



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 METODOLÓGICA DE DISEÑO Y
CONSTRUCCIÓN DE PAVIMENTOS DE ADOQUÍN
CONVENCIONAL**

**ESTUDIANTE: DÁRIL FABRICIO REDONDO
FAJARDO**

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. MAP.
Tutor

Ing. Manuel Bernal Pacheco
Lector

Ing. José María Ulate Zárate
Lector que preside

DERECHOS DE AUTOR

Fecha: Abril de 2020

El suscrito, Dáril Fabricio Redondo Fajardo cédula, 504150276, estudiante de la carrera de Licenciatura en Ingeniería Civil de la Universidad Latina de Costa Rica, con número de carné 2015010673, manifiesta que es el autor del Trabajo Final de Graduación “**PRPUESTA METOLÓGICA DE DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PAVIMENTO DE ADOQUÍN CONVENCIONAL**”, bajo la dirección del ingeniero Pablo José Morales Torres, quién en consecuencia tiene derechos compartidos sobre la 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.

Dáril Fabricio Redondo Fajardo
Cédula número: 504150276

AGRADECIMIENTOS

Mis más sinceros agradecimientos a todas aquellas personas que se acercaron a mí para ayudarme o pedirme ayuda, para hacerme reír, para estudiar, o para regalarme parte de su tiempo. Al lado de estas personas, la carga se hizo menor y las horas más cortas.

Agradecerle a mi familia, compañeros y amigos, por todo el apoyo brindado durante todo el proceso de mis estudios universitarios.

Quiero agradecer también a esas personas que siempre han estado ahí, los amigos incondicionales que son testigos del esfuerzo y dedicación con las cuales se fueron superando cada uno de los peldaños.

Por último, agradecerle al ingeniero Pablo José Torres Morales por su apoyo y dedicación durante el proceso de esta investigación.

DEDICATORIA

Quiero dedicarles la presente investigación a mi familia y amistades que han estado apoyándome a lo largo de este proceso universitario.

De todo corazón quiero agradecerle a mi madre por haberme enseñado a siempre hacer lo correcto, aun cuando este no sea el camino más fácil o corto. Al inculcarme valores como la honradez, respeto y perseverancia no solo hizo de mí una mejor persona, sino creó una manera de pensar ganadora, de primer mundo.

A todas aquellas personas que se encuentran en camino a realizar sus sueños, quiero recordarles que el parabrisas siempre será más grande que el retrovisor, por lo que los insto a avanzar y no mirar atrás.

RESUMEN

Ésta investigación se realiza debido a que el adoquín convencional se puede implementar de una manera técnica, siguiendo una metodología de diseño y construcción y no de una forma estética como muchas veces suele utilizarse. Es por ello, que nace la necesidad de crear una propuesta metodológica de diseño enfocada a Costa Rica ya que ésta es completamente inexistente. Además, la falta de una guía especificada de construcción y colocación genera un problema para quienes se dedican a realizar estas actividades, ya que muchas veces esto se realiza de una manera incorrecta lo que genera el deterioro de los pavimentos de adoquín muy rápido.

El problema de los pavimentos de adoquín se puede dar por diferentes factores como lo son: una incorrecta colocación de los adoquines, incumplimiento en la separación de juntas, un mal diseño en los espesores del pavimento, una mala compactación en los espesores de capas, entre otros.

El objetivo general que tiene esta investigación es formular una propuesta metodológica de diseño y construcción para un pavimento de adoquín convencional adaptado a las condiciones de Costa Rica.

Por tanto se decidió realizar una guía de diseño y construcción para un pavimento de adoquín convencional adaptándola a las condiciones que se tienen en Costa Rica y los distintos tipos de espesores de adoquín que se encuentran en este mercado. Además, se realizó una guía de construcción que servirá de ayuda para evitar problemas como son las deformaciones, escalonamientos, hundimientos y demás problemas que sufre un pavimento de adoquín debido a su incorrecta construcción.

Contenido

CAPITULO I.....	18
PROBLEMA Y PROPÓSITO.....	18
1.1 Estado actual del objeto de estudio.....	19
1.2 Formulación del problema.....	21
1.2.1 Criterios para plantear el problema.....	21
1.3 Objetivo General.....	22
1.3.1 Objetivos Específicos.....	22
1.4 Alcances de la investigación.....	22
1.5 Limitaciones de la investigación.....	23
1.5.1 Delimitación Espacial.....	23
1.5.2 Delimitación temporal.....	23
1.6 Justificación.....	24
CAPITULO II.....	25
FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA.....	25
2.1 Marco Legal.....	26
2.2 Marco Teórico.....	29
2.2.1 Conceptos Básicos.....	29
2.2.2 Pavimentos de Adoquín de Concreto.....	32
2.2.2.1 Adoquines de concreto.....	32
2.2.2.2 Aspectos de diseño.....	34
2.2.3 Proceso constructivo.....	35
2.2.3.1 Colocación de la base o sub-base.....	35
2.2.3.2 Colocación de la cama de arena.....	35
2.2.3.3 Instalación.....	36

2.2.3.4 Almacenamiento y manipulación	40
2.2.3.5 Utilización y mantenimiento	40
2.2.4 Ventajas de los pavimentos de adoquín	40
2.2.4.1 Ventajas de los pavimentos de adoquín	41
2.2.4.2 Ventajas debidas al manejo del pavimento	43
2.2.4.3 Ventajas debidas a su apariencia	44
2.2.4.4 Ventajas relativas a la seguridad	45
2.2.4.5 Ventajas relativas a la durabilidad	45
2.2.5 Comportamiento estructural de los pavimentos de adoquines	45
2.2.5.1 Estado de tensiones en pavimentos de adoquines	47
2.2.5.2 Trabazón mecánica	49
2.2.5.3 Efecto conjunto de la forma y aparejo de los adoquines	50
2.2.5.4 Comportamiento a la fatiga	53
2.2.5.5 Resistencia mecánica del adoquín	54
2.2.5.6 Forma del adoquín	55
2.2.5.7 Aparejo	55
2.2.5.8 Cama de arena	57
2.2.5.9 Humedad	58
2.2.5.10 Base y Subbase	58
2.2.5.11 Subrasante	59
2.2.6 Métodos de diseño de pavimentos de adoquines de hormigón	59
2.2.6.1 Método de Diseño de Australia	60
2.2.6.2 Método de Diseño de Japón	61
2.2.6.3 Método de Diseño de Estados Unidos	62
2.2.6.4 Método de Diseño de India	64

2.2.6.5 Método de Diseño del Reino Unido	65
2.2.7 Normativas recomendadas para especificaciones técnicas y ensayos de adoquines de concreto	66
CAPÍTULO III	68
MARCO METODOLÓGICO	68
3.1 Definición del enfoque y tipo de investigación utilizados.	69
3.2 Sujetos y fuentes de información.	69
3.2.1 Sujetos de información:.....	69
3.2.2 Fuentes de información:.....	70
3.3 Definición de variables: conceptual, operativa e instrumental.	70
3.4 Instrumentos y técnicas utilizadas en la recopilación de los datos.	71
3.5 Sustentación de la confiabilidad y la validez de los instrumentos de la investigación.	72
CAPITULO IV.....	73
PRESENTACIÓN DE RESULTADOS.....	73
4.1 Guía de diseño de un pavimento de adoquín convencional	74
4.1.1 Factor camión.....	74
4.1.2 Cálculo de ESALs de Diseño	75
4.1.3 Fórmula de diseño para obtener el número estructural	76
4.1.4 Variables de tiempo	76
4.1.5 Confiabilidad	77
4.1.6 Criterios de adopción de nivel de serviciabilidad	77
4.1.7 Determinación de espesores.....	78
4.1.8 Estabilidad y factibilidad de construcción	79
4.1.9 Espesores mínimos en función del SN.....	80
4.2 Guía de construcción de un pavimento de adoquín convencional	83

4.2.1 Materiales	84
4.2.1.1 Adoquines	84
4.2.1.2 Arena para capa de soporte	84
4.2.1.3 Arena para sello	85
4.2.1.4 Agregado para capas de base y sub-base	86
4.2.2 Equipo.....	87
4.2.3 Requisitos para la construcción.....	88
4.2.3.1 Preparación de la superficie existente	88
4.2.3.2 Colocación y nivelación de la capa de arena.....	88
4.2.3.3 Colocación de los adoquines.....	89
4.2.3.4 Ajustes	93
4.2.3.5 Compactación inicial	94
4.2.3.6 Sello de juntas y compactación final.....	95
4.2.3.7 Confinamiento.....	97
4.2.3.8 Drenaje	98
4.2.4 Limitaciones de ejecución	99
4.2.5 Apertura al tránsito.....	99
4.2.6 Conservación	99
4.2.7 Calidad del producto terminado.....	100
4.2.8 Medición.....	100
4.2.9 Pago	100
4.2.10 Reparación y Mantenimiento.....	101
4.2.10.1 Mantenimiento preventivo para el buen funcionamiento de un pavimento de adoquín.....	101
4.2.10.1.1 Limpieza.....	101

4.2.10.1.2 Evitar abrasión	101
4.2.10.1.3 Cuidado de juntas	101
4.2.10.1.4 Hundimiento	102
4.2.10.1.5 Ondulaciones	102
4.2.10.2 Remoción de los adoquines	102
4.2.10.2.1 Método usual para levantar el pavimento	102
4.2.10.2 Método alternativo de acceder al interior del pavimento sin romper adoquines.....	103
4.2.10.2.1 Remoción del primer adoquín	103
4.2.10.2.2 Remoción de los adoquines adyacentes	103
4.2.10.2.3 Limpieza de los adoquines extraídos	103
4.2.10.2.4 Recolocación de los adoquines	104
4.3 Ejemplo comparativo de costo-beneficio entre un diseño de un pavimento de adoquín convencional y un pavimento flexible asfáltico.....	104
4.3.1 Ejemplo de diseño de un pavimento de adoquín convencional	106
4.3.1.1 Adoquín.....	107
4.3.1.2 Base.....	107
4.3.1.3 Subbase.....	108
4.3.1.4 Respuestas	108
4.3.2 Ejemplo de diseño de un pavimento flexible asfáltico.....	109
4.3.2.1 Asfalto.....	110
4.3.2.2 Base.....	110
4.3.2.3 Subbase.....	111
4.3.1.4 Respuestas	111
CAPÍTULO V	112
ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	112

5.1 Análisis de resultados de la propuesta metodológica de diseño y construcción de un pavimento de adoquín convencional.....	113
5.1.1 Guía de diseño de un pavimento de adoquín convencional	114
5.1.2 Guía de construcción de un pavimento de adoquín convencional	114
5.1.3 Ejemplo comparativo de coste-beneficio entre un diseño de un pavimento de adoquín convencional y un pavimento flexible asfáltico.....	115
CAPITULO VII.....	118
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	118
6.1 Conclusiones.....	119
6.2 Recomendaciones	120
Bibliografía	121
Anexos.....	123

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Normativas sobre especificaciones y ensayos de adoquines de concreto ..	67
Tabla 2: Factor camión promedio para diferentes rutas del país.	74
Tabla 3: Período de análisis según el tipo de camino.....	77
Tabla 4: Espesores mínimos de concreto asfáltico y base granular	79
Tabla 5: Graduación de arena para capa de soporte.....	85
Tabla 6: Graduación de arena para sello de juntas	85
Tabla 7: Granulometría para base y sub-base.....	86
Tabla 8: Usos típicos de la granulometría	87
Tabla 9: Datos de los materiales	106
Tabla 10: Datos para diseño	107
Tabla 11: Datos de los materiales	109
Tabla 12: Datos para diseño	110
Tabla 13: Costo por m ² de un pavimento de adoquín convencional.....	105
Tabla 14: Costo por m ² de un pavimento flexible asfáltico	105

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1: Estructura Típica de Pavimento	31
Ilustración 2: Adoquín Rectangular	33
Ilustración 3: Adoquín Cuadrado	33
Ilustración 4: Adoquín clásico	33
Ilustración 5: Adoquín Lisboa.....	34
Ilustración 6: Adoquín rectangulares colocados.....	35
Ilustración 7: Área peatonal en Sydney Olympic Park, Australia (2000).....	42
Ilustración 8: Área de acopio de contenedores en puertos, Argentina	42
Ilustración 9: Pavimento vehicular de adoquín de hormigón después de 10 años de construcción, Israel	43
Ilustración 10: Pavimentos de adoquines en aeródromos.....	43
Ilustración 11: Bulbo de presiones bajo el eje de aplicación de la carga para un eje simple de 8,17 Ton, con un espesor de adoquín de 60 mm y cama de arena de 40 mm	48
Ilustración 12: Trabazón vertical, horizontal y rotacional de un pavimento de adoquín (Knapton y Barber, 1980).....	50
Ilustración 13: Efecto de la rotación de adoquines lisos y ondulados en aparejos lineales (Schakel y Lim, 2003)	51
Ilustración 14: Efecto de rotación de adoquines lisos y ondulados en aparejos de espina de pescado (Schakel y Lim, 2003).....	52
Ilustración 15: Progresión de las deformaciones permanentes en pavimentos de adoquines (Van der Heijden y Houben, 1988).....	53
Ilustración 16: Efecto de la resistencia a la compresión sobre las deflexiones del pavimento de adoquín (Panda y Gosh, 2002).....	54
Ilustración 17: Efecto de la forma de los adoquines en las deflexiones (Panda y Gosh, 2003)	55
Ilustración 18: Efecto del aparejo en las deflexiones de pavimentos	56
Ilustración 19: Efecto del aparejo en las deformaciones horizontales de pavimentos para adoquines lisos de 60 mm y ancho de junta de 3 mm (Nor, 2006) .	57
Ilustración 20: Influencia del espesor de la cama de arena en las deformaciones verticales (Miura, 1984)	58

Ilustración 21: Método de diseño Australiano (Morris, 1980)	61
Ilustración 22: Método de diseño Japonés (Miura, 1984).....	62
Ilustración 23: Método de diseño Japonés (Miura, 1984).....	63
Ilustración 24: Método de diseño de India (Ryantatiang, 2006).....	64
Ilustración 25: Método de diseño del Reino Unido (BSI, 2001a y b)	66
Ilustración 26: Procedimiento para determinar espesores mínimos de capas.	80
Ilustración 27: Ábaco para el diseño de un pavimento flexible.....	81
Ilustración 28: Nivelación de la capa de arena.....	89
Ilustración 29: Patrones de colocación para adoquines rectangulares utilizados para tránsito peatonal	91
Ilustración 30: Patrones de colocación para adoquines rectangulares utilizados para tránsito peatonal	91
Ilustración 31: Patrones de colocación para adoquines rectangulares utilizados para tránsito vehicular.....	92
Ilustración 32: Patrones de colocación en hiladas para adoquines rectangulares utilizados para tránsito vehicular	92
Ilustración 33: Patrones de colocación en hiladas para adoquines no rectangulares utilizados para tránsito vehicular.....	93
Ilustración 34: Procedimiento de la compactación inicial	95
Ilustración 35: Sellado de juntas	96
Ilustración 36: Compactación final	96
Ilustración 37: Confinamiento de los adoquines.....	98
Ilustración 39: Estructura del pavimento	124
Ilustración 40 : Proforma del precio de los adoquines.....	125
Ilustración 41: Proforma de los precios de agregados para base y subbase	126

CAPITULO I
PROBLEMA Y PROPÓSITO

1.1 Estado actual del objeto de estudio

Según (CEPEDA, 2018) la Universidad de Concepción de Chile en la década de 1970 el pavimento de adoquín empieza a verse más utilizado en estacionamientos, calzadas vehiculares, aceras y espacios públicos.

A criterio de (García, 2014) un adoquín es un elemento prismático, generalmente de forma regular, el cual se coloca uno junto a otro para formar una capa adecuada al tráfico de una vía. Además, en el adoquín convencional se pueden distinguir dos materiales para su construcción, la piedra labrada y de concreto, por lo que se les clasifica como adoquín de piedra y de concreto respectivamente. Por otra parte, la utilización de un pavimento adoquinado es una técnica rápida y eficiente a la hora de la construcción de pavimentos.

Según (Nuteco, 2019) la técnica de adoquinado cuenta con más de 2000 años de antigüedad, en ese entonces se empleaban piedras para formar vías de tránsito. De ese modo fue posible más fijar las rutas más seguras y directas entre dos puntos que tuvieran tratos comerciales recurrentes. Sin embargo, las rocas empleadas en la construcción de dichas rutas no permitían un desplazamiento rápido ya que estas no estaban detalladas. Debido a esto fue que empezaron a trabajarse y a pulirse.

Según (Nuteco, 2019) los primeros en utilizar el método de pavimento adoquinado para la circulación de personas y mercancías fueron los romanos, griegos y los cartagineses. Estos lugares son reputados como constructores de calzadas ya que muchas calzadas siguen en uso hasta el día de hoy.

En base a la reseña histórica realizada por (Euroadoquín, 2004) se han utilizado cuatro diferentes tipos de adoquín para pavimentar áreas urbanas, los cuales son: adoquines de piedra, madera, cerámicos y los de concreto. Los primeros adoquines de piedra que se utilizaron fueron guijarros de río colocados sobre una capa de arena sellándose las juntas con una argamasa de cal y arena. Los adoquines de madera se usaron en la primera mitad del siglo XIX, como una alternativa a los adoquines de piedra, para intentar reducir así, el nivel de ruido que provocaban las ruedas de acero y las

herraduras de los animales. Estos adoquines tenían una longitud comprendida entre los 12 y los 25 cm y entre los 7 y los 10 cm de ancho, con una separación entre ellos de 3 mm, que se rellenaba con residuos bituminosos. Los adoquines de ladrillos cerámicos utilizados como material de pavimentación se han utilizado durante los últimos 5.000 años, desde Mesopotamia, habiéndose demostrado su aptitud para usos peatonales o de bajos requerimientos. Los ladrillos cerámicos en pavimentación se colocaban sobre una capa de arena que también servía para rellenar las juntas, siendo su principal problema el rápido desgaste de su superficie, lo cual causaba la reducción de su vida útil y de su resistencia al deslizamiento.

Según la reseña histórica de (Euroadoquín, 2004) desde principios de siglo XIX ya existían detalles específicos sobre pavimentos de adoquín. Los adoquines se han colocado sobre una capa de arena y ésta apoyada directamente sobre la explanada, con la finalidad de corregir las irregularidades de la capa inferior y las posibles variaciones en los espesores de los adoquines. Esta capa solía tener unos 5 cm de espesor tras la compactación de los adoquines y desde un principio se especificó que la capa de arena no tuviera más de un 8% de finos. Esta arena era la que se utilizaba para sellar las juntas entre los adoquines.

Según (PRENSA, 2018) en Nicaragua la fabricación de los adoquines comenzó después del terremoto de 1972. En ese tiempo se convirtió en un negocio del dictador Anastasio Somoza Debayle ya que era dueño de la única empresa que los hacía.

Según (CEPEDA, 2018) las ventajas de un pavimento de adoquín de concreto es la alta resistencia a las cargas concentradas, a la abrasión y a los agentes atmosféricos, además, no está sujeto a los esfuerzos por cambios térmicos y se acomodan a los asentamientos. Sin embargo, una de las desventajas de pavimentos de adoquín es la cantidad de juntas que posee el pavimento, lo que hace que la circulación sea incomoda y se aumenten los costos de operación vehicular en relación con otros tipos de pavimentos.

1.2 Formulación del problema

¿Cuál debe ser la metodología de diseño y construcción de un pavimento de adoquín convencional para obtener mejores resultados en su comportamiento?

1.2.1 Criterios para plantear el problema

La problemática en la metodología de diseño y construcción de pavimentos de adoquín convencional se da por la mala colocación, mala planificación o por un mal diseño de los adoquines ya que muchas veces se observa el deterioro que estos sufren en periodos muy cortos de tiempo, lo cual se puede dar por diferentes factores como son:

- La mala colocación del adoquín provoca que estos tengan una vida útil menor para la cual fueron diseñados.
- El incumplimiento en la separación de juntas puede provocar la ascensión de finos a la superficie, lo cual provoca asentamientos en las capas inferiores.
- Utilizar un pavimento de adoquín en lugares donde las cargas para las cuales este fue diseñado sean mayores, provoca el deterioro de este observándose grietas en el adoquín o asentamientos en el terreno.
- Los Ingenieros aseguran que una de las mayores causas del deterioro de un pavimento de adoquín es la mala compactación que se da en el terreno, ya que esta no realiza de una manera adecuada y efectiva.
- Una mala evacuación de las aguas o la falta de mantenimiento de este pueden provocar el deterioro de cada una de las capas que conforman el pavimento de adoquín.
- El escalonamiento entre adoquines y confinamiento se da debido a un cambio brusco de nivel entre los elementos de confinamiento y los adoquines, ya que a la hora de haber realizado la compactación de las capas

inferiores ésta no quedó al nivel correspondiente, provocando que el adoquín no quede al mismo nivel respecto a otro.

- Hundimientos localizados en forma circular, sin pérdida de material, lo cual se da por asentamientos en el suelo de fundación, fallas en la capa de arena cuando las partículas de ésta se degradan y por un inadecuado drenaje o la falta de mantenimiento de éste.

Teniendo en cuenta la problemática anteriormente mencionada en el pavimento adoquinado, se ha observado que esto se da por una inadecuada metodología de diseño y por no seguir de manera correcta una adecuada metodología de construcción, lo cual provoca que se generen problemas en periodos muy cortos de tiempo.

1.3 Objetivo General

Formular una propuesta metodológica de diseño y construcción de un pavimento de adoquín convencional adaptado a las condiciones de Costa Rica.

