



**UNIVERSIDAD LATINA DE COSTA RICA
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL**

**PROYECTO DE GRADUACIÓN PARA OPTAR POR EL GRADO
ACADÉMICO DE LICENCIATURA EN INGENIERÍA CIVIL**

**PROPUESTA METODOLOGICA PARA EL DISEÑO Y
CONSTRUCCION DE PAVIMENTOS DE ADOQUIN
PERMEABLE.**

Elaborado por:

Erson Ureña Cruz

Tutor: Ing. Pablo José Torres Morales.

SAN JOSÉ, COSTA RICA

Mayo 2020.

TRIBUNAL EXAMINADOR

Este proyecto fue aprobado por el Tribunal Examinador de la carrera de Ingeniería Civil, requisito para optar para el grado de licenciatura.

Ing. Pablo José Torres Morales.

Tutor

Ing. Eduardo Chacón Cordero.

Lector

Ing. José María Ulate Zarate.

Lector que preside

DERECHOS DE AUTOR

Fecha: abril de 2020

El suscrito, Erson Ureña Cruz cédula, 207660963, estudiante de la carrera de Licenciatura en Ingeniería Civil de la Universidad Latina de Costa Rica, con número de carné 2015011097 manifiesta que es autor del Trabajo Final de Graduación “PROPUESTA METODOLOGICA PARA EL DISEÑO Y CONSTRUCCION DE PAVIMENTOS DE ADOQUIN PERMEABLE.”, bajo la dirección del ingeniero Pablo José Torres Morales, quien en consecuencia tiene derechos compartidos sobre los resultados de esta investigación. Asimismo, hago traspaso de los derechos de utilización del presente trabajo a la Universidad Latina de Costa Rica, para fines académicos: docencia, investigación, acción social y divulgación.

Nota: De acuerdo con la Ley de Derechos de Autor y Derechos Conexos N° 6683, Artículo 7 (versión actualizada el 02 de julio de 2001); “no podrá suprimirse el nombre del autor en las publicaciones o reproducciones, ni hacer en ellas interpolaciones, sin una conveniente distinción entre el texto original y las modificaciones o adiciones editoriales”. Además, el autor conserva el derecho moral sobre la obra, según el Artículo 13 de esta ley, por lo que es obligatorio citar la fuente de origen cuando se utilice información contenida en este texto.

Erson Ureña Cruz

Cédula número: 207660963

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mi familia, por todo el apoyo dado durante todo el proceso de mis estudios universitarios.

A la empresa Productos de Concreto de Costa Rica, por brindar la información necesaria para desarrollar la investigación.

Por último, al ingeniero Pablo José Torres Morales, por su apoyo y ayuda durante la ejecución de esta tesis.

DEDICATORIA

Le dedico a mi familia esta investigación por su apoyo a lo largo de mis estudios.

RESUMEN

En el presente documento, se desarrollará una metodología de diseño y construcción, para un sistema constructivo de pavimentos flexibles de adoquín permeable. Se pretende realizar una búsqueda exhaustiva de los diseños y las construcciones en donde se ha utilizado adoquines permeables para las condiciones en Costa Rica y en distintos países, con el fin de habilitar una nueva opción para los consumidores que desean implementar este sistema, de la mano de una guía en la cual se contemplara una serie de parámetros y variables para poder llevar acabo la implementación del mismo, elementos que no son considerados en un diseño de pavimento flexible convencional, ya que actualmente las dos opciones que existen en el mercado costarricense ofrecen el servicio de diseño y construcción completo, y no se puede desarrollar de cero buscando opciones competitivas y a un menor costo.

Para lograr un desarrollo viable se analizarán las distintas ventajas y desventajas, considerando costo-beneficios con respecto a otros pavimentos flexibles.

Como una posible solución a este sistema se analizará bajo las especificaciones del adoquín permeable TEKNODREN.

Contenido

CAPÍTULO I	1
PROBLEMA Y PROPÓSITO.....	1
1.1. Antecedentes	2
1.2. Formulación del problema.....	5
1.3. Objetivos de la investigación.....	6
1.3.1. Objetivo general	6
1.3.2. Objetivos específicos	6
1.4. Alcances de la investigación	7
1.5. Limitaciones de la investigación.....	7
1.5.1. Delimitación Espacial	7
1.5.2. Delimitación temporal.....	7
1.6. Justificación.....	8
CAPITULO II	9
MARCO TEÓRICO-CONCEPTUAL Y TÉCNICO-REFERENCIAL	9
2.1. Marco Legal o Normativo	10
2.2. Marco Teórico Conceptual	12
2.2.1. Definiciones de los distintos elementos que pueden conformar una estructura común de pavimento.....	13
2.2.2. Elementos que se deben considerar en un pavimento permeable.....	15
2.2.3. Consideraciones y características acerca de un adoquín	22
2.2.4. Consideraciones sobre el diseño estructural de un pavimento	31
2.2.5. Métodos para el análisis estructural en pavimentos de adoquín	36
CAPITULO III	44
3. MARCO METODOLÓGICO.....	44
3.1. Definición del enfoque cuantitativo y el tipo de la investigación	45
3.1.2 Tipo de la investigación.....	46
3.2. Sujetos y fuentes de información	47
3.2.1. Sujetos de información.....	47

3.2.2.	Fuentes de información.....	47
3.3.	Definición de variables conceptual, operativa e instrumental.....	47
3.4.	Sustentación de la confiabilidad y la validez de los instrumentos de la investigación.	50
CAPÍTULO IV.....		51
4.	PRESENTACIÓN DE RESULTADOS.....	51
4.1.	Generalidades sobre la metodología de diseño y construcción.	52
4.2.	Metodología para determinar el diseño estructural e hidráulico del pavimento de adoquín permeable.....	52
4.2.1.	Calculo hidráulico.....	52
4.2.2.	Calculo estructural.....	67
4.3.	Guía de construcción para un pavimento de adoquín permeable.	87
4.4.	Determinación de los costos beneficios con respecto al pavimento flexible de asfalto.	90
4.5.	Ejemplo de diseño aplicando la metodología desarrollada en los apartados anteriores.	92
4.5.1.	Diseño estructural para el ejercicio de adoquín permeable.....	92
4.5.2.	Ejercicio de pavimento flexible convencional (asfalto), utilizando las mismas variables que para el pavimento de adoquín permeable.	95
4.5.3.	Diseño hidráulico para el pavimento de adoquín permeable.....	97
CAPÍTULO V.....		104
5.	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	104
CAPITULO VI.....		110
6.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	110
6.1.	Conclusiones.....	111
6.2.	Recomendaciones	113
7.	CAPÍTULO VII	114
8.	BIBLIOGRAFÍA.....	114
BIBLIOGRAFÍA		115
7.	ANEXOS.....	117

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Porcentaje de saturación	20
Tabla 2 Capacidad de drenar según el material.	20
Tabla 3 Periodo de diseño según la carretera.	33
Tabla 4 Espesores de capa.	37
Tabla 5 Factores de equivalencia.	38
Tabla 6 Espesores de capa según las cargas.	38
Tabla 7 Parámetros para el diseño de pavimentos.	39
Tabla 8 Matriz de variables conceptuales, operativa e instrumental.	47
Tabla 9 Recomendaciones para el espaciamiento de sub-drenes.	58
Tabla 10 Valores de conductividad hidráulica según las propiedades del relleno.	61
Tabla 11 Plantilla para realizar el cálculo de los ESALs.	67
Tabla 12 Plantilla para determinar el TF.	68
Tabla 13 Factor de distribución por dirección.	68
Tabla 14 Factor de distribución por carril.	68
Tabla 15 Rango típico de ESALs según su aplicación.	70
Tabla 16 Valor de la confiabilidad recomendado	71
Tabla 17 Desviación estándar normal ZR correspondientes a los niveles de confiabilidad R	72
Tabla 18 Coeficientes de drenaje.	74
Tabla 19 Tipo de suelo condiciones de la subrasante.	75
Tabla 20 Calidad del drenaje según el tipo de suelo.	75
Tabla 21 Condiciones de MR, R y CBR según el tipo de subrasante y drenaje.	76
Tabla 22 Condiciones que debe cumplir una base permeable.	82
Tabla 23 Coeficiente K que es función del E subrasante.	82
Tabla 24 Condiciones de una granulometría permeable para subbase, base y cama de adoquín respectivamente.	84
Tabla 25 Espesores de los distintos elementos que componen la carpeta de rodamiento según diseños realizados por PC Costa rica.	86
Tabla 26 Costo por metro cuadrado de pavimento flexible de asfalto.	90
Tabla 27 Costo por metro cuadrado de pavimento flexible de adoquín permeable.	90
Tabla 28 Costo por metro cuadrado colocado en el GAM	91
Tabla 29 Elementos que componen un pavimento flexible de asfalto.	96

Tabla 30 Se selecciona la pérdida de agua C: Cantidad de agua que puede drenar por gravedad.....	119
Tabla 31 Plantilla para hacer los cálculos indicados anteriormente.....	122

ÍNDICE DE FIGURAS

Ilustración 1 Geometría de una base permeable	22
Ilustración 2 Rectángulo inscrito.....	23
Ilustración 3 Superficie de desgaste	24
Ilustración 4 Bisel del adoquín.....	25
Ilustración 5 Espesor del adoquín.	25
Ilustración 6 Ejes del rectángulo inscrito.....	26
Ilustración 7 Dimensiones del adoquín.	26
Ilustración 8 Estructura típica de pavimento flexible	35
Ilustración 9 Factores de reducción para la col matización.....	55
Ilustración 10 Distancia ficticia d' en función del espaciamiento de los sub-drenes	60
Ilustración 11 Requisitos físicos para geotextiles de drenaje subterráneo	66
Ilustración 12 Requisitos de los geotextiles para drenaje.	66
Ilustración 13 Sección de una posible estructura de pavimento permeable.	80
Ilustración 14 Apariencia Piedra ASTM N°8 tipo de cama para el adoquín.....	80
Ilustración 15 Apariencia Piedra ASTM N°57 para base de Sistema de pavimento permeable	83
Ilustración 16 Apariencia Piedra ASTM N°2 para subbase de Sistema de pavimento	83
Ilustración 17 Abaco para determinar la permeabilidad de un suelo.....	120
Ilustración 18 Selección de un factor de tiempo T en función de S, y de los grados de drenaje U.	121
Ilustración 19 Criterio de drenaje para capas granulares.....	122
Ilustración 20 Oferta de compra geotextil NT 2000.....	123
Ilustración 21 Oferta de compra de base y subbase granular.....	124
Ilustración 22 Oferta de compra de espesor de asfalto por m2.....	125
Ilustración 23 Oferta de compra tubería drenante "drenaflex"	126
Ilustración 24 Oferta de compra de la cama para adoquín permeable.....	127
Ilustración 25 oferta de compra del sistema completo de pavimento de adoquín permeable "TEKNODREN"	127

CAPÍTULO I
PROBLEMA Y PROPÓSITO

1.1. Antecedentes.

Según (EcuRed, 2012) la historia de los adoquines ha estado estrechamente ligada a la evolución de las vías urbanas. En la época medieval, las calles servían tanto para permitir el acceso de peatones, carros o animales, como lugar de vertido de aguas negras. Estos vertidos obligaban a pavimentarlas con elementos que facilitarían un rápido drenaje y permitiera el movimiento de personas y vehículos de tracción animal.

A criterio de (HERNÁNDEZ, 2008) La base de la pavimentación ecológica es fomentar la infiltración del agua a través de las estructuras de los firmes permeables. Por tanto, hay que seleccionar adecuadamente los materiales empleados para minimizar los efectos del agua.

Según (Gordillo, 2010) A través del tiempo se ha ido observando los beneficios que presenta el uso del adoquín como un elemento para la construcción de carpetas de rodamiento ya que este ha ido mejorando en sus diseños, en la forma de colocación y en la aplicación según el uso que ha este se le necesite dar como por ejemplo estudios realizados demuestran que el pavimento permeable disminuye la impermeabilidad efectiva de una urbanización, con lo que se reduce el caudal máximo de diseño y por lo mismo disminuye el tamaño y costo de la red pluvial, generando un ahorro en la inversión necesaria para urbanizar el terreno. Una estimación preliminar realizada en base al costo típico de obras de la red secundaria y a la metodología habitual de cálculo de parámetros de diseño, indica que, si se consigue disminuir en un 10% la impermeabilidad en una nueva urbanización, el costo de su red secundaria de drenaje puede disminuir hasta en un 20%. A ello habría que agregarle la reducción de costos de la red principal.

En base a (HERNÁNDEZ, 2008) la implementación de distintos tipos de adoquines se da según el lugar y según el proyecto el cual se vaya a desarrollar como los adoquines con ranuras son bloques prefabricados de hormigón diseñados o dispuestos de forma que la superficie final disponga de canales para la infiltración vertical del agua. Estos canales pueden rellenarse con material drenante o dejarse libres.

Para poder llevar a cabo la construcción de una estructura de pavimento se debe contemplar el uso que se le vaya a dar, por lo tanto, se debe realizar un diseño de las demás capas inferiores de la calzada como son base y subbase, para considerar el uso de elementos permeables o impermeables ya que existen una serie de capas y elementos, también permeables, que completan la correspondiente sección del firme.

Estas capas y elementos pueden ser:

1) Capas granulares: bases y subbases compuestas por un determinado tipo de árido con una distribución de tamaños fijada, 2) Estructuras de plástico: elementos resistentes de plástico con espesores variables, 3) Geo sintéticos: geotextiles, geomallas y geomembranas con misiones de filtro, separación, refuerzo o impermeabilización.

Según (HERNÁNDEZ, 2008) en 1972, en Estados Unidos se llevó a cabo probablemente la primera investigación acerca de los firmes permeables. La utilización de firmes permeables tenía la intención de aliviar la contaminación debida a los vertidos de los sistemas de saneamiento unitarios en tiempos de lluvia, reduciendo además los parámetros de diseño de las infraestructuras de drenaje urbano. Este primer análisis de laboratorio mostró como la mezcla bituminosa porosa era un material muy adecuado para la construcción de este tipo de pavimentos. Además, estudios económicos complementarios demostraron que las carreteras diseñadas con aglomerado poroso resultaban generalmente más económicas que las carreteras convencionales.

En Francia estudiaron tres tipos de pavimentos durante cinco meses utilizando lisímetros que permitían la medición de la escorrentía superficial, la infiltración y la evaporación que tenían lugar. Dos de las superficies ensayadas eran impermeables, resultando una escorrentía superficial del 70% de la precipitación. Mientras, la tercera superficie ensayada, que era permeable, presentó tan sólo un 16% de escorrentía. Las pérdidas por evaporación fueron de un 25% en todos los casos. Respecto a la infiltración, esta fue de un 58% en el caso de la superficie permeable y de un 3% de las superficies impermeables. Además, se observó cierta independencia respecto a las precipitaciones previas en el caso del pavimento permeable, mientras que el comportamiento de las

superficies impermeables se veía fuertemente condicionado por los antecedentes de lluvia.

Mediante (EUROADOQUIN, 2004) hay pruebas que indican que para aumentar la estabilidad de la superficie de adoquines es preciso colocarlos en una cierta disposición respecto a la dirección del tráfico. La trabazón óptima se logra con una disposición de los adoquines a 90° en diagonal respecto a la dirección del tráfico. De esta manera los esfuerzos horizontales se minimizan repartiéndose entre las cuatro caras de los adoquines. Respecto al espesor de los adoquines se recomienda un espesor nominal mínimo de 80 mm, dado que cuanto mayor sea el espesor del adoquín, más estable y duradero será el pavimento sometido al tráfico rodado. Esto se debe a que un mayor espesor supone mayor superficie de contacto lateral y una menor concentración de esfuerzos. En el caso de los adoquines con ranuras rellenas de material drenante, no es posible obtener una buena resistencia a los esfuerzos tangenciales si se usan separadores y huecos vacíos, debido a que la transmisión de las cargas se realiza únicamente a través de los separadores la mejor combinación de capacidad de infiltración y capacidad portante se obtiene con rellenos de arenas de 2 a 4 o 5 mm, ofreciendo resistencia suficiente para su uso incluso en calzadas con tráfico pesado. En los pavimentos permeables de adoquines con ranuras libres no se utiliza relleno para las ranuras, por lo que los problemas asociados al material de relleno desaparecen, pero se debe asegurar una superficie de contacto lateral suficiente para la transmisión de los esfuerzos.

1.2. Formulación del problema.

¿Cuál es la metodología para el diseño y construcción de un pavimento de adoquín permeable, que sea utilizada de manera correcta como una alternativa para el diseño de carpetas de rodamiento?

1.2.1. Criterios para plantear el problema (Enunciado del Problema)

El problema que se ha venido presentando con este sistema se da en la mayoría de los casos por los problemas que se presentan en el diseño y la construcción de estos pavimentos para que sea capaz de cumplir las funciones para lo cual es colocado como son:

Durante la época lluviosa el agua se acumula en la vía generando una reducción del nivel de confianza hacia los conductores.

Construcción incorrecta provoca el agrietamiento o separación del adoquín permitiendo el ingreso de agua por las juntas entre los adoquines y la ascensión de finos a la parte superior de la carpeta y con el tiempo aparecen hundimientos o adoquines fisurados.

Instalación incorrecta de los medios que se van a encargar de evacuar las aguas hasta los puntos de desfogue ocasionando daños en lo que es la estructura interna del pavimento.

Colocación de los demás elementos que componen la carpeta de rodamiento de manera incorrecta ya que se utiliza una granulometría que no es la indicada generado el lavado de partículas finas y con esto ocasionando una serie de vacíos que con el tiempo es reflejado en el pavimento.

No tener una gran capacidad de soporte por lo que su uso es limitado según el proyecto en el que se vaya a desarrollar.

Cada capa de material que se coloque desde la subrasante hasta el adoquín debe tener las condiciones adecuadas respecto a las características de los materiales.

Saber qué tipo de suelo se encuentra en el nivel de subrasante, es una de las variables que se debe analizar ampliamente ya que dependiendo de este se puede omitir la línea de conducción para evacuar el agua que se infiltra desde el pavimento de acuerdo con la permeabilidad que tenga.

Problemas constructivos para la colocación de los adoquines respecto a la separación que se le da entre cada elemento ya que algunos tipos de adoquines no poseen las guías o separadores para tener una junta del tamaño correcto

1.3. Objetivos de la investigación.

1.3.1. Objetivo general.

Definir una metodología para el diseño y la construcción de un pavimento mediante la utilización de adoquines permeables.

1.3.2. Objetivos específicos.

Realizar una búsqueda exhaustiva de los diseños y las construcciones en donde se ha utilizado adoquines permeables para las condiciones en Costa Rica y en distintos países.

Realizar una guía para la construcción de pavimentos de adoquín permeable adaptado a las condiciones de Costa Rica.

Analizar las distintas ventajas y desventajas, considerando costo-beneficios con respecto a otros pavimentos.

1.4. Alcances de la investigación.

Realizar una propuesta metodológica de diseño para pavimento de adoquín permeable.

Realizar una guía de construcción para un pavimento de adoquín permeable.

Ejecutar un análisis de costo-beneficio para determinar las ventajas y desventajas de un pavimento de adoquín permeable con respecto a otros.

El proyecto por realizar se basa en una fase inicial la cual puede ser continuada posteriormente.

1.5. Limitaciones de la investigación.

Debido a que este proyecto se basa solo en una fase inicial, solo abarcará lo que son los aspectos teóricos y no se verá la aplicación práctica de este.

No contar con información concreta acerca de la implementación de esta metodología en Costa Rica.

1.5.1. Delimitación Espacial.

La presente investigación está planteada para llevarse a cabo en el territorio de Costa Rica ya que los elementos con los que se va a trabajar en este proyecto son los tipos de adoquines permeables que ofrece el mercado nacional, ya que se busca realizar una metodología de diseño y construcción que se adapte al país.

1.5.2. Delimitación temporal.

El análisis para conformar la metodología del diseño y la construcción de un pavimento de adoquín permeable que es el objeto de estudio en este documento se basa en el Manual Técnico para la Correcta Colocación de los "Euroadoquines" MTCE-04, publicado en el año 2004 y en la Tesis doctoral de Jorge Rodríguez Hernández, la cual abarca los temas de análisis para el diseño de secciones de pavimentos permeables, que

fue publicada en el año 2008, la cual se tendrá como espacio de estudio los 8 meses que consta el aprobar seminario 1 y 2.

1.6. Justificación.

Este proyecto lo que busca es poder obtener una serie de conocimientos los cuales pueden ser utilizados posteriormente para si poder llevar acabo la realización de distintos proyectos implementando esta metodología de diseño y construcción.

Es una metodología la cual trata de llevar acabo el diseño y la construcción de una carpeta de rodamiento aplicando el uso del adoquín permeable y sus respectivos elementos que la componen, para que esta sea capaz de funcionar.

El adoquín posee un uso más amplio además de lo estético, ya que su función como elemento constructivo para caminos puede ser adaptado a diferentes necesidades según el proyecto. Se debe realizar una revisión de la documentación sobre el tema y crear una guía para realizar el diseño y construcción.

Este estudio se hace con el fin de poder obtener una mayor información acerca de lo que es un adoquín permeable, y cuál debe ser la respectiva conformación para poder obtener una estructura de pavimento correcta, además el poder analizar cuáles pueden ser sus ventajas y desventajas ante los demás tipos de adoquines o con respecto a otros tipos de pavimentos.

CAPITULO II
MARCO TEÓRICO-CONCEPTUAL Y TÉCNICO-
REFERENCIAL

2.1. Marco Legal o Normativo.

Aquí se coloca las leyes y reglamentos que rigen la materia de estudio haciendo referencia a los capítulo y artículos que se van a utilizar.

Todos los ensayos, normas, reglamentos o pruebas que son requeridos para poder llevar acabo todos los procesos o pasos de fabricación, diseño y construcción de los distintos elementos que conforman una estructura de pavimento de adoquín permeable se basaron en las normas legales.

INTE 06-04-01	Especificaciones técnicas y tolerancias dimensionales.
INTE C94 2006	Tiene por objetivo establecer las características y especificaciones que deben cumplir los adoquines de concreto de cemento hidráulico empleados para tráfico vehicular y peatonal.
INTE C51 2006	Tiene por objetivo establecer el método de prueba para determinar el módulo de ruptura de los adoquines de concreto que son empleados para el tráfico vehicular y peatonal.
CR-2010 sección 504- pavimentos de adoquín de concreto	Establece los parámetros que deben seguirse para la colocación de adoquín los cuales son los siguientes: adoquines, arena para capa de soporte, arena para sello, equipo, preparación de la superficie existente, colocación y nivelación de la capa de arena, colocación de los adoquines, ajuste, compactación inicial, sello de juntas y compactación final, confinamiento, limitaciones de ejecución apertura al tránsito, conservación, calidad del producto terminado, aceptación, medición y pago.
AASHTO T27	Método de los procedimientos para ejecutar un análisis granulométrico de agregados gruesos y finos.
ASTM D-2321	Estipula la colocación del tubo DREN PVC para la correcta extracción de aguas que son infiltradas a través de los elementos de la carpeta de rodamiento y a la vez evitar la asunción de finos.

ASTM C140	Nos indica la resistencia a la compresión de los adoquines a los 28 días de 330 Kg/cm ²
ASTM C 33	Nos indica los materiales utilizados para la fabricación del adoquín.
ASTM C 418	Detalla la pérdida de volumen por abrasión en el adoquín.
INTE 06-02-14	Detalla la forma de determinación del módulo de ruptura de los adoquines.
ASTM C94	Detalla los aspectos que se deben considerar para el agua que se utilice en la fabricación de adoquines.
ASTM C 494	Detalla los aspectos de los aditivos que se utilicen en la fabricación de adoquines de concreto.
ASTM C 979	Detalla los aspectos a considerar en los pigmentos que se utilicen en la fabricación de adoquines de concreto.
Manual Centroamericano para Diseño de Pavimentos (capítulo 7)	Guía para mejorar la colocación de una estructura de pavimento utilizando adoquín.
ASTM C936-01	Proporciona una serie de requerimientos físicos que debe cumplir cada pieza de adoquín en general controla: dimensiones, resistencia, absorción, resistencia a la abrasión y la de los ciclos de hielo deshielo.
PrEN1338-2010	Permite controlar particularmente la calidad del adoquín contempla los siguientes ensayos: muestreo, control de dimensiones, resistencia a ciclos de hielo y deshielo, absorción de agua, resistencia a la flexión, resistencia al deslizamiento, abrasión, verificación de aspectos visuales.
Manual Centroamericano para Diseño de Pavimentos (capítulo 6)	Sección en la cual se indica los efectos que puede ocasionar el mal diseño de los drenajes en un pavimento.
INTE 06-02-15	Método de ensayo para determinar la resistencia a la abrasión de materiales de pisos y pavimentos mediante arena y disco metálico ancho.

2.2. Marco Teórico Conceptual.

En esta sección de la investigación se explicarán ideas que pueden ser útiles para poder desarrollar este proyecto, con el fin de generar una guía para la construcción y también una metodología de un pavimento adoquinado permeable que se pueda acoplar a los proyectos o construcciones que son realizadas en nuestro país.

