



Sede "Camilo Cienfuegos"
Facultad de Ciencias Técnicas
Departamento de Construcciones

GUÍA PARA EL DISEÑO DE PAVIMENTOS DE ADOQUINES

Trabajo de Diploma en Ingeniería Civil

Autor: Damaisy Mesa Suárez

Tutor(es): Lic. Ing. Pedro A. Hernández Delgado

Matanzas, 2019

DECLARACIÓN DE AUTORIDAD

Yo, Damaisy Mesa Suárez, declaro que soy el único autor de este trabajo de diploma y, en tal calidad, autorizo a la Universidad de Matanzas a emplearlo como material de consulta. Y para que así conste firmo la presente a los ____ días del mes de _____ del año _____.

Firma del autor

Damaisy Mesa Suárez

Firma del tutor

Lic. Ing. Pedro A. Hernández Delgado

NOTA DE ACEPTACIÓN

Miembros del Tribunal:

Presidente

Secretario

Vocal

“La confianza en sí mismo es el primer secreto del éxito”

EMERSON

DEDICATORIA

A MIS PADRES: Por su amor incondicional, el esfuerzo continuo y constante, por siempre creer en mí y apoyarme en todas mis decisiones a lo largo de mis años de vida.

A MI HERMANA: Por ser mi mejor amiga y consejera a pesar de la distancia, y compartir los mejores años de mi vida junto a ella.

A MIS ABUELOS: A los que se encuentran y a los que quisieron verme hoy, gracias por todo el amor dado y la sabiduría ofrecida, y por haber formado la familia que hoy tenemos.

A MIS TÍOS: Por el apoyo y el cariño que me han brindado por todos estos años y los valiosos consejos ofrecidos.

A MIS PRIMOS: Por siempre estar al tanto de todo a pesar de la distancia.

A MI NOVIO: Por apoyarme y ayudarme en mis estudios, y el amor brindado en todo momento a pesar de las dificultades.

A MIS AMIGOS: A los que de una u otra forma me ayudaron en la culminación de mi carrera y por compartir buenos momentos, en especial a mis amigas Yalenis y Heidy. A Daniela por demostrar ser una buena amiga a pesar de los años y la distancia.

A mi tutor Pedro A. Hernández y a mis profesores en especial a Alejandro Hernández por todo el tiempo, el apoyo, los conocimientos que me han brindado.

AGRADECIMIENTOS

A mis padres por todos estos años dándome lo mejor de sí incondicionalmente en todo momento.

A mi hermana por todo el cariño y consejos ofrecidos a pesar de las dificultades y la distancia.

A mis abuelos que siempre han tratado de estar presente y al tanto de mí.

A mis tíos y a mis primos por su apoyo incondicional y por preocuparse de mí.

A mi novio por estar en cada momento y siempre dándome lo mejor de sí.

A mis amigos de la universidad Yalenis, Heidy y César, y los de la vieja escuela Daniela y Claudia muchas gracias por compartir risas y lágrimas en todos estos años.

A mi tutor Pedro A. Hernández y mi profesor Alejandro Hernández por todo ese tiempo y sabiduría brindada a pesar de las adversidades.

A todos mis familiares y amigos que se encuentran hoy y los que soñaron estar compartiendo conmigo hoy este día tan importante, les estoy sumamente agradecida con el corazón.

RESUMEN

La presente investigación tiene como objetivo desarrollar una guía para el diseño de pavimentos de adoquines. El país enfrenta nuevos desafíos en materias de infraestructura pública y muy especialmente en materia de habitabilidad urbana, ahorro de energía, protección ambiental y uso eficiente de los recursos, por lo cual el adoquín constituye una opción más para contribuir a ese propósito. En tanto no se disponga de una guía para diseñar pavimentos de adoquines en Cuba, la propuesta que aquí se expone permite contar con dimensiones adecuadas para usos tan diversos como calles, caminos menores, espacios industriales, áreas peatonales y estacionamientos. La guía que se propone corresponde a modelos extranjeros que han sido calibrados en condiciones similares a las que se pueden encontrar en el país. Como tales, los modelos entregan dimensiones mínimas de las capas de pavimento, que dependiendo del caso, el proyectista podrá aumentar. Se incluye una amplia referencia para quienes estén interesados en profundizar en diversos aspectos del diseño de este tipo de pavimentos, la cual en su mayoría es de libre acceso.

Palabras claves: adoquín, guía, diseñar, pavimentos.

ABSTRACT

The present investigation has as objective to develop a guide for the design of pavements of paving stones. The country faces new challenges in matters of public infrastructure and very especially as regards urban habitability, energy saving, environmental protection and efficient use of the resources, reason why the paving stone constitutes an option more to contribute to that purpose. As long as it doesn't have a guide to design pavements of paving stones in Cuba, the proposal that here it is exposed it allows to have appropriate dimensions for uses so diverse as streets, smaller roads, industrial spaces, pedestrian areas and parking. The guide that intends belong foreign models that have been gauged under similar conditions to those that can be in the country. As such, the models give minimum dimensions of the layers of pavement that depending on the case, the planner will be able to increase. A wide reference is included for those who are interested in deepening in diverse aspects of the design of this type of pavements, which is of free access in its majority.

Keywords: paving stone, guide, to design, pavements.

TABLA DE CONTENIDO

Introducción.....	1
Capítulo 1. Estado del arte relacionado con el diseño de pavimentos de adoquines.	5
1.1- Características de los pavimentos de adoquines.	5
1.2- Diferencias entre pavimento de hormigón, pavimento de asfalto y pavimento de adoquines.	6
1.3- Historia y evolución de los pavimentos de adoquines.	7
1.4- Tipos de pavimentos de adoquines	9
1.5- Aplicaciones de los pavimentos de adoquines	11
1.5.1- Ventajas de los pavimentos de adoquines.	14
1.5.2- Algunas limitantes que presentan los pavimentos de adoquines.....	15
1.6- Clasificación de los adoquines de hormigón.	16
1.6.1- Patrones de colocación de adoquines	17
1.7- Sistemas y estructuras de drenajes.	19
1.8- Comportamiento estructural de los pavimentos de adoquines.....	22
1.8.1- Tipos de trabazón mecánica	23
1.8.2- El comportamiento a la fatiga	24
1.8.3- Variables que describen el comportamiento de los pavimentos de adoquines.	26
1.9- Metodologías de diseño.	29
1.10- Adoquines en Cuba.....	30
Capítulo 2. Guía para el diseño de pavimentos de adoquines.	34
2.1- Elementos estructurales.....	34
2.2- Método de diseño para tráfico peatonal y vehicular	39
2.3- Método de diseño para tráfico pesado.....	43
2.4- Método de diseño de patios de almacenes y contenedores	44
Capítulo 3. Validación práctica de los resultados.	52
3.1- Características de la obra a realizar.....	52
3.2- Parámetros y consideraciones iniciales.....	55
3.3- Determinación de la estructura del pavimento.....	58
CONCLUSIONES	63
RECOMENDACIONES.....	64
Referencias Bibliográficas	65

INTRODUCCIÓN

Los pavimentos son estructuras compuestas por capas de diferentes materiales, que se construyen sobre terreno natural, para que personas, animales o vehículos puedan transitar sobre ellos, en cualquier época del año, de manera segura, cómoda y económica.

Desde tiempos antiguos se ha tratado de solucionar problemas convencionales para obtener un estatus de vida más adecuado de acuerdo a las exigencias de cada sociedad, por lo que un elemento predominante en el desarrollo de cada civilización han sido los caminos y su forma de desarrollo en el transcurso del tiempo. Dada la importancia de obtener tipos de pavimentos que sean competitivos en el mundo de acuerdo a los diferentes tipos de tráfico que existen, se hace necesario explorar de una forma exhaustiva, propuestas para un mejoramiento pertinente; haciendo énfasis en los procesos que sean técnica y económicamente factibles para llevar a cabo su realización.

Los buenos materiales y las buenas prácticas de construcción son vitales para producir pavimentos duraderos y de alta calidad. Aun cuando un pavimento esté diseñado con la más alta calidad, no tendrá un desempeño adecuado si no está construido correctamente. Un pavimento que está bien construido requiere menos mantenimiento y reparaciones con el transcurso del tiempo. Para lograrlo, es necesario que los requisitos y especificaciones de construcción estén correctamente definidos, que se puedan medir y que no sean arbitrarios.

Los pavimentos de adoquines son los pavimentos más viejos que existen en Cuba pues datan desde la colonia. En últimos años su uso ha disminuido, aunque en la actualidad se puede presenciar la utilización de éste en algunas calles matanceras.

Por lo cual se plantea como *situación problemática*: necesidad del país de incrementar las áreas de pavimentación tanto en zonas urbanas como industriales lo cual implica un alto consumo de hormigón y mezclas asfálticas siendo necesario el desarrollo de otras alternativas.

Dadas las condiciones anteriores se plantea como *problema*: carencia de una guía para el diseño y el empleo de adoquines en pavimentos.

En correspondencia con el problema científico se define la siguiente **hipótesis**: si se logra la guía, facilitaría la aplicación de los pavimentos de adoquines.

Objetivo general:

- Desarrollar una guía para el diseño de pavimentos de adoquines

Para dar cumplimiento al objetivo general, se trazan como **objetivos específicos**:

- Analizar el estado del arte relacionado con el diseño de pavimentos de adoquines.
- Elaborar una guía para el diseño de pavimentos de adoquines.
- Validar prácticamente los resultados.

De dichos objetivos específicos, se derivan las siguientes **tareas principales de la investigación**:

- Análisis del estado del arte relacionado con el diseño de pavimentos de adoquines.
- Elaboración de una guía para el diseño de pavimentos de adoquines.
- Validación práctica de los resultados.

Como parte de la **Operacionalización de las variables relevantes** se define como **variable independiente** el desarrollo de una guía para el diseño de pavimentos de adoquines; y como **variable dependiente** la existencia de un documento que contenga el diseño de pavimentos de adoquines, que inducirá la mejora de los mismos.

Novedad científica:

El desarrollo de un documento que aglutine las bases de esta temática

Métodos Científicos

Para desarrollar la presente investigación se emplearán diferentes **métodos teóricos**, entre los que figuran:

Análisis-síntesis.

Una vez definidos el objetivo general y las tareas de la investigación, se comenzará la recopilación de información referente al tema, estableciendo puntos de concatenación entre la presente indagación y materiales anteriores en cuanto a enfoque, visión y perspectiva. Al localizar la información en las diferentes fuentes bibliográficas, se realizará el fichaje para su posterior procesamiento, el cual consistirá en una lectura exhaustiva con el fin de describir los elementos relacionados en la búsqueda y establecer conexiones entre los mismos que posibilitarán el logro de los objetivos y el cumplimiento de las tareas de investigación.

Histórico-lógico.

Como parte de la caracterización del objeto de estudio, y como resultado de la revisión bibliográfica, se elaborará una reseña con la descripción de los antecedentes de los diseños de los pavimentos de adoquines, tanto en el ámbito nacional como en el internacional.

Inducción-deducción.

Tomando como referente los resultados de investigaciones referidas al diseño de los pavimentos de adoquines se inducirá una nueva alternativa a la hora de la realización de estos tipos de pavimentos.

Métodos Empíricos:

Revisión de documentos: Para el desarrollo de la investigación se consultarán diferentes fuentes tanto en formato digital como impreso en diferentes idiomas, con el objetivo de profundizar en aspectos fundamentales del diseño de los pavimentos de adoquines.

Entrevista: Se realizarán entrevistas informativas estructuradas de carácter abierto, para facilitar al entrevistado dar cualquier respuesta que considere apropiada sobre hechos, situaciones, acontecimientos, opiniones y actitudes que involucren al caso de estudio. Las mismas serán de tipo directiva centrada, pues tienen el objetivo de conocer las opiniones de diferentes personas con respecto al tema objeto de la investigación.

El Trabajo de Diploma se estructura de la siguiente forma:

Resumen / Abstract.

Índice.

Introducción

En ella se define la Situación Problemática y se formula el protocolo de la investigación, en el cual se precisan el problema científico, objetivo general, los objetivos específicos y la hipótesis, así como los métodos utilizados en la investigación.

Capítulo 1: Estado del arte relacionado con el diseño de pavimentos de adoquines.

-Se hará un análisis del estado del arte, basándose en su historia y evolución de estos tipos de pavimentos hasta la actualidad, sus definiciones, los parámetros que se tienen en cuenta para su diseño y ejecución.

Capítulo 2: Guía para el diseño de pavimentos de adoquines.

-Se realizará una guía que permita el diseño de pavimentos de adoquines bajo cualquier carga de tráfico y solicitaciones, basadas en normativas extranjeras.

Capítulo 3: Validación práctica de los resultados.

-Se aplicará la guía para diseñar el pavimento de adoquines de la rotonda de Varadero.

Conclusiones

-A partir de la situación problemática, luego de haberse aplicado los métodos de investigación y después de haber sido arrojados los resultados de la misma, se arriba a conclusiones en función de los objetivos específicos formulados por el autor.

Recomendaciones

- Se sugiere tanto a la Universidad de Matanzas y a la EMPAI que se continúen los estudios propuestos en el presente Trabajo de Diploma, facilitando el camino hacia el desarrollo de este tipo de pavimentos por todo el país.

Bibliografía

CAPÍTULO 1. ESTADO DEL ARTE RELACIONADO CON EL DISEÑO DE PAVIMENTOS DE ADOQUINES.

En este capítulo se pretende introducir los elementos fundamentales a tener en cuenta para un posterior diseño siendo así relevante el conocimiento de los elementos estructurales, la historia internacional como nacional, los diferentes tipos de pavimentos de adoquines y su aplicación en general. Su análisis estructural y las diferentes metodologías para diseñar que existen resultan significativos para la introducción de una guía de diseño de pavimentos de adoquines.

1.1- Características de los pavimentos de adoquines.

Los pavimentos de adoquines tienen una capa de rodadura que está conformada por adoquines de piedras naturales, colocados sobre una capa de arena y con un sello de arena entre sus juntas. De la misma manera que los pavimentos de asfalto, pueden tener una base, o una base con una subbase, que pueden tener espesores ligeramente menores que los utilizados para los pavimentos de asfalto y también se consideran pavimentos flexibles. El diseño y construcción varía con el clima, condiciones de disponibilidad de materiales, métodos de diseño, condiciones de suelo y cargas de tráfico. La colocación de los elementos puede ser manual o mecánica.