1.3.1 Objetivos Específicos

Realizar una búsqueda bibliográfica exhaustiva respecto a los diseños y las construcciones de los pavimentos de adoquín convencional en Costa Rica y en otros países.

Realizar una guía para diseño y construcción de un pavimento de adoquín convencional.

Analizar las ventajas y desventajas realizando un análisis costo-beneficios respecto a un pavimento flexible asfáltico.

1.4 Alcances de la investigación

Los alcances de esta investigación serán los siguientes:

Realizar una propuesta metodológica de diseño para un pavimento de adoquín convencional.

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

Efectuar un análisis de costo-beneficio para determinar las ventajas y desventajas de un pavimento convencional respecto a otros.

Por último, debido a que ésta investigación es una fase inicial de propuesta metodológica puede ser continuada posteriormente.

1.5 Limitaciones de la investigación

Debido a que ésta tesis sólo se fundamenta en aspectos teóricos no se realizará la aplicación práctica de ésta.

Carencia de información respecto a los pavimentos de adoquín convencional tanto en Costa Rica como en otros países.

1.5.1 Delimitación espacial

El presente escrito tiene como delimitación espacial el territorio de Costa Rica, esto debido a que los adoquines que estarán en análisis serán los que se encuentran en el mercado nacional. Además, la falta de metodologías tanto de diseño como construcción en el país generan la necesidad de que ésta investigación se realice.

1.5.2 Delimitación temporal

El presente escrito tiene como delimitación temporal la guía AAHSTO de 1993 para pavimentos flexibles, además, se tiene como otra delimitación temporal la sección 504 del CR-2010, la cual fue publicada en el año 2010.

1.6 Justificación

El presente escrito tiene como objetivo la creación de una propuesta metodológica de diseño y una guía de construcción de un pavimento de adoquín convencional adaptándolo a las condiciones de Costa Rica. Además, llevando a cabo una serie de métodos y técnicas rigurosas se pretende establecer una correcta creación tanto de una carpeta de rodamiento como de sus capas inferiores para obtener un mejor diseño y construcción de éste.

Ésta investigación se realiza debido a que el adoquín convencional se puede implementar de una manera técnica, siguiendo una metodología de diseño y construcción y no de una forma estética como muchas veces suele utilizarse.. Además, la falta de una guía especificada de construcción y colocación genera un problema para quienes se dedican a realizar estas actividades, ya que muchas veces esto se realiza de una manera incorrecta lo que genera el deterioro del adoquín muy rápido.

La finalidad que tiene ésta investigación es poder brindar una metodología de diseño a las personas, entidades públicas o privadas que se dedican a trabajar con el adoquín convencional, además, se busca poder brindar una propuesta metodológica de cómo debe realizarse la construcción de éste y así asegurar que se trabaje de manera correcta.

CAPITULO II
FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

2.1 Marco Legal

Las normas que rigen el diseño, construcción y ensayos que deben realizarse a un pavimento de adoquín son las siguientes:

NORMA	ESPECIFICACIÓN
ASTM C936-01	Proporciona una serie de requerimientos físicos que debe cumplir cada pieza individual, en general, cubren los principales aspectos a controlar como lo son: dimensiones, resistencia, absorción, resistencia a la abrasión y resistencia a ciclos de hielo y deshielo.
PrEN 1338-2010	Permite controlar particularmente la calidad del adoquín. Esta norma contempla los siguientes ensayos: métodos de muestreo, control de dimensiones, resistencia a ciclos de hielo y deshielo, absorción de agua, resistencia a la flexión, resistencia a la abrasión, resistencia al deslizamiento, verificación de aspectos visuales.
CR-2010 (SECCIÓN 504-PAVIMENTO DE ADOQUINES DE CONCRETO HIDRÁULICOI)	Establece los parámetros que deben seguirse para la colocación de un pavimento 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, ajustes, compactación inicial, sello de juntas y compactación final, confinamiento, limitaciones en la ejecución, apertura al tránsito, conservación, calidad del producto terminado, aceptación, medición y pago.
INTE C51:2006 (DETERMINACIÓN DEL MÓDULO DE RUPTURA DE LOS ADOQUINES)	La presente norma tiene como objeto establecer el método de prueba para determinar el módulo de ruptura de los adoquines de concreto de cemento hidráulico empleados para tráfico vehicular y peatonal.
INTE C94:2006 (ADOQUINES DE CONCRETO PARA PAVIMENTOS. ESPECIFICACIONES)	La presente norma tiene por objeto establecer las características y especificaciones que deben cumplir los adoquines de concreto de cemento hidráulico empleados para tráfico vehicular y peatonal.
INTE C50: 2018	Unidades de mampostería de concreto y unidades relacionadas. Muestreo y método de ensayo (MOD).
INTE 06-04-01-06 (ADOQUINES DE CONCRETO PARA PAVIMENTOS)	Define un adoquín de concreto como un elemento compacto de concreto

	<p>prefabricado, con la forma de prisma recto, cuyas bases pueden ser polígonos, que permiten conformar superficies completas como componente de un pavimento articulado; de la misma manera define el pavimento como una estructura construida sobre el terreno de fundación para permitir que el tránsito sobre éste, sea más confortable, seguro y rápido.</p>
<p>MANUAL CENTROAMERICANO PARA DISEÑO DE PAVIMENTOS (CAPÍTULO 7)</p>	<p>Ayudará a construir mejores y más durables superficies de rodaduras de las carreteras, para seguridad y comodidad de los usuarios, desafiando las nuevas tecnologías de fabricación de equipo rodante, de las propiedades de los materiales y las inclemencias del tiempo.</p>
<p>AAHSTO T27</p>	<p>Método donde se dan los procedimientos detallados para un análisis granulométrico.</p>
<p>ASTM C140</p>	<p>Define la resistencia a la compresión de los adoquines a los 28 días de 330 kg/cm².</p>
<p>ASTM C33</p>	<p>Verifica la calidad de los materiales para la construcción del adoquín.</p>

ASTM C418	Pérdida de volumen por abrasión en el adoquín.
ASTM C94	Cantidad de agua que se utiliza para la fabricación de adoquines.
ASTM C979	Los pigmentos que se utilicen en la fabricación de un adoquín deben cumplir con la norma.

2.2 Marco Teórico

A continuación se presentan los conceptos básicos necesarios para conocer y entender mejor esta investigación, ya que el fin de ésta es poder brindar una propuesta metodológica de diseño y construcción de un pavimento de adoquín convencional y que esta pueda ser comprendida por los lectores de esta.

2.2.1 Conceptos Básicos

Agregado: Según (Pavimentos, 2002) es un material granular duro de composición mineralógica como la arena, la grava, la escoria, o la roca triturada, usado para ser mezclado en diferentes tamaños.

Alcantarilla: Según (Pavimentos, 2002) es cualquier estructura por debajo de la subrasante de una carretera u otras obras viales, con el objeto de evacuar las aguas superficiales y profundas.

Base: Según (Pavimentos, 2002) es la capa de espesor diseñado, constituyente de la estructura del pavimento, destinada fundamentalmente a distribuir y transmitir las cargas originadas por el tránsito, a las capas subyacentes y sobre la cual se coloca la carpeta de rodadura.

Calzada: Según (Pavimentos, 2002) es la zona de la carretera destinada a la circulación de vehículos, con ancho suficiente para acomodar un cierto número de carriles para el movimiento de los mismos, excluyendo los hombros laterales.

Carpeta o Superficie de Rodamiento o Rodadura: Según (Pavimentos, 2002) es la parte superior de un pavimento, por lo general de pavimento bituminoso o rígido, que sostiene directamente la circulación vehicular.

Carretera, calle o camino: Según (Pavimentos, 2002) es un calificativo general que designa una vía pública para fines de tránsito de vehículo, y que incluye la extensión total comprendida dentro del derecho de vía.

Daños: En base a (Pavimentos, 2002) los daños son desperfectos ocurridos en la superficie de una carretera debido a efectos de clima y tránsito.

Deflexión: A criterio de (Pavimentos, 2002) es el desplazamiento vertical temporal de un pavimento proveniente de la aplicación de cargas de las ruedas de los vehículos.

Derecho de Vía: Según (Pavimentos, 2002) es el área de terreno que el Gobierno suministra para ser usada en la construcción de la carretera, sus estructuras, anexos y futuras ampliaciones.

Berma: Según (Pavimentos, 2002) son las áreas de la carretera, contiguas y paralelas a la carpeta o superficie de rodadura, que sirven de confinamiento a la capa de base y de zona de estacionamiento accidental de vehículos.

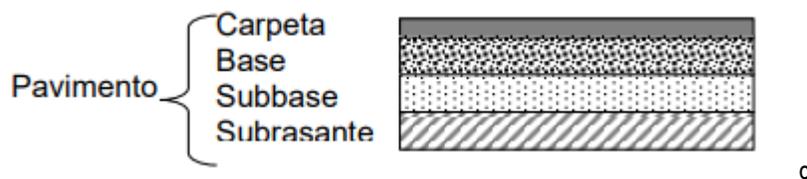
Mantenimiento: Según (Pavimentos, 2002) es el conjunto de tareas de limpieza, reemplazo y reparación que se realizan de manera regular y ordenada en una carretera, para asegurar su buen funcionamiento y la prolongación de su vida de servicio, al máximo compatible con las previsiones de diseño y construcción de la obra.

Mejoramiento: Según (Pavimentos, 2002) es la ejecución de las actividades constructivas necesarias para dotar a una carretera existente, en bueno, regular o

mal estado, de mejores condiciones físicas y operativas de las que disponía anteriormente, para ampliar su capacidad o simplemente ofrecer un mejor servicio al usuario.

Pavimento: Según (Pavimentos, 2002) es la estructura integral de las capas de subbase, base y carpeta colocado encima de la subrasante y destinada a sostener las cargas vehiculares.

Ilustración 1: Estructura Típica de Pavimento



Fuente: Manual Centroamericano de Diseño de Pavimentos.

Reconstrucción: Según (Pavimentos, 2002) es un trabajo mayor de rehabilitación de una carretera en mal estado, para restablecer sus condiciones físicas a un mejor nivel de servicio, al que fue construida anteriormente.

Rehabilitación: Según (Pavimentos, 2002) es la ejecución de las actividades constructivas necesarias para restablecer las condiciones físicas de la carretera a su situación como fue construida originalmente.

Rugosidad: Según (Pavimentos, 2002) es la desviación vertical del perfil de un pavimento de su forma tal como fue diseñado y que resulta en incomodidades en el manejo del vehículo. Por lo general, la rugosidad se mide para fines de mantenimiento vial por medio de IRI.

Subrasante: Según (Pavimentos, 2002) es la capa de terreno de una carretera, que soporta la estructura del pavimento y que se extiende hasta una profundidad en que no le afecte la carga de diseño que corresponde al tránsito previsto.

Tránsito: Según (Pavimentos, 2002) es la circulación de personas y vehículos por calles, carreteras, etc.

Adoquín: Piedra o concreto en forma rectangular, cuadrada o redonda para que pueda emplearse en el desarrollo de empedrados.

Zonas de confinamiento: Según (Prefabricadosjara, 2019) puede existir confinamiento externo, que rodea el pavimento, e interno, que rodea las estructuras que se encuentran dentro de este. El confinamiento externo suele estar formado por un bordillo, o el cordón de un andén, contra una zona verde o un cordón en el mismo nivel contra otro tipo de pavimento.

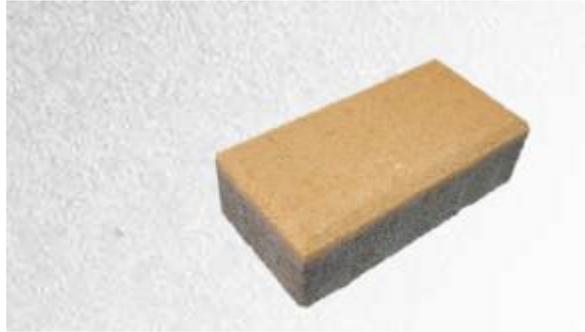
2.2.2 Pavimentos de Adoquín de Concreto

2.2.2.1 Adoquines de concreto

Según (Ortiz, 2012) los adoquines de concreto son elementos macizos, prefabricados, de un espesor uniforme e iguales entre sí, con forma de prisma recto que al colocarlos sobre una superficie encajen unos con otros, de manera que solamente queden juntas entre ellos. El espesor de los adoquines debe ser de 6 cm para un pavimento de tráfico liviano y de 8 cm, para calles, patios industriales, muelles y aeropuertos.

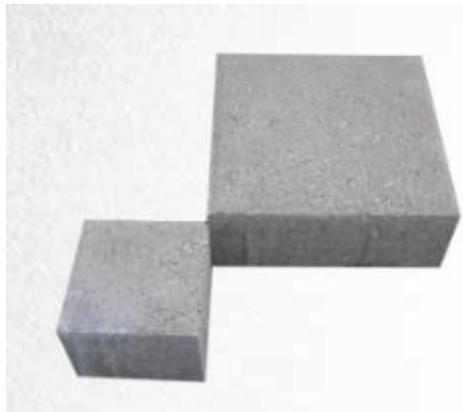
Según (Ortiz, 2012) la transmisión de esfuerzos entre adoquines se da por medio de la trabazón horizontal, rotacional y vertical entre ellos, evita desplazamientos de los adoquines respecto a sus colindantes, ayuda también a la distribución de los esfuerzos de las capas superficiales a las capas internas, de tal forma, que las presiones en estas últimas sean menores. Para lograr este efecto todo el adoquinado debe estar confinado con elementos de borde tales como los bordes prefabricados de concreto o vaciados insitu.

Ilustración 2: Adoquín Rectangular



Fuente: Pedregal, Costa Rica

Ilustración 3: Adoquín Cuadrado



Fuente: Pedregal, Costa Rica

Ilustración 4: Adoquín clásico



Fuente: Pedregal, Costa Rica

Ilustración 5: Adoquín Lisboa



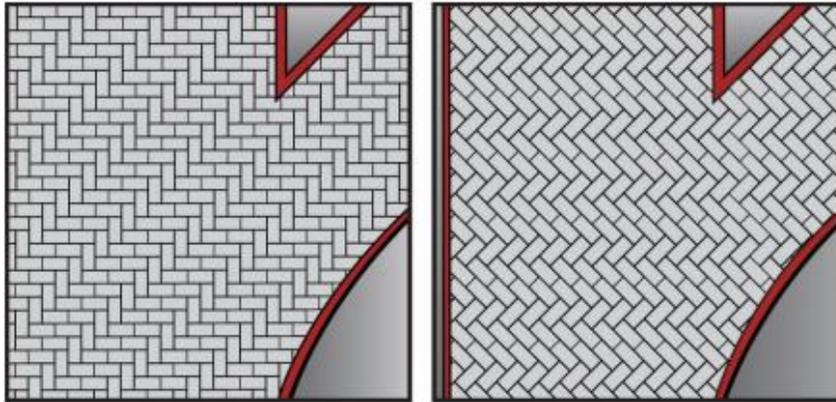
Fuente: Pedregal, Costa Rica

2.2.2.2 Aspectos de diseño

Según (Ortiz, 2012) la propiedad de distribuir las cargas de los adoquines de concreto depende esencialmente de la forma, el espesor, la resistencia mecánica y la forma de colocar los adoquines.

Según (Ortiz, 2012) los adoquines más recomendados para condiciones de tráfico pesado, como en patios industriales, puertos y carreteras, es el de forma rectangular colocada en patrón de espina de pescado a 45° y 90°.

Ilustración 6: Adoquín rectangulares colocados



a. Espina de pescado a 90°

b. Espina de pescado a 45°

Fuente: Instituto del cemento y concreto de Guatemala

2.2.3 Proceso constructivo

2.2.3.1 Colocación de la base o sub-base

Según (Ortiz, 2012) los adoquines deben estar sobre una base o sobre una sub-base, cuyos espesores pueden ser menores que para el asfalto y deben de tener obras adicionales de confinamiento como los bordillos prefabricados de concreto.

El diseño de cada una de las capas del pavimento deberá estar relacionado a la capacidad de carga del terreno del proyecto, la vida útil del diseño, el tipo de tránsito y los materiales constructivos. La calidad de los materiales es un factor muy importante para la realización del diseño, además, es importante tomar en cuenta la densidad especificada (prueba Próctor) para la escogencia de estos.

2.2.3.2 Colocación de la cama de arena

La cama de arena que se debe colocar como base para los adoquines debe tener un espesor entre 40 mm y 50 mm, cumplir con los requisitos granulométricos y con un contenido de finos (limos y arcillas) no mayor a 5%.

2.2.3.3 Instalación

La instalación del pavimento de adoquín deberá seguir cuidadosamente un orden de actividades a realizar, para evitar contratiempos y desperdicio de materiales ya que se pueden tener materiales y frentes de trabajo diferentes, que únicamente cuando se coordinan debidamente permiten obtener un pavimento de buena calidad.

Según (Ortiz, 2012) la capa de arena ya colocada divide el área de trabajo en dos, porque ésta no se debe pisar ni desordenar. Por esto, debe planearse el suministro de materiales y equipos así: los de la base y la capa de arena llegarán por el lado hacia el cual avanza la pavimentación y los adoquines y la arena de sello lo harán por el lado terminado.

Según (Ortiz, 2012) para poder colocar la capa de rodadura, que como se dijo está compuesta por la capa de arena; los adoquines y el sello de arena, es necesario tener listas todas las estructuras de confinamiento y de drenaje, que vayan a formar parte del pavimento, de modo que se forme una caja dentro de la cual se construya dicha capa.

A continuación se describen las etapas constructivas de un pavimento de adoquín:

- Primeramente se debe nivelar la subrasante con las pendientes establecidas por el diseño geométrico de la vía para el drenaje, de modo que sobre ésta se coloque después un espesor constante en toda el área del pavimento. Posteriormente, se debe retirar el material que

sobre en los cortes o se rellenan las zonas de relleno o huecos, con material de igual o mejor calidad que el de la subrasante.

- La base se debe ir construyendo por capas de espesor constante en toda el área del pavimento. Cada una de las capas deberá quedar completamente compactada antes de colocar la siguiente. El espesor de cada una de estas capas está en función del equipo que se tenga para la compactación del respectivo proyecto.
- Debido a que al compactar una cantidad definida del material de base su espesor se ve reducido, es necesario colocar uno mayor, de material suelto, esto para que al compactarlo su espesor quede como el requerido por el diseño.
- El confinamiento externo constituido, en general, por el cordón de la acera, un bordillo contra una zona verde o un cordón y caño a nivel, con otro tipo de pavimento. Dado que estos elementos están en contacto directo con las llantas de los vehículos, serán de un concreto de alta calidad (alta resistencia) y con detalles bien terminados.
- Los bordillos colados en obra deberán hacerse con formaleta, vibrados y bien acabados. Se recomienda que estos tengan un espesor de 10 cm para tránsito peatonal, 15 cm para tránsito vehicular y 45 cm de profundidad, para que penetren como mínimo 15 cm de la base. Si son prefabricados deberán tener un respaldo firme como lo es una acera o un contrafuerte de concreto.
- Para el confinamiento interno, los cuales son estructuras que se encuentran dentro del pavimento (sumidero o canal de aguas, cámaras de inspección, cunetas, entre otros). Sus paredes deberán ser de concreto colados insitu o prefabricados, con un espesor de 15 cm para tránsito vehicular, 10 cm para peatonal y con huecos de media pulgada de diámetro, cada 40 cm, en el nivel de la capa de la capa de arena, si son de drenaje.
- No se debe construir cordones transversales de confinamiento para los adoquines cada cierta distancia, esto para evitar que se corran,

exceptuando los cambios fuertes de pendiente de la vía. Si la pendiente es mayor al 10%, se confina al comenzar y terminar cada cuadra, en calles, y cada 100 m, en carreteras.

- La capa de arena tendrá un espesor de 50 mm (5 cm), antes de colocar los adoquines y deberá ser uniforme en toda la superficie del pavimento. Por ello, no se utiliza para corregir todas las irregularidades con que pueda haber quedado la base, ya que si se hace así, aparecerán irregularidades en forma de ondulaciones en la superficie del pavimento.
- Para la colocación de la cama de arena se utilizan 3 reglas o codales, de madera o de aluminio, 2 de ellos como rieles y otro como enrasador. Deben tener como mínimo 4 cm de altura. Los rieles se colocan paralelos en ambos lados de la vía y en el centro, esto para cubrir su ancho con solo dos pasadas.
- Los rieles se colocan sobre la base ya nivelada y compactada. En el espacio entre ellas se coloca suficiente arena suelta como para que quede una pequeña cantidad para arrastrar. El enrasador se manejará desde afuera de los rieles, dos personas pasándolo una o dos veces a lo largo, sin realizar un movimiento de zigzag, es decir, se debe pasar de una forma completamente recta.
- La superficie de la arena enrasada deberá quedar completa, sin huecos ni rayones. Si la arena sufre alguna compactación por el paso de personas, vehículos, animales, antes de colocar los adoquines ésta se deberá soltar con un rastrillo de jardinería y posteriormente deberá de ser enrasada nuevamente con una regla o llaneta.
- El patrón que lleven los adoquines como la alineación es muy importante que se mantengan a lo largo de la vía o zona que se vaya a pavimentar. Para realizar esto se deben utilizar hilos, a lo ancho y largo de la vía, colocados mediante estacas de madera, trozos de varilla para refuerzo o unos cuantos adoquines bien alineados y nivelados. Los colocadores de adoquín deberán pararse sobre tablas, tablones o

láminas de madera contrachapada durante la colocación de los adoquines y antes de compactarlos y deberán formarse caminos para el transporte de materiales (como adoquines o arena), sobre los adoquines sin compactar.