A continuación, se presentan los conceptos teóricos fundamentales requeridos para la comprensión del contexto temático de la investigación. Los conceptos presentados fueron extraídos de la investigación que constituye el principal antecedente que dio origen al presente proyecto de investigación. Estos conceptos serán utilizados durante el desarrollo del proyecto, los cuales sirven como guía para el buen entendimiento de este.

Para efectos de esta investigación se trabajará con el uso de adoquín permeable, el cual es distribuido por Pedregal y Productos de Concreto, conocidos con nombres como ECOESTONE Y TEKNODREN respectivamente. La aplicación de estos sistemas las empresas lo dan instalado ya que la colocación de este es distinta desde lo que es la parte de los diseños de subrasante, subbase y base ya que su principal objetivo es permitir que el agua se infiltre a través de la estructura y así evitar o reducir la escorrentía en la superficie de contacto con los vehículos y personas. Debido a este comportamiento es que se debe realizar diseños en los cuales se contemple distintos factores como lo son una granulometría sin finos, contemplar tuberías absorbentes para poder evacuar las aguas pluviales mediante diseños transversales o longitudinales a la calzada.

Toda ciudad en desarrollo presenta un proceso de urbanización donde se necesita pavimentar calles ya sea con pavimento flexibles o rígidos, para la circulación de vehículos permitiendo un tránsito más fluido y un mejor desarrollo a los habitantes y a la comunidad, sin embargo este proceso de desarrollo tiene importantes efectos sobre las aguas de lluvia en una ciudad debido a la disminución de la capacidad de infiltración, del almacenamiento, y la eliminación de los cauces naturales de escurrimiento.

Se provoca una escorrentía superficial acelerada conduciendo el agua de lluvia hacia las partes más bajas de una ciudad aumentando el caudal que puedan soportar los

colectores pluviales y cauces naturales generando inundaciones más frecuentes, rápidas y severas.

Una de las alternativas no convencionales de mayor atractivo para el desarrollo de urbanizaciones de bajo impacto hidrológico, es la utilización de pavimentos permeables (Aire, 2011). Esta solución tiene la gran ventaja que no requiere construir una obra especial para reducir la escorrentía, sino que basta con cambiar el tipo de elementos utilizados (Gordillo, 2015). Por lo tanto, los adoquines permeables, además de brindar el mismo servicio que los adoquines tradicionales, en una gran cantidad de aplicaciones, contribuyen a reducir el área efectivamente impermeable de la urbanización (IMCYC, 2005). La idea básica es que no todo lo que se necesita pavimentar tiene que impermeabilizarse (IMCYC, 2006). Con la utilización de adoquines permeables se consigue recargar los acuíferos y reducir el volumen y el caudal máximo de escorrentía, provocado por las lluvias (TEJAMAX, 2015).

Los adoquines permeables también son una forma de evitar inundaciones, ya que, al permitir las filtraciones del agua de lluvia, se evitará que existan más acumulaciones de agua por las avenidas y que llegue hasta los ríos o arroyos de forma rápida, así mismo evitando que el caudal de estos aumente.

Tomando las consideraciones anteriores, es necesario que se desarrollen proyectos urbanos que mitiguen estos efectos y que controlen los escurrimientos que se producen con las lluvias. Por lo anterior, en este proyecto se presenta una propuesta de pavimento que permita que el agua de lluvia se infiltre hacia los acuíferos, utilizando para ello pavimentos a base de adoquines permeables.

2.2.1. Definiciones de los distintos elementos que pueden conformar una estructura común de pavimento.

Pavimento: Según la revista (SIMON, 2004) es una estructura, que es asentado sobre una fundación apropiada, tiene por finalidad proporcionar una superficie de rodamiento que permita el tráfico seguro y confortable de vehículos, a velocidades operacionales deseadas y bajo cualquier condición climática. Hay una gran diversidad de

tipos de pavimento, dependiendo del tipo de vehículos que transitaran y del volumen de tráfico.

Capa de rodadura: Según la revista (SIMON, 2004) la función de este elemento consiste en proveer una superficie resistente al deslizamiento, incluso en una pista húmeda, además de reducir las tensiones verticales que la carga por eje ejerce sobre la capa base para poder controlar la acumulación de deformaciones plásticas en dicha capa.

Granulometría: Según (Trujillo, Valero, & Lozano, 2015) este ensayo tiene por objeto determinar la granulometría de los áridos de hasta 90 mm mediante su división y separación con una serie de tamices en fracciones granulométricas de tamaño decreciente.

La norma se refiere a la determinación cuantitativa de la distribución de los tamaños de las partículas mayores de 75 μm , retenidas en el tamiz No. 200, se determina por tamizado, mientras que la distribución de los tamaños de partículas menores de 75 μm , se determina por un proceso de sedimentación empleando un hidrómetro.

Agregados: A criterio de (Trujillo, Valero, & Lozano, 2015) son materiales granulares sólidos inertes que se emplean en los firmes de las carreteras con o sin adición de elementos activos y con granulometrías adecuadas, se utilizan para la fabricación de productos artificiales resistentes mediante su mezcla con materiales aglomerantes de activación hidráulica (cementos, cales ...)

Agregado Grueso: A criterio de (Trujillo, Valero, & Lozano, 2015) los agregados gruesos consisten en una grava o una combinación de gravas o agregado triturado cuyas partículas sean predominantemente mayores que 5 mm y generalmente entre 9.5 mm y 38 mm. y no deben de tener residuos que pudieran afectar la composición del concreto.

Agregado Fino: Según (Trujillo, Valero, & Lozano, 2015) estará constituido por arena de trituración o una mezcla de ella con arena natural. Los granos del agregado fino deberán ser duros, limpios y de superficie rugosa y angular. El material deberá estar libre

de cualquier sustancia que impida la adhesión del asfalto. (Trujillo, Valero, & Lozano, 2015)

Base: A criterio de (SIMON, 2004) tiene la función de reducir las tensiones verticales que las cargas por eje ejercen sobre las capas subbase y suelo natural, también Reducir las deformaciones de tracción que las cargas por eje ejercen a la capa de revestimiento asfáltico y Permitir el drenaje del agua que se infiltra en el pavimento, a través de drenajes laterales longitudinales.

Subbase: Según la revista (SIMON, 2004) la capa subbase está constituida por un material de capacidad de soporte superior a la del suelo compactado y se utiliza para permitir la reducción del espesor de la capa base.

Subrasante: Según la revista (SIMON, 2004) la capa de suelo reforzado puede estar presente en una estructura de pavimento, para poder reducir el espesor de la capa subbase. El suelo compactado, es el mismo suelo del terraplén, que esta escarificado y compactado una cierta profundidad dependiendo de su naturaleza o de las especificaciones del proyecto.

Adoquín: Este concepto alude a una piedra a la que se le otorga forma rectangular para que pueda emplearse en el desarrollo de empedrados. Los adoquines suelen utilizarse en la pavimentación de las calles.

2.2.2. Elementos que se deben considerar en un pavimento permeable.

Pavimentos permeables: A criterio de (Legret et al., 1999; EPA, 1999) los pavimentos permeables nacen como una forma alternativa de mitigación de la escorrentía superficial y los caudales pico (generadores de inundaciones), en las zonas urbanizadas en las cuales la cuenca ha perdido su permeabilidad. El objetivo de estos sistemas es generar zonas donde el agua se infiltre o se almacene amortiguando la cantidad de agua lluvia precipitada y aumentando los tiempos de concentración de esta. Se recomienda su uso en zonas de baja pendiente, con poco tráfico tales como estacionamientos, vías con tráfico ligero u ocasional, y andenes, entre otros, en los que su nivel freático se encuentre

muy por debajo del fondo de la zona de almacenamiento para que este no interfiera ni disminuya el volumen de acopio.

Mezclas asfálticas drenantes: A criterio de (Perez Cely & Juyar Mora, 1998) son aquellas mezclas asfálticas cuyo porcentaje de vacíos es lo suficientemente alto para permitir que a través de ellas se filtre el agua con rapidez y pueda ser evacuada hacia las bermas, cunetas u otros elementos de drenaje, evitando así su permanencia en la superficie de la vía (capa de rodadura), incluso bajo precipitaciones intensas y prolongadas.

Adoquín permeable: Según (Pedregal, 2012) es una solución innovadora para mitigar los riesgos de inundación y lograr una superficie en armonía con los nuevos estándares de conciencia ambiental. Es una buena alternativa de pavimento flexible con consecuencia ambiental, que reduce la esorrentía superficial del agua y la infiltra al terreno nuevamente.

Intensidad: Según (LEMUS., 2008) es la tasa promedio de lluvia en milímetros por minuto (mm/min) que cae en determinada área de estudio. Esta se selecciona en función de la lluvia de diseño y el período de retorno establecido con estándares de diseño.

Duración: Según (LEMUS., 2008) es el intervalo de tiempo que dura la lluvia, definiéndose en minutos.

Evaporación: Según (LEMUS., 2008) este es el fenómeno en el cual el agua pasa de un estado líquido a gaseoso y se produce desde la superficie del suelo y la vegetación inmediatamente después de la precipitación. Esta es el agua que queda atrapada en las depresiones geográficas (charcos) y la que queda atrapada en la vegetación, ya sea en hojas o tallos (fenómeno denominado intercepción) Desde las superficies de aguas, ya sean estos ríos, lagos, océanos, lagunas, estanques o represas. El agua que se ha infiltrado y que se evapora desde la parte superficial del suelo.

Infiltración: A criterio de (LEMUS., 2008) este es el movimiento del agua desde la superficie hacia el interior del suelo, la cual puede seguir varios caminos como: Transpiración este proceso es aquel en el cual las aguas infiltradas al suelo son

absorbidas por las raíces de las plantas, Escorrentía Subsuperficial: es toda aquella agua infiltrada en el suelo, que después de un recorrido lateral regresa a la superficie sin llegar al nivel freático y el agua que no es evaporada ni es atrapada por las plantas, se infiltra al suelo hasta llegar al nivel freático.

Coefficiente de escorrentía: Según (LEMUS., 2008) el coeficiente de escorrentía es la relación entre el volumen de agua de escorrentía superficial total y el volumen total de agua precipitado, en un tiempo determinado

$$C = \left(\frac{V \text{ escorrentia superficial}}{V \text{ precipitado total}} \right)$$

Este depende de numerosos factores: del tipo de precipitación (lluvia, nieve o granizo), de su cantidad, de su intensidad y distribución en el tiempo; de la humedad inicial del suelo; del tipo de terreno (granulometría, textura, estructura, materia orgánica, grado de compactación, pendiente, micro relieve, rugosidad), del tipo de cobertura vegetal existente; de la intercepción que provoque; del lapso de tiempo que se considere (minutos, duración de la tormenta, horas, días, meses, un año), etcétera. El coeficiente de escorrentía puede tomar valores comprendidos entre cero y uno.

Drenajes: Según (PLUVIAL) una red de drenaje pluvial es un sistema de tuberías, coladeras e instalaciones complementarias que permite el rápido desalojo de las aguas de lluvia para evitar posibles molestias, e incluso daños materiales y humanos debido a su acumulación o al escurrimiento superficial generado por la lluvia. Su importancia se manifiesta especialmente en zonas con altas precipitaciones y superficies poco permeables.

A criterio de (Pavimentos, 2002) El objeto del análisis del drenaje en el diseño de pavimentos es eliminar la posibilidad de la reducción de la vida útil de pavimento por el efecto que produce el agua al presentarse dentro del paquete estructural; en todos y cada uno de los casos en que se prevean problemas de humedad deberán diseñarse estructuras de drenaje tales como: bases drenantes, drenajes colectores del agua (cunetas), filtros laterales de transición elaborados con materiales granulares ó geotextiles (Subdrenajes).

Análisis de drenaje: Según (Pavimentos, 2002) para poder realizar un buen drenaje en un diseño de pavimentos se deben de tomar en cuenta algunos aspectos los cuales se explican este apartado de la investigación. En el análisis de drenaje, es necesario estudiar todas las granulometrías y permeabilidades de los materiales que se tengan en el proyecto; esta permeabilidad se puede determinar tanto en el lugar como en laboratorio. Será necesario también calcular la capacidad de los drenajes longitudinales, tanto las cunetas así como los subdrenajes, con el fin de conocer su capacidad de evacuación de las aguas; para el caso, es necesario que los drenajes deben diseñarse para evacuar el agua por lo menos en un período de dos horas o menos, posteriores a la finalización de la lluvia; un buen sistema de drenajes tiene que aumentar su capacidad drenante desde el material que esta aguas arriba hacia el material que esta aguas abajo. En el caso de la utilización de telas tipo geotextil como filtro de las capas drenantes, se deben considerar las siguientes propiedades: 1) Retención de las partículas de suelo 2) Permeabilidad 3) Capacidad de taponamiento 4) Resistencia a los agentes químicos 5) Fácil maniobrabilidad y durabilidad.

Granulometrías permeables: Según (Pavimentos, 2002) las bases que son permeables son excelentes para permitir la evacuación rápida del agua de una estructura de pavimento, antes de que la condición de saturación dañe el comportamiento de la capa. Estas bases permeables pueden estar construidas con materiales estabilizados o no, ya que, en una buena base drenante, el agua libre no debe permanecer más de dos horas después de que finalizó la lluvia. Al efectuar la construcción de una carretera, es necesario prever un buen sistema de colectores longitudinales que tengan el diámetro requerido y tengan relación directa con el aporte de agua de la base; siempre que sea posible, es conveniente que el agua drenada de la base no escurra sobre los taludes. Los materiales de los agregados de la base permeable, deben ser resistentes, durables. Es recomendable que la permeabilidad sea de 1,000 pies/ día ($305 \text{ m/ día} = 0,35 \text{ m/ s}$).

Las bases drenantes estabilizadas: Según (Pavimentos, 2002) se pueden construir con cemento hidráulico o con cemento asfáltico; el cemento Portland se puede colocar en una cantidad entre $80 \text{ a } 170 \text{ kg/ m}^3$ ($175 \text{ a } 375 \text{ lbs/ m}^3$). En las bases no estabilizadas es necesario que, al momento de la construcción, se evite el

desplazamiento y la segregación del material, para evitar la contaminación con finos después de su colocación. La compactación de una base granular, tiene por objeto construir una capa durable y resistente sin que pierda su capacidad drenante; el espesor mínimo de ésta debe ser de 10 centímetros (4") y debe tener un sobre ancho de por lo menos de 0,30 a 0,90 metros más que el ancho de rodadura en los laterales, con el objeto de permitir el apoyo del equipo de pavimentación. Para capas de transición es recomendable utilizar un espesor mínimo de 10 centímetros (4").

Consideraciones de drenaje en el diseño de pavimentos: Según (Pavimentos, 2002) Un buen drenaje mantiene la capacidad soporte de la subrasante (mantiene el módulo de resiliencia cuando la humedad es estable) lo que hace un camino de mejor calidad, así como permite en determinado momento el uso de capas de soporte de menor espesor. En la siguiente tabla se dan los tiempos de drenaje que recomienda AASHTO. Dichas recomendaciones se basan en el tiempo que es necesario para que la capa de base elimine la humedad cuando ésta tiene un grado de saturación del 50 %; pero es de hacer notar que un grado de saturación del 85 % reduce en buena medida el tiempo real necesario para seleccionar la calidad de un drenaje.

Porosidad efectiva (Nc): Según (Pavimentos, 2002) la porosidad efectiva es un concepto muy importante, ya que es la relación entre el volumen de agua que drena de un material por efecto de la gravedad y el volumen total de ese material. Es la medida de la cantidad de agua que puede ser drenada de un suelo.

Prueba de Permeabilidad: A criterio de (Grajales1, 2016) la permeabilidad es la propiedad de un material que permite el paso del agua a través de sus vacíos, bajo la acción de una carga hidrostática. El grado de permeabilidad se mide por su coeficiente de permeabilidad, el cual se basa en la ley propuesta por Darcy en el siglo XIX, la cual señala:

$$V = K * i$$

Dónde: V: Velocidad de escurrimiento de un fluido a través del suelo. K: Coeficiente de permeabilidad propio y característico. i: Gradiente hidráulico, el cual representa la relación entre las diferencias de nivel (H) y la distancia (L), que el agua recorre.

Tubería drenante o colectores pluviales: Según (Durman, 2017) el tubo DREN PVC es una tubería drenante con muchas aplicaciones dentro de la obra y la construcción. Se aplica en la conducción de sistemas de drenaje en carreteras, instalaciones deportivas, detección de fugas y explotaciones agropecuarias. Se caracteriza principalmente por sus funciones de drenaje, captación y conducción y resistencia. La tubería y sus accesorios cumplen ampliamente con la condición de captar las aguas que ingresan a la estructura de pavimento por medio de la carpeta de rodamiento y a la vez evitar migración de finos.

Tabla 1 Porcentaje de saturación

Calidad del drenaje	50% Saturación	85% Saturación
Excelente	2 horas	2 horas
Bueno	1 día	2 a 5 horas
Regular	1 semana	5 a 10 horas
Pobre	1 mes	10 a 15 horas
Muy pobre	El agua no drena	Mas de 15 horas

Fuente: Guía para diseño de pavimentos, AASHTO 1993

Cantidad de agua que puede drenar por gravedad un suelo.

La cantidad de agua que puede drenar por gravedad en el suelo resulta de la siguiente tabla.

Tabla 2 Capacidad de drenar según el material.

Material Predominante	Cantidad de finos								
	<2.5%			2.5%-5%			5%-10%		
	Tipo de finos			Tipo de finos			Tipo de finos		
	Filler	Limo	Arcilla	Filler	Limo	Arcilla	Filler	Limo	Arcilla
Grava	70	60	40	60	40	20	40	30	10
Arena	57	50	35	50	35	15	35	18	-8

Fuente: Diseño Estructural de Caminos, Universidad Nacional de San Juan, Argentina, 1994.

Tiempo de drenaje: A criterio de (Pavimentos, 2002) existen dos formas de calcular el tiempo de drenaje para la capa de un pavimento, y estas son: la aproximación del tiempo para drenar y la del caudal constante. En el primero, el método del tiempo para drenar se considera únicamente el agua que se infiltra y en el segundo se consideran las fuentes de ingreso y egreso y las mismas son cuantificables y la base permeable se dimensiona para conducir los caudales de diseño.

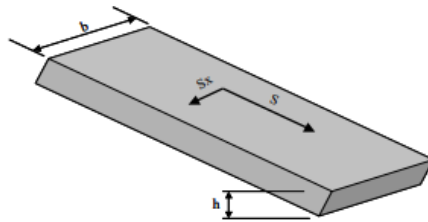
Método del tiempo para drenar: Según (Pavimentos, 2002) el agua de lluvia que se infiltra en la superficie de un pavimento, llega hasta el nivel de la base, la cual al estar en contacto con ella la satura completamente; en este proceso de saturación llega el momento en que la estructura de pavimento al saturarse completamente, ya no permite el ingreso de agua dentro de ella, entonces el agua que sigue tratando de penetrar se escurre sobre la superficie; de aquí que se debe tomar muy en cuenta que la base debe ser perfectamente permeable, ya que una vez termina de llover, el agua debe escurrirse de la base lo más rápido posible, con el objeto de que la saturación de los materiales no cambie las características mecánicas de la capa. El tiempo para que el agua se escurra de los materiales, depende en buena forma del posible daño que se pudiera ocasionar y las condiciones climáticas de la zona. Para el caso, es conveniente que la estructura de pavimento se drene en el lapso de media o una hora como máximo, esto con el objeto de que el posible daño que se pueda ocasionar sea el mínimo, por el efecto que se produce el estar mucho tiempo en presencia de la humedad. Los datos necesarios para efectuar el análisis con respecto a la geometría de una base permeable deben ser:

- Pendiente longitudinal (S)
- Pendiente transversal (Sx)
- Espesor de la capa a drenar (h)
- Ancho de la base permeable (b)

Geometría de una base permeable.

Ilustración 1 Geometría de una base permeable

Geometría de una base permeable



Fuente: ICPC, Notas técnicas norma I CONTEC 2017, p.3

Longitud resultante de la base: $L = b \left[\left(\frac{S}{S_x} \right)^2 + 1 \right]^{0.5}$

Pendiente transversal resultante de la base: $S_r = (S^2 + S_x^2)^{0.5}$

Factor de pendiente longitudinal: $S = (L_r * S_r) / b$

Dentro de las propiedades que se deben considerar en una base filtrante deben ser:

- Porcentaje de finos
- Tipo de finos
- Si los finos son inertes: el IP < 1%
- Si son limosos: el IP > 1%, pero por debajo de la línea "A" del grafico de plasticidades.
- Si son arcillosos: el IP es alto, y se encuentra sobre la línea "A" de la carta de plasticidad.

2.2.3. Consideraciones y características acerca de un adoquín.

Según (Leon, enero 2012) un adoquín de concreto que al ser colocado en un patrón definido y en conjunto con una estructura granular con graduación abierta, constituye un pavimento flexible que mejora el manejo de aguas pluviales y el exceso de escorrentía superficial.

Es una solución: de alta calidad, amigable con el ambiente y agradable a la vista, es una excelente alternativa de pavimento flexible que contribuye a disminuir la escorrentía superficial, las inundaciones y reduce la cantidad de obras para el manejo de aguas pluviales.

Pueden ser utilizados como pavimentos de tráfico peatonal, liviano y pesado, tanto en uso residencial, comercial e industrial.

Propiedades del producto:

- Módulo de ruptura promedio de 5 MPa
- Abrasión promedio 20 mm
- Absorción promedio 8%
- Tolerancias de ancho y largo de ± 2 mm y ± 3 mm en el espesor

2.2.3.1. Partes de los adoquines de hormigón.

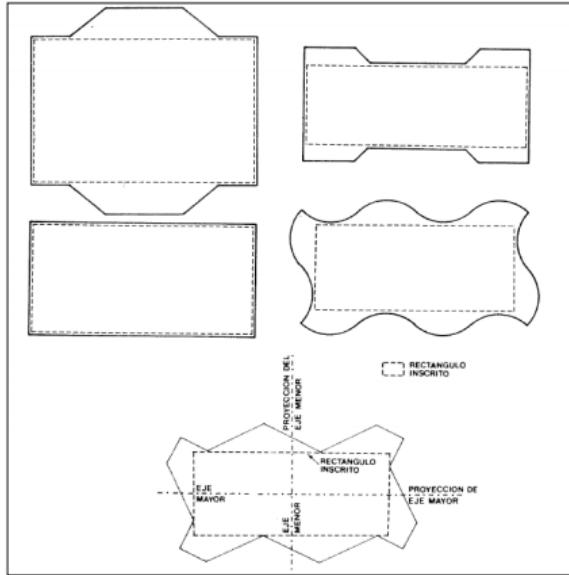
Para poder determinar las propiedades mecánicas, es importante conocer las partes básicas que lo conforman físicamente, debido a que estos se fabrican en diversidad de formas, todos deberán cumplir con las partes que son:

- Rectángulo inscrito
- Superficie de desgaste
- Bisel
- Espesor
- Largo
- Ancho

Rectángulo inscrito

Según (Leon, enero 2012) es el rectángulo de mayor área que cabe en la cara inferior del adoquín.

Ilustración 2 Rectángulo inscrito

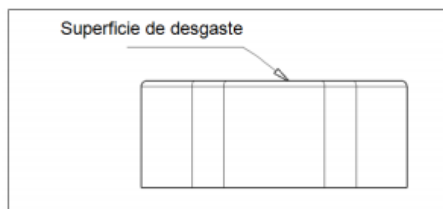


Fuente: ICPC, Notas técnicas norma I CONTEC 2017, p.3

Superficie de desgaste

Es la cara superior, la cual soporta directamente el tránsito, es la cara que queda a la vista una vez colocado el adoquín.

Ilustración 3 Superficie de desgaste.

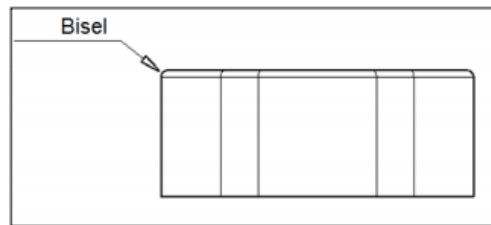


Fuente: Tesis propuesta de norma guatemalteca para procedimiento de ensayo de laboratorio y clasificación de adoquines de hormigón.

Bisel

Borde limado, torneado o pulido en sentido oblicuo para eliminar la arista viva. Es el plano oblicuo que corta dos caras adyacentes.

Ilustración 4 Bisel del adoquín.

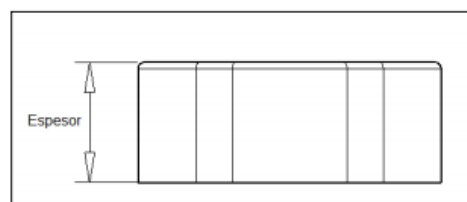


Fuente: tesis propuesta de norma guatemalteca para procedimiento de ensayo de laboratorio y clasificación de adoquines de hormigón.

Espesor

Es la dimensión en dirección perpendicular a la superficie de desgaste, representa el grosor de la pieza.

Ilustración 5 Espesor del adoquín.