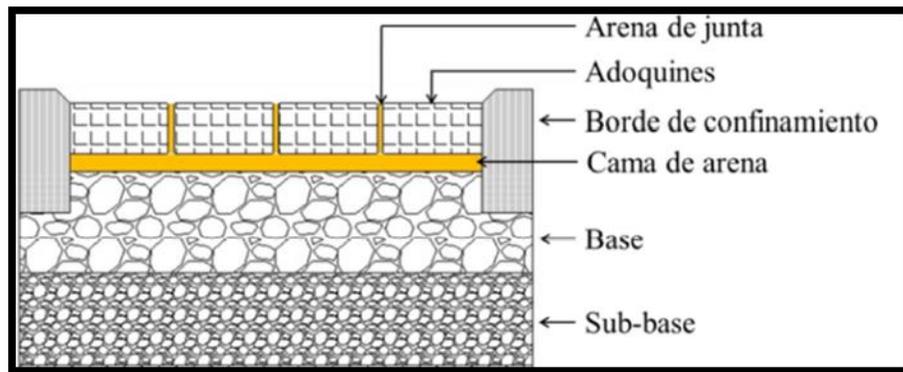


Figura 1.1: Elementos estructurales de un pavimento de adoquines
Fuente: (Rodrigo, 2013).

Según Rodrigo (2017) el terreno es el primer elemento de estudio para el diseño de cualquier tipo de pavimento, ya que es el terreno sobre el cual irán las demás capas; en el análisis, el terreno se estudian las alternativas de costos y funcionalidad del pavimento por medio de cortes y rellenos que se realizarán al terreno natural, así como las pendientes que llevara el pavimento y sus estructuras de drenajes, sobre este elemento se colocara la base o sub-base, según sea el caso,

pues la base constituye el elemento importante de la estructura de los pavimentos con adoquines de concreto, y estas pueden ser: granulares, suelo cemento, asfalto, cemento, macadán, material bituminoso, etc. por lo que en las consideraciones de diseño se debe de tener cuidado a la hora de su evaluación; sin embargo la sub-base se puede determinar como una base de menor calidad ya que se encuentra más alejada de la carga vehicular y se le atribuye a este elemento como una función de drenaje, posteriormente después de la base se procede a colocar la capa de rodadura que comprende la capa de arena, adoquines y finalmente el sellado de las juntas.

Conociendo de antemano que un buen diseño de pavimentos depende mucho de los sistemas de drenaje, para los pavimentos con adoquines es vital a la hora de analizar la infiltración existente en el área de diseño del pavimento, así mismo las condiciones ambientales, las pendientes ya sean estas longitudinales o transversales, por lo que el estudio en los sistemas de drenajes conllevan al análisis de drenajes superficiales y subterráneos.

1.2- Diferencias entre pavimento de hormigón, pavimento de asfalto y pavimento de adoquines.

A los pavimentos se los denomina de acuerdo a su comportamiento (rígido o flexible) según el material de su capa de rodadura (Edwin, 2016):

- Pavimentos de Hormigón: Son pavimentos rígidos. Están conformados por losas de hormigón de no menos de 15 cm de espesor, separadas por juntas y colocadas sobre una base, subbase y terreno. Se debe prestar especial atención al diseño y construcción del terreno, subbase y base para garantizar su capacidad estructural, estabilidad, uniformidad, durabilidad, y regularidad superficial. El objetivo de la base es proveer un soporte uniforme al pavimento. Posee una vida útil más larga que el pavimento de asfalto. Los pavimentos de hormigón, al tener una superficie plana alargan la vida de los vehículos evitando que se dañen y minimizando su mantenimiento. Los pavimentos de hormigón resisten mejor las cargas transmitidas por los vehículos pesados que los pavimentos de asfalto. En las zonas de frenado y arranque de vehículos pesados, el hormigón no se deforma.
- Pavimentos de Asfalto (de hormigón asfáltico): Son pavimentos flexibles. Su superficie es de hormigón asfáltico, sin juntas y no tienen más de 10 cm de espesor. Su base tiene

aproximadamente 20 cm de espesor y suelen tener subbase. Respecto a su mantenimiento, en el recapado de los pavimentos asfalto, se ejecutan desvíos y habilitan rutas alternativas, aspectos que perjudican a vecinos y usuarios. A diferencia del hormigón, que gana resistencia con el tiempo, con el asfalto no ocurre lo mismo. Se deforma con el paso de vehículos pesados. Al deformarse, no posee un buen drenaje del agua de lluvia. Poseen un tiempo de ejecución menor que los pavimentos de hormigón, al igual que es también menor el ruido producido por la circulación vehicular, al tratarse de una superficie continua.

- Pavimentos de adoquines: También se consideran pavimentos flexibles. La colocación de adoquines requiere de poca maquinaria, herramientas sencillas y permite una inmediata puesta en servicio una vez finalizada la obra. No demanda mano de obra altamente calificada. Los adoquines son combinables y antideslizantes, adaptables a curvas y pendientes, son fácilmente removibles y recuperables, facilitando posteriores instalaciones. Poseen resistencia, capacidad portante y flexibilidad de adaptación ante deformaciones del terreno, dan apariencia de orden y prolijidad. La pavimentación es en seco, fácil y rápida. El pavimento de adoquines permite mayor calidad del hormigón, al ser producido en fábrica, bajo estrictos controles de dosificación. Al no ser una superficie continua, es mayor el ruido producido por la circulación vehicular.

1.3- Historia y evolución de los pavimentos de adoquines.

La historia de los pavimentos de adoquines tiene sus orígenes hace más de 20 siglos en el empedrado. Su aparición se debió a la necesidad sentida por el hombre de tener vías durables, limpias y seguras, que le permitieran un desplazamiento rápido en cualquier época del año. Así, a la vez que se perfeccionaban los carros de tracción animal, también se buscó una superficie de rodamiento continua que permitiera un tránsito más cómodo; para lograr esto se abandonó la práctica de colocar las piedras en estado natural y se les comenzó a tallar en forma de bloques para obtener un mejor ajuste entre los elementos (Edwin, 2016).

Esta simple acción dio lugar al surgimiento del primer pavimento de adoquines, pues la palabra española adoquín proviene del árabe «ad-dukkân», que quiere decir «piedra escuadrada o a escuadra».

La primera vez que se emplea el firme según Edwin (2016) es en Asia, en las vías que construyó el Imperio Hitita. En Creta en el Minoico Medio (2.300 – 1.700 a. de C.), se utilizó como pavimento en la vía procesional que discurre desde las proximidades del mar hasta el palacio de Knossos, grandes losas de piedra asentadas sobre capas de arcilla, piedra y yeso. El sistema de urbanización y de comunicaciones más perfecto de la Edad Antigua corresponde al Imperio Romano por sus grandes detalles técnicos y funcionalidad de sus vías. Los técnicos romanos construyeron vías con grandes alineaciones rectas, utilizando distintos firmes en función de la categoría de la vía y de su funcionalidad.



Figura 1.2: *Vía Apia (Roma-Capua). Primer camino empedrado. Año 312 a. de C.
Fuente: (Edwin, 2016).*

En otro continente, los mayas, construyen caminos (Sache) para el acceso a los templos, empleando como cimiento piedras calizas blancas, apisonadas con cilindros de piedra, y como pavimento un enlosado de la misma naturaleza, conservándose en perfecto estado al no tener que soportar estos pavimentos la acción de las cargas de carros y caballerías, etc. Los aztecas construyeron calzadas locales y cortas situadas en los alrededores de México. La construcción de los pavimentos de piedra continuó hasta comienzos del siglo XX y no pocos aún se encuentran en servicio y en buen estado, lo cual atestigua su durabilidad. Sin embargo, esta situación estaba por cambiar. Con la urbanización en el siglo XIX y la aparición del automóvil con motor de combustión interna a finales del mismo, no resultaba económico ni práctico tallar la gran cantidad de piedras que requería el ritmo de pavimentación. Por esto, los adoquines de piedra comenzaron a sustituirse con los de arcilla cocida y por bloques de madera, gracias a lo cual se desarrollaron

las técnicas de pavimentación con concreto y con asfalto, muy comunes en la actualidad (Edwin, 2016).

La pavimentación con bloques de madera se desechó muy pronto, pero en algunos países europeos se trabajaron grandes extensiones de pavimentos de adoquines de arcilla cocida, con resultados aceptables a pesar del desgaste acelerado de las piezas. Al comenzar la reconstrucción de Europa, tras la Segunda Guerra Mundial, la arcilla cocida se dedicó a la construcción de vivienda, por lo que se comenzaron a fabricar, en moldes individuales adoquines de concreto. Éstos últimos pronto mostraron grandes ventajas sobre los de arcilla, en especial, por su durabilidad. Más tarde, Alemania impulsó el desarrollo de las máquinas vibro-compresoras para elaborar en serie piezas de concreto, con lo cual se industrializó la producción de los adoquines, popularizándolos por todo el mundo (Edwin, 2016).



*Figura 1.3: La tendencia actual de los pavimentos de adoquines
Fuente: (Edwin, 2016).*

1.4- Tipos de pavimentos de adoquines

Dentro de las familias de pavimentos de adoquines se pueden distinguir 3 tipos dada la clasificación por Tomás (2013):

- pavimentos de adoquines propiamente tales,
- pavimentos permeables de adoquines porosos
- y pavimentos peatonales de adoquines.

Los pavimentos de adoquines de hormigón se utilizan principalmente para espacios vehiculares, como por ejemplo estacionamientos, calles y pasajes, así como para áreas de circulación y estacionamientos de aeródromos, aeropuertos, patios industriales y explanadas portuarias. En todos estos casos es importante siempre proporcionar las pendientes suficientes para evitar la acumulación y/o infiltración de agua (Tomás, 2013).



Figura 1.4: Pavimentos de adoquines en aeródromos
Fuente: (Tomás, 2013).

Por otro lado, los pavimentos permeables de adoquines de hormigón (porosos) permiten la filtración de agua, utilizándose principalmente en estacionamientos.



Figura 1.5: Estacionamientos de centros comerciales.
Fuente: (Tomás, 2013).

Finalmente, los pavimentos peatonales con adoquines de hormigón se utilizan para fines ornamentales, principalmente en viviendas y espacios públicos con el fin de lograr un diseño urbano compatible con la escena arquitectónica.



*Figura 1.6: Espacios peatonales.
Fuente: (Tomás, 2013).*

1.5- Aplicaciones de los pavimentos de adoquines

El éxito de los pavimentos de adoquines se basó en su amplio rango de aplicación, pues pueden utilizarse en andenes, zonas peatonales, plazas, en las vías internas de urbanizaciones, calles y avenidas, con un tráfico vehicular que va de unos pocos automotores ligeros, hasta donde circula un gran número de camiones pesados; en zonas de carga, patios de puertos y plataformas de aeropuertos (Tomás, 2013).

La utilización de adoquines en pavimentos urbanos es una realidad que se destaca por su desempeño y adaptación a nuevas exigencias de seguridad, durabilidad, estética y medio ambiente (Tomás, 2013). Seguro, por permitir una excelente adherencia para cualquier tipo de tráfico, por su gran capacidad estructural estética, por razones técnicas, ecológicas, estructurales y economía.

Por otra parte, la utilización de los adoquines prefabricados ayuda a mejorar el ambiente de las pequeñas comunidades, puesto que durante su colocación se crea una gran cantidad de oportunidades de empleo temporal, y debido a los costos de transportación muchas veces conviene establecer una fábrica en la zona en desarrollo.

Según Adolfo J. María (2017) es necesario mencionar que las aplicaciones referente a las áreas sometidas a tráfico vehicular (ver figura 1.7) es destacable en el aspecto de señalizaciones para áreas urbanas, lo que conlleva a la utilización en los pasos peatonales, intersecciones de calles, avenidas, adecuados a cada caso, como lo es en las áreas de aparcamiento o mercados, terminales de autobuses, gasolineras, polígonos industriales, áreas de carga y descarga, zonas portuarias y aeropuertos, claramente tomando las consideraciones de diseño para los tipos de vehículos para cada caso.

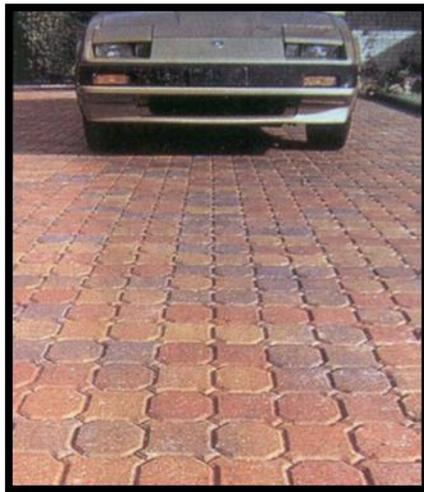


Figura 1.7: Áreas sometidas a tráfico.
Fuente: (Adolfo J. María ,2017).

Existen en este caso aplicaciones especiales que es necesario tomar en consideración, como son las estructuras hidráulicas en las que de forma general se recomienda el uso de adoquines de 10cm de espesor por razones de estabilidad, ya que la velocidad de desplazamiento del caudal en los canales y su movimientos ondulatorio se pueden controlar mediante adoquines que sobresalgan un poco de los extremos, esto con el fin de agudizar el golpe de ariete del fluyente; otra de las aplicaciones especiales se da en la protección de taludes. Otras aplicaciones especiales se dan en granjas y en zonas mineras debido a su naturaleza de modulación y durabilidad de este tipo de pavimentos (ver figura 1.8).



Figura 1.8: Pavimento en Minas de SURÁFRICA
Fuente: (Adolfo J. María ,2017).

Tabla 1.1: Diversas aplicaciones de pavimentos de adoquines según nivel de solicitud y grupo de aplicación.

Nivel de solicitud de tránsito	Grupo de aplicación	Tipo de aplicación
Baja	Espacios públicos	Veredas Plazas Ciclo vías
	Residencias	Entradas de vehículos Senderos Espacios recreacionales Pavimentos interiores en condominios Estacionamientos esporádicos
Media	Proyectos comerciales	Estacionamientos masivos Paraderos de taxi Terminales de buses Estaciones de servicio Centros comerciales Veredas en parques
	Caminos y calles	Cruces peatonales Calles y pasajes Intersecciones Plazas de peaje
Alta	Áreas industriales	Patios de carga en puertos Aeropuertos Patios de carga en puertos secos Zonas militares Patios de contenedores Rellenos sanitarios

Fuente: (Tomás, 2013)

1.5.1- Ventajas de los pavimentos de adoquines.