- La compactación inicial y final, que se hace con el sellado de las juntas, esto se debe hacer con un vibrocompactador de placa, de tamaño corriente, teniendo cuidado de no utilizar equipos muy grandes en pavimentos con adoquines de 6 cm de espesor ya que estos se pueden fisurar. En la compactación inicial se deben dar dos pasadas de placa como mínimo, desde diferentes direcciones, recorriendo toda el área en una dirección antes de empezar a recorrerla en la otra, y teniendo cuidado de traslapar cada recorrido con el anterior para evitar escalonamientos. Las labores de compactación y sellado del pavimento, se llevarán hasta un metro antes de los extremos no confinados del pavimento, como en los frentes de trabajos de la obra en la pavimentación de vías; y esa franja que queda sin compactar se terminará con el tramo siguiente .
- Se debe usar una arena fina para sellar las juntas, como la empleada para morteros de repello. Para que penetre por las juntas debe estar seca y no debe tener granos de más de 2,5 mm de grosor. No se deberá adicionar cemento, cal o reemplazarla por mortero, pues el sello quedaría quebradizo y se saldría de las juntas conforme pasa el tiempo. La arena se esparce sobre los adoquines, formando una capa delgada, que no los alcance a cubrir totalmente, y se barre con escobas o cepillos de cerdas duras, tantas veces como sea necesario, para que llene la junta. Este barrido se debe realizar alternando con la compactación final, o simultáneo con ésta, si se dispone de personal.
- La compactación final se hará con el mismo equipo y de la misma manera que la compactación inicial pero con el barrido simultáneo o alterno del sello de arena. La arena que no se empaste sobre los adoquines ni que forme morros que hagan hundir los adoquines al pasar

la placa vibrocompactadora sobre ellos. Se deberán dar al menos cuatro pasadas con la placa vibrocompactadora en diferentes direcciones y traslapando cada recorrido con el anterior, o las pasadas necesarias para que los adoquines queden completamente firmes. Una vez terminada la compactación, se podrá dar al servicio el pavimento.

2.2.3.4 Almacenamiento y manipulación

Según (Ortiz, 2012) para que el material no sufra quebraduras, despuntes ni fisuras, es necesario que quede correctamente almacenado en el sitio de instalación o almacenamiento temporal.

2.2.3.5 Utilización y mantenimiento

Según (Ortiz, 2012) con cada tipo de pavimento se deben tener cuidados diferentes, tanto para su utilización como para su mantenimiento. Para que funcione bien la junta entre adoquines debe permanecer llena. Si se pierde más de 1 cm de sello, se debe buscar la causa de ésta, para corregirla y barrer la arena fina seca, hasta que la junta quede llena de nuevo. La presencia de grama en la junta no es nociva; pero se puede retirar con un punzón metálico y se vuelve a llenar la junta.

Según (Ortiz, 2012) si se hunde el pavimento por daños en redes de servicio o por brechas mal compactadas; se deben retirar los adoquines, hacer la reparación y volver a construir la franja del pavimento; dejando una corona de unos 2 cm en la base ya compactada, para que al consolidarse la zona reparada llegue al nivel del resto del pavimento.

2.2.4 Ventajas de los pavimentos de adoquín

2.2.4.1 Ventajas de los pavimentos de adoquín

Según (Ortiz, 2012) las ventajas de estos pavimentos se basan en que su capa de rodadura está hecha de adoquines de concreto; es decir, piezas prefabricadas, que se pueden producir tanto en equipos sencillos y pequeños como en tecnificados y grandes; por parte de productores comerciales, grupos comunitarios o administradores municipales; sin importar la escala y la localización de los proyectos. Para su construcción se utiliza poca maquinaria (básicamente una placa vibrocompactadora) y mucha mano de obra local.

Según (Ortiz, 2012) como los adoquines no van pegados, sino unidos por compactación y como deben durar unos 40 años, al reparar el pavimento se pueden reutilizar, por lo cual son muy económicos para poblaciones o barrios sin redes de servicios completos o en mal estado.

Según (Ortiz, 2012) todos los materiales para este pavimento llegan a la obra listos para ser utilizados por lo cual se puede construir y dar al servicio en un mismo día. Esto permite desarrollar un programa de pavimentación por etapas, a medida que se va disponiendo de recursos.

Según (Ortiz, 2012) al pavimento de adoquín se le coloca una base que se diseña para que resista cualquier tipo de tránsito, desde el peatonal hasta el de camiones. Adicionalmente, como los adoquines se producen en máquina con moldes, se les puede dar distintas formas; y también colores, para que sean decorativos.

Según (Ortiz, 2012) por esto el pavimento de adoquines se utiliza desde zonas para tránsito peatonal (andenes, plazas, patios para juegos, instalaciones deportivas) hasta las de tránsito pesado (calles, carreteras, terminales de transporte, carga y puertos, pistas para aeropuertos) e inclusive para fines decorativos.

Ilustración 7: Área peatonal en Sydney Olympic Park, Australia (2000)



Fuente: Manual de Diseño de Pavimentos de Adoquines de Hormigón de Chile, 2013

Ilustración 8: Área de acopio de contenedores en puertos, Argentina



Fuente: Manual de Diseño de Pavimentos de Adoquines de Hormigón de Chile, 2013

Ilustración 9: Pavimento vehicular de adoquín de hormigón después de 10 años de construcción, Israel



Fuente: Manual de Diseño de Pavimentos de Adoquines de Hormigón de Chile, 2013

Ilustración 10: Pavimentos de adoquines en aeródromos



Fuente: Manual de Diseño de Pavimentos de Adoquines de Hormigón de Chile, 2013

2.2.4.2 Ventajas debidas al manejo del pavimento

Según (Ortiz, 2012) la capa de rodadura es quizá el elemento más costoso de cualquier pavimento. Cuando se presenta una falla en los pavimentos o cuando hay

que instalar o reparar redes de servicios que van enterrados por la vía es independiente retirar, y con esto destruir, las distintas capas del pavimento. Cuando se tiene un pavimento de adoquín la capa de rodadura es recuperable, pues como no van pegados unos con otros se pueden retirar y almacenar ordenadamente para reutilizarlos luego, en el mismo o en otro lugar, para la construcción de un pavimento nuevo. Esta propiedad es la que hace que el pavimento de adoquines sea especial, pues se puede reparar fácilmente y por lo tanto resulta ideal para pavimentar aquellas vías que aún no tengan completas las redes de servicios.

Según (Ortiz, 2012) el mantenimiento de los pavimentos de adoquines es muy simple. Además, de la reparación de las zonas que por problemas constructivos puedan presentar algún hundimiento, el pavimento de adoquines sólo requiere que se le retire la vegetación que pueda aparecer dentro de las juntas, en aquellas zonas abandonadas o por donde no exista tráfico permanente, y del llenado, mediante barrido de arena fina, de las juntas que se hayan vaciado. Nunca requiere de sobrecapas para mantener un buen nivel de servicio.

2.2.4.3 Ventajas debidas a su apariencia

Según (Ortiz, 2012) por estar conformado por muchas piezas iguales el pavimento de adoquín induce un cierto sentido de orden en la vía. Además, la existencia de las juntas entre los adoquines elimina la monotonía que presenta la superficie continua de los otros pavimentos.

Según (Ortiz, 2012) los adoquines se pueden fabricar de diferentes formas, adicionando colores minerales a la mezcla y utilizando cemento gris o blanco. Con algunos adoquines de color diferente al resto, se pueden incorporar en la superficie del pavimento señales y demarcaciones tan duraderas como éste, pero que a la vez pueden ser removidas fácilmente; se pueden colorear zonas para diferenciar su utilización o incorporar dibujos decorativos.

2.2.4.4 Ventajas relativas a la seguridad

Según (Ortiz, 2012) los pavimentos de adoquines se prestan para incorporar señales, o se pueden colocar en medio de otros pavimentos sirviendo como zonas de aviso para disminución de velocidad o zonas permanentes de velocidad restringida. Además, por su rugosidad, los pavimentos de adoquines tienen una distancia de frenada menor que otros tipos de pavimentos, lo que se traduce en seguridad tanto para los peatones como para quienes se desplazan en los vehículos.

2.2.4.5 Ventajas relativas a la durabilidad

Según (Ortiz, 2012) la calidad que se le exige a los adoquines de concreto garantiza su durabilidad, de manera que sean resistentes a la abrasión del tráfico de llantas, a la acción de la intemperie y al derrame de combustibles y aceites, lo que lo hace ideales para la pavimentación de estacionamientos, estaciones de servicio, patios industriales, entre otros. Un adoquín, como tal, tiene una vida casi ilimitada. Aunque la estructura del pavimento puede sufrir algún deterioro después de estar en servicio por 20 o más años, con una reparación menor el pavimento de adoquín puede alcanzar una vida útil de 40 años y estar todavía en condiciones de servicio por mucho más tiempo.

2.2.5 Comportamiento estructural de los pavimentos de adoquines

Según (Bahamondes, 2013) los adoquines, arena de juntas y cama de arena generan un mecanismo de trabazón mecánica entre los adoquines mediante el cual son capaces de disipar tensiones, transmitiendo carga entre adoquines adyacentes.

Según (Lim, 2003) describen el mecanismo de trabazón mecánica como el resultado del efecto combinado de cuña y rotación que se produce entre los adoquines al ser cargados. En el efecto de cuña el adoquín cargado empuja longitudinalmente los adoquines vecinos. El efecto de rotación, en tanto nace de girar los adoquines vecinos en torno alguno o varios de sus ejes. En adoquines rectangulares se produce el efecto de cuña o el efecto combinado de cuña y rotación en el caso de adoquines de caras dentadas. A lo anterior se agrega el aporte de la fracción entre las caras laterales de los adoquines, inducido por la arena en las juntas.

Según (Houben, 1986) otro aspecto particular de los pavimentos de adoquín es que la trabazón mecánica aumenta con la aplicación de cargas verticales hasta llegar a un nivel de equilibrio. Este se alcanza después de 10.000 repeticiones de carga de un eje estándar (ejes equivalentes acumulados, EEA). Este comportamiento tiene asociado un aumento en la rigidez de la carpeta de rodadura, con lo cual aumenta la capacidad de disipar tensiones y consecuentemente disminuyen las tensiones que se transmiten a las capas inferiores del pavimento.

(Houben, 1986) Verificó este aumento de la rigidez a través de mediciones en tramos de prueba y lo asociaron al comportamiento de las deformaciones permanentes del pavimento. De esta forma (Houben, 1986) propuso un modelo de progresión de las deformaciones permanentes en función de EEA de 80 kN.

Según (Houben, 1986) plantea que las deformaciones elásticas mantienen un nivel constante mientras se desarrolla la trabazón mecánica, hasta que alcanzan su nivel de equilibrio, lo cual ocurre cuando los ejes equivalentes acumulados alcanzan un valor crítico. Luego las deformaciones elásticas disminuyen de manera progresiva. Asimismo, las deformaciones permanentes aumentan a una tasa de acumulación decreciente. (Houben, 1986) Utilizó su modelo de progresión de las deformaciones permanentes para proponer un método de diseño para las condiciones de suelo y materiales de Holanda, usando como criterio de diseño el ahuellamiento en el pavimento.

2.2.5.1 Estado de tensiones en pavimentos de adoquines

Según (Solar, 2013) en pavimentos convencionales el estado de tensiones se obtiene con el modelo elástico multicapa de Boussinesq, el cual permite calcular el bulbo de tensiones y el estado de deformaciones en cualquier punto bajo la aplicación de una carga. En pavimentos de adoquín, sin embargo, el modelo no resulta adecuado debido a la variabilidad de materiales, y a la rigidez de las capas constitutivas del pavimento, lo cual limita notablemente la aplicabilidad del modelo de Boussinesq.

Según (Solar, 2013) debido a la presencia de la cama de arena, las tensiones en la parte superior de la base se ven reducidas por la disipación en los bloques y en la cama de arena debido al efecto de trabazón mecánica. Por tanto, si σ_1 es la tensión en la superficie del adoquín inducida por la capa de rueda, la tensión en la parte superior de la base (σ_0) queda determinada por la siguiente ecuación.

$$\sigma_0 = \sigma_1 \left(\frac{R_0^2}{R_e^2} \right) - \sigma_1 k_e$$

Donde k_e es el factor de dispersión de tensiones en la cama de arena, el cual se determina experimentalmente dependiendo de la relación de radios de plato de carga (R_0), del experimento de Dutruel y Dardare (1984) y el radio equivalente de carga de rueda (R_e), en la fibra interior del adoquín.

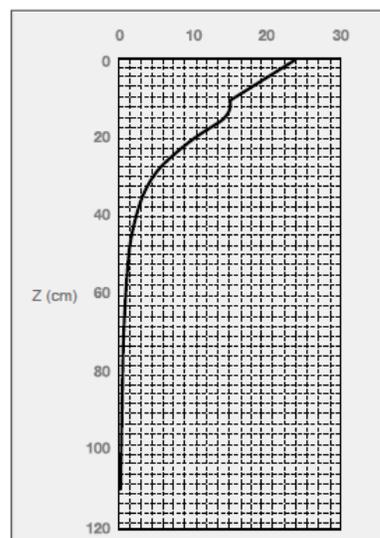
Según (Solar, 2013) si se aplica la regla de difusión trapezoidal de tensiones hasta la cama de arena, es posible reducir el radio equivalente R_e , obteniéndose la expresión de Eisenman y Leykauf (1988), la cual se muestra a continuación.

$$R_e = R_1 + h_{\text{adoquín}} h_{\text{cama de arena}}$$

Según (Solar, 2013) estudios experimentales realizados por Panda (2006) y otros investigadores, analizados por Soutsos (2011), proponen un factor de disipación de tensiones entre 0,55 y 0,6. Es decir, la tensión disipada por el adoquín y cama de arena puede alcanzar hasta un 45% de la carga aplicada.

De acuerdo con (Solar, 2013) estos resultados permiten obtener el valor de tensión en la parte superior de la base. Con este valor es posible, posteriormente, modelar mediante la ecuación de Boussinesq el estado tensional en la base, subbase y subrasante, con lo cual es posible contar indirectamente con un bulbo de presiones.

Ilustración 11: Bulbo de presiones bajo el eje de aplicación de la carga para un eje simple de 8,17 Ton, con un espesor de adoquín de 60 mm y cama de arena de 40 mm



Fuente: Manual de Diseño de Pavimentos de Adoquines de Hormigón de Chile, 2013

2.2.5.2 Trabazón mecánica

Según (Vlist, 1980) la trabazón mecánica se define como la inhabilidad de los adoquines de moverse aisladamente de sus vecinos y es en ausencia un mecanismo de disipación de tensiones. Es la principal característica que define el comportamiento de los pavimentos de adoquines. El efecto de transferencia de carga entre adoquines permite que estos actúen de forma solidaria, más que como piezas rígidas aisladas, lo cual acerca a este tipo de pavimento hacia un comportamiento flexible.

Según (Solar, 2013) la trabazón mecánica en los adoquines determina en buena parte la capacidad resistente del pavimento, su durabilidad y serviciabilidad, pero principalmente depende de la forma del adoquín, del aparejo utilizado, de la dirección de las fuerzas aplicadas y del espaciamiento entre las juntas.

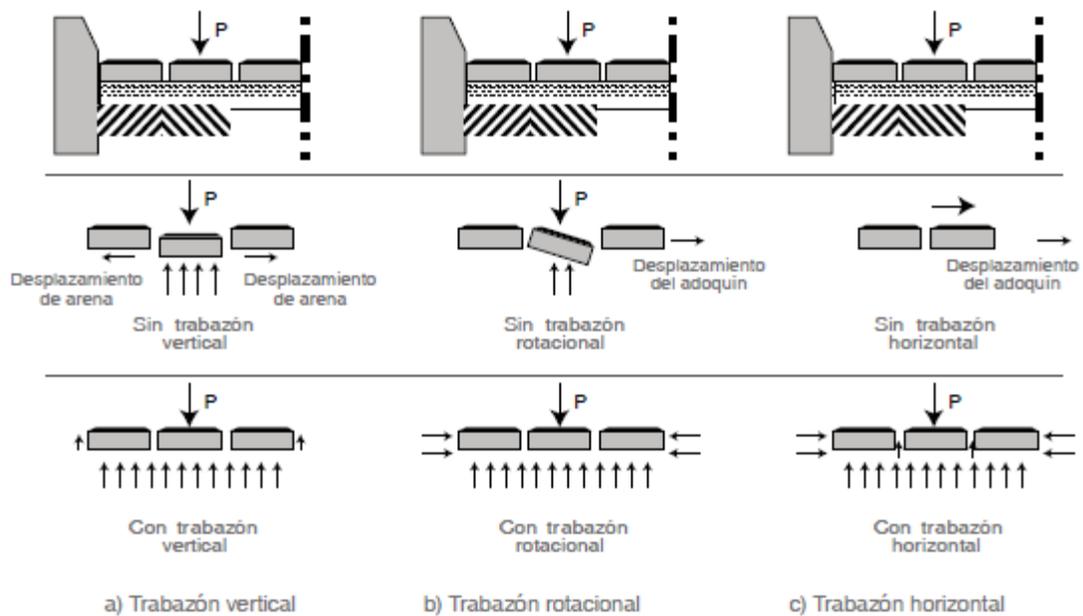
Según (Schakel y Lim, 2003), la trabazón de los adoquines se puede clasificar en trabazón vertical, rotacional y horizontal. La trabazón horizontal es importante, para la transferencia de carga hacia los adoquines adyacentes a través de las juntas. Esta se logra a través del diseño adecuado del espesor de junta y a la compactación adecuada del material de relleno de las juntas. Esto permite que una parte importante de la trabazón vertical se deba a la fricción.

Por consiguiente, la trabazón rotacional es necesaria para controlar deformaciones y desprendimiento o rotura de adoquines. Está relacionada con el espesor del pavimento, el espacio entre juntas y las restricciones de borde. A criterio de (Sun, 1996) particularmente, las restricciones de borde limitan el “efecto de arco”, que corresponde al levantamiento de los adoquines contiguos por rotación de los adyacentes.

Según (Schakel y Lim, 2003) la trabazón horizontal es necesaria para soportar las fuerzas de corte producidas en maniobras de frenado, giro y aceleración. La resultante de estas fuerzas es el desplazamiento de los adoquines, el cual se puede limitar utilizando formas irregulares y aparejos que minimicen estos

desplazamientos. Una trabazón mecánica adecuada, permite controlar deformaciones permanentes, el desprendimiento y fractura de los adoquines así como el lavado del material más fino de la cama de arena. Por lo anterior es conveniente revisar los factores que determinan la trabazón mecánica.

Ilustración 12: Trabazón vertical, horizontal y rotacional de un pavimento de adoquín (Knapton y Barber, 1980)



Fuente: Manual de Diseño de Pavimentos de Adoquines de Hormigón de Chile, 2013

2.2.5.3 Efecto conjunto de la forma y aparejo de los adoquines

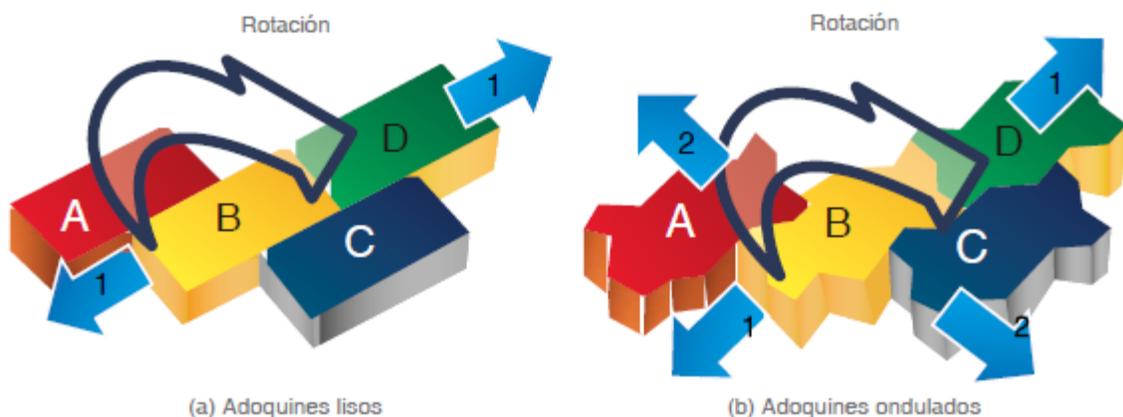
(Schakel y Lim, 2003), analizaron extensamente el efecto del aparejo y forma del adoquín en la trabazón mecánica considerando dos tipos de adoquines:

adoquines lisos y adoquines ondulados, y dos tipos de aparejos: aparejo lineal y aparejo de pescado.

Según (Schakel y Lim, 2003) en la ilustración 13 se muestra el efecto de la rotación del adoquín “B” sobre los adoquines adyacentes “A”, “C” y “D” para el caso del aparejo lineal y adoquines lisos y ondulados. Al someter a rotación al adoquín liso “B” este es libre de girar en torno a los adoquines “A” y “C”, perdiendo trabazón lateral y empujando al adoquín “D”. En este caso, se produce un efecto de cuña en la dirección 1, la cual es la única que permite lograr trabazón entre los adoquines “B” y “D” por contacto directo.

En el caso del adoquín ondulado, la misma ondulación genera trabazón del adoquín “B” con respecto a los adoquines “A” y “C”, impidiendo la rotación libre. Esto lleva a que el efecto de acuñamiento por empuje se produzca en las direcciones 1 y 2, aumentando la trabazón en dos sentidos y por consiguiente, aumentando la rigidez del conjunto de bloques.