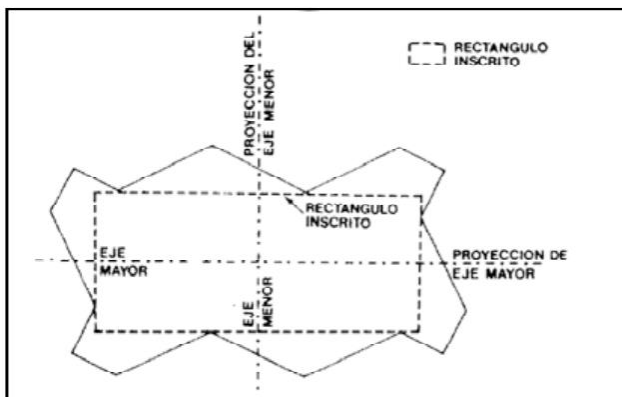


Fuente: Tesis propuesta de norma guatemalteca para procedimiento de ensayo de laboratorio y clasificación de adoquines de hormigón.

Largo

Dimensión del eje mayor del rectángulo inscrito.

Ilustración 6 Ejes del rectángulo inscrito.

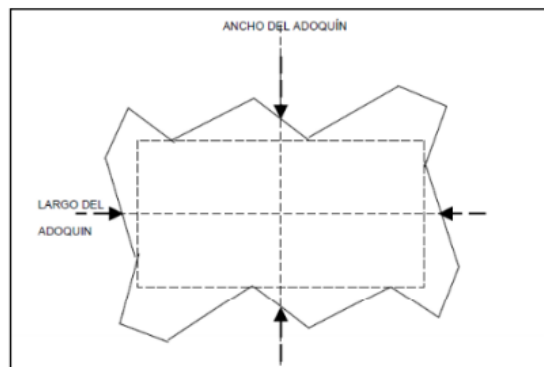


Fuente: ICPC, Notas técnicas norma I CONTEC 2017, p. 3.

Ancho

Dimensión del eje menor del rectángulo inscrito.

Ilustración 7 Dimensiones del adoquín.



Fuente: ICPC, Notas técnicas norma I CONTEC 2017, p. 3.

Lote de adoquines.

Un lote de adoquines es la cantidad de unidades producidas en condiciones esencialmente iguales que se somete a inspección como conjunto unitario a efectos de control, cuyo contenido es de características similares, o han sido fabricados bajo condiciones de producción presumiblemente uniformes y que se identifican por tener un mismo código o clave de producción.

Muestra.

Conjunto de adoquines extraídos, tomados al azar de un lote que sirve para obtener la información necesaria, que permita apreciar una o más características de ese lote por medio de ensayos.

Fabricación de los adoquines.

Los adoquines se fabrican en diferentes formas, tamaños y colores. Los de uso más popular son los rectangulares, pero la escogencia del tipo de adoquín depende del uso que se le dará al pavimento, así como por la selección estética que se haga de los patrones y colores, según el gusto y la creatividad del usuario.

Los materiales principales que componen el adoquín de hormigón son:

- Cemento
- Agua
- Agregados
- Aditivos
- Pigmentos

La propiedad de distribuir las cargas de los adoquines depende esencialmente de la forma, el espesor, la resistencia mecánica y la forma de colocarlos.

Enfoque del diseño y producción del adoquín.

Según (Leon, enero 2012) el enfoque primordial del diseño de mezclas de hormigón es encontrar la combinación de agua/cemento y agregados que satisfagan, al máximo posible, las exigencias requeridas a una aplicación determinada de resistencias físicas y mecánicas.

Los factores que deberán ser considerados en el proporcionamiento de la mezcla para fabricar hormigón son:

- Los requisitos concernientes a la colocación
- Las interrelaciones entre el contenido del cemento, la granulometría de los agregados y la cantidad total de agua por unidad de volumen
- La resistencia requerida
- La calidad necesaria del hormigón para resistir las condiciones a los que está expuesto
- Consideraciones económicas

2.2.3.2. Características del adoquín.

Resistencia a la compresión del adoquín.

A criterio de (Leon, enero 2012) los adoquines usados en la construcción de caminos deben ser de buena calidad para resistir el daño originado por el tránsito y por las variaciones de temperatura. El proceso de fabricación del adoquín de hormigón abarca desde la selección de materiales para su construcción, hasta llegar al curado de las unidades logradas, así como su almacenamiento. No hay secreto especial para fabricar adoquines de hormigón, basta con emplear buenas mezclas de hormigón que den a los 28 días, una resistencia a la compresión alrededor de 210 Kg/cm².

Dimensiones del adoquín con sus respectivas tolerancias.

Estas comprenden la descripción de sus especificaciones en dimensiones y sus tolerancias.

Formas y dimensiones.

Los adoquines de hormigón se fabrican en variedad de formas estipuladas por el fabricante, dentro de las cuales sus dimensiones deberán cumplir con lo siguiente.

- Largo nominal
- Ancho nominal
- Espesor nominal
- Tolerancias

Largo nominal.

El largo nominal de los adoquines no deberá ser mayor de 250 mm y se establecerá de común acuerdo entre comprador y vendedor.

Ancho nominal.

El ancho nominal no deberá ser mayor de 220 mm y se establecerá de común acuerdo entre comprador y vendedor.

Espesor nominal.

El espesor nominal de los adoquines de hormigón utilizados para pavimentar calzadas con circulación vehicular no deberá ser menor de 80 mm y el de los utilizados para pavimentar calzadas con circulación peatonal, no deberá ser menor de 60 mm; y se preferirán dimensiones múltiplos de 20 mm así: 60, 80, 100, 120 hasta un máximo de 140 mm. El rango de dimensiones múltiplos de 20 es con el fin de estandarizar y normar dimensiones para mantener homogeneidad en su forma.

Tolerancias.

Las tolerancias en dimensiones se refieren al límite máximo y mínimo para las dimensiones de las muestras, las cuales deben cumplir con: las tolerancias en el largo y ancho serán de ± 2 mm de las medidas nominales y la tolerancia en el espesor será de ± 3 mm del espesor nominal.

Propiedades mecánicas de los adoquines.

Según (Leon, enero 2012) las propiedades mecánicas comprenden la capacidad de resistir los siguientes esfuerzos:

Resistencia a la compresión.

La resistencia a la compresión le permite resistir cargas puntuales importantes. Una vez la superficie del camino ha sido rota, los adoquines se pueden levantar y recuperar para usarlos de nuevo. Por otra parte, las autoridades responsables del mantenimiento sólo necesitan contar con una pequeña cantidad de adoquines para sustituir los elementos dañados. Los vehículos pueden transitar sobre los adoquines, inmediatamente después de que han sido colocados de nuevo, por lo que la reparación es imperceptible.

La resistencia a la compresión debe ser determinada en probetas cúbicas. Las dimensiones del cubo (o probeta sensiblemente cúbica), deben ser de un espesor igual al del adoquín, a través del cual se aplicará la carga de compresión y un ancho y largo que no difiera mucho de ese espesor.

Absorción.

Esta propiedad es importante determinarla, ya que existe una correlación significativa con la resistencia de compresión del adoquín. En pruebas se ha demostrado, que, si aumenta la absorción, disminuye la resistencia a la compresión.

La absorción es la relación porcentual entre la masa total de un material seco y la cantidad de líquido en masa, que puede contener entre sus partículas dicho material, esto se debe a la relación de vacíos que existan entre las partículas del material en estado seco, el cual, al ser sumergido en líquido, éste ocupará los espacios vacíos, de tal manera que una relación de absorción alta es un material poroso, y por lo tanto menos resistente a la compresión.

Resistencia a la flexión.

La resistencia a la flexión es una medida de la resistencia a la falla por momento de un elemento de hormigón no reforzado. Para el adoquín de hormigón, la flexión se mide mediante la aplicación de carga al centro de su longitud mayor, colocando el adoquín sobre apoyos simples. La resistencia a la flexión se expresa como el módulo de ruptura.

Resistencia a la abrasión.

Entre las propiedades mecánicas, la resistencia a la abrasión es importante, especialmente cuando el material va a usarse en construcción de pavimentos, debido a la erosión o desgaste a la cual el material se enfrenta por el tránsito humano y vehicular.

Resistencia al deslizamiento.

Los adoquines presentan una adecuada resistencia al deslizamiento, siempre y cuando no hayan sido sometidos a un tratamiento secundario tales como rectificado, pulido, entre otros, para producir una superficie más lisa. Algunas superficies de los caminos se vuelven resbaladizas debido al derrame de aceites, pero esto no sucede con los adoquines, aun cuando la superficie se manche. Esta resistencia al aceite es probablemente una de las principales razones para su elección en la pavimentación de estacionamientos para automóviles y camiones, de paradas de autobuses y de áreas de servicio de gasolineras, ya que su forma de pavimento segmentado impide el despliegue de los derrames sobre toda la superficie, conteniendo los aceites en áreas limitadas. Bajo condiciones normales los adoquines cumplen satisfactoriamente la resistencia al deslizamiento durante el tiempo de vida del producto, siendo sometido a un mantenimiento normal, salvo que la mayor porción de agregados haya sido expuesta a un pulido excesivo en su cara vista.

2.2.4. Consideraciones sobre el diseño estructural. de un pavimento.

Transito: Según (Pavimentos, 2002) respecto a normas que se han utilizado para definir pesos y dimensiones, los países del área se han regido en las desarrolladas por SIECA y aprobadas en 1958. En base a esto, cada país realizaba sus modificaciones, de acuerdo con sus necesidades o requerimientos del Manual Centroamericano para Diseño de Pavimentos CAPITULO 16 especiales. Cada país ha generado sus propias tablas de

clasificación vehicular y en el año 2001, se han estandarizado a raíz de la actualización del Acuerdo Centroamericano sobre Circulación por Carreteras, también realizado por SIECA.

Diseño de espesores: Con base en investigaciones realizados por el manual (Pavimentos, 2002) el diseño de pavimentos flexibles incluye la superficie con concretos o mezclas asfálticas.

El concepto del diseño de pavimentos tanto flexibles como rígidos, es determinar primero el espesor de la estructura basado en el nivel de tránsito como en las propiedades de los materiales; el periodo de desempeño de un pavimento está en función de la pérdida de serviciabilidad.

Los pavimentos flexibles se basan para el cálculo de los espesores en dos métodos los cuales son: Método de AASHTO, 1993 y el Método del Instituto de Asfalto.

Método de AASHTO. Para el método de AASHTO la fórmula de diseño es:

$$\log_{10} W_{18} = Z_r S_o + 9.36 \log_{10}(SN+1) - 0.20 + \frac{\log_{10}(\Delta PSI)}{0.40 + \frac{1094}{(SN+1)^{5.19}}} + 2.32 \log_{10} Mr - 8.07$$

- W_{18} = Numero de cargas de ejes simples equivalentes de 18 kips (80 kN) calculadas conforme el tránsito vehicular.
- Z_r = Es el valor de Z (área bajo la curva de distribución) correspondiente a la curva estandarizada para una confiabilidad R.
- S_o = Desviación estándar de todas las variables.
- ΔPSI = Pérdida de serviciabilidad.
- Mr = Módulo de resiliencia de la subrasante.
- SN = Número Estructural.

Las variables por considerar en este método están en función del tiempo: el periodo de diseño y la vida útil del pavimento.

El periodo de diseño: es el tiempo total para el cual se diseña un pavimento en función de la proyección del tránsito y el tiempo que se considere apropiado para que las condiciones del entorno se comiencen a alterar desproporcionadamente.

La vida útil del pavimento es aquel tiempo que transcurre entre la construcción de este y el momento en que alcanza el mínimo de serviciabilidad.

El periodo de diseño puede llegar a ser igual a la vida útil de un pavimento; en los casos en que se consideren reconstrucciones o rehabilitaciones a lo largo del tiempo, el periodo de diseño comprende varios periodos de vida útil que son: el de pavimento original y el de las rehabilitaciones.

Periodo de diseño.

Tabla 3 Periodo de diseño según la carretera.

Tipo de Carretera	Periodo de Diseño
Autopista Regional.	20 - 40 años
Troncales Suburbanas.	15 - 30 años
Troncales Rurales.	15 - 30 años
Colectoras Suburbanas	10 - 20 años
Colectoras Rurales	10 - 20 años

Fuente: Manual Centroamericano de Normas para el Diseño Geométrico de las Carreteras Regionales, SIECA, 2001

Según (Pavimentos, 2002) esta variable es el número de repeticiones de ejes equivalentes de 18 kips (80 kN) o ESAL's. La conversión de una carga dada por eje a eje equivalente o ESAL's se hace a través de los factores equivalentes de carga (LEF's).

Confiabilidad (R).

Este valor se refiere al grado de seguridad o veracidad de que el diseño de la estructura de un pavimento puede llegar al fin de su periodo de diseño en buenas condiciones.

Subrasantes expansivas.

En el caso de existir subrasantes expansivas por efecto de la saturación, es necesario analizar la pérdida de serviciabilidad (ΔPSI) debido a esta causa, haciendo los análisis de laboratorio a los materiales existentes en el proyecto.

Criterios para determinar la serviciabilidad.

La serviciabilidad de una estructura de pavimento, es la capacidad que tiene este de servir al tipo y volumen de tránsito para el cual fue diseñado. El Índice de serviciabilidad se califica entre 0 (malas condiciones) y 5 (perfecto). Para el diseño de pavimentos debe asumirse la serviciabilidad inicial y la serviciabilidad final; la inicial (P_o) es función directa del diseño de la estructura de pavimento y de la calidad con que se construye la carretera, la final o terminal (P_t) va en función de la categoría del camino y se adopta en base a esto y al criterio del diseñador; los valores que se recomiendan por experiencia son:

Serviciabilidad inicial.

- $P_o = 4,5$ para pavimentos rígidos
- $P_o = 4,2$ para pavimentos flexibles

Serviciabilidad final.

- $P_t = 2,5$ o más para caminos principales
- $P_t = 2,0$ para caminos de tránsito menor

Determinación de espesores.

De la fórmula de diseño se obtiene el número estructural (SN) y en función de este se determinan los distintos espesores de las capas que conforman el paquete estructural; el diseño está basado en la identificación del número estructural del pavimento flexible y la cantidad de ejes de carga transitando.

Determinación del número estructural requerido.

Por medio de Abaco del diseño estructural se obtiene el número estructural. Para el cual se necesitan las siguientes variables.

- La cantidad estimada de ejes equivalentes (ESAL's) por carril, para el período de diseño.
- La confiabilidad (R)
- Desviaciones estándar (So) se recomienda utilizar los valores comprendidos dentro de los intervalos siguientes:

Para pavimentos flexibles 0,40 – 0,50

En construcción nueva 0,35 – 0,40

En sobre capas 0,50

- El módulo de resiliencia efectivo (que tome en cuenta las variaciones a lo largo del año) de la subrasante (Mr).
- La pérdida de serviciabilidad
- $\Delta PSI = P_o - P_t$

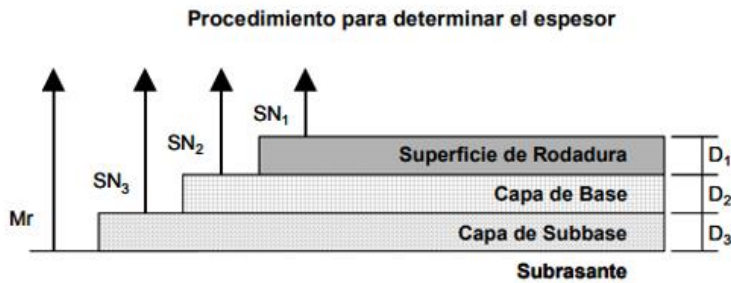
La fórmula general que relaciona el número estructural (SN) con los espesores de capa es la siguiente:

$$SN = a_1 \times D_1 + a_2 \times m_2 \times D_2 + a_3 \times m_3 \times D_3$$

Donde:

- a_1, a_2, a_3 son los coeficientes estructurales o de capa, de la superficie de rodadura, base y subbase respectivamente.
- m_2, m_3 son los coeficientes de drenaje para base y subbase.
- D_1, D_2, D_3 son los espesores de capa en pulgadas para la superficie de rodadura, base y subbase.

Ilustración 8 Estructura típica de pavimento flexible



Fuente: Guía para diseño de estructuras de pavimento AASHTO 1993

2.2.5. Métodos para el análisis estructural en pavimentos de adoquín.

Método del Instituto de Asfalto.

Según el manual de (Pavimentos, 2002) en este procedimiento de diseño, la estructura de un pavimento es considerada como un sistema elástico de capas múltiples. El material en cada una de las capas se caracteriza por su módulo de elasticidad.

Métodos para Diseño de pavimento Adoquinado.

Para el diseño de espesores en adoquines, descritos en este manual, se usaron cuatro tipos de métodos, los cuales son los siguientes:

- Método de Murillo López de Souza
- Método Argentino
- Método de AASHTO
- Método Británico

Método de Murillo López de Souza.

Método utilizado en caminos rurales con un tipo de tránsito medio (menos de los 750 vehículos comerciales por día con 20% de carga máxima), una carga por rueda de 5 toneladas y un C.B.R. de la subrasante del 5% mínimo.

Espesores requeridos, bajo esas condiciones sobre un terreno natural con un CBR de 5% o mayor, debe ser de 45 a 55 centímetros, de acuerdo con lo indicado en la siguiente tabla.

Tabla 4 Espesores de capa.

Estructura de pavimento (cm)	Precipitación pluvial (mm/año)		
	≤800	800 a 1500	≥1500
Adoquín	10	10	10
Capa de arena*	3-5	3-5	3-5
Base	20	20	20
Subbase	12	16	20
TOTAL	42	46	50

*La capa de arena se considera que no aporta soporte estructural.

Fuente: Diseño de Espesores y recomendaciones generales para la construcción de nuevos pavimentos utilizando adoquines, Frederic Harris, Nicaragua, 2002.

Para subrasantes con CBR menores a 5% debe colocarse un espesor de terracería mejorada, por debajo de la estructura de pavimento anteriormente indicada, con espesores de 10 a 45 cm; dependiendo del valor del C.B.R. y de la precipitación pluvial de la zona en donde se ubique el pavimento a construir.

Método Argentino.

Otro Método con el que se obtienen espesores similares es el desarrollado, en base a experiencias del Instituto de Cemento Portland Argentino, por el Ing. Juan F. García Balado, para el cálculo de espesores de pavimento de Adoquines, quien ha propuesto la siguiente ecuación:

$$e = \frac{100 + \sqrt{P}}{C.B.R + 5}$$

donde:

- e = Espesor total del pavimento requerido, en cm.
- P = Carga por rueda, en toneladas.
- C.B.R. De la subrasante en condiciones de servicio.

El Método Argentino contempla, además, la utilización de factores de equivalencia, para las diferentes capas del pavimento, en función de los tipos de materiales que se utilizan para su conformación. Dichos factores se describen a continuación.

Tabla 5 Factores de equivalencia.

TIPO DE MATERIAL	FACTOR DE EQUIVALENCIA
Base de Suelo Granular	1,0
Suelo-Cemento	1,5 a 2,0
Adoquín	2,0 a 2,5

Fuente: Diseño de Espesores y recomendaciones generales para la construcción de nuevos pavimentos utilizando adoquines, Frederic Harris, Nicaragua, 2002.

Si se toman en cuenta estos factores de equivalencia el espesor quedaría conformado de la manera siguiente:

$$e = k_1e_1 + k_2e_2$$

- e = Espesor total del pavimento
- e1 = Espesor del adoquín
- e2 = Espesor de la base
- k1 = Factor de Equivalencia del adoquín
- k2 = Factor de equivalencia de base de suelo granular

Así mismo, el método, considera cargas "P" con frecuencia de hasta 10^6 repeticiones. Para valores mayores, el espesor obtenido debe incrementarse de un 25 a un 35%, conforme al detalle siguiente:

Tabla 6 Espesores de capa según las cargas.

Repeticiones de carga	Espesor por utilizar
hasta 10^6	E
10^6 a 10^7	1,25e
mayor de 10^6	1,35e

Fuente: Diseño de Espesores y recomendaciones generales para la construcción de nuevos pavimentos utilizando adoquines, Frederic Harris, Nicaragua, 2002.

Método AASHTO.

En este método, para el cálculo de los espesores, se utiliza la Guía de Diseño AASHTO 1993.

Tabla 7 Parámetros para el diseño de pavimentos.

Datos de diseño	AASHTO 1993	
		RANGO
Índice de confianza (%)	85	75-95
Índice de Servicio Inicial	4,2	4,2-4,4
Índice de Servicio Final	2,2	2,0-2,5
Índice de Servicio de Diseño	2	-
Desviación Estándar, So	0,45	0,45
CBR de subrasante (%)	5	≥ 5
Módulo de Resiliencia, Mr. (CBR X 1500)	7500	-
Periodo de Diseño (Años)	15	-
Numero de Ejes Equivalentes	1,5 millones	50K-1500K

Fuente: Diseño de Espesores y recomendaciones generales para la construcción de nuevos pavimentos utilizando adoquines, Frederic Harris, Nicaragua, 2002.

Numero Estructural.

- SN del sistema corresponde a la subrasante.
- SN₁ de la carpeta de rodamiento
- SN₂ de la base
- SN₃ de la subbase=SN

Cálculo de espesores.

$$SN = a_1D_1 + a_2D_2 + a_3D_3$$

- SN: Número estructural

- a_1 : Coeficiente de carpeta (adoquín) = 0,30-0,45
- a_2 : Coeficiente de base
- a_3 : Coeficiente de subbase
- D_1 : Espesor del adoquín
- D_2 : Espesor de la base
- D_3 : Espesor de la subbase

Método Británico

La publicación adoquines de Concreto del Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto (IMCYC) demostró en su informe técnico que los adoquines colocados sobre un lecho de arena de 5 cm tienen una capacidad de distribución de carga, similar a la del asfalto compactado de 16 cm de espesor. Así mismo señala que la pavimentación con adoquines de concreto se puede colocar directamente sobre una subbase de acuerdo con las normas de las Road Note 29, donde la base y la superficie de rodamiento se sustituyen con los adoquines y 5 cm de arena. Ahora bien, si esto se toma como base para el diseño, es posible utilizar las Road Note 29, para determinar el espesor de la subbase, para cualquier subrasante y la duración esperada para diversos caminos, que soporten hasta 1,5 millones de ejes estándar. Por otra parte, dichas Road Note 29, recomiendan que el espesor total de la construcción sobre el nivel de la terracería no sea menor de 45 cm.

Los materiales para subbase, que contemplan las Road Note 29, deben cumplir las normas británicas, excepto aquellos que se especifican en las Normas 803, 805, 806, 807 y 815, de las "Specification for and bridge works" Department of Transport, Scottish Development Department and Welsh Office", 1976, ya que pueden ser susceptibles a la humedad, la cual penetrara entre las juntas de los Adoquines recién colocados.

Cabe hacer notar que el "Technical Memorandum, N.º. H6/78" del Departamento de Transporte, recomienda que cuando el valor del CBR de la subrasante sea menor al 5%, es necesaria una capa adicional, y esta debe tener un valor CBR de por lo menos, 5% más que el de la subrasante.

Como puede observarse los cuatro métodos de diseño, anteriormente indicados, consideran que el espesor total de un pavimento de adoquines, colocado sobre una subrasante con CBR de 5%, mínimo, es del orden de 40 a 45 cm.

El espesor anteriormente indicado puede soportar, según las normas británicas, hasta 1,5 millones de ejes estándar.

Guía para la construcción de la carpeta de rodamiento utilizando adoquín permeable.

Para poder realizar una construcción correcta se debe realizar la excavación correspondiente al trazo en donde se va a colocar el sistema, posteriormente una compactación adecuada a la subrasante de manera que el porcentaje de compactación en este elemento sea de al menos 85% según la norma ASTM, se debe buscar el 95% de compactación.

Se debe realizar una gaveta o zanja en la subrasante en uno o en los dos costados dependiendo del cálculo de la tubería.

Se debe colocar entre la subrasante y la cama o subbase una membrana o geotextil que sirva de filtro o aislante contra los finos provenientes de los alrededores de las paredes y fondo, de manera que no se genere una obstrucción de las ranuras de la tubería y solamente sea el agua evacuada por esta.

Se coloca una capa de subbase de 5 cm o más que funciona como cama sobre esta se coloca el tubo drenante el cual se encargara de la evacuación de las aguas provenientes de la infiltración, tubo conocido como drena flex el cual su tamaño va a depender de la cantidad de agua que este reciba.

Se debe colocar sobre el geotextil o la tubería la capa de subbase hasta lograr el espesor adecuado el cual es obtenido a través del diseño de este pavimento, hidráulico y estructural.

Sobre la subbase se coloca la base con el espesor correspondiente el cual es proveniente del diseño del pavimento que se hace de manera preliminar para que la

construcción se realice de manera correcta, en la colocación de este elemento de la carpeta de rodamiento se debe de procurar en lo máximo que el espesor de este sea lo más continuo en todo el tramo ya que si la base no queda lo más simétrica posible la diferencia en alturas se ve reflejada en los adoquines, factor que se convierte en contra del diseño, al tiempo de que este es habilitado al tránsito debido a que si existe desfases en la carpeta de rodadura se comienza a observar o generar daños de manera prematura.

