



CENTRO DE CIENCIAS DEL DISEÑO Y DE LA CONSTRUCCIÓN

DEPARTAMENTO DE GEOTECNIA E HIDRÁULICA

TESIS

ESTUDIO DE APLICACIÓN DE CONCRETO PERMEABLE EN ZONAS URBANAS

PRESENTA

Ing. Carlos Ignacio Vizcaíno López

PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL CON ESPECIALIDAD EN AMBIENTAL

TUTOR

Dr. Martín Hernández Marín

INTEGRANTES DEL COMITÉ TUTORIAL

Dr. José Ángel Ortíz Lozano

M. en I. José Luis López López

Aguascalientes, Ags., Abril de 2021

CARTA DE VOTO APROBATORIO
INDIVIDUAL

Dr. en C.T.C. Héctor Homero Posada Ávila
DECANO (A) DEL CENTRO DE CIENCIAS DEL DISEÑO Y DE LA CONSTRUCCIÓN

PRESENTE

Por medio del presente como **TUTOR** designado del estudiante **CARLOS IGNACIO VIZCAÍNO LÓPEZ** con ID **266191** quien realizó la tesis titulada: **ESTUDIO DE APLICACIÓN DE CONCRETO PERMEABLE EN ZONAS URBANAS**, un trabajo propio, innovador, relevante e inédito y con fundamento en el Artículo 175, Apartado II del Reglamento General de Docencia doy mi consentimiento de que la versión final del documento ha sido revisada y las correcciones se han incorporado apropiadamente, por lo que me permito emitir el **VOTO APROBATORIO**, para que él pueda proceder a imprimirlo así como continuar con el procedimiento administrativo para la obtención del grado.

Pongo lo anterior a su digna consideración y sin otro particular por el momento, me permito enviarle un cordial saludo.

ATENTAMENTE
"Se Lumen Proferre"
Aguascalientes, Ags., a 14 de abril de 2021.



Dr. Martín Hernández Marín
Tutor de tesis

c.c.p.- Interesado
c.c.p.- Secretaría Técnica del Programa de Posgrado

Elaborado por: Depto. Apoyo al Posgrado.
Revisado por: Depto. Control Escolar/Depto. Gestión de Calidad.
Aprobado por: Depto. Control Escolar/ Depto. Apoyo al Posgrado.

Código: DO-SEE-FO-07
Actualización: 01
Emisión: 17/05/19

CARTA DE VOTO APROBATORIO
INDIVIDUAL

Dr. en C.T.C. Héctor Homero Posada Ávila
DECANO (A) DEL CENTRO DE CIENCIAS DEL DISEÑO Y DE LA CONSTRUCCIÓN

PRESENTE

Por medio del presente como **COTUTOR** designado del estudiante **CARLOS IGNACIO VIZCAÍNO LÓPEZ** con ID **266191** quien realizó la tesis titulada: **ESTUDIO DE APLICACIÓN DE CONCRETO PERMEABLE EN ZONAS URBANAS**, un trabajo propio, innovador, relevante e inédito y con fundamento en el Artículo 175, Apartado II del Reglamento General de Docencia doy mi consentimiento de que la versión final del documento ha sido revisada y las correcciones se han incorporado apropiadamente, por lo que me permito emitir el **VOTO APROBATORIO**, para que él pueda proceder a imprimirlo así como continuar con el procedimiento administrativo para la obtención del grado.

Pongo lo anterior a su digna consideración y sin otro particular por el momento, me permito enviarle un cordial saludo.

ATENTAMENTE
"Se Lumen Proferre"
Aguascalientes, Ags., a 14 de abril de 2021.


Dr. José Ángel Ortiz Lozano
Cotutor de tesis

c.c.p.- Interesado
c.c.p.- Secretaría Técnica del Programa de Posgrado

Elaborado por: Depto. Apoyo al Posgrado.
Revisado por: Depto. Control Escolar/Depto. Gestión de Calidad.
Aprobado por: Depto. Control Escolar/ Depto. Apoyo al Posgrado.

Código: DO-SEE-FO-07
Actualización: 01
Emisión: 17/05/19

CARTA DE VOTO APROBATORIO
INDIVIDUAL

Dr. en C.T.C. Héctor Homero Posada Ávila
DECANO (A) DEL CENTRO DE CIENCIAS DEL DISEÑO Y DE LA CONSTRUCCIÓN

PRESENTE

Por medio del presente como **ASESOR** designado del estudiante **CARLOS IGNACIO VIZCAÍNO LÓPEZ** con ID **266191** quien realizó la tesis titulada: **ESTUDIO DE APLICACIÓN DE CONCRETO PERMEABLE EN ZONAS URBANAS**, un trabajo propio, innovador, relevante e inédito y con fundamento en el Artículo 175, Apartado II del Reglamento General de Docencia doy mi consentimiento de que la versión final del documento ha sido revisada y las correcciones se han incorporado apropiadamente, por lo que me permito emitir el **VOTO APROBATORIO**, para que él pueda proceder a imprimirlo así como continuar con el procedimiento administrativo para la obtención del grado.

Pongo lo anterior a su digna consideración y sin otro particular por el momento, me permito enviarle un cordial saludo.

ATENTAMENTE
"Se Lumen Proferre"
Aguascalientes, Ags., a 14 de abril de 2021.



M. en I. José Luis López López
Asesor de tesis

c.c.p.- Interesado
c.c.p.- Secretaría Técnica del Programa de Posgrado

Elaborado por: Depto. Apoyo al Posgrado.
Revisado por: Depto. Control Escolar/Depto. Gestión de Calidad.
Aprobado por: Depto. Control Escolar/ Depto. Apoyo al Posgrado.

Código: DO-SEE-FO-07
Actualización: 01
Emisión: 17/05/19

Fecha de dictaminación dd/mm/aaaa: _____

NOMBRE: _____ CARLOS IGNACIO VIZCAÍNO LÓPEZ _____ **ID** 266191

PROGRAMA: _____ MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL _____ **LGAC (del posgrado):** _____

TIPO DE TRABAJO: _____ () Tesis _____ (_____) Trabajo Práctico

TITULO: _____ ESTUDIO DE APLICACIÓN DE CONCRETO PERMEABLE EN ZONAS URBANAS _____

IMPACTO SOCIAL (señalar el impacto logrado): _____ La simulación numérica de la captura de sedimentos en el concreto permeable puede ayudar a diseñar mejores sistemas de captación de agua de lluvia con concreto permeable, que generen un aporte en la recarga de aguas subterráneas _____

INDICAR SI NO N.A. (NO APLICA) SEGÚN CORRESPONDA:

<i>Elementos para la revisión académica del trabajo de tesis o trabajo práctico:</i>	
SI	El trabajo es congruente con las LGAC del programa de posgrado
SI	La problemática fue abordada desde un enfoque multidisciplinario
SI	Existe coherencia, continuidad y orden lógico del tema central con cada apartado
SI	Los resultados del trabajo dan respuesta a las preguntas de investigación o a la problemática que aborda
SI	Los resultados presentados en el trabajo son de gran relevancia científica, tecnológica o profesional según el área
SI	El trabajo demuestra más de una aportación original al conocimiento de su área
SI	Las aportaciones responden a los problemas prioritarios del país
SI	Generó transferencia del conocimiento o tecnológica
SI	Cumple con la ética para la investigación (reporte de la herramienta antiplagio)
<i>El egresado cumple con lo siguiente:</i>	
SI	Cumple con lo señalado por el Reglamento General de Docencia
SI	Cumple con los requisitos señalados en el plan de estudios (créditos curriculares, optativos, actividades complementarias, estancia, predoctoral, etc)
SI	Cuenta con los votos aprobatorios del comité tutorial, en caso de los posgrados profesionales si tiene solo tutor podrá liberar solo el tutor
N.A.	Cuenta con la carta de satisfacción del Usuario
SI	Coincide con el título y objetivo registrado
SI	Tiene congruencia con cuerpos académicos
SI	Tiene el CVU del Conacyt actualizado
NO	Tiene el artículo aceptado o publicado y cumple con los requisitos institucionales (en caso que proceda)
<i>En caso de Tesis por artículos científicos publicados</i>	
NO	Aceptación o Publicación de los artículos según el nivel del programa
N.A.	El estudiante es el primer autor
N.A.	El autor de correspondencia es el Tutor del Núcleo Académico Básico
N.A.	En los artículos se ven reflejados los objetivos de la tesis, ya que son producto de este trabajo de investigación.
N.A.	Los artículos integran los capítulos de la tesis y se presentan en el idioma en que fueron publicados
NO	La aceptación o publicación de los artículos en revistas indexadas de alto impacto

Con base a estos criterios, se autoriza se continúen con los trámites de titulación y programación del examen de grado:

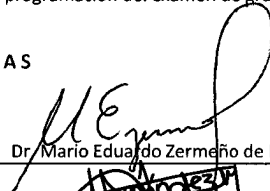
Sí _____

No _____

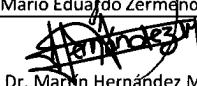
FIRMAS

Elaboró:

* NOMBRE Y FIRMA DEL CONSEJERO SEGÚN LA LGAC DE ADSCRIPCIÓN:


Dr. Mario Eduardo Zermeno de León

NOMBRE Y FIRMA DEL SECRETARIO TÉCNICO:


Dr. Marín Hernández Marín

* En caso de conflicto de intereses, firmará un revisor miembro del NAB de la LGAC correspondiente distinto al tutor o miembro del comité tutorial, asignado por el Decano

Revisó:

NOMBRE Y FIRMA DEL SECRETARIO DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO:


Dr. Alejandro Acosta Collazo

Autorizó:

NOMBRE Y FIRMA DEL DECANO:

Dr. en C. T. C. Héctor Homero Posada Avila

Nota: procede el trámite para el Depto. de Apoyo al Posgrado

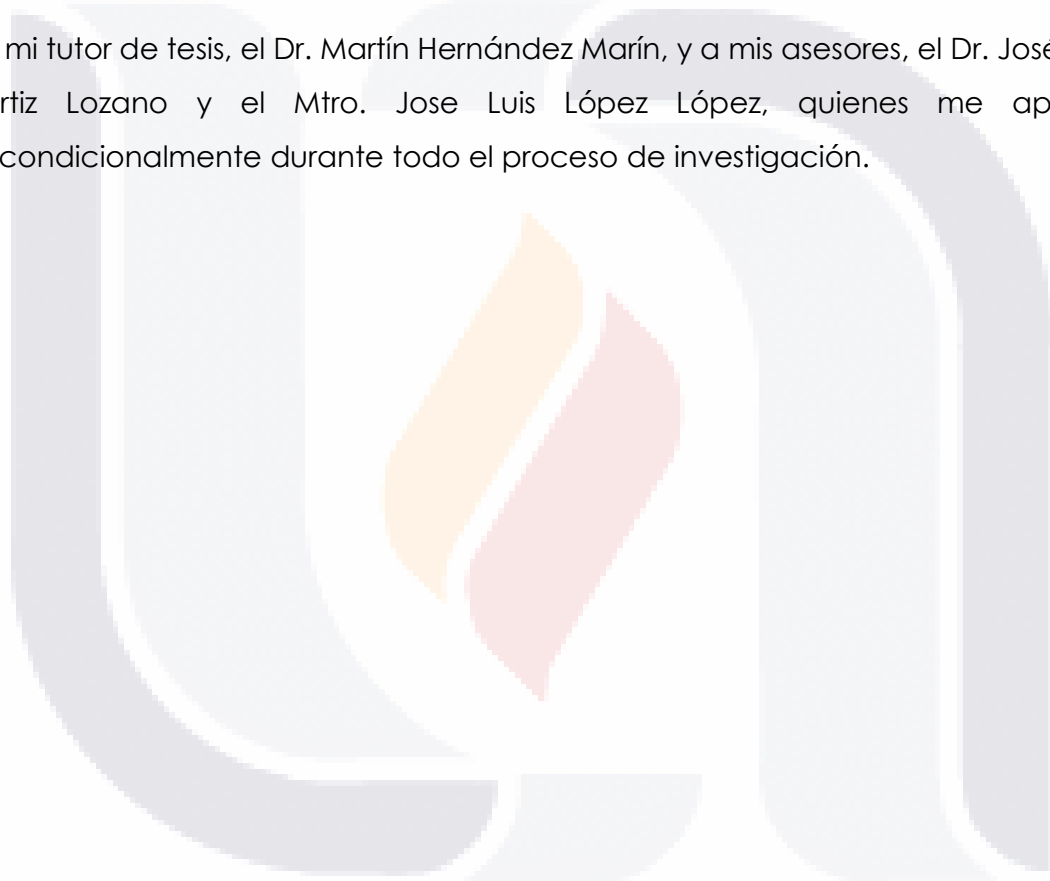
En cumplimiento con el Art. 105C del Reglamento General de Docencia que a la letra señala entre las funciones del Consejo Académico: ... Cumplir la eficiencia terminal del programa de posgrado y el Art. 105F las funciones del Secretario Técnico, llevar el seguimiento de los alumnos.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por el apoyo económico recibido durante el periodo de duración del programa de maestría, el cual me permitió ser un estudiante de dedicación exclusiva.

A la Universidad Autónoma de Aguascalientes, por facilitar el uso del laboratorio de resistencia de materiales y otras instalaciones sin las cuales no hubiera sido posible llevar a cabo la campaña experimental del trabajo de tesis.

A mi tutor de tesis, el Dr. Martín Hernández Marín, y a mis asesores, el Dr. José Ángel Ortiz Lozano y el Mtro. Jose Luis López López, quienes me apoyaron incondicionalmente durante todo el proceso de investigación.



CONTENIDO

ÍNDICE DE FIGURAS 4

ÍNDICE DE TABLAS..... 7

RESUMEN.....8

ABSTRACT.....9

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN 11

1.1 Prólogo 11

1.2 Objetivos..... 13

 1.2.1 Objetivo General..... 13

 1.2.2 Objetivos Particulares..... 13

1.3 Justificación..... 13

1.4 Hipótesis..... 16

1.5 Metodología 16

CAPÍTULO II: ESTADO DEL ARTE 19

2.1 Introducción..... 19

2.2 Proceso de captura de sedimentos 19

2.3 Simulación de la captura de sedimentos considerando vibraciones.21

2.4 Respuesta hidrológica de los sistemas de pavimento de concreto permeable.....25

2.5 Evaluación de la captura de sedimentos utilizando suelos limosos y composta.....28

2.6 Estudio de captura de sedimentos considerando condiciones climáticas locales..... 32

2.7 Sistemas de pavimento de concreto permeable sometidos a captura de sedimentos de arena y arcilla en condiciones saturadas.....36

2.8 Captura de sedimentos considerando diferentes porosidades de diseño39

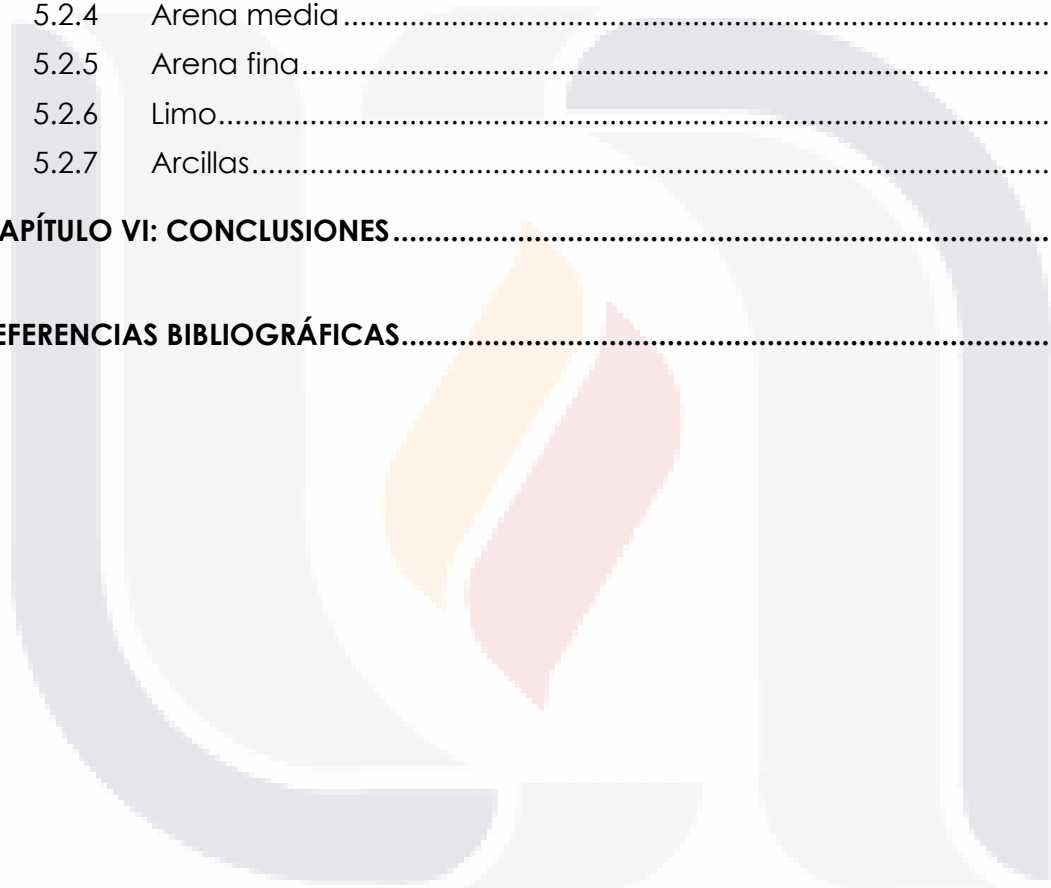
2.9 Efecto de la segregación y deposición sedimentaria sobre el concreto permeable 43

CAPÍTULO III: MARCO TEÓRICO..... 47

3.1 Introducción.....47

3.2	Tipos de Pavimentos Permeables.....	47
3.2.1	Asfalto Permeable	48
3.2.2	Método alternativo de colocación de asfalto permeable.....	50
3.2.3	Concreto Permeable con Cemento Portland.....	51
3.2.4	Adoquines de Concreto con Juntas Permeables	53
3.2.5	Pavimento <i>Grid</i>	57
3.2.6	Elección del tipo de pavimento permeable	60
3.3	Propiedades hidráulicas y mecánicas del concreto permeable	61
3.3.1	Conductividad Hidráulica	61
3.3.2	Densidad y porosidad	63
3.3.3	Consolidación y grado de compactación.....	64
3.3.4	Tortuosidad.....	65
3.3.5	Capacidad de Almacenamiento	66
3.3.6	Efectos de la Pendiente	67
3.3.7	Resistencia a la Compresión	68
3.4	Materiales y requerimientos para el diseño de concreto permeable con cemento Portland	69
3.4.1	Agregados	69
3.4.2	Materiales Cementantes	70
3.4.3	Relación agua-cemento	71
3.4.4	Aditivos	72
CAPÍTULO IV: CAMPAÑA EXPERIMENTAL		74
4.1	Elaboración de mezclas de concreto permeable.....	74
4.1.1	Agregados gruesos	74
4.1.2	Densidad y porcentaje de absorción de los agregados.....	75
4.1.3	Materiales cementantes	77
4.1.4	Proporción de las mezclas de concreto permeable	77
4.1.5	Procedimiento de mezclado.....	78
4.1.6	Fabricación y curado de las muestras	78
4.1.7	Dimensionamiento de las muestras	80
4.2	Diseño de un permeámetro de carga constante.....	80
4.3	Medición de parámetros hidráulicos y mecánicos.....	84
4.3.1	Porosidad efectiva	85
4.3.2	Conductividad Hidráulica	87
4.3.3	Resistencia a la Compresión	89

4.4	Simulación Numérica	90
CAPÍTULO V: RESULTADOS Y DISCUSIONES		95
5.1	Introducción.....	95
5.2	Resultados de Simulación Numérica	96
5.2.1	Flujo de agua sin sedimentos	97
5.2.2	Grava fina	98
5.2.3	Arena gruesa	100
5.2.4	Arena media.....	102
5.2.5	Arena fina.....	107
5.2.6	Limo.....	113
5.2.7	Arcillas.....	117
CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES.....		124
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....		127



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Delimitación de cuenca hidrológica en la zona urbana oriente de la ciudad de Aguascalientes, utilizando QGIS. Fuente: elaboración propia..... 14

Figura 2. Zona de inundación en el cruce ubicado entre la Av. Siglo XXI y la calle Sierra Tepehuanes. Existe evidencia del arrastre de sedimentos generado durante los eventos de precipitación. Fuente: Google Maps (2019)..... 15

Figura 3. Aparato de simulación de captura de contaminantes: 1. Molde, 2. Placa impermeable, 3. Cuerpo principal, 4. Pavimento permeable, 5. Marco de fijación del molde, 6. Muelle, 7. Controlador, 8. Motor de Vibración. (Tomado de Lin *et al.*, 2016)..... 22

Figura 4. Configuración de diseño del simulador de lluvia de pavimento permeable utilizado en el modelo de laboratorio. (Tomado de Alsubih *et al.*, 2016).....25

Figura 5. Técnicas usadas en concreto permeable: (a) Permeámetro de carga variable para medir la permeabilidad en laboratorio e (b) Infiltrómetro de anillo simple para medir la infiltración en campo (Tomado de Kevern, 2015). 29

Figura 6. Efecto del empaquetamiento de partículas a lo largo de la pared del molde cilíndrico sobre la porosidad (Tomado de Kevern, 2015). 30

Figura 7. Plataforma experimental para la comparación de asfalto permeable, *Hydrapave* y *Permapave*. (Tomado de Yong *et al.*, 2013)..... 34

Figura 8. Aparato de infiltración. Δh_{SG} representa la pérdida de carga en la capa subrasante se y Δh_{PM} es la pérdida de carga en todos los medios porosos. (Tomado de Coughlin *et al.*, 2012). 37

Figura 9. Diferentes cantidades de material de relleno fresco de concreto permeable en cada molde compactado para lograr la porosidad de diseño (Tomado de Tong, 2011). 40

Figura 10. Sección típica de un pavimento de asfalto permeable. Modificado de Eisenberg *et al.* (2015). 48

Figura 11. Demostración de la conductividad hidráulica del asfalto permeable. Obtenido de Asphalt Institute (2010). 49

Figura 12. Sección típica de una capa de asfalto permeable colocado sobre un pavimento asfáltico tradicional. Modificado de Eisenberg *et al.* (2015). 51

Figura 13. Sección típica de un pavimento de concreto permeable. Modificado de Eisenberg *et al.* (2015). 51

Figura 14. Concreto permeable de grano fino pulido colocado en una acera en Sunnyvale California. Obtenido de Bay Area (2019)..... 52

Figura 15. Adoquines de concreto permeable utilizados en la rehabilitación del centro de Burlingame Avenue en Burlingame, California. Obtenido de CNCA (2019). 53

Figura 16. Adoquines de concreto con juntas permeables en Goldstream Avenue, Victoria, Canadá. Obtenido de EVstudio (2016). 55

Figura 17. Sección típica de diseño de un pavimento de adoquines con juntas permeables. Modificado de Smith (2000). 56

Figura 18. Sección opcional de pavimento de adoquines con juntas permeables con sistema de drenaje. Modificado de Smith (2000). 56

Figura 19. Pavimento *Grid* de concreto y césped instalado en un sendero residencial (ICPI, 1999).57

Figura 20. Tipos de diseño de los pavimentos *Grid*. Obtenido de ICPI (1999). 58

Figura 21. Sección transversal típica de un pavimento *Grid*. Para el caso de aplicaciones con cargas vehiculares es recomendable utilizar bordes laterales de refuerzo. Modificado de ICPI (1999).....59

Figura 22. Sección transversal típica de un pavimento *Grid* colocado sobre un terraplén. Modificado de ICPI (1999)..... 60

Figura 23. Técnica para medir la conductividad hidráulica del concreto permeable en laboratorio (Tomado de Kevern, 2015).62

Figura 24. Tortuosidad en el concreto permeable (Tomado de Fetter, 1994). 66

Figura 25. Sección transversal de un sistema de pavimento de concreto permeable. Modificado de Leming et al. (2007)..... 67

Figura 26. (A) Una losa de concreto permeable nivelada puede aprovechar al máximo su capacidad de almacenamiento. (B) Efecto de la pendiente en una losa de concreto permeable. (Tomado de Leming et al., 2007)..... 67

Figura 27. Brillo característico de una mezcla de concreto permeable, utilizando una relación agua-cemento adecuada. Fuente: autoría propia.....71

Figura 28. Granulometrías SUCS 1 Y SUCS 2 empleadas en la elaboración de las mezclas de concreto permeable. Fuente: autoría propia.75

Figura 29. Procedimiento para obtener la densidad de los agregados. Fuente: autoría propia.76

Figura 30. Procedimiento de mezclado del concreto permeable. Fuente: autoría propia.78

Figura 31. Procedimiento de fabricación de las muestras de concreto permeable. Fuente: autoría propia.....79

Figura 32. Procedimiento de curado de las muestras cilíndricas. Fuente: autoría propia.80

Figura 33. Etapa inicial de elaboración del permeámetro de carga constante. Fuente: autoría propia.....81

Figura 34. Colocación apropiada de la membrana de látex en los cilindros de concreto permeable para evitar rasgaduras. Fuente: autoría propia.....82

Figura 35. Colocación del tanque de almacenamiento en el permeámetro de carga constante. Fuente: autoría propia.....82

Figura 36. Permeámetro de carga constante durante una prueba de permeabilidad. Fuente: autoría propia.84

Figura 37. Determinación de la masa saturada sumergida en agua de las muestras de concreto permeable. Fuente: autoría propia.86

Figura 38. Modelos de fractura de los ensayos de resistencia a la compresión. Los números en la parte superior izquierda de cada figura indican el número de lote y el número de muestra, respectivamente. Fuente: autoría propia.....89

Figura 39. † 90

Figura 40. Geometría de modelo de simulación numérica con 18% de porosidad efectiva. Fuente: autoría propia utilizando COMSOL *Multiphysics*. 92

Figura 41. Geometría de modelo de simulación numérica con 30% de porosidad efectiva. Fuente: autoría propia utilizando COMSOL *Multiphysics*. 93

Figura 42. Perfiles de velocidad de la matriz porosa de concreto permeable. Arriba: 18% de porosidad efectiva. Derecha: 30% de porosidad efectiva. Fuente: autoría propia. 98

Figura 43. Modelos de simulación de partículas de grava fina. D_p es el diámetro de las partículas. Arriba: 18% de porosidad. Abajo: 30% de porosidad. Fuente: autoría propia. 99

Figura 44. Trayectoria de sedimentos de arena gruesa que pasan a través de la matriz porosa con 18% de porosidad. Longitudes en decímetros. Fuente: autoría propia. 101

Figura 45. Trayectoria de sedimentos de arena gruesa que pasan a través de la matriz porosa con 30% de porosidad. Longitudes en decímetros. Fuente: autoría propia. 102

Figura 46. Cantidad de sedimentos de arena media que atraviesan la matriz porosa de concreto permeable en función del tiempo de simulación. Fuente: autoría propia. 103

Figura 47. Trayectoria de sedimentos de arena media que pasan a través de la matriz porosa de concreto permeable. D_p es el diámetro de los sedimentos. Izquierda:18% de porosidad efectiva. Derecha: 30% de porosidad efectiva. Fuente: autoría propia. 107

Figura 48. Cantidad de sedimentos de arena fina que atraviesan la matriz porosa de concreto permeable en función del tiempo de simulación. Fuente: autoría propia. 108

Figura 49. Trayectoria de sedimentos de arena fina que pasan a través de la matriz porosa de concreto permeable. Izquierda:18% de porosidad efectiva. Derecha: 30% de porosidad efectiva. Fuente: autoría propia..... 113

Figura 50. Cantidad de sedimentos de limo que atraviesan la matriz porosa de concreto permeable en función del tiempo de simulación. Fuente: autoría propia. 114

Figura 51. Trayectoria de sedimentos de limo que pasan a través de la matriz porosa de concreto permeable. Izquierda:18% de porosidad efectiva. Derecha: 30% de porosidad efectiva. Fuente: autoría propia..... 117

Figura 52. Cantidad de sedimentos de arcilla que atraviesan la matriz porosa de concreto permeable en función del tiempo de simulación. Fuente: autoría propia. 118

Figura 53. Trayectoria de sedimentos de arcilla que pasan a través de la matriz porosa de concreto permeable. Izquierda:18% de porosidad efectiva. Derecha: 30% de porosidad efectiva. Fuente: autoría propia..... 122

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Metodología de aplicación y cantidad de sedimentos utilizadas por investigadores en estudios de captura de sedimentos. Fuente: autoría propia.21

Tabla 3. Matriz de pruebas experimentales para los casos A y B (Modificada de Tong, 2011).41

Tabla 4. Porosidades efectivas obtenidas por Mata (2008) utilizando los métodos de diferencia de pesos y ASTM D 7063. Fuente: autoría propia. 64

Tabla 5. Porcentaje de humedad de los lotes de muestras SUCS 1 y SUCS 2. Fuente: autoría propia.85

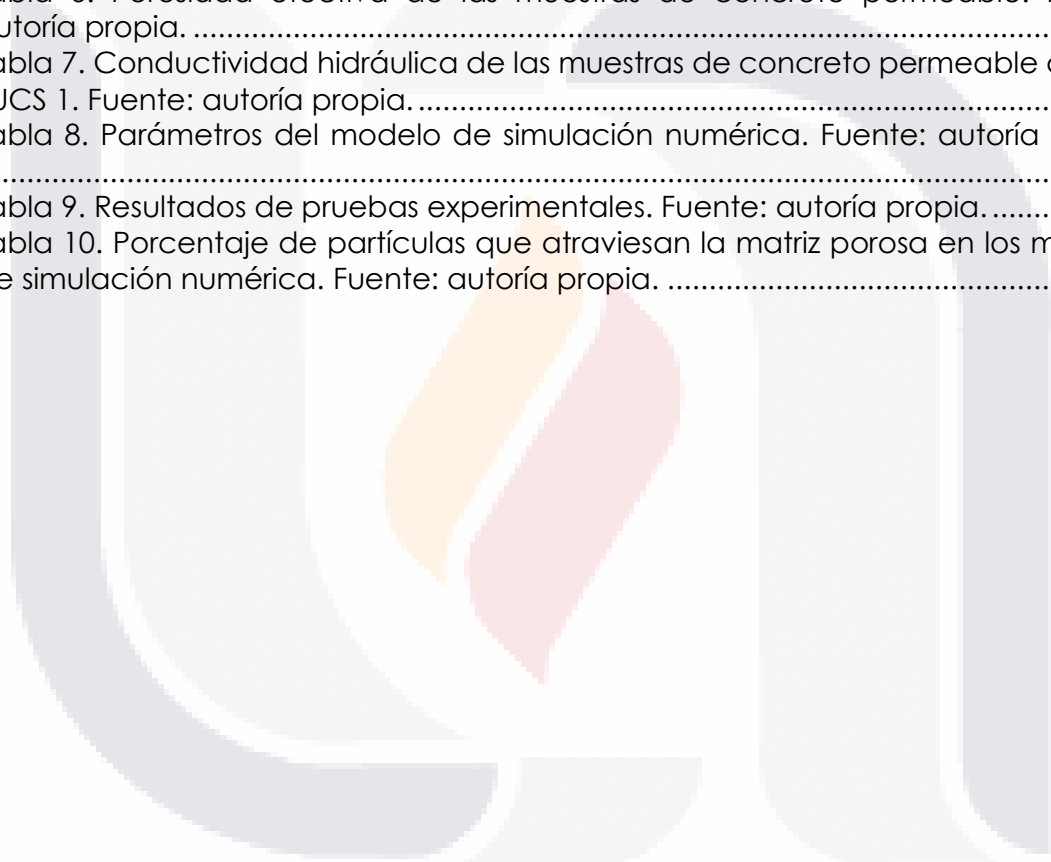
Tabla 6. Porosidad efectiva de las muestras de concreto permeable. Fuente: autoría propia.87

Tabla 7. Conductividad hidráulica de las muestras de concreto permeable del lote SUCS 1. Fuente: autoría propia.88

Tabla 8. Parámetros del modelo de simulación numérica. Fuente: autoría propia. 91

Tabla 9. Resultados de pruebas experimentales. Fuente: autoría propia.95

Tabla 10. Porcentaje de partículas que atraviesan la matriz porosa en los modelos de simulación numérica. Fuente: autoría propia. 97



RESUMEN

En la ciudad de Aguascalientes, existen zonas de inundación que pueden ser delimitadas con ayuda de modelos digitales de elevación y sistemas de información geográfica. Estas zonas tienen el potencial para ser utilizadas como puntos de captación de agua que generen un aporte extra en la recarga de agua subterránea, mediante la utilización de sistemas de pavimento de concreto permeable. No obstante, desde un punto de vista hidrológico, una de las principales limitantes con respecto a la aplicación de concreto permeable es el riesgo de captura de sedimentos transportados por las corrientes de agua. En este trabajo, se diseñó un experimento para medir las propiedades hidráulicas y mecánicas del concreto permeable con cemento portland. La conductividad hidráulica de muestras con diferentes porosidades fue obtenida utilizando un permeámetro de carga constante de diseño propio. Posteriormente, se realizaron simulaciones de flujo transportando sedimentos con ayuda del programa *COMSOL Multiphysics*, tomando en cuenta 2 modelos con porosidades efectivas distintas (18% y 30%). Los resultados muestran que la captura de sedimentos fue variable, y estuvo directamente relacionada con el tamaño de las partículas. En las simulaciones con sedimentos de limo y arcilla, entre el 14% y el 33% de las partículas se quedaron atrapadas en la matriz porosa, mientras que el peor caso se presentó con las arenas medias, con valores desde 75% hasta 99%. Los resultados sugieren que la captura de sedimentos ocurrirá en las zonas donde existan bifurcaciones horizontales de los conductos, así como en las áreas donde el diámetro de los poros sea menor que el diámetro de las partículas.

Palabras clave

Concreto permeable, conductividad hidráulica, porosidad efectiva, permeámetro de carga constante, captura de sedimentos, simulación numérica.

ABSTRACT

In the city of Aguascalientes, there are flood zones that can be delimited with the help of digital elevation models and geographic information systems. These areas have the potential to be used as water catchment points that generate an extra contribution in the recharge of groundwater, by utilizing permeable concrete pavement systems. However, from a hydrological point of view, one of the limitations with respect to the application of permeable concrete in urban areas is the risk of clogging, caused by sediments mixed with water currents. For this investigation, an experiment to measure the hydraulic and mechanical properties of pervious concrete with Portland cement was designed. The hydraulic conductivity of samples with different porosities was obtained using a constant head permeameter of our own design. Then, flow simulations transporting sediments were carried out with the help of COMSOL Multiphysics software, considering 2 models with different effective porosities (18% and 30%). The results show that sediment clogging was variable and was directly related to the size of the particles. In the simulations with silt and clay sediments, between 14% and 33% of the particles were trapped in the porous matrix, while the worst case occurred with medium sands, with values from 75% to 99%. The results suggest that sediment clogging will occur in the regions where there are horizontal bifurcations of the conduits, as well as in the areas where the diameter of the pores is smaller than the diameter of the particles.

Keywords

Permeable concrete, hydraulic conductivity, effective porosity, constant head permeameter, sediment clogging, numerical simulation.



TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

1.1 Prólogo

De todas las estructuras construidas por el hombre, los pavimentos son los que más dominan la calidad de los entornos urbanos, ya que generalmente ocupan el doble del área de los edificios y producen dos tercios de la disminución del agua subterránea y la escasez de agua local resultante (Ferguson, 2005). Este problema de escasez radica en que los pavimentos tradicionales de concreto y asfalto generan una cubierta impermeable que impide la infiltración natural del agua, en respuesta a los eventos de precipitación. Asimismo, los pavimentos provocan un incremento en la escorrentía superficial, que generalmente es la causa de impactos negativos en los sistemas de drenaje y en propiedades públicas y privadas.

La ciudad de Aguascalientes enfrenta una problemática de escasez de agua inminente que se ha venido acentuando a causa del crecimiento poblacional y el uso inadecuado del vital líquido. Si bien es cierto que la construcción y mantenimiento de la infraestructura hidráulica municipal ha solucionado los problemas de escasez de agua a corto plazo, también ha generado cierto grado de inconformidad en cuanto a la gestión de los recursos hídricos. De acuerdo con organismos operadores locales, se estima que un 40% del agua subterránea extraída de los pozos se pierde todos los días a causa de fugas (visibles y no visibles) en la red de agua potable, además de que el agua de lluvia no se ha podido aprovechar por medio de infiltración natural o sistemas de captación.

En la actualidad, existen pocas normas de construcción o regulaciones municipales en la ciudad de Aguascalientes, que incluyan el concreto permeable como parte del diseño urbano, lo cual sugiere que los intereses políticos siguen favoreciendo la aplicación de pavimentos tradicionales. De igual manera, las empresas locales del sector de la construcción generalmente carecen de experiencia en cuanto a la elaboración y aplicación de concreto permeable, ya que la falta de proyectos

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

sustentables que incluyan pavimentos ecológicos hace que esta sea una práctica poco rentable.

El concreto permeable, al igual que otras prácticas sustentables, surge de la necesidad de atender las problemáticas antes mencionadas. Los pavimentos de concreto permeable son un tipo especial de sistema de captación que permite que las escorrentías superficiales y el agua proveniente del deshielo pasen a través de él. La ausencia o mínimo contenido de partículas finas en la elaboración del concreto permeable permite la formación de una red de vacíos interconectados entre sí, que generan una alta porosidad en su estructura interna, en comparación con el concreto hidráulico o asfáltico convencional. El agua fluye libremente a través de los poros interconectados del concreto permeable hacia las capas subyacentes, favoreciendo los procesos naturales de infiltración y la recarga de agua subterránea.

No obstante, la aplicación de concreto permeable en zonas urbanas es limitada. De acuerdo con la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (*US-EPA*), la instalación de pavimentos de concreto permeable en sitios inapropiados, junto con la falta de mejores prácticas de mantenimiento, han generado un alto índice de fracaso y han frenado la aceptación del concreto permeable. La utilización de pavimentos de este tipo suele estar restringida en regiones frías, zonas áridas y lugares con altas tasas de erosión eólica, ya que para un buen desempeño del pavimento, desde un punto de vista hidráulico y mecánico, generalmente se requieren una serie de requisitos tales como suelos altamente permeables, tráfico pesado restringido y usos de suelo adyacentes que no aporten sedimentos en el área de instalación (*US-EPA, 1999*).