Los pavimentos de adoquines, al igual que cualquier otro tipo de pavimento, poseen ventajas y desventajas, las cuales determinan cuándo es adecuado o no optar por una solución de este tipo. Por tanto, resulta conveniente que los atributos de los pavimentos de adoquines son según Tomás (2013):

- **Diversidad:** La gran variedad de formas, colores y texturas con que pueden fabricarse los adoquines y la diversidad de configuraciones posibles de usar, entregan al proyectista elementos que adecuadamente conjugados dan por resultado pavimentos atractivos. Asimismo, utilizando diversos colores y texturas es posible incluir en la superficie dibujos o diseños, señalizaciones. De este modo, los adoquines proporcionan una gran variedad de posibilidades para el diseño arquitectónico y paisajístico de los espacios públicos.
- **Calidad:** puesto que los adoquines son elementos prefabricados, el control de calidad y su certificación pueden desarrollarse en la fábrica, reduciendo la heterogeneidad en calidad del material en obra. Por tanto, en terreno el control de calidad de los materiales se concentra en las arenas y material de base, en la terminación superficial del pavimento y en el control de los procesos constructivos de la base, subbase, y terminaciones.
- **Durabilidad:** las características de los adoquines, resistencia a la compresión, absorción, resistencia al congelamiento y resistencia a la abrasión, le otorgan una alta durabilidad ante ambientes agresivos, la cual puede sobrepasar la vida de diseño del pavimento.
- **Rapidez de puesta en operación:** independiente del método constructivo, manual o mecánico, los pavimentos de adoquines pueden utilizarse inmediatamente después de contruidos, lo cual les otorga una ventaja importante respecto de otros tipos de pavimentos, especialmente en aquellos lugares en donde no es posible contar con otras tecnologías de pavimentación.
- **Mantenimiento:** puesto que los elementos se pueden reponer fácilmente, cualquier defecto inducido por aspectos funcionales o estructurales puede corregirse logrando restituir en su totalidad la condición superficial, igualando la del pavimento adyacente al área reparada. Por tanto, se logra una razonable homogeneidad del pavimento. Debido a esto, en áreas

urbanas facilita notablemente la reparación y/o reposición de infraestructuras de servicios que se encuentren soterradas.

- Condición de operación: debido a la regularidad superficial del pavimento producto de las juntas entre adoquines y las juntas de confinamiento, este tipo de solución es adecuada para velocidades de circulación de alrededor de los 50 km/h o menos. Por tanto, no son adecuados para vías con velocidades de operación elevadas. Por otro lado, son eficientes elementos reductores de velocidad en pasos peatonales, intersecciones y calles locales, contribuyendo de esta manera a la seguridad vial.
- Reutilización: los adoquines, en tanto se encuentren sanos (no fracturados o degradados y cumplan con las características de diseño del proyecto), pueden reutilizarse para pavimentar, lo cual es beneficioso en términos ambientales dado que se reduce la cantidad de material de desecho si se desea utilizar otro tipo de pavimento, reponer o mantener áreas pavimentadas con adoquines.

1.5.2- Algunas limitantes que presentan los pavimentos de adoquines

Adolfo J. María (2017) plantea las limitantes siguientes:

- Si la capa de adoquines queda bien colocada, sellada y compactada no debe perder su sello y su estabilidad ante la caída de lluvias, por copiosas que estas sean; pero nunca se debe poner a trabajar un pavimento de adoquines como canal colector de aguas, que pueda llegar a soportar corrientes voluminosas y rápidas tipo “arroyo”.
- Los pavimentos de adoquines nunca deben someter a la acción de un chorro de agua a presión. Si esto se hace intencionalmente puede ocasionar la pérdida del sello de las juntas, por lo cual no se recomienda para zonas de lavado de automóviles.
- De la misma manera que con otros tipos de pavimentos la estructura del pavimento de adoquines se deben apartar del nivel freático del terreno.
- Por estar compuesto por un gran número de piezas, el tráfico sobre un pavimento de adoquines genera más ruido que sobre los otros tipos de pavimentos, e induce mayor

vibración al vehículo; por estas razones no es aconsejable para velocidades superiores a los 80km/h.

1.6- Clasificación de los adoquines de hormigón.

Los adoquines se clasifican internacionalmente como adoquines tipo “A”, “B” y “C” dada por Tomás (2013). La Figura 1.9 muestra una imagen de cada uno de ellos.

- Los adoquines tipo “A” corresponden a unidades dentadas que se traban unas con otras proporcionando las mejores condiciones de inter-trabazón ante la aplicación de fuerzas verticales y horizontales.
- Los adoquines tipo “B” ofrecen una menor inter-trabazón y permiten un mejor desempeño ante desplazamientos paralelos a unos de sus ejes.
- Los adoquines tipo “C”, en tanto, tienen formas regulares en sus caras y no ofrecen una inter-trabazón favorable para resistir movimientos longitudinales o rotacionales.

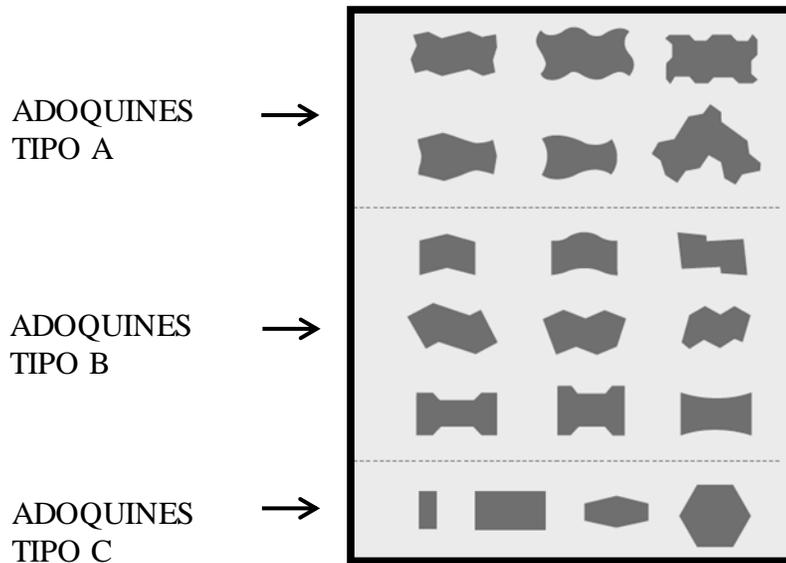


Figura 1.9: Clasificación de adoquines.
Fuente: (Tomás, 2013).

1.6.1- Patrones de colocación de adoquines

El adoquinado se coloca según Jorge A. (2005) por hileras, cuya disposición final depende del arreglo de conjunto o patrón deseado, cuidando los perfilamientos longitudinal y transversal que se aplique al proyecto. En las inmediaciones de los confinamientos, elementos restrictivos, banquetas, pozos de visita, alcantarillas, etc. se utilizarán fragmentos de adoquines, los cuales provendrán de cortes hechos con guillotinas. En caso de que los huecos por rellenar sean tan pequeños que la ejecución de fragmentos no sea práctica, podrá colocarse en los bordes a manera de rellenos concreto de $f'c = 300\text{kg/cm}^2$, con un tamaño máximo de agregado de 1cm, ver figura 1.10.

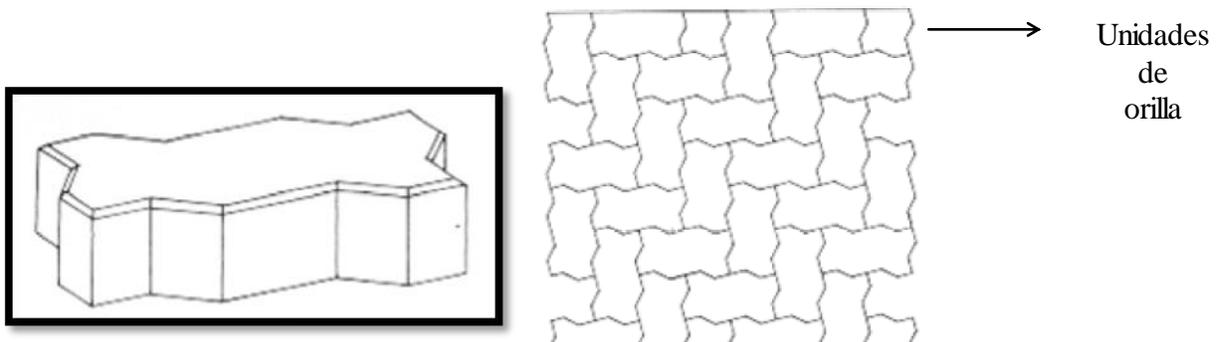


Figura 1.10: Forma de Relleno de Bordes del Pavimento.

Fuente: (Jorge A., 2005).

Los adoquines se ubican siguiendo un patrón de colocación, según figura 1.11; que es la manera como van puestos los adoquines, uno al lado de otros, se debe seguir también un alineamiento, que es la posición del patrón con respecto al eje de la vía. Ambos se deben definir antes de empezar la colocación. Para el tránsito vehicular no se pueden dejar juntas continuas en el sentido de circulación de los vehículos, por lo cual hay que buscar que no queden alineadas con el eje de la vía y los adoquines rectangulares se colocan preferiblemente en patrón de espina de pescado, alineado con el eje de la vía o en el ángulo que se desee, por lo cual no hay que cambiar de alineamiento cuando se llegue a curvas o esquinas (Jorge A., 2005).

No está de más mencionar que cuando se usen adoquines normales o de jardinería, es aconsejable emplear unidades dentadas colocadas según la disposición de espina de pez a 45° o 90° (Jorge A.,

2005), con el objetivo de obtener una superficie estable y teniendo cuidado de asegurar los adoquines de jardinería cuando la pendiente del talud supere los 45°.

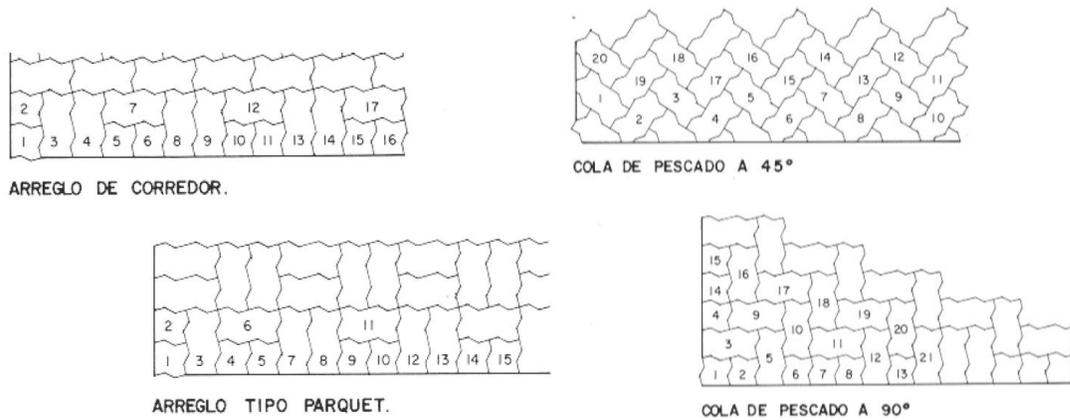


Figura 1.11: Tipos de arreglos
Fuente: (Jorge A., 2005).

Si se tienen adoquines con otras formas (“I”, cruz, trébol, etc.), sólo se pueden colocar en hileras, igualmente deben quedar atravesadas al eje de la vía principal, pero no es necesario girar el patrón de colocación al llegar a curvas o esquinas (Jorge A., 2005).

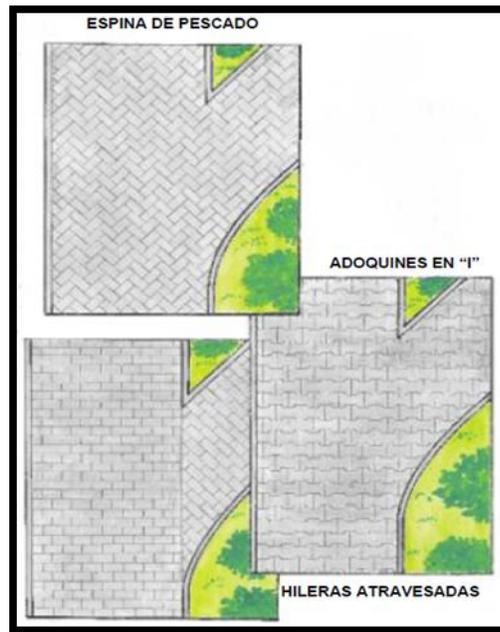


Figura 1.12: Representativa de patrones de colocación
Fuente: (Jorge A., 2005).

Un alineamiento correcto en los adoquines es un indicador de buena calidad en su construcción (Jorge A., 2005). No existe gran diferencia en el rendimiento de colocar adoquines cuidadosamente alineados y otros puestos sin el debido cuidado, pero el resultado final, tanto en calidad como en apariencia, se podrá observar fácilmente.

1.7- Sistemas y estructuras de drenajes.

Las estructuras de drenajes sirven para la recolección, conducción y evacuación del agua, tanto superficialmente como internamente en el pavimento, llamados comúnmente drenaje subterráneo. El drenaje natural corresponde a las pendientes longitudinales como transversales, cunetas, sumideros como se muestra en la figura 1.13 (Jorge A., 2005).



Figura 1.13: Tipo de Drenaje Sumidero
Fuente: (Jorge A., 2005).

El drenaje subterráneo corresponde a las redes de desagüe, filtros, etc. Es necesario colocar drenaje a la superficie, a la subrasante, y a los canales y desagües. Los adoquines de concreto pueden tener un chaflán (corte pronunciado en una arista) entre sus caras superiores y sus caras verticales, después de la compactación, sus caras superiores deben de quedar por encima de los niveles de las superficies de los canales adyacentes de drenaje de los rebordes, o de las coladeras, con el fin de asegurar un drenaje adecuado de las ranuras formadas por los adoquines adyacentes. Es recomendable que los diseñadores de pavimentos de este tipo señalen detalladamente este requisito en sus planos (Jorge A., 2005).

Los niveles y la uniformidad de la superficie de adoquines se pueden considerar como parte de los requisitos de drenaje, porque sin estas, las pendientes o las estructuras de drenaje no funcionan adecuadamente.