Ilustración 13: Efecto de la rotación de adoquines lisos y ondulados en aparejos lineales (Schakel y Lim, 2003)

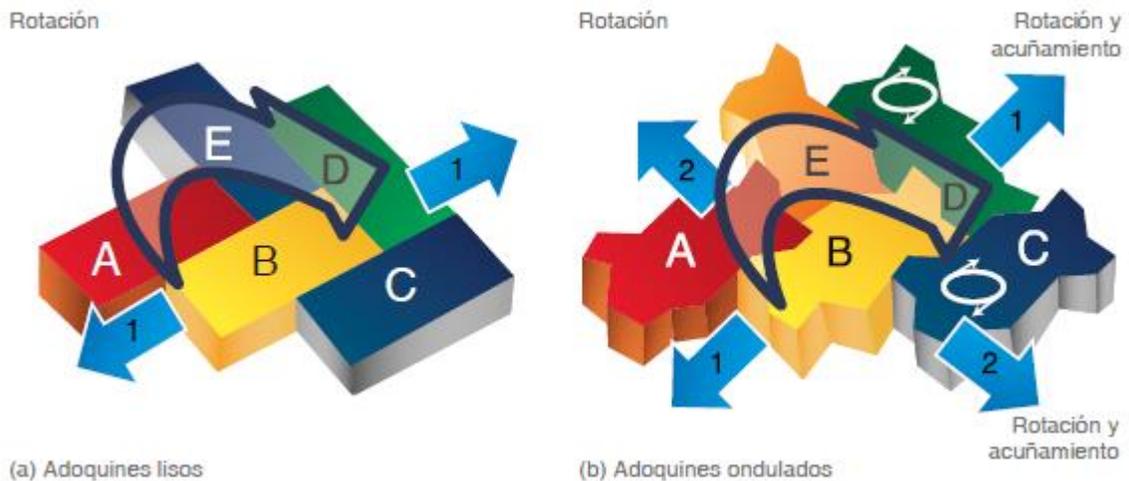


Fuente: Manual de Diseño de Pavimentos de Adoquines de Hormigón de Chile, 2013

Al comparar ambos tipos de adoquines para el aparejo espina de pescado se llega a resultados similares. En el caso de adoquines lisos se puede apreciar que la rotación del adoquín “B” también ocurre libremente respecto de los adoquines “A,”C” y “E”, produciendo acuñaamiento del adoquín “D” y eventualmente rotación en torno a su eje vertical. (Schakel y Lim, 2003)

Según (Schakel y Lim, 2003) en el caso de los adoquines ondulados el adoquín “B” está impedido de girar libremente respecto de los adoquines “A”, “C” y “E”, produciendo acuñaamiento en ambas direcciones (1 y 2). Por otro lado, el empuje producido por el adoquín “B”, induce una rotación en torno al eje horizontal de los adoquines “C” y “D”, magnificando el efecto de acuñaamiento. Por tanto, la trabazón se hace más eficiente en este último caso aumentando aún más la rigidez del conjunto de adoquines.

Ilustración 14: Efecto de rotación de adoquines lisos y ondulados en aparejos de espina de pescado (Schakel y Lim, 2003)

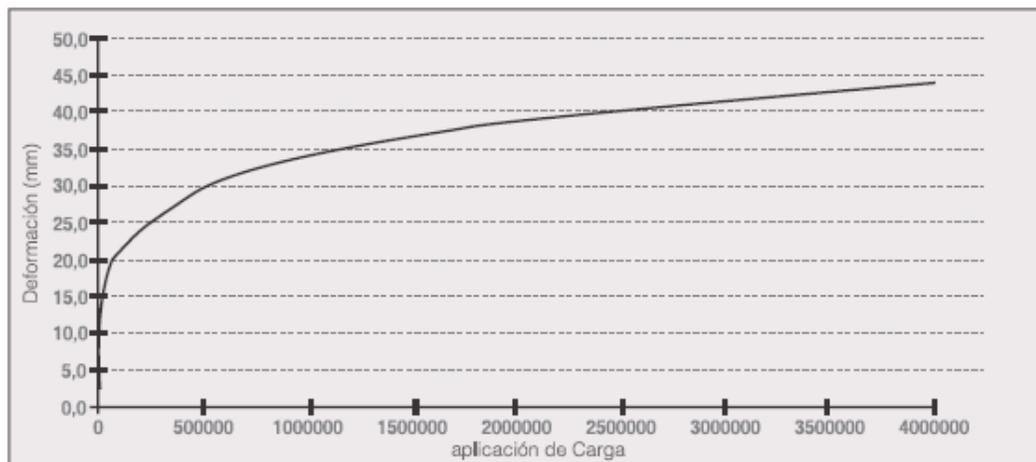


Fuente: Manual de Diseño de Pavimentos de Adoquines de Hormigón de Chile, 2013

2.2.5.4 Comportamiento a la fatiga

Según (Solar, 2013) la principal variable que describe el comportamiento a la fatiga de los pavimentos de adoquines es la deformación permanente. Utilizan como criterio de comparación las deformaciones permanentes. Conceptualmente, las deformaciones permanentes se acumulan en el tiempo en la medida que el pavimento recibe aplicaciones de carga, hasta llegar a un máximo y estabilizarse de acuerdo al modelo de la siguiente figura.

Ilustración 15: Progresión de las deformaciones permanentes en pavimentos de adoquines (Van der Heijden y Houben, 1988)



Fuente: Manual de Diseño de Pavimentos de Adoquines de Hormigón de Chile, 2013

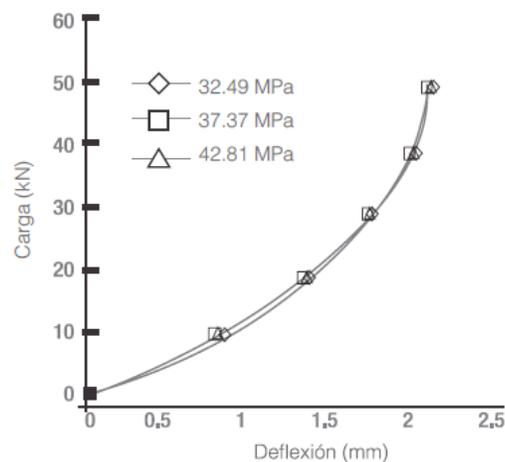
Según (Sharp y Armstrong, 1986) el proceso de acumulación de deformaciones está relacionado estrechamente con la compactación durante la construcción. La compactación proporciona una densificación inicial, a la cual posteriormente se le suma la deformación debido a las cargas de tránsito. En esta segunda fase, los

efectos combinados de carga y clima determinan el proceso de progresión de las deformaciones.

2.2.5.5 Resistencia mecánica del adoquín

Según (Shackel, 1980) y (Panda y Gosh, 2002b) probaron que la resistencia a la compresión del adoquín no es determinante en el desempeño estructural del pavimento. Sin embargo, si es determinante para controlar otros parámetros de desempeño, como son la resistencia a ciclos de hielo/deshielo y al ataque de sulfatos.

Ilustración 16: Efecto de la resistencia a la compresión sobre las deflexiones del pavimento de adoquín (Panda y Gosh, 2002)

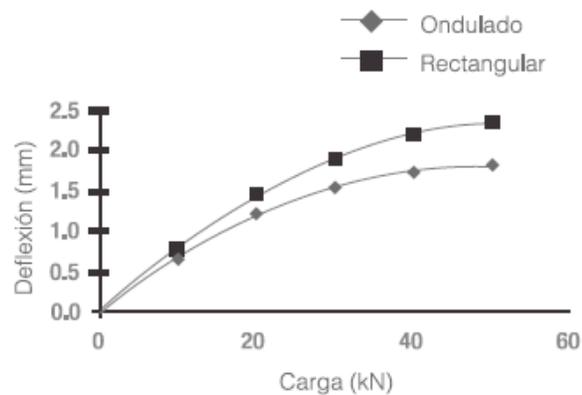


Fuente: Manual de Diseño de Pavimentos de Adoquines de Hormigón de Chile, 2013

2.2.5.6 Forma del adoquín

Según (Panda y Gosh, 2002) la forma del adoquín influye en la distribución de tensiones por trabazón mecánica, además, compararon adoquines ondulados, lo cual es consistente con los conceptos de Shackel y Lim (2003). La siguiente figura muestra los resultados obtenidos por Panda y Gosh (2003).

Ilustración 17: Efecto de la forma de los adoquines en las deflexiones (Panda y Gosh, 2003)



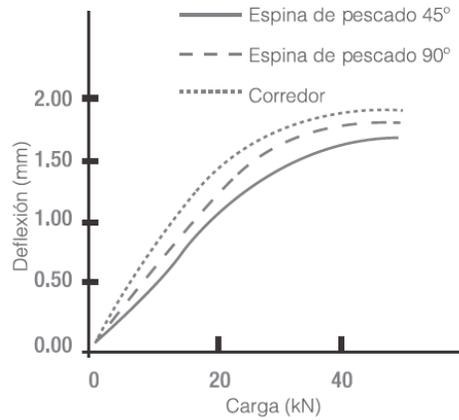
Fuente: Manual de Diseño de Pavimentos de Adoquines de Hormigón de Chile, 2013

2.2.5.7 Aparejo

De acuerdo con (Schakel y Lim, 2003) muestra que el aparejo espina de pescado a 45° es el más eficiente para limitar las deformaciones horizontales, ya que obtuvo

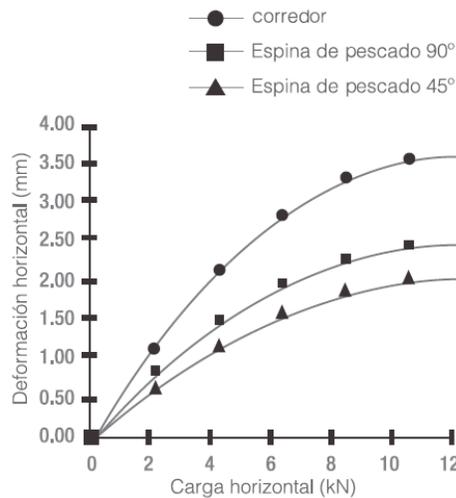
las menores deflexiones con el aparejo espina de pescado y mayores deflexiones con el aparejo corredor, lo cual se muestra en la siguiente figura.

Ilustración 18: Efecto del aparejo en las deflexiones de pavimentos



Fuente: Manual de Diseño de Pavimentos de Adoquines de Hormigón de Chile, 2013

Ilustración 19: Efecto del aparejo en las deformaciones horizontales de pavimentos para adoquines lisos de 60 mm y ancho de junta de 3 mm (Nor, 2006)

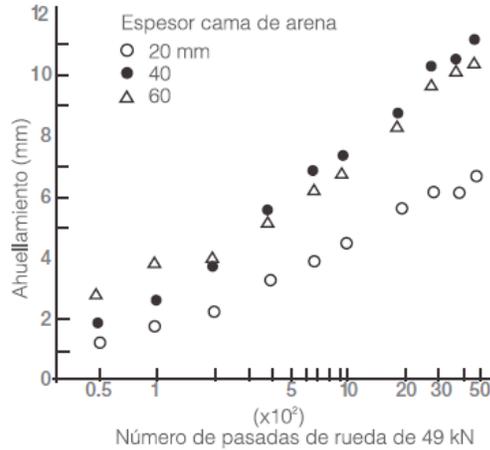


Fuente: Manual de Diseño de Pavimentos de Adoquines de Hormigón de Chile, 2013

2.2.5.8 Cama de arena

La función de la cama de arena es servir de base para la colocación de adoquines y permitir la consolidación producto de la compactación y paso del tráfico en los primeros años de vida del pavimento. Para que cumpla su función adecuadamente, la cama de arena debe caracterizarse en cuanto a su ancho y propiedades físicas. Esto garantizará su durabilidad en el largo plazo, especialmente ante la aplicación de cargas repetidas como es el caso de buses y camiones. (Baety, 1996)

Ilustración 20: Influencia del espesor de la cama de arena en las deformaciones verticales (Miura, 1984)



Fuente: Manual de Diseño de Pavimentos de Adoquines de Hormigón de Chile, 2013

2.2.5.9 Humedad

(Shackel, 1980) indica que la humedad de la cama de arena afecta directamente el corte. La práctica común es limitar la humedad de las arenas hasta un 8%, evitando que esta alcance la saturación. Además, explica que en un rango de humedad entre 4% y 8% se logra la mayor eficiencia en la compactación, siendo un valor deseable de 6%.

2.2.5.10 Base y Subbase

Según (Solar, 2013) la base y subbase tienen por objetivo disipar las tensiones que recibe desde las capas superficiales y transmitir las uniformemente al terreno de

fundación, para así controlar las deformaciones en el tiempo. La base y subbase pueden estar conformadas por suelos granulares o bien estar tratadas con asfalto o cemento. Los primeros parámetros de desempeño son el espesor y la calidad, expresada en términos de granulometría, plasticidad y resistencia.

2.2.5.11 Subrasante

Según (Solar, 2013) para un cierto nivel de tráfico, la resistencia de la subrasante es la que determina la estructuración del pavimento y por consiguiente el espesor de cada una de sus capas constitutivas. La mayoría de los métodos utilizan para caracterizarla el valor de CBR, aun teniendo en cuenta las limitaciones de este indicador. Sin embargo, algunos métodos optan por estudiar el módulo resiliente, puesto que esto permite caracterizar de una manera más precisa el comportamiento a la fatiga de la subrasante.

2.2.6 Métodos de diseño de pavimentos de adoquines de hormigón

Según (Bahamondes, 2013) los métodos de diseño se clasifican en: los basados en capacidad de soporte del suelo, métodos empíricos, de secciones normalizadas y mecanistas. Ejemplos de métodos de diseño según esta clasificación son los propuestos en Australia (Morrish, 1980), Japón (Miura, 1984), Estados Unidos (Rada, 1990), Reino Unido (BSI, 2001a y b) e India (Ryantatiang, 2006). Los métodos basados en la capacidad de soporte del suelo fueron los primeros en desarrollarse.

Según (Bahamondes, 2013) el cálculo de espesor de la base (H_b) para un cierto nivel de tránsito, espesor de adoquín y espesor de cama de arena, se realiza en función del CBR de la subrasante usando un modelo que relaciona linealmente el CBR y H_b . Dentro de este enfoque se encuentra el método propuesto en Australia

(Morrish, 1980), adoptado en Chile (Barthou, 1991) y también el propuesto en Israel (Liveneh, 1998).

Según (Bahamondes, 2013) dentro de los métodos empíricos se encuentra el método de Rada (1990), que utiliza la ecuación AASHTO de diseño de pavimentos flexibles. Este método se utiliza actualmente en Estados Unidos (ASCE, 2010). Según (Bahamondes, 2013) en Japón, Miura (1984) propusieron un método similar que asume un comportamiento asimilable al de pavimentos flexibles.

Por otra parte, según (Bahamondes, 2013) otro de los enfoques de diseño es el mecanicista clásico, en el que se calcula el estado de tensiones y el ciclo de fatiga del material en un sistema multicapa, para así determinar los espesores de las capas de base y/o subbase que cumplen con el criterio de fatiga. Dentro de estos métodos se encuentran los de Suecia (Silfwerbrand & Wappling, 2000) e India (Ryantatiang, 2006). (Bahamondes, 2013) Expone que en los métodos de secciones normalizadas, el diseño del espesor de las capas del pavimento se realiza en base a catálogos de secciones de tipo obtenidas previamente aplicando en forma repetitiva métodos de diseño mecanicista, como es el caso de Polonia (Judycki, 1996), Sudafrica (Clifford, 1987), Alemania (Eisenmann & Leykauf, 1988) y Reino Unido (BSI, 2001a y b).

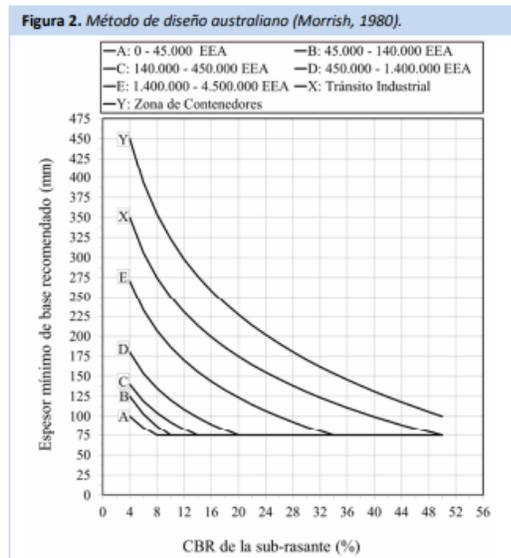
A continuación se explican los diferentes métodos de diseño, mencionados anteriormente.

2.2.6.1 Método de Diseño de Australia

Según (Bahamondes, 2013) utiliza curvas de diseño calibradas para condiciones locales. Considera cinco niveles de tránsito para calzada vehicular (A, B, C, D y E) y dos niveles para tránsito industrial (X e Y). Cada nivel de tránsito tiene asociada una curva de diseño. Para determinar el espesor de la base granular, se ingresa al gráfico con el valor de CBR de la subrasante y se interseca la curva correspondiente al nivel de tránsito de diseño seleccionado. El resultado es el espesor mínimo de la

base granular. El método no utiliza indicadores de desempeño, por lo que se asume que el criterio de diseño es la falla de la subrasante. El método es aplicable hasta una solictación de 4 500 000 EEA.

Ilustración 21: Método de diseño Australiano (Morris, 1980)



Fuente: Análisis de métodos de diseño de pavimentos de adoquines de hormigón, 2013

2.2.6.2 Método de Diseño de Japón

Según (Bahamondes, 2013) este método adoptó el método de diseño de pavimento flexibles de Japón para diseñar pavimento de adoquines a través del coeficiente de resistencia relativa de la capa de adoquines. Por lo tanto, asume que el comportamiento de los pavimentos de adoquines es similar a los pavimentos flexibles. Según (Bahamondes, 2013) este método establece que tanto los materiales como el espesor total del pavimento (H) está en función del CBR de la

subrasante y del número de pasadas equivalentes acumuladas de un eje estándar de 8 kN (N_{98}). El espesor de mezcla asfáltica equivalente expresado como (NE) está en función del CBR y de N_{98} , y se calcula como la suma del producto de los espesores de capa h , por los coeficiente de resistencia relativa del material (a_1) se obtiene en función del módulo de elasticidad del material de la capa "i" (E_i , en kg/cm^2) (Miura, 1984).

Ilustración 22: Método de diseño Japonés (Miura, 1984)

$$H = 28 \frac{N_{98}^{0.1}}{CBR^{0.6}} ; NE = 3,84 \frac{N_{98}^{0.16}}{CBR^{0.3}}$$

$$NE = a_1 h_1 + a_2 h_2 + \dots + a_n h_n = \sum a_i h_i$$

$$a_1 = 0,00525 \left(\frac{E_i^{0.46}}{0,44} \right)$$

Fuente: Análisis de métodos de diseño de pavimentos de adoquines de hormigón, 2013

2.2.6.3 Método de Diseño de Estados Unidos

Según (Bahamondes, 2013) el método fue propuesto originalmente por Rada (1990). Sin embargo, al igual que el método japonés, este método asume que un pavimento de adoquines tiene un comportamiento similar al de un pavimento flexible. Por lo tanto, asume que la pérdida de serviciabilidad de un pavimento de adoquín se podría asimilar a la de un pavimento flexible. De este modo, utiliza la

ecuación AASHTO 1986 (Ecuación 2) para pavimentos flexibles, caracterizando a los adoquines mediante el coeficiente estructural de Takeshita (Miura, 1984).

Ilustración 23: Método de diseño Japonés (Miura, 1984)

$$N_{80} = (NE + 24,5)^{3,36} 10^{-(16,4 + Z_R S_o)} M_R^{2,32} \left(\frac{p_i - p_f}{p_i - 1,5} \right)^{\frac{1}{\beta}} \quad (2)$$

$$\beta = 0,4 + \left(\frac{97,81}{NE + 25,4} \right)^{5,19}$$

$$E_{i+1} = 0,2h^{0,45}E_i$$

$$M_R = \begin{cases} 10(\text{CBR}) & ; \text{CBR} \leq 5\% \\ 17,6(\text{CBR})^{0,65} & ; \text{CBR} > 5\% \end{cases} \quad (3)$$

$$N_{80} = \frac{3,06 \times 10^{-7}}{\epsilon_z^{4,5337}}$$

Fuente: Análisis de métodos de diseño de pavimentos de adoquines de hormigón, 2013

Según (Bahamondes, 2013) en la ecuación 2 N_{80} es función de NE, del coeficiente estadístico de la distribución normal (Z_R), de la desviación estándar del error combinado de todas las variables (S_o), del módulo resiliente de la subrasante (M_R , en MPa), el índice de serviciabilidad inicial y final del pavimento (p_i y p_f respectivamente). Además, el método considera el aporte estructural de la capa combinada de adoquines y cama de arena a través del coeficiente (a_1), el cual depende del módulo de elasticidad, del nivel de tránsito y del tiempo de asentamiento. Este coeficiente aumenta linealmente desde 0,26 hasta 0,44, cuando

la sollicitación alcanza las 10,000 EEA. A partir de ese valor de sollicitaciones el coeficiente de capa permanece constante y vale 0,44.

2.2.6.4 Método de Diseño de India

Según (Bahamondes, 2013) este método considera el pavimento de adoquines como un sistema multicapa elástico. Cada capa de espesor (h_i) se caracteriza a través del módulo de elasticidad (E_i) y del módulo de Poisson. Según (Bahamondes, 2013) Ryntathiang (2006), mediante ensayos de placa de carga, estimaron el módulo de elasticidad de la capa de adoquines en 1,500 MPa. El módulo de elasticidad de las capas de base y subbase granulares la estiman aplicando la ecuación 3, en las cuales primero se relaciona el módulo de elasticidad de la capa superior e inferior E_{i+1} y E_i (en MPa) con el espesor de la capa inferior (h , en mm). Por último, el módulo resiliente de la subrasante lo estiman en función de las características mecánicas de todas las capas, para posteriormente calcular el estado de tensiones de la subrasante. Luego se determina el número de repeticiones de carga de 80 kN (N_{80}) que admite el pavimento tal que la deformación de la subrasante (ϵ_2) no exceda los 20 mm.