En el presente estudio se busca demostrar que el concreto permeable es potencialmente aplicable en zonas urbanas, permitiendo un aporte en la recarga de aguas subterráneas. Esto dependerá tanto de la capacidad del concreto permeable para soportar cargas de tráfico sin desgastarse, así como de mantener una permeabilidad mínima ante la captura de sedimentos que puedan llegar a ser transportados hacia su superficie por efecto de las escorrentías superficiales.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

Estudiar las propiedades hidráulicas del concreto permeable y su potencial aplicación en zonas dentro de una ciudad como la de Aguascalientes, tanto para la recarga de aguas subterráneas como la mitigación de inundaciones.

1.2.2 Objetivos Particulares

- A) Determinar zonas de inundación dentro de la ciudad de Aguascalientes por medio del software de Sistemas de Información Geográfica de código libre, QGIS, utilizando Modelos Digitales de Elevación.
- B) Diseñar un experimento para medir la reducción de la conductividad hidráulica del concreto permeable en condiciones de flujo de agua transportando sedimentos. Este objetivo incluye la fabricación de un dispositivo que permita establecer dicha reducción y la elaboración de muestras de concreto permeable.
- C) Diseñar modelos numéricos en el programa *COMSOL Multiphysics*, para simular la reducción de permeabilidad del concreto en condiciones de flujo transportando sedimentos.
- C) Proponer, con base en los resultados experimentales y de simulación, la frecuencia con la que tienen que ser aplicadas rutinas de mantenimiento en el concreto permeable de estudio para que este mantenga su funcionalidad.

1.3 Justificación

El volumen de recarga de agua subterránea puede verse afectado por factores como la precipitación y el cambio de uso de suelo (Hernández-Marín *et al.*, 2018). En consecuencia, se necesitan implementar sistemas de captación de agua de lluvia a nivel local, dentro de las zonas urbanas. Un potencial sistema de captación de agua de lluvia son los pavimentos de concreto permeable, instalados en conjunto con zanjas o pozos de infiltración.

En la ciudad de Aguascalientes, existen zonas de inundación que pueden ser detectadas con ayuda de modelos digitales de elevación y programas de Sistemas de Información Geográfica. Estas zonas son lugares con potencial aplicación de concreto permeable para el aprovechamiento de aguas subterráneas. Para el caso de la ciudad de Aguascalientes, se analizó una cuenca ubicada en la zona oriente, donde los escurrimientos convergen hacia un punto de salida aguas abajo, en la Av. Siglo XXI esquina con la Av. Sierra Tepehuanes, de la colonia Refugio Esparza Reyes (Figura 1).

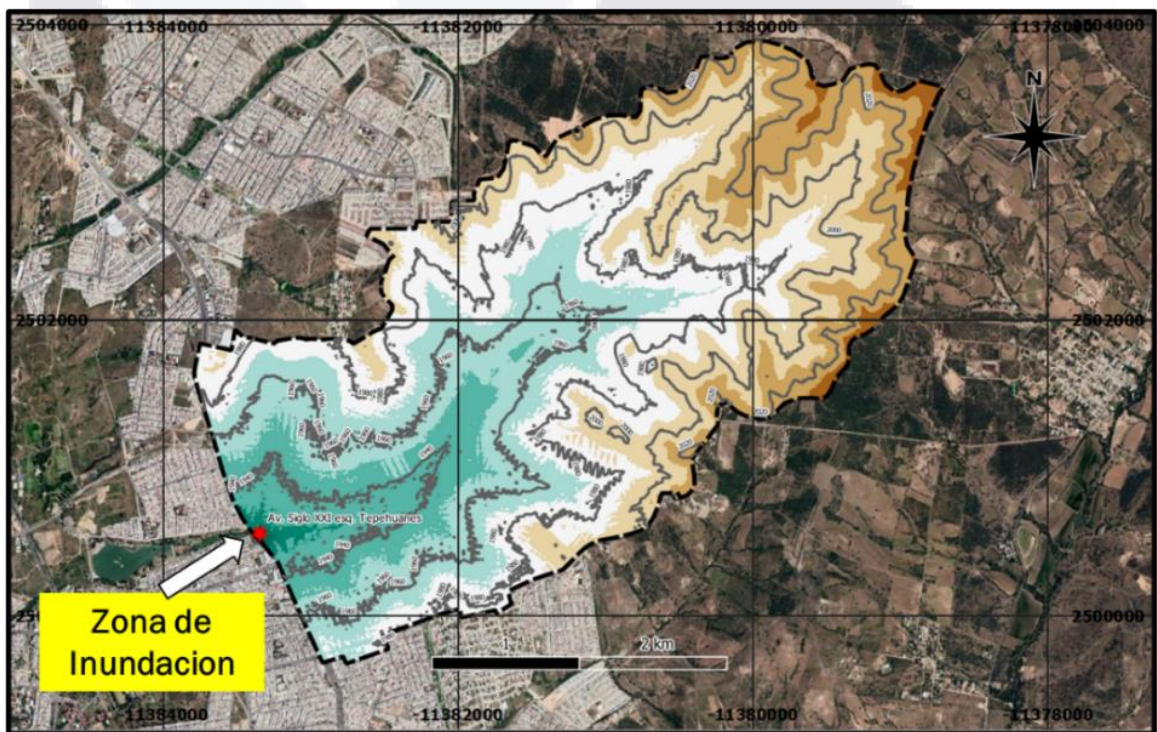


Figura 1. Delimitación de cuenca hidrológica en la zona urbana oriente de la ciudad de Aguascalientes, utilizando QGIS. Fuente: elaboración propia.

La cuenca tiene 961 hectáreas de extensión y cotas de elevación mínimas y máximas de 1945 y 2032 msnm, respectivamente. El agua descarga en la presa del parque México, ubicada al poniente del punto de descarga.

No obstante, uno de los principales problemas de estas zonas de potencial inundación es el arrastre de sedimentos que las corrientes de agua transportan consigo, tal y como se muestra en la figura 2. La capacidad del concreto de filtrar

agua hacia el punto de captación se verá severamente afectada si estos sedimentos se filtran junto con el agua.



Figura 2. Zona de inundación en el cruce ubicado entre la Av. Siglo XXI y la calle Sierra Tepehuanes. Existe evidencia del arrastre de sedimentos generado durante los eventos de precipitación. Fuente: Google Maps (2019).

Con base en lo anterior, surge la necesidad de estudiar las propiedades hidráulicas del concreto permeable, así como analizar el comportamiento del concreto permeable ante el fenómeno de captura de sedimentos. Se requieren mejores diseños de sistemas de infiltración, utilizando concreto permeable, instalados en puntos estratégicos que permitan un aporte a la recarga de aguas subterráneas. Asimismo, es importante determinar en qué momento el pavimento de concreto permeable pierde su funcionalidad, ante cierta cantidad, tipo y tamaño de sedimentos, con la finalidad de aplicar rutinas de mantenimiento o, en su caso, reemplazar el concreto permeable.

Por último, si bien actualmente en algunas ciudades se cuenta con mapas detallados de riesgo por inundación que permiten a las autoridades elaborar planes de contingencia más eficientes, y se construyen sistemas de alcantarillado cada vez más grandes y costosos, se requiere también un aprovechamiento más

eficiente de los recursos hídricos, como parte de las prácticas sustentables implementadas en zonas urbanas.

1.4 Hipótesis

“Se puede aplicar concreto permeable dentro de la ciudad de Aguascalientes en zonas selectas que van a permitir un aporte hídrico al agua subterránea, y al mismo tiempo mitigar inundaciones”.

1.5 Metodología

La presente investigación es de carácter cuantitativo y se consideraron, entre otras, las siguientes variables en el estudio:

- El tipo de pavimento de concreto permeable a utilizar durante las pruebas experimentales, ya que existen diversas clases de pavimentos, cada uno de los cuales tiene ventajas y desventajas en comparativa.
- El diseño del concreto permeable, es decir, los materiales, la dosificación y el procedimiento utilizados en la elaboración de especímenes de prueba.
- Las propiedades hidráulicas y mecánicas del concreto permeable, tales como la conductividad hidráulica, la porosidad efectiva y la resistencia a la compresión, debido a que van a estar estrechamente ligadas al diseño de la mezcla.
- La cantidad, tamaño y tipo de sedimentos a utilizar en las pruebas, puesto que existen arenas, limos y arcillas.

La metodología se puede resumir en los siguientes puntos:

- Hacer una revisión de la literatura, con la finalidad de identificar los estudios científicos más relevantes con respecto a la captura de sedimentos en el concreto permeable.
- Realizar una clasificación de los pavimentos de concreto permeable, con el objetivo de elegir el tipo de pavimento más adecuado para los trabajos experimentales.

- Diseñar y fabricar un permeámetro de carga constante y muestras de concreto permeable que se adapten a dicho dispositivo.
- Medir las propiedades hidráulicas y mecánicas del concreto permeable, como son la conductividad hidráulica, porosidad efectiva y resistencia a la compresión.
- Diseñar modelos de simulación numérica, con base en los resultados experimentales, para medir la captura de sedimentos en el concreto permeable.





CAPÍTULO

II

ESTADO DEL ARTE

CAPÍTULO II: ESTADO DEL ARTE

2.1 Introducción

En este capítulo se revisa el estado actual del conocimiento en cuanto al fenómeno de captura de sedimentos en el concreto permeable. Se presenta un resumen de los principales artículos científicos, tesis doctorales y de maestría que se encontraron en la literatura.

2.2 Proceso de captura de sedimentos

De acuerdo con Kuruppu *et al.* (2019), el mayor problema asociado con los sistemas de pavimento de concreto permeable es quizás la captura de sedimentos o contaminantes depositados en la estructura interna del pavimento. Los sedimentos bloquean los conductos por donde el concreto permeable favorece el paso del agua, reduciendo la conductividad hidráulica. Los autores expresan que, dentro de los retos para investigaciones actuales del concreto permeable se encuentra el de simular la condición de campo real del fenómeno de captura de sedimentos, ya que es un factor determinante a la hora de construir un sistema de pavimento de concreto permeable.

Aunque existe producción de sedimentos en casi cualquier zona donde se quieran aplicar pavimentos permeables, generalmente la tasa de infiltración del concreto permeable y las bases subyacentes de agregados es mayor en varios órdenes de magnitud que la de cualquier tipo de suelo. Por consiguiente, mientras que la conductividad hidráulica del concreto sea igual o mayor a la del suelo, el sistema hidráulico del pavimento podrá seguir en funcionamiento.

Lin *et al.* (2016) señalan que los movimientos de los sedimentos o contaminantes se clasifican en 3 tipos: sedimentación, suspensión y fluencia.

- *Sedimentación.* Es el movimiento de pequeñas partículas con un diámetro de 70–500 μm , que vuelan desde la superficie del pavimento y se mueven

bajo la influencia de la resistencia del aire y la gravedad. La sedimentación representa un total del 55 al 72% de todos los movimientos de partículas.

- *Suspensión.* Se refiere a la flotación y movimiento de partículas en el aire por efecto del viento a una distancia antes de precipitarse. El diámetro de estas partículas es inferior a 70 μm . La suspensión representa un total del 3 al 10% de todos los movimientos de partículas.
- *Fluencia.* Hace alusión a la rodadura o al movimiento lento de las partículas de arena y grava, y representa del 7 al 25% de todos los movimientos de partículas.

Por otra parte, tomando en cuenta la cantidad de sedimentos o contaminantes que recibe, un sistema de pavimento de concreto permeable (SPCP) puede diseñarse como un sistema de mitigación pasivo o activo (Mata, 2008). La mitigación pasiva se usa para reducir únicamente la cantidad de superficies impermeables al reemplazarlas por pavimentos permeables, capturando sólo la lluvia que cae directamente sobre estos. En cambio, la mitigación activa está diseñada para captar además una parte o la totalidad de la escorrentía superficial de aguas pluviales originada en zonas adyacentes (Leming *et al.*, 2007). Los sistemas de mitigación activos pueden ser más susceptibles a la captura de sedimentos debido a la escorrentía de aguas pluviales proveniente de zonas adyacentes con vegetación o altas tasas de erosión (Mata, 2008).

Las condiciones físicas reales, tales como el peso repartido no uniforme y la velocidad de los vehículos, el viento y otros eventos ambientales, pueden afectar la deposición o captura de sedimentos en los pavimentos de concreto permeable, por lo que investigar este fenómeno mediante experimentos de laboratorio no ha sido una tarea sencilla (Kuruppu *et al.*, 2019). En la tabla 1 se resume la cantidad de sedimentos y la metodología de aplicación utilizada por algunos investigadores.

Tabla 1. Metodología de aplicación y cantidad de sedimentos utilizadas por investigadores en estudios de captura de sedimentos. Fuente: autoría propia.

Autores	Año	Cantidad de Sedimentos y Metodología de Aplicación
Lin, Park, Ryu, Lee Y Cho	2016	La cantidad de sólidos suspendidos totales diarios por unidad de área se fijó en 0.332 gr/m ² /día y los períodos de diseño para la aplicación de sólidos se establecieron en 1, 2, 5, 7 y 9 años. Las cantidades de sedimentos utilizadas en las pruebas fueron 121, 242, 606, 848 y 1091 gr/m ² , respectivamente.
Yong, McCarthy Y Deletic	2013	La cantidad de sólidos suspendidos totales utilizada en la prueba fue de 1,850 gr/m ² para un periodo de lluvia simulado de 13 y 26 años. La concentración de sólidos suspendidos totales en el agua agregada durante la prueba fue de 0.15 gr/L y el flujo continuo aplicado en las muestras fue de 3.89 L/hr/m ² .
Coughlin, Campbell Y Mays	2012	Dividieron la aplicación de sedimentos de arena y arcilla en 6 ciclos. Se agregaron 870, 2,600 y 6,100 gr/m ² de arena en el primer, segundo y tercer ciclo, respectivamente. Se agregaron 6,100 gr/m ² de arena y 87, 260 y 610 gr/m ² de arcilla en el cuarto, quinto y sexto ciclo, respectivamente.
Kevern	2015	La tasa de carga de masa seca de sedimentos aplicados en la superficie de las muestras fue de 2,300 gr/m ² para la suspensión de suelo, 1,800 gr/m ² para la composta y 1,950 gr/m ² para la combinación de suelo y composta.
Mata	2008	La cantidad de sedimentos utilizada en la primera fase del estudio fue de 900 gr/m ² /año. Para la segunda fase, se aplicaron 112 gr/m ² /año. En ambas fases, se consideró una vida útil del pavimento de 20 años, por lo que se aplicaron 18,000 y 2,240 gr/m ² de sedimentos, respectivamente.

2.3 Simulación de la captura de sedimentos considerando vibraciones.

En su estudio, Lin *et al.* (2016) desarrollaron un aparato de captura de sedimentos y contaminantes con el objetivo de medir la reducción de la permeabilidad del concreto permeable en condiciones de flujo transportando sedimentos, simulando las vibraciones causadas por los vehículos. Además, se propuso un método de prueba que puede predecir y evaluar el rendimiento de permeabilidad por años de servicio.

Para identificar la cantidad y tipo de sedimentos presentes en las carreteras, estos fueron recolectados durante dos días consecutivos con un equipo de limpieza que estaba siendo utilizado por el gobierno local de la ciudad de Seúl, en Corea del Sur. Las carreteras locales investigadas fueron construidas con pavimento de asfalto típico con 3.50 metros de ancho por carril.

Se analizó el tamaño promedio de los sedimentos y contaminantes, con base en seis muestras recolectadas de los contenedores del equipo de limpieza. La mayoría de los contaminantes filtrados a través de la malla No. 4 (4.75 milímetros) fueron hojas de árboles y colillas de cigarrillos. El mayor porcentaje de sedimentos fue el que pasó la malla No. 30 y quedó retenido en la malla No. 50, es decir, arenas de tamaño medio a fino con diámetros de partículas entre 0.60 y 0.36 milímetros.

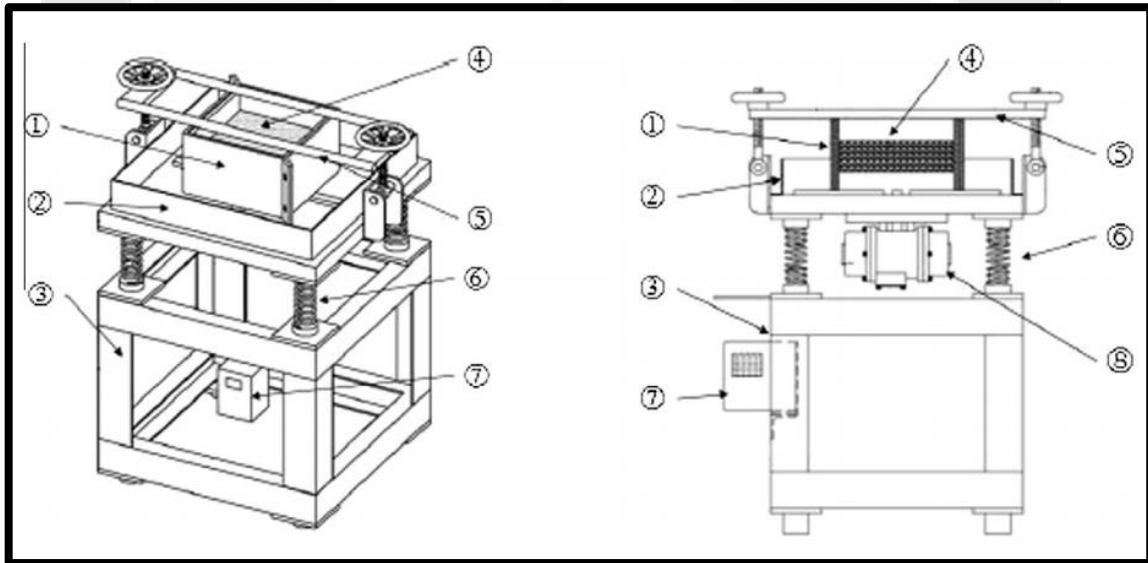


Figura 3. Aparato de simulación de captura de sedimentos y contaminantes: 1. Molde, 2. Placa impermeable, 3. Cuerpo principal, 4. Pavimento permeable, 5. Marco de fijación del molde, 6. Muelle, 7. Controlador, 8. Motor de Vibración. (Tomado de Lin *et al.*, 2016).

El aparato de captura de sedimentos y contaminantes se muestra en la figura 3. Se conectó un motor al aparato con la finalidad de simular la vibración que causan los vehículos en la carretera al estar en contacto con el pavimento. La vibración se puede controlar de 0 a 60 Hz con un incremento de 0.1 Hz. El tamaño del molde para montar la muestra de concreto permeable fue de 20x20x15 centímetros.

En el método experimental de prueba, los bloques de concreto permeable se montan en el molde y una cantidad específica de sedimentos y contaminantes se dispersa de manera homogénea sobre la muestra. Una vez que los sedimentos han penetrado a través de los poros al aplicar las vibraciones, la muestra se separa del molde y el coeficiente de permeabilidad se mide aplicando el método de prueba de carga constante KS-F-4419.

Para determinar el grado de captura de sedimentos y contaminantes, los investigadores realizaron una prueba piloto considerando tres casos distintos:

- Caso 1 (método seco). Se suministraron los sedimentos y contaminantes y se aplicó la vibración sin agregar agua.
- Caso 2 (método combinado). Se aplicó la vibración con el material seco durante el 50 % del tiempo total, y posteriormente se agregó agua (caso 2, método combinado).
- Caso 3 (método húmedo). Condiciones de flujo de agua transportando sedimentos y contaminantes se consideraron durante todo el tiempo de vibración.

Las variables del estudio fueron: la cantidad de sedimentos y/o contaminantes aplicados, la frecuencia y el periodo de vibración. Considerando que la cantidad de sedimentos y contaminantes que se generan en las carreteras fue de 332 mg/m²/día, en las pruebas experimentales se utilizaron 121, 242, 606, 848 y 1091 gr/m² para períodos de tiempo de 1, 2, 5, 7 y 9 años, respectivamente. La frecuencia de vibración varió de 20 a 60 Hz con intervalos de 10 Hz. El tiempo de duración de la vibración varió a razón de 15, 30, 45, 60 y 90 segundos. Se utilizaron un total de 3 muestras para un total de 125 variaciones.

En los resultados obtenidos, la porosidad y el coeficiente de permeabilidad promedio de los bloques porosos fueron del 15% y 0,056 cm/s, respectivamente. La condición crítica de captura de sedimentos y contaminantes tuvo lugar en el caso 3, seguida por el caso 2. En particular, el método húmedo y el método seco mostraron una diferencia de 0.2 cm/s o mayor en el coeficiente de permeabilidad,

lo cual sugiere que cuando los contaminantes se lavan con agua de lluvia, la resistencia entre las partículas de polvo y el material del pavimento disminuye, permitiendo que los contaminantes penetren fácilmente.

Por último, las conclusiones del estudio fueron las siguientes:

- La captura de sedimentos es afectada por los años de servicio, lo que significa una cantidad acumulativa de sedimentos y contaminantes. No obstante, a partir de cierta cantidad de sedimentos capturados, el cambio del coeficiente de permeabilidad se ralentiza, lo cual sugiere que la vibración tiene menos influencia sobre la permeabilidad al suministrar cantidades incrementales de contaminantes.
- El grado de captura de sedimentos fue dependiente de 2 factores. El primero fue la vibración de los vehículos y el segundo fue el agua de lluvia impregnada junto con los sedimentos. Cuando la frecuencia de vibración se configuró de 20 Hz a 60 Hz, la captura de sedimentos ocurrió fácilmente con el aumento de la frecuencia de vibración. En otras palabras, la captura de sedimentos fue crítica al configurar el tiempo de vibración a 60 segundos y la frecuencia de vibración a 60 Hz.
- Cuando se evaluaron 63 tipos de bloques de concreto permeable, los coeficientes de permeabilidad antes y después de la prueba mostraron una correlación muy alta ($R^2 = 0.88$) entre ellos, y el coeficiente de permeabilidad disminuyó en un 54% en promedio (siendo el máximo de 76% y el mínimo del 20%). En consecuencia, es posible utilizar los valores iniciales del coeficiente de permeabilidad para modelar la reducción de la permeabilidad.
- Antes de la prueba, se esperaba que cuanto mayor fuera el tiempo de vibración, menor sería el coeficiente de permeabilidad. No obstante, el coeficiente de permeabilidad se empezó a recuperar entre los 60 y 90 segundos de vibración continua. Lo anterior sugiere que a medida que el tiempo de vibración se alarga, las partículas logran escapar.

2.4 Respuesta hidrológica de los sistemas de pavimento de concreto permeable.

En esta investigación llevada a cabo por Alsubih et al.,(2016) se determinó la influencia de la intensidad de lluvia en la respuesta hidrológica de adoquines de pavimentos permeables. Tal y como señalan los autores, conocer la cantidad de agua que se almacenará y luego se liberará en un sistema de pavimento de concreto permeable después de una tormenta, es un parámetro crucial de diseño.

Una plataforma con una superficie de un metro cuadrado de pavimento permeable y un simulador de lluvia fueron diseñados. La plataforma de pavimento estaba hecha de fuertes paredes de polipropileno herméticas dentro de un marco de acero soldado. Las dimensiones de la plataforma eran de 1000 mm x 1000 mm x 1600 mm de profundidad, con un lado hecho de vidrio acrílico para permitir la inspección visual, tal y como se muestra en la Figura 4.

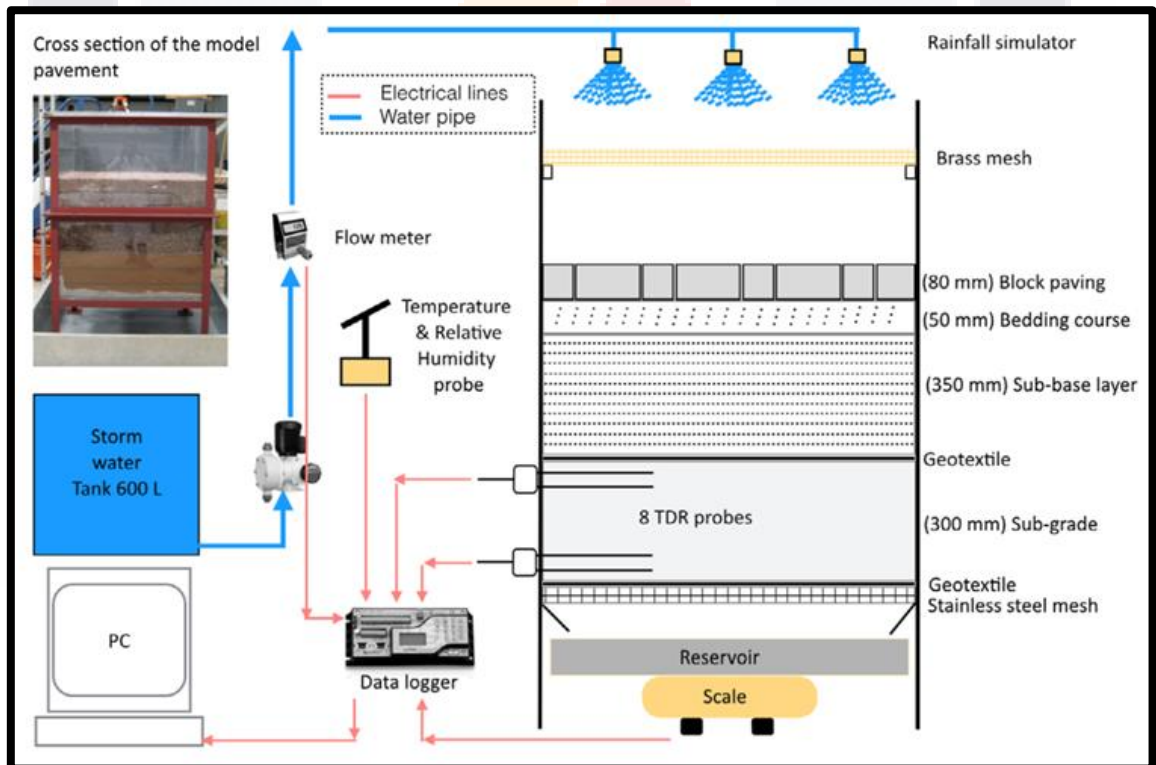


Figura 4. Configuración de diseño del simulador de lluvia de pavimento permeable utilizado en laboratorio. (Tomado de Alsubih et al., 2016).

El sistema de pavimento de concreto permeable constaba de adoquines de 200 mm de largo por 100 mm de ancho y 80 mm de espesor, una base de 50 mm de espesor, una subbase de 350 mm de espesor y una subrasante de 300 mm de espesor. La permeabilidad de los adoquines era de 18,750 l/seg/ha (6750 l/m²/hr). La base y la subbase estaban compuestas de agregados de 6 mm y 20 mm, respectivamente. La subrasante se llenó con arena fina de 0.20 milímetros de diámetro. Se colocaron geotextiles entre algunas capas para evitar la migración de partículas y la pérdida de material (ver figura 4).

El simulador de lluvia fue diseñado para suministrar agua al sistema de pavimento de concreto permeable, de manera que proporcionara control de volumen, intensidad y duración de la lluvia. Además, dentro de la capa de subrasante, los datos sobre el contenido de humedad se recopilaban utilizando sondas de reflectometría en el dominio del tiempo (TDR).

El procedimiento experimental implicó la aplicación de tres combinaciones diferentes de intensidad/duración de lluvia, y cada combinación se repitió tres veces. Se aplicaron profundidades de lluvia de 6.39, 7.78 y 10.85 mm durante períodos de 15, 15 y 30 minutos, respectivamente. Por lo general, los eventos de lluvia simulados ocurrieron durante un ciclo de siete días. Se simuló la lluvia una vez al día durante los primeros cinco días (días 1 a 5), y los días 6 y 7 fueron sin lluvia.

La temperatura atmosférica promedio durante los tres meses de prueba en Edimburgo, Inglaterra fue de 23,5 °C con una humedad relativa del 33,6%. Para fines prácticos, se asumió que la tasa de evaporación durante el período del experimento permaneció constante.

En total, se aplicaron 43 simulaciones de eventos de lluvia a la plataforma de pavimento permeable. Para una mejor comprensión de la metodología del estudio, se definieron los conceptos de volumen de salida, duración de salida y retraso de inicio, como a continuación:

- *Volumen de Salida.* Es la cantidad de agua drenada por el pavimento durante el intervalo de tiempo analizado, generalmente 24 horas.

- TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS
- *Duración de salida del flujo.* Se define como el período de tiempo comprendido entre el inicio y el final del flujo de salida para un solo evento de lluvia.
 - *Retraso de inicio.* Es el tiempo necesario para que la lluvia penetre a través de una estructura de pavimento hasta que alcance el punto de drenaje, es decir, cuando comience el flujo de salida.

Los resultados y conclusiones relevantes para el desempeño de un pavimento permeable de acuerdo con esta investigación fueron:

- Más del 40% de la precipitación total de todos los eventos de lluvia probados se retuvo dentro de la estructura del pavimento permeable, lo cual sugiere que el pavimento permeable almacena la lluvia y posteriormente la libera lentamente hacia el suelo subyacente o al sistema de recolección de aguas pluviales subterráneas. La lluvia fue liberada hasta dentro de las 7 horas posteriores al inicio del evento de lluvia.
- El contenido de humedad inicial de un pavimento permeable, antes de que ocurra un evento de lluvia, es clave en su capacidad para almacenar lluvia. A medida que aumenta la intensidad de la lluvia (con una condición inicial húmeda), la atenuación de la lluvia por la estructura del pavimento disminuye.
- En el día 1, con el sistema de pavimento permeable en condiciones secas, la duración de salida promedio del flujo fue de 0,86, 0,85 y 1,87 horas para las intensidades de lluvia de 6.39, 7.78 y 10.85 milímetros, respectivamente. Entre los días 2 y 5, con condiciones húmedas, la duración promedio del flujo de salida fue de 5.64, 5.9 y 7.43 horas aplicando las mismas intensidades. Al comparar las condiciones del día 1 con las del día 2 al 5, se tiene como resultado un aumento de la duración del flujo de salida de 4,78 a 5,56 horas, o sea, un incremento de tiempo del 300% al 600%.
- La respuesta del flujo de salida varió con base en las modificaciones en la duración de la lluvia y la humedad del pavimento. El aumento de la duración de la lluvia y la humedad inicial del pavimento provocaron un mayor flujo de salida de

la estructura del pavimento. La descarga máxima medida fue de 5.8, 6.5 y 15 L/hr/m² para las intensidades de lluvia 1, 2 y 3 respectivamente.

- El retraso de inicio para los días relativamente húmedos al comienzo del ciclo de lluvia (día 1) fue de 10.40, 10.20 y 10.20 minutos para las intensidades de lluvia 1, 2 y 3, respectivamente. Este retraso representa hasta el 70% de la duración de la lluvia y disminuyó hasta en 2,8 minutos cuando las condiciones iniciales eran húmedas (días 2-5). Lo anterior sugiere que el retraso de inicio disminuye a medida que aumenta el número de eventos de lluvia.

2.5 Evaluación de la captura de sedimentos utilizando suelos limosos y composta

El autor (Kevern, 2015) midió la captura de sedimentos, con la finalidad de proporcionar información para un mejor diseño hidráulico de concreto permeable. El estudio se divide en 2 partes. La primera parte probó la hipótesis de que los permeámetros de carga variable de paredes rígidas podrían no ser apropiados para medir la permeabilidad de muestras cilíndricas de concreto permeable, debido a la alta variabilidad y flujo desproporcionado observado a lo largo de las paredes de la muestra. La segunda parte del estudio trata de comprobar que la permeabilidad medida experimentalmente no representa por sí solas condiciones reales del fenómeno de captura de sedimentos y de las prácticas de mantenimiento.

En la metodología de pruebas de permeabilidad (primera parte del estudio), el peso específico del concreto en estado fresco se fijó para controlar la densidad, y un solo técnico elaboró todas las muestras. Se seleccionaron dos mezclas: la mezcla A y la mezcla B, las cuales tenían 17% y 32% de porosidad promedio, respectivamente. La mezcla de baja porosidad (mezcla A) contenía un agregado de grava de río redondeado con el 100% pasando la malla de 3/8" (9.75 mm) y el 100% retenido en la malla No. 4 (4.75 mm). La mezcla de porosidad alta (mezcla B) contenía un agregado de cuarcita triturado con el 100% pasando la malla de 1/2"

(12.5 mm) y el 100% retenido en la malla de 3/8" (9.5 mm). Las mezclas también incluían un aditivo reductor de agua de alto rango.

La figura 5 muestra los tipos de permeámetros utilizados en el estudio para medir la permeabilidad tanto en campo como en laboratorio.

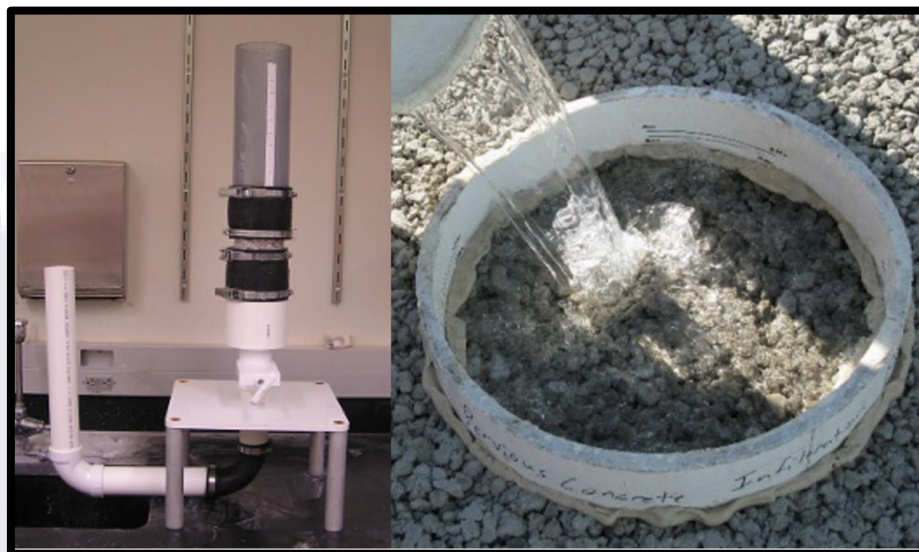


Figura 5. Técnicas para medir la conductividad hidráulica del concreto permeable: (a) Permeámetro de carga variable de laboratorio y (b) Infiltrómetro de anillo simple utilizado en campo (Tomado de Keven, 2015).

En la elaboración de las muestras, se aplicó una compactación con varilla en tres capas para asegurar una distribución uniforme de porosidad. Los tamaños de muestra incluyeron 75 mm de diámetro por 100 mm de longitud y 100 mm de diámetro por 150 mm de longitud, los cuales son los tamaños más comúnmente reportados en laboratorio. Posteriormente, se probó la permeabilidad en las muestras cilíndricas. Cinco muestras de cada tipo (A y B) fueron analizadas por tres operadores diferentes, y cada operador realizó la prueba en las mismas condiciones. Las muestras se secaron al aire entre cada prueba. Se realizaron pruebas de porosidad de acuerdo con el estándar ASTM C1754.

Observaciones de tomografía computarizada de rayos X mostraron que, para muestras de 75 mm, una gran cantidad de poros conectan la parte superior o inferior de la muestra con las paredes, y relativamente pocos poros conectan la parte superior a la parte inferior. En consecuencia, la mayoría del flujo ocurre en las

paredes de la muestra, produciendo resultados inconsistentes. Por otra parte, debido a los efectos de los bordes en los moldes cilíndricos, la porosidad externa en el material entre la mitad del diámetro de agregado (D_a) y la pared del cilindro es mucho mayor que la porosidad interna de la muestra a granel (Figura 6).

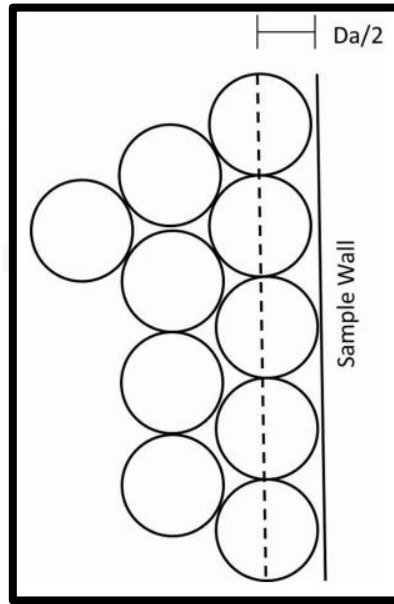


Figura 6. Efecto del empaquetamiento de partículas a lo largo de la pared del molde cilíndrico sobre la porosidad (Tomado de Kevern, 2015).

En la segunda parte del estudio, se simuló la captura de grandes cantidades de sedimentos transportados a la superficie del pavimento de concreto permeable durante la etapa de construcción. La reducción severa de la permeabilidad a menudo ocurre repentinamente durante esta etapa, cuando aún no se han implementado medidas adecuadas de control de la erosión.

Para la elaboración de las muestras, se seleccionó una mezcla con una porosidad del 27%. Nueve muestras tipo losa se colocaron con la misma densidad en estado fresco por un solo operador utilizando una técnica consistente. Las losas tenían 35 x 35 x 15 cm (14 x 14 x 6 pulgadas). Todo el material requerido se colocó primero en los moldes. El concreto se compactó uniformemente a la altura correcta utilizando una placa plana. Después del desmoldeo, las paredes laterales de la muestra se sellaron para evitar fugas.

Los ensayos se realizaron con tres tipos de suelos. Primero, se seleccionó una muestra compuesta principalmente de limo con un 34% pasando la malla #200. Posteriormente, se seleccionó una composta que tenía una granulometría uniforme y un 15% de material que pasaba la malla #200. Por último, se realizó una mezcla de los 2 tipos de suelos antes mencionados en cantidades iguales.

La tasa de carga de sedimentos en la superficie fue de 2.30 kg/m² para la suspensión del suelo, 1.80 kg/m² para la composta y 1.95 kg/m² para la combinación de ambas. Las lechadas con sedimentos y agua se vertieron y se presionaron en la superficie, y luego se dejaron secar a pleno sol a una temperatura promedio de 32 a 24 °C. Finalmente, se barrieron ligeramente con una escoba.

Después de la aplicación de la técnica de limpieza, se probó la infiltración y las muestras se colocaron al aire libre durante 7 días. Posterior a los 7 días del período de secado, la infiltración se probó una vez al día durante 7 días para simular los efectos de humectación y secado en las muestras obstruidas. Finalmente, las muestras se lavaron con un rociador de manguera de mano estándar y se aspiraron con un equipo industrial de taller de 4.0 HP.