La humedad tiene un papel muy importante sobre las propiedades de los materiales que constituyen el pavimento de adoquines de concreto y su respectivo comportamiento. Es necesario tomar en cuenta la influencia del agua en el diseño, ya que esto conlleva a la migración de partículas de suelo, creando problemas de erosión, por lo que puede ocurrir un ablandamiento de la subrasante cuando ésta se satura y permanece saturada durante un prolongado período, etc. (Jorge A., 2005).

En todo buen diseño de pavimentos con adoquines debe de buscarse que la subrasante, sub-base y base estén lo más protegidas de la acción del agua, por lo que se debe de considerar según Jorge A. (2005):

- Usar materiales que sean insensibles a la humedad y que no provoquen daños relacionados con la humedad
- Usar materiales estabilizados para capas granulares (estabilización con cemento o productos bituminosos).
- Seleccionar materiales granulares con bajo contenido de finos y baja plasticidad que puedan resistir los efectos de la humedad.
- Proveer un drenaje adecuado para remover efectivamente todo tipo de humedad que pueda entrar en el pavimento antes de que se produzcan deterioros. Para ello se debe:
 - diseñar un sistema de drenaje que mantenga el nivel freático por debajo del pavimento o que pueda evacuar fácilmente el agua que eventualmente pueda ingresar en las diferentes capas del pavimento.
 - usar bases y sub-bases permeables, diseñadas no sólo desde el punto de vista estructural, sino también como capas desagües. Debido a esto el agua que ingresa al pavimento drena en dirección horizontal para salir del camino, en lugar de continuar hacia abajo, hacia la subrasante.
 - colocar mantos que drenen debajo de secciones de la subrasante.

Cabe mencionar que no siempre se pueden cumplir con los literales anteriores, pero un buen diseño de pavimentos con adoquines de concreto debe reunir la mayor parte de ellos y saberlos integrar bien.

El drenaje son los aspectos u obras que sirven para manejar las aguas que puedan afectar el pavimento, se distinguen dos sistemas de drenaje los cuales son según Jorge A. (2005):

- Sistema de drenaje superficial.
- Sistema de drenaje subterráneo.

Se debe considerar dos fuentes de agua en lo que se refiere a los sistemas de drenaje:

- El agua existente en la zona de saturación a la altura del nivel freático.
- El agua de infiltración que entra a través.

El sistema de drenaje superficial es el que maneja y encauza el agua que está sobre el pavimento, siendo de este tipo las pendientes, cunetas, sumideros, etc. Cuando la pendiente longitudinal de la vía es de, al menos, 2.5%, su pendiente transversal será de, mínimo del 3% y no es necesario construirle cunetas a los lados. Si la pendiente longitudinal de la vía es menor de 2.5%, se construyen cunetas a uno o ambos lados de la vía, según las pendientes transversales y las cunetas se pueden hacer con adoquines colocados sobre, o de concreto. Si la pendiente longitudinal es menor del 1%, la cuneta tendrá que ser de concreto y de mínimo 15cm de espesor (Jorge A., 2005).

Cuando se tienen tránsito peatonal, las cunetas se pueden hacer escalonadas hasta 3cm, con respecto a la superficie del pavimento. En áreas pavimentadas con adoquines, diferentes a vías, como plazas, parqueaderos, patios, etc. La pendiente mínima será del 2%. Y se recomienda que el tipo de mortero a utilizar sea de una relación de 1:4. En zonas diferentes a vías, como plazas, parqueaderos, patios, etc., la pendiente mínima será del 2% y se dejarán perforaciones en los confinamientos cada 40cm. El lado del tubo que está en contacto con la capa de arena se cubre con geo-textil no tejido para que no se pierda la arena. La uniformidad en la superficie adoquinada es un requisito de drenaje, ya que en una superficie desnivelada o con hundimientos, las pendientes y las estructuras de drenaje no funcionan adecuadamente. Para que el agua circule

fácilmente, la superficie debe quedar de tal forma que al colocar un codal o regla de 3m, ningún punto de la superficie de los adoquines tenga una separación de más de 1cm; si así ocurre, se debe corregir el proceso de construcción hasta alcanzar esta calidad (Jorge A., 2005).

El sistema de drenaje subterráneo es el que maneja el agua que está por debajo del pavimento, siendo de este tipo los filtros, alcantarillas, etc. Entre los sistemas conocidos de drenajes subterráneos según Jorge A. (2005):

- Drenes longitudinales: Están ubicados en forma paralela al camino y pueden constar de una cuneta pero con una diferencia de que la profundidad es mayor que drenajes superficiales o están determinadas por un caño colector perforado y un filtro.
- Drenes transversales y horizontales: Son los drenes que corren en forma transversal al camino, formando un ángulo recto generalmente con el eje del camino, este tipo de drenaje es conveniente hacerlo cuando debido a la relación entre pendientes longitudinales y transversales, el agua tiende a ir paralela al eje del camino.
- Sistemas de pozos: Los pozos verticales se usan para controlar el caudal de agua dentro del terreno y aliviar las presiones de poros en taludes cuya estabilidad se encuentra seriamente comprometida. En este caso los pozos deben ser bombeados para rebatir el nivel freático durante la construcción o simplemente permitir el flujo para aliviar presiones artesianas, en ocasiones están combinados con sistemas colectores que permiten su drenaje libre hacia lugares más bajos como lo son túneles, drenes horizontales, etc.

1.8- Comportamiento estructural de los pavimentos de adoquines

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. El mecanismo de trabazón mecánica es el resultado del efecto combinado de cuña y rotación que se produce entre adoquines al ser cargados. La trabazón mecánica en los adoquines determina en buena parte la capacidad resistente del pavimento, su durabilidad y serviciabilidad. Depende principalmente de la forma del adoquín, del aparejo utilizado, de la dirección de las fuerzas aplicadas y del espaciamiento entre las juntas (Edwin, 2016).

En el efecto de cuña el adoquín cargado empuja longitudinalmente los adoquines vecinos. El efecto de rotación, en tanto, hace girar los adoquines vecinos en torno a 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 fricción entre las caras laterales de los adoquines, inducido por la arena en las juntas. Otro aspecto particular de los pavimentos de adoquines es que la trabazón mecánica aumenta con la aplicación de cargas verticales hasta llegar a un nivel de equilibrio (Edwin, 2016).

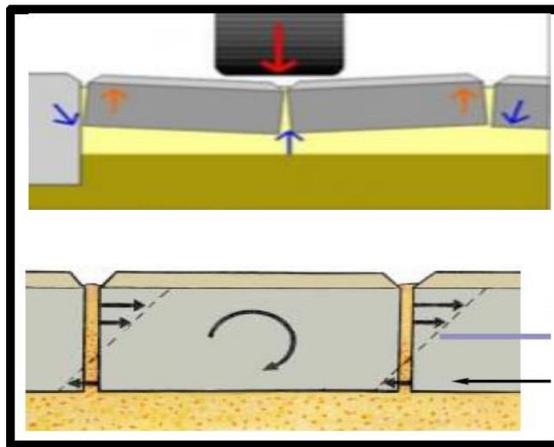


Figura 1.14: Esquema de cargas dinámicas que actúan en un pavimento adoquinado

Fuente: (Edwin, 2016).

1.8.1- Tipos de trabazón mecánica

La trabazón de los adoquines se puede clasificar en según Tomás (2013):

- La trabazón vertical (Figura 1.15 a) es importante, para la transferencia de carga hacia los adoquines adyacentes a través de las juntas. 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.
- La trabazón rotacional (Figura 1.15 b) 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. Particularmente, las restricciones de

borde limitan el “efecto de arco”, que corresponde al levantamiento de dos adoquines contiguos por rotación de los adyacentes.

- La trabazón horizontal (Figura 1.15 c), 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.

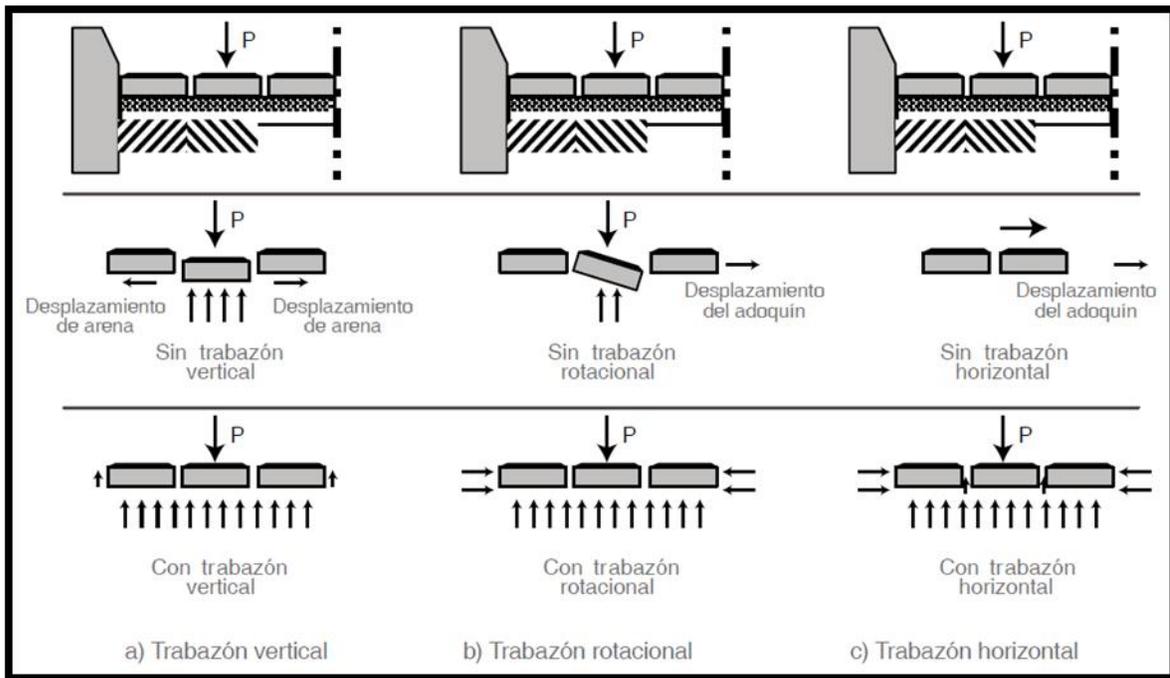


Figura 1.15: Trabazón vertical, horizontal y rotacional de un pavimento de adoquín
Fuente: (Tomás, 2013).

1.8.2- El comportamiento a la fatiga

La principal variable que describe el comportamiento a la fatiga de los pavimentos de adoquines es la deformación permanente. La mayoría de los estudios del efecto de las variables de diseño (véase Tabla 1.2), 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 por ejemplo al modelo de la figura 1.16 (Tomás, 2013).

Tabla 1.2: Factores que determinan el desempeño de los pavimentos de adoquines de hormigón

Componente del pavimento	Factores de desempeño
Adoquines de hormigón	Espesor Forma Resistencia Aparejo Ancho de la junta Condiciones de borde
Cama de arena	Espesor Granulometría Angularidad Dureza Grado de humedad Composición petrográfica
Base y sub-base	Espesor Granulometría Plasticidad Resistencia y durabilidad Compactación
Subrasante	Tipo de suelo Rigidez y resistencia Grado de humedad

Fuente: (Tomás, 2013).

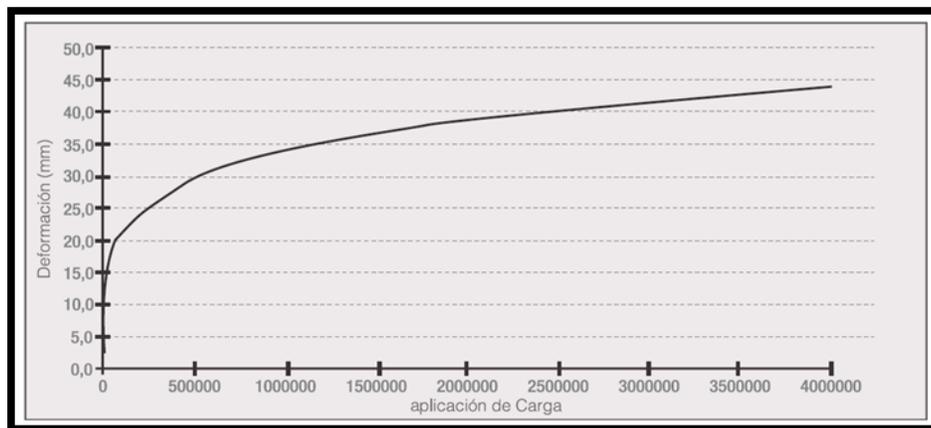


Figura 1.16: Progresión de las deformaciones permanentes en pavimentos de adoquines

Fuente: (Tomás, 2013).

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 tráfico. En esta segunda fase, los efectos combinados de carga y clima determinan el proceso de progresión de las deformaciones. Las deformaciones permanentes dependen de la aplicación de cargas repetitivas, del peso bruto total por eje, de la tensión transmitida a la base y de la tensión en la dirección principal, la cual es a su vez función de las propiedades mecánicas de los componentes del pavimento de adoquín. Indirectamente la condición climática está presente a través del efecto de la humedad sobre los parámetros mecánicos de la base, subbase y/o suelo de fundación (Tomás, 2013).

1.8.3- Variables que describen el comportamiento de los pavimentos de adoquines.

Para cumplir el objetivo para el cual se fabricaron los adoquines es necesario conocer el comportamiento de los diversos factores que determinan el desempeño del pavimento según Tomás (2013):

- Espesor del adoquín: las deflexiones y las deformaciones permanentes en el pavimento son considerablemente menores con adoquines de 80 mm que con adoquines de 60 mm, a igualdad de condiciones. Con adoquines de 100 mm el beneficio adicional no es tan acentuado para solicitudes de tránsito bajas, pero sí lo es para solicitudes elevadas como en puertos, aeropuertos y sitios industriales. A mayor espesor, mayor disipación de las tensiones que alcanzan la parte superior de la base y menor ahuellamiento.
- Forma del adoquín: la forma del adoquín influye en la distribución de tensiones por trabazón mecánica.
- Resistencia mecánica del adoquín: la resistencia a la compresión del adoquín no es determinante en el desempeño estructural del pavimento. Sin embargo, sí es determinante para controlar otros parámetros de desempeño, como son la resistencia a hielo/deshielo y al ataque de sulfatos.
- Aparejo: el aparejo constituye la forma en que se distribuyen los adoquines en el sentido predominante del tránsito. Las deformaciones verticales para distintos aparejos son menores en tramas espina de pescado a 45° y las mayores con la trama de corredor. Los

desplazamientos horizontales, que son propios de pavimentos en pendiente, el aparejo espina de pescado a 45° es el más eficiente para limitar las deformaciones horizontales.

