROLA, Roberto. PÉREZ, Félix. SÁNCHEZ, Bartolomé. Porous Asphalt Mixtures in Spain. Nov 1990.

RODRÍGUEZ HERNANDEZ, Jorge. Estudio, análisis y diseño de secciones permeables de firmes para vías urbanas con un comportamiento adecuado frente a la colmatación y con la capacidad portante necesaria para soportar tráficos ligeros. Santander. 2008.

FLORIDA DEPARTMENT OF TRANSPORTATION. Normas. Actualización 2015. Gainesville, Florida. DOT FM 5-565

BASTIDAS MARTINEZ, Juan Gabriel. Asfaltos e misturas modificadas com materiais alternativos. 2017. xxv, 217 f., il. Tese (Doutorado em Geotecnia)—Universidade de Brasília, Brasília, 2017. Pag. 67-73.

NASCIMENTO Catia cristiana Carmona do. Avaliação da permeabilidade de msturas betuminosas drenantes em laboratórios e "In Situ". 2012. Tese de mestrado integrado. Engenharia Civil - Especialização em Vias de Comunicação. Faculdade de Engenharia. Universidade do Porto. 2012. Pag 51.

14. ANEXOS.

PERMEABILIDAD IN SITU DE CAPAS ASFÁLTICAS DRENANTES CON EL PERMEÁMETRO LCS (LABORATORIO DE LA ESCUELA DE CAMINOS DE SANTANDER, ESPAÑA)

INV E – 796 – 13

1 OBJETO

- 1.1 Esta norma describe el procedimiento a seguir para realizar medidas de permeabilidad in-situ en las mezclas drenantes utilizadas en capas de rodadura y bermas.
- 1.2 Esta norma reemplaza la norma INV E-796-07.

2 RESUMEN DEL MÉTODO

- 2.1 El ensayo se fundamenta en la medición del tiempo que tarda en pasar un volumen fijo de agua a través de una capa asfáltica drenante de pavimento bajo condiciones especificadas, empleando un permeámetro de carga variable. A partir de este tiempo, se estima el coeficiente de permeabilidad de la capa empleando una fórmula desarrollada por el LCS de Santander, España.

3 IMPORTANCIA Y USO

- 3.1 Uno de los inconvenientes que pueden presentar las capas de rodadura drenantes, es la posibilidad de que sus vacíos se obstruyan con la llegada de sedimentos, perdiendo así muchas de sus ventajas (infiltración rápida del agua lluvia, alta resistencia al deslizamiento, reducción de las proyecciones de agua al paso de los vehículos en instantes de lluvia, mejor visibilidad del pavimento mojado, etc.).
- 3.2 Debido a ello, un dato importante a considerar en la evaluación de las capas de rodadura drenantes es la evolución de su capacidad de infiltración. Para ello, el método normalmente utilizado consiste en medir su permeabilidad mediante el empleo de permeámetros.

4 EQUIPO Y MATERIALES

4.1 *Permeámetro LCS* – Representado en la Figura 796 - 1 y constituido por los siguientes elementos principales:

- 4.1.1 Una base de apoyo, formada por una placa rígida circular de acero, de 165 mm de diámetro y 10 mm de espesor, con un orificio circular en su centro, de 40 mm de diámetro.
- 4.1.2 Un tubo cilíndrico circular, de unos 40 mm de diámetro exterior, 30 mm de diámetro interior y 45 mm de altura, incrustado como se indica en la Figura 796 - 1, en el orificio circular de la base de apoyo.
- 4.1.3 Un tubo cilíndrico transparente de 94 mm de diámetro interior y unos 500 mm de altura, unido rígidamente y con cierre estanco a la base de apoyo. El tubo lleva marcadas dos señales de medida, grabadas en toda su periferia y situadas respectivamente a 100 y 350 mm del fondo de la base de apoyo.
- 4.1.4 Una pesa tórica de 20 ± 0.5 kg de masa, cuyo orificio y base permitan un apoyo estable sobre la placa circular.
- 4.1.5 Un anillo circular estanco de caucho celular de 16 mm de espesor, que se adapte perfectamente a las irregularidades superficiales del pavimento para impedir el escape superficial del agua durante el ensayo. Para ello, su deformación o reducción de espesor bajo la carga de la pesa tórica deberá ser de 8 ± 0.5 % a los 30 segundos de carga, alcanzando una deformación final constante de 12 ± 0.5 % a los 5 minutos.

4.2 *Reserva de agua* – Mínima de 20 litros por ensayo.

4.3 *Cronómetro* – Con una precisión de 0.5 segundos.