De este estudio se obtuvieron las siguientes conclusiones con respecto al diseño de pavimentos de concreto permeables que sean resistentes a la captura de sedimentos:

- Aunque todas las muestras tenían el mismo peso unitario, porosidad y fueron colocadas por un solo operador utilizando la misma técnica de compactación, las tasas de infiltración variaron de 140 cm/hr hasta 1380 cm/hr. Cuando las tasas iniciales de infiltración estaban por encima de los 750 cm/hr fue posible la restauración de la permeabilidad, aunque solo alrededor del 50% de la capacidad inicial. Estos resultados sugieren la importancia de que el concreto tenga una alta tasa de infiltración inicial y de que se proteja contra la captura de sedimentos durante la etapa de construcción.
- Después de la aplicación de las suspensiones de suelo y agua, en todas las muestras se redujo la permeabilidad hasta un 10% o menos de la capacidad inicial. Las muestras donde se aplicó el suelo de composta tuvieron mayores tasas de

permeabilidad y recuperación después de la captura de sedimentos, lo que se esperaba porque la composta se compone de partículas de mayor diámetro. La combinación de suelo y composta causó el mayor efecto de reducción de la permeabilidad.

- Los resultados de permeabilidad indicaron que, para muestras hechas en laboratorio, gran parte de la porosidad y permeabilidad ocurre en las paredes de la muestra. Desafortunadamente, el flujo a lo largo de la parte exterior de las muestras no representa condiciones actuales en el concreto permeable, por lo que no deben utilizarse membranas semiflexibles o rígidas para probar la permeabilidad de las muestras.

Para reducir los efectos de flujo a lo largo de las paredes de las muestras, existen dos posibles soluciones: usar muestras de tamaño más grande o modificar las condiciones de la parte exterior de las muestras. Cuando se probó la permeabilidad de laboratorio en muestras de 75 y 100 milímetros de diámetro, las muestras de 75 milímetros presentaron resultados con menor variabilidad. En consecuencia, es importante que las muestras tengan un diámetro mínimo de 100 milímetros.

- La porosidad a lo largo de las paredes de la muestra se comparó con la porosidad total promedio utilizando los resultados determinados a partir del análisis de tomografía computarizada de rayos X. Para las muestras de 100 milímetros de diámetro, la porosidad en la región externa representaba el 19% del volumen total de toda la muestra. Asimismo, la porosidad en esta región era del 58%, un incremento del 33% de lo que se esperaba si la porosidad de la mezcla fuera homogénea.

2.6 Estudio de captura de sedimentos considerando condiciones climáticas locales

En su estudio, Yong *et al.* (2013) aportaron conocimiento en cuanto a los principales procesos físicos que rigen la captura de sedimentos en algunos pavimentos de concreto permeable, y desarrollaron un modelo estadístico de regresión simple que

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

puede predecir la captura de sedimentos considerando condiciones climáticas locales.

Se realizaron dos experimentos de laboratorio a escala de tiempo, en el transcurso de 3 años, en tres tipos de pavimentos: asfalto permeable monolítico, *Hydrapave* modular y *Permapave* monolítico. *Hydrapave* es un adoquín de concreto permeable de 8 cm de espesor con cámara y biselado de borde únicos, que permite la unión a tope y elimina la necesidad de colocar juntas de arena. Por otro lado, *Permapave* consiste en un pavimento de 5 cm de espesor hecho con grava triturada de diámetro entre 10 y 12 milímetros que se une con pegamento a base de polietileno.

Las ciudades australianas que se consideraron para las características climáticas fueron: *Brisbane*, con clima subtropical (precipitación anual promedio a largo plazo de 1200 mm) y *Melbourne*, con clima templado (precipitación anual promedio a largo plazo de 653 mm). Cada experimento se probó utilizando dos patrones de dosificación diferentes:

- (1) Flujo continuo sin períodos de secado
- (2) Flujo variable con períodos de secado (condiciones más naturales)

Cada sistema de pavimento se instaló uno al lado del otro en una plataforma de 2.7 m x 0.45 m x 1.95 m, que tenía tres compartimentos verticales separados, cada uno de 0.9 m de ancho (Figura 7). Se instaló un sistema de distribución neumática para suministrar la entrada de aguas pluviales, que consistía en una bomba peristáltica y un aspersor rotativo. Esto aseguró la distribución aleatoria e igualitaria de las aguas pluviales y los sedimentos sobre las tres superficies del pavimento. Se instalaron tres pluviómetros con cubeta basculante, con una resolución de volumen de 0.2 mm/punta, para monitorear las tasas de flujo de salida.

Los investigadores recogieron sedimentos de aguas pluviales de *Huntingdale Wetland*, en la ciudad de *Melbourne*, Australia. Posteriormente, con base en los análisis de los sedimentos recolectados, se agregaron concentraciones conocidas de sólidos, lodos, nutrientes y metales en un tanque de agua de grifo de 550 litros

constantemente mezclado, para simular el agua pluvial. La concentración de sólidos suspendidos totales se fijó en 150 mg/l.

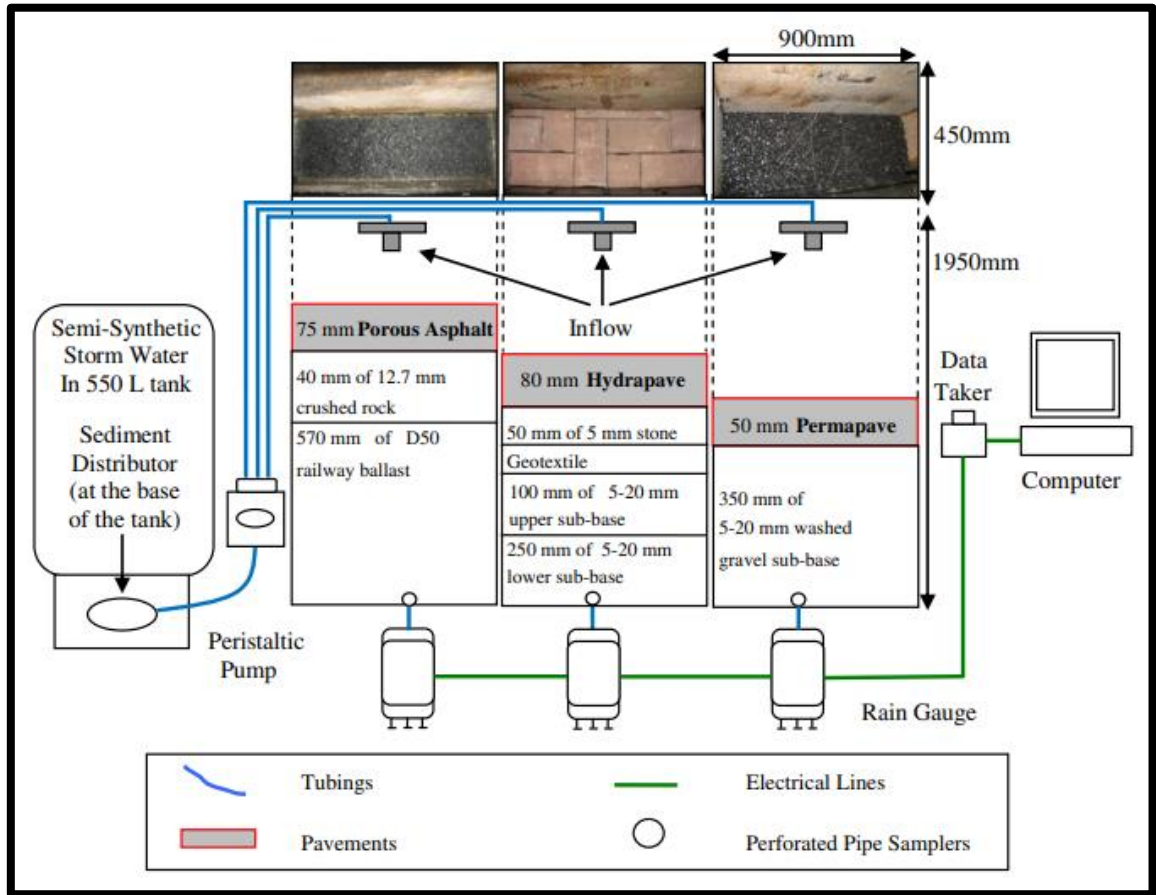


Figura 7. Plataforma experimental para la comparación de asfalto permeable, Hydrapave y Permapave. (Tomado de Yong et al., 2013).

Flujo continuo sin períodos de secado

En esta prueba se agregó agua continuamente (10.8 L/seg/ha) y 1 semana del experimento correspondió a alrededor de 1 año de escorrentía en el clima de *Brisbane* y 2 años en el clima de *Melbourne*. Se simularon un total de 13 y 26 años de operación bajo el clima de *Brisbane* y *Melbourne*, respectivamente. Además, se replicó 4 veces una tormenta bajo la cual los sistemas pudieran comenzar a inundarse, en la cual se agregaron 530 L/seg/ha durante 5 horas. La cantidad de sedimentos (sólidos suspendidos totales) utilizada en la prueba fue de 1.85 kg/m². Las tasas de flujo de salida se monitorearon continuamente a intervalos de tiempo

de 1 minuto utilizando pluviómetros, y estos registros se fueron verificado además utilizando mediciones manuales a intervalos regulares.

Flujo variable con períodos de secado

En este ensayo se simularon cinco flujos diferentes junto con un régimen de secado típico del clima de *Brisbane*. También se eligió una tormenta de diseño de 1 en 5 años. Cada año simulado se componía de los tipos de flujo A, B, C y D, que se aplicaron durante 96, 48, 48 y 48 horas, respectivamente, proporcionando un total de 1243 mm de flujo de entrada simulado (la precipitación anual promedio en *Brisbane*). Como tal, durante cada año simulado, se imitaron 21 períodos de clima seco aplicando calentadores de ventilador a 25 °C durante 3 horas (que eliminaron el 80% del contenido de humedad en los pavimentos).

Para mejorar la eficiencia y la integridad de los datos recopilados que se utilizaron en los análisis estadísticos, primero se realizaron verificaciones de forma manual y luego automáticamente en los vertidos de flujo recopilados. Las conclusiones más importantes del estudio fueron las siguientes:

- La permeabilidad del pavimento *Permapave* monolítico no se redujo en su totalidad, incluso después de 26 años de operación en clima subtropical simulado de *Brisbane*. No obstante, en el asfalto permeable y el pavimento *Hydrapave*, la permeabilidad se redujo a cero a los 12 años.
- El método 2 de dosificación duplicó aproximadamente la vida útil de todos los sistemas de pavimento, lo que sugiere la influencia de las condiciones climáticas en el fenómeno de captura de sedimentos. Se encontró que este fenómeno estaba altamente correlacionado con el volumen acumulado de agua y sedimentos, y la velocidad de flujo.
- La captura de sedimentos en el asfalto poroso tuvo lugar principalmente en la superficie, haciendo que el agua se estancara relativamente más rápido en comparación con el pavimento *Hydrapave*, donde los sedimentos se quedaron atrapados justo por encima de la capa del geotextil (colocada por debajo de los adoquines). En este caso, como la captura de sedimentos no es visible para los

peatones, no se notará la falla del sistema hasta mucho después, cuando se observe la acumulación de agua sobre la superficie del pavimento.

- La tasa de captura de sedimentos fue dependiente de las condiciones en las que se probaron los pavimentos. Se encontró que los sistemas de pavimento de concreto permeable que recibieron cantidades de flujo variables, junto con los períodos de secado, casi duplicaron su vida útil, en comparación con los sistemas que recibieron un flujo continuo sin períodos de secado.

2.7 Sistemas de pavimento de concreto permeable sometidos a captura de sedimentos de arena y arcilla en condiciones saturadas

Coughlin et al. (2012) evaluaron la captura de sedimentos de arena y arcilla en un sistema de pavimento de concreto permeable saturado, así como el efecto posterior de la limpieza de la superficie mediante lavado con agua presión. A diferencia de otros estudios, se utilizaron condiciones saturadas.

La metodología de pruebas experimentales registró la infiltración y la pérdida de carga hidráulica de las muestras de concreto permeable en una serie de ocho ciclos. El primer ciclo se efectuó sin añadir sedimentos. En ciclos posteriores se añadieron cantidades crecientes de arena y arcilla (tabla 2). Por último, en el octavo ciclo se aplicó lavado con agua a presión.

Tabla 2. Cantidad de sedimentos añadida en cada ciclo. (Tomada de Coughlin et al., 2012).

Ciclo	Arena (gr/m ²)	Arcilla (gr/m ²)
1	0	0.0
2	870	0.0
3	2600	0.0
4	6100	0.0
5	6100	87.0
6	6100	260.0
7	6100	610.0

El aparato de laboratorio que emplearon fue diseñado para simular un flujo saturado unidimensional a través del concreto permeable y dos capas subyacentes de grava y suelo, respectivamente (Figura 8).

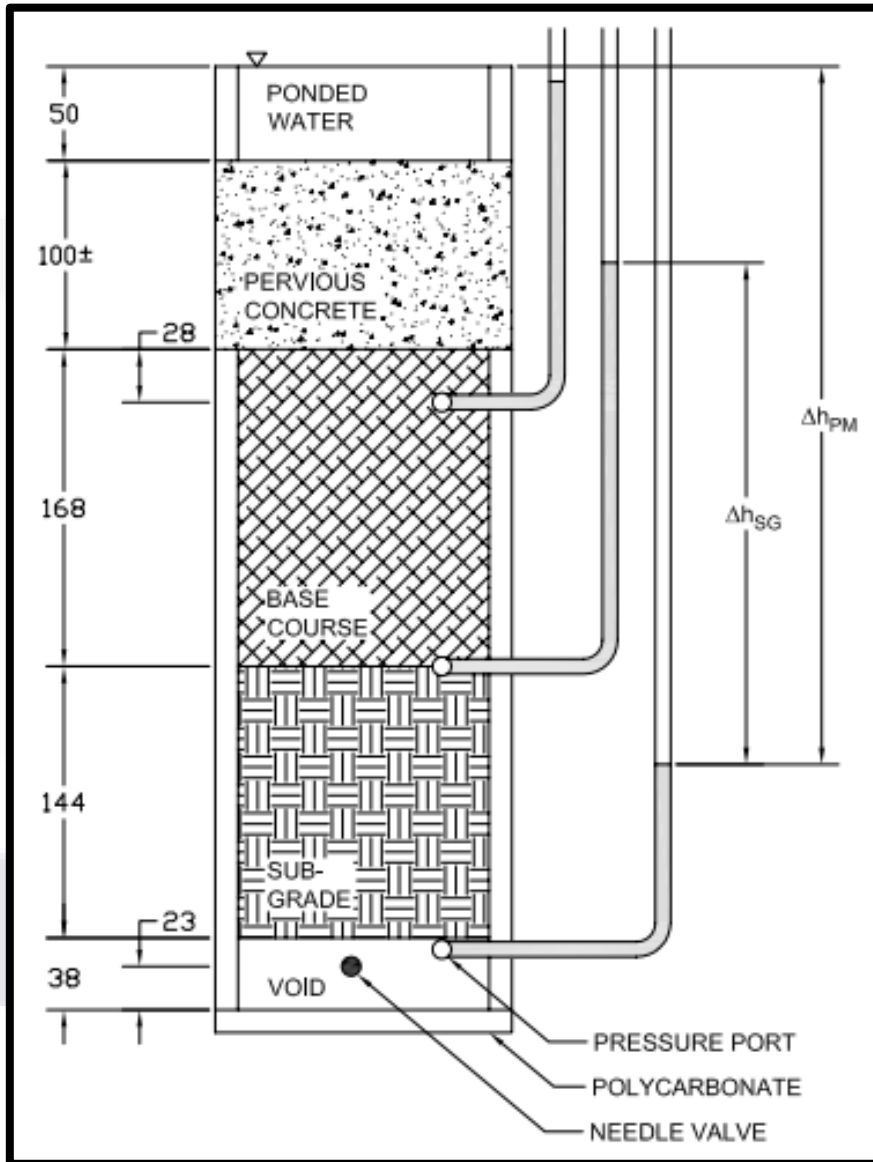


Figura 8. Aparato de infiltración. Δh_{SG} representa la pérdida de carga en la capa subrasante se y Δh_{PM} es la pérdida de carga en todos los medios porosos. (Tomado de Coughlin *et al.*, 2012).

Encima de la capa de concreto permeable se colocó un marco abierto corto de policarbonato utilizado para imponer condiciones de carga constante por encima de la superficie. Además, se perforaron seis puertos en tres pares en lados opuestos

de la caja, cerca de las transiciones de cada capa, para medir las diferencias de presión hidrostática utilizando piezómetros.

Procedimiento de Prueba

Antes de comenzar cada serie de ocho ciclos, el aparato se saturó con agua. Luego, el marco abierto sobre el concreto permeable se llenó gradualmente con agua del grifo hasta que se desbordó. En la muestra 1, el chorro de agua creó un lugar en la superficie del pavimento donde no se veían sedimentos, por lo que en las demás muestras se utilizó un tablero perforado para distribuir esta agua del grifo uniformemente en la parte superior. A continuación, se abrió la válvula de desagüe y se dejó que el sistema alcanzara el estado estacionario, definido como una descarga constante a través de la válvula y una altura constante en los piezómetros. La descarga se determinó por medidas triplicadas del volumen de agua en 30 y 60 segundos.

Después de registrar la descarga de agua en el aparato (para medir la permeabilidad) y tomar medidas de la carga hidráulica con un sistema de pavimento limpio, se agregaron sedimentos de arena o arcilla distribuyendo uniformemente una cantidad conocida, y luego agregando agua del grifo a través del tablero perforado en la parte superior. Posterior al séptimo ciclo, se lavó con agua a presión la superficie de concreto permeable y se midió la permeabilidad. Finalmente, el aparato se desarmó y reconstruyó con una muestra nueva.

Las tasas de infiltración en estado estacionario se calcularon a partir de la siguiente fórmula:

$$f = \frac{Q}{A}$$

Donde f = tasa de infiltración, Q es la descarga o caudal y A es el área de la sección transversal.

Las conclusiones de este estudio pueden resumirse como sigue:

- Desde una perspectiva hidrológica, una limitación del pavimento de concreto permeable es el riesgo de captura de sedimentos, el cual reduce la

“infiltración” del agua a través del pavimento hasta la parte inferior de la base, o la “exfiltración” que va desde el sistema de pavimento hacia la capa de suelo subyacente.

- Tanto la arena como la arcilla (montmorillonita) provocan captura de sedimentos, y la arcilla provoca aproximadamente diez veces más captura de sedimentos que la arena. No obstante, la mayor parte de la pérdida de carga hidráulica se produjo en la capa de suelo subyacente, en lugar de la capa de concreto permeable o la capa de base, lo cual sugiere que este es el elemento limitante del flujo.
- El lavado con agua a presión no restaura la infiltración en los sistemas de pavimento de concreto permeable cuando la capa de suelo subyacente es el elemento limitante del flujo.

2.8 Captura de sedimentos considerando diferentes porosidades de diseño

Tong (2011) midió la captura de sedimentos en el concreto permeable, considerando muestras con porosidades de diseño de 15%, 20% y 25% (figura 9). Se utilizaron tres tipos de sedimentos: arena, arena limosa y arena limosa arcillosa.

La metodología experimental se dividió en 2 etapas. En la primera etapa, se elaboraron las muestras de concreto y se construyeron los permeámetros de carga variable. En la segunda etapa, se midió la permeabilidad de los cilindros de concreto antes y después de aplicar el flujo de agua transportando sedimentos. En algunos casos el procedimiento contempló hasta 20 ciclos.



Figura 9. Diferentes cantidades de material de relleno fresco de concreto permeable en cada molde compactado para lograr la porosidad de diseño (Tomado de Tong, 2011).

Para simular parcialmente las condiciones en sitio de la deposición sedimentaria en el concreto permeable, se utilizó una cantidad de sedimentos basada en el estudio realizado por Mata (2008). Se definió un ciclo de captura de sedimentos durante el estudio. Para cada ciclo, una misma cantidad de sedimentos fue repartida uniformemente sobre la superficie de la muestra, y la permeabilidad fue obtenida al dejar fluir el agua mezclada con los sedimentos a través de la muestra, midiendo la variación de la carga hidráulica con el tiempo (permeámetro de carga variable).

La matriz experimental de las pruebas de captura de sedimentos se muestra en la tabla 2. Se incluyeron los casos A y B. El caso A imitó la condición de captura de sedimentos más realista, esto es, la aplicación de concreto permeable en sitios comerciales. Una cantidad de 100 gramos de sedimentos fue aplicada en cada cilindro de concreto permeable de 10 centímetros de diámetro. Dicha cantidad se distribuyó en 20 partes iguales, al considerar que el concreto permeable tendría una vida útil de 20 años, para ser aplicada en cada ciclo. Cada muestra estuvo expuesta hasta los 20 ciclos, sin limpieza o lavado, para predecir el comportamiento hidráulico del pavimento con el tiempo de servicio simulado.

Tabla 3. Matriz de pruebas experimentales para los casos A y B (Modificada de Tong, 2011).

Matriz de Pruebas (Total de Muestras: 108)				
Prueba	Estándar de Prueba	Tipo de Muestra		
		15%	20%	25%
Porosidad	Volumen	36	36	36
Permeabilidad	Carga Variable	36	36	36
Fase 1. Carga de sedimentos moderada 0.01 lb/ciclo (4.45 gr/ciclo)				
Permeabilidad	Carga Variable	Número de muestras		
Tipos de Sedimentos				
Arena		3	3	3
Arena limosa		3	3	3
Arena limosa arcillosa	3	3	3	
Fase 2. Carga de sedimentos alta 0.088 lb/ciclo (39.92 gr/ciclo)				
Permeabilidad	Carga Variable	Número de muestras		
Tipos de Sedimentos				
Arena		9	9	9
Arena limosa		9	9	9
Arena limosa arcillosa	9	9	9	
Métodos de recuperación de la permeabilidad (con muestras obstruidas de la fase 2)				
Permeabilidad	Carga Variable	Número de muestras		
Lavado a presión		3	3	3
Barrido con equipo de aspiración		3	3	3
Lavado a presión y barrido		3	3	3

El procedimiento de captura de sedimentos para el caso A se efectuó de la siguiente manera. Después de la medición de permeabilidad inicial de las muestras no obstruidas, el agua del cilindro graduado del permeámetro de carga variable se drenó por completo. Luego, 5 gramos de sedimentos se esparcieron uniformemente en la superficie de la muestra y la prueba de permeabilidad se realizó permitiendo que el agua fluyera a través de la muestra junto con los sedimentos. Se registró el tiempo para que el nivel del agua cayera desde la altura inicial constante (h_1) de 20 pulgadas a una altura final constante (h_2) de 4 pulgadas por encima de la parte superior de la muestra.

Por otro lado, en el caso B se escogió un escenario razonable pero adverso, involucrando grandes cargas de sedimentación. Un caso típico de esto son los usos de suelo donde existe construcción o edificación. Se utilizaron 820 gramos de

sedimentos para simular una carga durante 20 años de vida útil del concreto permeable en una muestra cilíndrica de 10 centímetros de diámetro. Cada muestra estuvo expuesta hasta 20 ciclos utilizando los tres tipos de sedimentos. Adicionalmente, en el caso B se emplearon tres prácticas de mantenimiento: lavado con agua a presión, barrido con equipo de aspiración y la combinación de estos dos. Las prácticas de mantenimiento se aplicaron en las muestras al concluir los 20 ciclos, comparando la recuperación de permeabilidad de cada práctica.

Los siguientes hallazgos importantes o conclusiones se enumeran según lo observado en el caso A:

- 1) La arena limosa arcillosa provocó la reducción de la permeabilidad más rápida y las partículas se depositaron fácilmente dentro del concreto en un corto período de tiempo. Según la prueba, la permeabilidad de las muestras disminuyó al 10% del valor inicial en un lapso de 3 a 5 años después de la construcción del pavimento de concreto permeable. Lo anterior sugiere que el limo arcilloso cohesivo actúa como cementante formando la unión entre el concreto y las partículas sedimentarias en los poros.
- 2) La arena limosa arcillosa causó la reducción de permeabilidad más significativa en comparación con la arena y el limo arcilloso. Más del 90% de la permeabilidad inicial se redujo al final de la prueba. Todos los cilindros de concreto con diferentes porosidades alcanzaron una permeabilidad constante de aproximadamente 20 pulgadas por hora (0.85 cm/min).
- 3) Más del 90% de la permeabilidad inicial se redujo con el tiempo para los cilindros de concreto con diferentes porosidades, hasta alcanzar una permeabilidad residual promedio de 35 pulg/hr (0.025 cm/s).
- 4) Cuanto mayor fue la porosidad de las muestras (20% o 25% en este estudio), mayor permeabilidad residual se obtuvo bajo la sedimentación de arena y limo arcilloso. No obstante, al utilizar sedimentos de arena limosa arcillosa la permeabilidad fue baja sin importar el grado de porosidad de las muestras.

5) Para los sedimentos de arcilla, no se generó una reducción significativa de la permeabilidad en el concreto, pero la deposición sedimentaria entre el pavimento y el suelo subyacente es crítica, y debe tenerse en cuenta para el diseño. Con los sedimentos de arena, al menos el 60% de la permeabilidad inicial se redujo.

Las pruebas de sedimentación efectuadas en el caso B confirmaron parcialmente los hallazgos obtenidos en el caso A, y concluyeron además que:

- 1) El lavado con agua a presión seguido de aspiración se confirmó como la mejor práctica de mantenimiento, debido a que generalmente produjeron un mayor aumento en la permeabilidad y una mayor tasa de infiltración.
- 2) La permeabilidad residual y las recuperaciones de permeabilidad por métodos de rehabilitación aumentan a medida que la permeabilidad inicial y/o la porosidad inicial del concreto son mayores.
- 3) Los sedimentos de arena limosa arcillosa se segregaron en partículas de mayor tamaño, es decir, en arenas, quedando atrapados en la superficie del concreto permeable y los sedimentos de grano más fino pasaron a través de las muestras. Además, los granos finos parciales se adhirieron a la superficie de las partículas de arena dentro los especímenes, reduciendo aún más la permeabilidad.

2.9 Efecto de la segregación y deposición sedimentaria sobre el concreto permeable

En su tesis doctoral, Mata (2008) consideró diferentes tamaños de sedimentos de arena, limo y arcilla, junto con una variedad de suelos sobre los que yace la capa de pavimento de concreto permeable. El propósito de la investigación fue identificar los efectos de la segregación y la deposición sedimentaria sobre la capa superficial de concreto permeable y la capa de suelo subyacente.

Los efectos del transporte de sedimentos en el concreto permeable fueron simulados en laboratorio mediante permeámetros de carga variable. Para llevar a

cabo los experimentos, se elaboraron cilindros de 10 centímetros de diámetro por 20 centímetros de altura, vigas de 50 y 100 centímetros de largo por 15 centímetros de ancho y 15 centímetros de espesor, y discos de 10 centímetros de diámetro por 2.5 centímetros de altura.

En la metodología se dividió el estudio en 3 fases:

- En las fases 1 y 2, las tasas de sedimentación de tres diferentes tipos de concreto permeable fueron examinadas con tres diferentes tipos de sedimentos: arena, limo arcilloso y arena limosa arcillosa. En particular en la primera fase, 2 mezclas de concreto permeable se sujetaron a un flujo pequeño de agua con alta presencia de sedimentos simulando el peor escenario posible.
- En la segunda fase, una mezcla de concreto permeable se sometió a un alto flujo inicial de agua, el cual fue disminuyendo de intensidad hasta tener un flujo pequeño con sedimentos, que fueron calculados con base en la vida útil del pavimento.
- La fase 3 contempló efectos de congelación sobre el concreto permeable.

La cantidad de sedimentos utilizada en la primera fase del estudio fue considerada para el peor escenario posible con una producción de sedimentos de 9,000 kg/ha/año. Esta cantidad de sedimentos es mayor que la estimada por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (US-EPA) para sitios en proceso de construcción de 6,750 kg/ha. Para la segunda fase, se tomaron en cuenta las estimaciones de la US-EPA de 1,125 kg/ha/año para sitios comerciales, considerando que la principal aplicación de los pavimentos permeables son los estacionamientos.

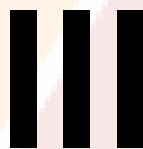
El valor de variables tales como porosidad, resistencia a la compresión, resistencia a la tracción, módulo de ruptura, módulo de Young y resistencia a la congelación-descongelación, se determinó con base en estándares de la *American Society of Testing Materials (ASTM)*. La permeabilidad y la tasa de infiltración se obtuvieron utilizando un permeámetro de carga variable y un permeámetro de anillo simple, respectivamente.

Las conclusiones generales de la investigación se resumen en los siguientes puntos:

- Los sedimentos de arcilla son los que más afectaron la conductividad hidráulica del concreto permeable, bloqueando poros de pequeño diámetro que pudieran estar conectando poros mucho más grandes.
- La recuperación de la permeabilidad en el concreto nunca se restablece con prácticas tradicionales de mantenimiento, como lavado con agua a presión y aspiración con barredoras viales, cuando existen sedimentos de arcilla.
- Los sedimentos de arena fueron capturados únicamente en la región cercana a la superficie y se pudieron remover parcialmente con prácticas de mantenimiento. En otras palabras, no se presentaron afectaciones en la infiltración del suelo subyacente ni en el interior del concreto permeable.
- El limo arcilloso causó una deposición sedimentaria en la superficie del suelo subyacente, afectando la permeabilidad tanto del suelo como de la muestra de concreto permeable.
- La permeabilidad de la capa de sedimentos depositados puede afectar la infiltración de un suelo subyacente de arena limosa. Por otro lado, los sedimentos no afectarán la infiltración cuando se trate de un suelo de limo arcilloso compactado.



CAPÍTULO



MARCO TEÓRICO

CAPÍTULO III: MARCO TEÓRICO

3.1 Introducción

Con el objetivo de elegir el tipo de pavimento permeable más adecuado para las pruebas experimentales de este estudio, se llevó a cabo una clasificación de los pavimentos permeables disponibles en la actualidad, indicando las principales ventajas y desventajas en la aplicación de estos. Se incluye también un resumen de las propiedades hidráulicas y mecánicas más importantes del concreto permeable, algunas de las cuales se estudian en la campaña experimental. Por último, se presenta información acerca de los materiales y requerimientos para la elaboración de mezclas de concreto permeable con Cemento Portland, de acuerdo con la revisión de la literatura existente.

3.2 Tipos de Pavimentos Permeables

En la actualidad, existen una gran variedad de pavimentos permeables que se pueden utilizar en numerosas aplicaciones. Algunos investigadores (i.e. Eisenberg *et al.*, 2015) los clasifican en 4 categorías principales: asfalto permeable, concreto permeable con cemento portland, adoquines de concreto permeable y pavimentos *Grid*.

Aunque todos los pavimentos permeables cumplen la misma función y aportan beneficios al medio ambiente, existen diferencias significativas en cuanto a la durabilidad, diseño estructural, tipo de aplicación, costos, técnicas de colocación, consideraciones climáticas, entre otros. Estos factores deben ser considerados al momento de proyectar un sistema de pavimento de concreto permeable.

A continuación, se presenta un resumen de los tipos de pavimentos permeables que se pueden encontrar hoy en día.

3.2.1 Asfalto Permeable

Consiste en una mezcla asfáltica caliente convencional, con agregados finos significativamente reducidos, que permite el paso del agua a través de espacios vacíos interconectados en su estructura interna, como lo definen Eisenberg *et al.* (2015). De acuerdo con los autores, la porosidad de la superficie del asfalto permeable generalmente varía entre 18% y 25%, a diferencia de un asfalto estándar donde el rango suele ser del 2% al 3% y la conductividad hidráulica es nula.

El pavimento de asfalto permeable se coloca directamente sobre una base de agregados gruesos de graduación abierta que incluye a veces una capa estabilizante de grava de menor tamaño o una base permeable tratada con asfalto (Figura 10). Hansen (2008) argumenta que los agregados deben estar libres de polvo (menos del 2% del material pasa la malla No. 100), ser uniformes y tener una porosidad de alrededor del 40% en estado compactado, de acuerdo con la norma ASTM C29. Además, menciona que en la mayoría de los casos se utiliza grava AASHTO No. 3 y No. 57 para la cama de recarga (capa de base o subbase) y para la capa estabilizante, respectivamente.



Figura 10. Sección típica de un pavimento de asfalto permeable. Modificado de Eisenberg *et al.* (2015).

La capa estabilizante actúa como un filtro que no deja pasar el asfalto permeable hacia la cama de recarga al momento de ser tendido, y debe tener un espesor máximo de 1 pulgada (Hansen, 2008). No obstante, por experiencia los contratistas

están dejando de utilizar la capa estabilizante debido a que no cumple totalmente su objetivo principal de proporcionar una superficie pavimentada estable, por lo que es opcional su consideración en el diseño (Eisenberg *et al.*, 2015).

El espesor de la cama de recarga se determina con base en la cantidad de agua que necesita ser almacenada y la tasa de infiltración del suelo no compactado. Tal como señala Hansen (2008), dicho espesor generalmente puede ser de 30 hasta 100 centímetros, lo cual implica que la capa puede almacenar de 12 hasta 40 centímetros de lluvia si los agregados tienen una porosidad del 40%. De igual manera, el autor recomienda un espesor mínimo compactado de la capa de asfalto permeable de 6, 10 y 15 centímetros para estacionamientos, calles residenciales y aplicaciones con tráfico pesado, respectivamente.

En la colocación de un pavimento de asfalto permeable se debe garantizar un nivel adecuado de compactación que no cause la ruptura de los agregados o resulte en una reducción excesiva de la porosidad superficial o interior, al tiempo que el sistema mantiene un soporte estructural de diseño (Eisenberg *et al.*, 2015). Asimismo, Hansen (2008) refiere que la capa de suelo subyacente no debe ser compactada, ya que esto reduciría su capacidad de infiltración, haciendo inefectivo el sistema de pavimento.



Figura 11. Demostración de la conductividad hidráulica del asfalto permeable. Obtenido de Asphalt Institute (2010).

Generalmente el asfalto permeable presenta una textura tosca como la de la figura 11. De acuerdo con Eisenberg *et al.* (2015), su uso es adecuado para aceras y caminos peatonales, áreas de estacionamiento con niveles de tráfico de bajo a moderado, áreas recreativas (por ejemplo, canchas de básquetbol y tenis), caminos de acceso y caminos de baja velocidad de circulación. De igual manera, los autores señalan que el uso de aditivos (fibras, agentes antiadherentes, etc.) y aglomerantes han permitido utilizarlo en aplicaciones con mayores demandas de carga y tráfico pesado.

Para la infiltración de aguas pluviales, el diseño del pavimento asfáltico permeable debe considerar las condiciones del sitio que afectan este proceso. Como plantea Hansen (2008), los suelos con tasas de infiltración de 0.25 a 25 cm/hr funcionan adecuadamente, y un sistema de pavimento eficiente debe retener toda el agua de la tormenta de diseño, además de evacuarla gradualmente en un periodo máximo de 72 horas.

Otro material opcional para el diseño de un sistema de pavimento de asfalto permeable son los geotextiles, los cuales se utilizan para prevenir que los sedimentos de la capa de suelo subyacente contaminen la cama de recarga (Hansen, 2008). Las recomendaciones varían sobre el uso de los geotextiles, y como regla general deben utilizarse en suelos con poca capacidad de carga y alto contenido de finos, y también en los lados de la excavación para evitar derrumbes (Eisenberg *et al.*, 2015).

3.2.2 Método alternativo de colocación de asfalto permeable

El asfalto permeable también se suele colocar sobre capas ya existentes de pavimento asfáltico impermeable (figura 12). Eisenberg *et al.* (2015) argumentan que, desde la década de 1970, se ha utilizado esta técnica en los Estados Unidos en carreteras selectas, para hacerlas más silenciosas y seguras, ya que la superficie permeable conduce a distancias de parada más cortas para los automóviles, períodos de secado de la superficie más rápidos, menos salpicaduras y rociado durante la precipitación, así como a la reducción del ruido (absorción acústica).

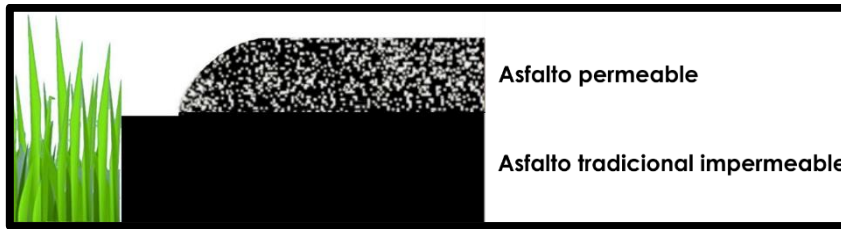


Figura 12. Sección típica de una capa de asfalto permeable colocado sobre un pavimento asfáltico tradicional. Modificado de Eisenberg *et al.* (2015).

La escorrentía de las aguas pluviales viaja a través de los vacíos en la superficie superior hasta que alcanza la capa de asfalto impermeable subyacente. Luego, el agua fluye a lo largo de esta capa convexa hacia los hombros de la carretera.

3.2.3 Concreto Permeable con Cemento Portland

Se define como la unión de pasta cementante con agregados de graduación abierta para producir un pavimento rígido (Eisenberg *et al.*, 2015). El objetivo es crear un material con poros interconectados, generalmente de un tamaño de 2 a 8 milímetros, que permita la rápida infiltración de las aguas pluviales hacia las capas subyacentes (ACI 522R, 2006).

La figura 13 muestra una sección típica de pavimento de concreto permeable. La capa de base presenta una porosidad de 36% a 42% cuando ya está compactada, y su profundidad se determina según el diseño hidrológico y la carga vehicular. (Eisenberg *et al.*, 2015).

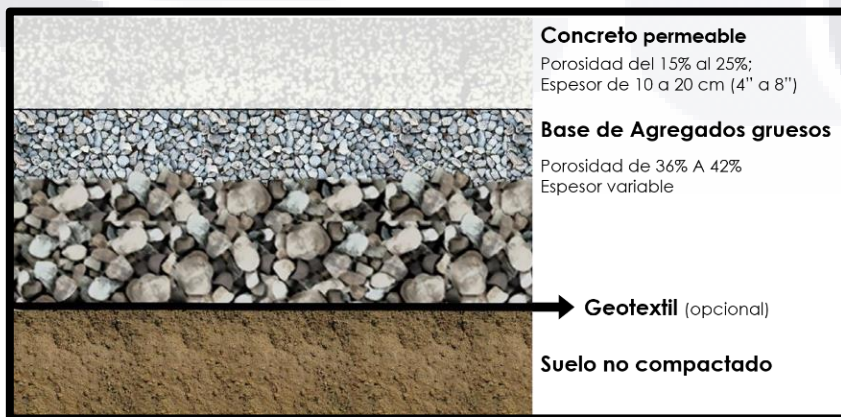


Figura 13. Sección típica de un pavimento de concreto permeable. Modificado de Eisenberg *et al.* (2015).