- Ancho de la junta: el ancho de las juntas y el material de sello tienen un importante rol en la transferencia de esfuerzos entre los adoquines. El rango de variación del ancho de juntas, dentro del cual la respuesta estructural del pavimento es óptima, está comprendido entre los 2 y los 7 mm. Cuando el ancho de junta es inferior a 2 mm, las juntas no quedan totalmente llenas de arena incluso después de la compactación. Cuando el ancho de junta es superior a 7 mm se pierde el efecto de trabazón mecánica, favoreciendo desplazamientos verticales, horizontales y rotaciones. A medida que el ancho de junta aumenta, las deflexiones aumentan también, independientemente del aparejo, del tipo y espesor del adoquín.
- Condición de borde: las condiciones de borde se clasifican en dos tipos. Una, el confinamiento lateral, que permite controlar las deformaciones en los bordes del pavimento producto de expansión térmica o por cargas de tráfico de borde y los anclajes intermedios que están destinados esencialmente a controlar los desplazamientos horizontales en grandes extensiones de pavimentos de adoquines (por ejemplo patios de carga y estacionamientos) o bien en calles o áreas con pendientes longitudinales pronunciadas.
- 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 a sus propiedades físicas. Esto garantizará su durabilidad en el largo plazo, especialmente ante la aplicación de cargas pesadas repetidas como es el caso de buses y camiones.
- Espesor de la cama de arena: El espesor de la cama de arena está relacionado con su habilidad para controlar las deformaciones verticales. Esta habilidad queda determinada además, por la eficiencia de la compactación y por la uniformidad del espesor. Si se usan espesores inferiores a 50 mm no afecta significativamente las deformaciones. A medida

que el espesor de la cama de arena disminuye, disminuye también la deformación del pavimento. Es por este motivo que se recomienda el uso de espesores entre 20 y 40 mm.

- Granulometría: la granulometría de la cama de arena determina su resistencia al corte. El uso de arenas gruesas aumenta la resistencia a los movimientos verticales, lo cual favorece su uso en pavimentos de alto tráfico. En general, la práctica de diseño recomienda “usar arenas” con un porcentaje de finos de hasta un 5%. Las arenas con porcentajes de finos superiores al 15% incrementan las deformaciones, por lo cual dicho valor representa el máximo porcentaje de finos recomendable.
- Angulosidad: la angulosidad tiene relación con el origen de las arenas. Esta propiedad determina la resistencia al corte. Las arenas provenientes del chancado ofrecen resistencias al corte significativamente mayores que las arenas de río. Esta diferencia se hace más notoria cuando la banda granulométrica de las arenas es más bien cerrada. En contraste, las arenas usadas en las juntas requieren una menor angulosidad, un tamaño máximo menor y una capacidad de dilatación mayor, a fin de lograr un mejor comportamiento friccional.
- Dureza de las partículas: la propiedad física más relevante para lograr resistencia en la cama de arena es la dureza de las partículas, por lo cual es recomendable evitar arenas con partículas que se fracturan fácilmente.
- Humedad: la humedad de la cama de arena afecta directamente la resistencia al corte. La práctica común es limitar la humedad de las arenas hasta un 8%, evitando que este alcance la saturación. En un rango de humedad entre 4% y 8% se logra la mayor eficiencia en la compactación, siendo deseable un valor de 6%. Para lograr una compactación adecuada es necesario que la humedad sea cercana a la saturación. Sin embargo, cuando las arenas poseen un contenido de finos superior al 15%, es posible que la compactación produzca deformaciones prematuras.
- Composición petrográfica: la composición petrográfica de las arenas está relacionada con la dureza de los componentes minerales. Las arenas con contenidos de cuarzo son las más adecuadas así como aquellas con sílice. El instituto de adoquines de hormigón de Estados Unidos, (*Interlocking Concrete Pavement Institute, ICPI*) desarrolló una serie de ensayos

a arenas con distinta proporción de sílice, concluyendo que los mejores comportamientos se dan en aquellas que poseen un mayor porcentaje de sílice.

- Base y subbase: Los primeros métodos de diseño utilizan espesores mínimos de base del orden de los 100 a 150 mm, con el fin de controlar las deformaciones permanentes. Estos espesores mínimos asumen valores medios de capacidad de soporte medida con el ensayo CBR (*California Bearing Ratio*) de 40% para la subbase y 60 % para la base, asumiendo un CBR del terreno de entre 2% y 8%. Esto garantiza además un buen comportamiento resiliente de la base y sub base.
- Terreno: Para un cierto nivel de tráfico, la resistencia del terreno 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 de diseño utilizan para caracterizarla el valor CBR, aun teniendo en cuenta las limitaciones de este indicador.

1.9- Metodologías de diseño.

Durante la revisión bibliográfica se analizaron diferentes normativas de proyectos y diseños de diferentes países, la metodología de los chilenos, de los argentinos y de los colombianos.

En Chile los modelos que proponen corresponden a modelos extranjeros que han sido calibrados en condiciones similares a las que se pueden encontrar en su país, uno de ellos son las normas del Reino Unido, que separa en diferentes secciones el diseño de pavimentos de uso vehicular, peatonal, portuario y aeroportuario (Jorge A., 2005). En cada caso, se entregan consideraciones generales para el diseño, especificaciones de materiales y los métodos a utilizar para dimensionar estructuralmente las capas constitutivas del pavimento de adoquín. Como tales, los modelos entregan dimensiones mínimas de las capas de pavimento, que dependiendo del caso, el proyectista podrá aumentar.

En Argentina el Instituto del Cemento Portland Argentino hacen referencia al procedimiento empírico- mecanicista basado en respuestas de pavimentos matemáticamente calculadas, el método de la *Portland Cement Association* calibrado con ensayos de campo y rutas en servicio, y el método AASHTO 1993 el cual desarrolla relaciones entre cargas de tránsito pesado aplicadas, estructura del pavimento y pérdida de serviciabilidad.

El manual del INVÍAS (Instituto Nacional de Vías) señala que en Colombia los métodos de diseño para los pavimentos de concreto más utilizados son los propuestos por la AASHTO en 1993 y la PCA en 1984, los cuales tienen características distintas y su aplicación puede conducir a que los espesores calculados para condiciones similares, sean diferentes.

La elección de uno u otro método de diseño llevan a grandes diferencias en espesores, pero el impacto final sobre el pavimento se verá reflejado esencialmente en el desempeño. En este sentido, si bien el método británico proporciona mayores espesores, posee un desempeño sustancialmente superior que resto de métodos en términos de tensiones, deformaciones y deflexiones en la sub-rasante. El método británico posee ventajas respecto de los otros métodos analizados para solicitaciones de tránsito elevadas. Por el contrario, para solicitaciones de tránsito bajas puede sobreestimar espesores, pero asegurando en todo caso un buen desempeño.

1.10- Adoquines en Cuba.

Se conoce que a principios del siglo XIX la pavimentación de las calles de La Habana era caótica; en muchas de ellas se habían eliminado las piedras llamadas “chinas pelonas”, y se sustituyeron por lajas de piedra con relleno de tierra, pero esto no funcionó en épocas de lluvias, porque eran arrastradas y llegaron a afectar considerablemente el calado de la bahía por aquellos tiempos. Los propietarios de las viviendas que por los mismos inconvenientes se vieron afectados, comenzaron a levantar frente a sus casas escalones de madera o piedra y en las esquinas, surgieron los guardacantones, como protección ante los estragos dejados por los carruajes, que en no pocas ocasiones se voltearon ante la irregularidad del terreno (Joha ,2018).

La calle de adoquines de madera que se extiende por frente al antiguo Palacio de los Capitanes Generales (hoy Museo de la Ciudad) en la Plaza de Armas del centro histórico de La Habana, llama la atención del visitante que llega al corazón de la ciudad antigua. Todos preguntan: ¿por qué es la única calle de madera?; y cuenta la leyenda que mucho tiempo atrás, al Capitán General le molestaba el continuo ruido de los carruajes y el lodazal que en tiempos de lluvia se formaba frente a su honorable mansión. Lo cierto es, que formó parte de un experimento llevado a cabo para la pavimentación de las principales arterias, allá por el siglo XIX, y que siendo muy costoso y poco duradero, no se implementó, quedando solo está como testimonio de la historia, trabajo que estuvo a cargo del ingeniero Evaristo Carrillo. En las primeras décadas del pasado siglo XX

las calles que ya estaban adoquinadas, fueron asfaltadas, y en la década del '80, cuando comenzó la obra restauradora de la Oficina del Historiador, esta calle de adoquines de madera fue redescubierta bajo varias capas de pavimento, por ello se decidió mostrarla, como ejemplo singular y único en su tipo. Ha perdurado gracias a los trabajos de mantenimiento y sustitución de los adoquines, que obreros con manos laboriosas llevan a cabo cada cierto tiempo (Joha ,2018).

En Matanzas los adoquines resucitan para adornar, una vez más, algunas de las calles. Luego de varias décadas bajo el asfalto algunos espacios, como la calle del Medio o la Plaza de la Vigía, lucen nuevamente este centenario pavimento que exhibe su carácter funcional de antaño en perfecta sincronía con su significación patrimonial y la restauración de la ciudad. El granito de los adoquines de Matanzas es de origen norteamericano, importado de las canteras de Westerly, Otis y Westford, en el estado de Massachusetts y Connecticut desde mediados y finales del siglo XIX. Es por esto que siempre se les ha conocido como granito de Boston. Estas canteras comenzaron sus actividades a partir de 1792 y algunas de ellas aún se mantienen activas. El granito procedente de estas regiones, que adorna estas calles, es de tipo granodiorítico; una forma de granito con minerales más finos y uniformes, donde predomina el mineral opaco de biotita. Los minerales que las componen crecieron y se solidificaron hace cientos de millones de años, en la época Precámbrica, en un antigua recámara volcánica. Matanzas no siempre tuvo adoquines o empedradas sus calles. Inclusive, muchos de los viajeros que la visitaron desde mediados del siglo XVIII y el XIX notaron las malas condiciones de sus calles, precisamente porque estas no cumplían con las más deseadas condiciones para el tránsito de peatones y carruajes. No sería hasta mediados del siglo XIX que se comenzaría a empedrar primero, y luego hacia finales del XIX, a adoquinar las calles de Matanzas (Joha ,2018).

Según Joha (2018) antes de la llegada de los adoquines el sistema de empedrado se realizaba mediante la colocación minuciosa de rocas caracterizadas por su dureza y peculiar forma. Estas se colocaban sobre un substrato arenoso, usualmente adheridas al mismo mediante el empleo de un mortero permeable y flexible. Esto permitía el escurrimiento del agua y el lodo, prolongando la calidad de las vías y haciéndolas más cómodas para el tránsito. Un ejemplo interesante del empedrado colocado entre 1854 y 1855 en la primitiva Plaza de la Vigía (ver figura 1.17) fue descubierto en las labores arqueológicas del Teatro Sauto. Este había sido inteligentemente preservado y utilizado por el arquitecto Daniel Dall'Aglio para mantener el substrato del Teatro

Sauto. Los mismos barcos que visitaban el puerto, en ocasiones también cedían o vendían su balastro para el empedrado de la ciudad.



Figura 1.17: Plaza Estrada Palma
Fuente: (Joha ,2018).

Con el crecimiento económico y social que experimentó la ciudad durante la segunda mitad del siglo XIX, se hizo evidente la necesidad de recubrir sus calles con adoquines, seleccionándose los que se extraían de las canteras de Massachusetts, Nuevo Hampshire y Connecticut. Esto se facilitó dada la estrecha relación que había entre estas ciudades norteamericanas y la del país. Desde 1879, y durante la década de 1880, se adoquinó la plaza de la Vigía, calles del puerto y de la ciudad. Los primeros adoquines eran de forma cuboides, como los que se ven en la Plaza de la Vigía. A estos les siguió después otros cortados al estilo de bloque rectangular, conocidos como estilo belga, como los que se pueden apreciar en la calle del Medio y en el cuartel de Bomberos. Según la prensa del momento, el costo de importación de estos adoquines norteamericanos era de 25 centavos por cada 1000 kg. Luego, con el arribo del tranvía y el asfaltado de las calles, en especial los proyectos de los años 20 y 30 del siglo XX, quedaron sepultados los viejos adoquines y guijarros de las antiguas calles. Estos mismos adoquines hoy resucitan junto una ciudad inmersa en una novedosa restauración, y son testigos del suave despertar de “La ciudad dormida” (Joha ,2018).

CONCLUSIONES PARCIALES

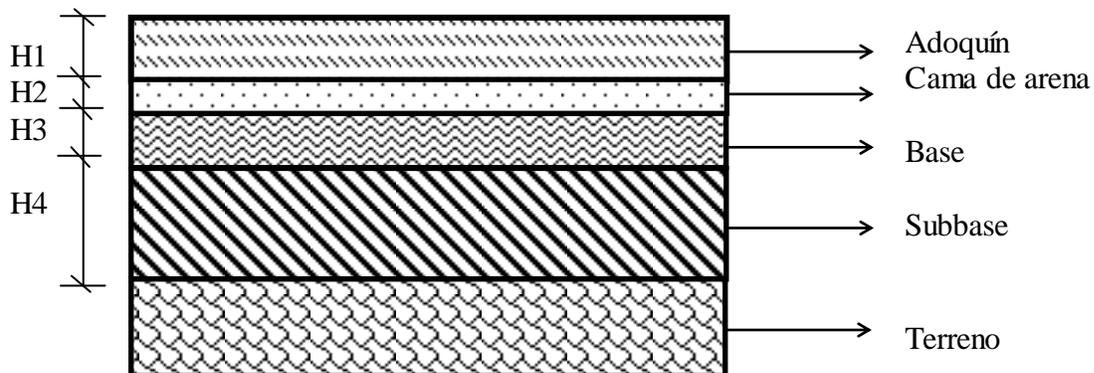
- Existen diferentes tipos de adoquines que son reconocidos a nivel mundial, cada uno con características específicas en cuanto a su función y a las solicitaciones a que se encuentran sometidos.
- Las normativas internacionales han evolucionado sus parámetros de diseño para pavimentos de adoquines de acuerdo a las variaciones de las solicitaciones a las que se encuentran expuestos los mismos en la actualidad.