Ilustración 24: Método de diseño de India (Ryantathiang, 2006)

$$E_{i+1} = 0,2h^{0,45}E_i$$

$$M_R = \begin{cases} 10(\text{CBR}) & ; \text{CBR} \leq 5\% \\ 17,6(\text{CBR})^{0,65} & ; \text{CBR} > 5\% \end{cases} \quad (3)$$

$$N_{80} = \frac{3,06 \times 10^{-7}}{\epsilon_2^{4,5337}}$$

Fuente: Análisis de métodos de diseño de pavimentos de adoquines de hormigón, 2013

2.2.6.5 Método de Diseño del Reino Unido

Según (Bahamondes, 2013) este método posee tabulados espesores de base y subbase en función de las solicitaciones de tránsito y CBR. Estos espesores los obtuvieron en base a un análisis mecanicista en el cual estandarizaron los materiales de la base de modo tal que reducir hasta un valor admisible preestablecido las deformaciones permanentes. El método considera bases granulares mejoradas con cemento pero con una resistencia a la compresión similar a la de hormigones ligeros que en general son superiores a los 6 MPa. Para obtener el valor equivalente a bases de otro material, se multiplica por un factor de equivalencia que es igual a 3 para bases granulares con CBR=80% (Knapton, 2008).

Ilustración 25: Método de diseño del Reino Unido (BSI, 2001a y b)

Tabla 1. Espesor de la base (adaptado de BSI, 2001b)

Espesor de capa (mm)	Espesor (mm) de la base granular según tránsito (EEAx10 ⁶)			
	0,5 – 1,5	1,5 – 4,0	4,0– 8,0	8,0– 12,0
Base granular	390	390 – 480	540	690 –750
Base tratada con cemento	130	130 –160	180	230 – 250

Tabla 2. Espesor de la sub-base (adaptado de BSI, 2001a)

Nivel de tránsito (EE/día)	Espesor (mm) de la subbase granular según el CBR (%) de la subrasante					
	2	3	4	5–10	10–15	15–30
< 60	250	190	160	150	150	150
< 200	310	240	210	180	150	150
< 500	350	270	230	200	160	150
< 1.000	400	310	270	225	180	150
> 1.000	450	350	310	270	240	225

Fuente: Análisis de métodos de diseño de pavimentos de adoquines de hormigón, 2013

2.2.7 Normativas recomendadas para especificaciones técnicas y ensayos de adoquines de concreto

Según (Solar, 2013) la especificación más completa de ensayos la proporciona la norma europea provisional PrEN 1338:2010, la cual permite controlar particularmente la calidad del adoquín. Esta norma contempla los siguientes ensayos:

1. Métodos de muestreo
2. Control de dimensiones
3. Resistencia a ciclos de hielo/deshielo

4. Absorción del agua
5. Resistencia a la flexión
6. Resistencia a la abrasión
7. Resistencia al deslizamiento
8. Verificación de aspectos visuales

Según (Solar, 2013) la normativa australiana AS/NZS 4456 agrega otros ensayos a los adoquines:

1. Resistencia a la compresión
2. Resistencia al ataque de sales
3. Saltaduras por presencia de partículas de limo

Sin embargo, (Solar, 2013) realiza una tabla resumen de las normativas recomendadas a considerar respecto a especificaciones, ensayos, inspección y mantenimiento de adoquines de concreto.

Tabla 1: Normativas sobre especificaciones y ensayos de adoquines de concreto

Aspecto	Norma	Contenido
Adoquines	ASTM C936 - 08	Especificaciones para adoquines
	ASTM C1645 - 09	Ensayo de durabilidad ante ciclos de hielo/deshielo y sales anticongelantes.
Ensayos de adoquines	BS EN 1338: 2003	Requisitos y métodos de ensayo para adoquines homologados a norma europea.
Mantenimiento	ASTME284 - 11	Inspección y evaluación de pavimentos de adoquines.

Fuente: Manual de Diseño de Pavimento de Adoquines de Hormigón de Chile, 2013

CAPÍTULO III
MARCO METODOLÓGICO

3.1 Definición del enfoque y tipo de investigación utilizados.

El enfoque metodológico que tendrá esta investigación será cuantitativo, ya que este utiliza la recolección y el análisis de datos para contestar preguntas de investigación y probar hipótesis establecidas previamente y confía en la medición numérica, el conteo y frecuentemente en el uso de la estadística para establecer con exactitud patrones de comportamiento del tema de estudio. Es por ello que para la realización de este escrito se utilizará este tipo de enfoque.

Por otra parte, el tipo de investigación en el que se basará este proyecto será del tipo descriptivo ya que busca especificaciones, características y rasgos importantes de cualquier fenómeno o situación que se analice. Además, el estudio descriptivo mide de manera independiente los conceptos y variables a los que se referirá y centrará este escrito de una manera más precisa.

Además, este escrito será también del tipo analítica ya que la formulación de la propuesta metodológica de diseño y construcción de un pavimento de adoquín convencional será un trabajo en el cual se analizarán datos y resultados que han sido extraídos de manuales e información recopilada de otros trabajos realizados anteriormente tanto a nivel nacional como internacional.

3.2 Sujetos y fuentes de información.

El presente escrito tendrá como insumos los siguientes:

3.2.1 Sujetos de información:

La información obtenida para el presente trabajo estuvo orientado por los siguientes profesionales

Nombre	Descripción Profesional	Temas en que puede aportar
Pablo José Torres Morales	Ingeniero Civil	Diseño y Construcción de Pavimentos
José María Ulate	Ingeniero Civil	Análisis Vehicular y Geométrico de carreteras
Roy Allán Canet	Ingeniero Civil	Diseño y Construcción de Pavimentos

3.2.2 Fuentes de información:

Las fuentes de información a las que se recurrirán para esta investigación, son todas aquellas especializadas en el área de interés.

3.3 Definición de variables: conceptual, operativa e instrumental.

Las variables de consideración para el trabajo son las siguientes:

Variabes	Definición Conceptual	Definición Operativa	Definición Instrumental
Resistencia a la compresión	Es la capacidad que soporta un elemento cuando este se somete a esfuerzos de compresión.	Para especificar cuanto debe ser la resistencia de un adoquín convencional se utilizará la norma ASTM C140.	
Resistencia a la abrasión	Capacidad de un elemento de soportar el desgaste causado	Para especificar cuanto debe ser la resistencia de	

	por la abrasión en función del tránsito sobre el pavimento.	abrasión de un adoquín convencional se utilizará la norma ASTM C936-01.	
Absorción	Diferencia en la cantidad de agua contenida dentro de un elemento dentro de una unidad de mampostería, concreto o una unidad relacionada, entre su condición saturada y su condición seca.	Para especificar cuanto debe ser la absorción de un adoquín convencional se utilizará la norma ASTM 140-06.	
Granulometría	Es la distribución de los tamaños de las partículas de un agregado.	Para especificar como se realiza un análisis granulométrico se utilizará la norma ASTM D-422.	Se realiza por una serie de tamices con diferentes diámetros que son ensamblados en una columna.

3.4 Instrumentos y técnicas utilizadas en la recopilación de los datos.

Los instrumentos y técnicas que se utilizarán para la recopilación de datos serán por medio de entrevistas a profesionales relacionados con el tema, así, como búsqueda exhaustiva de información los cuales puedan aportar su conocimiento para la elaboración de este escrito.

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

En el punto anterior se mencionaron los instrumentos que se utilizarán para la realización de este escrito, los cuales tienen la confiabilidad necesaria, ya que estos serán profesionales responsables y con conocimientos respecto al tema que abarcará este escrito.

CAPITULO IV
PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

4.1 Guía de diseño de un pavimento de adoquín convencional

A continuación se presenta una guía de diseño para pavimentos de adoquín convencional.

4.1.1 Factor camión

Primeramente para el diseño de un pavimento de adoquín se debe tener en cuenta el factor camión para el cálculo del ESAL'S de diseño.

En la siguiente tabla se muestran los factores camión-eje determinados en estaciones de pesaje del Ministerio de Obras Públicas y Transportes de Costa Rica, una encuesta de carga realizada por Lanamme UCR y de un Trabajo Final de Graduación asociado a buses.

Tabla 2: Factor camión promedio para diferentes rutas del país.

Fuente	Ruta	Factor Camión								
		Pick Up	C2+	C2	Bus C2	C3	C4	T2-01	T3-01	T3-02
Determinación de los factores camión promedio en las estaciones de pesaje en Costa Rica 2008-2011	Ruta 32 San José - Limón	-	-	0.242	-	0.82	1.375	0.961	1.565	1.685
	Ruta 32 Limón - San José	-	-	0.21	-	0.599	0.573	0.675	0.745	0.813
	Ruta 1 Cañas - San José	-	-	0.34	-	0.846	0.792	0.749	1.167	1.603
	Ruta 2 San José - Cartago	-	-	0.214	-	0.689	1.102	0.438	1.068	1.016
	Ruta 2 Cartago - San José	-	-	0.205	-	0.880	1.199	1.874	1.273	1.394
	Ruta 2 Paso Canoas - San José	-	-	0.268	-	0.604	0.956	0.668	0.936	1.072
Encuesta de Carga 2007	Ruta 1: General Cañas (Peaje)	0.011	0.019	0.734	2.022	2.721	-	-	-	2.102
	Ruta 1: Bernardo Soto Naranjo (Peaje)	0.011	0.0116	0.902	3.68	1.971	-	-	-	3.701
	Ruta 1: Bernardo Soto Esparza (Peaje)	0.011	0.233	0.723	2.911	2.834	-	-	-	4.153
	Ruta 2: Florencio del Castillo (Peaje)	0.015	0.031	-	1.473	-	-	-	-	-
	Ruta 2: Pérez Zeledón (Tránsito)	0.012	0.014	0.446	1.858	3.33	-	-	-	2.08
	Ruta 27 Próspero Fernández (Peaje)	0.011	0.016	1.163	1.957	3.155	-	-	-	2.695
	Ruta 32 Braulio Carrillo (Peaje)	0.011	0.022	-	3.692	-	-	-	-	-
Ruta 140 San Carlos (Ciudad Quesada)	0.012	0.014	0.521	2.107	3.773	-	-	-	3.861	
Factores Camión TFG Juan Carlos Espinoza 2013	Bus Urbano	-	-	-	1.02	-	-	-	-	-
	Bus Interurbano	-	-	-	2.88	-	-	-	-	-
Promedio		0.01	0.05	0.50	2.36	1.85	1.00	0.89	1.13	2.18
Desviación Estándar		0.00	0.08	0.32	0.90	1.24	0.29	0.51	0.28	1.17

Fuente: (Espinoza Gonzales,2013) (Allen, Ulloa, Sibaja y Badilla, 2007)
(Vargas y Allen, 2014). Modificado Arias, 2014

4.1.2 Cálculo de ESALs de Diseño

Para obtener el cálculo de ESALs de diseño se utiliza la siguiente ecuación:

$$ESALs_{diseño} = ESALs_{diseño} * 365 * GF * DS * LDF$$

$$GF = \frac{|((1 + g)^n - 1|}{g}$$

Donde:

ESAL: Ejes equivalentes a 8200 kg

GF: Factor de crecimiento vehicular

DS: Factor direccional

LDF: Porcentaje de vehículos por carril

g: Tasa de crecimiento

n: Período de diseño

Sin embargo, la guía AASHTO 93 establece que el rango de ESALs a considerar tanto para pavimentos flexibles como rígidos de bajo volumen es de 50,000 a 3,000,000. Además, un estudio realizado por Lanamme establece que los diseños de pavimentos para tránsitos de bajo volumen son aquellos que presentan un rango de ejes equivalentes en su mayoría entre 30,000 y 1,500,000 de ESALs, y que en una menor cantidad no excedan los 3,000,000 de ESALs. Esto según valores

recomendados por la Guía de Diseño de Sudáfrica (Departamento de Transporte de la República de Sudáfrica, 1996), la guía de diseño estadounidense MEPDG del 2004 (National Cooperative Highway Research Program, 2004) y la guía de diseño AASHTO de 1993.

4.1.3 Fórmula de diseño para obtener el número estructural

La fórmula de diseño según el método AASTHO 93 es la siguiente:

$$\log W_{18} = Z_R S_o + 9.36 \log(SN + 1) - 0.20 + \frac{\frac{\log(\Delta PSI)}{4.2 - 1.5}}{0.40 + \frac{1094}{(SN + 1)^{5.19}}} + 2.32 \log M_R - 8.07$$

Donde:

SN = Número estructural, en pulgadas (pulg)

W_{18} = Número de cargas de 18 kips (80 KN)

Z_R = Nivel de confianza

S_o = Desviación estándar

ΔPSI = Pérdida de serviciabilidad

M_R = Módulo resiliente de la subrasante

4.1.4 Variables de tiempo

Para el diseño de un pavimento flexible como lo es el adoquín es importante tener en cuenta las siguientes dos variables: período de análisis y vida útil del pavimento. La vida útil es el período que media entre la construcción o rehabilitación del pavimento y el momento en que éste alcanza un grado de serviciabilidad mínimo. El periodo de análisis es el tiempo total que cada estrategia de diseño debe cubrir. Los períodos de análisis recomendados según la norma AASHTO 93 son los que se describen en la tabla 3.

Tabla 3: *Período de análisis según el tipo de camino*

Tipo de Camino	Período de análisis
Gran volumen de tránsito urbano	30-50 años
Gran volumen de tránsito rural	20-50 años
Bajo volumen pavimento	15-25 años

Fuente: Guía de Diseño de Pavimentos AASHTO 93

4.1.5 Confiabilidad

La confiabilidad se refiere al grado de certidumbre de un determinado diseño pueda llegar al fin de su periodo de análisis en buenas condiciones. Es por esto, que las carreteras se categorizan desde la A hasta la D, siendo A la más importante y D la menos importante. Para A se utiliza una confiabilidad de 95%, B de 90%, C de 80% y D de 50%.

4.1.6 Criterios de adopción de nivel de serviciabilidad

En el diseño del pavimento se deben elegir la serviciabilidad inicial y final. La inicial, p_o , es función del diseño del pavimento y de la calidad de la construcción. La final, p_t , es función de la categoría del camino y es adoptada en base a ésta y al criterio del diseñador. Los valores recomendados por la norma AASHTO 93 son los siguientes.

Serviciabilidad inicial:

p_o : 4,5 para pavimentos rígidos

p_o : 4,2 para pavimentos flexibles

Serviciabilidad final:

p_t : 3,0 para carreteras importantes o autopistas

p_t : 2,5 para carreteras urbanas

p_t : 2,0 para carreteras colectoras o de menor tránsito

4.1.7 Determinación de espesores

Para determinar los espesores de capa se utiliza la ecuación que está ligada con el número estructural, la cual es la siguiente.

$$SN = a_1D_1 + a_2m_2D_2 + a_3m_3D_3 \dots$$

Donde:

a_1, a_2, a_3 : Coeficientes estructurales o de capa, adimensionales

m_1, m_2, m_3 : Coeficientes de drenaje, adimensionales

D_1, D_2, D_3 : Espesores de capas, en pulgadas o en milímetros (pul o mm)

4.1.8 Estabilidad y factibilidad de construcción

Para la construcción de un pavimento flexible no es práctico ni económico colocar capas de un espesor menor que el mínimo requerido. Además, las capas con un espesor mayor que el mínimo se vuelven más estables. A continuación se brindan valores de espesores mínimos sugeridos por la norma AASHTO 93 para capas de concreto asfáltico y base granular en función del tránsito.

Tabla 4: Espesores mínimos de concreto asfáltico y base granular

Número de ESALs	Concreto Asfáltico	Base Granular
Menos de 50,000	2,5 cm	10 cm
50,000 – 150,000	5,0 cm	10 cm
150,000 – 500,000	6,5 cm	10 cm
500,000 – 2,000,000	7,5 cm	15 cm
2,000,000 – 7,000,000	9,0 cm	15 cm
Más de 7,000,000	10,0 cm	15 cm

Fuente: Guía de Diseño de Pavimentos AASHTO 93

4.1.9 Espesores mínimos en función del SN

Esta metodología se basa en el concepto de que las capas granulares no tratadas deben estar protegidas de tensiones verticales excesivas que les producirán deformaciones permanentes. A continuación se muestra el proceso.

Ilustración 26: Procedimiento para determinar espesores mínimos de capas.

$$D_1^* \geq \frac{SN_1}{a_1}$$

$$SN_1^* = a_1 D_1^* > SN_1$$

$$D_2^* = \frac{SN_2 - SN_1^*}{a_2 m_2}$$

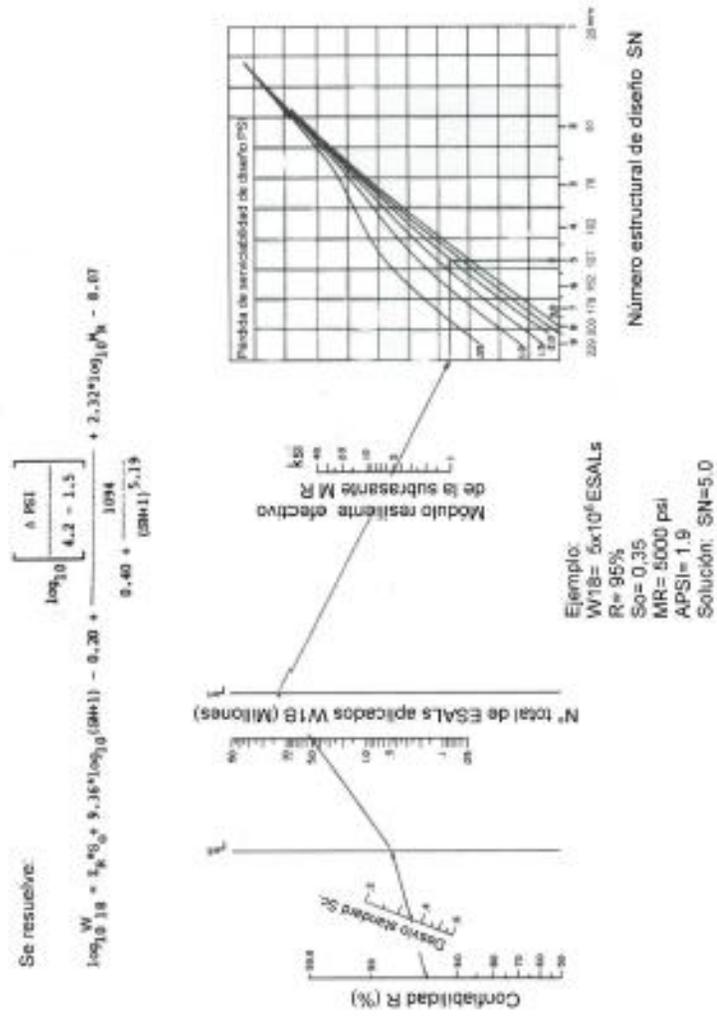
$$SN_1^* + SN_2^* \geq SN_2$$

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

Fuente: Guía de Diseño de Pavimentos AASHTO 93

Conociendo los módulos resilientes de cada capa se puede utilizar el ábaco de la ilustración 27 y así determinar los números estructurales requeridos para proteger cada capa no tratada reemplazando el módulo resiliente de la subrasante por el módulo resiliente de la capa que está inmediatamente abajo. Así para determinar el espesor D_1 de la capa de pavimento (adoquín) se supone un M_R igual al de la base y así se obtiene el SN_1 que debe ser absorbido por el pavimento (adoquín). Sin embargo, para el caso de Costa Rica el espesor de un adoquín ya es definido por lo que no es necesario calcular el espesor de éste.

Ilustración 27: Ábaco para el diseño de un pavimento flexible.



Fuente: Guía de Diseño de Pavimentos AASHTO 93

El espesor D_1 debe ser:

$$D_1 \geq \frac{SN_1}{a_1}$$

Se define un espesor D^*_1 ligeramente mayor y el número estructural absorbido por esta capa es:

$$SN^*_1 = a_1 D^*_1$$

Para determinar el espesor mínimo de la base, se entra al ábaco con el M_R de la subbase y entonces se obtiene el SN_2 a ser absorbido por la carpeta de rodadura y base de la siguiente manera:

$$D_2 \geq \frac{SN_2 - SN^*_1}{a_1 m_2}$$

De igual forma se define un espesor ligeramente mayor D^*_2 y el número estructural absorbido será:

$$SN^*_2 = a_2 m_2 D^*_2$$

Seguidamente, para la subbase se entra al ábaco con el M_R correspondiente a la subrasante y se obtiene $SN_3 = SN$ para todo el paquete estructural ya calculado. En este caso el espesor es:

$$D_3 \geq \frac{SN - (SN^*_1 - SN^*_2)}{a_1 m_3}$$

Se define un espesor ligeramente mayor a D^*_3 y se obtiene el número estructural absorbido por la subbase:

$$SN^*_3 = a_3 m_3 D^*_3$$

Por último, como verificación:

$$SN^*_1 + SN^*_2 + SN^*_3 \geq SN$$

Finalmente, con este criterio cada capa del paquete estructural resulta protegida. Este procedimiento no es aplicable para determinar espesores de capas sobre otras capas que tengan un módulo resiliente mayor de 280 MPa (4000 psi). En este caso el espesor de la capa situada encima será establecido en base a la relación costo-eficiencia y espesores mínimos desde el punto de vista constructivo.