Eisenberg *et al.* (2015) mencionan que el concreto permeable puede producirse utilizando una amplia variedad de tamaños y formas de agregados, aunque el agregado grueso de $\frac{1}{4}$ a $\frac{1}{2}$ pulgada ha demostrado producir una textura deseable. Por otro lado, la conductividad hidráulica del concreto permeable con cemento Portland suele oscilar entre los 500 y 7,600 cm/hr (0.0014 y 0.0211 m/s, respectivamente) cuando está recién instalado, y el volumen total de agua infiltrado caerá en un rango de 81 a 730 L/min/m², tal y como lo expresa la norma ACI 522R-2006.

La resistencia del concreto permeable varía desde baja (28 kg/cm²) para aplicaciones que no requieren mucha resistencia (como control de erosión de suelos) hasta alta (280 kg/cm²) para secciones con tráfico pesado, y normalmente se requiere de un curado mínimo de 7 y 14 días cuando el concreto se diseña para soportar cargas ligeras y de tráfico pesado, respectivamente (Eisenberg *et al.*, 2015).



Figura 14. Concreto permeable de grano fino pulido colocado en una acera en Sunnyvale California. Obtenido de Bay Area (2019).

Los pavimentos de concreto permeable son utilizados principalmente para el manejo de aguas pluviales en las áreas de estacionamiento de vehículos, donde se pueden acumular enormes cantidades de flujo en poco tiempo. No obstante, el concreto permeable se ha utilizado en aceras, senderos, caminos, calzadas residenciales, calles residenciales o de bajo volumen de tránsito, bordillos, canaletas, recubrimientos, estabilización de pendientes, protección contra la

erosión de suelos, cubiertas de piscinas, muros de mitigación de sonido, hombros de carreteras, pisos en invernaderos y establos de caballos, así como en el césped artificial (Eisenberg *et al.*, 2015). La figura 14 muestra la aplicación de concreto permeable en una acera de una zona residencial.

Por último, el espesor del concreto permeable varía comúnmente de 125 a 300 milímetros, y se requiere de un análisis de las características hidráulicas y estructurales para determinarlo (ACI 522R, 2006).

3.2.4 Adoquines de Concreto con Juntas Permeables

Estos pavimentos consisten en bloques de concreto que forman juntas permeables cuando son ensamblados y colocados, según lo descrito por Eisenberg *et al.* (2015). Los autores mencionan que las juntas típicamente comprenden del 5% al 15% del área total de superficie del pavimento, y se componen de agregados de tamaño pequeño que mantienen una alta conductividad hidráulica. Además, estos bloques pueden sustituir el pavimento impermeable tradicional para la mayoría de las aplicaciones peatonales y vehiculares, excepto en carreteras o autopistas de alta velocidad.



Figura 15. Adoquines de concreto permeable utilizados en la rehabilitación del centro de Burlingame Avenue en Burlingame, California. Obtenido de CNCA (2019).

De acuerdo con Eisenberg et al. (2015), estos pavimentos se han desempeñado con éxito en pasos peatonales, aceras, calzadas, calles y estacionamientos. Las piezas de adoquín se elaboran en diferentes figuras patentadas y no patentadas que ofrecen una amplia gama de formas y juntas. Varios colores permiten crear franjas o pautas en el pavimento, mejorando significativamente el diseño y la apariencia desde un contexto arquitectónico.

Smith (2000) clasifica los adoquines de concreto con juntas permeables en 3 tipos:

- Con juntas pequeñas. Las piezas de concreto son impermeables. No obstante, las juntas permiten la filtración al tiempo que se mantiene un alto contacto entre cada elemento para la estabilidad bajo cargas vehiculares (ver figura 15).
- Con juntas amplias. Tienen aberturas que pueden ser de hasta 13/8 pulg. (35 mm). Las juntas se crean con separadores colocados en los lados de cada pieza, o con espaciadores de plástico insertados entre cada unidad. Estos mantienen separaciones constantes. Aunque estos bloques son impermeables, las juntas se rellenan con grava triturada o con césped, lo cual permite la infiltración (ver figura 16).
- Adoquines de concreto permeable. Permiten que la lluvia entre directamente y pase a través de ellos porque el concreto tiene poco o nulo contenido de agregados finos. Al igual que otros adoquines, las unidades se ajustan firmemente sobre una cama de arena, se compactan, las juntas se rellenan con arena gruesa, se lavan y se compactan nuevamente. Este tipo de adoquines son apropiados sólo en áreas sin congelación y descongelación. Su uso es mejor para áreas peatonales, carriles para bicicletas y aplicaciones residenciales.

Eisenberg et al. (2015) argumentan que, aunque el costo de los pavimentos con adoquines es más elevado comparado con el del concreto permeable convencional, y se requiere mano de obra especializada para su colocación, estos pueden llegar a tener una vida útil de hasta 50 años. Además, no se requieren días

adicionales para el curado después de su instalación, y tanto los adoquines como las capas de grava pueden ser removidas y reinstaladas.



Figura 16. Adoquines de concreto con juntas permeables en Goldstream Avenue, Victoria, Canadá. Obtenido de EVstudio (2016).

Generalmente la pendiente de la superficie donde se instala el pavimento debe ser menor al 5%. Sin embargo, se pueden alcanzar valores de hasta 15% en casos especiales, de conformidad con Eisenberg et al. (2015). Los autores también establecen que, en caso de existir una microcuenca que transmita escurrimientos superficiales hacia el sistema de pavimento, no debe tener una inclinación mayor al 20% ni tener un tamaño mayor a cinco veces el área de infiltración. De igual manera, debe estar libre de sedimentos que puedan ser transportados por escorrentía superficial.

Como plantea Smith (2000), el diseño más común para un pavimento de adoquines con juntas permeables es el que permite una infiltración total y directa hacia el suelo subyacente (figura 17). El autor también menciona que es un factor importante, y con frecuencia un requisito reglamentario, tener al menos 0,60 m (2 pies) de suelo entre la parte inferior de la subbase y el nivel de aguas freáticas estacional, para garantizar la estabilidad del suelo cuando está saturado, así como para impedir el filtrado de contaminantes hacia los acuíferos.

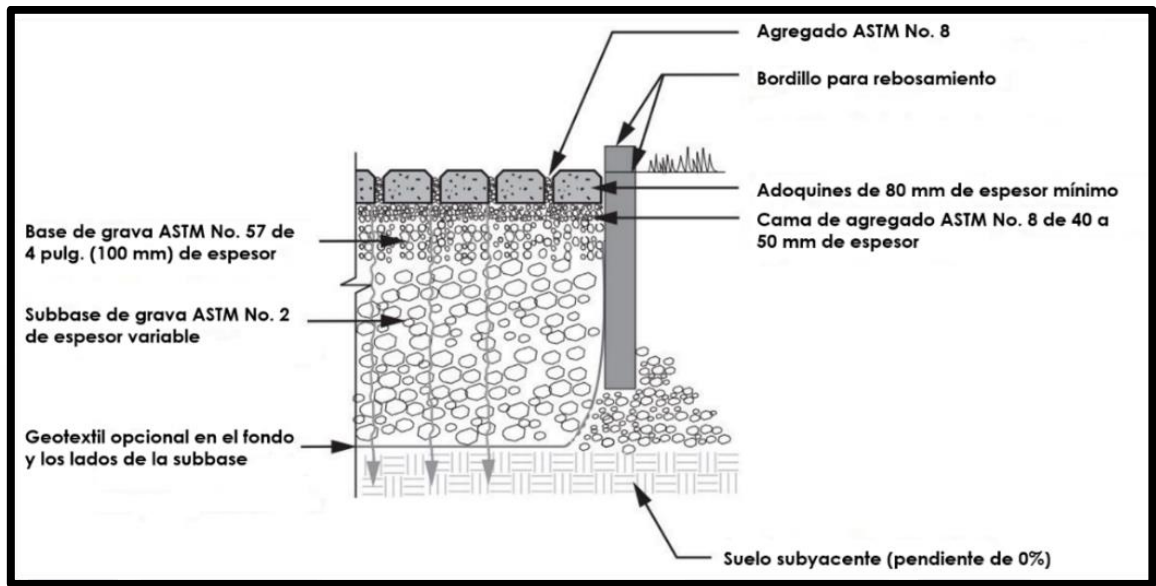


Figura 17. Sección típica de diseño de un pavimento de adoquines con juntas permeables. Modificado de Smith (2000).

Existen otros casos en los que ocurre una infiltración parcial (figura 18), donde parte del agua se transmite hacia el suelo, mientras que los escurrimientos restantes fluyen a través del drenaje instalado hacia cunetas, pozos de infiltración o entradas de alcantarillado pluvial. Las tuberías perforadas drenan el exceso de escorrentía que no puede ser absorbido por el suelo.

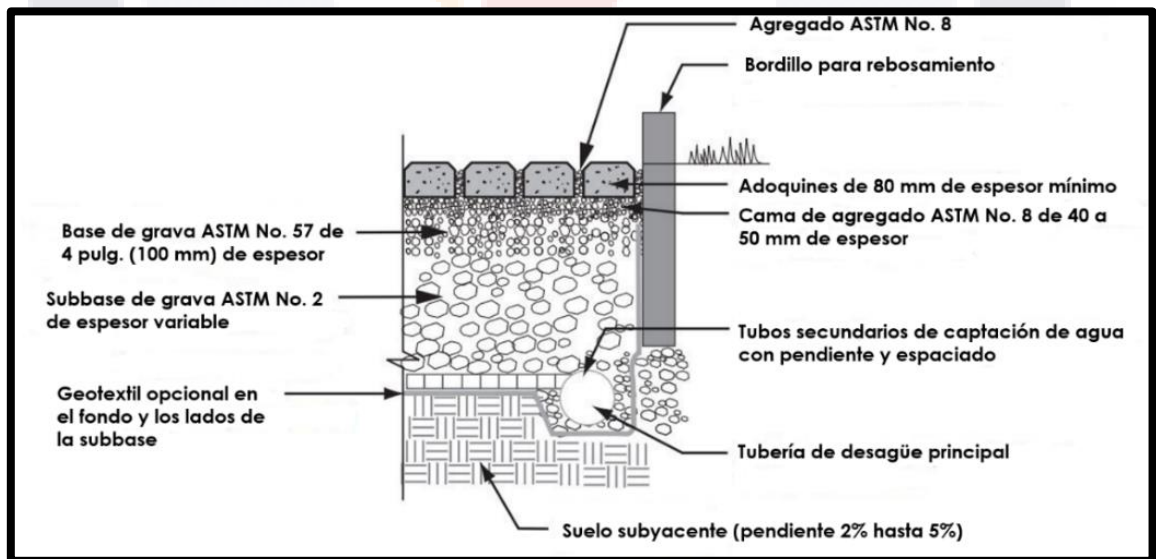


Figura 18. Sección opcional de pavimento de adoquines con juntas permeables con sistema de drenaje. Modificado de Smith (2000).

3.2.5 Pavimento Grid

Este tipo de pavimentos aparecieron por primera vez en 1961 en un importante centro cultural cerca de Stuttgart, Alemania y tenían como objetivo reducir los escurrimientos superficiales y la temperatura ambiente del área de estacionamientos de la zona (ICPI, 2019). El acabado típico de un pavimento *Grid* instalado con pasto es el que se muestra en la figura 19. Según Eisenberg *et al.* (2015) estos pavimentos consisten en cuadrículas de concreto o plástico con aberturas superficiales rellenas con un material permeable (típicamente agregados, arena o pasto) que se colocan directamente sobre una cama de arena de ½ a 1 pulgada de espesor, y una base o subbase de agregados triturados de graduación densa.



Figura 19. Pavimento *Grid* de concreto y césped instalado en un sendero residencial (ICPI, 1999).

Los bloques de pavimento *Grid* generalmente pesan entre 20 kg (45 lb) y 40 kg (90 lb) y el área de superficie libre está entre el 20% y el 75% (ICPI, 1999). Debido a su forma, pueden agrietarse mientras están en servicio, pero los bloques más pequeños (de menos de 300 mm de largo y ancho) reducen el riesgo de ruptura (Eisenberg *et al.*, 2015).

De acuerdo con la norma ASTM C-1319, los *Grids* de concreto tienen unas dimensiones máximas de 610 mm por 610 mm (24 x 24 pulgadas) por bloque, y un

espesor mínimo de 80 mm (3 pulgadas). Además, el grosor mínimo requerido entre las aberturas de las cuadrículas es de 25 mm (1 pulgada). El diseño puede ser en celosía o almenada (Figura 20). Los diseños en celosía tienen una superficie plana que forma un patrón continuo de concreto cuando se instala. Los de tipo almenado tienen dientes de hormigón sobresalientes en la superficie que hacen que el césped parezca continuo cuando se instala.

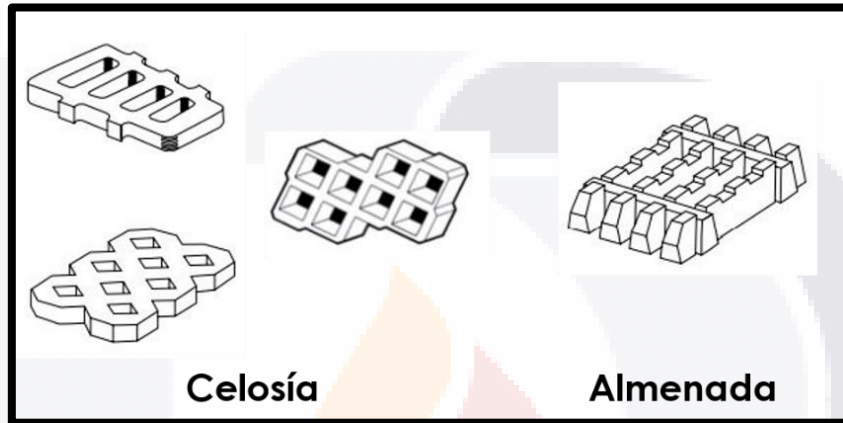


Figura 20. Tipos de diseño de los pavimentos *Grid*. Obtenido de ICPI (1999).

Tal como se señala en el boletín técnico del Instituto de Pavimentos de Concreto Permeable (ICPI, 1999), la elección del material de relleno de las aberturas depende de la intensidad del uso del pavimento. El pasto generalmente requiere al menos de 5 horas diarias de sol para sobrevivir. En consecuencia, si se instala pavimento *Grid* en un estacionamiento muy concurrido, deben utilizarse agregados, ya que la sombra constante generada por los automóviles provocará que el pasto se seque.

En la construcción de un pavimento *Grid*, la capa de suelo y la capa de base deben ser compactadas uniformemente al 95% y 98% de la prueba Proctor, respectivamente, según la norma ASTM D 698 (1993). Esto implica una reducción en la tasa de infiltración del suelo, por lo que no se recomienda instalar pavimentos de esta clase en suelos donde dicha disminución sea significativa, a menos que se coloque un sistema adicional de drenado.

Como parte del diseño de un pavimento *Grid*, se recomienda contar con un espesor mínimo de 200 milímetros de base de agregados para aplicaciones de

tránsito vehicular ligero, como estacionamientos y entradas de coches (ICPI, 1999). Cuando el suelo contenga limos o arcillas en grandes cantidades o cuando existan cargas vehiculares pesadas se requerirá un mayor espesor (ICPI, 1999). Una sección típica de pavimento *Grid* es la que se muestra en la figura 21.

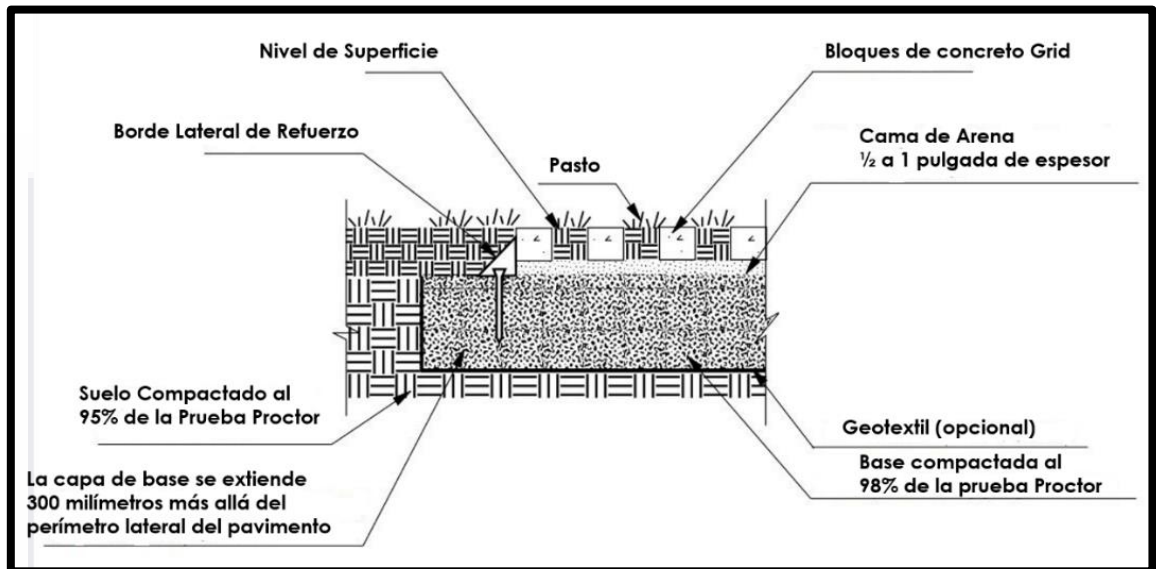


Figura 21. Sección transversal típica de un pavimento *Grid*. Para el caso de aplicaciones con cargas vehiculares es recomendable utilizar bordes laterales de refuerzo. Modificado de ICPI (1999).

Una de las principales limitantes de los pavimentos *Grid* radica en su poca o nula aportación de refuerzo estructural al sistema, a diferencia de otros tipos de pavimentos permeables, ya que la estabilidad viene dada por los materiales de las capas subyacentes (Eisenberg *et al.*, 2015). Por consiguiente, la aplicación de estos pavimentos incluye únicamente senderos de fraccionamientos residenciales, áreas de estacionamiento, aceras, caminos de acceso adyacentes a edificios, camellones, terraplenes, orillas de lagos o canales, rampas de lanzamiento de botes, entre otros (ICPI, 2019).

Por último, para el control de erosión del suelo, los pavimentos *Grid* proveen una estabilización inmediata de los terraplenes hasta que el pasto u otro tipo de vegetación crecen y se afianzan (Ver figura 22). El ángulo máximo recomendado para la colocación del pavimento en estos casos es de 18 grados (talud 3:1) o hasta de 27 grados (talud 2:1) si se colocan estacas de acero y no hay cargas de vehículos.

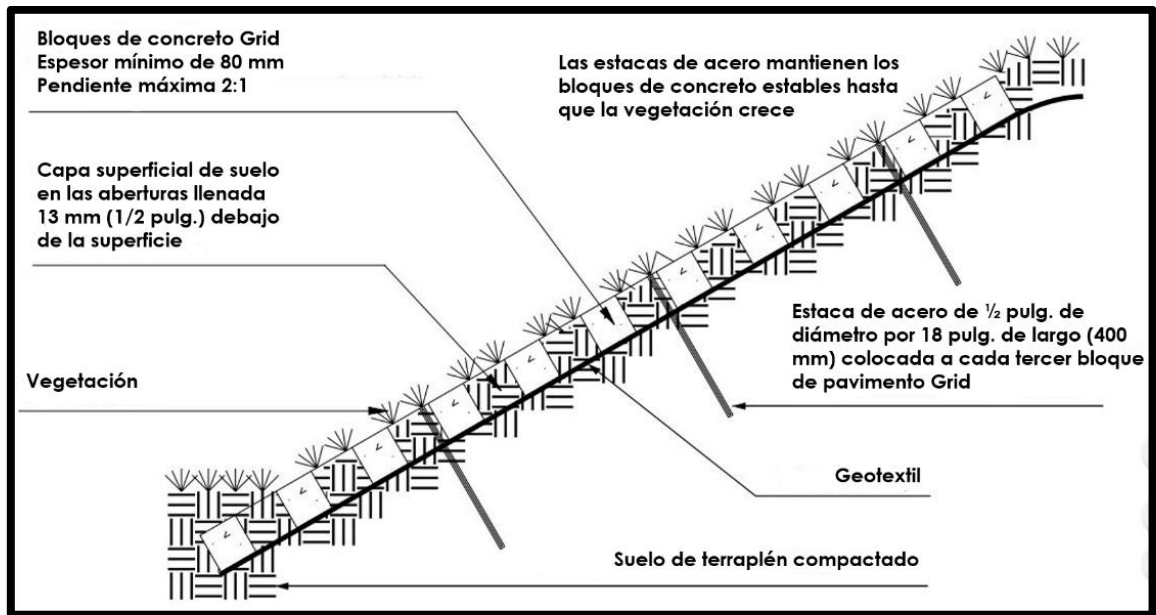


Figura 22. Sección transversal típica de un pavimento *Grid* colocado sobre un terraplén. Modificado de ICPI (1999).

3.2.6 Elección del tipo de pavimento permeable

La posibilidad de trabajar con Asfalto Permeable o con Adoquines de Concreto con Juntas Permeables se descartó debido a que resultaba poco práctico y muy costoso la elaboración de muestras representativas. Por el contrario, los materiales y equipo necesarios para la fabricación y curado de muestras de Concreto Permeable con Cemento Portland (CPCP) son muy similares a los utilizados en las mezclas de concreto hidráulico convencional, y generalmente ya existen en los laboratorios institucionales locales.

Por otra parte, debido a que los pavimentos *Grid* no aportan un refuerzo estructural al sistema de pavimento, también se descartó su elección en el presente estudio, ya que la resistencia mecánica del CPCP ha hecho posible su potencial aplicación en superficies donde existen cargas de tráfico ligero y pesado.

3.3 Propiedades hidráulicas y mecánicas del concreto permeable

3.3.1 Conductividad Hidráulica

Se define como la cantidad de flujo que pasa a través de un medio poroso en un tiempo determinado. La conductividad hidráulica es una propiedad que se puede determinar en laboratorio mediante ensayos controlados, pero también en campo utilizando infiltrómetros de anillo simple o doble, y los valores típicos en el concreto permeable varían desde los 0.20 cm/s (288 pulg/hr) hasta 0.54 cm/s (770 pulg/hr). De igual manera, las tasas de infiltración oscilan en un rango de 120 L/m²/min hasta 320 L/m²/min (Tennis *et al.*, 2004).

Actualmente no existe una técnica estandarizada para determinar la conductividad hidráulica del concreto permeable en laboratorio. No obstante, se han empleado comúnmente 2 tipos de dispositivos: el permeámetro de carga variable y el permeámetro de carga constante. Algunos investigadores (i.e. Kevern, 2015; Mata, 2008; Tong, 2011) han utilizado permeámetros de carga variable con esta finalidad. En las pruebas se asume un flujo laminar completamente saturado, por lo que la ley de Darcy es aplicable. Montes Y Haselbach (2006) demostraron que la hipótesis anterior es válida para concretos permeables normales con porosidades de hasta 32%.

Kevern (2015) determinó la conductividad hidráulica utilizando un permeámetro de carga variable (Figura 23). De acuerdo con el autor, la muestra de concreto permeable se confina en juntas de goma termo-contráíbles, permitiendo una conexión de la muestra con los tubos superior e inferior sin que haya fugas. Se proporciona un tubo vertical igual a la elevación del fondo de la muestra para crear contrapresión y evitar la cavitación. La prueba consiste en medir el descenso de la carga hidráulica en el tubo superior, aplicando la ley de Darcy para obtener la permeabilidad.

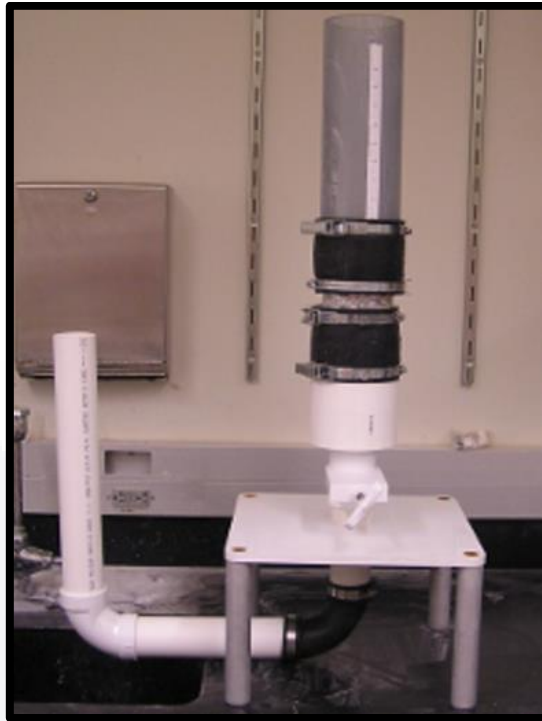


Figura 23. Dispositivo para medir la conductividad hidráulica del concreto permeable en laboratorio (Tomado de Kevern, 2015).

Por otro lado, el uso de permeámetros de carga variable y constante presentan algunas desventajas. Esto es, a medida que la carga hidráulica aumenta, el flujo que atraviesa por el concreto permeable cambia de laminar a transitorio o turbulento, incrementando el valor obtenido de conductividad hidráulica. Estudios recientes (Qin *et al.*, 2015) demostraron que a mayor carga hidráulica el valor de la tasa de infiltración aumentó para ambos tipos de permeámetros, especialmente para el de carga variable.

En esta tesis se diseñó y construyó un permeámetro de carga constante que es capaz de medir la permeabilidad de muestras cilíndricas de 10 cm de diámetro por 15 cm de altura (Figura 35). Dicho dispositivo permite la libre descarga del agua infiltrada a través de las muestras, manteniendo una carga hidráulica constante de hasta 5 centímetros con la finalidad de mantener un flujo laminar durante las pruebas.

La conductividad hidráulica (K), en cm/s, se calculó empleando la siguiente ecuación (Andres-Valeri *et al.*, 2018):

$$K(t) = \frac{V}{t * A}$$

Donde t es el tiempo en segundos que tarda el volumen de agua V (en cm^3) en infiltrarse a través de la muestra, y A es el área en cm^2 de la sección transversal de la muestra.

3.3.2 Densidad y porosidad

La densidad del concreto permeable, según lo señalado por Tennis et al. (2004), depende de las propiedades y proporciones de los materiales utilizados, así como de los procedimientos de compactación durante la colocación del pavimento, siendo comunes los valores del orden de 100 lb/ft^3 a 125 lb/ft^3 (1600 kg/m^3 a 2000 kg/m^3).

Por otro lado, deben tomarse en cuenta 2 tipos de porosidades cuando se trabaja con pavimentos de concreto permeable: porosidad efectiva y porosidad no efectiva. La porosidad efectiva es la que permite el paso de los fluidos a través de la matriz porosa de concreto y, en contraste, la porosidad cerrada es la que forma poros aislados distribuidos aleatoriamente y que no contribuyen a la infiltración (Tong, 2011, Mata, 2008). En consecuencia, la porosidad total es la suma de la porosidad efectiva (también llamada porosidad abierta) y la porosidad no efectiva (porosidad cerrada).

En su tesis doctoral, Mata (2008) utilizó 2 métodos para determinar la porosidad efectiva de muestras de concreto permeable: diferencia de pesos según ASTM C 140, métodos de prueba estándar para muestrear y probar unidades de mampostería de concreto y unidades relacionadas, y ASTM D 7063, método de prueba estándar para porosidades y vacíos de aire efectivos de muestras elaboradas con mezclas bituminosas compactadas. Aunque ASTM D 7063 es señalado como el mejor método para determinar la porosidad efectiva, al comparar las porosidades obtenidas por ambos métodos, el autor encontró que los resultados fueron positivos en algunos casos y negativos en otros, lo que sugiere que las muestras no siguen una tendencia en cuanto a la aplicación de dichos métodos (ver tabla 4).

Tabla 4. Porosidades efectivas obtenidas por Mata (2008) utilizando los métodos de diferencia de pesos y ASTM D 7063. Fuente: autoría propia.

Lote	Muestra	% de porosidad por diferencia de pesos	% de porosidad con ASTM D 7063
No. 1	C 1-8	21.9	20.8
	C 1-9	18.9	19.9
	Promedio	20.4	20.4
No. 2	C 2-12	22.3	23.4
	C 2-13	18.4	16.5
	Promedio	20.4	20.0
No. 3	C 3-1	26.6	25.3
	C 3-2	23.8	23.6
	C 3-3	23.8	18.3
	C 3-4	24.9	25.9
	C 3-5	20.4	22.0
	C 3-6	22.0	16.4
	Promedio	23.6	21.9

Para calcular la porosidad efectiva por el método de diferencia de pesos, según ASTM C 140, se utiliza la siguiente ecuación:

$$n = \left[1 - \frac{m_2 - m_1}{\rho_w V} \right] * 100$$

Donde:

n = porosidad efectiva, en %

m_1 = masa de la muestra saturada sumergida en agua, en gr

m_2 = masa de la muestra seca, en gr

V = volumen aparente de la muestra, en cm^3

ρ_w = densidad del agua, en gr/cm^3

3.3.3 Consolidación y grado de compactación

Los grados y métodos de compactación afectan las propiedades del concreto permeable, incluido el peso unitario, la resistencia a la compresión, la

permeabilidad y la porosidad. Tong (2011) argumenta que una compactación insuficiente no proporcionará la resistencia requerida ni tampoco una superficie lisa. Por el contrario, demasiada compactación causará una disminución de la porosidad efectiva y, por tanto, una conductividad hidráulica insuficiente.

El grado de compactación aplicado en la mezcla de concreto permeable en estado fresco durante la elaboración de las muestras determinará el porcentaje de porosidad final. De acuerdo con Mata (2008), la *American Standard of Testing Materials (ASTM)* está considerando diferentes métodos para consolidar el concreto permeable, incluyendo:

- (1) Martillo Marshal de 10 libras de peso total, 18 pulgadas de altura de caída y 3.875 pulgadas de base de impacto, aplicando 5 golpes por elevación para 2 elevaciones iguales.
- (2) Martillo Marshal de 10 libras de peso total, 18 pulgadas de altura de caída y 3.875 pulgadas de base de impacto, aplicando 10 golpes por elevación para 2 elevaciones iguales.
- (3) Martillo Proctor de 5.5 libras de peso, 12 pulgadas de altura de caída y 2 pulgadas de base de impacto, aplicando 20 golpes por elevación para 2 elevaciones iguales.

3.3.4 Tortuosidad

Fetter (1994) indica que la tortuosidad es la longitud real de la ruta de flujo, dividida por la distancia recta entre los extremos de dicha ruta. Esto es, L_e/L tal y como se muestra en la Figura 24, donde L_e es la longitud de un canal de flujo para el fluido, y L es la longitud de la línea recta entre los extremos de la trayectoria del flujo. Esta propiedad está relacionada con la captura de sedimentos, ya que un concreto permeable con una mayor tortuosidad será más propenso a sufrir este fenómeno (Zhong *et al.*, 2016).

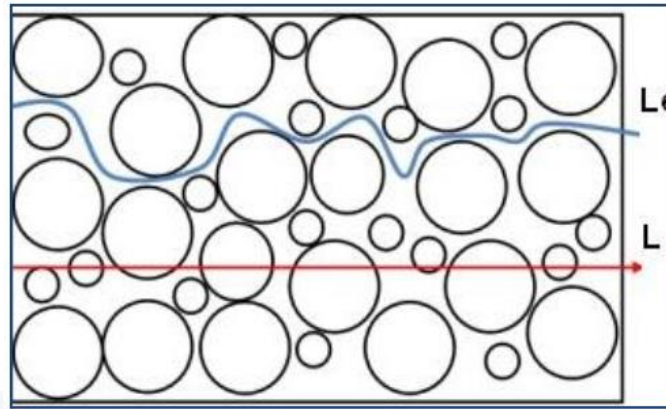


Figura 24. Tortuosidad en el concreto permeable (Tomado de Fetter, 1994).

3.3.5 Capacidad de Almacenamiento

La tasa de infiltración de un sistema de pavimento de concreto permeable es por lo general mucho mayor que la tasa de infiltración en estado estable de casi todos los suelos, y tiene un valor promedio de 143 L/m²/min, que es equivalente a una conductividad hidráulica de 860 centímetros por hora o 0.24 centímetros por segundo, un valor mayor a 100 veces la tasa de infiltración de un suelo altamente permeable (Leming *et al.*, 2007).

La porosidad efectiva puede usarse como capacidad de almacenamiento del pavimento de concreto permeable. Esta capacidad de almacenamiento incluye el volumen captado por el concreto y las capas subyacentes de agregados que componen dicho sistema. La porosidad de la capa de base de agregados gruesos debe ser generalmente del 40%, pero puede oscilar entre un rango del 20% al 40% (Tennis *et al.*, 2004). Por último, también debe considerarse el volumen de agua que se infiltra a través del suelo.

Leming *et al.* (2007) mencionan que otro elemento con potencial de almacenamiento es la colocación de bordillos (Figura 25) hacia los extremos del pavimento que permitan retener el agua sobre la superficie, lo cual puede aportar otros 100 mm de lluvia almacenada. Sin embargo, este tipo de diseño no se recomienda para áreas peatonales o de estacionamiento, y el embalse debe generarse por un breve periodo de tiempo.

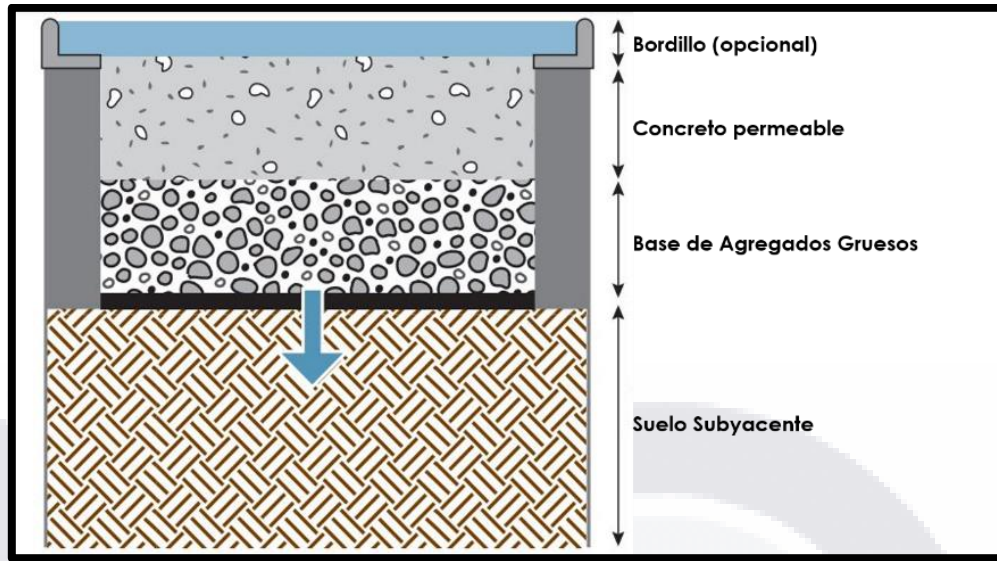


Figura 25. Sección transversal de un sistema de pavimento de concreto permeable. Modificado de Leming et al. (2007).

3.3.6 Efectos de la Pendiente

El efecto de la pendiente afecta la capacidad de almacenamiento de agua de los sistemas de pavimento de concreto permeable, tal y como se muestra en la figura 26.

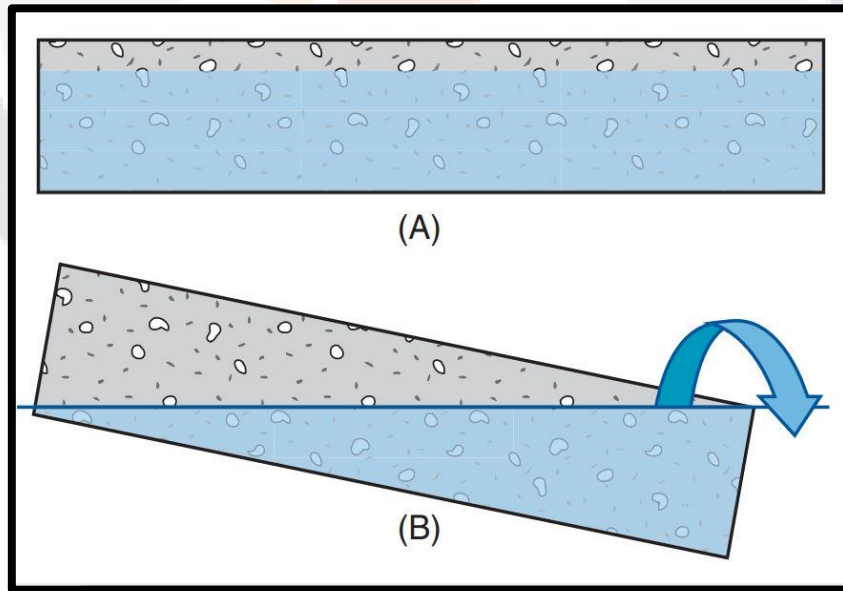


Figura 26. (A) Una losa de concreto permeable nivelada puede aprovechar al máximo su capacidad de almacenamiento. (B) Efecto de la pendiente en una losa de concreto permeable. (Tomado de Leming et al., 2007).

Si las losas de pavimento de concreto permeable no están niveladas, y la precipitación es mayor que la tasa de infiltración del suelo, la porción superior de la losa no se saturará y el agua se concentrará rápidamente en la parte inferior, disminuyendo la capacidad de almacenamiento, tal y como señalan Leming et al. (2007). Según los autores, lo ideal es que los pavimentos de concreto permeable estén nivelados en la medida de lo posible y de ser posible utilizar pozos o zanjas de infiltración para incrementar el volumen de agua captado.

3.3.7 Resistencia a la Compresión

La resistencia a la compresión del concreto permeable está ligada a la proporción de la mezcla y al esfuerzo de compactación durante la colocación (ACI 522R, 2006). Las mezclas de concreto permeable pueden desarrollar resistencias a la compresión en un rango de 500 a 4000 psi (35 a 280 kg/cm²), tal como señalan Tennis et al. (2004), siendo los valores típicos los de 2500 psi (170 Kg/cm²).

El contenido total de pasta cementante en una mezcla de concreto permeable es importante para el desarrollo de la resistencia a la compresión y la correcta formación de la matriz porosa, de acuerdo con la norma ACI 522R-2006. Un alto contenido de pasta dará como resultado una estructura de poros reducida y, en consecuencia, una baja porosidad. Por el contrario, un contenido insuficiente puede dar como resultado un revestimiento de pasta reducido de los agregados y una baja resistencia a la compresión.