CAPÍTULO 2. GUÍA PARA EL DISEÑO DE PAVIMENTOS DE ADOQUINES.

En este capítulo se desarrollan los métodos para el diseño estructural de pavimentos de adoquines. El capítulo separa en diferentes secciones el diseño de pavimentos de uso vehicular, peatonal, portuario y de almacenes. En cada caso, se entregan consideraciones generales para el diseño, especificaciones de materiales y los métodos a utilizar para dimensionar estructuralmente las capas constitutivas del pavimento de adoquín, para ello se van a utilizar las normativas inglesas, americanas y chilenas.

2.1- Elementos estructurales

Después de analizar toda la bibliografía consultada se identificó como el esquema representativo de los elementos estructurales de un pavimento de adoquines, la Figura 2.1:



*Figura 2.1: Esquema de los elementos estructurales
Fuente: (elaboración propia).*

Cada uno de los elementos estructurales observados con anterioridad presenta características y funciones, para ello véase Tabla 2.1

Tabla 2.1: Breve descripción de los elementos estructurales

Elementos	Descripción
Capa de rodadura	Esencialmente es la capa superior del pavimento que soporta el tráfico. En los pavimentos con adoquines, la capa de rodadura está formada por tres elementos esenciales los cuales son: los adoquines, la capa de arena, y el sello de arena.
Cama de arena	El objetivo fundamental de esta capa es de servir de base de apoyo a los adoquines, permitiendo una adecuada compactación y nivelación de los mismos; el espesor de la capa de arena influye en la funcionalidad del pavimento con lo que respecta a las deformaciones permanentes provocadas por el tráfico.
Base	Constituye el principal elemento portante de la estructura del pavimento, por lo que debe de absorber en mayor proporción, las cargas verticales transmitidas por el tráfico. Puede ser simple o estar compuesta por dos o más capas de materiales adecuados.
Subbase	Proporciona un cimiento uniforme para la base y una adecuada plataforma de trabajo para su puesta en obra y compactación.
Terreno	Terreno sobre el cual se construirá el pavimento y que sirve como fundación. Puede ser de terreno natural o mejorado.

Fuente: (elaboración propia).

Los adoquines que se fabrican en Cuba parten de la NC 998:2014. “Adoquines de hormigón (adocretos)”, los cuales poseen dimensiones (ver Figura 2.2), donde el espesor (h) puede ser variable desde 50 mm hasta 150 mm (ver Tabla 2.2).

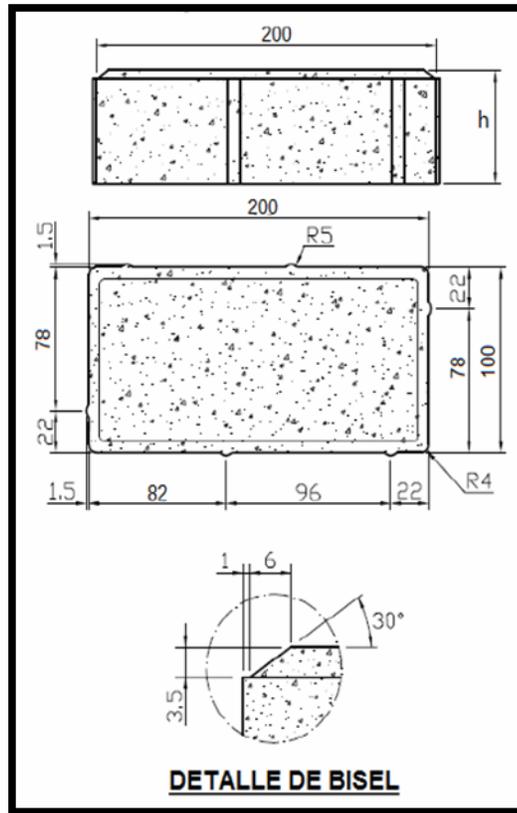


Figura 2.2 Dimensiones de fabricación
Fuente: (NC 998.2014).

Según la NC 998:2014. “Adoquines de hormigón (adocretos)” el espesor de los adoquines según las categorías del tráfico dado en v.p.d (vehículos pesados por día) son las especificadas en la Tabla 2.2, la cual tiene modificaciones a conveniencia.

Tabla 2.2: Espesor mínimo según categoría del tráfico

Categoría de tráfico		Descripción	Espesor(mm)
Tráfico peatonal	C4	Áreas peatonales, calles residenciales, vehículo ligero y v.p.d ≤ 4	50 y 60
Tráfico ligero	C3	Calles comerciales de escasa actividad sin servicio rígidos de ómnibus y v.p.d entre 5 y 14	>60 y ≤ 80
Tráfico medio	C2	Calles principales con tráfico entre 15 y 24 v.p.d	>80 y ≤ 100
Tráfico pesado	C1	Calles principales con tráfico entre 25 y 49 v.p.d	
	Co	Calzadas principales con tráfico entre 50 y 149 v.p.d	

Patio de almacenes	AL-1	Arterias principales con tráfico entre 150 y 499 v.p.d	>100 y ≤ 150
Patio de contenedores	AL-2	Áreas industriales con tráfico pesado entre 500 y 1000 v.p.d	

Fuente: (elaboración propia).

En la cama de arena, la arena debe tener un tamaño máximo de 1,0 mm y un contenido de finos hasta del 10 %. Mayores contenidos de finos favorecen las deformaciones, por lo cual es de especial cuidado el limitarlo. La banda granulométrica recomendada por la normativa chilena es la indicada en Tabla 2.3.

Tabla 2.3: Banda granulométrica para material de cama de arena

Tamiz		% que pasa en peso
ASTM	NCH	
3/8"	10	100
#4	5	95 - 100
#8	2,5	80 - 100
#16	1,25	50 - 95
#30	0,63	25 - 60
#50	0,315	10 - 30
#100	0,16	5 - 15
#200	0,08	0 - 10

Fuente: (Tomás, 2013).

Según la RC 3542:2014. “Construcción y reparación de pavimentos empleando adoquines de hormigón (adocretos)”:

- Sellado del pavimento: la arena debe estar seca al momento de su uso y no debe contener finos plásticos, polvos ni materias orgánicas
- Cama del pavimento: se prohíbe la utilización de polvo de piedra como árido para la cama del pavimento.

Los adoquines en general deben cumplir especificaciones de fabricación y de desempeño según la normativa chilena, ver tabla 2.4 que muestra un resumen de especificaciones que pueden utilizarse.

Tabla 2.4 Resumen de especificaciones provisionarias para adoquines de hormigón

Tipo	Especificación	Criterio
Fabricación (1)	Dimensión	Largo: var \pm 2mm Ancho: var \pm 2mm Espesor: 60, 80, 100 \pm 3 mm Largo / Ancho > 4 Largo / Espesor > 4
	Resistencia a la flexotracción	Mínimo individual: 3 MPa Mínimo promedio: 4 MPa
	Resistencia a la compresión	Mínimo individual: 50 MPa Mínimo promedio: 55 MPa
	Resistencia a la hielo / deshielo	< 1% en 50 ciclos
	Resistencia a la abrasión	Pérdida volumen: 15 cm ³ / 50cm ² Pérdida espesor: <3mm
	Absorción	Mínimo Individual: < 7% Mínimo Promedio: < 5%
Desempeño	Resistencia al deslizamiento (5)	> 65 BPN (calle de rodaje) > 55 BPN (vehicular) > 40 BPN (peatonal)

Fuente: (Tomás, 2013).

Para la fabricación y uso de los adoquines en Cuba necesitan requisitos a cumplir especificados en la Tabla 2.5, los datos que se muestran parten de la NC 998:2014. “Adoquines de hormigón (adocretos)”.

Tabla 2.5 Algunos requisitos para la fabricación de los adoquines

Categorías del tráfico	Resistencia a la compresión	Resistencia al desgaste por abrasión	Absorción
C4	≥ 20	27	
C3	≥ 40	23	
C2	-	20	Máx. 8% del peso

C1-C0	≥ 50	20	
AL-1	-	20	
AL-2	-	20	

Fuente: (elaboración propia).

2.2- Método de diseño para tráfico peatonal y vehicular

El diseño estructural de pavimentos de adoquines en las normativas se establecen una diferenciación entre las cargas y el tráfico por lo que se divide en diferentes secciones: el diseño de pavimentos de uso vehicular, peatonal, de almacenes y contenedores, ver Figura 2.3.

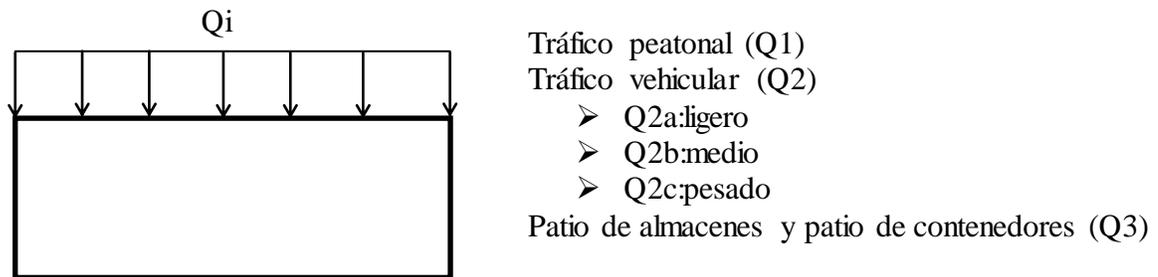


Figura 2.3: Esquema de carga

Fuente: (elaboración propia).

Las solicitaciones de diseño se calculan en base para vías urbanas o interurbanas, se pueden expresar en Ejes Equivalentes Acumulados (EEA) en la vida de diseño, Ejes Equivalentes por día (EE/día) y en vehículos por día (Veh/día). Estas solicitaciones posteriormente se clasifican según categorías de tráfico (Tomás, 2013).

El uso de categorías de tráfico permite reducir la incertidumbre natural existente en el cálculo de solicitaciones de tráfico, otorgando un rango de categorías de tráfico en las cuales los rangos de solicitaciones son amplios.

La Tabla 2.6 según la normativa chilena muestra la clasificación de tráfico en 4 categorías. Habitualmente, cuando se proyectan vías peatonales, no se estiman solicitaciones, sino que se asigna directamente la categoría de tráfico más baja, asumiendo que el nivel de carga sobre el pavimento no es significativo. En los otros casos, además de conocer los EEA en la vida de diseño, es necesario también estimar los valores de EE/día, para precisar los valores de EEA de la Tabla 2.6.

Tabla 2.6: Clasificación de tráfico según nivel de solicitudes

Tipo de tráfico		Nivel de solicitud			Descripción	
Nivel	Categoría	EE/día	EEAx10 ⁶	Veh/día (1)		
Pesado	I	IA	>1000	>0,5	Estimar	Calles, caminos y accesos a desarrollos industriales, comerciales y otro con alta presencia de vehículos pesados.
		IB	<1000	>0,5	Estimar	
		IC	<200	>0,5	Estimar	
Medio	II	IIA	<60	>0,5	>5	Calles, caminos, pasajes, retornos, estaciones de servicio y espacios peatonales con presencia de vehículos pesados.
		IIB	<60	<0,5	<5	
Liviano	III	IIIA	<5	--	<1	Áreas peatonales en que circulan eventualmente vehículos pesados como psajes o calles de condominios. Estacionamientos de desarrollos comerciales, industriales, deportivos u otros que reciben vehículos pesados.
Peatonal		IIIB	0	--	0	
	IV		0	--	0	Áreas peatonales, estacionamientos interiores a domicilios, parques y jardines, veredas, paseos peatonales.

Fuente: (Tomás, 2013).

Según la NC 334:2004 “Pavimentos Flexibles. Métodos de Cálculo.” de acuerdo al valor de tráfico de diseño, se definen 3 tipos de tráfico de diseño: ligero, medio y pesado, que se muestran en la Tabla 2.7.

Tabla 2.7: Tráfico de diseño

SIMBOLO	TIPO	Número de ejes acumulados (ΣN)	CATEGORÍA	Número de ejes acumulados (ΣN)
T1	Pesado	$\geq 1,0 \times 10^6$	Muy pesado	$\geq 2,0 \times 10^6$
			Pesado	$1,0 \times 10^6 - 2,0 \times 10^6$
T2	Medio	$1,3 \times 10^5 - 1,0 \times 10^6$	Medio pesado	$5,1 \times 10^5 - 1,0 \times 10^6$
			Medio	$2,6 \times 10^5 - 5,1 \times 10^5$
			Medio ligero	$1,3 \times 10^5 - 2,6 \times 10^5$
T3	Ligero	$\leq 1,3 \times 10^5$	Ligero	$6,4 \times 10^4 - 1,3 \times 10^5$
			Muy ligero	$\leq 6,4 \times 10^4$

Fuente: (NC 334:2004).

Teniendo en cuenta la Tabla 2.6 y Tabla 2.7, la clasificación de tráfico según nivel de solicitudes que propone la autora (ver Tabla 2.8) se basa fundamentalmente en la normativa chilena, incorporando modificaciones según las categorías del tráfico de la Tabla 2.6.

Tabla 2.8: Clasificación de tráfico según nivel de solicitudes

Tipo de tráfico		Nivel de solicitudes		Descripción
Nivel	Categoría	EE/día	EEA*10 ⁶	
Tráfico peatonal	C4	0	-	Áreas peatonales, parques, paseos peatonales.
Tráfico ligero	C3	<5		Estacionamientos de desarrollos comerciales, industriales, deportivos.
Tráfico medio	C2	<60	<0.5	Calles, caminos, pasajes, estacionamientos de servicios y espacios peatonales.
Tráfico pesado	C1- Co	<200		Calles, caminos con alta presencia de vehículos pesados.
Patio de almacenes	AL-1	<1000	>0.5	Accesos a desarrollos, calles y caminos industriales con alta presencia de vehículos pesados.
Patio de contenedores	AL-2	>1000		

Fuente: (elaboración propia)

En general los materiales de bases y subbases no tratadas cumplirán con los requisitos de calidad que se muestran en la Tabla 2.9.

Tabla 2.9: Requisitos de calidad para los materiales de bases y subbases no tratados

Parámetro	MATERIAL DE BASE		MATERIAL DE SUB BASE	
	$\Sigma N < 5 \times 10^5$ ejes de 100KN	$\Sigma N > 5 \times 10^5$ ejes de 100 KN	Drenaje Desfavorable	Drenaje favorable
CBR (mínimo)	60-80%	80-100%	20-30%	20-30%
Limite líquido (máx.)	25%	25%	25%	35%
Índice de Plástico. (máx.)	6%	6%	6%	10%
Equivalente Arena (min)	30%	50%	-	-

Fuente: (NC 334:2004).