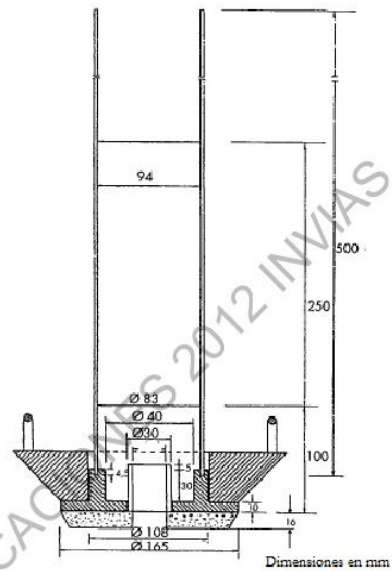


Figura 796 - 1. Permeámetro LCS

5 PROCEDIMIENTO

- 5.1 Se sitúa el permeámetro en el punto del pavimento elegido para el ensayo y se coloca la pesa tórica sobre la base.
- 5.2 A continuación, se llena con agua el tubo transparente del permeámetro hasta unos 15 cm por encima de la marca superior de medida, y se deja que se vacíe a continuación para mojar y saturar el pavimento en la zona de medida.
- 5.3 Seguidamente, se vuelve a llenar el permeámetro de la misma forma y se anota el tiempo de evacuación, en segundos, que tarda el nivel del agua en descender desde la marca superior de medida hasta la inferior.

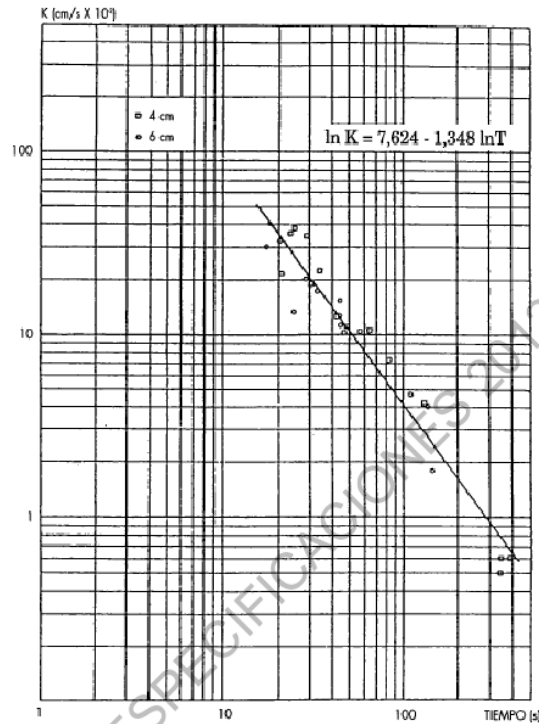


Figura 796 - 2. Correlación coeficiente de permeabilidad – tiempo

6 CÁLCULOS

- 6.1 El resultado del ensayo realizado sobre un punto del pavimento será el tiempo, en segundos, obtenido según lo indicado en el numeral 5.3.
- 6.2 Se determina el coeficiente permeabilidad de la capa ensayada, aplicando la siguiente correlación, determinada por el LCS de Santander a partir de los valores representados en la Figura 796 - 2:

$$\ln K = 7.624 - 1.348 \ln T$$

[796.1]

Donde: K: Coeficiente de permeabilidad, $\text{cm/s} \times 10^{-2}$;

T: Tiempo de evacuación del agua, s

Nota 1: La correlación fue obtenida al estudiar mezclas asfálticas drenantes con las características que se presentan en seguida y en espesores de capa comprendidos entre 4 y 6 cm:

Tamaño máximo del agregado, mm	10 – 12
% pasa tamiz de 2.5 mm (No. 8)	10 – 15
% pasa tamiz de 75 μm (No. 200)	2 – 6
% asfalto sobre masa del agregado	3.5 – 5.5

6.3 El contenido de vacíos con aire (V_a) de la capa ensayada se puede estimar con la expresión:

$$V_a = \frac{58.6}{T^{0.305}} \quad [796.2]$$

Donde: V_a : Contenido de vacíos con aire en la capa drenante ensayada, %;

T: Tiempo de evacuación del agua, s.

7 DOCUMENTOS DE REFERENCIA

NLT 327/00

RUIZ A., ALBEROLA R., PÉREZ-JIMÉNEZ F. & SÁNCHEZ B., "Porous Asphalt Mixtures in Spain" Transportation Research Record", Journal of the Transportation Research Board, No. 1265 (1990), pp. 87-94, National Research Council, Washington D.C.

15. REGISTRO FOTOGRÁFICO.