Al igual que con cualquier concreto, las propiedades y combinaciones de materiales específicos, así como las técnicas de colocación y las condiciones ambientales, determinarán la resistencia real en el sitio. En consecuencia, los núcleos perforados o calas son la mejor opción para medir las resistencias del concreto permeable en el lugar, ya que las diferencias de compactación hacen que los cilindros fabricados en moldes sean menos representativos del concreto colocado en campo (Tennis et al., 2004).

3.4 Materiales y requerimientos para el diseño de concreto permeable con cemento Portland

3.4.1 Agregados

En su libro, Kosmatka Y Panarese (1992) recalcan que la importancia de utilizar el tipo y la calidad adecuados de agregados no debe ser subestimada, pues los agregados finos y gruesos ocupan comúnmente de 60 a 75% del volumen del concreto, e influyen notablemente en las propiedades del concreto en estado fresco y en estado endurecido, así como en las proporciones de la mezcla y en la economía.

El contenido de agregados finos (limos y arcillas) está limitado en el concreto permeable, y los sedimentos que pasan la malla No. 50 (1.18 milímetros) no se utilizan para la elaboración de concreto permeable. Las granulometrías comúnmente utilizadas son gravas bien graduadas con arena, de acuerdo con el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), e incluyen tamaños específicos de agregados gruesos y arenas.

Las granulometrías más utilizadas para la elaboración de concreto permeable de acuerdo con Tennis *et al.* (2004) son 3:

- *ASTM C33 No. 67.* Incluye gravas de tamaño grueso y fino. Esto es, agregados que van desde los 3/4 de pulgada (19 milímetros) hasta el material retenido en la malla No. 4 (4.75 milímetros).
- *ASTM C33 No. 8.* Es una granulometría que incluye tamaños que van desde gravas medias de 3/8 de pulgada (9.5 milímetros) hasta arenas gruesas retenidas en la malla No. 16 (1,18 milímetros).
- *ASTM C33 No. 89.* Incluye desde gravas medias de 3/8 de pulgada (9.5 milímetros) hasta arenas finas retenidas en la malla No. 50 (0.30 milímetros).

La granulometría *ASTM C33 No. 89* se ha utilizado ampliamente para estacionamientos y aplicaciones peatonales desde el año 1885 en los Estados Unidos (Tennis *et al.*, 2004). La norma *ASTM C 33* especifica los requerimientos de

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

agregados para usos en la construcción en general, pero también se puede revisar la norma ASTM D 448 para la construcción de pavimentos de concreto permeable (Tennis *et al.*, 2004).

Para la elaboración de concreto permeable, se puede emplear grava triturada de buena calidad y de peso normal, que contenga agregados redondeados o angulosos, aunque por lo general se logran mayores resistencias a la compresión con agregados redondeados (ACI 522R, 2006). Lo más importante es utilizar una granulometría de agregados que genere porosidades y conductividades hidráulicas que satisfagan los requerimientos de diseño, sin que la resistencia a la compresión se vea tan afectada. Los agregados gruesos de $\frac{3}{4}$ a $\frac{1}{4}$ de pulgada crean una superficie más tosca y aumentan significativamente la porosidad y conductividad hidráulica del concreto, pero también disminuyen en gran medida la resistencia a la compresión.

Las relaciones agregado-cemento deben caer en el rango de 4.0 a 4.5 en masa, de acuerdo con Tennis *et al.* (2004). Los autores también mencionan que estas relaciones conducen a contenidos agregados de entre aproximadamente 2200 y 3000 lb/yd³ (1300 a 1800 kg/m³ en el sistema internacional).

3.4.2 Materiales Cementantes

El principal aglutinante que se emplea para fabricar concreto permeable es el cemento Portland correspondiente a las normas ASTM C150, ASTM C595 y ASTM C1157 (ACI 522R, 2006). El cemento portland está compuesto principalmente de silicatos de calcio, los cuales fraguan y endurecen al reaccionar químicamente con el agua, actuando como un adhesivo o pasta cementante que unifica los agregados (Kosmatka Y Panarese, 1992).

Algunas puzolanas tales como la ceniza volante, la escoria granulada de altos hornos y el humo de sílice también pueden ser utilizadas para producir concretos de alta resistencia, siempre y cuando satisfagan las normas ASTM C618, ASTM C989 y ASTM C1240, respectivamente (ACI 522R, 2006).

3.4.3 Relación agua-cemento

De acuerdo con Tennis *et al.* (2004), se han utilizado relaciones agua-cemento en un rango de 0.30 a 0.34 para la elaboración de mezclas de concreto permeable, y se han logrado rangos de 0.27 a 0.30 con la inclusión de aditivos reductores de agua. El contenido de agua debe controlarse estrictamente, ya que una cantidad insuficiente de agua impedirá la formación de la pasta cementante, y una cantidad excesiva afectará la consistencia del concreto, provocando el asentamiento de la pasta cementante y, por tanto, la pérdida de la permeabilidad (ACI 522R, 2006).

Se deben cumplir los mismos requerimientos tanto para el diseño de concreto permeable como para el concreto convencional en cuanto a la calidad del agua y al contenido de humedad de los agregados. Respecto al contenido de humedad, lo ideal es que los agregados estén saturados y superficialmente secos, con la finalidad de no alterar el contenido de agua de la relación agua-cemento.



Figura 27. Brillo característico de una mezcla de concreto permeable, utilizando una relación agua-cemento adecuada. Fuente: autoría propia.

El agua absorbida por agregados secos puede dar lugar a problemas en la colocación o compactación de la mezcla, así como a reducciones en la resistencia a la compresión. En la práctica, no siempre se contará con agregados

en óptimas condiciones de humedad, por lo que se deberá tener en cuenta una cantidad de agua extra para cubrir el porcentaje de absorción en caso de que los agregados estén secos. Por otro lado, si los agregados están superficialmente húmedos, este contenido de agua deberá incluirse en la relación agua-cemento.

Por último, el contenido exacto de agua le dará un brillo característico a la mezcla, sin desprenderse del agregado, tal y como se muestra en la figura 27. Un puñado de concreto permeable formado en una bola no se derrumbará o perderá su estructura vacía a medida que la pasta fluye hacia los espacios entre los agregados (Tennis et al., 2004).

3.4.4 Aditivos

Debido al rápido tiempo de fraguado asociado con el concreto permeable, se utilizan comúnmente retardantes o aditivos estabilizadores de hidratación, según lo indicado en la norma *ASTM C494*, así como aditivos reductores de agua para aumentar la resistencia a la compresión (Tennis et al., 2004). En el presente estudio, se utilizó aditivo Verdecreto por recomendación de la empresa local Construcciones Ecológicas del Bajío S.A. de C.V., la cual ya ha aplicado concreto permeable en el estado de Aguascalientes. El aditivo Verdecreto es un líquido viscoso de color café, producto de una mezcla de polímeros modificados que aumentan la resistencia a la compresión del concreto permeable.



CAPÍTULO

IV

CAMPAÑA EXPERIMENTAL

CAPÍTULO IV: CAMPAÑA EXPERIMENTAL

La campaña experimental abarca los siguientes subcapítulos:

- Elaboración de muestras de concreto permeable
- Diseño de un permeámetro de carga constante
- Porosidad efectiva
- Conductividad hidráulica
- Resistencia a la compresión
- Simulación numérica

4.1 Elaboración de mezclas de concreto permeable

Se elaboraron muestras de concreto permeable en 2 lotes diferentes: SUCS 1 Y SUCS 2. La única diferencia entre los lotes 1 y 2 es la variación en la granulometría de los agregados gruesos utilizados, ya que se siguió el mismo procedimiento de fabricación en todas las muestras, tal y como se describe en los siguientes subcapítulos. Asimismo, se construyó un permeámetro de carga constante, ajustado para medir la conductividad hidráulica de las muestras de concreto permeable elaboradas.

4.1.1 Agregados gruesos

Se empleó grava de río, la cual se componía de partículas de diferentes tipos de rocas con formas redondeadas. Se utilizaron 2 tipos de granulometrías: SUCS 1 y SUCS 2. Estas granulometrías fueron elaboradas empleando el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) para obtener grava bien graduada con arena, tal y como se muestra en la figura 28.

Ambas granulometrías son gravas bien graduadas con arena, pero la diferencia es que SUCS 2 tiene mayor contenido de arenas que SUCS 1. Los coeficientes de uniformidad y compacidad para SUCS 1 fueron de 4.36 y 1.98, respectivamente.

Del mismo modo, los coeficientes para SUCS 2 fueron de 5.70 y 1.49, respectivamente.

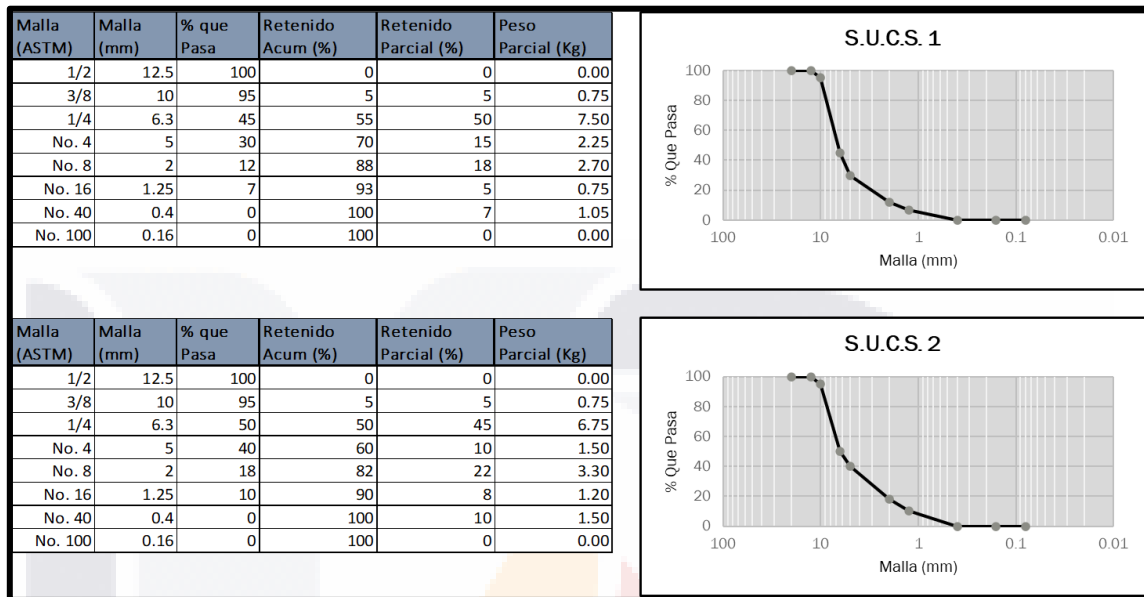


Figura 28. Granulometrías SUCS 1 Y SUCS 2 empleadas en la elaboración de las mezclas de concreto permeable. Fuente: autoría propia.

Por último, la densidad y el porcentaje de absorción de la grava de río fue de 2394 kg/m³ y 3.766%, respectivamente, y se obtuvieron de acuerdo con la norma ASTM C 127-01, tal y como se menciona en la sección 3.3.2.

4.1.2 Densidad y porcentaje de absorción de los agregados

El cálculo de la densidad y el porcentaje de absorción de los agregados son parámetros que deben tomarse en cuenta en la elaboración de mezclas de concreto permeable. El agua utilizada en la elaboración del concreto permeable no debe ser absorbida por los agregados durante la elaboración de la mezcla ni durante el curado. En el caso de que los agregados no se encuentren totalmente saturados, se tendrá que considerar el porcentaje de absorción correspondiente en el diseño de la mezcla.

Para obtener la densidad y el porcentaje de absorción de los agregados gruesos, se aplicó la norma ASTM C127-01. El procedimiento para determinar la densidad de

los agregados, tal y como se muestra en la Figura 29, se llevó a cabo de la siguiente manera:

- 1) Se dejó saturar en agua una muestra de grava (aproximadamente 100 gramos) a utilizar en la elaboración de la mezcla de concreto permeable durante 24 horas.
- 2) Se secaron las partículas de grava con un trapo húmedo y se determinó el peso saturado superficialmente seco (PSSS) en una balanza electrónica con precisión de 0.1 gramos.
- 3) En una probeta de vidrio de 250 ml se añadió agua hasta una marca de 150 ml. Posteriormente se añadieron a la probeta las partículas de grava en estado saturado superficialmente seco y se tomó lectura de la marca de agua.
- 4) El valor de la densidad se obtuvo dividiendo el PSSS entre el volumen desplazado por las partículas de grava. La prueba se realizó 3 veces y se eligió el promedio como el resultado final.

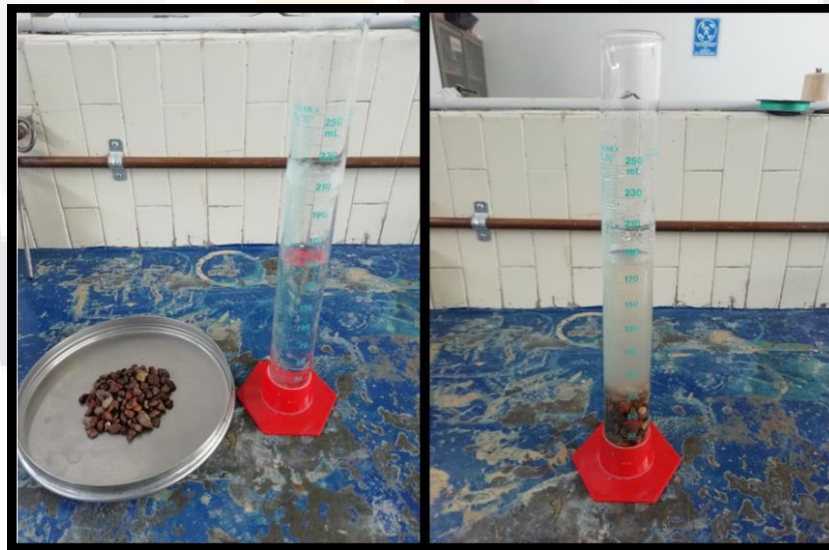


Figura 29. Procedimiento para obtener la densidad de los agregados. Fuente: autoría propia.

Asimismo, el procedimiento para determinar el porcentaje de absorción se realizó de la siguiente manera:

- 1) Se dejó saturar en agua una muestra de grava (aproximadamente 200 gramos) durante 24 horas.

2) Se secaron las partículas de grava con un trapo húmedo y se determinó el peso saturado superficialmente seco (PSSS) en una balanza electrónica con precisión de 0.1 gramos.

3) Se colocó la muestra en un recipiente metálico y se calentó en una parrilla a fuego medio. Utilizando un vidrio de reloj se verificó la evaporación total de agua. Se dejó enfriar la muestra durante 1 hora y se determinó el peso seco (PS)

4) El valor del porcentaje de absorción se obtuvo dividiendo la diferencia del PSSS y el PS entre el PSSS. La prueba se realizó 3 veces y se eligió el promedio como el resultado final.

4.1.3 Materiales cementantes

En el presente estudio se utilizó cemento portland compuesto (CPC) de la marca CEMEX Monterrey Extra, el cual se caracteriza por ser especial para superficies expuestas como pavimentos y losas, y está formulado para mejorar la consistencia de la mezcla. En el caso del agua, se consideró una cantidad de aditivo Verdecreto diluida siguiendo una relación aditivo-agua de 0.11 en volumen. En otras palabras, se añadieron 110 mililitros de aditivo por cada litro de agua para la elaboración de la pasta cementante.

4.1.4 Proporción de las mezclas de concreto permeable

Se utilizaron relaciones en peso de agregado-cemento y agua-cemento de 4:1 y 0.33, respectivamente. La cantidad de aditivo Verdecreto añadido a la mezcla se incluyó en la relación agua-cemento. Además, se determinó el contenido de humedad de una muestra representativa de los agregados gruesos unos minutos antes de la elaboración de la mezcla de concreto permeable, para realizar los ajustes necesarios de agua.

El concreto permeable se preparó en lotes de 0.007 metros cúbicos, empleando unos 15 kilogramos de grava para cada lote de muestras. El cemento y la grava se

pesaron en una balanza con precisión de 50 gramos. El agua y el aditivo se mezclaron y midieron en probetas graduadas de 1000 y 250 mililitros.

4.1.5 Procedimiento de mezclado

Se utilizó una revolvedora o mezcladora de concreto de tambor giratorio de medio saco de capacidad para el mezclado (figura 30). El procedimiento consistió en mezclar el 50% del agua con los agregados gruesos durante 5 minutos. Posteriormente se agregó el cemento y otro 40% de agua, y se dejó mezclar durante 2 minutos. El 10% de agua restante se añadió cuidadosamente hasta observar la consistencia adecuada en la pasta cementante. Después, el contenido se dejó reposar durante 2 minutos. Por último, se mezcló todo durante 1 minuto.



Figura 30. Procedimiento de mezclado del concreto permeable. Fuente: autoría propia.

4.1.6 Fabricación y curado de las muestras

Las muestras se elaboraron en 2 lotes de 8 piezas, considerando cada una de las granulometrías de la sección 4.1.1. Se utilizaron moldes cilíndricos de acero de 100 mm de diámetro por 200 mm de altura para contener la mezcla de concreto permeable, previamente limpiados y aceitados.

Para consolidar la mezcla de concreto permeable, los moldes se fueron llenando en 2 capas iguales, tal y como se muestra en la figura 31. En ambas capas se aplicó una compactación de 20 golpes con varilla, seguida por 10 golpes con un martillo

Proctor estándar a una altura de caída de 15 centímetros. Por último, se utilizó una placa de acero de 6.30 kg únicamente para enrasar los cilindros en la parte superior.

El martillo Proctor tenía una masa total de 9.50 kg, un martillo con una masa de 4.53 kg y una base de impacto de 100 mm de diámetro para distribuir el esfuerzo de compactación de manera uniforme sobre la superficie de las muestras de concreto. El conteo de 10 golpes se determinó considerando el momento en el que el volumen de la mezcla de concreto ya no disminuyó visiblemente y la altura de caída se definió considerando el mayor impacto posible sin que los agregados gruesos se fracturaran.



Figura 31. Procedimiento de fabricación de las muestras de concreto permeable. Fuente: autoría propia.

En el proceso de curado (figura 32), los moldes con las muestras de concreto permeable se envolvieron en una película de plástico durante 24 horas para protegerlas contra la pérdida de humedad. Posteriormente, las muestras se desmoldaron y sumergieron completamente en agua hasta alcanzar los 28 días de curado.



Figura 32. Procedimiento de curado de las muestras cilíndricas. Fuente: autoría propia.

4.1.7 Dimensionamiento de las muestras

Para realizar las pruebas de resistencia a la compresión se utilizaron las muestras de 100 milímetros de diámetro por 200 milímetros de altura. Por otro lado, para determinar la porosidad y la conductividad hidráulica, las muestras cilíndricas fueron cortadas 25 mm de la parte inferior y superior, para obtener una altura aproximada de 150 a 160 milímetros. Este ajuste se implementó debido a que la balanza utilizada para determinar la masa sumergida de las muestras puede medir 1500 gramos como máximo.

4.2 Diseño de un permeámetro de carga constante

Con la finalidad de medir el caudal que pasa a través de los cilindros de concreto permeable, se construyó un permeámetro de carga constante para trabajar con muestras de concreto permeable de 100 mm de diámetro, tomando en cuenta que muestras de menor diámetro han producido resultados inconsistentes y muestras de mayor diámetro incrementarían en gran medida tanto los costos como los tiempos de fabricación del permeámetro y de las muestras de concreto permeable.

El permeámetro fue montado sobre una base de madera de pino de 1 pulgada de espesor. El tipo de tubería y accesorios que se utilizaron para la fabricación fueron

de PVC hidráulico RD-26. El cople de 3 pulgadas comercialmente disponible tiene un diámetro exterior de 100 mm, una medida conveniente para asentar los cilindros de concreto permeable en la parte superior, tal y como se muestra en la figura 33. En la parte inferior de cople se colocó una reducción de 3 a 2 pulgadas, seguida por un codo de 2 pulgadas por 90° y una válvula de esfera de 2 pulgadas para el control del flujo.



Figura 33. Etapa inicial de elaboración del permeámetro de carga constante. Fuente: autoría propia.

Para impedir el flujo de agua por la parte exterior de las muestras de concreto permeable, se utilizaron membranas de látex Humboldt de 75 mm de diámetro con base en las recomendaciones de estudios previos (Kevern, 2015).

Se diseñó un encapsulador de membranas a partir de un tubo de PVC sanitario de 4 pulgadas conectado a una manguera de succión de aire. Este encapsulador permite la colocación y el retiro de las membranas de látex en muestras de concreto permeable de 100 mm de diámetro, evitando rasgaduras, tal y como se muestra en la figura 34. Por otro lado, para lograr la hermeticidad entre la membrana de látex y la pared exterior de los coples de PVC, se colocaron unas tiras de caucho y unas abrazaderas ajustables.



Figura 34. Colocación apropiada de la membrana de látex en los cilindros de concreto permeable para evitar rasgadas. Fuente: autoría propia.

En la parte superior del permeámetro se colocó de forma invertida un garrafón comercial de agua de 19 litros como tanque de almacenamiento, y se adaptó una válvula de paso roscable de $\frac{3}{4}$ de pulgada para el control del flujo de entrada. Al abrir la válvula de paso, el flujo cae directamente sobre la muestra de concreto permeable, tal y como se muestra en la figura 35.



Figura 35. Colocación del tanque de almacenamiento en el permeámetro de carga constante. Fuente: autoría propia.

Cabe mencionar que, aunque la capacidad máxima del tanque de almacenamiento es de 19 litros, no es recomendable llenarlo con más de 5 litros; se debe evitar en la medida de lo posible que la velocidad con la que sale el chorro de agua altere los resultados de conductividad hidráulica.

Se colocaron 2 tanques en la parte inferior del permeámetro: un tanque de captación y un tanque de excedencias. El tanque de captación tiene la finalidad de almacenar el caudal que pasa a través de la muestra de concreto permeable durante la prueba, y el tanque de excedencias permite mantener una carga hidráulica constante por encima de la superficie de la muestra, drenando el exceso de agua a través de una manguera transparente de media pulgada de diámetro, la cual está conectada al cople superior de PVC hidráulico del permeámetro.

En la figura 36 se muestra el permeámetro de carga constante durante una prueba de conductividad hidráulica efectuada en el Laboratorio de Resistencia de Materiales de la Universidad Autónoma de Aguascalientes. Las pruebas se realizaron con base en un enfoque de flujo unidimensional saturado, manteniendo una carga hidráulica constante máxima de 5 centímetros de agua sobre la muestra, para simular las condiciones del pavimento de concreto permeable instalado en zonas urbanas. Además, considerando que las capas de base y sub-base sobre las que se coloca el pavimento tienen una mayor conductividad hidráulica, el flujo que pasa a través de la matriz porosa de las muestras durante las pruebas es de libre descarga y no existen contrapresiones que lo frenen.



Figura 36. Permeámetro de carga constante durante una prueba de permeabilidad. Fuente: autoría propia.

4.3 Medición de parámetros hidráulicos y mecánicos

Los parámetros de porosidad efectiva, conductividad hidráulica y resistencia a la compresión fueron obtenidos utilizando las muestras de concreto permeable que se mencionan en el subcapítulo 4.1. A continuación, se muestra un resumen de los procedimientos que se llevaron a cabo para obtener dichos parámetros.

4.3.1 Porosidad efectiva

La porosidad efectiva se calculó por el método de diferencia de masas, según el estándar ASTM C 140. La fórmula utilizada fue la siguiente:

$$n = \left[1 - \frac{m_2 - m_1}{\rho_w V} \right] * 100$$

Donde:

n = porosidad efectiva, en %

m_1 = masa de la muestra saturada sumergida en agua, en gr

m_2 = masa de la muestra seca, en gr

V = volumen aparente de la muestra, en cm^3

ρ_w = densidad del agua, en gr/cm^3

El primer paso para determinar la porosidad en laboratorio fue la obtención del porcentaje de humedad de cada lote de muestras. Para ello, se utilizó una muestra de cada lote y se secó en un horno durante 24 horas a una temperatura constante de 80 grados centígrados. El porcentaje de humedad obtenido fue del 6% y 4.9% para los lotes 1 y 2, respectivamente (Ver tabla 5). Estas muestras se desecharon después de la prueba, ya que las temperaturas mayores a los 40°C pueden llegar a afectar los resultados de porosidad y resistencia a la compresión.

Tabla 5. Porcentaje de humedad de los lotes de muestras SUCS 1 y SUCS 2. Fuente: autoría propia.

No. Muestra	Peso Molde (gr)	Peso Molde + Cilindro (gr)	Peso Cilindro (gr)	Peso Seco al Horno (gr)	% de Humedad
SUCS 1-7	3351	6107	2756	2592	6.0%
SUCS 2-7	3351	6014	2663	2533	4.9%

Para obtener la masa saturada sumergida en agua, las muestras fueron saturadas en agua durante un periodo de 24 ± 4 horas previo a la prueba, y se empleó la técnica de peso suspendido utilizando una balanza electrónica *Pioneer Ohaus*

Modelo PA1602C (figura 37). Cabe mencionar que las muestras tuvieron que ser cortadas en ambos extremos, con ayuda de una cortadora de disco para concreto, ya que la balanza puede medir hasta 1500 gramos de masa y las muestras de 200 milímetros de altura rebasan este valor.



Figura 37. Determinación de la masa saturada sumergida en agua de las muestras de concreto permeable. Fuente: autoría propia.

Para medir la porosidad efectiva, se utilizaron 3 muestras de cada lote. El valor de la densidad del agua se fijó en 1 gr/cm^3 para todas las pruebas. El peso seco calculado se obtuvo restando el porcentaje de humedad obtenido en cada lote de muestras. Los resultados se muestran en la tabla 6. Las porosidades efectivas promedio fueron de 0.27 y 0.18 para los lotes SUCS 1 Y SUCS 2, respectivamente.

Tabla 6. Porosidad efectiva de las muestras de concreto permeable. Fuente: autoría propia.

No. Muestra	Altura (mm)	Peso Cilindro (gr)	% humedad	Peso Seco Calculado (gr)	Peso Sumergido (gr)	Volumen aparente (cm3)	Porosidad Efectiva
SUCS 1-1	160	2255	6.0%	2121	1191	1257	0.26
SUCS 1-2	160	2243	6.0%	2110	1205	1257	0.28
SUCS 1-3	160	2275	6.0%	2140	1220	1257	0.27
SUCS 2-1	160	2492	4.9%	2370	1356	1257	0.19
SUCS 2-2	159	2476	4.9%	2355	1325	1249	0.18
SUCS 2-3	160	2471	4.9%	2350	1319	1257	0.18

4.3.2 Conductividad Hidráulica

Las pruebas de conductividad hidráulica se llevan a cabo aplicando el procedimiento siguiente:

- (1) Se lijaron los bordes de la muestra de concreto permeable, para evitar posibles rasgaduras en la membrana de látex.
- (2) Se colocó la membrana de látex alrededor de la muestra de concreto permeable con ayuda del encapsulador y se llenó el tanque de almacenamiento con 5 litros de agua.
- (3) La muestra confinada se colocó sobre el cople inferior del permeámetro y se retiró el encapsulador. En este momento la muestra quedó correctamente asentada en el permeámetro.
- (4) El cople superior se acomodó de manera que quedó envuelto en su perímetro exterior por la membrana de látex. Se ajustaron las abrazaderas de caucho alrededor de los coples inferior y superior con ayuda de un destornillador, asegurándose de que la presión aplicada sobre la membrana de látex y el cople fuera suficiente para lograr la hermeticidad.
- (5) Se aplicó silicón transparente para sellar el perímetro de la parte superior de las muestras donde se asentó el cople superior del permeámetro, y se dejó secar durante 5 minutos. Fue de importancia aplicar una cantidad suficiente de silicón para evitar que el flujo escapara por los extremos y se produjeran resultados inconsistentes.

(6) Habiendo completado los pasos del 1 al 4, se inició la prueba de conductividad hidráulica. Al tiempo que se abrió la llave de paso del tanque de almacenamiento, se inició el cronómetro para medir el tiempo. El flujo de agua tuvo que ser suficiente para mantener una carga hidráulica constante, pero evitando que demasiada agua se tirara hacia el tanque de excedencias. El cronómetro se detuvo en el mismo instante en el que se interrumpió el flujo, y esto se llevó a cabo antes de que se terminara el agua en el tanque de almacenamiento.

Por otra parte, las pruebas se efectuaron con los cilindros de concreto permeable sobre los que se determinó la porosidad efectiva en la sección 5.2 del presente capítulo. Cabe mencionar que, en el caso del lote de muestras SUCS 2, la conductividad hidráulica fue nula en las 3 muestras. Los resultados de conductividad hidráulica del lote de muestras SUCS 1 se muestran en la tabla 7.

Tabla 7. Conductividad hidráulica de las muestras de concreto permeable del lote SUCS 1. Fuente: autoría propia.

No. Muestra	Area Efectiva (cm ²)	Volumen de Agua (Kg)	Volumen de Agua (cm ³)	Tiempo (s)	Conductividad Hidráulica (cm/s)
SUCS 1-1	63.62	3.85	3850	119.46	0.507
	63.62	3.80	3800	120.11	0.497
Promedio					0.50
SUCS 1-2	63.62	4.00	4000	120.53	0.522
	63.62	3.95	3950	119.23	0.521
Promedio					0.52
SUCS 1-3	63.62	3.75	3750	120.62	0.489
	63.62	3.80	3800	121.07	0.493
Promedio					0.49

El volumen de agua obtenido en cada prueba se midió con una báscula electrónica con precisión de 0.05 kilogramos. Al igual que en las pruebas de porosidad efectiva, se fijó la densidad del agua en 1 gr/cm³ para fines prácticos. El mismo operador realizó todas las pruebas, y para cada muestra cilíndrica de

concreto permeable se realizó la prueba 2 veces. La fórmula que se utilizó para calcular la conductividad hidráulica es la siguiente (Andres-Valeri et al., 2018):

$$K(t) = \frac{V}{t * A}$$

Donde t es el tiempo en segundos que tarda el volumen de agua V (en cm^3) en infiltrarse a través de la muestra, y A es el área en cm^2 de la sección transversal de infiltración.

4.3.3 Resistencia a la Compresión

Se obtuvo la resistencia a la compresión a los 28 días de los cilindros de concreto permeable, únicamente con la finalidad de revisar la calidad del concreto elaborado. La resistencia a la compresión es inversamente proporcional a la porosidad efectiva, ya que a mayor porosidad se espera una menor resistencia a la compresión (Tong, 2011).



Figura 38. Modelos de fractura de los ensayos de resistencia a la compresión. Los números en la parte superior izquierda de cada figura indican el número de lote y el número de muestra, respectivamente. Fuente: autoría propia.

Las pruebas de resistencia a la compresión se llevaron a cabo en un equipo de ensaye automático CONTROLS Modelo Pilot 4, el cual se encuentra en el laboratorio de resistencia de materiales de la Universidad Autónoma de Aguascalientes. Se siguieron las recomendaciones descritas en la norma ASTM C39: Método de Ensayo Normalizado para Resistencia a la Compresión de Especímenes Cilíndricos de Concreto.

Las muestras se mantuvieron en proceso de curado hasta el momento de las pruebas de compresión. Los modelos de fractura de los ensayos efectuado en los lotes de muestras SUCS 1 y SUCS 2 se muestra en las figuras 38 y 39, respectivamente.

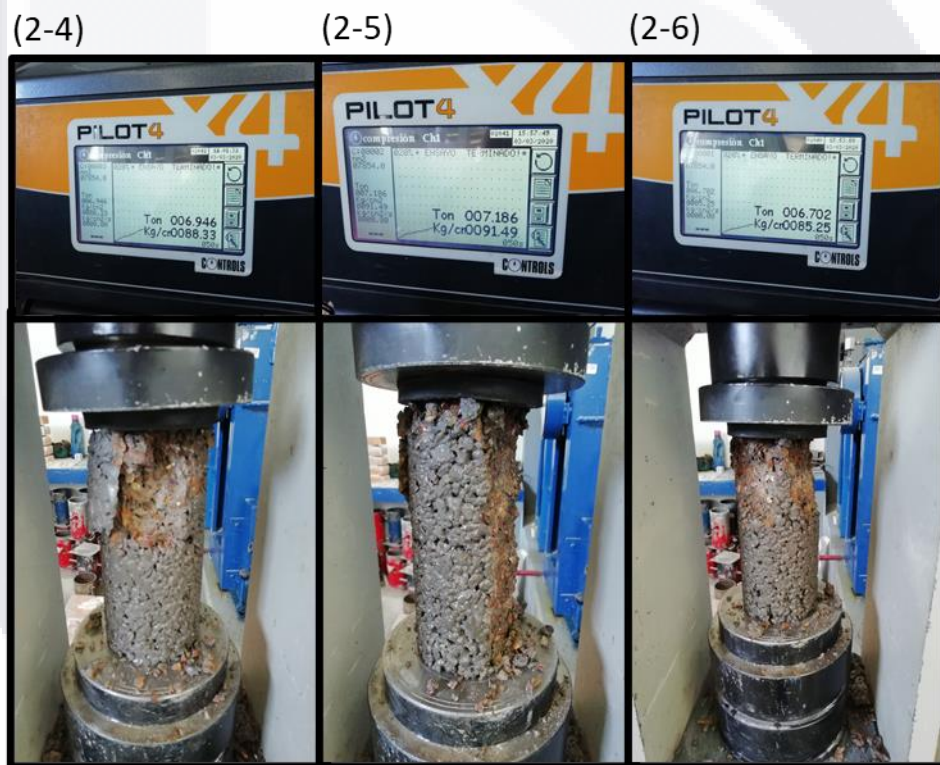


Figura 39. †

4.4 Simulación Numérica

Se diseñaron y aplicaron varios modelos de simulación numérica utilizando el programa de análisis y resolución por elementos finitos *COMSOL Multiphysics*. Para ello se hizo el acoplamiento de 2 físicas disponibles dentro del programa: flujo laminar y rastreo de partículas. De este modo, los modelos aplicados simularon un

flujo laminar de agua mezclado con sedimentos, que pasó a través de una matriz porosa de concreto permeable. Durante la simulación se observó la trayectoria de los sedimentos en función del tiempo y del tamaño de los sedimentos. Los parámetros utilizados en los modelos se muestran en la tabla 8.

En los parámetros, tanto la densidad como el tamaño de las partículas fue variable. De acuerdo con el libro de **González de Vallejo et al. (2002)**, se consideró una densidad en estado saturado de 1800 kg/m³ para las gravas, y de 2100 kg/m³ para las arenas, limos y arcillas. Los tamaños de partículas varían desde los 10 mm hasta los 0.0015 mm, tal y como se muestra en los modelos del capítulo de resultados y discusiones.

El parámetro de número de partículas por liberación se refiere a la cantidad de sedimentos liberados al comienzo de la simulación, mismos que se mueven a través de los conductos mezclados con el agua. La variación de este parámetro en los modelos cae dentro del rango de 10 hasta 1000 partículas, y depende del tamaño de los sedimentos.

Tabla 8. Parámetros del modelo de simulación numérica. Fuente: autoría propia.

Parámetro	Valor	Descripción
Vi	0.005 [m/s]	Velocidad Inicial de entrada del flujo de fluido
Dc	10 [cm]	Diámetro del cilindro de concreto permeable
Hc	15 [cm]	Altura del cilindro de concreto permeable
Rho_w	1000 [kg/m ³]	Densidad del Agua
Vd_w	1e-3 [Pa*s]	Viscosidad Dinámica del agua
P_ref	1 [atm]	Nivel de Presión de referencia
T_ref	20 [degC]	Temperatura de Referencia
P_ini	490 [Pa]	Presión Inicial
Rho_p	Variable	Densidad de partículas
Size_p	Variable	Tamaño de partículas
tfm	0.1[kg/h]	Tasa de flujo de masa de partículas
nppl	Variable	Número de partículas por liberación

Cabe mencionar que, algunos de los parámetros utilizados en el modelo se determinaron con base en los resultados experimentales de la presente tesis, esto es, la velocidad inicial de entrada del flujo, o conductividad hidráulica, y las dimensiones de los objetos simulados, o cilindros de concreto permeable en este caso. La velocidad inicial de entrada del flujo de fluido se fijó en 0.5 cm/s (0.005

m/s). Las dimensiones de los cilindros en la simulación son de 1 decímetro (100 milímetros) de ancho por 1.5 decímetros (150 milímetros) de altura.

La geometría de los modelos se construyó en 2 dimensiones, dibujando el bosquejo de la matriz porosa de concreto permeable directamente en el programa, tal y como se muestra en la figura 39. En los modelos geométricos las curvas tienen formas redondeadas, simulando el tipo de superficie que forman los agregados con la pasta cementante, lo cual se puede observar en concretos permeables.

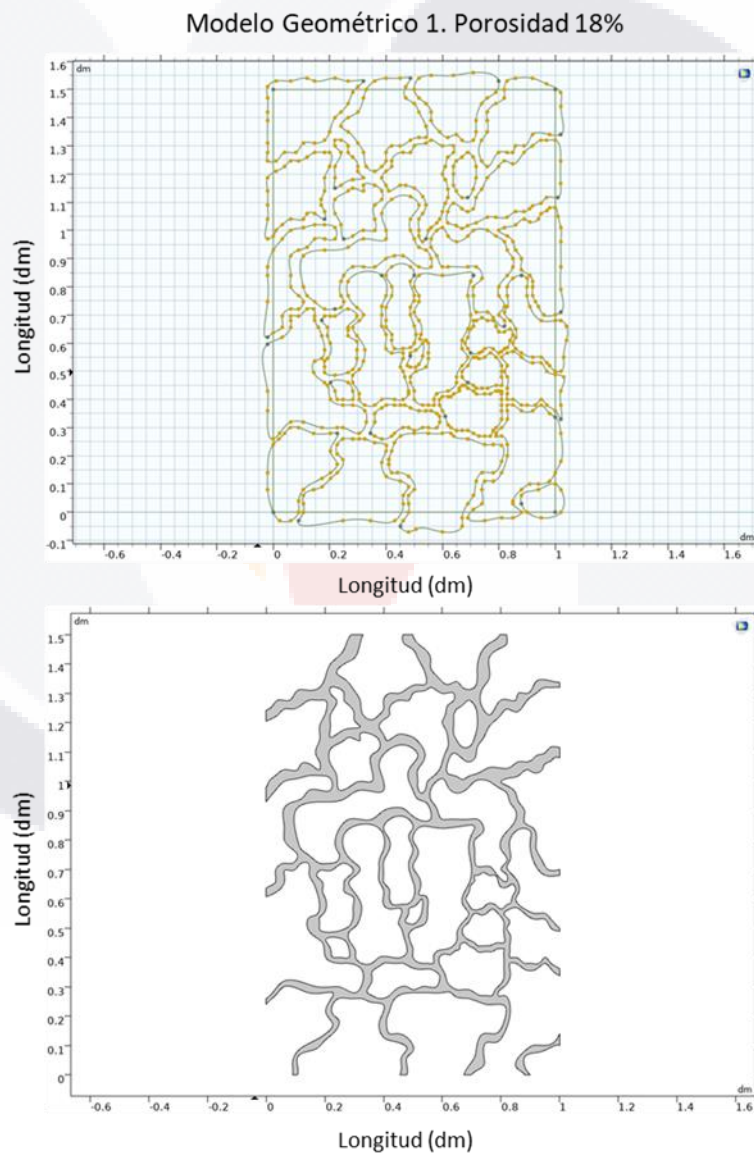


Figura 40. Geometría de modelo de simulación numérica con 18% de porosidad efectiva. Fuente: autoría propia utilizando *COMSOL Multiphysics*.