Cuando los materiales de bases o subbases no tratados tengan un IP superior a 6% deben compactarse como mínimo a una densidad del 95% del valor máximo obtenido en el ensayo Proctor modificado, en caso contrario ($IP < 6\%$), se alcanzarán densidades iguales o superiores al 100% del ensayo modificado.

Según Tomás (2013) las especificaciones para el material de la base granular tratada con cemento quedarán definidas según: resistencia característica, ver Tabla 2.10. En cualquier caso, las especificaciones mínimas a utilizar en el diseño son: capacidad de soporte ($CBR \geq 40\%$).

Tabla 2.10: Factores de espesor equivalente y resistencias características de bases tratadas con cemento

Resistencia característica (MPa)		Factor de espesor equivalente (1)
ASTM	NCH	
3	4,5	1,6
5	7,0	1,2
8	10	1,0
12	15	0,8
20	25	0,7

Fuente: (Tomás, 2013).

En términos generales, los pasos a seguir son los siguientes:

1. El dimensionamiento se realiza aplicando la Tabla 2.11 para el diseño con adoquines.

Tabla 2.11: Espesores de Base y Subbase para diseño con adoquines

Tipo de tráfico		Espesor de subbase granular, en mm, según CBR, en %					Espesor de base tratada (mm)	Espesor de cama de arena (mm)	Clase de adoquín mínima
Nivel	Categoría	2	3	4	5	≥6			
Tráfico peatonal	C4	200	150	130	100	100	100	40	60
Tráfico ligero	C3	350	300	100	150	150	100	40	60
Tráfico medio	C2	400	350	250	150	150	150	40	80

Fuente: (Tomás, 2013).

2. Basado en Tomás (2013) se puede optar por uno u otro material para la superficie de rodadura, dependiendo de las condiciones de construcción, ingeniería y paisaje del contexto del emplazamiento, el proyectista; ver Tabla 2.12.

Tabla 2.12: Determinación de espesor de base, cama de arena y adoquín

Nivel de tráfico	Espesores de capa en mm según nivel de tráfico acumulado (EEA)			
	0,5 - 1,5 x 10 ⁶	1,5 - 4 x 10 ⁶	4 - 8 x 10 ⁶	8,12 x 10 ⁶
Base granular (1)	390	390-480	540	690-750
Base tratada con cemento (2)	130	130-160	180	230-250
Base tratada con asfalto (3)	130	130-160	150-170	170-190
Cama de arena	30	30	30	30
Adoquín	60	60	80	80

Fuente: (Tomás, 2013).

2.3- Método de diseño para tráfico pesado

Los espesores de diseño para cada capa quedan establecidos en el siguiente procedimiento según Tomás (2013), basado en las Tablas 2.12, 2.13, 2.14. En estas Tablas, el diseño considera un aparejo espina de pescado.

1. Determinación de espesores de subbase cuando se emplea suelo mejorado. En este paso se determina el nivel de solicitaciones en EE/día. A partir del valor obtenido y del CBR de la subrasante, de la Tabla 2.13 se obtiene el espesor de la subbase en mm y del mejoramiento de suelo si es que es necesario.

Tabla 2.13: Determinación de espesores de subbase y suelo mejorado

Nivel de tráfico	Espesor en mm de subbase / mejoramiento según CBR en %					
	<2%	2%	3%	4%	5-10%	10-15%
<60 EE/día	150/210	150/180	150/180	150/0	150/0	150/0
<200 EE/día	150/370	150/250	150/170	150/160	150/150	150/150
<500 EE/día	150/470	150/340	150/250	150/220	150/200	150/150
<1000 EE/día	150/600	150/450	150/350	150/300	150/250	150/180
>1000 EE/día	200/600	200/450	150/450	150/350	150/300	150/250

Fuente: (Tomás, 2013).

2. Determinación de espesores de subbase cuando no se emplea suelo mejorado. Cuando no se desea realizar un mejoramiento de suelo, sino que usar sólo una subbase granular, se utiliza la Tabla 2.14.

Tabla 2.14 Determinación de espesor subbase granular

Nivel de tráfico	Espesor en mm de subbase granular según CBR en %				
	2%	3%	4%	5-10%	10-15%
< 60 EE/día	250	190	160	150	150
< 200 EE/día	310	240	210	180	150
< 500 EE/día	350	270	230	200	150
≤ 1000 EE/día	400	310	270	225	150
> 1000 EE/día	450	350	310	270	225

Fuente: (Tomás, 2013).

3. Determinación del espesor de base, cama de arena y adoquín de hormigón. Una vez determinado el espesor de la subbase y eventualmente del mejoramiento de suelo, se procede a estimar los espesores de la base, de la cama de arena y del adoquín de hormigón. En este caso, el dimensionamiento depende de los EEA en la vida de diseño, los cuales son la principal variable de diseño, como lo muestra la Tabla 2.12. En dicha Tabla los espesores de capa están diferenciados según el material empleado.

2.4- Método de diseño de patios de almacenes y contenedores

El método aquí propuesto, considera diseños específicos para 4 tipos de zonas portuarias: zonas de acopio de contenedores, zonas de carga y embarque, calles interiores para vehículos pesados y estacionamientos de vehículos pesados. Otras áreas tales como estacionamientos o calles de

acceso a oficinas pueden diseñarse siguiendo el método de diseño de pavimentos vehiculares, por lo cual no se incluyen en esta sección (Tomás, 2013).

El método es válido para un rango de pasadas equivalentes desde 0,25 millones de ejes estándar hasta 25 millones, para los cuales se alcanzan tensiones de trabajo entre 0,5 y 1,3 N/mm² para tales rangos de carga. Asimismo, las deflexiones de trabajo para estos rangos de tensiones varían entre 0,1 y 0,5 mm para los niveles de carga y tensiones antes mencionadas. De este modo, el procedimiento de diseño establece un dimensionamiento acotado a los rangos de solicitaciones y estados tensionales antes descritos, para asegurar una funcionalidad adecuada. Las especificaciones de materiales para el diseño son:

- Adoquines de hormigón: los adoquines en general deben cumplir especificaciones de fabricación y de desempeño. En la Tabla 2.10 se muestra un resumen de las especificaciones que pueden utilizarse.
- Cama de arena: se refiere a la sección de diseño de pavimentos vehiculares y peatonales. En cualquier caso, el espesor compactado debe ser de 30 a 40 mm.
- Base granular: la base granular debe cumplir con requisitos similares a los establecidos para pavimentos de alto tráfico.
- Base granular tratada con cemento: en los pavimentos portuarios se requiere una base granular tratada con cemento, que hace las veces de subbase.
- Mejoramiento de subrasante: en los casos en que la subrasante exhibe CBR inferiores al 4%, es posible incorporar dentro del diseño un mejoramiento que eleve el CBR de diseño hasta valores superiores al 10%.

Las zonas de acopio de contenedores están solicitadas por los contenedores mismos, organizados en filas, bloques y montados unos sobre otros; y por los equipos que permiten acomodarlos de acuerdo a algún patrón determinado.

Estos equipos (cargadores frontales) según Tomás (2013) aplican cargas estáticas sobre el pavimento al momento de elevar los contenedores y a la vez cargas dinámicas por maniobras tales

como frenados, giros y aceleraciones; por lo tanto, el diseño está condicionado por la carga que aparece como carga crítica, deducida a partir de la combinación de cargas estáticas y dinámicas.

En términos generales, los pasos a seguir son los siguientes:

1. De acuerdo a la configuración elegida para ordenar los contenedores (véase Tabla 2.16), definir la carga estática mediante la Tabla 2.17.

Tabla 2.16: Equipos de manipulación, distribución y alturas máxima de contenedores

Equipo de manipulación	Forma de distribución	Número máximo de contenedores apilados
Cargador frontal (<i>Front Lift Truck</i>)	Fila simple o doble	4
Cargador lateral (<i>Side Lift Truck</i>)	Fila simple o doble	4
Carretilla pórtico (<i>Side Lift Truck</i>)	Fila simple	3
Grúa móvil (<i>Mobile Crane</i>)	Bloque pequeño	4
<i>Transtainer</i> de luz < 30 m	Bloque pequeño	4
<i>Transtainer</i> de luz < 30 m	Bloque grande	5

Fuente: (Tomás, 2013).

Tabla 2.17 Cargas ejercidas por contenedores apilados sobre el pavimento

N° de contenedores apilados	% de reducción de peso bruto	Presión de contacto (N/mm ²)	Carga sobre el pavimento según forma de apilamiento, en kN		
			Fila simple	Fila dobles	Bloques
1	0	2,6	76,2	152,4	304,8
2	10	4,7	137,2	274,3	548,6
3	20	6,2	182,9	365,8	731,5
4	30	7,3	213,4	426,7	853,4
5	40	7,8	228,6	457,2	914,4

Fuente: (Tomás, 2013).

2. Con la carga obtenida en el paso 1, expresada en carga estática (CE, en kN), estimar el espesor de diseño de la base a partir de la Ecuación 2.1, en la cual “E” corresponde al espesor de diseño de la base, en mm.

$$CE = \frac{832,84}{\left(7,5 - 1,14 \left(\frac{e}{100}\right)\right)^{0,584}} \quad \text{Ecuación 2.1}$$

3. En caso que se desee utilizar una base granular diferente, el espesor equivalente se calcula multiplicando el espesor “e” obtenido en la Ecuación 2.1, por el factor de espesor equivalente obtenido por la Ecuación 2.2 para el caso de bases de otras calidades, para bases granulares se utiliza un factor de espesor equivalente igual a 3. La Ecuación 2.2 se obtuvo introduciendo los datos correspondientes de la Tabla 2.10 en el software “Labfit”, dando así los espesores equivalentes según la resistencia característica, para no recurrir a la interpolación.

$$Y = \frac{1}{0.1622 + 0.4193 \cdot \ln X} \quad \text{Ecuación 2.2}$$

Y: Espesor equivalente

X: Resistencia característica (MPa)

4. Una vez realizado este diseño, se procede a diseñar el espesor requerido para la operación de los cargadores frontales. Los datos de entrada para el diseño del espesor de la base son la carga dinámica y el número de pasadas en el horizonte de evaluación. La carga dinámica se expresa en términos de la carga de rueda simple equivalente (*Single Equivalent Wheel Load*, SEWL). Cada maquinaria posee un factor de equivalencia de carga respecto de la maquinaria de referencia, que se obtiene a través de la Tabla 2.18.

Tabla 2.18: Pasadas equivalentes de diversas maquinarias respecto a un cargador frontal Hyster 620

Maquinaria	Pasada equivalente
Cargador frontal (Front Lift) HYSTER 620	1,00
Carretilla pórtico (Straddel Carrier) SHOREMASTER	0,03
Carretilla pórtico (Straddel Carrier) CLARK 512	0,43
Pórtico de almacenamiento (Straddel Carrier) BELOTTI B67b	0,71
Grúa de 80 toneladas	0,05
Grúa de 140 toneladas	0,21

Fuente: (Tomás, 2013).

Si la maquinaria específica no se encuentra en dicha Tabla, se puede calcular el factor de equivalencia a partir del daño relativo usando la Ecuación 2.3. Con esto se logra que la diversidad de maquinarias se exprese en términos relativos a una carga equivalente, que es la que se usa en el paso siguiente.

$$D = \left(\frac{W}{12.000} \right)^{3,75} \left(\frac{P}{0,8} \right)^{1,25} \quad \text{Ecuación 2.3}$$

La Ecuación 2.3 representa el daño relativo (D, adimensional) producido por una carga de peso W (en kg) y una presión de inflado P (en MPa), respecto de una carga de referencia de 12.000 kg y una presión de inflado de 0,8 MPa. Para calcular la equivalencia de una maquinaria, es necesario calcular el daño relativo de cada eje y luego sumar cada uno de ellos.

5. Cuando los pares de ruedas se encuentran muy próximos entre sí, es necesario considerar el efecto de superposición de estados tensionales, para lo cual se aplica el concepto de factor de proximidad.

Para estimar este factor, primero es necesario estimar la profundidad efectiva (h_{eff} en mm) de la base mediante la Ecuación 2.4, la cual requiere el valor del CBR de la subrasante en %. Posteriormente el factor de proximidad se obtiene directamente de la Tabla 2.19. Este factor de proximidad, magnifica la carga del eje crítico.

$$h_{eff} = 300 \sqrt[3]{\frac{35000}{10CBR}}$$

Ecuación 2.4

Tabla 2.19: Factor de proximidad para calcular efecto de superposición de tensiones debido a cargas de rueda

Espaciamiento entre ruedas (mm)	Factor de proximidad para profundidad efectiva de:		
	1.000 mm	2.000 mm	3.000 mm
300	1,82	1,95	1,98
600	1,47	1,82	1,91
900	1,19	1,65	1,82
1.200	1,02	1,47	1,71
1.800	1,00	1,19	1,47
2.400	1,00	1,02	1,27
3.600	1,00	1,00	1,02
4.800	1,00	1,00	1,00

Fuente: (Tomás, 2013).

6. El siguiente paso es determinar el efecto de la carga dinámica, para lo cual se deben identificar las maniobras típicas que ejecuta la maquinaria, de acuerdo a la Tabla 2.20, con lo cual se obtienen los factores de carga dinámica, que magnifican la carga de rueda.

Tabla 2.20: Factor de carga dinámica según maquinaria y tipo de maniobra

Maniobra	Maquinaria	Fd
Frenado	Cargador frontal (Reach Stacker/Front Lift)	±0,30
	Carretilla de pórtico (Straddel Carrier)	±0,50
	Cargador lateral (Side Lift Truck)	±0,30
	Camiones articulados (Tractor and Trailer)	±0,10
	Pórticos de almacenamiento (Transtainers)	±0,10
Viraje	Cargador frontal (Reach Stacker/Front Lift)	±0,40
	Carretilla de pórtico (Straddel Carrier)	±0,60
	Cargador lateral (Side Lift Truck)	±0,30
	Camiones articulados (Tractor and Trailer)	±0,30
	Pórticos de almacenamiento (Transtainers)	0
Aceleración	Cargador frontal (Reach Stacker/Front Lift)	±0,10
	Carretilla de pórtico (Straddel Carrier)	±0,10
	Cargador lateral (Side Lift Truck)	±0,10
	Camiones articulados (Tractor and Trailer)	±0,10
	Pórticos de almacenamiento (Transtainers)	±0,05
Irregularidades de la superficie	Cargador frontal (Reach Stacker/Front Lift)	±0,20
	Carretilla de pórtico (Straddel Carrier)	±0,20
	Cargador lateral (Side Lift Truck)	±0,20
	Camiones articulados (Tractor and Trailer)	±0,20
	Pórticos de almacenamiento (Transtainers)	±0,10

Fuente: (Tomás, 2013).