Por último, se realiza la colocación de la cama de asiento de un material granular de tamaño más pequeño que las otras capas, pero evitando los finos en este elemento, este espesor debe ser de 5 ± 2 cm, el cual va solamente colocado sobre la base y no lleva ningún tipo de compactación.

En caso de tener un cambio de pavimento en algún tramo se debe realizar una junta de contracción de manera que los esfuerzos no sean transferidos de un pavimento a otro ya que en la mayoría de los casos el comportamiento de estos no es el mismo, por lo que se debe realizar una viga de concreto que separe los dos pavimentos, de manera que esta cumpla con la función de disipar esfuerzos provenientes del rodaje de los vehículos.

Por último, se realiza la colocación de los adoquines, en la mayoría de los casos se debe colocar adoquines de un espesor como mínimo de 8 cm ya que al trabajar con espesores inferiores sería solo para casos en donde sea exclusivamente de uso peatonal y en la mayoría de los casos siempre se va a contar con el tráfico vehicular el cual puede dañar el adoquín si fuese de un espesor inferior a 8 cm.

Se realiza la compactación inicial que consta de una a dos pasadas traslapadas por medio de una plancha que genera una vibro compactación.

Se realiza el sellado de las juntas con el mismo material que fue utilizado como cama para el adoquín, posteriormente al sellado se realiza la compactación final que es igual a la inicial.

En todos los casos la granulometría que se utilice para este diseño debe ser una granulometría que no contenga finos ya que estos elementos van a estar en contacto de manera frecuente con el agua, factor que es muy perjudicial si hay presencia de finos ya

que estos podrían ser lavados, con esto permitiendo que aparezcan vacíos en las distintas capas que conforman la estructura de pavimento generando con el tiempo que se den asentamientos en la calzada y así esta sea afectada por la pérdida de resistencia.

CAPITULO III
MARCO METODOLÓGICO.

3.1. Definición del enfoque cuantitativo y el tipo de la investigación.

3.1.1 Enfoque cuantitativo.

La presente tesis se basa en un diseño cuantitativo debido a que consta de una metodología para el diseño de un pavimento de adoquín permeable, donde las herramientas principales o aspectos fundamentales para realizarlo están basadas en entes de la ingeniería, y que por lo tanto el realizar esta metodología que no es susceptible a una percepción o situación de índole propio del investigador, por lo que hay que basarse en metodologías ya aplicadas o investigaciones que tengan relación con lo que se pretende construir en esta nueva metodología de diseño y construcción.

El enfoque que lleva esta tesis es cuantitativo debido a que se requiere una serie de pasos para poder llevar a cabo el diseño correcto de esta metodología, la cual se va a basar en distintos aspectos que permiten determinar cada uno de los elementos que requiere una carpeta de rodadura para que esta sea capaz de cumplir con las condiciones para la cual es diseñada de la manera más óptima, el diseño de un pavimento de adoquín permeable debe contener al igual que otros pavimentos caracterización de los materiales con los que se va a trabajar, espesores correspondientes a cada diseño, pendientes en la carpeta de rodadura según lo especificado, materiales impermeabilizantes o drenantes, pero además de todas estas características debe contar con un apartado que me indique cómo puedo realizar la evacuación de las aguas que la estructura permite que se infiltren, en donde se debe mencionar aspectos como: geotextiles, diámetro de la tubería longitud de recorrido de las aguas, evacuaciones transversales o longitudinales con respecto al sentido que lleva la vía.

En aspectos resumidos lo que busca esta investigación es el poder alcanzar un conocimiento acerca de lo que es y cómo trabaja un pavimento de adoquín permeable ante las distintas condiciones que puede presentar el territorio nacional para lo que es el mantener un control acerca de la infiltración, escorrentía y capacidad portante que puede presentar una estructura de pavimento de este tipo.

Además, como justificación esta investigación lo que con lleva es el contar con una metodología de diseño y construcción que permita que en el país este tipo de adoquín permeable se pueda manejar como los otros tipos de adoquín convencionales, ya que las compañías que brindan este producto solo lo venden instalado, el cual puede generar un incremento en los costos ya que de momento solo existen pocas compañías que cuentan con este producto. Al tener una metodología de diseño y construcción facilita lo que es el poder conseguir este tipo de adoquín por medio de otras fuentes sin necesidad de depender de estas para poder obtener este servicio de construcción de calzadas.

El emplear el uso de un adoquín permeable favorece con el ambiente, el mantenimiento de la calzada se reduce, tiene la capacidad de soportar las cargas producidas por el tránsito vehicular ligero y mediano., genera un acabado que embellece el proyecto, contribuye con el manejo de la escorrentía superficial ya que tiene la capacidad de infiltración de este tipo de aguas debido a la estructura que esta posee y además reduce la cantidad de obras pluviales.

3.1.2 Tipo de la investigación.

El estudio que se llevó a cabo es de tipo cuantitativa| descriptiva, debido a las revisiones críticas del estado del conocimiento: integración, organización y evaluación de la información teórica y empírica existente actualmente sobre el problema, enfocado ya sea en el progreso de la investigación actual y posibles vías para su solución, en el análisis de la consistencia interna y externas de las teorías y conceptualizaciones para señalar sus fallas o demostrar la superioridad de unas sobre otras, o en ambos aspectos. Y a la vez esta investigación también contiene ciertos componentes del tipo cuantitativa analítica ya que al realizar la metodología de diseño se espera que está presente una serie de rangos o parámetros provenientes de cálculos realizadas según estipulaciones provenientes de otras metodologías o informes, que tengan que ver con el conocimiento que se busca adquirir, también formulas en las cuales se puedan sustituir las variables correspondientes para poder obtener el resultado esperado que van a hacer provenientes de alguna sección de esta investigación. Esto con el fin de que se pueda poner en práctica a la hora de realizar un diseño de este tipo.

Comentado [MOU1]: Esto no comprendo que significa Tasar?

3.2. Sujetos y fuentes de información.

Esta investigación tendrá como insumos los siguientes:

3.2.1. Sujetos de información.

Como sujeto de información se cuenta con la opinión y experiencia por parte del ingeniero Pablo Torres el cual tiene conocimiento acerca del área de pavimentos y se encarga de brindar parte del conocimiento adquirido a través de sus años de ejercer su profesión a esta investigación.

3.2.2. Fuentes de información.

Las fuentes de información a las que se recurrirán son aquellas especializadas en el área o en el campo de interés hacia la investigación que se está llevando a cabo como: revistas, manuales, tesis, páginas web, libros, fichas técnicas.

3.3. Definición de variables conceptual, operativa e instrumental.

Las variables de consideración para el presente trabajo son las siguientes.

Matriz de variables conceptuales, operativa e instrumental.

Tabla 8 Matriz de variables conceptuales, operativa e instrumental.

Variable	Definición conceptual	Definición operativa	Definición instrumental
Granulometría	Es la distribución de los tamaños de las partículas de un agregado, tal como se determina por análisis de tamices.	Para obtener la granulometría adecuada que se utilizara como drenaje se recurrirá a la norma: AASHTO T27	Se utilizará una serie de mallas para poder realizar la distribución correcta según el tamaño de las partículas del agregado.
Espesores	El espesor es la magnitud más pequeña de un elemento visto en las tres dimensiones.	Se debe de revisar que el adoquín cuente con el espesor correspondiente al diseño al igual que las demás capas del pavimento según las normas: INTE 06-04-01	Se utilizará un vernier, cinta métrica y un densímetro nuclear para determinar los respectivos espesores
Evacuación de aguas.	La evacuación de estas consiste en el agua que es recolectada o acumulada en algún sector transportarla hasta un lugar adecuado en donde estas no generen alteraciones o daños.	La evacuación de aguas de la estructura se puede realizar mediante tubería especial o directamente a la subrasante en caso de ser mediante tubería se debe cumplir con la norma: ASTM D-2321	La cantidad de agua que una tubería específica puede evacuar es determinada después de realizar un análisis hidráulico e hidrológico el cual puede ser mediante Manning y el método racional.
Resistencia a la compresión del adoquín	La resistencia a la compresión es la característica mecánica principal del concreto. Se define como la capacidad para	La resistencia a la compresión del adoquín es determina con el fin de ver la capacidad individual o grupal del	La resistencia a la compresión debe ser determinada mediante especímenes de concreto y una prensa

	soportar una carga por unidad de área, y se expresa en términos de esfuerzo,	elemento y así determinar qué capacidad posee según la norma: ASTM C140	hidráulica que le aplique cargas
Resistencia a la flexión.	La resistencia a la flexión es una medida de la resistencia a la falla por momento de un elemento de hormigón no reforzado.	La flexión del adoquín se determina para verificar su comportamiento ante las cargas de tránsito según la norma: INTE C51 2006	La flexión se mide mediante la aplicación de carga al centro de su longitud mayor, colocando el adoquín sobre apoyos simples en un marco de carga.
Resistencia a la abrasión.	Es una propiedad que permite que un material sea resistente al desgaste producido por elementos como tránsito vehicular.	La abrasión de los adoquines es determina para ver la capacidad y duración que va a tener a través de los años según la norma: ASTM C418	La máquina para el ensayo de abrasión de adoquines es la estipulada por la Norma DIN 52108, que funciona por medio de la rueda de desgaste de Böhen.

Fuente: Propia.

3.4. Sustentación de la confiabilidad y la validez de los instrumentos de la investigación.

La sustentación de los datos es proveniente de los laboratorios que son utilizados por las empresas PC y PEDREGAL para realizar las pruebas correspondientes a los adoquines, las cuales son, la resistencia a la compresión, resistencia a la flexión, resistencia a la abrasión, resistencia al deslizamiento y capacidad de absorción.

Se debe contar con otra certificación por parte de la empresa que se encargue de proveer los agregados que debe de llevar las distintas capas que conforman la estructura de pavimento, además del agregado que se coloca en la parte superior del adoquín el cual funciona como cama y sellado de juntas.

El emplear el sistema de evacuación de las aguas de la estructura con lleva al uso de una tubería conocida como dreña flex distribuida por Durman y otras compañías, las cuales también deben brindar una serie de especificaciones técnicas que me certifiquen que lo que indica la ficha técnica del producto si es realmente correcto, para que cuando se coloque una tubería de determinadas características estas si cumpla con lo requerido según el diseño que se realizara de manera anticipada a la construcción.

Todas estas pruebas deben ser certificadas y normadas a través de una serie de parámetros que deben cumplir desde el tipo de agregados, mezcla de concreto, relación, agua cemento, máquinas utilizadas para la realización de cada una de estas pruebas y hasta el operario encargado de manipular estos elementos. Esta comprobación se debe realizar con el fin de que la empresa tenga un respaldo de lo que está vendiendo y si sea realmente lo que se ofrece a los consumidores en las fichas técnicas del producto, ya que a la hora de realizar un proyecto en donde se vaya a necesitar de alguno de estos elementos cumpla con lo establecido luego de realizar de manera anticipada diseños correspondientes que contemplen todas las variables y factores que son provenientes de estudios que realizan las compañías encargadas de la distribución del mismo.

CAPÍTULO IV
PRESENTACIÓN DE RESULTADOS.

4.1. Generalidades sobre la metodología de diseño y construcción.

Lo que se busca con la investigación es brindar las herramientas del diseño de un pavimento permeable al igual que su construcción de manera que cuando se requiera la colocación de un sistema de este tipo se proceda considerando todos los elementos necesarios, por ejemplo, la selección de materiales y la serie de cálculos para obtener un diseño según las normas, manuales, reglamentos y demás parámetros a cumplir.

La parte del diseño de esta metodología se divide en dos secciones: el cálculo estructural y el cálculo hidráulico.

Para la temática de construcción se planteó una guía de pasos en donde se indican los procesos constructivos de este sistema.

4.2. Metodología para determinar el diseño estructural e hidráulico del pavimento de adoquín permeable.

4.2.1. Cálculo hidráulico.

Determinación del caudal del área que tributa al pavimento.

El método racional es ampliamente usado desde mediados del siglo XIX, el cual expresa que el caudal máximo es proporcional a la lluvia caída en el área multiplicada por un coeficiente que se denomina coeficiente de escurrimiento. Es apropiado para ser usado en cuencas inferiores a 50 Ha de características homogéneas. Este método entrega un caudal constante a la salida de la cuenca para la lluvia de diseño, el gasto aportante de una cuenca urbana se calcula como:

$$Q = \frac{C * I * A}{3600}$$

Donde:

- Q: Caudal a la salida de la cuenca, en l/s.
- I: Intensidad de la lluvia, en mm/hora.
- A: Área de la cuenca, en m².
- C: Coeficiente de escurrimiento de la superficie.

Volumen de almacenamiento.

Para calcular el volumen de almacenamiento (Valm) necesario del firme, se estima el volumen acumulado que puede ser drenado con la tasa de infiltración estimada en función del tiempo. Se puede determinar gráficamente como la máxima diferencia entre el volumen afluente acumulado de agua lluvia o volumen de recarga V_{afl}(t) y el volumen acumulado infiltrado V_{inf}(t), ambos en función del tiempo.

$$Valm = \text{Max} [V_{afl}(t) - V_{inf}(t)]$$

Volumen afluente acumulado.

Se recomienda determinar el volumen afluente acumulado para una lluvia de período de retorno de T años según la siguiente ecuación:

$$V_{afl}(t) = 1,25 * 0,001 * C * I * A * t = 0,00125 * C * A * P \frac{T}{t}$$

Donde:

- C: Coeficiente de escurrimiento superficial del área total aportante.
- A: Área total aportante (m²).
- I: Intensidad de la lluvia de período de retorno T y duración t, en mm/hora.
- t: Tiempo acumulado en horas.
- $P \frac{T}{t}$: Corresponde a la precipitación acumulada en el tiempo t para la lluvia de período de retorno de T años.

El valor del V_{afl} en función de t se denomina “curva de recarga”. Se recomienda multiplicar por un factor de seguridad de 1,25 el volumen acumulado para considerar la porción de lluvia que cae antes y después de la porción más intensa de la tormenta. El factor ya se considera en la ecuación. El procedimiento para determinar el $V_{afl}(t)$ es similar al método racional para estimar los caudales aportantes por una cuenca, los resultados serían iguales si este último considerara el F.S.= 1,25.

Volumen acumulado infiltrado.

El volumen acumulado que puede ser drenado con la tasa de infiltración estimada en función del tiempo, se determina según la siguiente ecuación:

$$V_{inf}(t) = 0,001 * C_s * f * A_e * t$$

(*) nota en caso de no considerar la capacidad de infiltración del suelo, sea impermeable el volumen de infiltración cero “0”, en estos casos el volumen de almacenamiento es igual al de volumen afluente.

Donde:

- f : Capacidad de infiltración del suelo, en mm/hora.
- A_e : Área del pavimento, en (m^2).
- t : Tiempo acumulado, en horas.
- C_s : Coeficiente de seguridad que afecta la capacidad de infiltración dependiendo de las propiedades del agua y las condiciones de mantenimiento, que toma en cuenta los efectos de la colmatación en el tiempo que experimenta el suelo.

Percolación de la capa de pavimento.

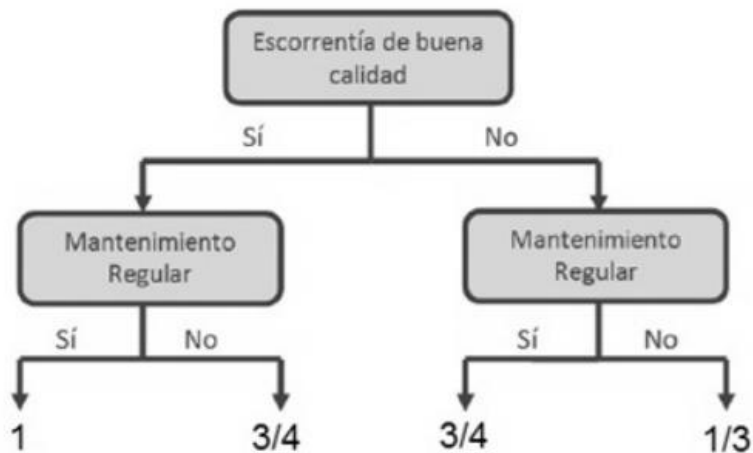
Una tasa de percolación habitual a través de un pavimento de adoquines prefabricados de hormigón puede ser del orden de 40.000 mm/h. Esta tasa se reduciría y estabilizaría con el tiempo debido a la colmatación, por lo que deberá

tenerse en cuenta un factor de seguridad sobre la capacidad de percolación, se emplea un coeficiente de seguridad que afecta la capacidad de infiltración dependiendo de las propiedades del agua y las condiciones de mantenimiento, que toma en cuenta los efectos de la colmatación en el tiempo que experimenta el suelo. El procedimiento para su estimación el que se muestra en la siguiente figura.

Proceso de cálculo del factor de seguridad frente a colmatación para un pavimento discontinuo permeable.

La tasa de infiltración del suelo debe estimarse en base a ensayos en terreno realizados por un laboratorio autorizado, tomando el promedio de los valores obtenidos en diferentes lugares representativos, de ensayos realizados al nivel de la subrasante.

Ilustración 9 Factores de reducción para la colmatación.



Fuente: Universidad Austral de Chile Facultad de Ciencias de la Ingeniería Escuela de Ingeniería Civil en Obras Civiles.

Transferencia de flujo de la estructura a la tubería drenante:

$$Q = N * Cd * A * (2 * g * h)^{0.5}$$

Donde:

- Q: Flujo a través de las perforaciones, en m³/s por metro de tubería.
- N: Número de perforaciones en un metro de tubería.
- Cd: Coeficiente de descarga de cada perforación, se recomienda 0,8.
- A: Sección transversal de cada perforación, en (m²). (a partir de un diámetro de 5mm.).
- g: Aceleración de la gravedad, en (m/s²).
- h: Máxima altura del agua sobre el orificio, en m (se sugiere 5mm.).

El dimensionamiento de la tubería de evacuación.

$$Q = \frac{A * R^2 * S^{\frac{1}{2}}}{n}$$

Donde:

- Q: Caudal total drenado, en (m³/s).
- A: Área de la sección transversal de la tubería, en (m²).
- R: Radio hidráulico de la sección transversal de la tubería, en m.
- S: Pendiente de la línea de energía, en m/m.
- n: Coeficiente de rugosidad de Manning, 0,009 para PVC. Proveniente del manual de colocación Durman

Comentado [MOU2]: Cual es la fuente de este coeficiente

Espesor de la subbase.

$$e = \frac{V_{alm}}{p * A_e}$$

Donde:

- p: Porosidad del material de la subbase, considerado como 0,3 para efectos de diseño.

- Rangos de porosidad para agregados permeables según normas chilenas y productos de concreto entre 0,25 y 0,35.

Tiempo de vaciado:

$$t_m = \frac{p * e_s}{C_s * f}$$

Donde:

- es: Corresponde al espesor definitivo asignado a la subbase, en mm.
- f: Tasa de infiltración del suelo o de la subrasante, en mm/hora.
- Cs: Coeficiente de seguridad que afecta la capacidad de infiltración dependiendo de las propiedades del agua y las condiciones de mantenimiento, que toma en cuenta los efectos de la colmatación en el tiempo que experimenta el suelo.
- p: Porosidad del relleno de la subbase, normalmente igual a 0,3.

Separador longitudinal de la calzada.

En un pavimento permeable se deben colocar paredes de concretos verticales para separar los bloques y cortar el flujo horizontal de agua. El espacio entre las paredes debe ser tal que la distancia a lo largo de la subbase de pendiente So no exceda Lmax dado por:

$$L_{max} = \frac{e_s}{2 * S_o}$$

Donde:

- es: Espesor de la subbase, en m.
- So: Pendiente longitudinal,

*Nota para determinar la separación máxima transversal utilizar la So transversal.

Calculo hidráulico de sub-drenes.

El diseño hidráulico de los sub-drenes y zanjas de drenaje incluye la determinación del caudal a evacuar, el cálculo del espaciamiento de ellos y la definición del diámetro y pendiente de los tubos.

Criterios de Diseño.

El diámetro mínimo de los tubos será 150 mm para longitudes iguales o menores a 150 m. Este diámetro es suficiente para la mayor parte de los suelos. Si la longitud del lateral o colector es superior a 150 m, el diámetro mínimo será de 200 mm.

Los elementos de drenaje subterráneo funcionan normalmente con escurrimiento a superficie libre y pueden entregar sus aguas al sistema de drenes superficiales sólo si no trabajan a presión. Las entregas deben disponerse a distancias no superiores a 300 m. La pendiente recomendada para los tubos es 0,005. Si está pendiente no puede conseguirse se tomarán como valores mínimos 0,002 para los laterales y 0,0025 para los drenes colectores.

La profundidad del drenaje depende de la permeabilidad, profundidad del nivel freático, conductividad hidráulica y depresión requerida en la napa. La siguiente Tabla entrega algunas recomendaciones generales para la profundidad de instalación y espaciamiento de sub-drenes en distintos tipos de suelos.

Tabla 9 Recomendaciones para el espaciamiento de sub-drenes

Tipo Suelo	Composición del Suelo			Espaciamiento (m) para Profundidades indicadas (m)			
	% Arena	% Limo	% Arcilla	1,00	1,25	1,50	1,75
Arena	80-100	0-20	0-20	35-45	45-60	-	-
Greda arenosa	50-80	0-50	0-20	15-30	30-45	-	-
Greda	30-50	30-50	0-20	9-18	12-24	15-30	18-36
Greda arcillosa	20-50	20-50	20-30	6-12	8-15	9-18	12-24
Arcilla arenosa	50-70	0-20	30-50	4-9	6-12	8-15	9-18
Arcilla limosa	0-20	50-70	30-50	3-8	4-9	6-12	8-15
Arcilla	0-50	0-50	30-100	máx.4	máx.6	máx.8	máx.12

Fuente: Manual de carreteras de Chile volumen 3.

Profundidad y Espaciamiento.

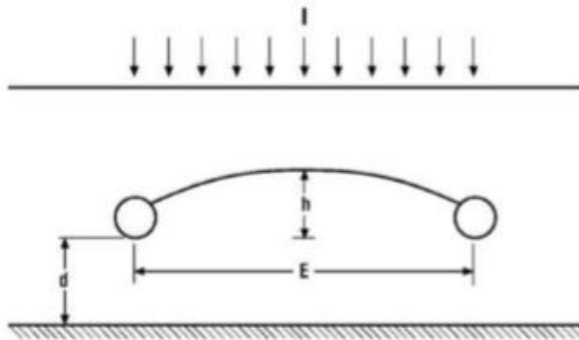
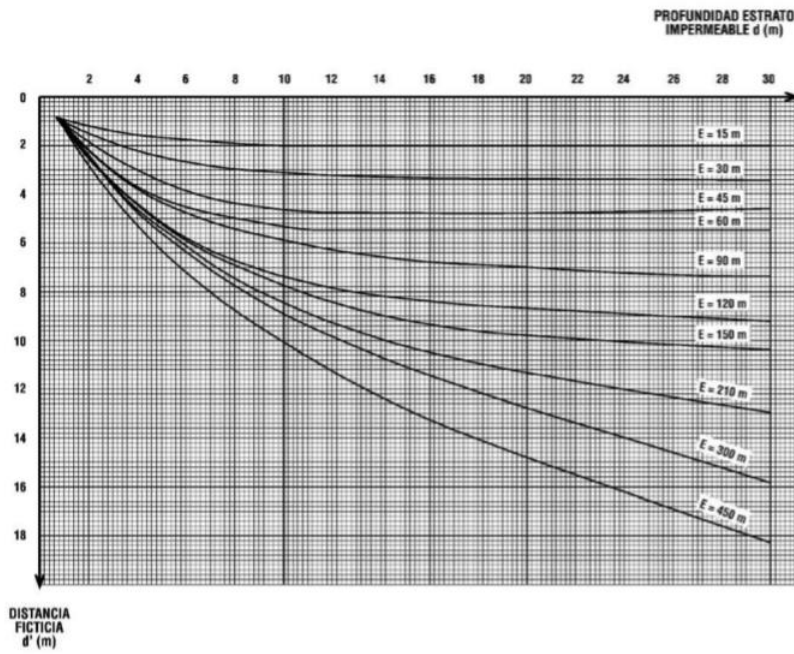
Existen métodos para calcular el espaciamiento de los drenes que consideran la situación de flujo en régimen permanente y no permanente. Se recomienda utilizar la siguiente expresión para el espaciamiento, la cual supone régimen permanente.

$$E = \frac{4 \cdot k \cdot h}{1} \cdot (h + 2d) - 8 \cdot (h + d)^2 \cdot \frac{h}{3 \cdot h + d}$$

Donde:

- k = componente horizontal media de la conductividad hidráulica del terreno medida in situ o en laboratorio (mm/día).
- h = altura máxima deseada para la napa entre 2 drenes consecutivos medida sobre el fondo de las zanjas donde van ubicados los drenes (m).
- E = espaciamiento de los drenes en m.
- d = distancia en metros entre el estrato impermeable y el fondo de las zanjas de los drenes. Si la distancia d es mayor de 0,5 m debe calcularse una distancia ficticia d', reducida para tomar en cuenta la convergencia de las líneas de corriente del escurrimiento en la zona vecina a los drenes. Esta altura ficticia d' llamada de Hooghoudt, depende de la distancia real d, del espaciamiento de los drenes y del diámetro de ellos. Se incluye el gráfico de la lámina siguiente que permite el cálculo de la distancia ficticia d' para drenes de 400 mm de diámetro. Dado que no existen mayores antecedentes experimentales para otros diámetros se recomienda el uso de este gráfico en los casos de sub-drenes y zanjas de drenaje.