4.2 Guía de construcción de un pavimento de adoquín convencional

La presente tiene la finalidad de hacer una guía para la construcción de un pavimento de adoquín convencional para evitar que se produzcan daños en periodos muy cortos de tiempo, los cuales suceden por la variabilidad de solicitaciones de tráfico, clima, de los materiales, de la compactación y de los métodos constructivos.

4.2.1 Materiales

Los materiales utilizados deberán cumplir con las siguientes especificaciones:

4.2.1.1 Adoquines

Los adoquines deberán cumplir los requisitos de resistencia, dimensiones y forma establecidos en las especificaciones especiales y en los planos de los proyectos. Por otra parte, su espesor no será en ningún caso, menor a seis centímetros, para aceras, ciclorutas y parqueos para vehículos livianos y ocho centímetros para calles y carreteras con tránsito pesado y aplicaciones industriales; también, deben tener una absorción de agua total para todo el volumen del espécimen no superior al 7% como valor promedio para 3 especímenes de muestra y ningún valor individual superior al 9%. Su módulo de ruptura a los 28 días, no debe ser menor de 5,0 MPa como promedio para la muestra y de 4,2 MPa como valor individual.

4.2.1.2 Arena para capa de soporte

La arena para capa de soporte es utilizada para cumplir tres funciones: como un medio filtrante para las aguas que logren penetrar las juntas, como capa de soporte para los adoquines y como amarre entre adoquines cuando la arena penetra por las juntas. La arena para capa de soporte no deberá de tener un contenido de finos mayor al 5%. Además, ésta arena deberá de ser de origen aluvial, arena natural sin trituración, libre de polvo y materia orgánica.

La arena para capa de soporte deberá cumplir con las siguientes especificaciones:

Tabla 5: Graduación de arena para capa de soporte

Tamiz	% por peso que pasa por los tamices de malla cuadrada (AASHTO T-27 y T-11)
9,5 mm	100
4,75 mm (Nº 4)	90 - 100
2,36 mm (Nº 8)	75 - 90
1,18 mm (Nº 16)	50 - 95
600 µm (Nº 30)	25 - 60
300 µm (Nº 50)	10 - 30
150 µm (Nº 100)	0 - 15
75 µm (Nº 200)	0 - 5

Fuente: CR-2010

4.2.1.3 Arena para sello

Al igual que la arena para capa de soporte, la arena para sello de juntas entre los adoquines será de origen aluvial, arena, sin trituración, libre de finos plásticos, polvo, materia orgánica y otras sustancias perjudiciales. La arena para sello de deberá exceder más del 15% de finos.

La arena para sello deberá cumplir con las siguientes especificaciones:

Tabla 6: Graduación de arena para sello de juntas

Tamiz	% por peso que pasa por los tamices de malla cuadrada (AASHTO T-27 y T-11)
2,36 mm (Nº 8)	100
1,18 mm (Nº 16)	90 - 100
600 µm (Nº 30)	60 - 90
300 µm (Nº 50)	30 - 60
150 µm (Nº 100)	5 - 30
75 µm (Nº 200)	0 - 15

Fuente: CR-2010

4.2.1.4 Agregado para capas de base y sub-base

Se deberá suministrar agregados con partículas duras y durables o fragmentos de piedra triturada, escoria o grava triturada y no deberán contener partículas elongadas, raíces y restos vegetales; además deberá cumplir con los siguientes requisitos:

1. Abrasión de los Ángeles, AASHTO 96 (50% máx)
2. Índice de durabilidad (agregado grueso), AASHTO 210 (35 min)
3. Índice de durabilidad (agregado fino), AASHTO 210 (35 min)
4. Caras fracturadas, ASTM D 5821 (50% min)
5. Libre de materia orgánica, grumos o arcillas
6. Índice plástico no mayor de 4

Tabla 7: Granulometría para base y sub-base

Abertura de la malla	Porcentaje por peso pasando la malla cuadrada				
	AASHTO T 27 y AASHTO T 11				
	Requerimientos de Granulometría				
	A (Sub-base)	B (Sub-base)	C (Base)	D (Base)	E (Base)
63 mm	100 ⁽¹⁾				
50 mm	97 - 100	100 ⁽¹⁾	100 ⁽¹⁾		
37,5 mm	97 - 100 ⁽¹⁾				
25 mm	65 - 79 (6)		80 - 100 (6)	100 ⁽¹⁾	
19 mm			64 - 94 (6)	86 - 100 (6)	100 ⁽¹⁾
12,5 mm	45 - 59 (7)				
9,5 mm				51 - 82 (6)	62 - 90 (6)
4,75 mm	28 - 42 (6)	40 - 60 (8)	40 - 69 (6)	36 - 64 (6)	46 - 74 (7)
425 µm	9 - 17 (4)		31 - 54 (4)	12 - 26 (4)	12 - 26 (4)
75 µm	4 - 8 (3)	4 - 12 (4)	4 - 7 (3)	4 - 7 (3)	4 - 7 (3)

Fuente: CR-2010

Las clases A, B, C, D y E corresponden a los siguientes usos típicos:

Tabla 8: Usos típicos de la granulometría

Usos	Exposición a la Intemperie	Clase
Concreto arquitectónico, puentes, otros usos en que irregularidades debidas al deterioro son objetables	Severas	A
	Moderadas	B
	Despreciables	C
Pavimento de concreto, capas de base, veredas, etc, en que irregularidades moderadas pueden tolerarse	Severas	B
	Moderadas	C
	Despreciables	D
Concreto recubierto no expuesto a la intemperie		E

Fuente: CR-2010

4.2.2 Equipo

El equipo consistirá de elementos para el transporte ordenado de los adoquines que impidan la alteración de calidad de las piezas, para la distribución de éstas piezas en obra se podrán utilizar carretillas con cuidado de que las piezas no se dañen, además, se utilizarán vehículos para el transporte de la arena, una vibrocompactadora de placa para la compactación inicial y final del pavimento. El área de la placa deberá estar entre 0,20 m² y 0,50 m², ya que no es recomendable utilizar placas más grandes porque podría fisurar el adoquín.

Por último, se deberán utilizar herramientas manuales refinadas como rieles, reglas, enrasadoras, palas, llanetas, codales, cepillos de cerdas y otras de uso común en estos trabajos. Mientras más refinado sea el equipo, más precisos serán los ajustes.

4.2.3 Requisitos para la construcción

Las especificaciones para la construcción de un pavimento de adoquín convencional son las siguientes:

4.2.3.1 Preparación de la superficie existente

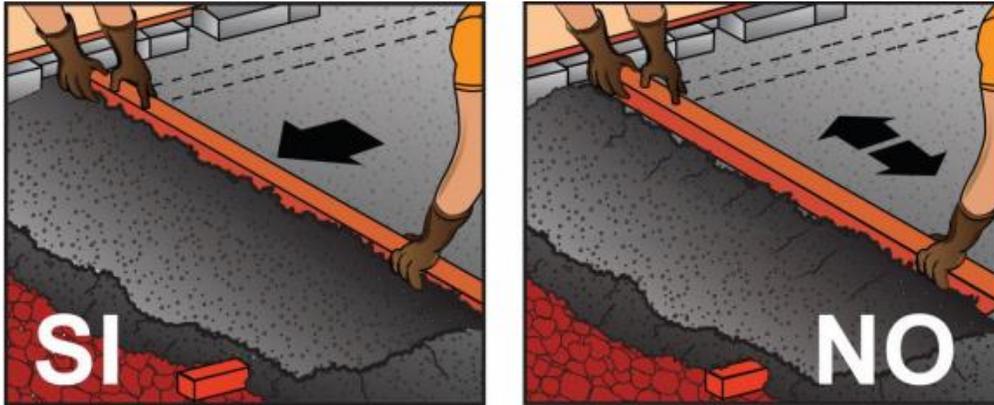
La capa de arena de soporte de los adoquines no se extenderá hasta que se compruebe que la superficie sobre la cual se colocará tiene la densidad apropiada y las cotas indicadas en los planos o definidas por el ingeniero encargado de la obra. Las irregularidades que excedan los límites especificados deberán corregirse a criterio del ingeniero responsable de la obra.

4.2.3.2 Colocación y nivelación de la capa de arena

La arena se colocará seca y en un espesor uniforme tal que, una vez compactado el pavimento, la capa tenga un espesor entre cuarenta y cincuenta milímetros (40 mm - 50 mm). Si la arena ya colocada sufre algún tipo de compactación antes de colocar los adoquines, se someterá a la acción repetida de un rastrillo para devolverle su carácter suelto y se enrasará de nuevo. La capa de arena deberá ir extendiéndose coordinadamente con la colocación de los adoquines, de manera que al término de la jornada de trabajo no quede expuesta.

Para la colocación se pueden utilizar tres reglas, de madera o aluminio, dos de ellas como guía y otra como elemento nivelador. Las guías se colocan paralelas, tanto en el centro como al lado de la vía, esto con el objetivo de cubrir su ancho. Estas guías se colocan sobre la superficie de la base ya nivelada y compactada y en el espacio entre ellas se agrega suficiente arena suelta como para que quede un poco para ser arrastrada. La regla niveladora la manejarán dos personas desde afuera de las guías pasándola una o dos veces a lo largo, sin hacer movimiento de zigzag.

Ilustración 28: Nivelación de la capa de arena



Fuente: Instituto del cemento y concreto de Guatemala

El espesor suelto a colocar deberá cubrir la altura de las reglas guía y puede ser entre 35 mm 50 mm, de manera que al terminar de nivelar la cama de arena el espesor resultante quede entre 40 mm y 50 mm. Para asegurar que la superficie final del pavimento de adoquín sea uniforme, es necesario que la calidad de la arena, el espesor en que se coloca y la nivelación de esta capa sean constantes y uniformes. Por último, al estar nivelada la capa de arena según las cotas y pendientes determinadas en el diseño de pavimento, no se debe perturbar la superficie hasta que se coloquen los adoquines.

4.2.3.3 Colocación de los adoquines

Los adoquines se colocarán directamente sobre la capa de arena nivelada, al tope unos con otros, de manera que generen juntas que no excedan de tres milímetros (3 mm). La colocación seguirá un patrón uniforme, el cual se controlará con cuerdas para asegurar su alineamiento transversal y longitudinal. Si los adoquines son rectangulares con una relación largo/ancho de 2/1, el patrón de

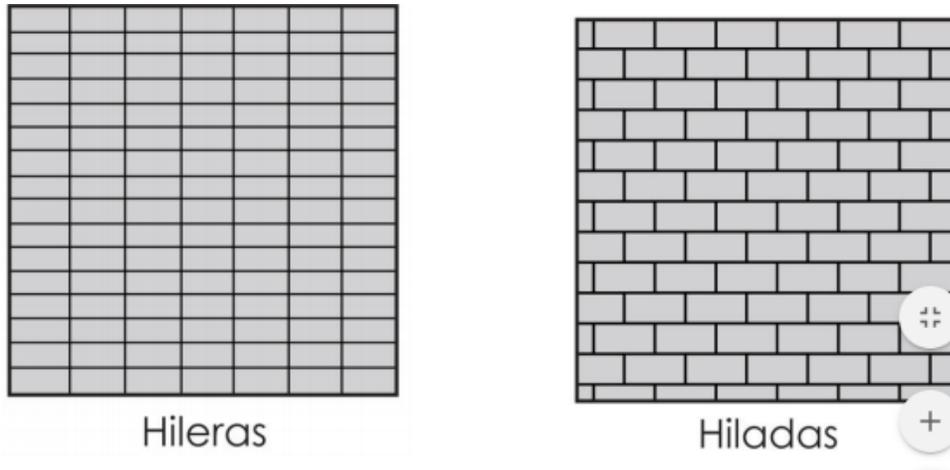
colocación será preferiblemente de espina de pescado, dispuesto en cualquier ángulo de la superficie, patrón que se seguirá de manera continua, sin necesidad de alterar su rumbo al doblar esquinas o seguir trazados curvos. Si los adoquines se colocan en hileras, deberán cambiar de orientación para respetar la perpendicularidad a la dirección preferencial de circulación. Los adoquines de otras formas se tratarán de colocar en hileras perpendiculares a la dirección preferencial de circulación, pero sin cambiarles el sentido al doblar esquinas o seguir trazados curvos.

Para avanzar con la secuencia de colocación en los tramos que se alejan de los hilos de guía, los colocadores deberán formar caminos sobre los adoquines ya colocados sin compactar y así transportar los materiales. Estos caminos pueden hacerse con tablas de madera que se colocan sobre los adoquines para facilitar el paso de las carretas que transportan el material y así evitar hundimientos antes de la compactación.

Los adoquines no se nivelarán de forma individual, pero si podrán ajustar horizontalmente para conservar el alineamiento. Por último, para zonas en pendiente, la colocación de los adoquines se hará preferiblemente de abajo hacia arriba.

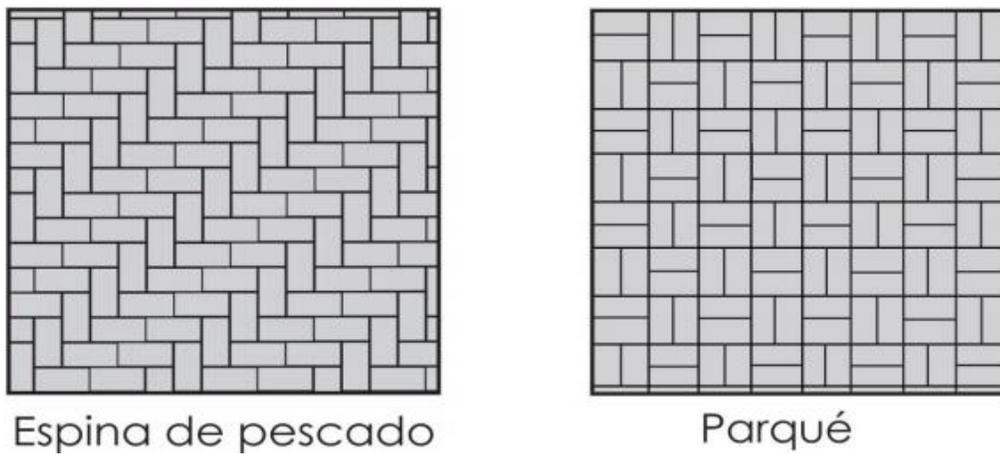
A continuación se muestran algunos patrones de instalación recomendados según el uso que se les dará a estos:

Ilustración 29: Patrones de colocación para adoquines rectangulares utilizados para tránsito peatonal



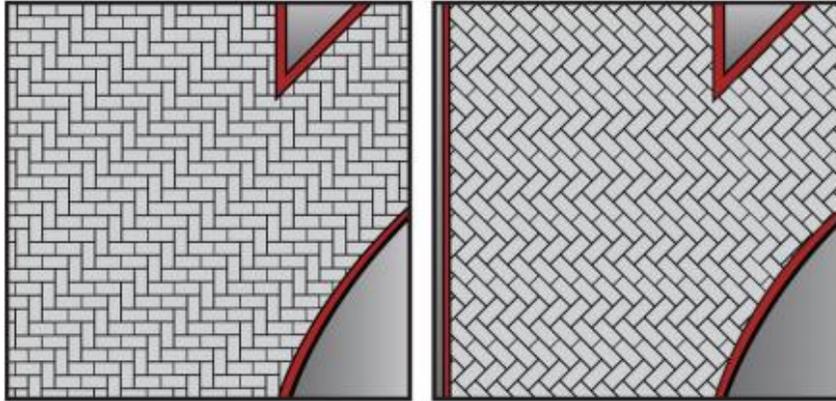
Fuente: Instituto del cemento y concreto de Guatemala

Ilustración 30: Patrones de colocación para adoquines rectangulares utilizados para tránsito peatonal



Fuente: Instituto del cemento y concreto de Guatemala

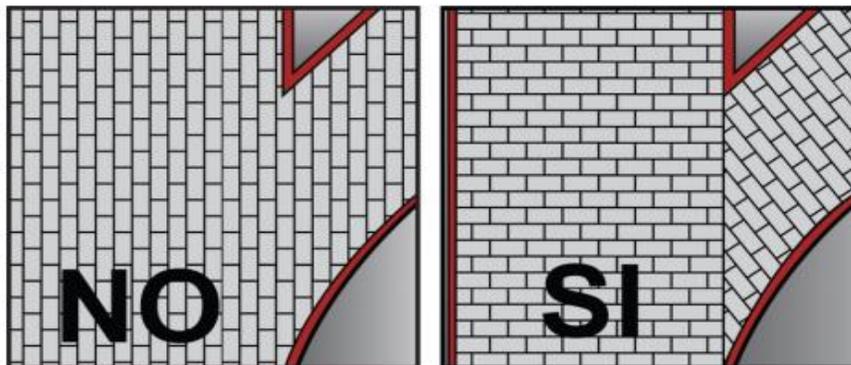
Ilustración 31: Patrones de colocación para adoquines rectangulares utilizados para tránsito vehicular



b. Espina de pescado a 90° b. Espina de pescado a 45°

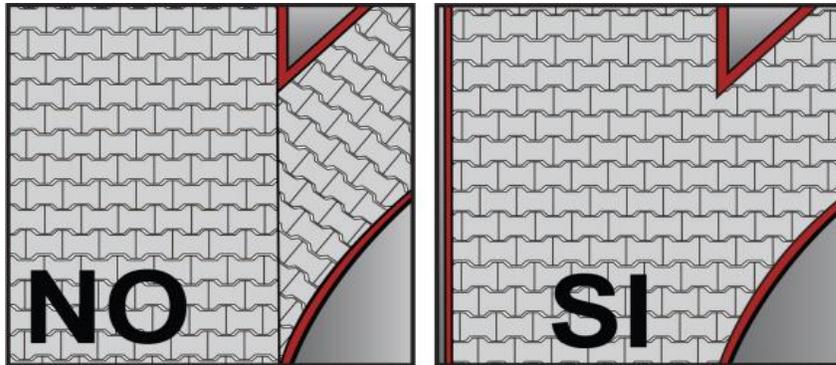
Fuente: Instituto del cemento y concreto de Guatemala

Ilustración 32: Patrones de colocación en hiladas para adoquines rectangulares utilizados para tránsito vehicular



Fuente: Instituto del cemento y concreto de Guatemala

Ilustración 33: Patrones de colocación en hiladas para adoquines no rectangulares utilizados para tránsito vehicular



Fuente: Instituto del cemento y concreto de Guatemala

4.2.3.4 Ajustes

Para disminuir la cantidad de ajustes es importante tener en cuenta la orientación del patrón en relación con los límites más largos del área pavimentada, ya que determina cuánto corte de adoquines será necesario para completar el pavimento, es por ello que se debe considerar muy importante; la selección del patrón de colocación, la orientación y posición del mismo ya que puede reducirse la cantidad de cortes y lograr un mejor rendimiento durante el proceso de colocación.

Una vez colocados los adoquines que quepan enteros dentro de la zona de trabajo, se colocarán ajustes (adoquines cortados), en las áreas que hayan quedado libres, contra las estructuras de drenaje o de confinamiento. Los ajustes se realizarán preferiblemente, cortando con un cortador adecuado o por medio de aserrado los adoquines, en piezas con la forma necesaria. Debe evitarse colocar piezas muy pequeñas o delgadas. Los ajustes cuya área sea inferior a dos centímetros, se efectuarán después de la compactación final, empleando un

mortero compuesto por una parte de cemento, cuatro de arena y agua apenas suficiente para dar trabajabilidad al mortero.

4.2.3.5 Compactación inicial

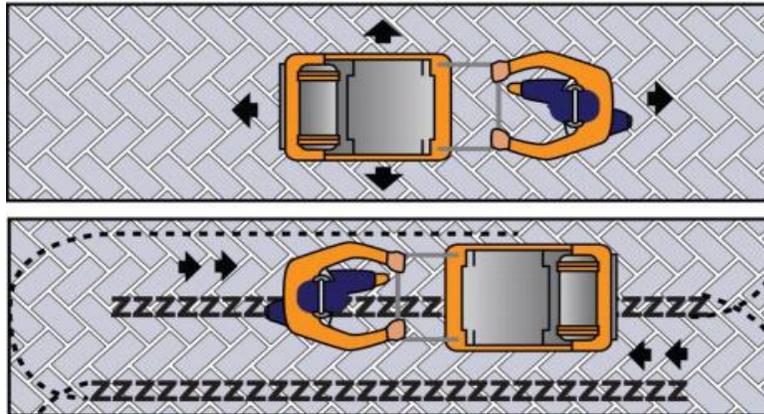
Se entenderá como compactación inicial al procedimiento de dar por lo menos dos pasadas con el equipo de compactación requerido desde diferentes direcciones, recorriendo toda el área del pavimento en una dirección antes de recorrerla en la dirección contraria, cuidando siempre traslapar cada recorrido con el anterior para evitar posibles escalonamientos. La compactación inicial debe realizarse tan pronto como sea posible después de haber colocado todos los adoquines enteros y piezas de ajuste para cumplir con el nivel del pavimento terminado.

La compactación inicial se hará por medio de una vibrocompactadora de placa, cuando menos de dos veces en direcciones perpendiculares. El área adoquinada se compactará hasta un metro del borde del avance de la obra o de cualquier borde no confinado. Al terminar la jornada de trabajo, los adoquines deberán de haber recibido, al menos, la compactación inicial, excepto en la franja de un metro descrita anteriormente.

Las funciones de la compactación inicial son:

1. Enrasar la capa de adoquines para corregir cualquier irregularidad en su espesor durante la colocación.
2. Iniciar la compactación de la capa de arena de asiento de los adoquines.
3. Iniciar el llenado parcial de las juntas desde la capa de arena de asiento hacia arriba y con ello el amarre de los adoquines.