Por otro lado, con ayuda del programa de procesamiento de imágenes digitales de código libre, IMAGE J, se ajustó la porosidad efectiva de los modelos a los porcentajes medidos en el subcapítulo 4.3 de la presente tesis, esto es, 18% y 30% en promedio. Cabe mencionar que, en los modelos de simulación se trabajó únicamente con porosidades efectivas, es decir, todos los conductos de la geometría dibujada se encuentran interconectados entre sí, y no existen porosidades cerradas.

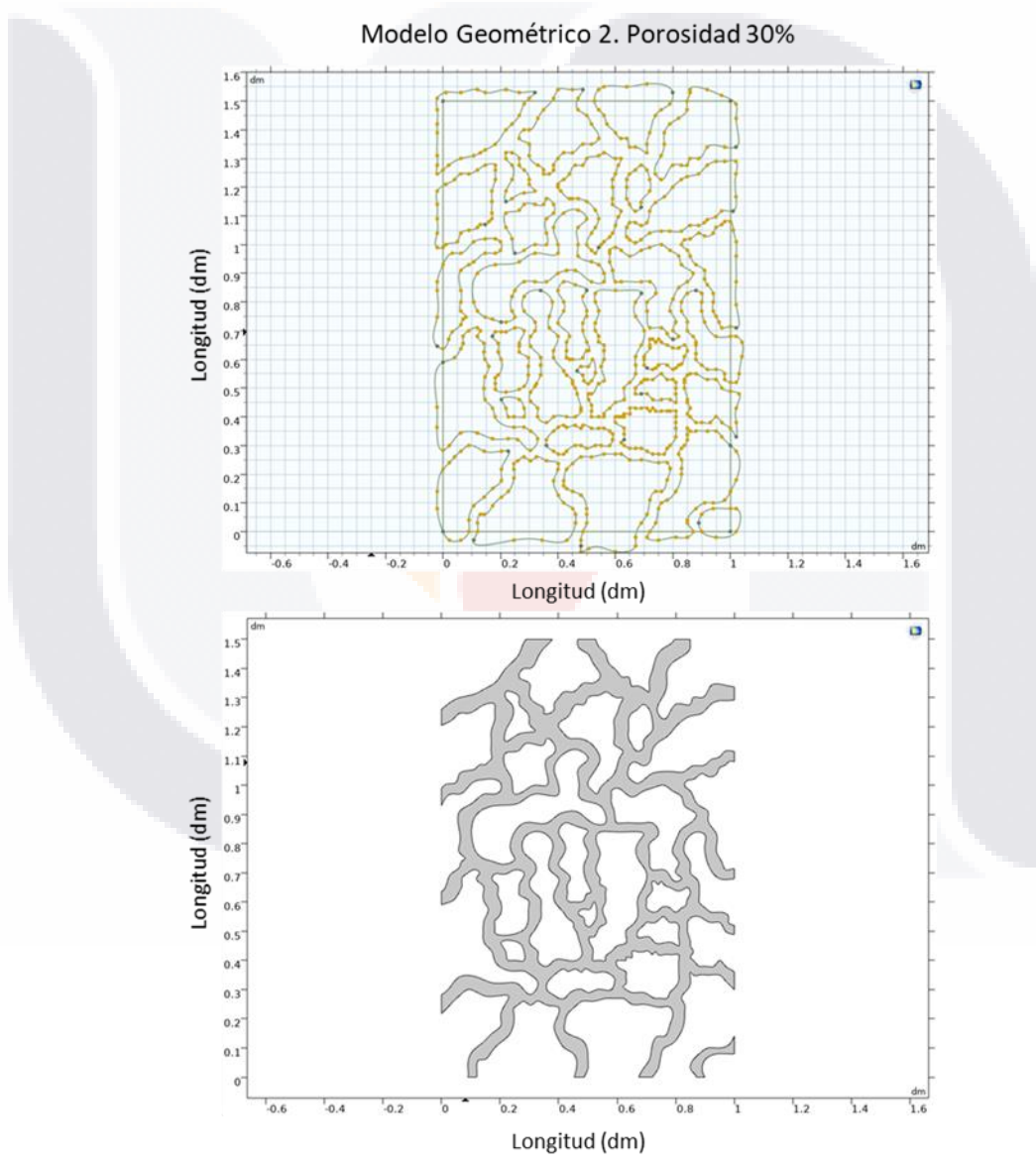


Figura 41. Geometría de modelo de simulación numérica con 30% de porosidad efectiva. Fuente: autoría propia utilizando COMSOL Multiphysics.



CAPÍTULO

V

RESULTADOS Y DISCUSIONES

CAPÍTULO V: RESULTADOS Y DISCUSIONES

5.1 Introducción

Con la finalidad de estudiar las propiedades hidráulicas y mecánicas del concreto permeable, se efectuaron pruebas en cilindros de concreto permeable de 10 centímetros de diámetro por 20 centímetros de altura. Los resultados experimentales de porosidad, conductividad hidráulica y resistencia a la compresión se resumen en la tabla 9.

Tabla 9. Resultados de pruebas experimentales. Fuente: autoría propia.

Muestra	Granulometría	Porosidad (%)	Conductividad Hidráulica (cm/s)	Resistencia a la Compresión (Kg/cm ²)
1-1	SUCS 1	30%	0.50	76.36
1-2	SUCS 1	30%	0.47	71.76
1-3	SUCS 1	29%	0.49	57.35
2-1	SUCS 2	19%	0.00	88.33
2-2	SUCS 2	18%	0.00	91.49
2-3	SUCS 2	18%	0.00	85.25

Los ensayos de resistencia a la compresión arrojaron valores de 76.36, 71.76 y 57.35 kg/cm², para las muestras 1-1, 1-2 y 1-3. Por otra parte, para las muestras 2-1, 2-2 y 2-3 se observaron valores de 88.33, 91.49 y 85.25 kg/cm², respectivamente. Estos valores caen dentro de los rangos de 35 a 285 kg/cm² que reportan Tennis et al. (2004), aunque un valor de 170 kg/cm² es el más típico. Durante los ensayos, se observó que las fracturas ocurrieron en los agregados, lo que sugiere que los agregados de grava de río no cumplieron con los requisitos de calidad.

La porosidad efectiva medida fue de alrededor del 30% para las muestras de SUCS 1 y del 18% para las muestras SUCS 2. Se esperaban valores de entre 15 y 25%, de acuerdo con los valores reportados en la literatura (Tennis et al., 2004). Mata (2008) obtuvo porosidades efectivas en un rango del 20 al 24%, mientras que Tong (2011) trabajó con porosidades del 15 al 25%. Kevern (2015) utilizó muestras con porosidades del 17 y 32%.

Por otra parte, la conductividad hidráulica promedio de las muestras fue de 0.49 cm/s para los cilindros elaborados con la granulometría SUCS 1, mientras que en los

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

cilindros de la granulometría SUCS 2 la conductividad hidráulica de las muestras fue nula. Estos no eran valores esperados, ya que según la norma ACI 522-R (2006), se pueden obtener valores de conductividad hidráulica si se tiene una porosidad efectiva de al menos 15%. Tong (2011) reportó valores de 0.34 y 0.65 cm/s en muestras de concreto permeable de 0.15 y 0.20% de porosidad efectiva, respectivamente, mientras que Kevern (2015) obtuvo valores de 0.07 a 0.09 cm/s en muestras con porosidades efectivas del 17%.

Así pues, los resultados de porosidad y conductividad hidráulica obtenidos sugieren que el método de diferencia de pesos para determinar la porosidad efectiva no representa condiciones reales. Además, es necesario considerar el incremento de la porosidad en la parte exterior de las muestras que se fabrican con moldes, tal y como se mencionó en el subcapítulo 2.5.

5.2 Resultados de Simulación Numérica

Los resultados de las simulaciones numéricas en *COMSOL Multiphysics* muestran un flujo laminar de agua mezclado con sedimentos, que pasa a través de una matriz porosa de concreto permeable. Se trabajó con 2 matrices, de 18% y 30% de porosidad efectiva.

Con la finalidad de simular la captura de sedimentos, se hizo una variación del tamaño de partículas desde los 10.0 mm hasta los 0.0015 mm, por lo que en los modelos se puede observar el comportamiento de las partículas de grava y sedimentos de arena, limo y arcilla. El flujo de agua transportando sedimentos se simuló entrando a una velocidad constante de 0.50 cm/s en todos los casos.

Los resultados de las simulaciones numéricas se resumen en la tabla 10. Los modelos 1 y 2 corresponden a las matrices de 18% y 30% de porosidad, respectivamente. Los tiempos de simulación van desde los 5 segundos hasta los 100 segundos.

Tabla 10. Porcentaje de partículas que atraviesan la matriz porosa en los modelos de simulación numérica. Fuente: autoría propia.

Tipo	Cantidad de partículas liberadas	Tamaño (mm)	Modelo 1 % que pasa	Modelo 2 % que pasa
Grava fina	10	10.0000	0.00%	0.00%
Arena gruesa	100	3.0000	0.00%	0.00%
Arena media	100	1.0000	1.00%	25.00%
Arena fina	250	0.2500	63.00%	86.00%
Limo	500	0.0100	67.00%	84.00%
Arcilla	1000	0.0015	67.00%	86.00%

5.2.1 Flujo de agua sin sedimentos

En el primer caso, se simuló únicamente la entrada de un flujo laminar permanente a una velocidad constante de 0.50 cm/s, sin agregar sedimentos. Se obtuvieron los perfiles de velocidad del flujo laminar de agua que pasa a través de las matrices porosas de concreto permeable (Figura 42).

Se observó un incremento de la velocidad desde 1.0 hasta 2.0 cm/s en la mayoría de los conductos verticales, mientras que en los conductos horizontales el rango osciló entre 0.0 y 0.60 cm/s. La velocidad máxima en los conductos fue de 2.00 cm/s, y se presentó en algunas partes estrechas, y en las zonas donde llega flujo de 2 conductos distintos.

Comparando ambos modelos, puede verse que el aumento de la porosidad permite una mejor circulación del flujo, ya que la velocidad de los conductos se mantiene entre 1.0 y 2.0 cm/s desde la entrada hasta la salida siguiendo algunas de las rutas de flujo. Es otras palabras, el estrechamiento de los poros hace que la velocidad disminuya en algunas partes de los conductos, aumentando el riesgo de captura de sedimentos.

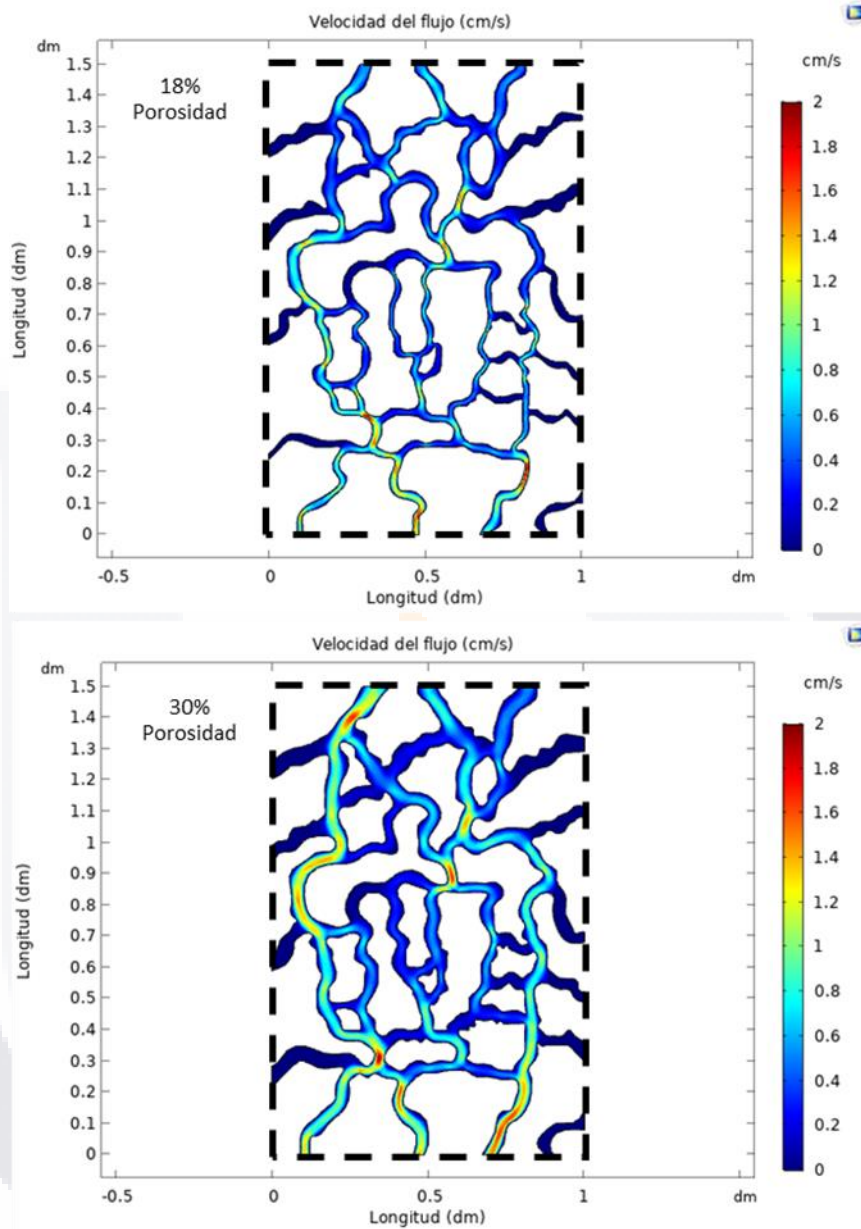


Figura 42. Perfiles de velocidad de la matriz porosa de concreto permeable. Arriba: 18% de porosidad efectiva. Derecha: 30% de porosidad efectiva. Fuente: autoría propia.

5.2.2 Grava fina

En este caso, se simuló un flujo laminar mezclado con partículas de grava fina, con un diámetro de 10.0 milímetros ($D_p=10.0\text{mm}$). La cantidad de partículas se fijó en 10 y la velocidad del flujo fue de 0.50 cm/s. Como se esperaba, las partículas de grava no pudieron atravesar la matriz porosa de concreto permeable en ninguno

de los 2 casos, considerando que los poros tienen un diámetro menor al tamaño de las partículas de grava. La simulación duró 5 segundos y las partículas quedaron atrapadas a la entrada de los conductos, tal y como se muestra en la figura 43.

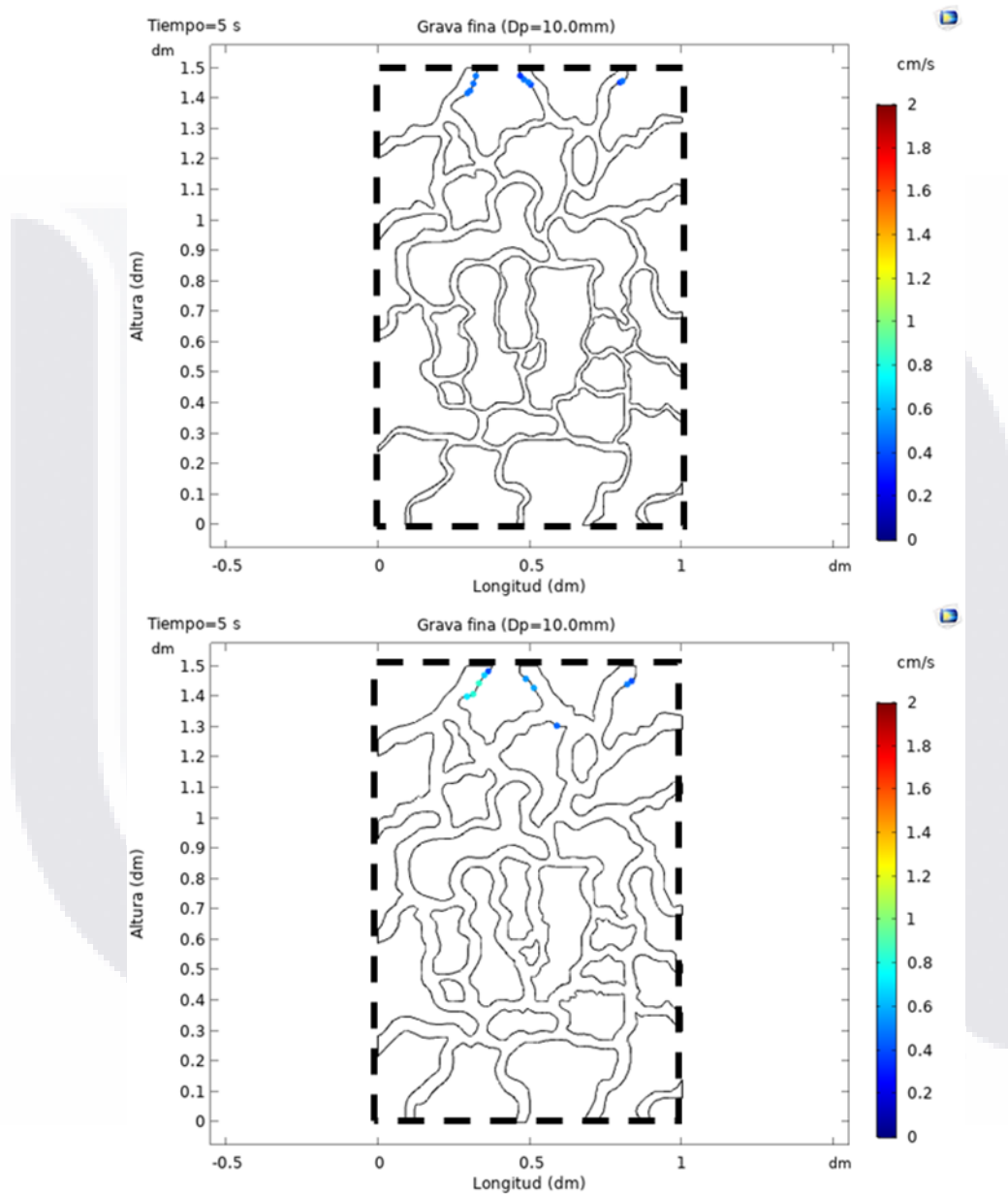


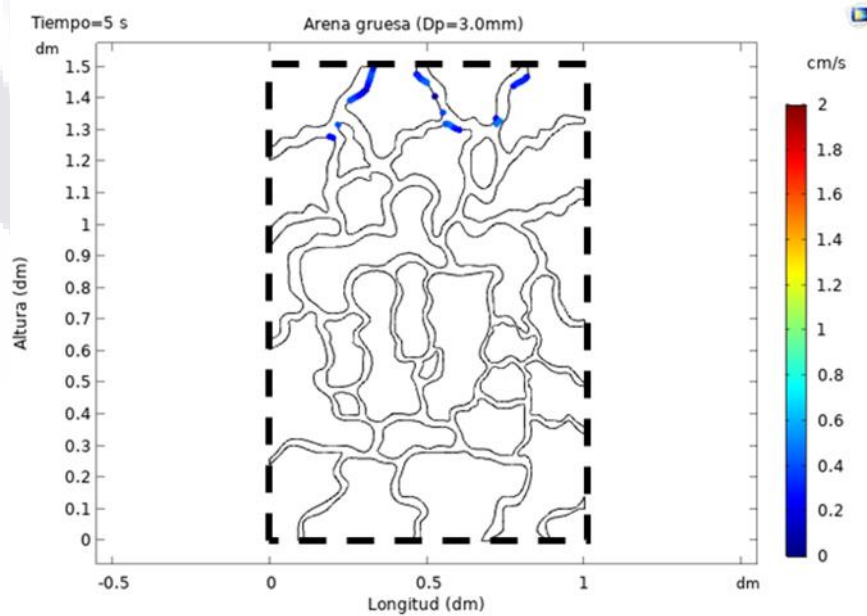
Figura 43. Modelos de simulación de partículas de grava fina. Dp es el diámetro de las partículas. Arriba: 18% de porosidad. Abajo: 30% de porosidad. Fuente: autoría propia.

5.2.3 Arena gruesa

En esta simulación se añadieron 100 sedimentos de arena gruesa con un diámetro de 3.0 milímetros ($D_p=3.0\text{mm}$). La velocidad del flujo fue de 0.50 cm/s. Al igual que en el caso de las gravas finas, ninguna partícula de ambos modelos logró pasar a través de la matriz porosa, a pesar de que el tamaño de los poros es mayor al tamaño de los sedimentos en el modelo de 30% de porosidad.

Como se muestra en las figuras 44 y 45, entre los 5 y 15 segundos de simulación los sedimentos quedaron depositados en la parte superior del concreto permeable. Esto es, en los 5 centímetros superiores del espesor. El acomodo de los sedimentos sugiere que la fuerza de arrastre del flujo de agua no fue suficiente para transportarlos a través de la matriz porosa, y el peso propio provocó que se quedaran atrapados.

La tortuosidad de los conductos también influyó en la captura de los sedimentos. Esto se puede observar en los primeros segundos de la simulación cuando las arenas van entrando en los conductos y su velocidad disminuye hasta quedar estáticos.



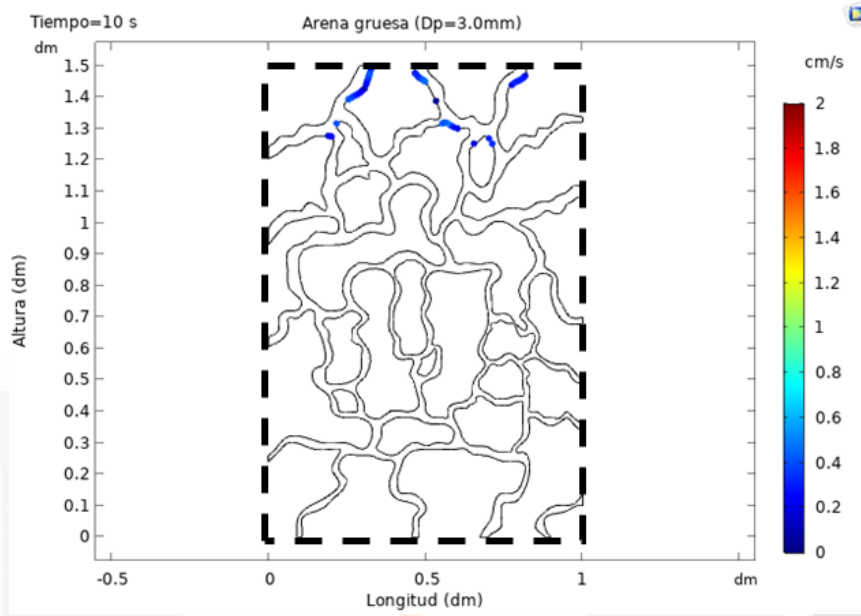
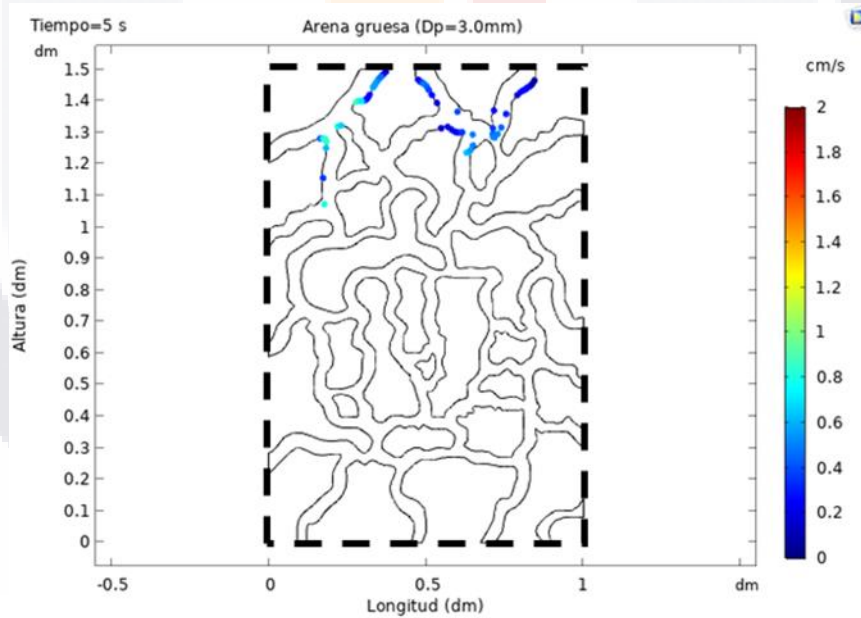


Figura 44. Trayectoria de sedimentos de arena gruesa que pasan a través de la matriz porosa con 18% de porosidad. Longitudes en decímetros. Fuente: autoría propia.



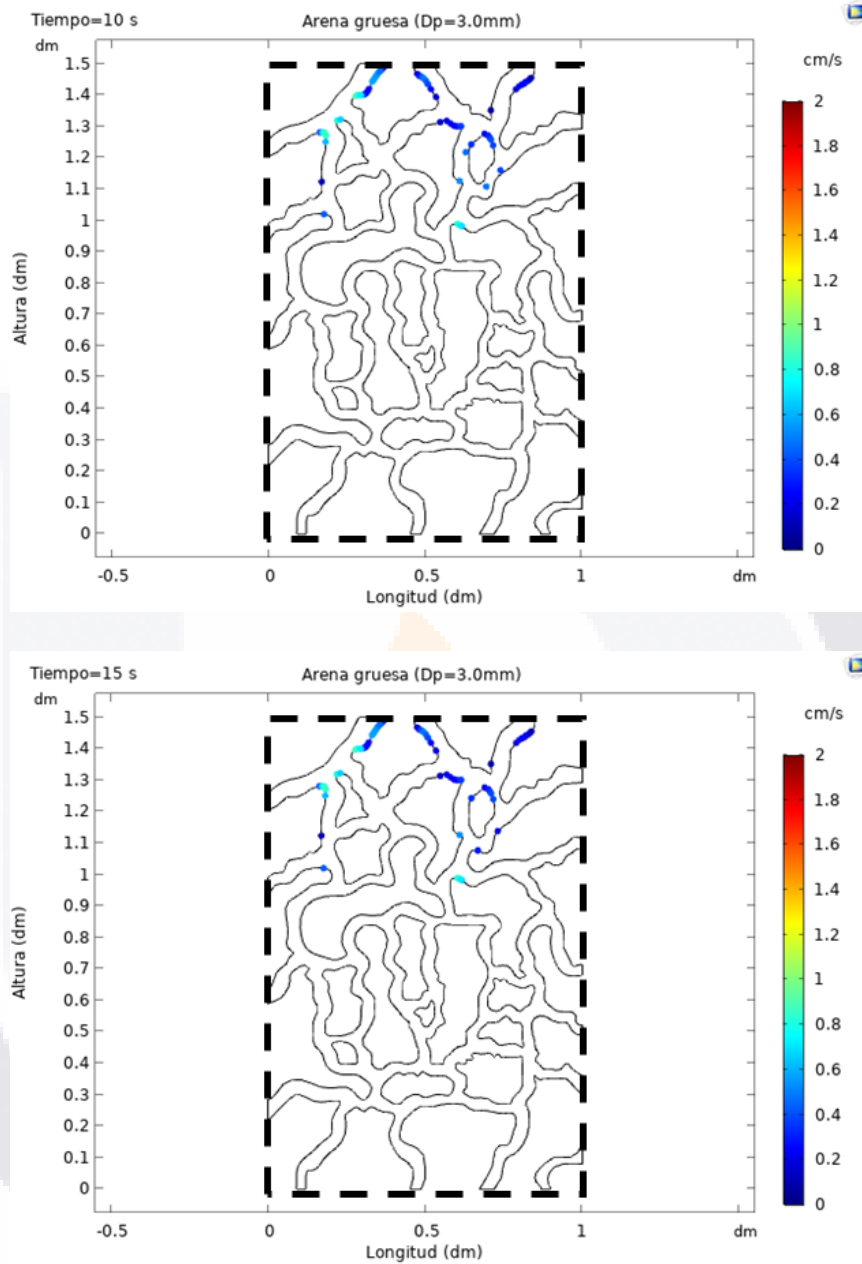


Figura 45. Trayectoria de sedimentos de arena gruesa que pasan a través de la matriz porosa con 30% de porosidad. Longitudes en decímetros. Fuente: autoría propia.

5.2.4 Arena media

En esta simulación se observa el peor caso de captura de sedimentos, esto es, el 99% y el 75% de las partículas se quedaron atrapadas a lo largo de todos los conductos, tal y como se muestra en las gráficas de la figura 46. La velocidad del

flujo transportando partículas fue de 0.50 cm/s, y se consideraron 100 sedimentos de 1.0 milímetros de diámetro ($D_p=1.0\text{mm}$).

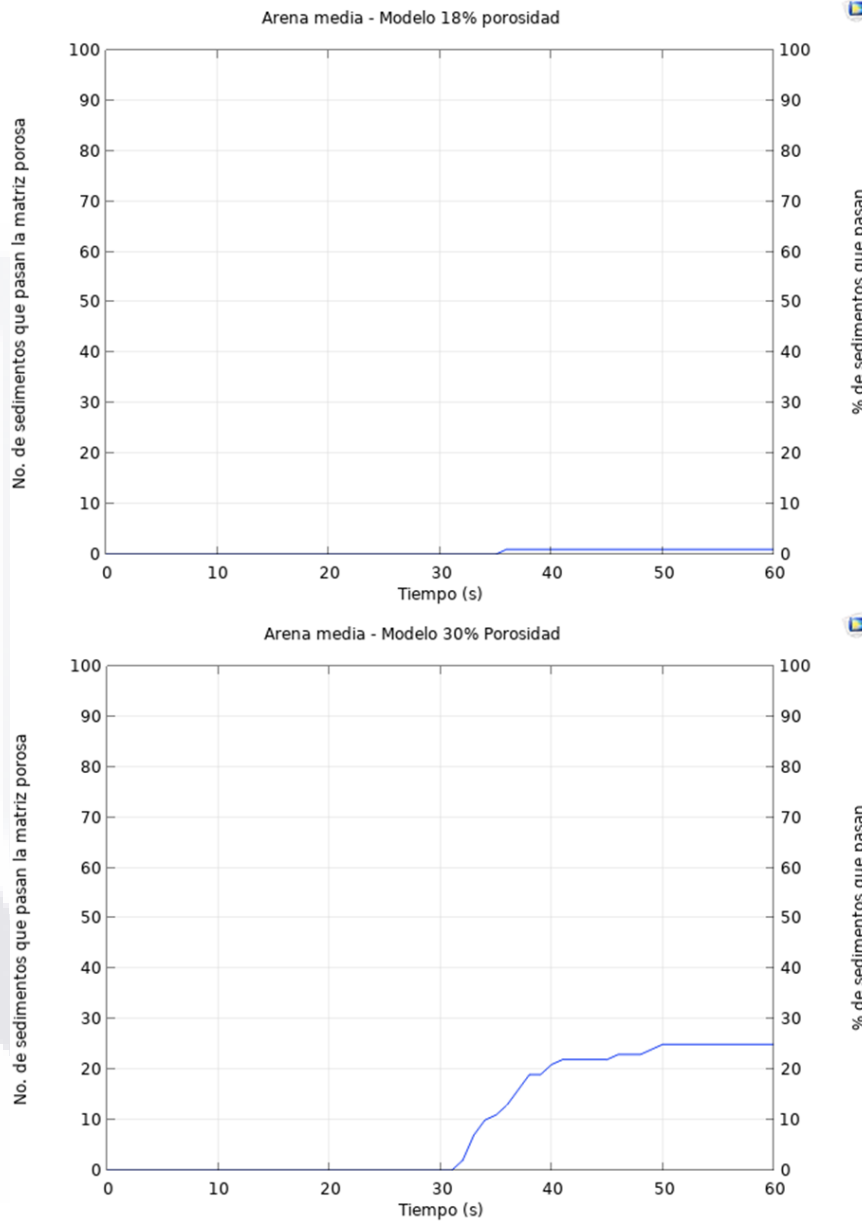
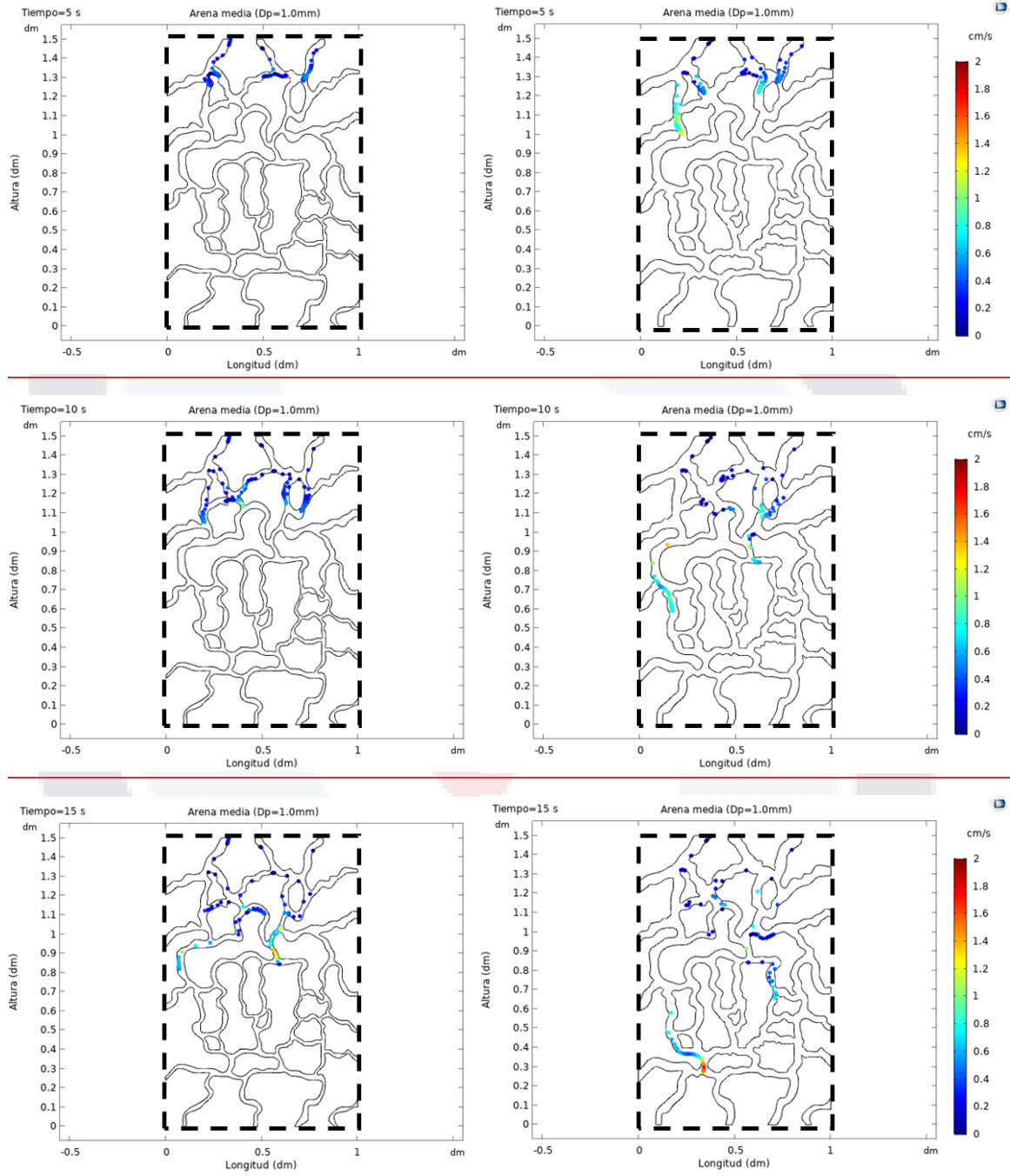
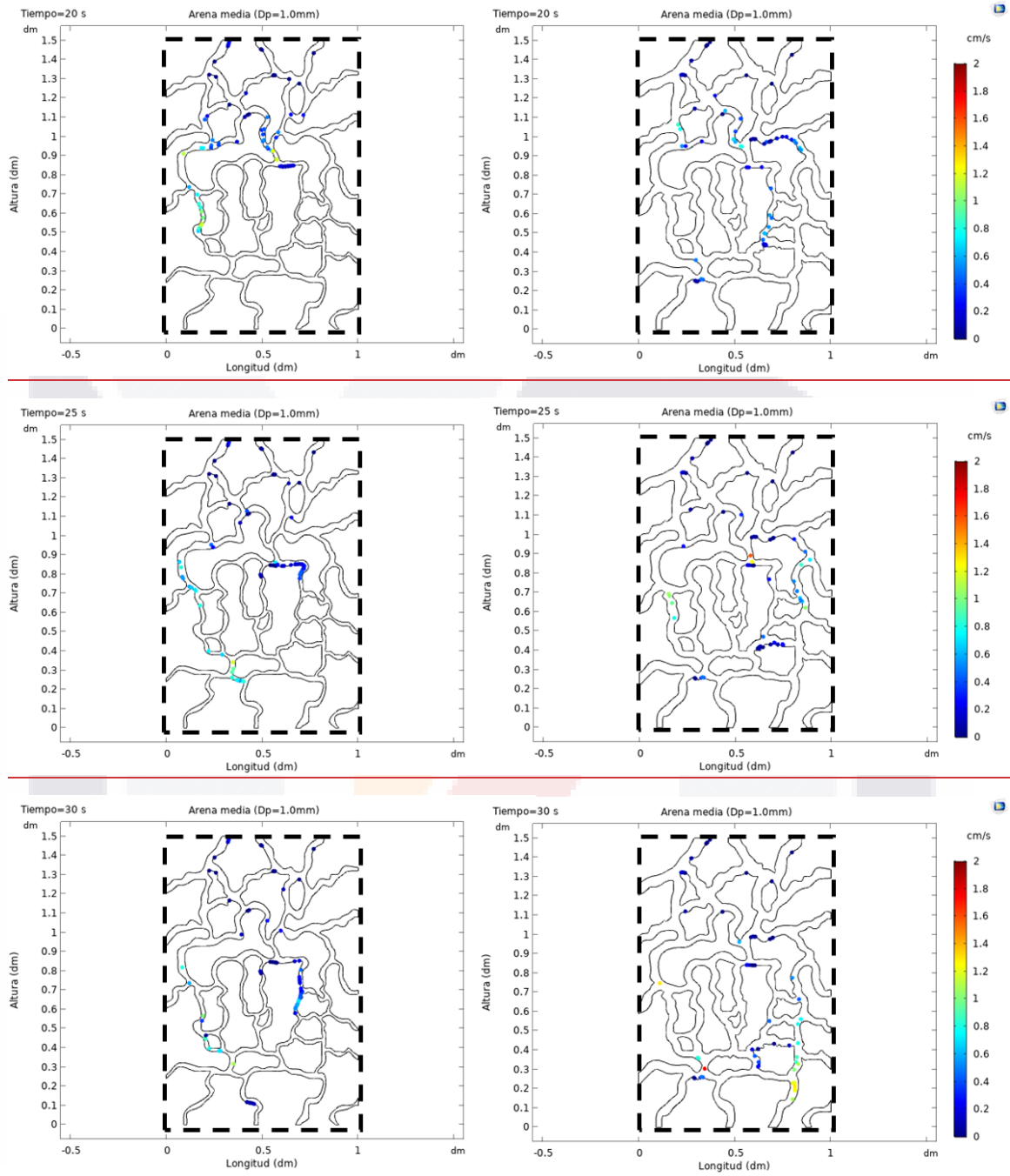


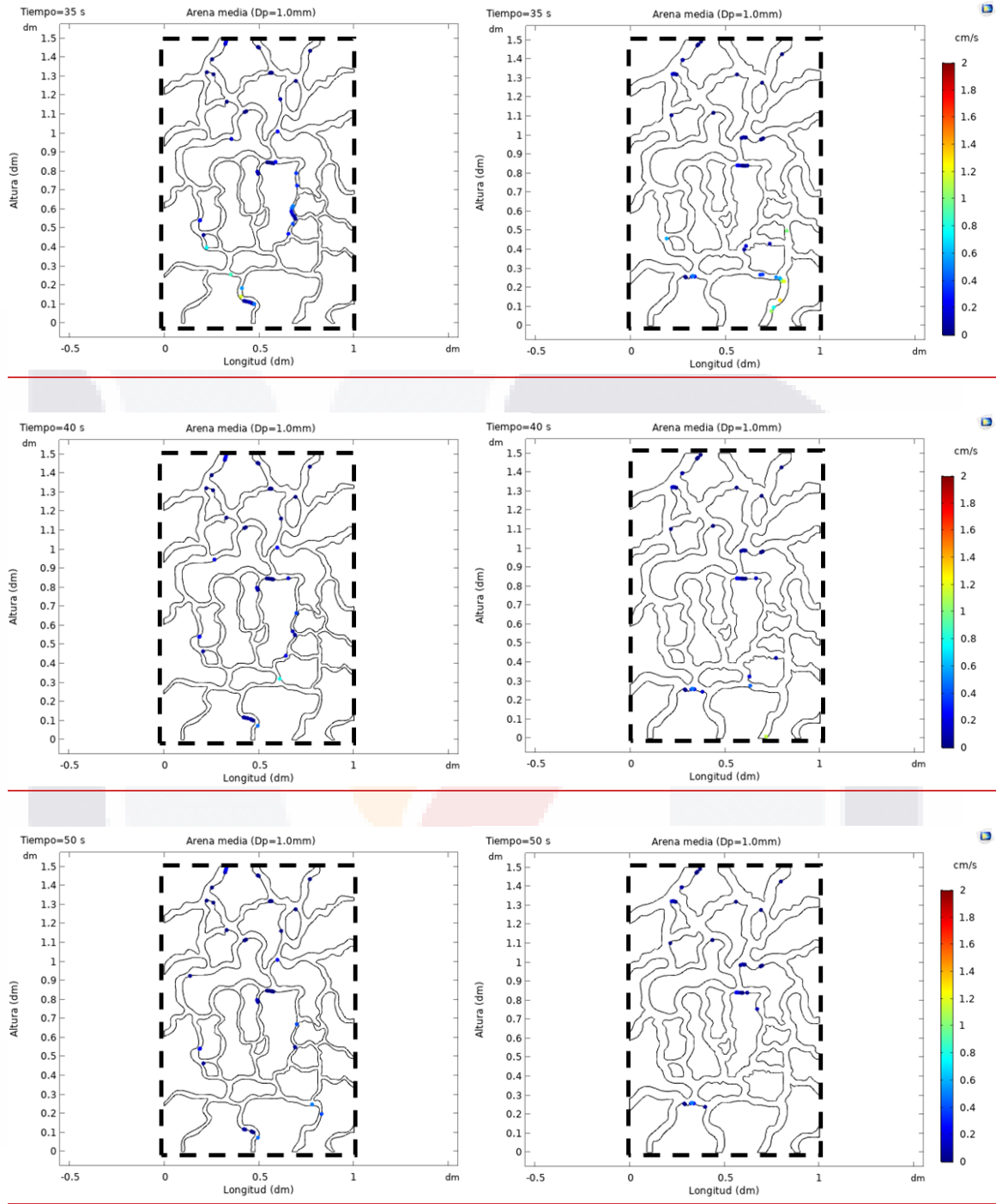
Figura 46. Cantidad de sedimentos de arena media que atraviesan la matriz porosa de concreto permeable en función del tiempo de simulación. Fuente: autoría propia.