Ilustración 10 Distancia ficticia d' en función del espaciamiento de los sub-drenes



Fuente: Manual de carreteras de Chile volumen 4.

Tabla 10 Valores de conductividad hidráulica según las propiedades del relleno.

Tipo de Suelo	Conductividad hidráulica (cm/h)
Arena	11,78
Greda arenosa	1,09
Greda	0,34
Greda arcillosa	0,10
Arcilla arenosa	0,06
Arcilla limosa	0,05
Arcilla	0,03

Fuente: Manual de carreteras de Chile volumen 4.

Tubos colectores.

Pueden estar hechos de varios materiales: cerámico; hormigón; plástico con fibra bituminosa; metal corrugado; polietileno corrugado; PVC.

Las longitudes son muy variables, 0,3 a 0,9 m para cerámicos. En este caso pueden ir no perforados y el agua se capta a través de las juntas abiertas. Los de hormigón normalmente son de 1 m de longitud. Los metálicos y de fibras son de 2,5 m o más. Los de plástico corrugado vienen en longitudes de 60 a 90 m. Los diámetros más comunes usados en la práctica son de 10 a 15 cm (4" y 6").

Materiales de filtro.

Cuando se usan materiales de granulometría muy abierta para drenes transversales, longitudinales, bases permeables y pozos de drenaje, se hace necesario el empleo de materiales de filtro. Sus funciones son:

- Prevenir el movimiento de partículas de suelo que pueden migrar y taponar el dren.
- Proveer material en las vecindades de los vacíos del dren que sea más permeable que el suelo circundante.

- Proveer un buen apoyo para el dren.
- Estabilizar el suelo sobre el que apoya el dren.

En el caso de tener tuberías de drenaje, el material circundante debe cumplir determinadas condiciones granulométricas con respecto a las aperturas de los tubos.

Estos son: Para tuberías con ranuras rectangulares:

$$\frac{D_{85}^F}{B} > 1,2$$

- D_{85}^F = diámetro equivalente a "pasa 85%" para el filtro
- B = ancho de la ranura

Para tuberías con orificios circulares:

$$\frac{D_{85}^F}{D} > 1,0$$

- D = diámetro del orificio

Filtros de textiles.

Se usan cuando es difícil conseguir materiales de granulometría adecuada para construir las capas de transición. En este caso se emplean membranas artificiales que tienen aberturas que cumplen las mismas propiedades hidráulicas que las capas de transición. Las más comunes son los geotextiles formados por fibras no tejidas, que últimamente están tomando mucho auge. En este caso se habla del AOS (apparent opening size o tamaño de apertura aparente) que es el tamaño de poros que supera al 95% del tamaño de los poros del geotextil. Este tamaño se lo llama también P95. Las condiciones granulométricas para cumplir son:

$$P_{95} < BD_{85}^M$$

- M se refiere al suelo natural, si éste tiene PT N° 200 < 50%

- Cuando $CU < 2$ ó $CU > 8$ $B = 1$ siendo $CU = D_{60}/D_{10}$
- Cuando $2 < Cu < 4$ $B = 0,5 CU$
- Cuando $4 < Cu < 8$ $B = 8/Cu$
- Cu: Coeficiente de uniformidad.
- D60: Tamaño tal, que el 60% en peso, del suelo, sea igual o menor.
- D10: diámetro efectivo; es el tamaño tal que sea igual o mayor que el 10 % en peso del suelo.
- Si el material tiene $PT N^{\circ}200 > 50\%$ $B = 1,8$

$$\text{Además: } P_{95} > 3D_{15}^M$$

Con respecto al material de filtro se debe cumplir sólo esta condición de Terzaghi:

$$\frac{D_{15}^F}{P_{15}} > 5$$

Dado que el geotextil no puede sufrir erosión.

Consideraciones de filtro que se deben tener en las capas de la estructura de pavimento.

Condiciones de filtro. Es recomendable que la subbase cumpla las siguientes condiciones de filtro: (esta condición es ratificada y certificada en laboratorio)

$$\frac{D_{15 \text{ subbase}}}{D_{85 \text{ subrasante}}} \leq 5$$

$$D_{15 \text{ subbase}} \geq 0,42 \text{ mm}$$

$$\frac{D_{50 \text{ subbase}}}{D_{50 \text{ subrasante}}} \leq 25$$

$$\frac{D_{15 \text{ subbase}}}{D_{15 \text{ subrasante}}} \geq 5$$

DN = diámetro de la abertura del tamiz en que pasa N% del material

“Ensayo Desgaste Los Ángeles”. El agregado grueso (retenido en tamiz 5 mm) debe tener un desgaste inferior a un 40 %

El CBR será igual o superior al 80% y se mide a 0,2” de penetración en una muestra saturada y previamente compactada a una densidad igual o superior al 95% de la D.M.C.S., obtenida en el ensayo Proctor Modificado.

La subbase se construye por capas de espesor compactado no superior a 0,30 m ni inferior a 0,12 m. Espesores superiores a 0,30 m, se extienden y compactan en capas.

La subbase se construye por capas de espesor compactado no superior a 0,30 m ni inferior a 0,12 m. Espesores superiores a 0,30 m, se extienden y compactan en capas.

En la capa de subbase, se efectúa un ensayo de Densidad “en sitio” cada 500 m² como máximo.

Condiciones de filtro. La base granular cumplirá las siguientes condiciones de filtro, las cuales son ratificadas y certificadas en laboratorio (ya que es parte de la teoría de diseño estructural, nunca ha sido exigida y es muy probable que las fallas en muchos pavimentos sean por no cumplir esta condición)

$$\frac{D_{15 \text{ base}}}{D_{85 \text{ subbase}}} \leq 5$$

$$D_{15 \text{ base}} \geq 0,42 \text{ mm}$$

$$\frac{D_{50 \text{ base}}}{D_{50 \text{ subbase}}} \leq 25$$

$$\frac{D_{15 \text{ base}}}{D_{15 \text{ subbase}}} \geq 5$$

El porcentaje de partículas chancadas debe ser mayor que el 50% para lograr el CBR especificado, y que, además, el 80 % mínimo de las partículas retenidas en el tamiz N° 4 ASTM tengan, a lo menos 2 caras fracturadas mecánicamente.

Ensayo Desgaste Los Ángeles. El agregado grueso debe tener un desgaste inferior a un 40%.

Poder de Soporte de California, Base con CBR 80 %. El CBR debe ser superior a 80% en las bases para pavimentos.

En la capa de base granular, se efectúa un ensayo de densidad “en -sitio” cada 350 m².

Material permeable para drenes y sub-drenes de grava.

El material permeable estará constituido por gravas naturales limpias sin aristas vivas, libre de material fino, materia orgánica, terrones de arcilla u otras sustancias deleznable. La granulometría del material deberá estar comprendida entre 40 mm y 10 mm para la construcción de drenes al borde del pavimento y entre 80 mm y 10 mm para el relleno de sub-drenes.

Diseño de geotextil.

La selección del geotextil se hace conforme a la norma AASHTO M288. Se debe considerar que el geotextil no se sature de finos, para lo cual hay que seleccionarlo según la granulometría del material a filtrar. Como mínimo se recomienda una geotextil clase II con una elongación ≥ 50 %, una permeabilidad de 1,68 mm/s, un tamaño de apertura aparente de 0,212 mm y una resistencia mínima a la tensión (Grab Strenght) de 712 N.

Ilustración 11 Requisitos físicos para geotextiles de drenaje subterráneo.

Requisitos físicos para geotextiles de drenaje subterráneo

Propiedad	Norma de ensayo	Unidades	Tipo I-A (1)	Tipo I-B (1)	Tipo I-C (1)	Tipo I-D (1)	Tipo I-E (1)	Tipo I-F (1)
Resistencia al agarre	D 4632	N	1100 / 700	1100 / 700	1100 / 700	800 / 500	800 / 500	800 / 500
Resistencia de juntas cosidas	D 4632	N	990 / 630	990 / 630	990 / 630	720 / 450	720 / 450	720 / 450
Resistencia a rasgaduras	D 4533	N	400 / 250	400 / 250	400 / 250	300 / 175	300 / 175	300 / 175
Resistencia a agujeros	D 4833	N	400 / 250	400 / 250	400 / 250	300 / 175	300 / 175	300 / 175
Resistencia a ruptura	D 3786	kPa	2750 / 1350	2750 / 1350	2750 / 1350	2100 / 950	2100 / 950	2100 / 950
Permisividad	D 4491	s ⁻¹	0,5	0,2	0,1	0,5	0,2	0,1
Abertura aparente	D 4751	mm	0,45	0,25 (2)	0,22 (2)	0,45 (2)	0,25 (2)	0,22 (2)
Estabilidad al ultravioleta	D 4355	%	50% después de 500 horas de exposición					

Fuente: Manual de diseño para pavimentos método de AASHTO 93

Ilustración 12 Requisitos de los geotextiles para drenaje.

Requisitos de los geotextiles para drenaje

Ensayo	Norma ASTM	Unidad	Requisitos		
			$\xi_r < 50\%$	$\xi_r < 50\%$	$\xi_r < 50\%$
Resistencia a tracción longitudinal	D 4632	N	800	500	
Costurado	D 4632	N	720	450	
Punzonamiento ⁽¹⁾	D 4833	N	300	180	
Corte trapezoidal	D 4533	N	300	180	
Resistencia al reventado	D 3786	kPa	2 100	950	
% que pasa tamiz 0.08 mm					
			< 15%	15% a 50%	≥ 50%
Permitividad	D 4491	s ⁻¹	0,5	0,2	0,1
Abertura aparente de poros (AOS)	D 4751	mm	0,43	0,25	0,22 ⁽²⁾
Estabilidad UV, 500 h	D 4355	%	50	50	50

Fuente: Manual de diseño para pavimentos método de AASHTO 93

4.2.2. Calculo estructural

Planilla para cálculo manual de ESALs

Tabla 11 Plantilla para realizar el cálculo de los ESALs.

Tipo de vehículo	Volumen diario	Factores de crecimiento	Tránsito de diseño	Factor camión TF	N° de ESAL's p/diseño
	(A)	(B)	(C)	(D)	(E)
Autos					
Pick ups					
Otros veh. 2 ejes y 4 ruedas					
Camiones (2 ejes y 6 ruedas)					
Camiones (2 ejes y 6 ruedas)					
Semirremolques (3 ejes)					
Semirremolques (4 ejes)					
Semirremolques (5 ó más ejes)					
Camión c/acoplado (5 ejes)					
Camión c/acoplado (6 ó más ejes)					
Total, vehículos				ESALs diseño	

Fuente: Manual de diseño para pavimentos método de AASHTO 93

Para el cálculo del TF se deben analizar los distintos pesos de ejes para cada tipo de camión.

Tabla 12 Plantilla para determinar el TF

Carga			
Ejes simples	LEF	No ejes	No ESALs
P ₁	lef ₁	N ₁	
P ₂	lef ₂	N ₂	
P ₃	lef ₃	N ₃	
Ejes tridem			
P ₁ ^T	lef ₁ ^T	N ₁ ^T	
P ₂ ^T	lef ₂ ^T	N ₂ ^T	
P ₃ ^T	lef ₃ ^T	N ₃ ^T	
P _{total}	lef _{total}	N _{total}	

Fuente: Manual de diseño para pavimentos método de AASHTO 93

$$TF = \frac{\text{No. de ESALs totales}}{\text{No. de camiones}}$$

$$\text{factor crecimiento} = \left(\frac{1+g}{g}\right)^n - 1$$

- g = tasa de crecimiento
- n = periodo de diseño
- W₁₈ = No de ESALs de diseño * factor crecimiento * 365 * LD * LC
- LD = factor de distribución por dirección
- LC = factor de distribución por carril

Tabla 13 Factor de distribución por dirección.

Número de carriles en ambas direcciones	LD
2	50
4	45
6 o mas	40

Fuente: Manual de diseño para pavimentos método de AASHTO 93

Tabla 14 Factor de distribución por carril.

Número de carriles en una sola dirección	LC
1	1.00
2	0,80-1,00
3	0,60-0,80
4	0,50-0,75

Fuente: Manual de diseño para pavimentos método de AASHTO 93

Carga de diseño.

Cuando un pavimento de adoquines está sujeto a tráfico, una señal de daño es la formación de baches, la marcación de los carriles por donde circulan los vehículos o el deterioro del adoquinado a lo largo de su vida útil. La vida útil del pavimento es el periodo diseñado para que cumpla su función, dentro de ciertos niveles de deformación o deterioro antes de requerir una rehabilitación mayor. En general, es de 20 a 50 años. La predicción del tráfico durante la vida del pavimento es una estimación de cargas para diferentes tipos de vehículos, pesos, configuraciones de ejes y ruedas, así como el número de veces que se repiten. Cuando sea difícil predecir las cargas futuras, se debe aplicar el criterio profesional y definir si es requerido utilizar un factor de seguridad adicional para disminuir el riesgo de daños excesivos durante la vida útil del sistema. El paso de un camión cargado sobre un pavimento produce más daño que varias pasadas de vehículos livianos. A fin de poder comparar el nivel de daño que diferentes tipos de vehículos le hacen al pavimento, la AASHTO desarrolló una metodología para normalizar o equiparar las cargas a una carga equivalente por eje que pasa cierto número de veces (ESAL).

Esta carga equivalente corresponde a un eje simple de 80 kN y el daño que provoca no es lineal, sino exponencial. Este exponente es cuatro y se le aplica al factor de dividir cada eje entre el eje equivalente de 80 kN y realizar posteriormente la sumatoria.

$$\text{Factor camión} = \left(\frac{\text{CARGA POR EJE}}{80} \right)^4 * 2$$

Otro índice desarrollado por el Departamento de Transportes de California (Caltrans) es el índice de tráfico (TI), que relaciona los ejes equivalentes de la siguiente forma:

$$\text{TI} = 9,0X \left(\frac{\text{ESAL}}{10^6} \right)^{0,119}$$

En la siguiente tabla se muestra el rango de los ejes equivalentes y el índice de tráfico según el tipo de tráfico y la aplicación usual.

Tabla 15 Rango típico de ESALs según su aplicación

Rango típico de ESALs según su aplicación.			
Tipo de tráfico	ESALs x 1000	(TI)	Aplicación
Ligero	10-100	5,2-6,8	Condominios, parqueos
Mediano	200-1000	7,4-9,0	Calles secundarias de ciudad
Pesado	2000-10000	9,8-11,8	Calles principales de ciudad

Fuente: Manual técnico de productos de concreto Costa Rica.

Determinación del número estructural.

Metodología de diseño El diseño del pavimento de adoquines se puede realizar con la fórmula desarrollada por la AASHTO en 1993 para pavimentos flexibles y adoptada para su uso en adoquines de concreto en la norma ASCE 58.

$$\text{Log}_{10} W_{18} = Z_r S_0 + 9.36 \text{Log}_{10} (\text{SN} + 1) - 0.20 + \frac{\text{Log}_{10} \left(\frac{\Delta \text{PSI}}{4.2 - 1.5} \right)}{\frac{0.40 + 1094}{(\text{SN} + 1)^{5.19}}} + 2.32 \text{Log}_{10} M_r - 8.07$$

Donde:

- W = Es la carga de diseño expresada en ejes equivalentes (ESALs)
- ZR= Desviación normal estándar para la confiabilidad R seleccionada.
- S0= Desviación estándar global
- SN= Número estructural del pavimento, calculado como ai x di x mi
- Donde:
- ai = coeficiente estructural de la capa i
- di= espesor de la capa i

- m_i = Coeficiente de drenaje de la capa i
- P_i = Índice de servicio inicial
- P_t = Índice de servicio final
- MR = Módulo resiliente de la subrasante, (psi)

Desviación normal estándar (Z_r) y confiabilidad (R)

La confiabilidad R es la probabilidad de que un pavimento mantenga su capacidad de servicio dentro de niveles adecuados desde el punto de vista del usuario en el periodo de vida del proyecto. El valor de la confiabilidad depende del nivel de tráfico y las consecuencias asociadas a su salida de operación por mantenimiento o reemplazo durante su vida útil. Un valor cercano a 90 % es el punto de equilibrio entre el costo inicial y los costos de mantenimiento, rehabilitación, costos por demoras en el tráfico, etc. En la siguiente tabla se muestran algunos valores de confiabilidad adaptados de la AASHTO 93. Con base a la confiabilidad requerida para el diseño, se calcula la desviación normal estándar (Z_r) correspondiente.

Tabla 16 Valor de la confiabilidad recomendado

Valor de confiabilidad recomendado		
Clasificación funcional	Confiabilidad R	
	Urbano	Rural
Carretera primaria/Nacional	85-99,9	80-99,9
Carretera secundaria/Nacional	80-99	75-95
Carretera terciaria /Nacional	80-95	75-95
Vías públicas cantonales	50-80	50-80

Fuente: Manual técnico de productos de concreto Costa Rica.

Tabla 17 Desviación estándar normal ZR correspondientes a los niveles de confiabilidad R

Valor de la desviación estándar normal ZR correspondientes a los niveles de confiabilidad, R.	
Confiabilidad R, en porcentaje	Desviación estándar normal, Zr
50	-0,000
60	-0,253
70	-0,254
80	-0,841
85	-1,037
90	-1,282
91	-1,340
92	-1,405
93	-1,476
94	-1,555
95	-1,645

Fuente: Manual técnico de productos de concreto Costa Rica.

Desviación Estándar Global.

La desviación estándar global la estableció la AASHTO en 0,35 para pavimento rígido y 0,45 para pavimento flexible.

Coefficiente estructural de la capa (ai)

El coeficiente estructural de la capa es un coeficiente empírico que expresa la capacidad estructural de cada capa dentro de la estructura del pavimento. Estos coeficientes varían según el espesor de la capa, la capacidad soportante de la capa inmediata inferior a la capa en análisis y su posición dentro de la estructura del pavimento.

Coefficiente a₁ para la carpeta de rodamiento.

En términos del módulo de resiliencia (ER), el coeficiente a₁ puede expresarse como:

$$a_1 = 0,44 \left(\frac{ER}{3100} \right)^{\frac{1}{3}}$$

ER expresado en MPa

Para considerar el efecto de rigidización de la capa con el tráfico, algunas investigaciones han asumido un módulo mínimo de resiliencia de 350 MPa y un valor límite de 3100 MPa. El valor a_1 tiene un límite de 0,44 para tráficos mayores a 10 000 ESAL y un valor mínimo de 0,26 que varía en forma lineal entre cero y 10.000 ESAL.

Coefficiente a_2 para bases granulares.

Para bases granulares, el coeficiente a_2 varía de 0,06 a 0,14 para valores de CBR entre 15 % y 100 % y valores del módulo de resiliencia de entre 100 y 200 MPa.

En términos del módulo de resiliencia (ER), el coeficiente a_2 puede expresarse como:

$$a_2 = 0,520 * \log_{10} (ER) - 0,977$$

Donde ER está expresado en MPa

$$a_2 = 0,249 * \log_{10} (ER) - 0,977$$

Donde ER está expresado en PSI

Cuando se escoja el valor de diseño del módulo resiliente (ER), debe considerarse que este varía con las condiciones de esfuerzo y humedad dentro de la capa, así como con las características y espesor de la capa subyacente.

Coefficiente a_3 para subbases granulares.

Para subbases granulares, el coeficiente a_3 varía de 0,06 a 0,14 para valores de CBR entre 6 % y 100 % y valores del módulo de resiliencia de entre 48 y 138 MPa.

En términos del módulo de resiliencia (ER), el coeficiente a_3 puede expresarse como.

$$a_3 = 0,474 * \log_{10} (ER) - 0,839$$

ER esta expresado en MPa.

$$a_3 = 0,227 * \log_{10} (ER) - 0,839$$

ER esta expresado en PSI.

Coeficiente de drenaje de la capa (mi)

El coeficiente m_i para considerar el efecto que tiene la humedad o saturación de las superficies del pavimento en su desempeño estructural varía entre 0,4 para condiciones de muy mal drenaje y 1,4 para excelente drenaje ver valores en la siguiente tabla.

Tabla 18 Coeficientes de drenaje.

Valores recomendados de los coeficientes de drenaje				
Calidad del drenaje	Porcentaje del tiempo en que la estructura del pavimento está expuesta a niveles de humedad cercanos a saturación.			
	Menos de 1%	1-5%	5-25%	Mas de 25%
Excelente	1,40-1,35	1,35-1,30	1,30-1,20	1,20
Bueno	1,35-1,25	1,25-1,15	1,15-1,00	1,00
Regular	1,25-1,15	1,15-1,05	1,00-0,80	0,80
Malo	1,15-1,05	1,05-0,80	0,80-0,60	0,60
Muy malo	1,05-0,95	0,95-0,75	0,75-0,40	0,40

Fuente: Manual técnico de productos de concreto Costa Rica.

Para elegir alguno de los coeficientes presentes en estas tablas se deben seguir estos pasos:

1. Calcular el tiempo de drenaje de cada capa no ligada para pavimentos flexibles o de la base combinada con subrasante para los rígidos.
2. Seleccionar una calidad de drenaje en función del tiempo de drenaje calculado.

3. Estimar el tiempo en que la estructura del pavimento está expuesta a niveles de humedad próximos a la saturación.

4. Con la calidad de drenaje y el porcentaje de tiempo en que el pavimento está expuesto a niveles de humedad próximos a la saturación, se elige el coeficiente de drenaje m_i o C_d según el caso.

Tabla 19 Tipo de suelo condiciones de la subrasante.

Categorías y características del suelo (ASCE 2016)			
Categoría	Clasificación del suelo	Descripción	Características de drenaje del suelo
1	Guijarros y cantos rodados	Roca, relleno de piedra fracturada, cantos rodados y guijarros	Excelente
2	GW, SW	Gravas y arenas bien graduadas	Excelente
3	GP, SP	Gravas y arenas mal graduadas	De excelente a regula
4	GM, SM	Gravas y arenas limosas	De bueno a semi impermeable
5	GC, SC	Gravas y arenas arcillosas	Prácticamente impermeable
6	ML, MI	Limos y arenas limosas	Malo
7	CL, MH	Arcillas de baja plasticidad y limos compresibles	Prácticamente impermeable
8	CI, CH	Arcillas de media y alta plasticidad	Semi permeable a impermeable

Fuente: Manual técnico de productos de concreto Costa Rica.

Tabla 20 Calidad del drenaje según el tipo de suelo.

Drenaje del pavimento acorde con la categoría del suelo (ASCE 2016)		
Calidad del drenaje	Tiempo de drenado	Categoría del suelo
Bueno	1 día	1,2,3
Regular	7 días	3,4
Malo	30 días	4,5,6,7,8

Fuente: Manual técnico de productos de concreto Costa Rica.

Tabla 21 Condiciones de MR, R y CBR según el tipo de subrasante y drenaje.

Valores del módulo de resiliencia, R y CBR de acuerdo con las características del drenaje (ASCE 2010)									
Categoría	Drenaje								
	Bueno			Regular			Malo		
	Mr. (MPa)	R	CBR	Mr. (MPa)	R	CBR	Mr. (MPa)	R	CBR
1	90	21	13	80	19	11	70	16	9
2	80	19	11	70	16	9	50	11	5
3	70	16	9	50	11	5	35	7	3
4	50	11	5	35	7	3	30	6	2
5	40	8	4	30	6	2	25	4	2
6	30	6	2	25	4	2	18	3	1
7	27	5	2	20	3	1	15	2	1
8	25	4	2	20	3	1	15	2	1

Fuente: Manual técnico de productos de concreto Costa Rica.

Para suelos con CBR iguales o inferiores a 3 se recomienda mejorar la subrasante, ya sea con sustitución o con refuerzo al usar geomallas o geotextiles. Para CBR entre 3 y 10 se recomienda usar un geotextil no tejido como separación entre la subrasante y la subbase para evitar que con el tiempo disminuya el espesor efectivo de esta última. Si la subbase es débil o trabaja en condiciones saturadas, puede ser necesario usar geotextiles como refuerzo y capacidades de filtración y no solo como separación. Este geotextil requiere un tamaño de apertura aparente, propiedades mecánicas, físicas e hidráulicas según AASHTO M288 que varían según si se requiere que el mismo aporte una función únicamente de separación o también de refuerzo.

Índice de servicio

El índice de servicio mide la rugosidad y deterioro (agrietamiento y hundimiento) que presenta la superficie de rodadura. La escala va de 5 a 0, donde 5 es el índice con el mejor desempeño y 0 el más bajo o imposible de transitar.