Ilustración 34: Procedimiento de la compactación inicial



Fuente: Instituto del cemento y concreto de Guatemala

4.2.3.6 Sello de juntas y compactación final

Después de la compactación inicial, se aplicará la arena de sello para la superficie en una cantidad equivalente a una capa de tres milímetros de espesor y se barrerá repetidamente y en distintas direcciones, con un escobón o cepillo de cerdas largas y duras. En el momento de su aplicación, la arena deberá encontrarse lo suficientemente cerca para penetrar con facilidad en las juntas. Seguidamente, se aplicará la última compactación, durante la cual cada punto de pavimento deberá recibir al menos cuatro pasadas de equipo, preferiblemente desde distintas direcciones.

Por último, no se permitirá el lavado del pavimento con chorro de agua a presión inmediatamente después de su terminación, ni a edades posteriores ya que esto puede ocasionar que el material de las juntas se lave por completo. El sellado de juntas es muy importante para el buen funcionamiento del pavimento. Por esto, es importante emplear el material adecuado y ejecutar el sellado lo mejor posible, simultáneamente con la compactación final, ya que si las juntas están mal selladas,

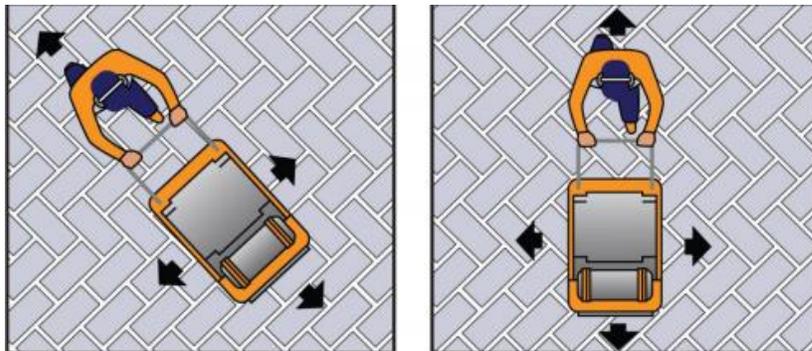
los adoquines quedan sueltos, el pavimento pierde solidez y se deteriora rápidamente.

Ilustración 35: Sellado de juntas



Fuente: Instituto del cemento y concreto de Guatemala

Ilustración 36: Compactación final



Fuente: Instituto del cemento y concreto de Guatemala

4.2.3.7 Confinamiento

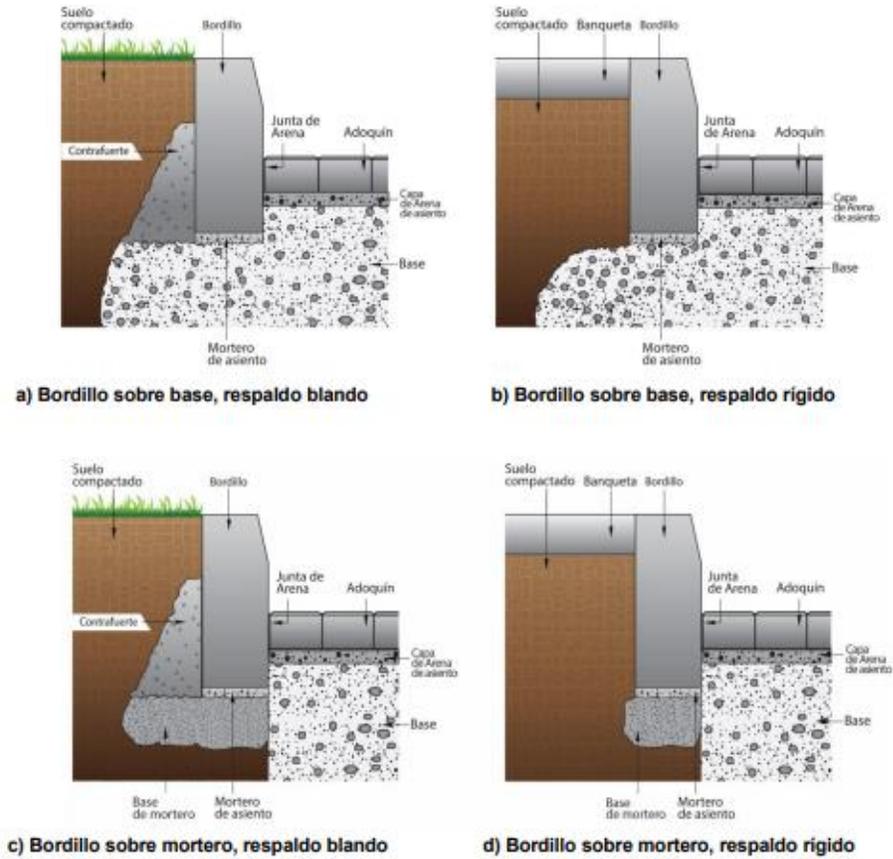
El confinamiento es parte fundamental del pavimento de adoquines, porque evita que el tránsito dañe la capa de rodadura que está unida a la compactación de todo el sistema.

Los adoquines deberán tener una estructura de confinamiento que impida su desplazamiento lateral a causa del empuje del tránsito vehicular. Las estructuras de confinamiento deberán rodear completamente el área pavimentada y deberán penetrar, por lo menos, quince centímetros en la capa de base que se encuentre bajo la capa de arena y su nivel superior cubrirá, como mínimo, la parte superior del espesor del adoquín después de compactado. En el caso que la estructura de confinamiento también sirva como elemento de evacuación de agua, caso típico de ejemplo un caño o borde de acera, la altura final de este elemento de confinamiento deberá quedar entre uno y dos centímetros más bajo que la parte superior de la pieza de adoquín, con el fin de impedir el desalojo de agua.

El confinamiento externo deberá construirse antes de colocar la capa de arena y los adoquines, de tal manera que ambos se coloquen dentro de una caja cuyo fondo será la base compactada y las paredes serán las estructuras de confinamiento. Éste confinamiento está conformado, en general, por el bordillo de un banqueta, un bordillo contra una zona verde o un bordillo a ras, al lado de otro tipo de pavimentos. La resistencia que debe tener el concreto de estos bordillos deberá ser como mínimo de 28 MPa a los 28 días, ya que estos elementos estarán en contacto con las llantas de los vehículos y con el medio ambiente.

Por último, la subrasante sobre la que se apoyarán los bordillos se debe compactar con un apisonador mecánico y colocar un mortero de nivelación para el asentado de las piezas.

Ilustración 37: Confinamiento de los adoquines



Fuente: Instituto del cemento y concreto de Guatemala

4.2.3.8 Drenaje

Las obras de drenaje son las que sirven para manejar las aguas que puedan afectar el pavimento. Es por ello que se utilizan pendientes transversales las cuales sirven para:

1. Evacuar el agua de la superficie para mantenerla seca
2. Reducir la penetración de aguas por las juntas
3. Conducir el agua a las estructuras de drenaje

4.2.3.8.1 Pendiente longitudinal mayor o igual a 2,5%: Si la pendiente longitudinal de la vía es por lo menos 2,5%, su pendiente transversal debe ser por lo menos 2,5% y por lo tanto no se considera construir cunetas a los costados.

4.2.3.8.2 Pendiente longitudinal menor a 2,5%: Si la pendiente longitudinal de la vía es menor a 2,5%, se deben construir cunetas a uno o ambos lados de la vía

4.2.3.8.3 Pendiente longitudinal menor o igual a 1%: Si la pendiente longitudinal de la vía es por lo menor a 1%, la cuneta se debe hacer de concreto y de 150 mm de espesor como mínimo.

4.2.4 Limitaciones de ejecución

Ninguna de las operaciones que forman parte de la construcción del pavimento de adoquines se realizará en momento de lluvia. Si la capa de arena que sirve de apoyo a los adoquines ha soportado lluvia o agua de escorrentía, deberá ser levantada y reemplazada por una arena suelta de humedad baja y uniforme.

4.2.5 Apertura al tránsito

El tránsito automotor no se permitirá hasta que el pavimento haya recibido la compactación final y esté completamente confiando.

4.2.6 Conservación

Durante un lapso de dos semanas, se deberá dejar un sobrante de arena esparcido sobre el pavimento terminado, de manera que el tránsito y las posibles

lluvias ayuden a acomodar la arena en las juntas. Por último, no se permitirá lavar el pavimento con chorro de agua a presión, recién terminada su construcción ni posteriormente.

4.2.7 Calidad del producto terminado

El pavimento terminado deberá presentar una superficie uniforme y ajustarse a las rasantes y pendientes establecidas. La distancia entre el eje del proyecto y el borde de la capa construida no podrá ser menor que la indicada en planos. La cota de cualquier punto del pavimento terminado no deberá variar en más de diez milímetros de la proyectada. Por último, la superficie del pavimento terminado no podrá presentar irregularidades mayores a diez milímetros, cuando se compruebe con una regla de tres metros, en cualquier punto que escoja el ingeniero, tanto paralela como transversalmente al eje del camino.

4.2.8 Medición

La unidad de medida del pavimento de adoquines de concreto hidráulico será el metro cuadrado (m²). El área se determinará multiplicando la longitud real, medida a lo largo del eje del proyecto, por el ancho especificado en los planos. No se incluirá en la medida ninguna área por fuera de estos límites.

4.2.9 Pago

El pago de una construcción de un pavimento de adoquín convencional se efectuará de acuerdo al precio unitario del contrato y por toda obra ejecutada de acuerdo con esta especificación y aceptado a satisfacción de la administración. El precio unitario deberá cubrir todos los precios de los materiales y actividades

requeridas para completar el proceso constructivo del pavimento. Por último, las obras de construcción de confinamiento se pagaran por metro lineal (m).

4.2.10 Reparación y Mantenimiento

4.2.10.1 Mantenimiento preventivo para el buen funcionamiento de un pavimento de adoquín

4.2.10.1.1 Limpieza

El uso de ácidos o pulidoras, no está permitido, ya que estos elementos deterioran la superficie del pavimento, afectando su durabilidad y color inicial. No se debe permitir el lavado del pavimento con chorro a presión, ya que esto podría desalojar el material dentro de las juntas.

4.2.10.1.2 Evitar abrasión

Garantizar que el entorno del pavimento no genere deterioro prematuro del mismo, como cuando se expone a acciones abrasivas constantes y así preservar la calidad del adoquín.

4.2.10.1.3 Cuidado de juntas

Para que funcionen de manera correcta, las juntas de los adoquines deben permanecer llenas. Si se pierden más de 10 mm del sello, se debe buscar la causa de esta perdida, corregirla y barrer arena fina y seca, hasta que la junta quede llena

de nuevo. La presencia de grama no es nociva, pero es mejor retirarla con un punzón metálico y llenar la junta nuevamente con arena fina.

4.2.10.1.4 Hundimiento

Si se hunde el pavimento por daños en redes de servicios o por zanjas mal compactadas, se deben retirar los adoquines en la zona del daño, por lo menos 40 cm a su alrededor, hacer la reparación y volver a construir la franja del pavimento. El área reparada debe quedar con el nivel arriba en 20 mm para vías vehiculares y 5 mm para peatonales en la base compactada para que al consolidarse la zona reparada quede al nivel del resto del pavimento.

4.2.10.1.5 Ondulaciones

Cuando se presenten ondulaciones en la superficie del pavimento puede ser indicio de que fue construido con una base insuficiente, la mala calidad o mala compactación. También, puede indicar que el tránsito es muy alto y que el pavimento no fue diseñado ni construido para soportar esas cargas. Para ello se deberá investigar cual es la razón de las ondulaciones y efectuar una reparación completa.

4.2.10.2 Remoción de los adoquines

La remoción de los adoquines puede realizarse por dos distintos métodos que se describen a continuación:

4.2.10.2.1 Método usual para levantar el pavimento

Este método consiste en romper dos o tres adoquines y después se remueven cuidadosamente los demás adoquines del área a intervenir. Este método tiene la desventaja de requerir el reemplazo de aquellos adoquines que han sido dañados, debido a que no es permitido fabricar piezas en sitio con concreto, ni llenar estos espacios con elementos fundidos en el sitio.

4.2.10.2 Método alternativo de acceder al interior del pavimento sin romper adoquines

4.2.10.2.1 Remoción del primer adoquín

Primero se remueve tanta arena de sello como sea posible, usando una espátula pequeña u alguna otra herramienta que se ajuste. Se levanta el adoquín usando una herramienta apropiada como cuchillas y espátulas o un extractor de adoquines.

4.2.10.2.2 Remoción de los adoquines adyacentes

Pasar un vibrocompactador de plancha sobre la superficie de los adoquines adyacentes al adoquín retirado puede provocar que se pierda el confinamiento de los mismos y da la posibilidad de retirarlos. Los adoquines adyacentes al área sin confinamiento pueden ser golpeados con un martillo de caucho u otra herramienta apropiada para facilitar su retiro.

4.2.10.2.3 Limpieza de los adoquines extraídos

Con un cepillo de alambre se retira la arena adherida a cada adoquín. Una vez realizada esta labor, se procede a intervenir la base o sub-rasante para ejecutar las labores necesarias para la correcta rehabilitación de la estructura del pavimento.

4.2.10.2.4 Recolocación de los adoquines

Por último, para la recolocación del adoquín, se debe compactar adecuadamente la base. Posteriormente, se debe colocar la capa de arena de asiento y se coloca el adoquín sobre ella. Finalmente, se compacta utilizando el vibrocompactador de plancha y así se sella el área intervenida.

4.3 Ejemplo comparativo de costo-beneficio entre un diseño de un pavimento de adoquín convencional y un pavimento flexible asfáltico

Para la realización de la comparación de costo-beneficio entre un pavimento de adoquín convencional y un pavimento asfáltico se utilizaron los precios que existen en el mercado costarricense. Para la realización de este se utilizaron los espesores calculados en la sección 4.3.1 y 4.3.2 los cuales se basan en un área de un metro cuadrado. Los precios que se observan en las siguientes tablas, fueron obtenidos por medio de proveedores como asfaltos CBZ para el precio de la carpeta asfáltica, en la cual especificaron que 10 cm de profundidad por metro cuadrado de asfalto cuesta ₡15 500. Los precios de la base y subbase granular se obtuvieron de Cemex Costa Rica, donde mandaron una proforma que evidencia el costo por metro cúbico de agregado tanto para base y subbase que se evidencian en la ilustración 40 de la sección de anexos, por otra parte, para obtener el precio de la arena para cama de asiento y para sello se llamó a varios proveedores (Tajo la montaña, Pedregal) los cuales dieron el precio de este por llamada telefónica. Por último, se obtuvo el precio del adoquín del adoquín por metro cuadrado de Pedregal. Se logró obtener una factura proforma realizada para la Constructora Gonzalo Delgado S.A del año 2017 en la cual el precio es muy cercano al valor actual del mercado y por esta razón se tomó este precio para la realización del presupuesto; esta factura proforma se observa en la ilustración 40 de la sección de anexos.

Tabla 9: Costo por m² de un pavimento de adoquín convencional

Pavimento de adoquín convencional				
Material	Cantidad	Unidad	Precio Uni	Total
Adoquín 8 cm	1	m2	19452	19 452,00
Arena para sello	1	m2	220	220,00
Arena para cama de asiento (4 cm profund)	4	m2	220	880,00
Agregado para base (10 cm profund)	10	m2	109,81	1 098,10
Agregado para subbase (25 cm profund)	25	m2	123,85	3 096,25
Total por m2 de constrcción				24 746,35

Fuente: Propia

Tabla 10: Costo por m² de un pavimento flexible asfáltico

Pavimento de adoquín convencional				
Material	Cantidad	Unidad	Precio Uni	Total
Asfalto (3 cm de profund)	7,5	m2	1550	11 625,00
Agregado para base (11.5 cm profund)	11,5	m2	109,81	1 262,82
Agregado para subbase (25 cm profund)	25	m2	123,85	3 096,25
Total por m2 de constrcción				15 984,07

Fuente: Propia

Los precios obtenidos para ambos pavimentos por m² son específicamente para la GAM y estos podrían sufrir alguna variación dependiendo del lugar donde se realice el proyecto.

A continuación se muestran un ejemplo de diseño de un pavimento de adoquín convencional y un pavimento flexible asfáltico utilizando la metodología AASHTO 93. Por consiguiente, para la realización de ambos ejemplos se utilizarán los mismos valores de psi inicial y final, nivel de confianza, desviación estándar, la misma carga

de diseño (ESAL´S) y los mismo materiales de base, subbase y subrasante; esto con el fin de realizar un análisis costo-beneficio posteriormente y así identificar cual sería el más eficientes según las solicitudes de diseño.

4.3.1 Ejemplo de diseño de un pavimento de adoquín convencional

A continuación se muestra una tabla con los datos del material a utilizar para el diseño, además, de sus respectivos coeficientes estructurales de capa, sus coeficientes de drenaje y su número estructural. Los valores de cada uno de los conceptos mencionados anteriormente se obtuvieron del ábaco para diseño de pavimentos flexibles de la norma ASHTO 93. También, se muestra el valor del módulo resiliente de cada material, el cual se obtiene por pruebas realizadas en laboratorio.

Tabla 11: Datos de los materiales

Material	Mr (Psi)	A	M	SN
Adoquín	400000	0,42	-	-
Base	30000	0,138	1,1	1,1
Subbase	16000	0,11	0,138	1,9
Subrasante	8000	-	0,11	2,7

Fuente: Propia

Seguidamente, se muestra una tabla con el psi inicial y final del pavimento, ESAL´S, nivel de confianza y desviación estándar. El psi inicial es de 4,2 por ser un pavimento flexible y el psi final es de 2,5 por ser una carretera urbana.

Tabla 12: Datos para Diseño

ESAL'S	1,5x10 ⁶
Psi inicial	4,2
Psi final	2,5
Nivel de confianza	80%
Desviación estándar (So)	0,44

Fuente: Propia

4.3.1.1 Adoquín

Para el diseño de este pavimento se utilizará un adoquín de 8 cm de espesor, lo cual es igual a 3,2 pulg.

Utilizando la siguiente ecuación se puede calcular el SN_1^* ya que no es necesario calcular el espesor del adoquín porque este ya se conoce y es de 3,2 pulg.

$$SN_1 = a_1 D_1$$

$$\therefore SN_1^* = SN_1 = a_1 D_1$$

$$\therefore SN_1^* = SN_1 = 0.42 * 3,2 = 1,34$$

4.3.1.2 Base

$$SN_2 = a_2 m_2 D_2$$

$$(1,9 - 1,34) = 0,138 * 1,1 * D_2$$

$$\therefore D_2 = 3,69 \text{ pulg} \cong 4 \text{ pulg}$$

$$\therefore SN_2^* = a_2 m_2 D_2$$

$$\therefore SN_2^* = 0,138 * 1,1 * 4 = 0,61$$

4.3.1.3 Subbase

$$SN_3 = a_3 m_3 D_3$$

$$(2,7 - 1,34 - 0,61) = 0,11 * 0,7 * D_3$$

$$\therefore D_3 = 9,74 \text{ pulg} \cong 10 \text{ pulg}$$

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

$$\therefore SN_3^* = 0,11 * 0,7 * 10 = 0,77$$

4.3.1.4 Respuestas

1. El número estructural requerido para proteger la estructura de pavimento es 2,7.

2. Ver ilustración 38 de la sección de anexos.

3. Comprobación del número estructural

$$2,7 \leq 1,34 + 0,61 + 0,77$$

$$2,7 \leq 2,72$$

Las tres respuestas anteriores indican que el diseño de pavimento es un diseño que cumple con lo requerido.

4.3.2 Ejemplo de diseño de un pavimento flexible asfáltico

A continuación se muestra una tabla con los datos del material a utilizar para el diseño, además, de sus respectivos coeficientes estructurales de capa, sus coeficientes de drenaje y su número estructural. Los valores de cada uno de los conceptos mencionados anteriormente se obtuvieron del ábaco para diseño de pavimentos flexibles de la norma ASHTO 93. También, se muestra el valor del módulo resiliente de cada material, el cual se obtiene por pruebas realizadas en laboratorio.

Tabla 13: Datos de los Materiales

Material	Mr (Psi)	A	m	SN
Asfalto	400000	0,42	-	-
Base	30000	0,138	1,1	1,1
Subbase	16000	0,11	0,138	1,9
Subrasante	8000	-	0,11	2,7

Fuente: Propia

Seguidamente, se muestra una tabla con el psi inicial y final del pavimento, ESAL'S, nivel de confianza y desviación estándar. El psi inicial es de 4,2 por ser un pavimento flexible y el psi final es de 2,5 por ser una carretera urbana.

Tabla 14: Datos para diseño

ESAL'S	$1,5 \times 10^6$
Psi inicial	4,2
Psi final	2,5
Nivel de confianza	80%
Desviación estándar (So)	0,44

Fuente: Propia

4.3.2.1 Asfalto

$$SN_1 = a_1 D_1$$

$$1,1 = 0,42 * D_1$$

$$\therefore D_1 = 2,62 \text{ pulg} \cong 3 \text{ pulg}$$

$$\therefore SN_1^* = a_1 D_1$$

$$\therefore SN_1^* = 0,42 * 3 = 1,26$$

4.3.2.2 Base

$$SN_2 = a_2 m_2 D_2$$

$$(1,9 - 1,26) = 0,138 * 1,1 * D_2$$

$$\therefore D_2 = 4,22 \text{ pulg} \cong 4,5 \text{ pulg}$$

$$\therefore SN_2^* = a_2 m_2 D_2$$

$$\therefore SN_2^* = 0,138 * 1,1 * 4,5 = 0,68$$

4.3.2.3 Subbase

$$SN_3 = a_3 m_3 D_3$$

$$(2,7 - 1,26 - 0,68) = 0,11 * 0,7 * D_3$$

$$\therefore D_3 = 9,87 \text{ pulg} \cong 10 \text{ pulg}$$

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

$$\therefore SN_3^* = 0,11 * 0,7 * 10 = 0,77$$

4.3.1.4 Respuestas

1. El número estructural requerido para proteger la estructura de pavimento es 2.7.

2. Ver ilustración 39 de la sección de anexos.

3. Comprobación del número estructural

$$2,7 \leq 1,26 + 0,68 + 0,77$$

$$2,7 \leq 2,71$$

Las tres respuestas anteriores indican que el diseño de pavimento es un diseño que cumple con lo requerido.