La captura de los sedimentos ocurrió principalmente en los conductos donde existen bifurcaciones horizontales, y en partes donde los conductos tenían un diámetro entre 1 y 2 milímetros (ver figura 47). En un tiempo de simulación de 10 segundos se observan conductos con bifurcaciones horizontales que están siendo

totalmente obstruidos por los sedimentos, mientras que a los 60 segundos se aprecia que las partículas quedaron atoradas en los conductos más estrechos.







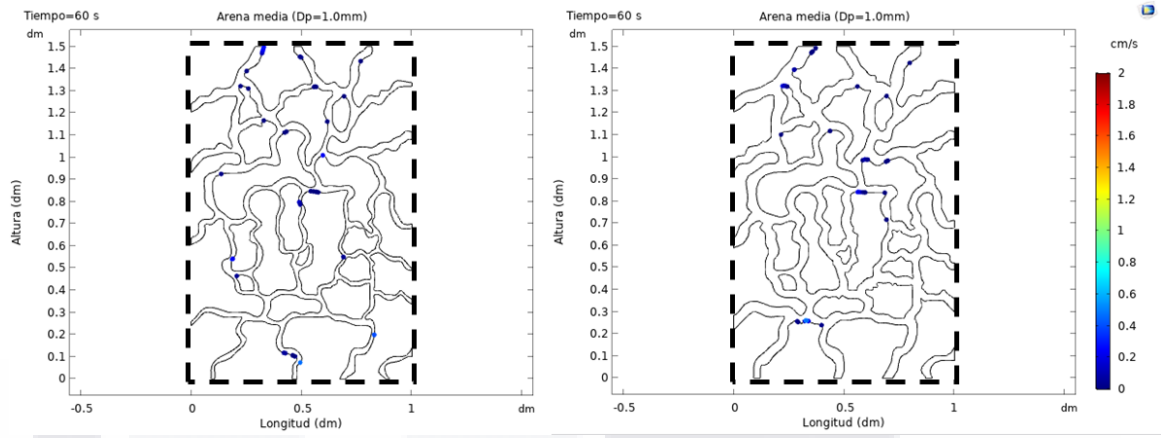
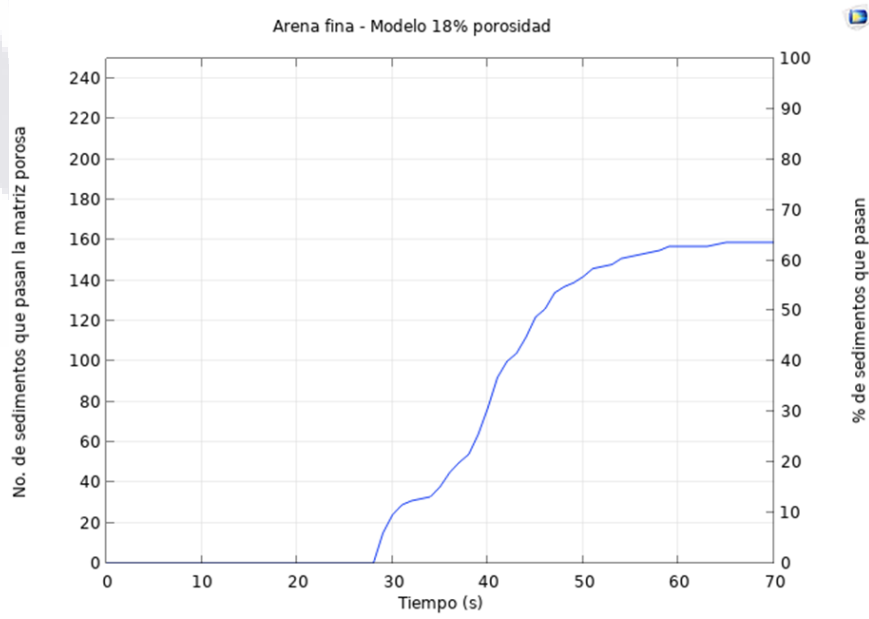


Figura 47. Trayectoria de sedimentos de arena media que pasan a través de la matriz porosa de concreto permeable. D_p es el diámetro de los sedimentos. Izquierda: 18% de porosidad efectiva. Derecha: 30% de porosidad efectiva. Fuente: autoría propia.

5.2.5 Arena fina

La simulación de arenas finas se ejecutó considerando un diámetro de partícula de 0.25 milímetros ($D_p=0.25\text{mm}$) y un total de 250 sedimentos. La velocidad del flujo fue constante, de 0.50 cm/s. La figura 48 muestra el porcentaje de sedimentos que pasaron a través de la matriz porosa, siendo 63% y 86% para los modelos de izquierda y derecha, respectivamente.



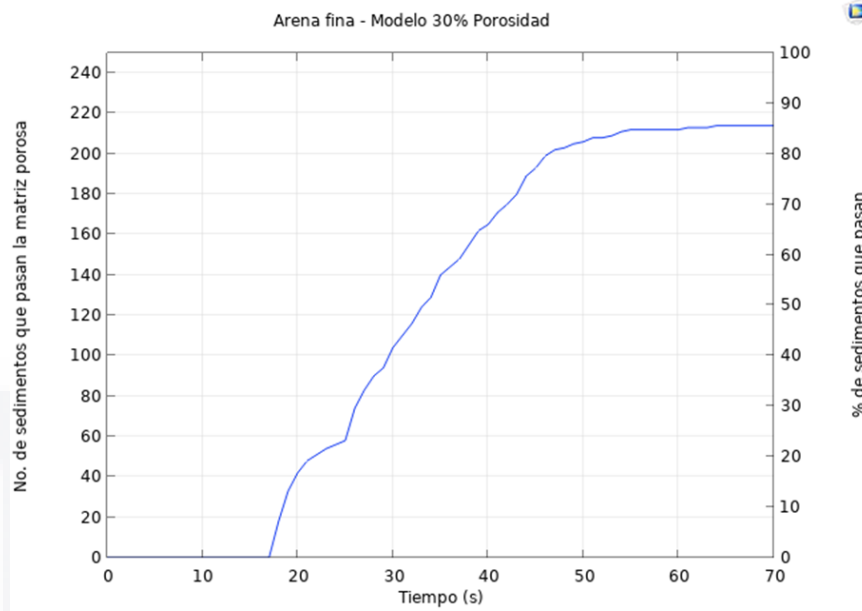
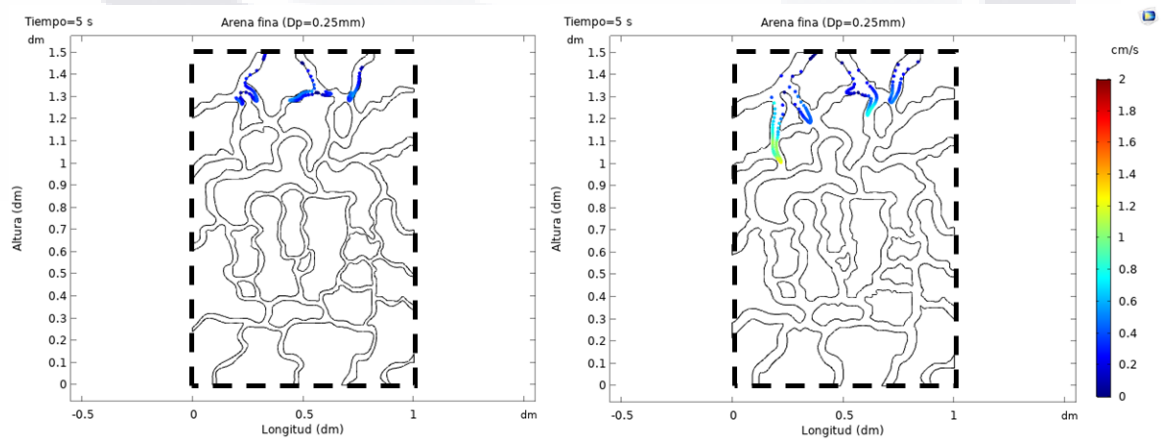
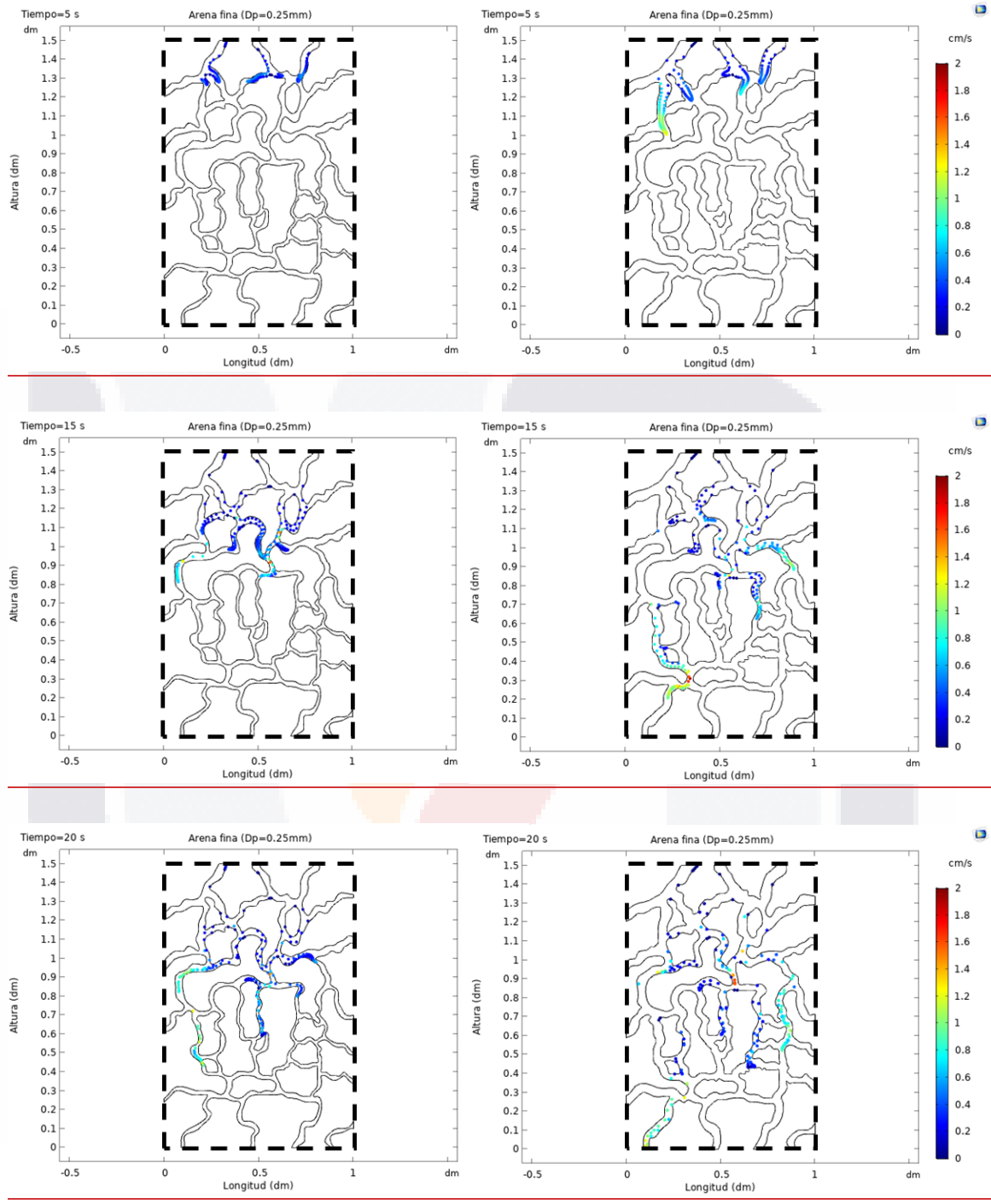
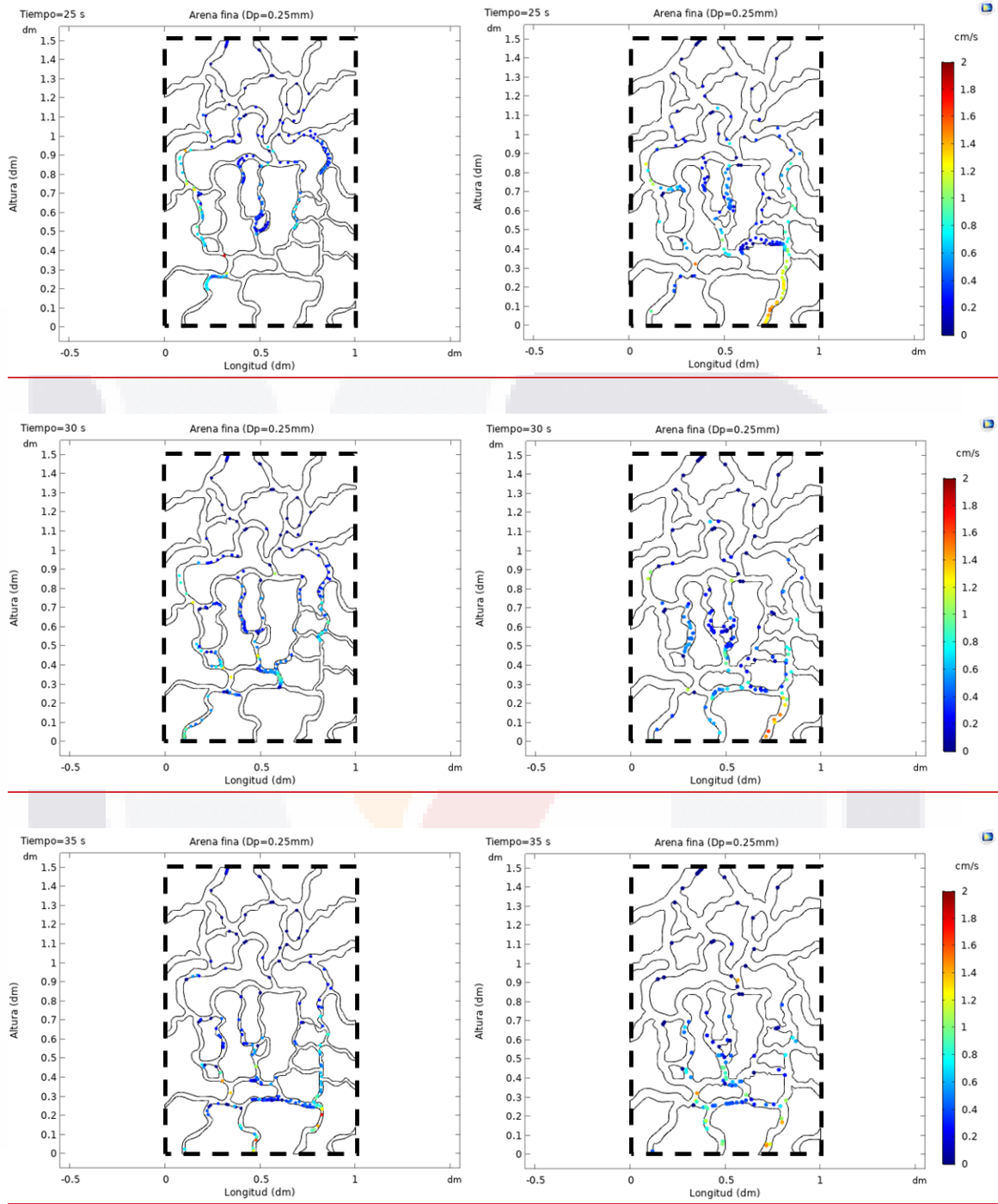


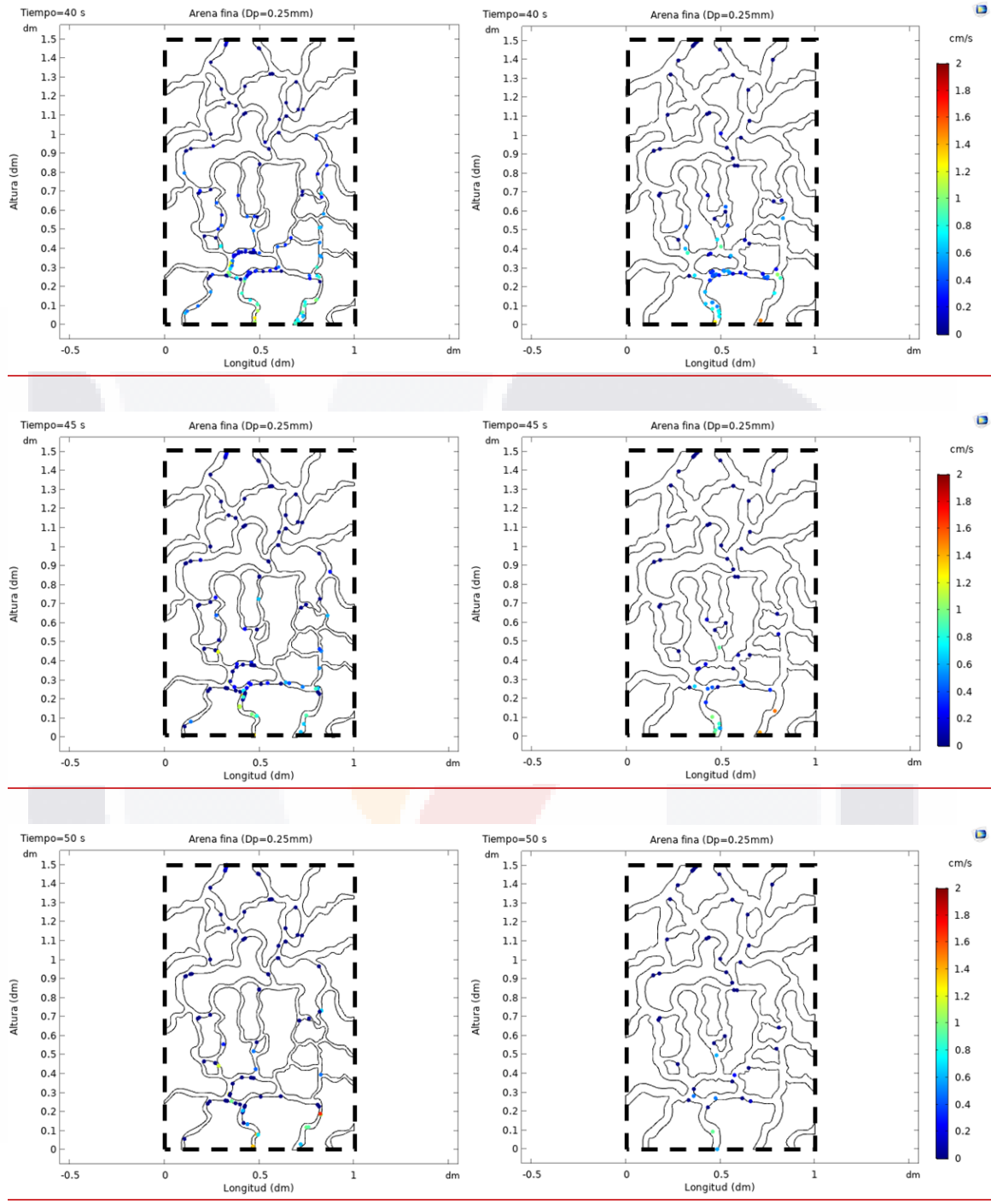
Figura 48. Cantidad de sedimentos de arena fina que atraviesan la matriz porosa de concreto permeable en función del tiempo de simulación. Fuente: autoría propia.

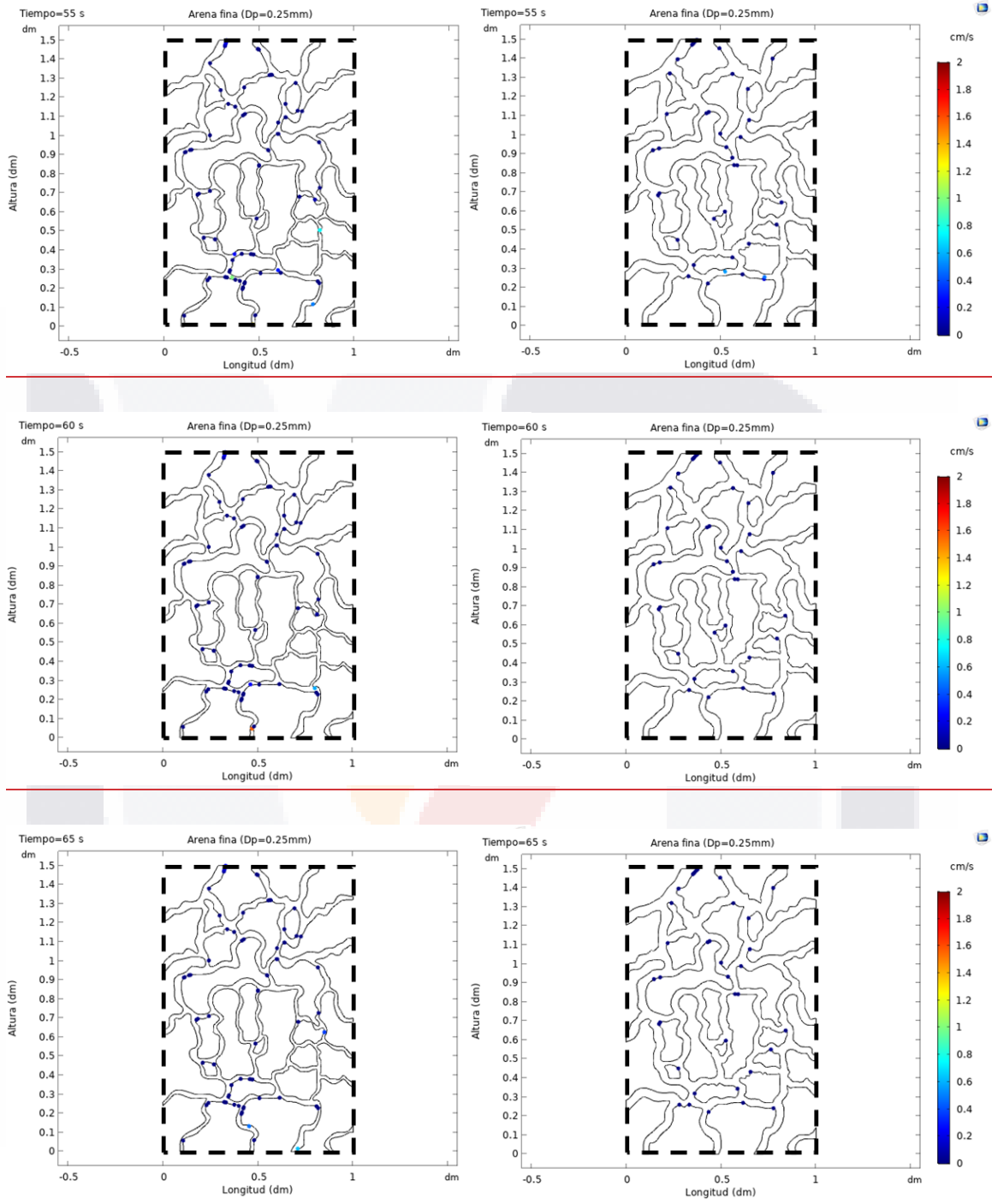
En esta simulación, un bajo porcentaje de sedimentos quedaron atrapados, en comparación con las simulaciones con partículas más gruesas. Esto es, el 39% y el 14% para los modelos de 18% y 30% de porosidad, respectivamente. Estos resultados sugieren que, a menor diámetro de partículas se tendrá menor posibilidad de captura de sedimentos. A los 17 segundos, los sedimentos comenzaron a llegar a la parte inferior del modelo de 30% de porosidad, mientras que en el modelo de 18% de porosidad el tiempo de llegada fue entre los 28 segundos (figura 49).











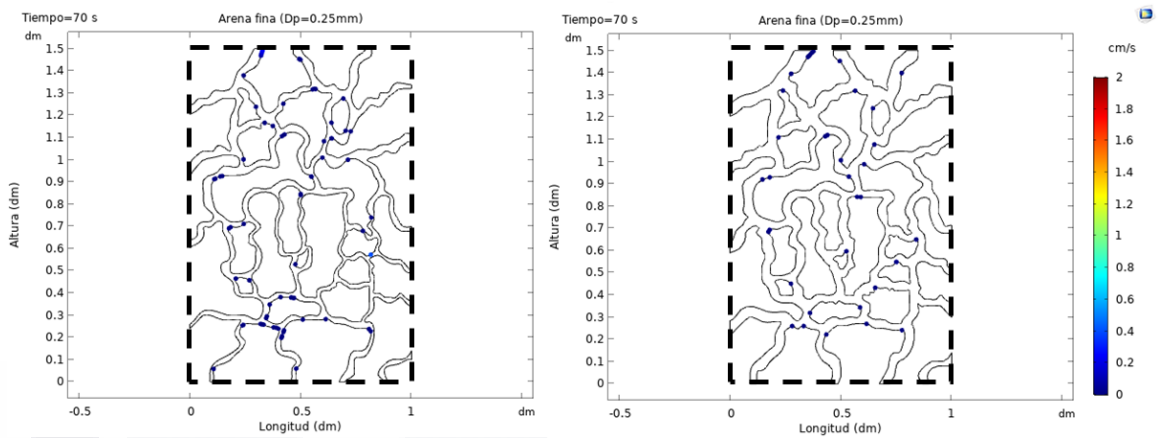
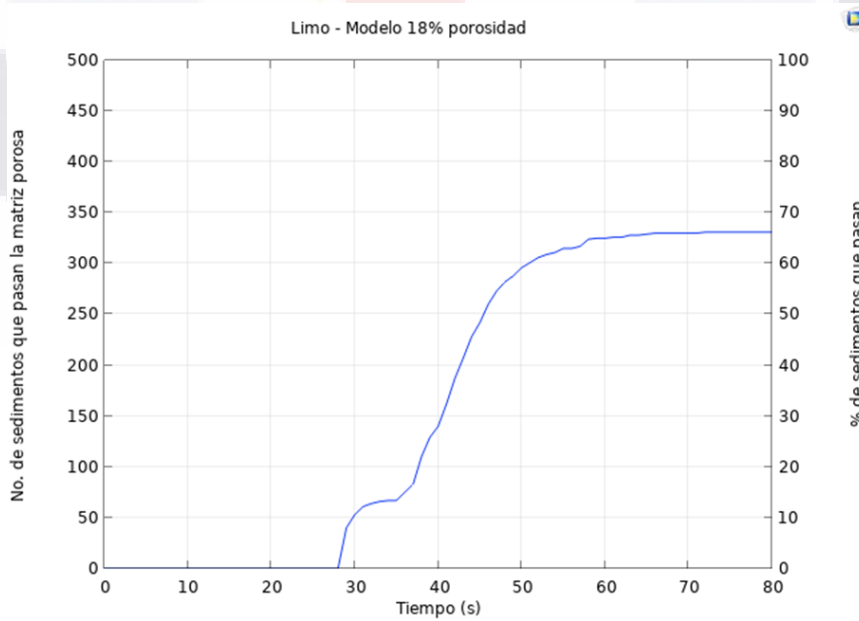


Figura 49. Trayectoria de sedimentos de arena fina que pasan a través de la matriz porosa de concreto permeable. Izquierda: 18% de porosidad efectiva. Derecha: 30% de porosidad efectiva. Fuente: autoría propia.

5.2.6 Limo

Para la simulación de sedimentos de limo se consideraron 500 partículas con un diámetro de 0.01 milímetros ($D_p=0.01\text{mm}$). La velocidad del flujo fue constante, de 0.50 cm/s. El porcentaje de sedimentos que pasaron a través de la matriz porosa fue muy similar (67% y 85%) al obtenido en las simulaciones con sedimentos de arena fina y arcilla, tal y como se muestra en la figura 50.



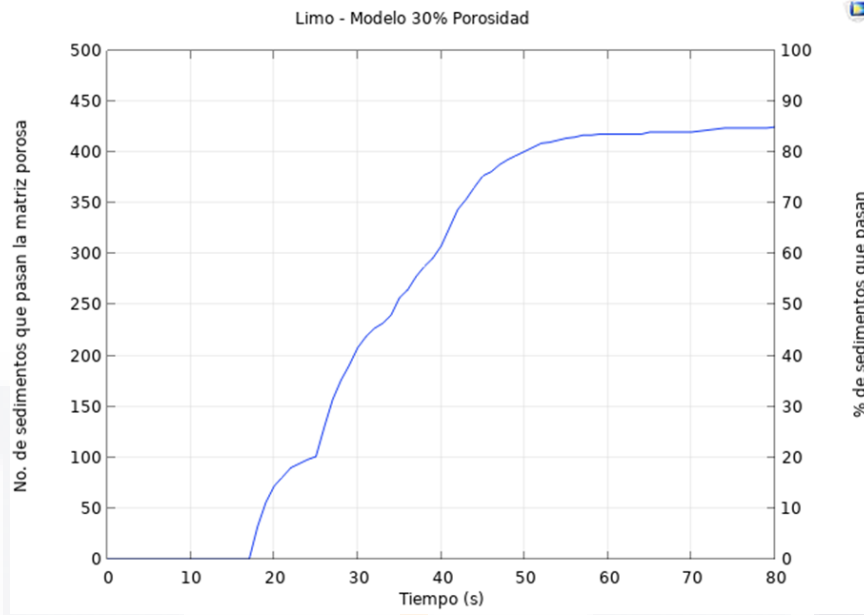
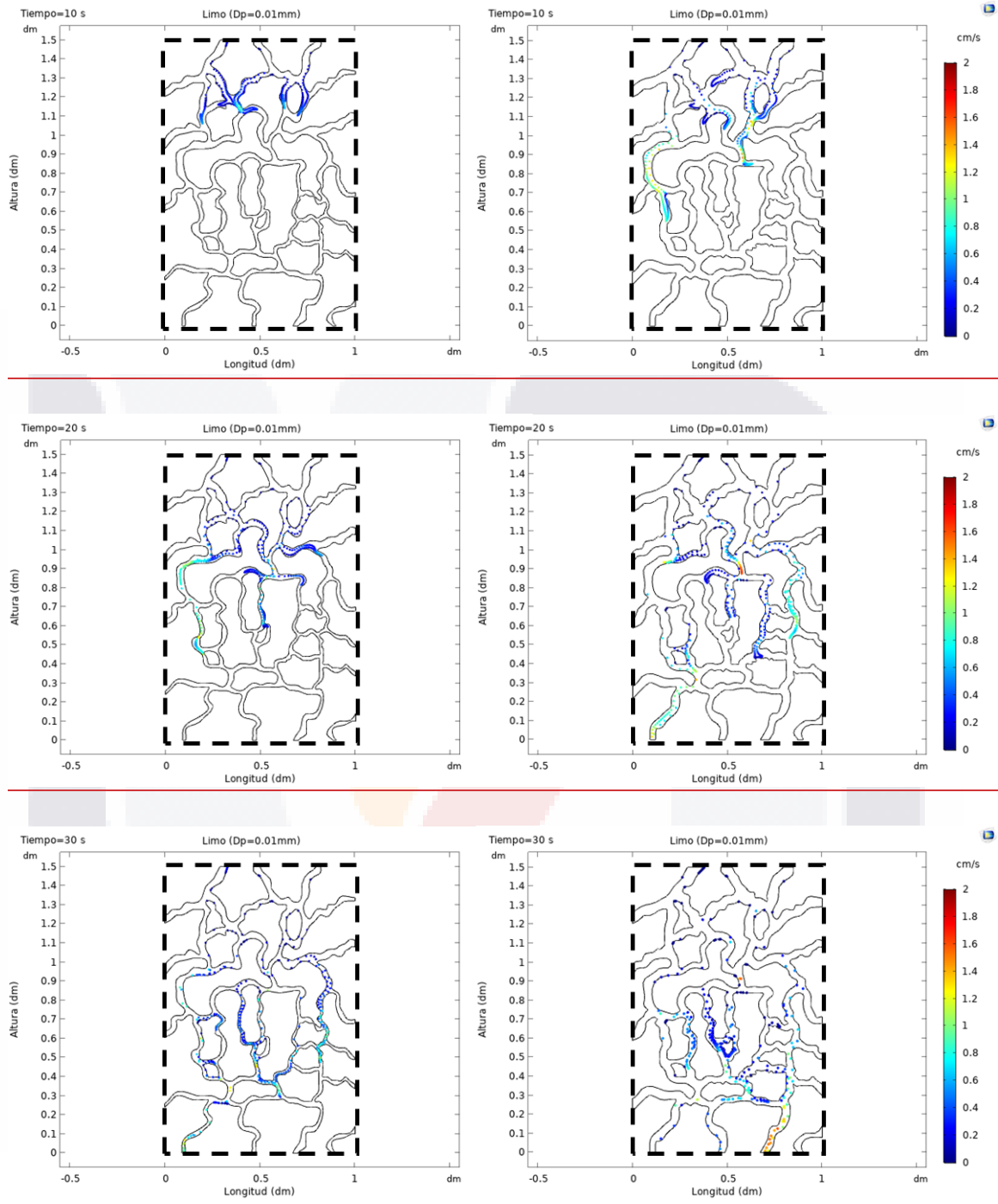
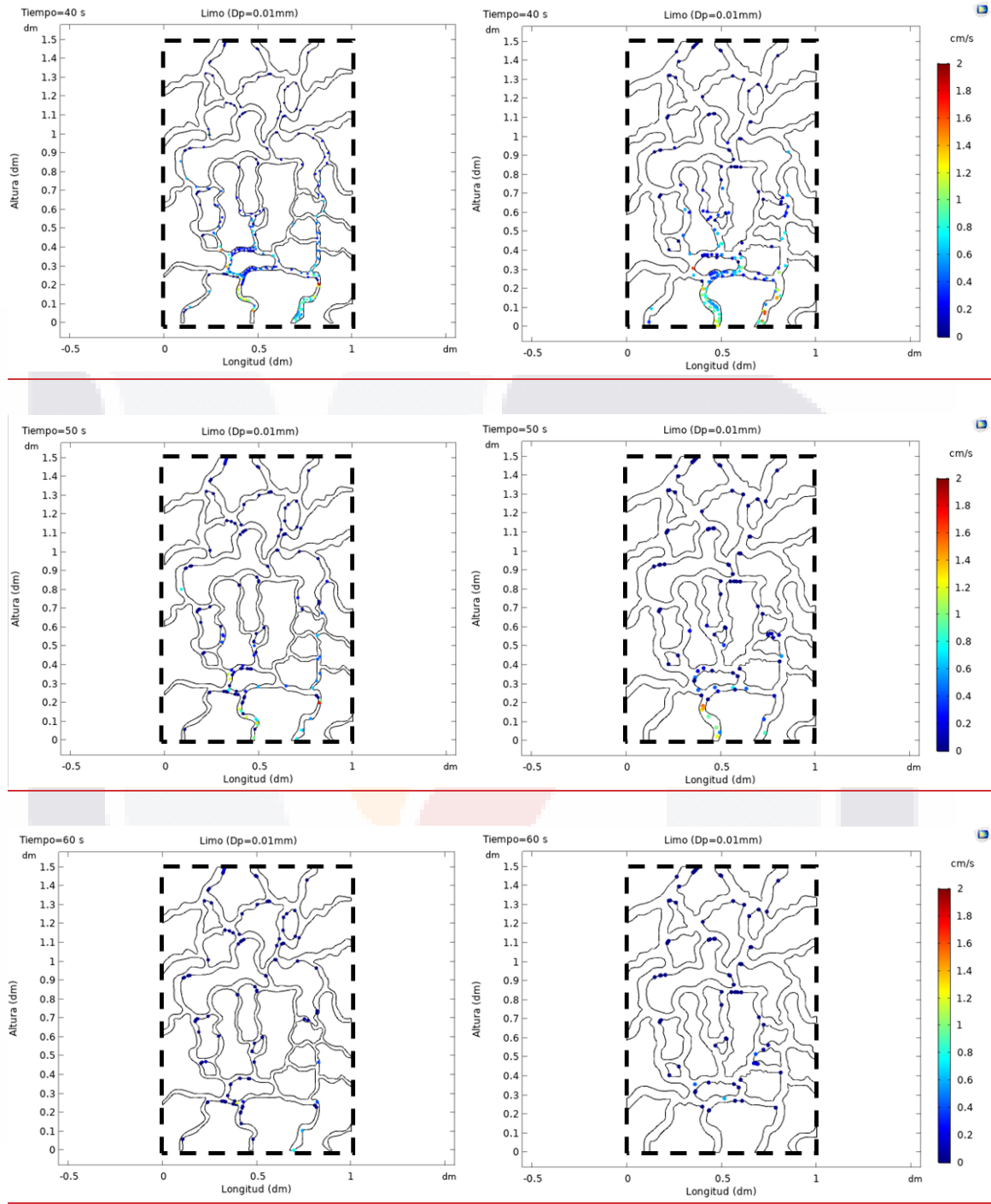


Figura 50. Cantidad de sedimentos de limo que atraviesan la matriz porosa de concreto permeable en función del tiempo de simulación. Fuente: autoría propia.