Para pavimentos flexibles, el índice de servicio inicial lo estableció la AASHTO en su manual de diseño como 4,2 El índice de servicio final es aquel en el que el pavimento requiera una intervención mayor y se recomienda un índice de servicio final de 2,5 a 3,0 para carreteras principales de alto tráfico y de 2,5 para carreteras de bajo tránsito.

Según el manual técnico de productos de concreto en Costa Rica se establecen una serie de valores ya establecidos por esta compañía para emplear la construcción de carpetas de rodamiento de adoquín permeable sin necesidad de realizar análisis estructural. Estos valores que se presentaran a continuación en la tabla 26 de esta metodología son los mínimos que puede contemplar esta metodología.

Para el cálculo del espesor de los pavimentos permeables es necesario analizar dos condiciones. La primera es el espesor estructural según las demandas de tránsito, vida útil y características de los materiales a emplear. La segunda es el diseño hidráulico del pavimento, que depende de la vida útil, el periodo de retorno de la tormenta de diseño, la intensidad de la lluvia para dicho periodo y el tiempo de retardo necesario para absorber o evacuar el agua almacenada en la estructura del pavimento. Debe considerarse que el cálculo del volumen de agua a almacenar puede no regirse por la intensidad máxima para el periodo de diseño, sino por una intensidad menor, pero con un tiempo de duración mayor.

Los pavimentos permeables deben tener como condiciones generales las siguientes:

- Una pendiente longitudinal mínima de 1%
- Una pendiente longitudinal máxima de 12%
- Una pendiente del terreno circundante no mayor de 20%
- Un retiro mínimo de 30 m de zonas donde se puedan contaminar los mantos acuíferos

Por último, en general el área que puede drenar un pavimento de adoquines es del orden de cinco veces el área del pavimento.

El valor del SN es obtenido por medio del Abaco de la AAHSTO o por medio de la siguiente ecuación.

$$\text{Log}_{10} W_{18} = Z_r S_o + 9.36 \text{Log}_{10} (\text{SN} + 1) - 0.20 + \frac{\text{Log}_{10} \left(\frac{\Delta \text{PSI}}{4.2 - 1.5} \right)}{\frac{0.40 + 1094}{(\text{SN} + 1)^{5.19}}} + 2.32 \text{Log}_{10} M_r - 8.07$$

Carpeta de rodamiento.

$$\text{SN}_1 = a_1 * D_1$$

$$\frac{\text{SN}_1}{a_1} = D_1 \sim D_1^*$$

$$\text{SN}_1^* = a_1 * D_1^*$$

Base.

$$\text{SN}_2 = a_2 * D_2 * m1$$

$$\text{SN}_2 - \text{SN}_1^* = a_2 * D_2 * m2$$

$$\frac{\text{SN}_2 - \text{SN}_1^*}{a_2 * m2} = D_2 \sim D_2^*$$

$$\text{SN}_2^* = a_2 * D_2^* * m2$$

Subbase.

$$\text{SN}_3 = a_3 * D_3 * m3$$

$$\text{SN}_3 - (\text{SN}_2 + \text{SN}_1) = a_3 * D_3 * m3$$

$$\frac{SN_3 - (SN_2 + SN_1)}{a_3 * m_3} = D_3 \sim D_3^*$$

$$SN_3^* = a_3 * D_3^* * m_3$$

Verificación cumplimiento de los espesores.

$$SN^* = SN_1^* + SN_2^* + SN_3^* > SN.$$

Diseño estructural del pavimento permeable con adoquines Teknodren La metodología para el diseño estructural de los pavimentos permeables es la misma que para los adoquines estándar, solo que varían los coeficientes estructurales de capa ai utilizados. Los valores recomendados por el Interlocking Concrete Paver Institute (ICPI) son:

- Adoquín y cama de a_1 de 0,30
- Base granular a_2 de 0,09
- Subbase granular a_3 de 0,06

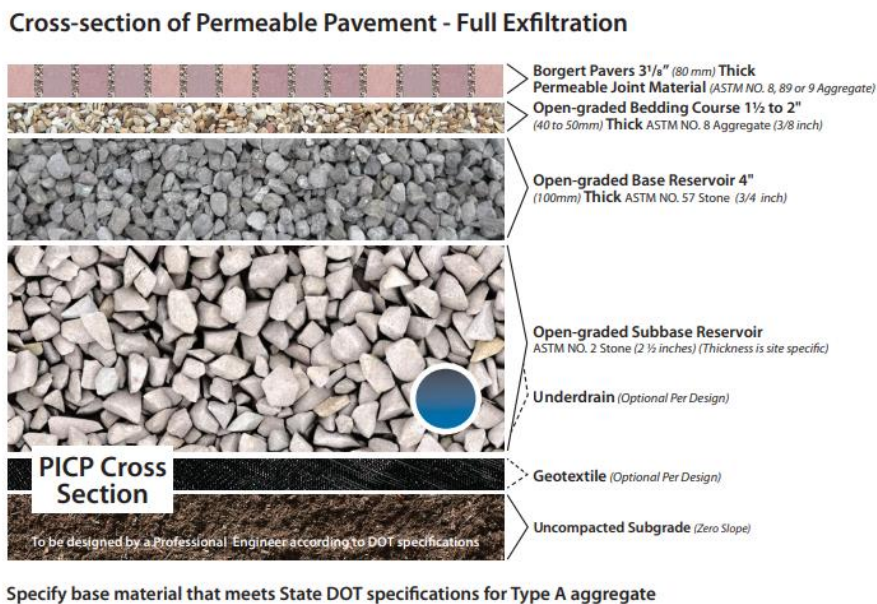
En este diseño se deben considerar condiciones saturadas.

Los materiales por utilizar en las juntas, la cama, la base y la subbase deben ser agregados granulares con un mínimo de 90 % de sus caras fracturadas y una abrasión menor a 40 %, conforme a las normas ASTM C131 y ASTM C535. El porcentaje de finos que pasa la malla N°200 (ASTM C136) debe ser menor o igual al 2 %, con una densidad típica de 1522 a 1922 kg/m³ y un CBR mínimo de 80 %.

Para las juntas y la cama se debe utilizar la granulometría estándar ASTM N° 8 para la base la ASTM N° 57 y para la subbase la ASTM N° 2 conforme a la norma ASTM D448 ver en las siguientes figuras respectivamente.

La estructura final que compone el pavimento permeable debe presentar una forma muy similar a la siguiente.

Ilustración 13 Sección de una posible estructura de pavimento permeable.



Fuente: Borgert pavers.

método de AASHTO 93

Apariencia Piedra ASTM N°8 para cama base de sistema de pavimento permeable con adoquines Teknodren. Este tipo de cama para el adoquín es conocido como piedra quintilla de aproximadamente 9,5 mm.

Ilustración 14 Apariencia Piedra ASTM N°8 tipo de cama para el adoquín



Fuente: Manual técnico de productos de concreto Costa Rica.

Condiciones que deben cumplir las bases permeables.

Son bases con alto grado de permeabilidad (mayor de 305 m/día o 0,35 cm/seg) que permiten que el agua que penetra en el pavimento pueda drenar rápidamente. Estas bases pueden ser tratadas o no tratadas. En el caso de bases tratadas, éstas pueden ser con cemento o con asfalto. El cemento se agrega en una cantidad de 80 a 170 Kg/m³ y el asfalto entre un 2,0 y 2,5% en peso. Las bases tratadas deben tener suficiente ligante como para mantener el material ligado y brindar estabilidad. En ambos casos debe usarse material de filtro como subbase para evitar que esta base drenante se contamine con finos provenientes de la subrasante. Alternativamente se puede usar un geotextil. El espesor mínimo para bases granulares drenantes es 4" (10 cm). Este espesor debe ser suficiente para permitir que el agua vaya hacia drenes colectores laterales. Esta base permeable se debe extender como mínimo entre 0,30 y 1,00 m afuera del borde del pavimento para proveer una superficie estable para la pavimentadora, aunque normalmente se prefiere extenderla por debajo de la totalidad de las bermas.

Tabla 22 Condiciones que debe cumplir una base permeable.

Tamiz	% Pasando
	ASTM N°57
1,5"	100
1,0"	95-100
3/4"	----
1/2"	25-60
3/8"	----
N°4	0-10
N°8	0-5
N°10	----
N°16	----
N°50	----
N°200	0-2

Fuente: Manual de diseño para pavimentos método de AASHTO 93.

El módulo de la base depende del soporte brindado por la subrasante. Con esta expresión se puede calcular un módulo medio:

$$E_{\text{base}} = K * E_{\text{subrasante}}$$

Tabla 23 Coeficiente K que es función del E subrasante

K	$E_{\text{subrasante}}$ MPa (PSI)
3,5-4,8	21 (3000)
2,4-2,7	41(6000)
1,8-1,9	83 (12000)
1,6-1,8	138 (20000)
1,5-1,7	207 (30000)

Fuente: Manual de diseño para pavimentos método de AASHTO 93.

Apariencia Piedra ASTM N°57 para base de Sistema de pavimento permeable con adoquines Teknodren.

Ilustración 15 Apariencia Piedra ASTM N°57 para base de Sistema de pavimento permeable



Fuente: Manual técnico de productos de concreto Costa Rica.

Apariencia Piedra ASTM N°2 para subbase de Sistema de pavimento permeable con adoquines Teknodren

Ilustración 16 Apariencia Piedra ASTM N°2 para subbase de Sistema de pavimento



Fuente: Manual técnico de productos de concreto Costa Rica.

Tabla 24 Condiciones de una granulometría permeable para subbase, base y cama de adoquín respectivamente.

Rangos que debe cumplir una granulometría de una estructura de pavimento permeable.					
SUB BASE		BASE		CAMA DE ADOQUIN	
ASTM N 2		ASTM N 57		ASTM N 8	
MALLA	%PASANDO	MALLA	%PASANDO	MALLA	%PASANDO
75 mm	100	37,5 mm	100	12,5 mm	100
53 mm	90-100	25 mm	95-100	9,5 mm	85-100
50 mm	35-70	12,5 mm	25-60	4,75 mm	10-30
37,5 mm	0-15	4,75 mm	0-10	2,36 mm	0-10
19 mm	0-5	2,36 mm	0-5	1,18 mm	0-5
N°200	0-2	N°200	0-2	N°200	0-2

Fuente: Ficha técnica productos de concreta Costa Rica "PC"

Para el tránsito vehicular, los espesores mínimos recomendados por el ICPI son de 4 cm para la cama, 10 cm para la base y 15 cm para la subbase.

Para aplicaciones peatonales puede usarse solo la base sin subbase, con un espesor mínimo de 15 cm.

En todas las aplicaciones, las capas de cama, base y subbase deben ser compactadas por medios vibratorios para conseguir la mayor densidad posible sin quebrar o dañar las capas de agregados.

Tablas de diseño para adoquines Teknodren.

De acuerdo con la metodología descrita en los apartados anteriores, se calcula la siguiente tabla que considera los siguientes parámetros:

- Vida útil de 20 años
- Índice de servicio inicial P_i de 4,2
- Índice de servicio final P_f de 2,5

- Confiabilidad R de 80 %
- Desviación normal estándar ZR de -0,842
- Desviación estándar global S0 de 0,45
- Adoquín y cama base a1 de 0,30
- Base granular a2 de 0,09
- Subbase granular a3 de 0,06
- Adoquín de 80 mm
- Espesor de la capa de cama para el adoquín de 5 cm
- Módulo de resiliencia MR de la subrasante.

Los pavimentos permeables normalmente se han usado en parqueos, calles secundarias donde el tráfico es menor de 1.000.000 ESAL y zonas con velocidades de 60 km/h.

Tabla 25 Espesores de los distintos elementos que componen la carpeta de rodamiento según diseños realizados por PC Costa Rica.

		ESALs	10,000	20,000	50,000	100,000	200,000	500,000	1,000,000	2,000,000	5,000,000	10,000,000	
Drenaje		Ti	5.20	5.55	6.30	6.84	7.43	8.29	9.00	9.77	10.90	11.84	
		Tipo de capa											
Categoría 1	Bueno	Adoquín y cama de arena	85	85	85	85	85	85	85	85	85	85	85
		Base granular gradada	100	100	100	100	100	150	200	150	200	150	150
		Sub base granular gradada	0	0	0	0	0	0	0	175	300	400	400
	Regular	Adoquín y cama de arena	85	85	85	85	85	85	85	85	85	85	85
		Base granular gradada	100	100	100	100	100	175	150	150	150	150	150
		Sub base granular gradada	0	0	0	0	0	0	150	200	350	450	450
	Malo	Adoquín y cama de arena	85	85	85	85	85	85	85	85	85	85	85
		Base granular gradada	100	100	100	100	125	200	150	150	150	150	150
		Sub base granular gradada	0	0	0	0	0	0	150	250	400	500	500
Categoría 2	Bueno	Adoquín y cama de arena	85	85	85	85	85	85	85	85	85	85	85
		Base granular gradada	100	100	100	100	100	175	150	150	150	150	150
		Sub base granular gradada	0	0	0	0	0	0	150	200	350	450	450
	Regular	Adoquín y cama de arena	85	85	85	85	85	85	85	85	85	85	85
		Base granular gradada	100	100	100	100	125	200	150	150	150	150	150
		Sub base granular gradada	0	0	0	0	0	0	150	250	400	500	500
	Malo	Adoquín y cama de arena	85	85	85	85	85	85	85	85	85	85	85
		Base granular gradada	100	100	100	150	175	150	150	150	150	150	150
		Sub base granular gradada	0	0	0	0	0	150	250	375	525	650	650
Categoría 3	Bueno	Adoquín y cama de arena	85	85	85	85	85	85	85	85	85	85	85
		Base granular gradada	100	100	100	100	125	200	150	150	150	150	150
		Sub base granular gradada	0	0	0	0	0	0	150	250	400	500	500
	Regular	Adoquín y cama de arena	85	85	85	85	85	85	85	85	85	85	85
		Base granular gradada	100	100	100	150	175	150	150	150	150	150	150
		Sub base granular gradada	0	0	0	0	0	150	250	375	525	650	650
	Malo	Adoquín y cama de arena	85	85	85	85	85	85	85	85	85	85	85
		Base granular gradada	100	100	150	200	100	150	150	150	150	150	150
		Sub base granular gradada	0	0	0	0	225	275	400	500	675	825	825
Categoría 4	Bueno	Adoquín y cama de arena	85	85	85	85	85	85	85	85	85	85	85
		Base granular gradada	100	100	100	150	175	150	150	150	150	150	150
		Sub base granular gradada	0	0	0	0	0	150	250	375	525	650	650
	Regular	Adoquín y cama de arena	85	85	85	85	85	85	85	85	85	85	85
		Base granular gradada	100	100	150	200	100	150	150	150	150	150	150
		Sub base granular gradada	0	0	0	0	225	275	400	500	675	825	825
	Malo	Adoquín y cama de arena	85	85	85	85	85	85	85	85	85	85	85
		Base granular gradada	100	100	175	100	100	150	150	150	150	150	150
		Sub base granular gradada	0	0	0	175	275	325	450	575	750	900	900
Categoría 5	Bueno	Adoquín y cama de arena	85	85	85	85	85	85	85	85	85	85	85
		Base granular gradada	100	100	125	175	100	150	150	150	150	150	150
		Sub base granular gradada	0	0	0	0	200	225	350	450	625	750	750
	Regular	Adoquín y cama de arena	85	85	85	85	85	85	85	85	85	85	85
		Base granular gradada	100	100	175	100	100	150	150	150	150	150	150
		Sub base granular gradada	0	0	0	175	275	325	450	575	750	900	900
	Malo	Adoquín y cama de arena	85	85	85	85	85	85	85	85	85	85	85
		Base granular gradada	100	150	200	100	100	150	150	150	150	150	150
		Sub base granular gradada	0	0	0	250	325	400	525	650	825	975	975
Categoría 6	Bueno	Adoquín y cama de arena	85	85	85	85	85	85	85	85	85	85	85
		Base granular gradada	100	100	175	100	100	150	150	150	150	150	150
		Sub base granular gradada	0	0	0	175	275	325	450	575	750	900	900
	Regular	Adoquín y cama de arena	85	85	85	85	85	85	85	85	85	85	85
		Base granular gradada	100	150	200	100	100	150	150	150	150	150	150
		Sub base granular gradada	0	0	0	250	325	400	525	650	825	975	975
	Malo	Adoquín y cama de arena	85	85	85	85	85	85	85	85	85	85	85
		Base granular gradada	150	200	100	100	100	150	150	150	150	150	150
		Sub base granular gradada	0	0	250	350	450	550	675	800	1000	1150	1150
Categoría 7	Bueno	Adoquín y cama de arena	85	85	85	85	85	85	85	85	85	85	85
		Base granular gradada	100	125	200	100	100	150	150	150	150	150	150
		Sub base granular gradada	0	0	0	225	300	375	500	625	800	950	950
	Regular	Adoquín y cama de arena	85	85	85	85	85	85	85	85	85	85	85
		Base granular gradada	125	175	100	100	100	150	150	150	150	150	150
		Sub base granular gradada	0	0	225	300	425	500	625	750	950	1100	1100
	Malo	Adoquín y cama de arena	85	85	85	85	85	85	85	85	85	85	85
		Base granular gradada	175	100	100	100	100	150	150	150	150	150	150
		Sub base granular gradada	0	175	300	400	525	625	750	900	1100	1250	1250
Categoría 8	Bueno	Adoquín y cama de arena	85	85	85	85	85	85	85	85	85	85	85
		Base granular gradada	100	150	200	100	100	150	150	150	150	150	150
		Sub base granular gradada	0	0	0	250	325	400	525	650	825	975	975
	Regular	Adoquín y cama de arena	85	85	85	85	85	85	85	85	85	85	85
		Base granular gradada	125	175	100	100	100	150	150	150	150	150	150
		Sub base granular gradada	0	0	225	300	425	500	625	750	950	1100	1100
	Malo	Adoquín y cama de arena	85	85	85	85	85	85	85	85	85	85	85
		Base granular gradada	175	100	100	100	100	150	150	150	150	150	150
		Sub base granular gradada	0	175	300	400	525	625	750	900	1100	1250	1250

Fuente: Manual técnico de productos de concreto Costa Rica

4.3. Guía de construcción para un pavimento de adoquín permeable.

La instalación del sistema Teknodren debe hacerse siguiendo una serie de pasos en orden y de forma adecuada, para garantizar su correcto funcionamiento. A lo largo de las etapas del proceso constructivo es necesario cuidar que la maquinaria que se utiliza no incorpore barro o material contaminado a las capas que conforman la estructura del pavimento. Antes de comenzar la instalación es necesario tener listas las siguientes actividades:

- Corte de la gaveta para la estructura.
- Confinamientos perimetrales.
- Protección lateral del terreno con barreras (como el sarán) para evitar el ingreso de sedimentos.
- En época lluviosa, la colocación de drenajes para evacuar el exceso de agua sobre la subrasante.
- Ensayos de CBR en sitio para garantizar que la capacidad del suelo corresponda al valor de diseño.

Las etapas del proceso constructivo básicamente se dividen en ocho actividades: excavación, colocación del geotextil, colocación de drenajes, colocación de subbase, colocación de base, colocación de cama, instalación de Teknodren y sellado de juntas.

Excavación de la gaveta y colocación del sistema que ayuda a la estabilidad lateral.

Se debe de realizar la excavación correspondiente según con el trazo que vaya a requerir el sistema completo del pavimento de adoquín permeable, así como la gaveta correspondiente en donde se requiera la colocación de la tubería drenante, además de la excavación se debe realizar la construcción del cordón y caño o colocación del bordillo según se adapte a las condiciones del diseño.

Compactación del suelo

Es necesario mantener la capacidad de infiltración del suelo, por lo que se debe evitar la compactación de la subrasante para que los poros no sean sellados. Solamente se requiere la compactación de la subrasante cuando sea necesario mejorar el suelo, debido a una inadecuada capacidad o a que el nivel freático se encuentre a la altura de la subrasante (y sea necesario el abatimiento de este por medio de una base estabilizada). En estos casos, el diseñador estructural debe tomar las previsiones pertinentes y considerar que la infiltración será nula.

Colocación del geotextil.

El geotextil se coloca sobre la subrasante para generar una matriz de separación entre el suelo y la estructura del pavimento y evitar la contaminación del material granular. Por lo general, los geotextiles son suministrados en rollos de 3,5 m a 4,0 m de ancho, por lo que se hace necesario realizar un traslape que debe tener como mínimo 0,6 m en el sentido lateral y de 1 m de manera transversal. Es importante que el geotextil se extienda por encima de los confinamientos laterales hasta alcanzar la cama del adoquín, para evitar el ingreso de finos provenientes del suelo aledaño.

Colocación de drenajes.

En los diseños que consideran infiltración parcial o infiltración nula, se utilizan tubos perforados para el manejo del excedente de agua. Estos drenajes se colocan a lo largo de los puntos bajos del pavimento, con una pendiente adecuada, y se conectan a un pozo pluvial, tubería que debe ser colocada sobre una cama de material granular.

Colocación de la subbase.

La subbase debe ser de un material acorde con la granulometría N° 2 de ASTM C33, que se extiende sobre la tubería drenante en caso de necesitarla y el geotextil en capas de 15 cm como máximo para ser compactadas posteriormente por un rodillo vibratorio. Las pasadas iniciales se deben realizar con vibración para que el

material se acomode adecuadamente, pero las finales, que son para la nivelación del material granular, se hacen sin la vibración.

Colocación de la base.

El material para la base debe tener una granulometría que cumpla con la graduación N° 57, su espesor no puede ser inferior a 10 cm y se puede aplicar en una sola capa. Posteriormente al extendido del material, se debe humedecer y compactar con rodillo vibratorio. Es importante evitar la contaminación del material, limpiando las llantas de los equipos mecánicos que se utilicen para extender y compactar el agregado. La base debe encontrarse 11 cm como mínimo por debajo del nivel del pavimento terminado.

Colocación de la cama para Teknodren.

La cama para Teknodren se compone de 5 cm de material granular N° 8, que se extiende inmediatamente sobre la base de material ASTM N° 57. Esta capa no debe ser compactada. Es importante que no haya tránsito alguno sobre ella previo a la colocación del adoquín.

Instalación de Teknodren

El Teknodren se coloca inmediatamente después de la colocación de la cama de material granular, por lo que el extendido de este último debe llevar el mismo ritmo de la instalación de los adoquines de concreto. Los bordes del pavimento deben ser detallados con adoquines cortados a no menos de un tercio del tamaño del adoquín. Después de la colocación de un área suficiente de Teknodren se realiza la compactación inicial, que se lleva a cabo con dos pasadas de una plancha manual.

Sello de juntas.

Posteriormente a la compactación inicial, se realiza el sello de juntas. Se extiende el mismo material utilizado para la cama de adoquines y se llenan todas las celdas del Teknodren con ayuda de escobones. Es importante darle el mantenimiento adecuado al sello de las juntas antes de cada invierno, limpiando el

sedimento acumulado arrastrado por la escorrentía. finalmente se realiza la compactación final que se realiza de la misma manera que la inicial.

4.4. Determinación de los costos beneficios con respecto al pavimento flexible de asfalto.

Costos determinados a partir de los materiales necesarios para conformar las dos estructuras de pavimento este costo no incluye transporte ni colocación.

Tabla 26 Costo por metro cuadrado de pavimento flexible de asfalto

Costo por metro cuadrado de pavimento flexible de Asfalto.		
Material	Espesor (cm)	Precio unitario (₡)
Asfalto	10	15500,00
Base	10	1098,12
Sub base	17,5	2167,52
Total		18765,64

Fuente: Propia.

Tabla 27 Costo por metro cuadrado de pavimento flexible de adoquín permeable.

Costo por metro cuadrado de pavimento flexible de Adoquín permeable		
Material	Espesor (cm)	Precio unitario (₡)
Adoquín	8	9373,00
Cama para adoquín	13	3790,80
Base	10	1098,12
Sub base	15	2167,52
Tubo drenante	20	26359,83
Geotextil	0,15	572,00
Total		43361,27

Fuente: Propia.

Tabla 28 Costo por metro cuadrado colocado en el GAM

*Costo por metro cuadrado transportado y colocado.	
Tipo de pavimento flexible.	Costo por metro cuadrado
Asfalto.	₡32915,64 colones
Adoquín permeable.	\$90 dólares

Fuente: Propia.

***Nota:** este costo solo incluye transporte para el GAM, zonas alejadas se debe realizar una nueva cotización.

Para lograr realizar la determinación de los costos para los dos tipos de pavimentos flexibles contamos con la ayuda de algunas constructoras, plantas, tajos y demás compañías que se encargaban de distribuir alguno de los elementos necesarios para poder realizar la conformación de cada una de las estructuras de pavimento como lo son:

Constructora Gonzalo Delgado: facilito una oferta de compra sobre lo que es el sistema de pavimento permeable TEKNODREN, sistema que fue construido en el año 2017, pero al realizar llamadas telefónicas a PC se determinó que los precios no varían por lo que se trabajó con un precio similar que fue estipulado en la oferta figura 25 que se muestra en los anexos de esta investigación.

Cemex: luego de contactar con personal de Cemex se logró solicitar una oferta de compra sobre la base y subbase, oferta que es presentado en la figura 21 que se encuentra en la sección de los anexos de esta investigación.