CAPÍTULO V

**ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE
RESULTADOS**

5.1 Análisis de resultados de la propuesta metodológica de diseño y construcción de un pavimento de adoquín convencional

La creación de la propuesta metodológica de diseño y construcción de un pavimento de adoquín convencional generó ciertas dudas a la hora de realizar ésta, ya que se tuvo que realizar una búsqueda exhaustiva de distintas metodologías de diseño y construcción de diferentes países como: el método de diseño del Reino Unido, método de diseño de Japón, método de diseño de Australia, método de diseño de Estados Unidos, método de diseño de Chile y finalmente el método de diseño para pavimentos flexibles de la guía AASHTO de 1993; siendo la metodología AASHTO 93 la utilizada para crear una guía de diseño para Costa Rica.

La utilización de la metodología AASHTO 93 como base para la guía de diseño de un pavimento de adoquín convencional nace debido a que es la metodología utilizada en Costa Rica para el diseño de un pavimento flexible, esto porque pavimento de adoquín toma comportamientos muy similares a un pavimento flexible asfáltico como: están compuestos por capas de subbase, base y carpeta de rodamiento, donde, las capas de base y subbase disipan las tensiones producidas por las cargas de tránsito transmitidas por la carpeta de rodamiento, de tal forma que en la subrasante no se superen las tensiones admisibles, además, ambos pavimentos comparten la característica que se deforman en un área determinada y no distribuyen sus esfuerzos a lo largo del pavimento como lo hacen los pavimentos rígidos.

Por otra parte, para la guía de construcción se utilizó la sección 504 del CR-2010 y una guía de cemento y construcción de Guatemala. Esto porque ambas guías consideran factores muy importantes que deben contemplarse al momento de realizarse una construcción de un pavimento de adoquín convencional.

5.1.1 Guía de diseño de un pavimento de adoquín convencional

La guía de diseño consta de diversos análisis y cálculos que deben emplearse para la utilización de ésta como lo son: factor camión, cálculo de ESALs, variables de tiempo, confiabilidad, nivel de servivabilidad y el cálculo de espesores.

El factor camión deberá ser elegido dependiendo del lugar donde se vaya a realizar la construcción del proyecto, sin embargo, si en la tabla 2 no se encuentran los factores camión que se necesiten estos deberán ser calculados de la manera correspondiente. Por otra parte, el cálculo de ESALs se deberá de hacer con la formula indicada en la sección 4.1.2. Las variables de tiempo, confiabilidad, desviación estándar y el nivel de servivabilidad deberán ser establecidos por el ingeniero diseñador dependiendo del proyecto que se requiera.

Por ello, esta propuesta de guía de diseño es aplicable para Costa Rica, ya que los materiales y datos recopilados son los que han establecido en el país. También, cabe resaltar que los adoquines utilizados en Costa Rica tienen dimensiones y espesores ya establecidos con lo cual el espesor de la capa de rodadura ya es conocido a diferencia del cálculo que se debe realizar para encontrar el espesor de un pavimento flexible asfáltico.

Por último, para calcular los números estructurales requeridos por el pavimento se debe utilizar el ábaco de la ilustración 27, el cual se utiliza siguiendo el siguiente orden: confiabilidad, desviación estándar, ESALs de diseño y posteriormente el módulo resiliente de cada capa del pavimento para entrar por último a la gráfica y así obtener el número estructural requerido para cada del pavimento.

5.1.2 Guía de construcción de un pavimento de adoquín convencional

La guía de construcción del pavimento de adoquín convencional se realizó para favorecer la vida útil del pavimento y que se sigan los lineamientos respectivos para la construcción. Los materiales son un factor importante ya que estos deben cumplir

diversas especificaciones; los adoquines por ser el elemento base deberán cumplir con un módulo resiliente entre los 2760 MPa (400000 psi) y los 3100 MPa (450000 psi), además, la granulometría de la base y subbase deberá cumplir con la establecido en la tabla 7, con una abrasión de los ángeles del 50% máximo, caras fracturadas de 50% mínimo, con un índice plástico no mayor a 4%, deberán ser libres de materia orgánica, grumos o arcillas y con un límite líquido máximo de 25%. Además, se deberá comprobar que los adoquines cumplan con un módulo de ruptura a los 28 días, el cual no debe ser menor de 5,0 MPa como promedio (3 especímenes) para la muestra y de 4,2 MPa como valor individual.

También, esta guía establece factores como lo son: equipo para la construcción, requisitos para la construcción, limitaciones para la construcción, apertura al tránsito, conservación, calidad del producto terminado, pago y la reparación y mantenimiento. El cumplimiento de estos factores es de gran importancia para prolongar la vida útil del pavimento y así evitar que éste sufra daños en periodos muy cortos de tiempo.

Por último, siguiendo esta guía de la manera correcta se considera que los costos en mantenimiento y daños se verán reducidos, ya que se evitará que el pavimento presente daños a temprana edad y por ende su vida útil y su calidad de servicio sea más óptima.

5.1.3 Ejemplo comparativo de coste-beneficio entre un diseño de un pavimento de adoquín convencional y un pavimento flexible asfáltico

El ejemplo comparativo se realizó utilizando los mismos datos para ambos diseños. Estos datos fueron de confiabilidad, desviación estándar, Psi inicial y final, ESALs de diseño, módulo resiliente para cada material, coeficiente de drenaje, coeficiente estructural y número estructural requerido. Los valores de lo anteriormente escrito se pueden observar en la sección “4.3 Ejemplo comparativo

entre un diseño de un pavimento de adoquín convencional y un pavimento flexible asfáltico”.

En el ejemplo del pavimento de adoquín convencional se utilizó un adoquín de 8 cm (3,2 pulg) de espesor que se encuentra en el mercado nacional, la base y subbase dieron como resultado 10 cm (4 pulg) y 20 cm (10 pulg) respectivamente. Por otra parte, los resultados obtenidos en el pavimento flexible asfáltico se obtuvieron 7,5 cm (3 pulg) de espesor para el asfalto y los espesores requeridos para la base y subbase fueron de 11,4 cm (4,5 pulg) y 20 cm (10 pulg), respectivamente. Esto me indica que la capa de rodadura del pavimento de adoquín será mayor que la del pavimento asfáltico, sin embargo, se podría utilizar un adoquín de 6 cm de espesor únicamente en casos donde las cargas de tránsito sean peatonales, ya que se recomienda que para tránsito vehicular se utilicen adoquines mayores a los 8 cm de espesor.

Sin embargo, los espesores de la base y subbase para ambos pavimentos dieron resultados similares o prácticamente iguales, lo cual indica que si se tienen los mismos datos para ambos pavimentos los espesores de base y subbase no varían de forma considerable.

Por consiguiente, se realizó una comparación de costo-beneficio según los distintos espesores de capa obtenidos para ambos pavimentos, los cuales se muestran en las siguientes tablas.

De acuerdo con la tabla 9 el pavimento de adoquín tiene un mayor costo que el pavimento flexible asfáltico que se muestra en la tabla 10. En base a las tablas anteriormente mencionadas se puede mencionar que el pavimento de adoquín tiene 2 materiales más que el pavimento asfáltico como lo es la arena para sello y la cama para arena de asiento lo cual eleva su costo. Sin embargo, a pesar de que es más costoso tiene ventajas de durabilidad y permanencia de color, posibilidades expresivas como la variada gama de colores cálidos y sus múltiples combinaciones estéticas que en el pavimento asfáltico no tiene.

Además, a diferencia del pavimento asfáltico el pavimento de adoquín no sufre deformaciones por cambios de temperatura, también, el pavimento de adoquín resiste cambios de hielo/deshielo, ambientes donde la contaminación, las lluvias ácidas y el resto de agentes agresivos acabarían con otros materiales como los que contiene la mezcla asfáltica. Por otra parte, su mantenimiento puede ser mucho menor que el un pavimento asfáltico, ya que con remover la posible vegetación que pueda producirse en las juntas y rellenar éstas cada vez que la acción erosiva del ambiente lo exija.

En los pavimentos de adoquín también existe la posibilidad de levantamiento de piezas sin provocar deterioros en los mismos, por tanto, en los pavimentos de aceras, plazas, patios, carreteras, entre otros, la característica de reutilización de los adoquines es muy válida. La facilidad de ejecución queda evidenciada por el empleo incluso de personal no especialista haciendo uso de herramientas manuales, además, otra ventaja es que inmediatamente después de haber terminado el adoquinado se puede utilizar, tanto para tráfico pesado como para tráfico peatonal. Para un pavimento de adoquín se considera una vida útil superior a 30 años, siendo esta superior a la de otros pavimentos.

Por ello, considerando que las ventajas anteriormente mencionadas: bajo mantenimiento, mano de obra y herramientas de bajo coste, elevado valor residual por la posibilidad de reutilización de adoquines, período de vida útil y a pesar que el costo por metro cuadrado de adoquín únicamente tomando en cuenta material es un poco más elevado, se obtiene un pavimento óptimo desde el punto de vista coste-beneficio, superior a otros tipos de pavimentación. Además, cabe resaltar que el coste por metro cuadrado para las profundidades requeridas de los pavimentos está basada en el área de San José y que para efectos de ésta en otras ciudades este podría variar.

Por último, la capa rodadura debe cumplir con un módulo resiliente entre 2760 MPa (400000 psi) y 3100 MPa (450000 psi) según la guía AAHSTO 93, por lo cual para la realización del ejemplo de diseño de un pavimento de adoquín convencional se optó por utilizar un módulo resiliente de 2760 MPa (400000 psi).

CAPITULO VII

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones

1. Se logró investigar acerca del proceso constructivo y de diseño de un pavimento de adoquín convencional en Costa Rica, donde se encontró que una metodología de diseño como tal es completamente inexistente, mientras que la metodología constructiva que brinda el CR-2010 es muy básica, ya que hay aspectos que se consideran deberían ser más específicos.
2. Se logró realizar una propuesta metodológica de diseño para un pavimento de adoquín convencional utilizando como base la metodología AAHSTO de 1993 para pavimentos flexibles, y así crear una propuesta metodológica de diseño para Costa Rica.
3. Los materiales utilizados como lo son: el adoquín, los agregados para base y subbase, la arena para cama de asiento y para sello de adoquines deberá cumplir con las especificaciones escritas en la sección 4.2.1 de la guía para construcción de un pavimento de adoquín convencional.
4. Al realizar los diseños se logró determinar cada uno de los espesores para ambos tipos de pavimentos analizados; para el caso del pavimento de adoquín fueron: adoquín más cama de arena 8,4 cm, base de 10 cm y la subbase de 25 cm. Para el pavimento asfáltico fueron de: asfalto de 7,5 cm, la base de 11,4 cm y finalmente una subbase de 25 cm de espesor.
5. Las normas ASTM utilizadas en la investigación fueron de gran importancia, ya que se siguieron los lineamientos establecidos con el fin de que los diseños cumplieran con estos requerimientos, como lo es la norma ASTM C33, ASTM C936-01 y la norma ASTM C140.
6. Se logró realizar una propuesta metodológica de construcción para un pavimento de adoquín convencional siguiendo los lineamientos que brinda la sección 504 del CR-2010 y agregando más información recopilada de la construcción de este tipo de pavimentos en otros países.
7. También, se realizó un análisis coste-beneficio entre un pavimento de adoquín convencional y un pavimento flexible asfáltico con precios y

cantidades utilizadas en San José, donde, el pavimento asfáltico fue más económico con un costo de ¢15 984,07, mientras que el de adoquín fue de ¢24 726,35, únicamente presupuestando los materiales dentro de la GAM y siendo estos valores por m² de construcción para las profundidades requeridas en los ejemplos de la sección 4.3.

6.2 Recomendaciones

1. Debido a que, esta investigación es únicamente de manera teórica por la falta de tiempo que se requeriría para hacerla también de manera práctica; se recomienda que, en un futuro, se puedan realizar de manera práctica un pavimento de adoquín utilizando la guía tanto de diseño y construcción que se realizó en este escrito para comprobar su desempeño.
2. También, se recomienda que los pavimentos de adoquín se diseñen con cargas de tránsito entre los 50 000 y 3 000 000 de ejes equivalentes (ESALs).
3. Por otra parte, se recomienda que los diseños para un pavimento de adoquín se realice implementando alguna otra metodología de diseño para compararla con la expuesta en este escrito y observar si los espesores de capas dan de manera similar.

Bibliografía

- Alicante, S. d. (08 de Enero de 2004). *Manual Euroadoquín*. Obtenido de http://www.euroadoquin.org/index_manual.htm
- Barrantes, E. A. (2016). *Própuesta para Guía de Diseño de Bajo Volumen para Pavimentos Flexibles y Semirrigidos*. San Pedro de Montes de Oca, Costa Rica: Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales, Universidad de Costa Rica.
- COGUANOR. (11 de Septiembre de 2015). www.iccg.org.gt. Obtenido de Guía de Instalación de Adoquines de Concreto: [file:///C:/Users/D%C3%A1ril/Downloads/gua%20de%20instalacion%20adoquines%20iccg%20-%20octubre%202014-sitio%20web%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/D%C3%A1ril/Downloads/gua%20de%20instalacion%20adoquines%20iccg%20-%20octubre%202014-sitio%20web%20(1).pdf)
- Ing. Oscar V. Cordo. (1998). *DISEÑO DE PAVIMENTO MEODO AASHTO 1993*. San Juan: Instituto Nacional de Carreteras de Estados Unidos (NHI).
- Iturbe, I. J. (2002). *Manual Centroamericano para Diseño de Pavimentos*. Guatemala.
- Jiménez, J. A. (2010). *Manual de especificaciones generales para la construcción de carreteras, camino y puentes CR-2010*. San Jos, Costa Rica: Ministerio de Obras Publicas y Transportes.
- Muñoz, L. R. (2013). *Manual de Diseño de Pavimentos de Adoquines de Hormigón de Chile*. Chile .
- Navarro, T. E. (2013). *Manual de Diseño de Pavimentos de Adoquines de Hormigón*. Chile: Instituto del Cemento y del Hormigón de Chile.
- Ortiz, R. M. (13 de Diciembre de 2012). *es.SlideShare.net*. Obtenido de <https://es.slideshare.net/ricardmiranda2010/proyecto-de-tesis-12-nov-2012>

Rodrigo Bahamondes, T. E.-T. (Diciembre de 2013). *Revista de la construcción.*

Obtenido

de

https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-915X2013000300002

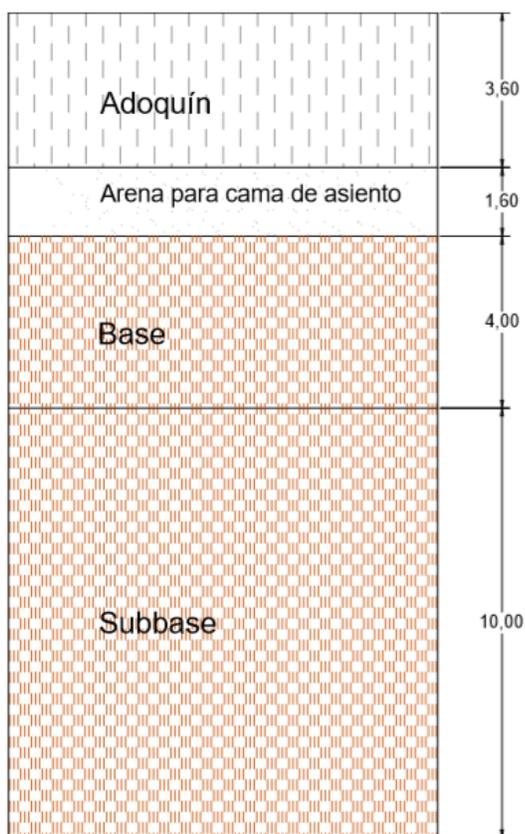
Solar, J. S. (2013). *Manual de Diseño de Pavimentos de Adoquines de Hormigón de Chile.* Chile.

UCR, L. (2010). *Manual de especificaciones generales para la construcción de carreteras, caminos y puentes CR-2010.* San José, Costa Rica.

Anexos

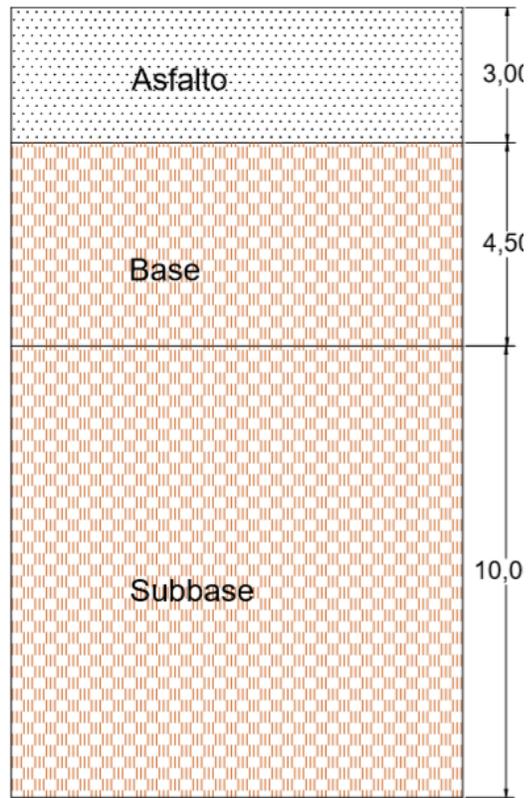
En esta sección se muestran algunas proformas que evidencien los precios obtenidos para la elaboración del presupuesto para el pavimento de adoquín convencional y asfáltico, también, una imagen ilustrativa del diseño de pavimento.

Ilustración 38: Estructura del Pavimento de Adoquín



Fuente: Propia

Ilustración 39: Estructura del Pavimento Asfáltico



Fuente: Propia

Ilustración 40 : Proforma del precio de los adoquines



Código: CONSTRUCTORA GONZALO DELGADO S.A.
Cia cliente: 7000638
Fecha: 13/12/2017
Teléfono:
Fax:
Atención:
Correo:

Estimados señores:

En respuesta a su solicitud presentamos oferta económica para su proyecto: **Teknodren y 401 gris.**

Ubicado en: **Retiro en planta.**

Código	Descripción del producto	Cantidad (un)	Precio unitario	Impuesto venta	Precio total
93000054PTD1	SISTEMA PAVIMENTO TEKNODREN GRIS (M2)	4.00	₡ 17,215.00	₡ 2,237.95	₡ 77,811.80
10034680PCD1	ADOQUIN BICAPA 401 GRIS 8X10Q20	75.00	₡ 144.90	₡ 19.84	₡ 12,280.61
Peso total: 0.93 Ton		Total Productos + I.V.I		₡ 90,092.41	
		Transporte:		₡ 0.00	
		Servicios de embalaje:		₡ 0.00	
TOTAL DE LA OFERTA					₡ 90,092.41

CONSIDERACIONES IMPORTANTES

Tiempo de entrega: El material se entregará 1 día hábiles después de recibida la orden de compra.

Vigencia de la oferta y precios: Los precios y la oferta son válidos por los próximos 15 días naturales.

Garantía del producto: Nuestro producto tiene garantía siempre y cuando se cumpla con los requerimientos de almacenamiento y manipulación de nuestro Manual Técnico (www.productosdeconcreto.com)

Sujeto a especificaciones indicadas en la ficha técnica adjunta.

Forma de pago: Crédito a 30 días

Importante: Recuerde su equipo de protección personal, en caso de no contar con el mismo, pregunte al oficial de seguridad.

Bancos	Número de cuenta	Cuenta cliente
Devilinda (Cuenta Empresarial) - Colonias	28603-01-01	10400000296030111
Devilinda (Cuenta Empresarial) - Colonias	28603-01-02	10400000296030126
Banco Nacional de Costa Rica (BNCR) - Colonias	100-01-000-14589-6	151000100010145891
Banco de Costa Rica (BCR) - Colonias	001-4297-9	15201001000629798
Banco Promérica - Colonias	4-000-4065-69	116001030000005492
Banco BAC San José	915156079	10200009151560798

Jose Francisco Valverde
Segmento Constructoras
 francisco.valverde@pc.cr
 6225-1931
 2587-2725

013 477

Productos de Concreto S.A.

San Rafael de Alajuela
 362-1000 San José
 +506 25-87-1400



Fuente: Constructora Gonzalo Delgado S.A

Ilustración 41: Proforma de los precios de agregados para base y subbase



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@ogd.co.cr

Teléfono: 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	Total	
12	M3	10101974 SF-4172 LASTRE GRUESO (TAMANO MAXIMO)	Vagoneta	7,032.30	914.20	3,034.71	10,981.21	131,774.52
12	M3	10102713 SF-4172 SUBBASE 3	Vagoneta	8,275.30	1,075.79	3,034.71	12,385.80	148,629.60

SUB-TOTAL	183,691.20
Transporte	72,833.04
Impuesto 13%	38,082.32
TOTAL	294,606.56

OFERTA VALIDA HASTA: 18 de Abril del 2020

Forma de Pago: Crédito 30 días.

Fuente: CEMEX, Costa Rica