Los modelos de simulación de trayectoria de sedimentos de limo se muestran en la figura 51. Entre los 20 y 60 segundos se observa una llegada continua de sedimentos en las salidas de los conductos verticales, así como un incremento de la velocidad en las partículas.

La similitud de las simulaciones con sedimentos de arena fina, limo y arcilla sugiere que existe una relación entre el diámetro de los conductos de la matriz porosa y el diámetro de las partículas. En otras palabras, a partir de cierto diámetro mínimo de partículas, la subsecuente reducción del diámetro de las partículas no causará variaciones significativas en el porcentaje de sedimentos que pasan a través de la matriz porosa.





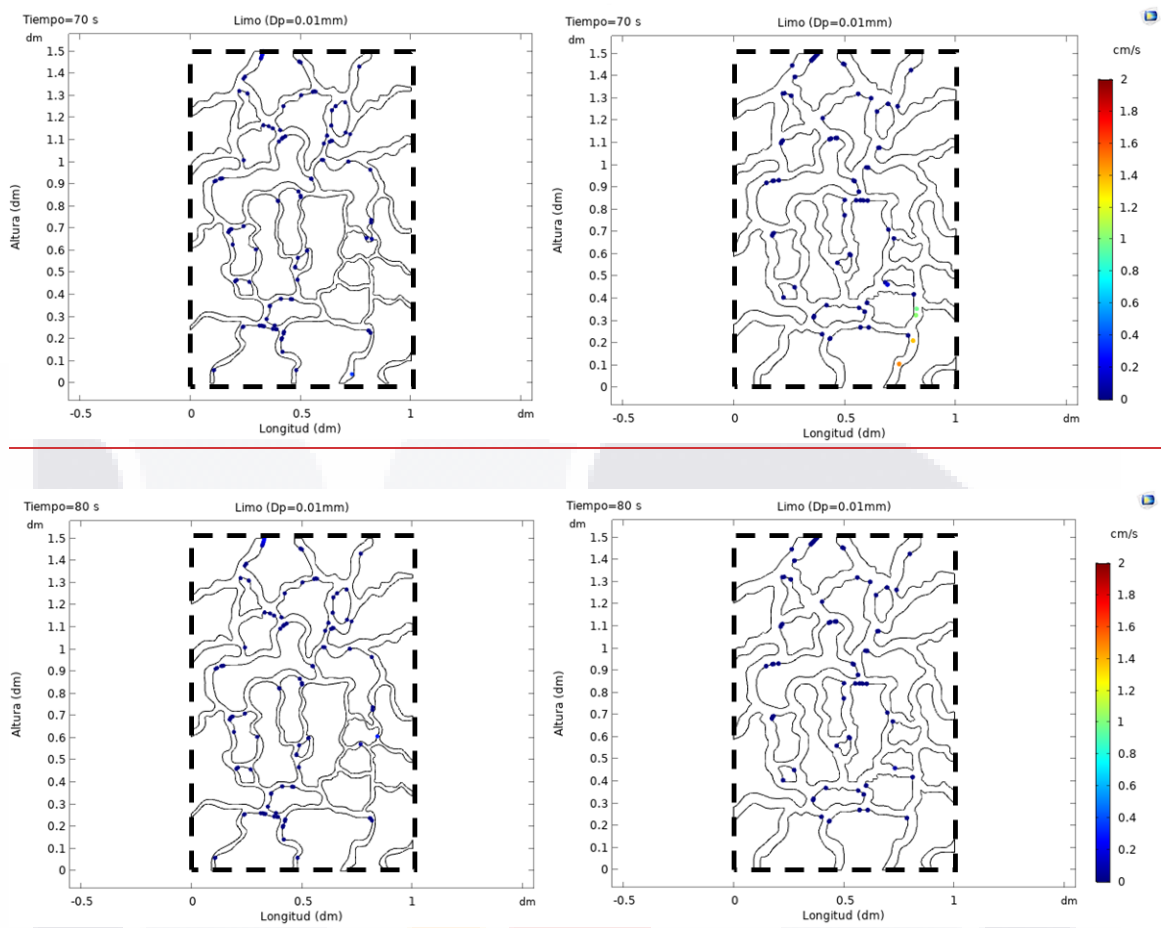


Figura 51. Trayectoria de sedimentos de limo que pasan a través de la matriz porosa de concreto permeable. Izquierda:18% de porosidad efectiva. Derecha: 30% de porosidad efectiva. Fuente: autoría propia.

5.2.7 Arcillas

La simulación de sedimentos de arcilla presentó un comportamiento similar al de las arenas finas y limos, aunque debe tomarse en cuenta que no se consideró la cohesión de las partículas. Se liberaron un total de 1000 sedimentos de arcilla, a una velocidad de flujo de 0.50 cm/s. El diámetro de las partículas se fijó en 0.0015 mm. El porcentaje de partículas que pasaron a través de la matriz porosa se muestra en la figura 52.

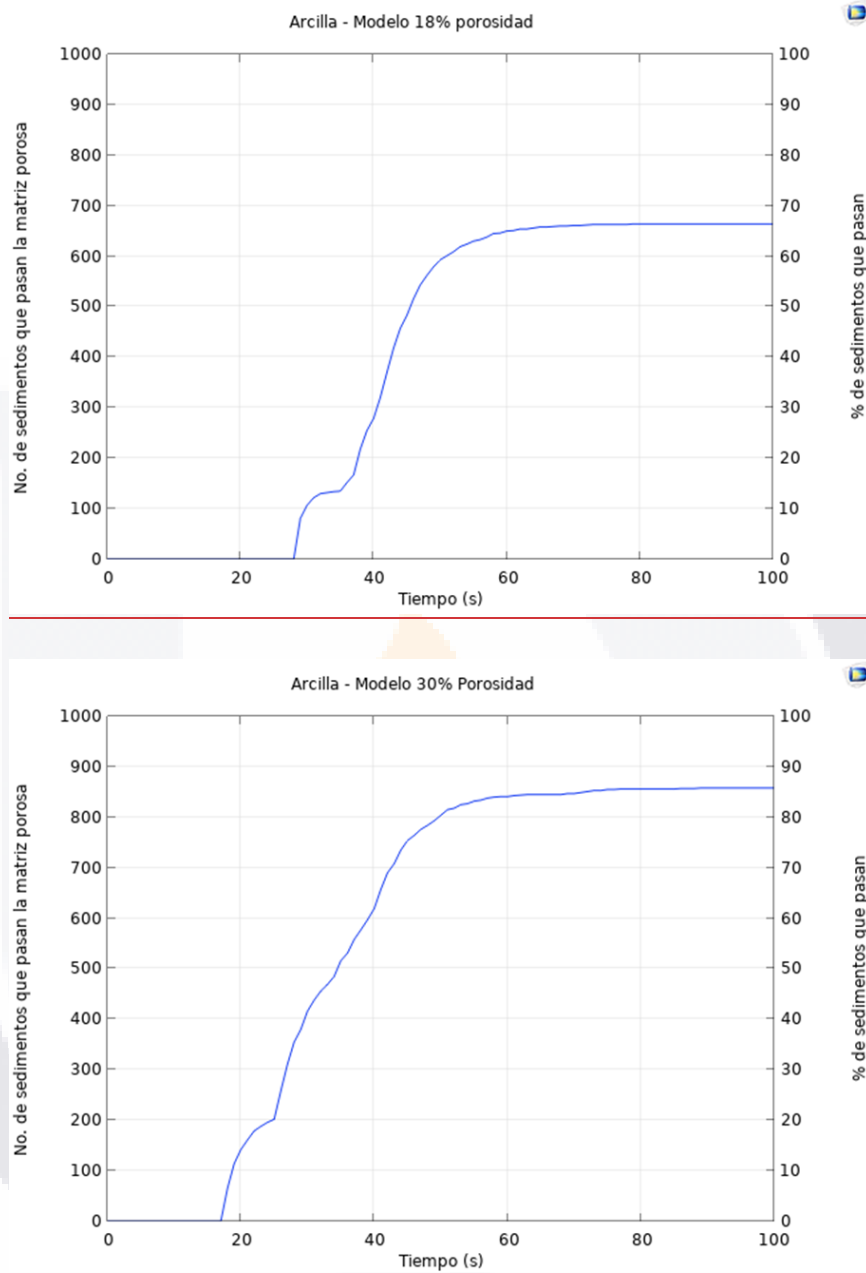
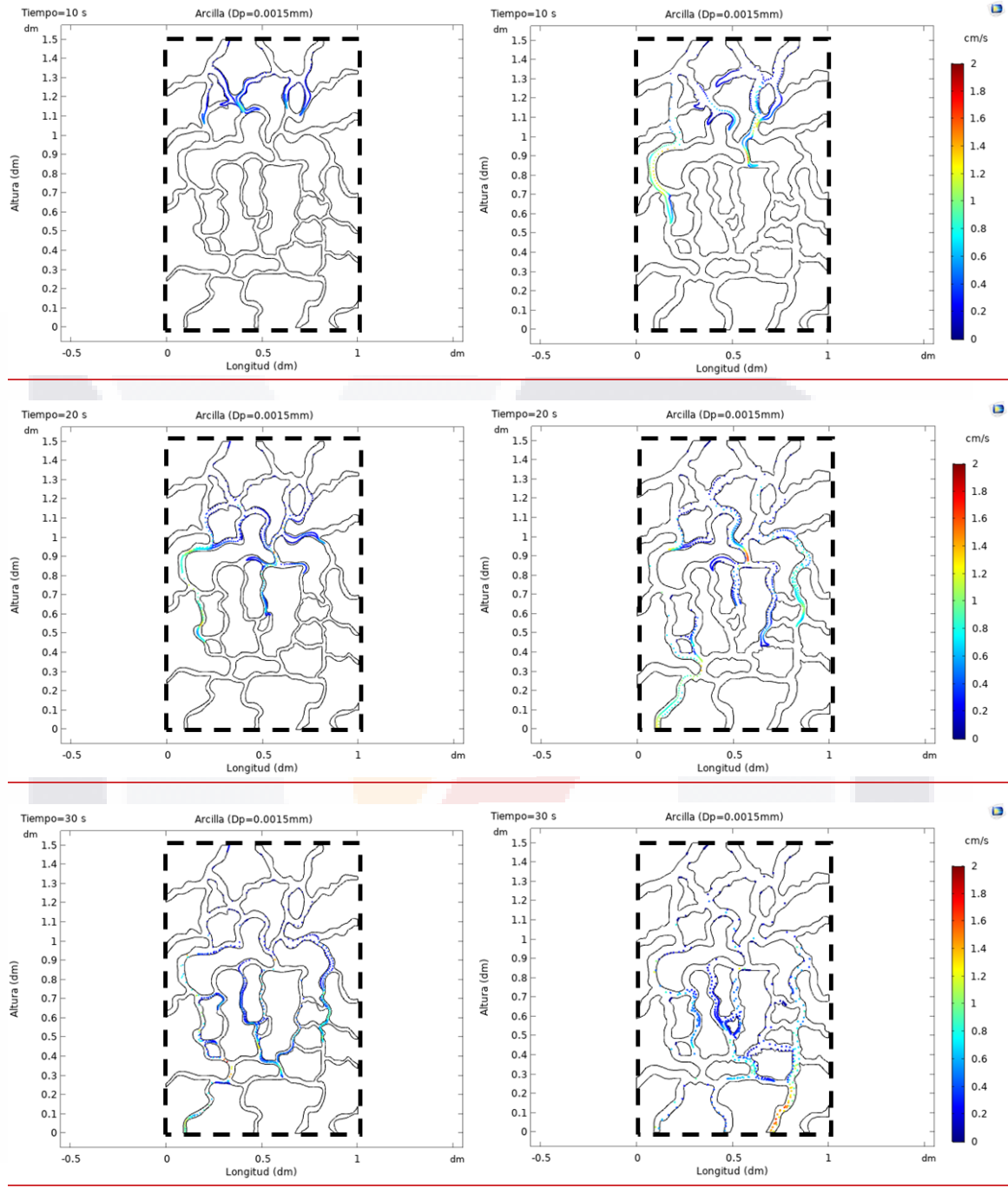
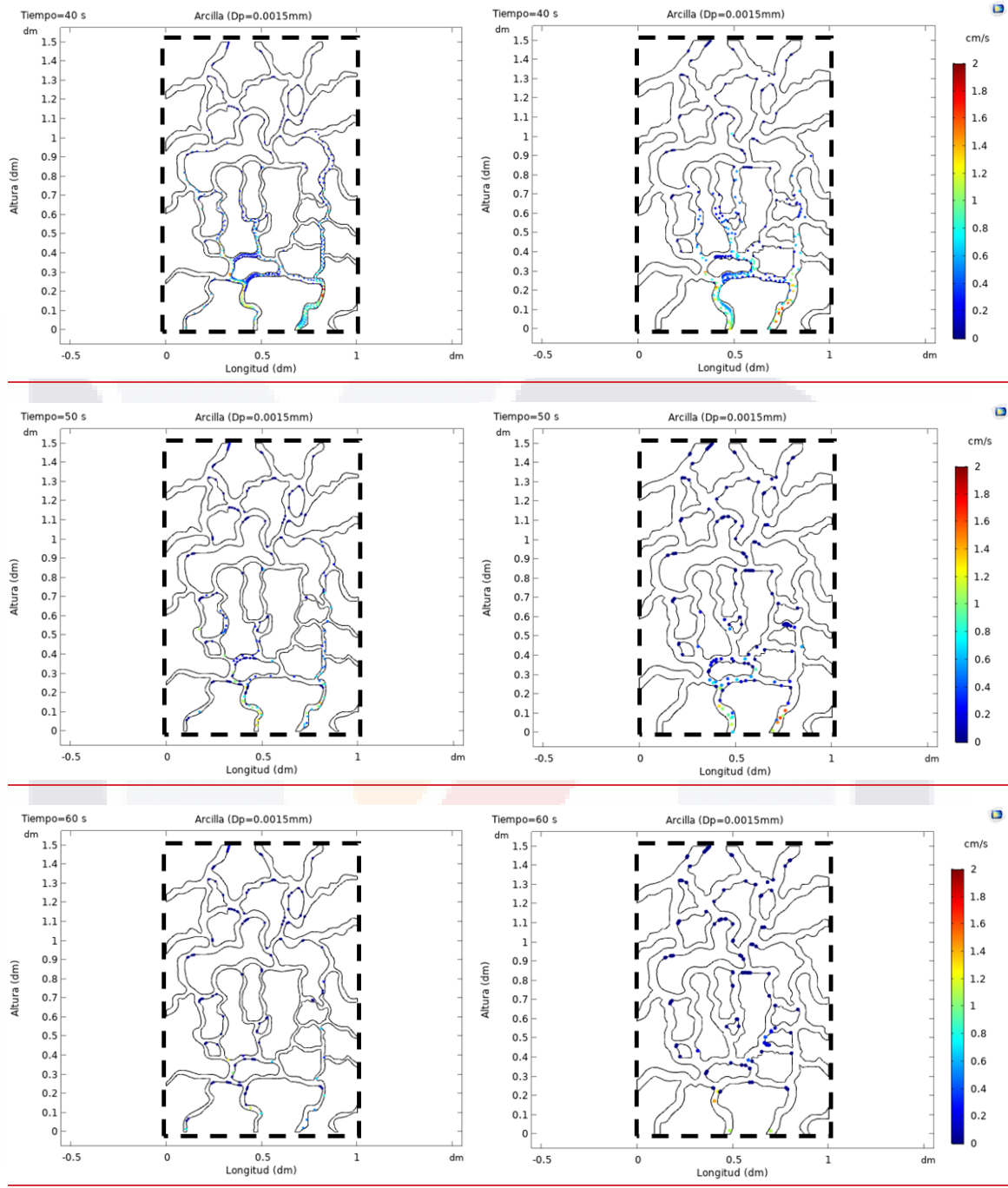
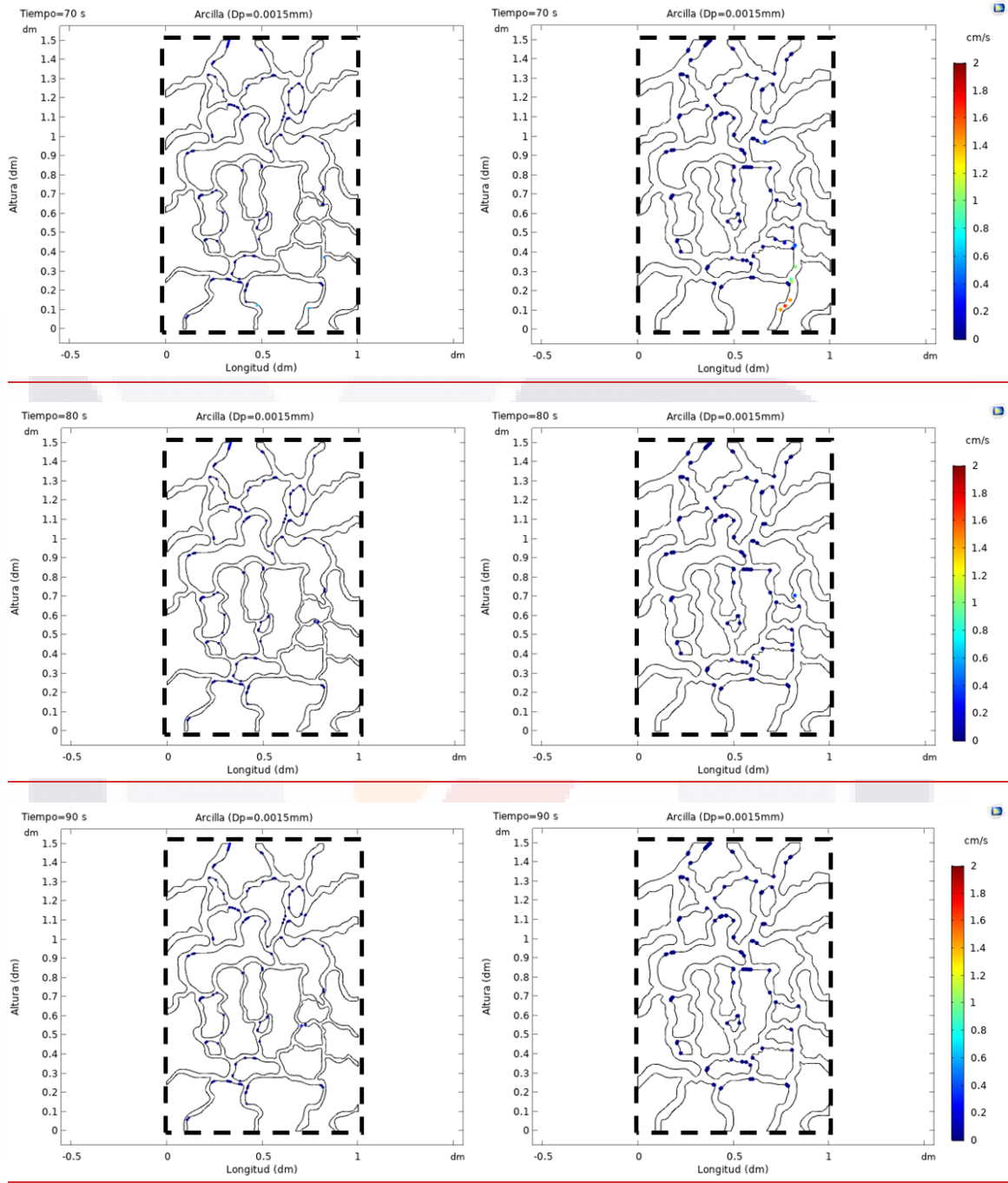


Figura 52. Cantidad de sedimentos de arcilla que atraviesan la matriz porosa de concreto permeable en función del tiempo de simulación. Fuente: autoría propia.

En la figura 53 se muestran los modelos de simulación de trayectoria de sedimentos de arcilla. En el modelo de 18% de porosidad, se observa la llegada continua de más del 95% de los sedimentos entre los 24 y 60 segundos, mientras que en el modelo de 30% de porosidad, el lapso oscila entre los 18 y los 55 segundos.







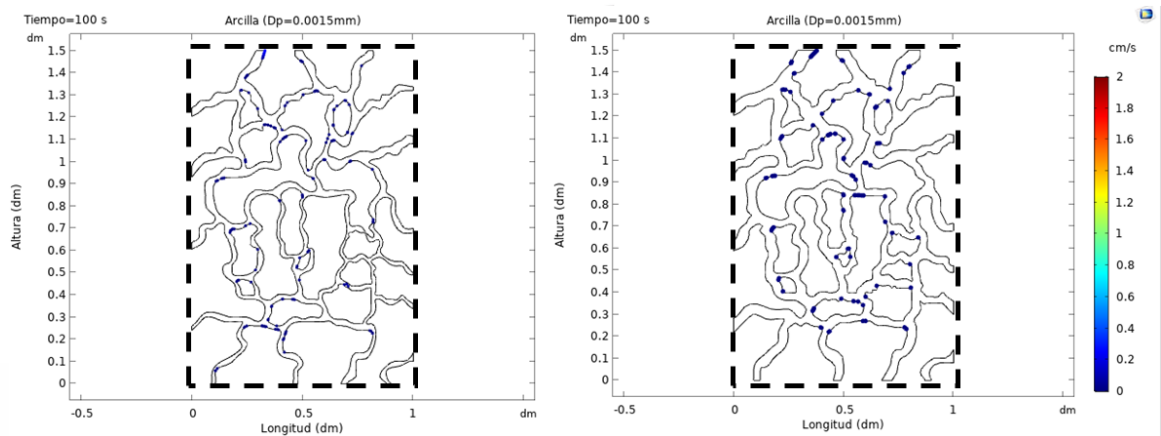


Figura 53. Trayectoria de sedimentos de arcilla que pasan a través de la matriz porosa de concreto permeable. Izquierda: 18% de porosidad efectiva. Derecha: 30% de porosidad efectiva. Fuente: autoría propia.



CAPÍTULO

VI

CONCLUSIONES

CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES

Captura de sedimentos

Una gran cantidad de variables son las que influyen en la captura de sedimentos. Como se vio en el capítulo 2, se ha demostrado que factores tales como las condiciones climáticas, el volumen acumulado de sedimentos, la cohesión de las partículas, la velocidad del flujo, la vibración causada por los vehículos, el tipo de suelo subyacente, la porosidad efectiva, entre otros, se deben tomar en cuenta cuando se diseñan sistemas de pavimento de concreto permeable.

Los resultados fueron variables respecto a las simulaciones con sedimentos de arena. Por un lado, las arenas gruesas quedaron capturados únicamente la parte de los modelos más cercana a la superficie, lo cual concuerda con los resultados obtenidos por Mata (2008). No obstante, en el caso de las arenas medias se presentó el caso más desfavorable de captura de sedimentos, donde el 99% y el 75% de las partículas se quedaron atrapadas a lo largo de toda la matriz porosa. Coughlin *et al.* (2012) también reportaron captura de sedimentos de arena de 0.0625 a 2.0 milímetros de diámetro.

En las simulaciones, el comportamiento de los sedimentos de arena fina fue muy similar al de los limos y arcillas. Aproximadamente del 63% al 86% de los sedimentos lograron atravesar la matriz porosa, en un tiempo de simulación entre los 20 y 70 segundos. Los diámetros de partícula más pequeños favorecieron el transporte de sedimentos, ya que la fuerza de arrastre que se requiere para desplazarlos es mucho menor.

Los sedimentos de limo y arcilla son los que menos efectos de captura de sedimentos causaron en los modelos de simulación. Sólo un 33% y un 15% de las partículas se quedaron atrapadas. Estos resultados contrastan con los obtenidos por Tong (2011), Mata (2008) y Coughlin *et al.* (2012), donde estos sedimentos bloquearon conductos estrechos y causaron la mayor reducción de la conductividad hidráulica.

La captura de sedimentos ocurrirá en las partes de los poros donde existan bifurcaciones horizontales de los conductos, así como en las zonas donde el diámetro de los poros sea menor al diámetro de las partículas, tal y como lo muestran los modelos de captura de sedimentos del capítulo 5.

Cuando se aumentó la porosidad efectiva del modelo de un 18% a un 30%, se obtuvo un incremento del 17 al 24% de partículas que pasaron la matriz porosa. No obstante, al utilizar partículas de grava fina y arena gruesa en los modelos de simulación, las partículas se quedaron en la parte superior de los conductos.

Matriz porosa de los modelos de simulación

El acomodo de agregados que mejor impide la captura de sedimentos como consecuencia del flujo de agua transportando sedimentos, es el que produce las formas de poro alargadas en el sentido vertical, donde el flujo de agua y los sedimentos alcanzan velocidades mayores.

En los poros horizontales, perpendiculares al sentido del flujo, la velocidad se mantuvo entre 0 y 0.40 cm/s, lo que sugiere que, en caso de que exista flujo de agua con sedimentos, las partículas se atascarán por efecto de su peso propio.

En algunos de los poros verticales, la velocidad del flujo se incrementó hasta 4 veces más que la velocidad inicial, lo cual demuestra la facilidad del flujo de agua para pasar a través de estos conductos. En consecuencia, será menos probable que ocurra captura de sedimentos en los conductos verticales.

Elaboración de mezclas de concreto permeable

Para la elaboración de mezclas de concreto permeable con cemento portland, se recomienda seguir las siguientes indicaciones:

- Emplear gravas bien graduadas con arena, de acuerdo con el Sistema Unificado de Clasificación de suelos.
- Dosificar con relaciones agregado-cemento y agua-cemento de 4:1 y 0.33, respectivamente.

- Utilizar la mayor cantidad posible de aditivo para concreto permeable en la mezcla, en sustitución de la cantidad de agua por añadir.
- Agregar aditivo reductor de agua a la mezcla de concreto permeable.

Porosidad Efectiva

La técnica de la diferencia de pesos para calcular la porosidad no arrojó resultados consistentes en cuando a la determinación de las porosidades efectivas. Lo anterior quedó demostrado para el caso de las muestras elaboradas con la granulometría SUCS 2, donde la porosidad efectiva medida fue del 18% promedio, pero al momento de realizar la prueba de conductividad hidráulica, los valores fueron nulos. En consecuencia, se requiere contar con técnicas que arrojen resultados precisos respecto a la medición de porosidades efectivas y no efectivas en muestras de concreto permeable.

Nichos de Investigación

El concreto permeable tiene áreas de oportunidad en el campo de la simulación numérica, ya que medir la condición de campo real de la captura de sedimentos en el concreto permeable mediante experimentos físicos es costoso.

En los modelos de simulación de captura de sedimentos que se presentan en esta tesis, se trabajó con variables como el tamaño de los sedimentos, el porcentaje de porosidad efectiva, el número de partículas liberadas en la simulación, entre otros. No obstante, se pueden añadir más variables, tales como el grado de tortuosidad, la forma de los sedimentos, la velocidad de entrada del flujo, la cohesión entre partículas, la vibración causada por los vehículos, las condiciones de humedad, diferentes tamaños de sedimentos en un solo modelo de simulación, entre otros. Lo anterior va a permitir el diseño de mejores sistemas de pavimento de concreto permeable.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACI 522R. (2006). *Pervious Concrete*. Farmington Hills, MI: American Concrete Institute. Recuperado de American Concrete Institute website: https://www.techstreet.com/standards/aci-522r-10-r2011?product_id=1880994
- Alsubih, M., Arthur, S., Wright, G., & Allen, D. (2016). Experimental study on the hydrological performance of a permeable pavement. *Urban Water Journal*, 14(4), 427–434. doi: 10.1080/1573062X.2016.1176221
- Andres-Valeri, V., Juli-Gandara, L., Jato-Espino, D., & Rodriguez-Hernandez, J. (2018). Characterization of the Infiltration Capacity of Porous Concrete Pavements with Low Constant Head Permeability Tests. *Water*, 10(4), 480. doi: 10.3390/w10040480
- Asphalt Institute. (2010). *Porous Asphalt Pavement example*. Lexington, Kentucky. Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=Wj-ILKmJrh8>
- ASTM D 698. (1993). *ASTM D 698, Test Method for Laboratory Compaction of Soil Using Standard Effort, Annual Book of ASTM Standards*. Conshohocken, Pennsylvania: American Society for Testing and Materials.
- Bay Area. (2019). Polished Fine Grain Pervious Concrete. Recuperado el 26 de junio de 2019, de Bay Area Pervious Concrete website: <http://www.bayareaperviousconcrete.com/>
- CNCA. (2019). Example of Permeable Interlocking Concrete Pavers [California and Nevada Cement Association (CNCA)]. Recuperado el 27 de junio de 2019, de <https://cncement.org/solutions/concrete-pavers/>

Coughlin, J. P., Campbell, C. D., & Mays, D. C. (2012). Infiltration and Clogging by Sand and Clay in a Pervious Concrete Pavement System. *Journal of Hydrologic Engineering*, 17(1), 68–73. doi: 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000424

Eisenberg, B., Lindow, K. C., Smith, D. R., & Smith, D. R. (Eds.). (2015). *Permeable Pavements* (First). Reston, VA: American Society of Civil Engineers. doi: 10.1061/9780784413784

EVstudio. (2016, junio 10). Benefits of Permeable Interlocking Concrete Pavements [EVstudio]. Recuperado el 28 de junio de 2019, de Architect Engineer Denver Evergreen Colorado, Austin Texas Architect website: <https://evstudio.com/benefits-of-permeable-interlocking-concrete-pavement-picp/>

Ferguson, B. K. (2005). *Porous Pavements*. Boca Raton, Florida: CRC Press.

Fetter, C. W. (1994). *Applied Hydrogeology* (Tercera Edición). Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, Inc.

González de Vallejo, L. I., Ferrer, M., Ortuño, L., & Oteo, C. (2002). *Ingeniería Geológica*. Madrid, España: Pearson Educación.

Google Maps. (2019). *Zona de inundación en el cruce ubicado entre la Av. Siglo XXI y la calle Sierra Tepehuanes [Figura]*. Recuperado de https://www.google.com.mx/maps/@21.9086411,-102.258186,3a,75y,339.34h,76.38t/data=!3m6!1e1!3m4!1siCWbiQKaf0Z_VIRzBAE_Yg!2e0!7i16384!8i8192

Hansen, K. (2008). *Porous Asphalt Pavements for Sormwater Management. Design, construction and maintenance guide* (p. 24). Lanham, Maryland: National

Asphalt Pavement Association. Recuperado de National Asphalt Pavement Association website: http://driveasphalt.org/assets/content/resources/IS-131_Porous_Asphalt_Pavements_for_Sormwater_Management-screen.pdf

Hernández-Marín, M., Guerrero-Martínez, L., Zermeño-Villalobos, A., Rodríguez-González, L., Burbey, T. J., Pacheco-Martínez, J., ... González-Cervantes, N. (2018). Spatial and temporal variation of natural recharge in the semi-arid valley of Aguascalientes, Mexico. *Hydrogeology Journal*, 26(8), 2811–2826. doi: 10.1007/s10040-018-1819-x

ICPI. (1999). *Tech Spec 8: Concrete Grid Pavers* (Technical Bulletin Núm. 8; p. 12). Herndon, VA: Interlocking Concrete Pavement Institute. Recuperado de Interlocking Concrete Pavement Institute website: <http://rochesterpcp.com/resources/icpi-tech-specs/tech-spec-8.pdf>

ICPI. (2019). Interlocking Concrete Pavement Institute. Recuperado el 26 de junio de 2019, de Interlocking Concrete Pavement Institute website: <https://www.icpi.org/>

Kevern, J. T. (2015). Evaluating Permeability and Infiltration Requirements for Pervious Concrete. *Journal of Testing and Evaluation*, 43(3), 20130180. doi: 10.1520/JTE20130180

Kosmatka, S. H., & Panarese, W. C. (1992). *Diseño y Control del Mezclas de Concreto* (13 edición). Instituto Mexicano del Cemento y el Concreto, A.C.

Kuruppu, U., Rahman, A., & Rahman, M. A. (2019). Permeable pavement as a stormwater best management practice: A review and discussion. *Environmental Earth Sciences*, 78(10), 327. doi: 10.1007/s12665-019-8312-2

- Leming, M. L., Malcom, H. R., & Tennis, P. D. (2007). *Hydrologic Design of Pervious Concrete (First)*. Skokie, Illinois: Portland Cement Association. Recuperado de <http://secement.org/wp-content/uploads/2016/02/EB303.pdf>
- Lin, W., Park, D.-G., Ryu, S. W., Lee, B.-T., & Cho, Y.-H. (2016). Development of permeability test method for porous concrete block pavement materials considering clogging. *Construction and Building Materials*, 118, 20–26. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.03.107
- Mata, L. A. (2008). *Sedimentation of pervious concrete* (Doctoral Dissertation, North Carolina State University). North Carolina State University, Raleigh, North Carolina. Recuperado de <https://repository.lib.ncsu.edu/handle/1840.16/5749>
- Montes, F., & Haselbach, L. (2006). Measuring Hydraulic Conductivity in Pervious Concrete. *Environmental Engineering Science*, 23(6), 960–969. doi: 10.1089/ees.2006.23.960
- Qin, Y., Yang, H., Deng, Z., & He, J. (2015). Water Permeability of Pervious Concrete Is Dependent on the Applied Pressure and Testing Methods. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2015, 1–6. doi: 10.1155/2015/404136
- Smith, D. R. (2000). *Permeable Interlocking Concrete Pavements* (Third Edition). Washington DC. Recuperado de http://www.idealconcreteblock.com/tl_files/pages/designers/know-green/PICP_Manual_3rd_edition.pdf
- Tennis, P. D., Leming, M. L., & Akers, D. J. (2004). *Pervious Concrete Pavements*. Skokie, Illinois: Portland Cement Association. Recuperado de

https://www.researchgate.net/publication/242722509_Pervious_Concrete_Pavements

Tong, B. (2011). *Clogging effects of portland cement pervious concrete* (Master of Science, Iowa State University). Iowa State University, Ames. doi: 10.31274/etd-180810-303

US EPA. (1999). *Storm Water Technology Fact Sheet. Porous Pavement*. United States Environmental Protection Agency. Recuperado de <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyNET.exe/91018M1N.TXT?ZyActionD=ZyDocument&Client=EPA&Index=1995+Thru+1999&Docs=&Query=&Time=&EndTime=&SearchMethod=1&TocRestrict=n&Toc=&TocEntry=&QField=&QFieldYear=&QFieldMonth=&QFieldDay=&IntQFieldOp=0&ExtQFieldOp=0&XmlQuery=&File>

Yong, C. F., McCarthy, D. T., & Deletic, A. (2013). Predicting physical clogging of porous and permeable pavements. *Journal of Hydrology*, 481, 48–55. doi: 10.1016/j.jhydrol.2012.12.009

Zhong, R., Xu, M., Vieira Netto, R., & Wille, K. (2016). Influence of pore tortuosity on hydraulic conductivity of pervious concrete: Characterization and modeling. *Construction and Building Materials*, 125, 1158–1168. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.08.060