Meco: al enviarle un correo solicitando información y costos se realizó la cotización de la piedra quintilla que es utilizada como cama para el adoquín y también el sello de las juntas, oferta que nos enviaron al correo y que es presentada en la figura 24 que se encuentra en los anexos de esta investigación.

Durman: por medio de Durman se obtuvo lo que es información y costos sobre lo que es la tubería drenante “drena flex” información que no la adjuntaron al correo y es presentada en los anexos de esta investigación, figura 23.

Comentado [MOU3]: Supongo que esto es de la tabla de arriba que es donde hay un asterisco

Comentado [MOU4]: No coincide

Amanco: empresa que facilitó caracterización y costos por metro cuadrado de geotextil NT 2000 luego de que se contactara por medio de un correo, datos que se muestran en la figura 20 en la sección de los anexos.

Productos de concreto (PC): mediante un correo electrónico dicha empresa brindó el número telefónico de un ingeniero encargado acerca del sistema "TEKNODREN.", el cual se encargó de aconsejados sobre parámetros a considerar en este sistema, como también brindarnos el precio por metro cuadrado construido dentro del GAM, valores que no los brindo vía telefónica y que son especificados en la tabla 28.

CBZ Asfaltos: dicha compañía se encargó de brindar el costo por metro cuadrado de asfalto con un espesor entre los 7 cm y 10 cm mediante una oferta de compra enviada por teléfono que se adjunta en los anexos de la investigación figura 22 y además nos brindó el costo por metro cubico en la planta mediante una llamada telefónica, el cual se muestra en la tabla 26

4.5. Ejemplo de diseño aplicando la metodología desarrollada en los apartados anteriores.

4.5.1. Diseño estructural para el ejercicio de adoquín permeable.

Datos.

- $W_{18} = 1000.000 \text{ esal's}$
- $MR_{\text{base}} = 35444,84 \text{ PSI}$
- $MR_{\text{subbase}} = 15409,71 \text{ PSI}$
- $CBR_{\text{subrasante}} = 6,0\% , MR = 8000 \text{ PSI}$
- $\text{CONFIABILIDAD} = 80\%$
- $S_0 = 0,45$
- $\Delta_{\text{PSI}} = 4,2 - 2,5 = 1,7$
- $\text{ESPESOR DEL ADOQUIN} = 3,2''$
- $a_1 = 0,30$

Solución.

Paso 1 Cálculo del número estructural de la estructura de pavimento.

Datos.

- $W_{18} = 1000.000 \text{ esal's}$
- CONFIABILIDAD = 80%
- $S_0 = 0,45$
- $\Delta_{\text{PSI}} = 4,2 - 2,5 = 1,7$
- MR = 8000 PSI

A partir de estos valores y el Abaco del diseño estructural de pavimento flexible es posible determinar el SN.

SN =3,15

Paso 2 Determinar el número estructural SN del adoquín y la cama.

Datos.

- $W_{18} = 1.000.000 \text{ esal's}$
- CONFIABILIDAD = 80%
- $S_0 = 0,45$
- $\Delta_{\text{PSI}} = 4,2 - 2,5 = 1,7$
- $SN_1 = 2,0$
- $MR_{\text{base}} = 35444,84 \text{ PSI}$
- $a_1 = 0,30$
- Espesor adoquin mas cama = 5,2"

$$SN_1 = a_1 * D_1$$

$$D_1 = \frac{2,0}{0,30} = 6,7'' \sim 3,2''$$

$$D_1 \sim 3,2$$

$$SN_1^* = 0,30 * 3,2 = 0,96$$

Paso 3 Determinar el número estructural SN2 y espesor de la base.

Luego de colocar los datos correspondientes en el Abaco se determinó SN₂

Datos.

- $W_{18} = 1000.000 \text{ esal's}$
- CONFIABILIDAD = 80%
- $S_0 = 0,45$
- $\Delta_{PSI} = 4,2 - 2,5 = 1,7$
- $MR_{\text{sub base}} = 15409,71 \text{ PSI}$
- $m_2 = 1,0$
- $SN_2 = 2,5$

$$SN_2 = a_2 * D_2 * m_2$$

$$SN_2 - SN_1 = a_2 * D_2 * m_2$$

$$\frac{2,5 - 0,96}{0,156 * 1,0} = 9,87'' \sim 10''$$

$$SN_2^* = 0,56 * 10'' * 1,00 = 1,56$$

Paso 4 Determinar el número estructural SN3 y espesor de la subbase.

Luego de colocar los datos correspondientes en el Abaco se determino SN₃

Datos.

- $W_{18} = 1000.000 \text{ esal's}$
- CONFIABILIDAD = 80%
- $S_0 = 0,45$
- $\Delta_{PSI} = 4,2 - 2,5 = 1,7$
- $m_3 = 1,0$

- $CBR_{\text{subrasante}} = 6,0\%$, $MR = 8000$ PSI
- $SN_3 = 3,15$

$$SN_3 = a_3 * D_3 * m_3$$

$$SN_3 - (SN_2 + SN_1) = a_3 * D_3 * m_3$$

$$\frac{3,15 - (1,56 + 0,96)}{0,112 * 1,0} = 5,625 \text{ "}, 6,0"$$

$$SN_3^* = 0,112 * 6,0 * 1,00 = 0,672$$

Paso 5 Determinar si con los espesores propuestos cumple el diseño.

$$SN^* = SN_1 + SN_2^* + SN_3^*$$

$$SN^* = 0,96 + 1,56 + 0,672 = 3,192$$

$SN^* > SN$ por lo tanto este diseño cumple.

4.5.2. Ejercicio de pavimento flexible convencional (asfalto), utilizando las mismas variables que para el pavimento de adoquín permeable.

Datos

- $W_{18} = 1000.000$ esal's
- $CBR_{\text{base}} = 85\% - 100\%$, $MR = 30000$ PSI
- $CBR_{\text{sub base}} = 85\% - 100\%$, $MR = 18000$ PSI
- $CBR_{\text{subrasante}} = 6,0\%$, $MR = 8000$ PSI
- CONFIABILIDAD = 80%
- $S_0 = 0,45$
- $\Delta_{\text{PSI}} = 4,2 - 2,5 = 1,7$
- $m_2 = 1,0$
- $m_3 = 0,7$

Se determinará el SN y el espesor correspondiente para cada una de las capas.

Luego de colocar los datos correspondientes en el Abaco se determinaron los SN correspondientes a cada capa.

Tabla 29 Elementos que componen un pavimento flexible de asfalto

Material	ai*	SN	M	D (cm)
ASFALTO	0,42	1,6	-	10
BASE	0,138	2,1	1,0	10
SUB BASE	0,13	2,9	0,70	17,5
SUBRASANTE	-			

Fuente: Propia.

Al igual que con el pavimento de adoquín permeable el cálculo de los espesores que componen la estructura final de pavimentos se determinó de la misma manera.

El valor del SN en los dos diseños fue determinado por medio del Abaco de AASHTO 93, valor que también pudo ser determinado con la siguiente ecuación.

$$\text{Log}_{10} W_{18} = Z_r S_o + 9.36 \text{Log}_{10} (\text{SN} + 1) - 0.20 + \frac{\text{Log}_{10} \left(\frac{\Delta \text{PSI}}{4.2 - 1.5} \right)}{\frac{0.40 + 1094}{(\text{SN} + 1)^{5.19}}} + 2.32 \text{Log}_{10} M_r - 8.07$$

*Nota los valores del coeficiente estructural "ai" son determinados a partir de las gráficas de AASHTO 93, o a partir de las fórmulas descritas en la metodología, provenientes del manual AASHTO 86.

$$\text{SN}_1 = a_1 * D_1$$

$$\text{SN}_2 = a_2 * D_2 * m_2$$

$$\text{SN}_3 = a_3 * D_3 * m_3$$

4.5.3. Diseño hidráulico para el pavimento de adoquín permeable.

Datos.

- Zona: Limón.
- Periodo de retorno:10 años.
- Espesor subbase:0,15 m.
- Porosidad del material:0,30.
- Área del pavimento permeable:2450 m².
- Área total circundante :20450 m².
- Coeficiente de escurrimiento superficial del área total aportante:0,35.
- Coeficiente de seguridad que afecta la capacidad de infiltración:0,75 .

Determinar el volumen de almacenamiento de esta estructura.

$$V_{\text{almacenamiento}} = e * A_e * p$$

$$V_{\text{almacenamiento}} = 0,15 * 2450 * 0,30 = 110,25 \text{ m}^3$$

$$V_{\text{alm}} = \text{Max} [V_{\text{afl}}(t) - V_{\text{inf}}(t)]$$

$$V_{\text{afl}}(t) = 0,00125 * C * I_t * A * t$$

$$V_{\text{inf}}(t) = 0,001 * C_s * f * A_e * t$$

A partir de estas dos ecuaciones se despeja la capacidad de infiltración (f) que debería tener el suelo para poder evacuar la cantidad de agua que es infiltrada y de esta forma se puede saber que caudal es el que tiene que evacuar los drenes.

$$f = \frac{0,00125 * C * A * I_t * t - V_{\text{alm}}}{0,001 * C_s * A_e * t}$$

Para poder determinar la infiltración se deben de realizar una serie de iteraciones respecto a la intensidad y duración de la lluvia y de esta forma utilizar la mayor.

En este caso el valor de intensidad y duración máxima fueron 99 mm/h y 0.42 h respectivamente.

$$f = \frac{0,00125 * 0,35 * 20450 * 99 * 0,42 - 110,25}{0,001 * 0,75 * 2450 * 0,42}$$

$$f = 339,18 \text{ mm/h}$$

$$f = 339,18 \text{ mm/h} * \left(\frac{1 \text{ m}}{1000 \text{ mm}}\right) * \left(\frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}}\right) = 9,42 \times 10^{-5} \text{ m/s}$$

Con la tasa estimada se puede determinar la capacidad de infiltración en el terreno, la que debe ser reemplazada por la capacidad de salida del dren longitudinal.

Caudal de salida.

$$Q_{\text{SALIDA}} = f * A_e$$

$$Q_{\text{SALIDA}} = 9,42 \times 10^{-5} \frac{\text{m}}{\text{s}} * 2450 \text{ m}^2 * 1000 = 230,79 \text{ l/s}$$

Espaciamiento de la tubería.

$$E^2 = \frac{4 * k * h}{1} * (h + 2 * d) - 8 * (h + d)^2 * \frac{h}{3 * h + d}$$

$$h = 0,15 \text{ m}$$

$$d = 0,05 \text{ m}$$

$$k = 1,09 \text{ cm/h} * \left(\frac{10 \text{ mm}}{1 \text{ cm}}\right) * \left(\frac{24 \text{ h}}{1 \text{ día}}\right) = 261,6 \text{ mm/día.}$$

$$E = \sqrt{4 * 261,6 * 0,15 * (0,15 + 2 * 0,05) - 8 * (0,15 + 0,05)^2 * \frac{0,15}{3 * 0,15 + 0,05}}$$

$$E = 6,3 \text{ m}$$

Dimensionamiento de la tubería de evacuación Mediante Manning.

$$Q = \frac{A * R^2 * S^{\frac{1}{2}}}{n}$$

Donde:

- Q: Caudal total drenado, en m³/s
- A: Área de la sección transversal de la tubería, en m².
- R: Radio hidráulico de la sección transversal de la tubería, en m.
- S: Pendiente de la línea de energía, en m/m.
- n: Coeficiente de rugosidad de Manning, 0,009 para PVC, proviene del manual técnico de Durman.

En este caso se va a considerar que el tubo va a trabajar a su máxima capacidad es decir tubo lleno, 100%.

$$A = \frac{\pi}{4} * (0,2032)^2 = 0,0324293 \text{ m}^2$$

$$P = 2\pi * \left(\frac{0,2032}{2}\right) = 0,638372 \text{ m}$$

$$R = \frac{0,0324293 \text{ m}^2}{0,638372 \text{ m}} = 0,0508 \text{ m}$$

$$S = 5,5\%$$

$$n = 0,009$$

$$Q = \frac{0,0324293 * 0,0508^{\frac{2}{3}} * 5,5\%^{\frac{1}{2}}}{0,009} = 0,11591 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q = 0,11591 \text{ m}^3/\text{s} * 1000 = 115,91 \text{ l/s}$$

En este caso si se colocan 2 drenes longitudinales de 20 cm de diámetro estos son capaces de evacuar toda el agua que debiese ser infiltrada, con respecto al espaciamiento se indica que debe ser de 6,3 m entre ellos en este caso se podría

poner uno a cada lado de la vía ya que esta es de 7 m de ancho y las zanjas en donde se colocan los tubos es de 0.6 m más el diámetro de la tubería.

Q TOTAL =2*115,91 l/s=231,82 l/s > 230,79 l/s por lo tanto cumple con la implementación de dos drenes longitudinales en el sentido de la vía.

Cálculo de la velocidad del flujo dentro de la tubería drenante.

$$Q = A * V$$

$$Q=115,91\text{L/s}$$

$$A=0,0324 \text{ m}^2$$

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

$$V = \frac{0,11591}{0,0324} = 3,58 \text{ m/s}$$

Cálculo del flujo de transferencia de la estructura de pavimento hacia la tubería.

$$Q_{\text{perf}} = N * C_d * A * (2 * g * h)^{0,5}$$

Donde:

- Q_{perf}: Flujo a través de las perforaciones, en m³/s por metro de tubería.
- N = Número de perforaciones en un metro de tubería.
- C_d = 0,8 Coeficiente de descarga recomendado.
- A= Superficie filtrante en (m²) para 1 metro de tubería con D* =200 mm. respetando disposición de ranuras que deben cumplir los tubos de drenaje, según Manual de Carreteras.
- g=9,81 m²/s Aceleración de la gravedad en m²/s
- h=0,005 m Máxima altura del agua sobre el orificio recomendada en m.

Dimensiones de las ranuras de tubería de pared doble de 200 mm de diámetro, con ranuras en los 360° de la tubería.

- Ancho de la ranura 3 mm.
- Largo de la ranura 18 mm.
- Total, de ranuras en su perímetro 4.
- Separación entre ranuras en el sentido longitudinal a la tubería 15 mm.
- Total, de ranuras por metro de tubería 400.

$$A_{\text{ranura}} = \text{Ancho}_{\text{ranura}} \times \text{Largo}_{\text{ranura}}$$

$$A_{\text{ranura}} = 3 \text{ mm} \times 18 \text{ mm} = 54 \text{ mm}^2$$

$$A_{\text{ranura}} = \frac{54 \text{ mm}^2}{1000^2} = 0,000054 \text{ m}^2$$

$$Q_{\text{perf}} = 400 \times 0,8 \times 0,000054 \times (2 \times 9,81 \times 0,005)^{0,5}$$

$$Q_{\text{perf}} = 0,0054 \text{ m}^3/\text{s} \times 1000 = 5,41 \text{ L/s} \times \text{metro de tubería.}$$

Este valor del caudal es el que la estructura de pavimento puede transferir a la tubería drenante por metro lineal.

Cálculo del Tiempo de vaciado.

$$t_m = \frac{p \times es}{C_s \times f}$$

$$P=0,30$$

$$es=150 \text{ mm}$$

$$C_s=0,75$$

$$f=339,18 \text{ mm/h}$$

$$t_m = \frac{0.30 \cdot 150}{0.75 \cdot 340.63} = 0,18 \text{ horas.}$$

Como ya se tiene la capacidad total de la tubería “la cantidad máxima de caudal a evacuar” se procede a verificar si el espesor propuesto en el diseño estructural cumple con el hidráulico.

Verificación si el espesor estructural cumple con el hidráulico.

Capacidad de dos tubos de 8 pulgadas = 231.81 l/s

$$Q_{\text{SALIDA}} = f \cdot A_e$$

$$Q_{\text{SALIDA}} = \frac{231.82}{1000} = 0,2318 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$A_e = 2450 \text{ m}^2$$

$$\frac{Q_{\text{salida}}}{A_e} = f$$

$$f = 0,000095 \text{ m/s}$$

$$f = 340,63 \text{ mm/h}$$

$$f = \frac{0,00125 \cdot C \cdot A \cdot l \cdot t - V_{\text{alm}}}{0,001 \cdot C_s \cdot A_e \cdot t}$$

$$340,63 = \frac{0,00125 \cdot 0,35 \cdot 20450 \cdot 99 \cdot 0,42 - V_{\text{alm}}}{0,001 \cdot 0,75 \cdot 2450 \cdot 0,42}$$

$$V_{\text{alm}} = 109,49 \text{ m}^3$$

$$e = \frac{V_{\text{almacenamiento}}}{A_e \cdot p}$$

$$e = \frac{109,49}{2450 \cdot 0,30} = 0,149 \text{ m}$$

En este caso el volumen de almacenamiento también fue determinado realizando iteraciones con la intensidad y duración, al igual que para el cálculo de la tasa de infiltración estos dos valores coinciden con los anteriores respectivamente $I=99 \text{ mm/h}$, $t=0,42 \text{ h}$.

Valor que coincide con el valor determinado por el diseño estructural, en caso de que este espesor hubiese sido mayor el diseño final se realizaría con este.

*Nota: En el diseño final siempre se toma el máximo espesor entre el cálculo estructural y el hidráulico.

CAPÍTULO V
ANÁLISIS DE RESULTADOS.

Análisis de los espesores que componen estos dos sistemas de pavimentos flexibles.

Luego de realizar los cálculos correspondientes para cada uno de los diseños según parámetros y ecuaciones necesarias se determinaron los siguientes espesores para pavimento de adoquín permeable: D1: 8 cm, D2: 25 cm, D3: 15 cm, mas 5cm de cama para colocar adoquín , mientras que para pavimento flexible de asfalto: D1 :10 cm, D2: 10 cm D3: 17,5cm. Espesores que fueron determinados bajo los mismos parámetros, estos resultados nos indican que la estructura de adoquín permeable tiene que ser más robusta para poder soportar los mismos parámetros de diseño a los que se somete el de asfalto.

Parámetros de diseño para pavimento permeable.

Se determino que al realizar un diseño de pavimento permeable tiene algunas diferencias en relación con uno convencional, como lo es la selección de agregados que el porcentaje de finos debe ser inferior al 2% es decir casi nulo. Debe cumplir con lo establecido por las normas y reglamentos para que no vaya a generar problemas con el tiempo y además para que su vida útil no se acorte, en este caso las granulometrías que pueden ser utilizadas se muestran en la tabla 24, las cuales indican que no poseen porcentaje de finos.

Condiciones de permeabilidad que debe presentar una estructura de este tipo debe de ser como mínimo 0,35 cm/s, si el valor es inferior de no se debe utilizar, ya que la capacidad de drenar el agua infiltrada puede ser muy reducida generando una superficie saturada la mayoría del tiempo, en este caso se trabaja con granulometrías que poseen una permeabilidad de 0,70 cm/s.

Al realizar análisis sobre el tamaño de las partículas y consultar a profesionales con conocimiento sobre este tema, se estableció que las granulometrías que se adaptan de manera correcta a la: subbase, base y cama para adoquín deben cumplir con los siguientes rangos, ver Tabla 24 “condiciones de una granulometría

permeable para subbase, base y cama de adoquín respectivamente”, las cuales son estipuladas por las normas: ASTM N 2, ASTM N 57 y ASTM N 8.

Y en lo que respecta con la implementación del geotextil, este debe ser del tipo no tejido ya que la función de este consiste en permitir solamente el paso del flujo de agua y no el ingreso de finos en la estructura, ya que si estos ingresan a la estructura de pavimento pueden generar inconvenientes, como la colmatación de esta, generando que el flujo del agua sea obstruido y por ende dejaría de cumplir la función por la cual fue diseñada. Y a la vez cumplir con la protección de la gaveta contra posible erosión que se podría presentar con el tiempo. Los parámetros que debe cumplir según las especificaciones técnicas “MARV de AMANCO” el geotextil NT 2000, se adjuntan en los anexos de esta investigación, en el apartado 7.1.

Para finalizar con el análisis de parámetros, cabe mencionar que el tubo drenante o “drena flex” debe ser de pared doble corrugada por fuera y lisa por dentro, para que cumpla con las rugosidades establecidas por la n de Manning, según resultados de laboratorio realizados por la empresa Durman, indican que el valor de la n para flujo limpio puede andar en un rango entre 0,0088 y 0,0092. Adicional usar tubería de pared doble, tiene como objetivo que pueda ser utilizada ante cargas vivas y muertas, como lo es en una estructura de pavimento, parámetros que pueden ser determinados por medio del manual técnico de Durman, en esta investigación no se contempló, ya que no es parte de los objetivos de la misma ,por lo que los diseños se realizaron mediante rangos ya definidos por la compañía Durman, que recomienda que la tubería este colocada a una profundidad entre 0,45 m y 0,90 m, altura que es medida desde la corona del tubo hasta la carpeta de rodamiento que es donde son aplicadas las cargas.

Los parámetros para esta tubería son estipulados en la ficha técnica del producto y el manual técnico de colocación de este.

Partiendo de lo estipulado anterior mente, es necesario guiarse en la norma ASTM F-949, que son presentadas en los anexos de esta investigación, que se encuentra en los apartados 7.2 y 7.3 de los anexos.

Dimensionamiento de la tubería.

Luego de que se obtuvo el espesor adecuado para la almacenamiento de agua se procedió a realizar el cálculo del dimensionamiento de la tubería mediante la ecuación de Manning, con la cual obtuvimos que se requiere 2 tubos drenantes de 8 pulgadas de pared doble, a partir de este diseño se procede a calcular la velocidad del flujo del agua interna en la tubería y obtuvimos un valor de 3,58 m/s, dato que cumple por lo especificado en el manual técnico de Durman para flujo limpio el cual indica que esta velocidad debe ser entre 0,5 m/s y 7m/s.

Tiempo de drenado.

Con respecto a esta variable se debe contemplar en los diseños ya que mucho del comportamiento de una estructura permeable depende de esta, AASHTO estipula en su manual de diseño que un sistema de este tipo debe ser capaz de drenar toda el agua acumulada en un lapso de horas, alrededor de 2 horas, tiempo que es tomado a partir del momento en que se detiene la lluvia y hasta que la estructura ya se encuentre libre de agua en su interior dato que es determinado a partir de la porosidad efectiva del relleno, espesor del relleno, capacidad de infiltración de a subrasante o capacidad de salida de la tubería colocada en caso de contar con una superficie impermeable, además se debe contemplar un factor de seguridad con respecto a la colmatación de la estructura. Para este diseño se analizaron las intensidades y duraciones de lluvia de la zona de Limón lugar donde se determinó que la estructura de pavimento necesita un tiempo de 0,18 horas para poder evacuar el agua, lo cual cumple por lo establecido en la guía de AASHTO 93.

Análisis costo beneficio de ambos sistemas.

Al realizar la metodología de diseño y construcción se logra realizar un diseño para dos tipos de pavimentos flexibles los cuales son, adoquín permeable y con asfalto al tener estos dos diseñados, se procede a realizar dos presupuestos por metro cuadrado de estructura de pavimento, para el primer análisis de costos se contempla solo lo que es el costo de los elementos que conforman el pavimento y

para el segundo análisis se contempla los mismos elementos más el transporte y colocación, dentro del GAM valores que son especificados en las tablas 29 y 30, de manera que se puede apreciar que el asfalto tiene un valor inferior con respecto al de adoquín, lo que determina que a partir de este análisis, el implementar un sistema permeable puede ser eficiente en caso de que el diseño este enfocado en lo que es poder darle algún uso al agua que es captada durante la precipitación, como también en zonas donde la intensidad de lluvia es alta durante gran parte del año, ya que un diseño de esta magnitud permitiría reducir lo que es la escorrentía sobre la calzada de rodamiento aumentado con esto lo que es el nivel de confianza por parte de la vía hacia los conductores que transitan por rutas con características similares y además también juega un papel estético.

En cuanto a las ventajas que presenta este sistema se puede describir la vida útil de este pavimento el cual si se le da un buen mantenimiento puede ser de 25 años, mientras que para uno flexible de asfalto puede ser entre los 15 y 20 años además de que en caso de realizar algún trabajo en la estructura interna se puede realizar sin necesidad de dañar la carpeta de rodamiento ya que se puede quitar los adoquines para realizar el trabajo y luego se colocan de nuevo, en cambio en el asfalto si se requiere realizar un corte en la calzada y luego un bache para remplazar lo removido por lo que se puede comenzar a generar los daños.

En cuanto al mantenimiento que requiere este sistema a lo largo de su vida útil es estar realizando una limpieza "deshierbando" la vegetación que crece en las juntas ya que esto genera una obstrucción de los fluidos con el paso del tiempo, y siempre es recomendable, después del primer invierno, hacer un nuevo llenado de juntas. Esto se debe a que es normal que al inicio de la vida del pavimento las juntas tengan cierta permeabilidad y al recibir agua y algún tipo de desechos producto de escorrentía se pueda obstruir y evitar el paso de agua.

En el caso del pavimento de asfalto si se requiere un mantenimiento que implica más costos ya que con el tiempo se generan agrietamientos o desprendimiento de agregados producto del desgaste.

Por lo que en este análisis se puede evidenciar producto de investigaciones que el costo inicial entre estos dos pavimentos es mayor para el de adoquín pero que con el paso del tiempo este costo puede ser opuesto ya que el mantenimiento que requiere el de asfalto puede genera un incremento que supere el costo con respecto al de adoquín.

CAPITULO VI
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. Conclusiones.

1. Se logró investigar sobre lo que es una estructura de pavimento permeable, desde el punto de vista del diseño que con lleva, elementos que la componen, construcción y su funcionamiento frente a distintos parámetros.

2. Se determinó que en la mayoría de los casos los pavimentos permeables son utilizados bajo condiciones como las siguientes, normalmente se han usado en parqueos, calles secundarias donde el tráfico es menor de 1.000.000 ESAL y zonas con velocidades de 60 km/h.

3. Se logró realizar una propuesta metodológica para, lo que es el diseño de un pavimento flexible mediante la implementación de adoquín permeable como carpeta de rodamiento, en la cual se estipularon los diseños estructurales e hidráulicos necesarios para poder llevar a cabo el diseño de un sistema de este tipo, el cual fue desarrollado mediante lineamientos presentados en la guía de diseño AASHTO 86 y 93 para la parte estructural, y en cuanto al diseño hidráulico se obtuvo mediante revisión de normas e investigaciones chilenas.

4. En lo que respecta a la guía de construcción se estipularon una serie de trabajos y estudios preliminares que se deben realizar de manera anticipada, además una serie de pasos para lograr una estructura de pavimento permeable, se determinó que la construcción de este sistema se puede desarrollar mediante 8 pasos, que son estipulados en la metodología de dicha investigación y que se obtuvieron siguiendo los lineamientos que brinda la sección de adoquines del manual de productos de concreto de Costa Rica y otras fuentes de información.

5. Una vez que se realizaron los diseños se logró determinar cada uno de los espesores para los dos tipos de pavimento que fueron analizados, en el caso de adoquín permeable fueron: adoquín más cama 13, base 25 cm y para la subbase 15 cm y en el caso del asfalto fueron los siguientes: asfalto 10 cm, base: 10 cm y subbase 17,5 cm.

6. Al obtener el espesor de la subbase permeable por medio del cálculo estructural se procedió con el cálculo hidráulico del sistema, espesor que después fue comprobado en el cálculo hidráulico y el cual si cumplía ya que daba menor que el obtenido en el diseño estructural de manera que se utilizó el mayor que fue de 0,15 m para que la estructura funcionara de manera adecuada.

7. Se realizó el cálculo del tiempo de drenado de la estructura de pavimento permeable y el cual arrojó un valor de 0,18 horas.

8. Las normas ASTM fueron de gran importancia para el desarrollo de la investigación, ya que se siguieron los lineamientos estipulados con el fin de que los diseños cumplan con todo lo establecido, en el caso de la granulometría se utilizaron: ASTM N 2, ASTM N 57 Y ASTM N 8 , en el caso de la tubería : ASTM F949, Para el adoquín y el geotextil las normas son estipuladas en los anexos de esta investigación, en el apartado 7.1 y 7.4 respectivamente, ya que tienen una para cada una de las propiedades que estas deben cumplir.

9. Se determinaron los costos por metro cuadrado de dos maneras, para ambos tipos de pavimento flexible, la primera fue contemplando solo el costo de todos los elementos que conforman el metro cuadrado para cada estructura los cuales fueron: ₡18.765,64 colones para el de asfalto convencional y de: ₡43.361,29 colones para el de adoquín permeable. Y cuando se consideró transporte y colocación de los sistemas dentro del GAM fueron de: ₡32.915,64 colones para el de asfalto y de \$90 dólares para el de adoquín.

10. Se concluye con respecto a los costos que el inicial del pavimento de adoquín permeable es superior al de asfalto, pero que en cuanto al mantenimiento que estos requieren puede que se genere un cambio con respecto a los costos y que sean mayores para el de asfalto con respecto al de adoquín.

6.2. Recomendaciones

1. La implementación de un sistema de este tipo se recomienda que sea en zonas donde las cargas de tránsito no sean muy altas, un valor que se puede respetar es diseños de máximo 1,5 millones de ESALs; en caso de necesitar soportar mayor cantidad de cargas se recomienda aumentar el espesor del adoquín permeable.

2. Para aumentar la vida útil de un sistema de adoquín permeable, se debe contemplar en el diseño factores de seguridad para evitar saturaciones totales en la estructura y escorrentías superficiales.

3. Realizar la construcción de este sistema, previo de la construcción de cordón caño o bordillo, ya que esto genera mayor estabilidad lateral y por ende hace que la estructura trabaje de mejor manera ya que esta puede disipar mejor los esfuerzos producto de las cargas de tránsito, así como realizar cálculos que determinen la máxima separación longitudinal y transversal que puede presentar la vía para la colocación de separadores o bordillos.

4. Se recomienda que dicha metodología sea probada en un área pequeña, con el fin de determinar que se cumpla con todas las variables, y de esta forma garantizar que sea exitosa en construcciones de mayor área.

CAPÍTULO VII
BIBLIOGRAFÍA.

BIBLIOGRAFÍA

- 1993, A. (2019). *Diseño de pavimentos (AASHTO-93)*.
- AASHTO. (1991). *SENSITIVITY STUDY OF 1986 AASHTO GUIDE FOR DESIGN OF PAVEMENT STRUCTURES*
- AASHTO. (2019). *DISEÑO DE PAVIMENTOS (AASHTO-93)*.
- AÑAZCO, J. B. (2014). *ANÁLISIS Y DISEÑO PARA SOLUCIÓN DE AGUAS LLUVIAS*.
- BORGERT. (2018). *Cross-section of Permeable Pavement - Full Exfiltration*.
- CHILE, D. D. (2012). *MANUAL DE CARRETERAS VOLUMEN 5*.
- CHILE, M. D. (2002). *MANUAL DE CARRETERAS VOLUMEN 3*.
- de, P. d. (2015). *ANUARIO DE INFORMACION DE TRANSITO 2015*.
- de, P. d. (2015). *ANUARIO DE INFORMACION DE TRANSITO 2015*.
- Durman. (2017). *Catalogo de Infraestructura*.
- EcuRed. (2012).
- EUROADOQUIN. (2004).
- Gordillo, T. (2010). *USO DE PAVIMENTOS PERMEABLES DE ADOQUINES*.
- Grajales1, F. A. (2016). *Diseño de Adoquines de Concreto Permeable*.
- HERNÁNDEZ, J. R. (2008). *ESTUDIO, ANÁLISIS Y DISEÑO DE SECCIONES PERMEABLES*.
- LEMUS., E. V. (2008). *IMPACTO HIDROLOGICO CERO, COMPORTAMIENTO DE LOS DISPOSITIVOS Y METODOLOGIA DE SELECCION*. CUSCATLAN EL SALVADOR.

Leon, E. J. (enero 2012). *PROPUESTA DE NORMA GUATEMALTECA PARA PROCEDIMIENTO DE ENSAYO DE LABORATORIO Y CLASIFICACIÓN DE ADOQUINES DE HORMIGÓN*.

Municipal, U. d. (2016). *Propuesta para una guía de diseño de bajo*.

Pavimntos, M. C. (2002).

Pavimentos, M. C. (2002).

Pedregal. (2012). *Ecostone. adoquines*.

PLUVIAL, N. P. (NO POSEE).

Ramier. (2004).

RICA, P. D. (2018). *MANUAL TECNICO PC*.

Shackel. (1997).

SIMON, U. M. (2004). *pavimentos*.

VIALIDAD, G. D. (2000). *MANUAL DE CARRETERAS DE CHILE VOLUMEN 4*.

Comentado [MOU5]: Revisar la bibliografía de Hernandez JR ya que el título parece que no está completo

ANEXOS

7.1. En el siguiente PDF se indican las diferentes propiedades que debe de contemplar un geotextil, además de varios tipos, para esta investigación se utilizó el NT 2000.



Adobe Acrobat
Document

7.2. En el siguiente PDF se muestra la guía de instalación de Durman para la manipulación de productos como la tubería drenante TDP.



Adobe Acrobat
Document

7.3. En el siguiente PDF MANUAL TÉCNICO TUBOS PVC de Doble Pared, ASTM F949 / A ASHTO M-304 Para alcantarillado sanitario, pluvial y para carretera.



Adobe Acrobat
Document

7.4. En el siguiente PDF se muestra lo que es la ficha técnica del adoquín permeable “TEKNODREN”.



Adobe Acrobat
Document

7.5. En el siguiente PDF se adjunta lo que es la lluvia de diseño de costa rica la cual está determinada por zonas.



Adobe Acrobat
Document

7.6. La siguiente información que es adjuntada es útil para lo que es el cálculo de una geometría permeable, permeabilidad, porosidad efectiva del material, y tiempo de drenaje del relleno permeable, en esta investigación no fue utilizada ya que para determinar estos parámetros mediante este documento es necesario algunos análisis de laboratorio que no fueron posibles obtener, ya que la compañía que nos brindó las granulometrías solo contemplaba ciertos ensayos de laboratorio.

Para el análisis en lo que respecta a la geometría de la base permeable son: Pendiente longitudinal S; Pendiente transversal S_x; Espesor de capa drenante H y Ancho de base permeable W

- Longitud resultante de la base: $L_R = W[(S/S_x)^2 + 1]^{0.5}$
- Pendiente resultante de la base $S_R = (S^2 + S_x^2)^{0.5}$
- Factor de pendiente : $S_T = \frac{L_R * S_R}{H}$

Los cálculos para realizar para cuantificar las propiedades drenantes del pavimento son:

1. Suponer V_t (volumen total) = 1
2. Calcular V_s = W_s/G_s
3. Calcular V_v (volumen de vacíos) = V_t - V_s = N_{emáx} (volumen de agua que llena completamente los vacíos del material).

Tabla 30 Se selecciona la pérdida de agua C: Cantidad de agua que puede drenar por gravedad.

Material predominante	Cantidad de finos								
	<2,5			5%			10%		
	Tipo de finos			Tipo de finos			Tipo de finos		
	Filler	Limo	Arcilla	Filler	Limo	Arcilla	Filler	Limo	Arcilla
Grava	70	60	40	60	40	20	40	30	10
Arena	57	50	35	50	35	15	25	18	8

Fuente: Manual de diseño para pavimentos método de AASHTO 93

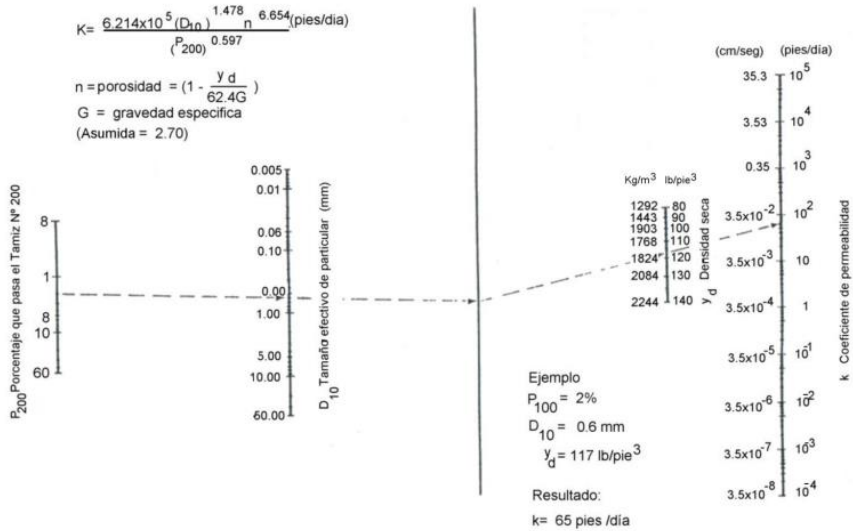
5. Calcular la porosidad efectiva: $N_e = N_{máx} C / 100$

La porosidad efectiva es un concepto muy importante, es la relación entre el volumen de agua que drena de un material bajo la acción de la gravedad y el volumen total de ese material. Es una medida de la cantidad de agua que puede ser drenada de un suelo.

6. Calcular $m = N_e * L_R^2 / Hk$

La permeabilidad k se puede determinar con el ábaco de la siguiente figura. El tiempo de drenaje y los niveles de saturación se determinan de esta manera:

Ilustración 17 Abaco para determinar la permeabilidad de un suelo.

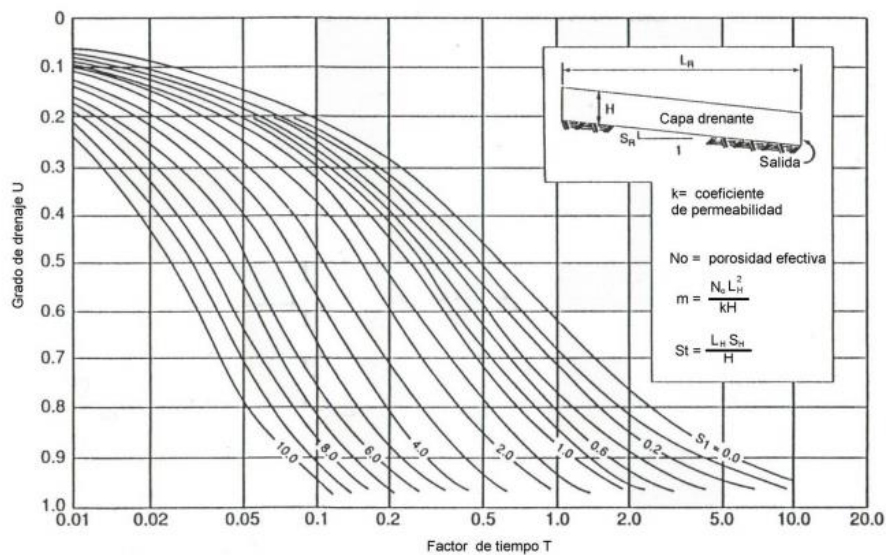


Fuente: Manual de diseño para pavimentos método de AASHTO 93

El tiempo de drenaje y los niveles de saturación se determinan de esta manera:

7. De la Figura siguiente se selecciona un factor de tiempo T, función de S, y de los grados de drenaje U.

Ilustración 18 Selección de un factor de tiempo T en función de S, y de los grados de drenaje U.



Fuente: Manual de diseño para pavimentos método de AASHTO 93

8. Se calcula el tiempo de drenaje t en horas: $t = T \cdot m \cdot 24$
9. Se computa el agua drenada durante cada período de tiempo multiplicando la porosidad efectiva N_e por U .
10. Para cada periodo de tiempo, se debe computar la cantidad de agua remanente en la muestra sustrayendo el agua drenada durante cada período ($N_e \cdot U$) del volumen de agua que llenaría completamente los vacíos de la capa drenante (V_v).
11. Determinar el nivel de saturación (%) de la capa drenante en cada intervalo de tiempo haciendo: $(V_v - N_e U) / N_{e\text{máx}} \cdot 100$

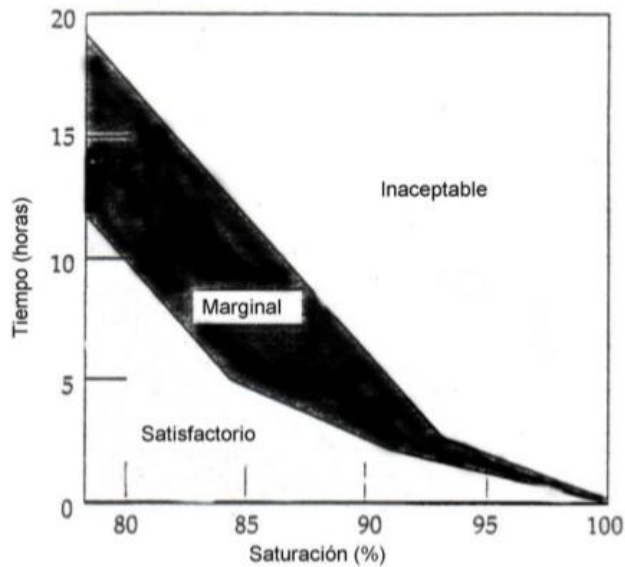
Tabla 31 Plantilla para hacer los cálculos indicados anteriormente.

U	T	$t_{\text{días}} = Tm$	$t_{\text{horas}} = Tm24$	$N_e U$	$V_w = V_v * N_e * U$	$S = \frac{V_w}{V_v} * 100$
0,1						
0,2						
0,3						
0,4						
0,5						
0,6						
0,7						
0,8						
0,9						

Fuente: Manual de diseño para pavimentos método de AASHTO 93

Los valores de t en horas y el porcentaje de saturación se grafican para determinar la capacidad de la base como elemento drenante. De acuerdo con la clasificación podrá ser "aceptable", "marginal" o "inaceptable" que se muestra en la siguiente figura.

Ilustración 19 Criterio de drenaje para capas granulares



Fuente: Manual de diseño para pavimentos método de AASHTO 93

Ilustración 20 Oferta de compra geotextil NT 2000



MEXICHEM COSTA RICA S.A.
Cédula Jurídica: 3-101-338564-09
 Teléfono: 2209-3263/Fax: 2209-3209
 La Asunción de Belén, 300 mts Oeste del Mall Real Cariari.

Fecha:	14 de noviembre de 2019	Proforma N°:	MC1411
Nombre del Cliente:	CONSTRUCTORA GONZALO DELGADO S.A.		
Dirección:	BARRIO EL SOCORRO, 2 KM E DELES 997	Cliente No.:	32925
Referencia:		Teléfono:	2241-4174
		Celular:	
		Fax:	2241-4174
Contacto:	EDWIN PEREZ		Marco Clare
Email:			

Item N°	Código SAP	Descripción	Cant	Ud	Precio Unitario	Total
1	908650	GEOTEXTIL NO TEJIDO 2000 4.0	3639	M2	€572.64	€2,083,836.96

Fuente: Constructora Gonzalo Delgado.

Ilustración 21 Oferta de compra de base y subbase granular



OFERTA DE VENTA DE PRODUCTOS CEMEX COSTA RICA



Cotización #CU4584

03 de Abril del 2020

Cliente: Maycoll Velasquez

Proyecto: San Jose

Atención: Maycoll

Correo: mvelasquez@cgd.co.cr

Telefono: 7114-1550

Provincia: San Jose

Cantón: San Jose

Distrito: Catedral

PRESENTE

Estimados Señores:

De acuerdo con su solicitud, CEMEX COSTA RICA S.A. presenta la siguiente oferta formal para el Suministro de Agregados; para su proyecto de construcción, ubicado en: San Jose

OFERTA ECONÓMICA

Cantidad	Unidad	Descripción	Entrega	Precio Unitario			Monto Total
				Material	I.V.	Transporte	
12	M3	1010774 SF-4172 LASTRE GRUESO (TAMANO MAXIMO)	Vagoneta	7,032.30	914.20	3,034.71	131,774.52
12	M3	10102713 SF-4172 SUBBASE 3	Vagoneta	8,275.30	1,075.79	3,034.71	148,629.60

Fuente: Constructora Gonzalo Delgado.

Ilustración 22 Oferta de compra de espesor de asfalto por m2

Constructora Blanco Zamora S.A.

Señores: Ing. Olga Mendez	Fecha: 13/09/2019
Atención:	Tel:
Oferta N° 12160ASI	Cel:
Proyecto: Santa Barbara, Heredia	C: omendez@cgd.co.cr

DESCRIPCIÓN DE LA OBRA A EJECUTAR

OPERACIÓN	ESPESOR	CANTIDAD	PRECIO UNIT	PRECIO TOTAL
Carpeta asfáltica	7 cm	35 m ²	€26.950.00/m ²	€943.250.00
TOTAL				€943.250.00

1. La carpeta asfáltica incluye el suministro, colocación y compactación de la mezcla asfáltica, contempla un barrido previo, imprimación y traba.
2. La mezcla asfáltica cumple las especificaciones del CR-2010.
3. Duración de la obra es de 1 día.
4. La forma de pago será 60% por adelantado y 40% contra entrega de proyecto.
5. La vigencia de esta oferta queda sujeta a la variación del precio de los hidrocarburos por parte de RECOPE. Según publicación en La Gaceta.
6. Cualquier monto adicional al de esta oferta está sujeta a la verificación de condiciones del terreno, área total y requerimientos técnicos de la colocación por parte del dpto. de Ingeniería.
7. Esta oferta no incluye la conformación de la base y la supone lista para la colocación del asfalto.

Fuente: Constructora Gonzalo Delgado.

Ilustración 23 Oferta de compra tubería drenante "drenaflex"



DURMAN ESQUIVEL S.A
Cedula Juridica N° 3-101-006779-37
Tels. Central: (506)2436-4700 Fax: (506)2436-4800
Cotigua a la Compañía Dos Pinos El Coyol de Nájagua
Apdo. 6136-1000 San José, Costa Rica
E-mail: costarica@durman.com - www.durman.com
Codigo de Exportador: 1,88

CONSTRUCTORA GONZALO DELGADO S.A.
Nombre: CONSTRUCTORA GONZALO DELGADO S.A.
Dirección:
CARRETERA A BRAULIO CARRILLO, 200 MTS ANTES
DE LALLO, 200 MTS ANTES DE LA
Teléfono: (506) 50640353670
Fax: (506) 50622413019
Contacto: Pendiente

Cotización

Número/Fecha : 1268640 / 02.04.2020
Número ref./Fecha : Maycol Velasquez / 02.04.2020
Fecha de entrega : 03.04.2020
N° de cliente : 100263
Período de validez : 02.04.2020 al 03.04.2020
Grupo Vendedor : 2000007
Definición Grupo : OSCAR SOLANO
Fecha : 02.04.2020 15:49:35

Efectuamos las entregas según las condiciones siguientes:

Moneda CRC

Condiciones de pago Dentro de 45 días sin deducción

Condiciones de entrega FOB EN SU PLANTA

VIGENCIA 8 DIAS, FORMAN DE PAGO :
TERMINADA LA VIGENCIA ESTIPULADA EN LA PRESENTE COTIZACIÓN LOS PRECIOS SON SUJETOS A
RECONFIRMACIÓN AL MOMENTO DE CONFIRMAR OC

Material	Cantidad	Denominación	Precio Unit.	Total
2013909	10 UN	TUBO PVC ALCANTARILLADO ASTM F949 8"	158,159.00	1,581,590.00

Fuente: Constructora Gonzalo Delgado.

Ilustración 24 Oferta de compra de la cama para adoquín permeable.



Comercializadora Tárcoles

Atención
Teléfono

Constructora MECO, S.A.
Tel: (506)2519-7000 | Fax: (506)2296-8400 | Apdo. 875-1150 La Uruca
Céd. Jurídica: 3-101-035078-17
50 m norte del Hotel San José Palacio


Cliente Constructora Gonzalo Delgado S.A. Cotización 10033421
Cédula 3101060618 Fecha del Documento 18.11.2019
Dirección DE LA ESCUELA 800 ESTE Y 200 NORTE, BARRIO EL SOCORRO Vigencia 18.11.2019 - 03.12.2019

Estimado cliente: Para nosotros es un placer cotizarle el siguiente material localizado en nuestro Centro de Producción Comercializadora Tárcoles

Item	Concepto	Cantidad	Precio	Importe
1	Quintilla Primera	5 M3	¢ 7.964,60	¢ 39.823,00

Fuente: Constructora Gonzalo Delgado.

Ilustración 25 oferta de compra del sistema completo de pavimento de adoquín permeable "TEKNODREN"



Productos de Concreto S.A. Tel (506 2587 1400)
San Rafael de Alajuela Fax (506 2293 0311)
San José, Costa Rica

Señores: **Constructora Gonzalo Delgado** martes, 12 de diciembre de 2017
Atención: **Ing. Wanner Gutiérrez Venegas**
CC: wguiterrez@pdccr.com

Dirección: Guachipén, del Banco Davivienda 200 m Este y 150 m Sur (detrás de Multiplaza)

Proyecto: **Adoquinado drenante Edificio EBC** Tel: 83 173 390

Estimados señores:
De acuerdo a su solicitud, nos permitimos presentarles nuestra oferta para el servicio de construcción de pavimento de adoquines de la siguiente manera para el PROYECTO Adoquinado drenante Edificio EBC

1. OFERTA ECONÓMICA

1.a CANTIDADES Y PRECIOS

SISTEMA DE PAVIMENTOS ARTICULADOS "ADOQUINES"				
ITEM	DESCRIPCIÓN	Cantidad	Precio Unitario	Total
1	Proveeduría y construcción de pavimento 100% Teknodren® de Productos de Concreto S.A. La oferta incluye el adoquín drenante (Teknodren), subbase de material granular tipo ASTM N°2, base de material granular tipo ASTM N°57, cama de material granular tipo ASTM N°8, tubería drenaflex y geotextil NT2000 bajo la estructura del pavimento. El cliente debe entregar la gaveta lista (47 cm total), confinamientos terminados al 100% y obras de recolección pluvial indicados en diseño (pozos, tragantes) al 100%. Esta estructura está calculada con respecto a la información brindada por el Ing. Wanner Gutiérrez, quien indica que la calle a intervenir tiene una sustitución de terreno, con lastre compactado tipo Proctor.	7 m2	\$ 77.83	\$ 544.82

Fuente: Constructora Gonzalo Delgado.