7. Conocida la carga de rueda equivalente (SEWL) y el número de pasadas (en miles), se estima el espesor de la base mediante las Ecuaciones 2.5.

$$SEWL = \begin{cases} 122,99e^{0,0029 \text{ espesor}} ; < 250 \text{ SEWL} \\ 100,40e^{0,0029 \text{ espesor}} ; < 1.500 \text{ SEWL} \\ 80,078e^{0,0030 \text{ espesor}} ; < 4.000 \text{ SEWL} \\ 51,439e^{0,0033 \text{ espesor}} ; < 8.000 \text{ SEWL} \\ 24,122e^{0,0040 \text{ espesor}} ; < 12.000 \text{ SEWL} \\ 9,574e^{0,0051 \text{ espesor}} ; < 25.000 \text{ SEWL} \end{cases}$$

Ecuación 2.5

8. El espesor mayor obtenido entre el diseño del área de contenedores y el de cargas de maquinaria, será el espesor de diseño.

CONCLUSIONES PARCIALES

- En Cuba no existe normativa que refleje el diseño estructural de los pavimentos de adoquines por tanto la guía se basa en normativas internacionales.
- Se obtiene una guía que permite el diseño de todo tipo de pavimentos de adoquines para todo tipo de tráfico y solicitaciones.

CAPÍTULO 3. VALIDACIÓN PRÁCTICA DE LOS RESULTADOS.

Si este tipo de pavimento constituye una estrategia del país, deberá implementarse poco a poco e ir ganando en experiencia, equipamiento y especialización de la construcción, pudiendo ir sustituyendo paulatinamente el asfalto y el hormigón hidráulico. Por esta razón la alta dirección del país solicitó al EMPAI realizar la rotonda de la entrada de Varadero de adoquines.

3.1- Características de la obra a realizar

Varadero es un importante destino turístico, se encuentra situado al norte de la provincia de Matanzas perteneciente al municipio Cárdenas. Los paisajes actuales de la península de Hicacos se caracterizan por una rica diversidad. Considerada uno de los principales polos turísticos del país, cautiva por sus blancas y finas arenas, y sus aguas de un delicado azul, cálidos y transparentes todo el año.

Este cuenta con uno de los mayores IDH (índice de desarrollo humano) y niveles de vida de Cuba. Los hoteles de construcción más reciente después del 2000, en lo fundamental se construyeron siguiendo códigos ambientalistas y con el menor daño posible al medio. Varadero cuenta con una de las infraestructuras hoteleras mayores de la región del Caribe. Anualmente recibe alrededor de 1 millón de visitantes. Sigue siendo el primer centro turístico de sol y playa de Cuba y aporta 30-40% de los ingresos en este sector. Debido a la importancia que se le otorga a la Península de Hicacos y la problemática que presenta el nudo de la entrada al mismo, según el Plan de Ordenamiento Territorial y Urbano de Varadero, la solución a los problemas de congestionamiento que se evidencian durante las horas pico en el nudo, es el tránsito hacia la rotonda como solución que resolverá la comodidad de nivel de servicio necesaria para el polo turístico, dando respuesta a la necesidad de accesibilidad y movilidad hacia el mismo. El nudo experimenta en los horarios picos del día, dígame la mañana y la tarde, la generación de colas de vehículos en sus accesos, llegando estos a mantenerse en la fila durante varios ciclos del semáforo para su fase correspondiente. Esto denota que ya en el presente, el nudo está comenzando a presentar síntomas de congestión y eventos de demoras (Orlando, 2016).

Esta intersección está compuesta 3 flujos vehiculares Matanzas, Cárdenas y Varadero:

-Matanzas { Cárdenas
Varadero

-Cárdenas { Varadero
Matanzas

-Varadero { Matanzas
Cárdenas

El proyecto se le encomendó al EMPAI (Empresa de Proyectos de Arquitectura e Ingeniería) donde en un inicio la rotonda fue diseñada de pavimento de hormigón hidráulico el cual fue sustituido por pavimento intertrabado de adoquines y las vías de acceso y directas se mantienen de pavimento flexible. (Ver figura 3.1 y 3.2)

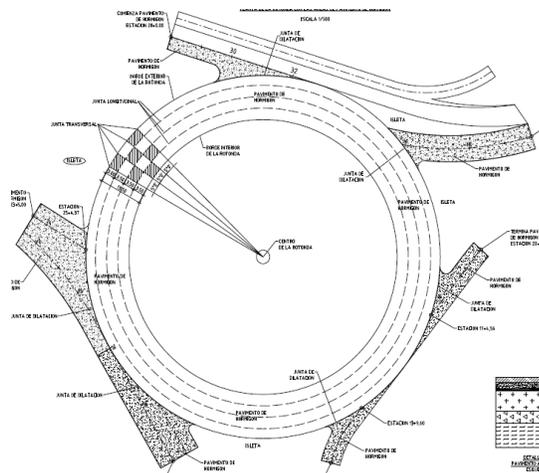


Figura 3.1: Rotonda de la entrada a Varadero de pavimento de hormigón hidráulico
Fuente: (Grisel, 2019).

Velocidad de diseño	50 km/h
Velocidad de operación	40 - 43 km/h
Longitud mínima de entrecruzamiento	55.00 m.
Ancho de calzada en rotonda	4.00 m.
Cantidad de sendas	3
Retranqueo	0.75 m.
Radio interior de rotonda	42.00 m.
Radio exterior de rotonda	55.50 m.
Radio mínimo utilizado	15.00 m.
Radio máximo utilizado	134.31 m.
Ancho de calzada en acceso entrada	6.00, 8.00m, 9.00 m.
Cantidad de sendas	1 - 2
Ancho de calzada en acceso salida	6.75, 8.00m.
Cantidad de sendas	1 - 2
Bombeo	2%
Peralte en rotonda	2%
Superelevación en accesos	3% – 6%
Rampas y/o pendientes	3% máximo
Contenes	Tipo integral (0.675 m.)
Parterre	1.50 m.
Aceras	2.00 m.

Fuente: (Grisel, 2019).

3.2- Parámetros y consideraciones iniciales.

Según el estudio del tráfico realizado por la EMPAI se clasificó el tráfico como pesado. Los adoquines como la mayoría de los pavimentos, según Grisel (2019) requieren la existencia de elementos de confinamiento lateral, con la finalidad de evitar el desplazamiento de las piezas, cuando estén sometidos a cargas y con ello impedir que se abran las juntas, la pérdida de trabazón y la dispersión de la arena. En este caso se utilizarán contenes simples (elevados) y contenes deprimidos, ambos requieren un cimiento de hormigón.

Los adoquines se colocarán en forma de “espina de pescado” a 45° en el sentido del tráfico pues es el ensamblaje que mejor dispersa las fuerzas de frenado, aceleración y giro de los vehículos, con una resistencia media a la compresión mayor de 50 MPa, una resistencia al desgaste por abrasión de 20 mm y una absorción 8% como máximo, según lo especificado en la NC 998:2014. “Adoquines de hormigón (adocretos)”. Los adoquines presentan caras paralelas, su cara expuesta debe tener acabado liso, sin fisuras ni oquedades. En el resto de las caras solo se admitirán fisuras con diámetro y profundidad no mayor de 2 mm. (Grisel, 2019)

Se recomienda según GRISEL (2019) que se empleen preferentemente áridos de machaqueo en las juntas y cama de arena según las especificaciones de RC 3542:2014. “Construcción y reparación de pavimentos empleando adoquines de hormigón (adocretos)”, los áridos gruesos no debe superar los 6 mm para evitar daños en los adoquines que se coloquen sobre ellos, ya que se pueden producir roturas ante acumulaciones puntuales de tensiones. La granulometría será continua tal que la totalidad pase por el tamiz 3/8” y no más del 5% pase por el tamiz No. 200. El material no contendrá más de un 3% de arcillas y limos exento de materiales extraños y sales perjudiciales, que es la arena que se utiliza actualmente en la junta entre adoquines en estos tipos de pavimentos que construyeron en el Mariel, la arena sílice traída de Pinar del Río. Antes de echar la arena deben estar contruidos los bordillos (Grisel, 2019).

Haciendo uso de la bibliografía consultada, con los datos de tráfico dados para el proyecto original, se obtiene como resultado el diseño de pavimento antes expuesto, que tendrá una base estabilizada de suelo cemento, resultante, sobre todo, de la composición del tráfico (pesado). Los áridos a emplear en la mezcla procederán de cantera. No debe contener partículas mayores de 7.5 cm, o de 1/3 de espesor de capa tratada, menos del 50% de él pasa por el tamiz No. 200, LL menor de 40 e IP menor de 18. Este material será no plástico, estará exento de materia orgánica y la proporción de arcilla será inferior al 2%. La dosificación de cemento no superará el 4,50% en peso respecto al total de áridos. La resistencia a compresión de probetas a siete días, fabricadas en obra con el molde y compactación del Próctor modificado no será inferior a 35 kg/cm². La puesta en obra se realizará con especial cuidado en la humedad adecuada de la subrasante y evitando segregaciones de la mezcla en el transporte. No deben pasar más de 2 horas entre la mezcla y la compactación. Una vez terminada la compactación, se mantendrá húmeda la capa grava cemento y con posterioridad es recomendable aplicar un riego con ligante bituminoso sobre el que se espolvoreará arena de 0 – 5 mm (Grisel, 2019).

Se empleará como material de subbase mejoramiento calizo, CBR>25% compactado a más del 95% del próctor modificado LL=25%, LP=6%.

Los pavimentos de adoquín terminan comportándose como impermeables ya que el polvo y la suciedad acaban colmatando las juntas impidiendo la infiltración del agua a las mismas. La pendiente transversal tendrá que ser igual o superior al 2% (Grisel, 2019).

Consideraciones generales del pavimento de adoquines (Grisel, 2019):

- De la buena ejecución de la base y la subbase, así como de un acertado examen del suelo natural sobre el que se va a actuar, dependerá en buena medida la duración del adoquinado.
- Una vez nivelada y pre-compactada la capa de arena, se procederá a colocar sobre ella los adoquines.
- Se debe realizar un perfecto replanteo del pavimento, evitando el corte innecesario de piezas.
- La junta ideal entre adoquines estará comprendida entre 3 y 5 mm.
- No se colocarán en ningún caso piezas a tope, la colocación del adoquín se realizará evitando pisar la capa de arena y no se colocarán adoquines sobre camadas de arena encharcada o excesivamente húmeda.
- Se colocarán los adoquines simplemente dejándolos caer sobre la cama de arena, alineándolos de forma aproximada, una vez se haya avanzado un tramo de dos a tres metros, se corrigen las desviaciones del tramo completo colocando un tablón contra los cantos del borde libre y golpeando con una maceta hasta llevar las piezas a la alineación requerida.
- Una vez colocada una superficie suficiente de adoquines, se procederá al relleno de juntas, utilizando arena de granulometría comprendida entre 0 y 2 mm.
- Antes de proceder al compactado estarán totalmente rematados los encuentros de los adoquines con los elementos de sujeción y no se compactarán a menos de un metro de distancia de bordes sin contención del pavimento.
- Para compactar paños reducidos pueden usarse bandejas vibrantes provistas de suelas de neopreno u otro material que amortigüe los impactos sobre esquinas salientes, que podrían romper los bordes de los adoquines. Para superficies mayores se aumenta el rendimiento

empleando compactadores de rodillos vibrantes; en estos casos se extendería sobre el pavimento una lámina de fieltro o cualquier otro material que disminuya los impactos directos.

- Se requieren dos o tres pasadas para conseguir la compactación adecuada; tras cada una de ellas se comprobará el estado de las juntas, añadiéndose arena a medida que ésta se va introduciendo en las juntas.

3.3- Determinación de la estructura del pavimento

Las especificaciones y parámetros definidos anteriormente se tendrán en cuenta para diseñar la estructura del pavimento de adoquines de la rotonda de Varadero según la guía propuesta.

Definido el tráfico como pesado con $4EEA \cdot 10^6$ obtenemos de la tabla 2.12 los espesores de adoquín, cama de arena y base tratada con cemento; los valores son los siguientes:

Tabla 2.12: Determinación de espesor de base, cama de arena y adoquín

Nivel de tráfico	Espesores de capa en mm según nivel de tráfico acumulado (EEA)			
	$0,5 - 1,5 \times 10^6$	$1,5 - 4 \times 10^6$	$4 - 8 \times 10^6$	$8,12 \times 10^6$
Base granular (1)	390	390-480	540	690-750
Base tratada con cemento (2)	130	130-160	180	230-250
Base tratada con asfalto (3)	130	130-160	150-170	170-190
Cama de arena	30	30	30	30
Adoquín	60	60	80	80

Fuente: (Tomás, 2013).

-adoquín: 80mm o 0.08m

-cama de arena: 30mm o 0.03m

-base: 180mm o 0.18m

Teniendo CBR=25% (Subbase de mejoramiento calizo) y la tabla 2.13 obtenemos que la subbase es de 150mm o 0.15m.

Tabla 2.13: Determinación de espesores de subbase y suelo mejorado

Nivel de tráfico	Espesor en mm de subbase / mejoramiento según CBR en %					
	<2%	2%	3%	4%	5-10%	10-15%
<60 EE/día	150/210	150/180	150/180	150/0	150/0	150/0
<200 EE/día	150/370	150/250	150/170	150/160	150/150	150/150
<500 EE/día	150/470	150/340	150/250	150/220	150/200	150/150
<1000 EE/día	150/600	150/450	150/350	150/300	150/250	150/180
>1000 EE/día	200/600	200/450	150/450	150/350	150/300	150/250

Fuente: (Tomás, 2013).

La estructura del pavimento de adoquines queda diseñada según figura 3.3.



Figura 3.3: Estructura del pavimento de adoquines

Fuente: (elaboración propia).

De la aplicación de la guía propuesta se resumieron los pasos para tráfico pesado en el siguiente flujograma (ver figura 3.4):

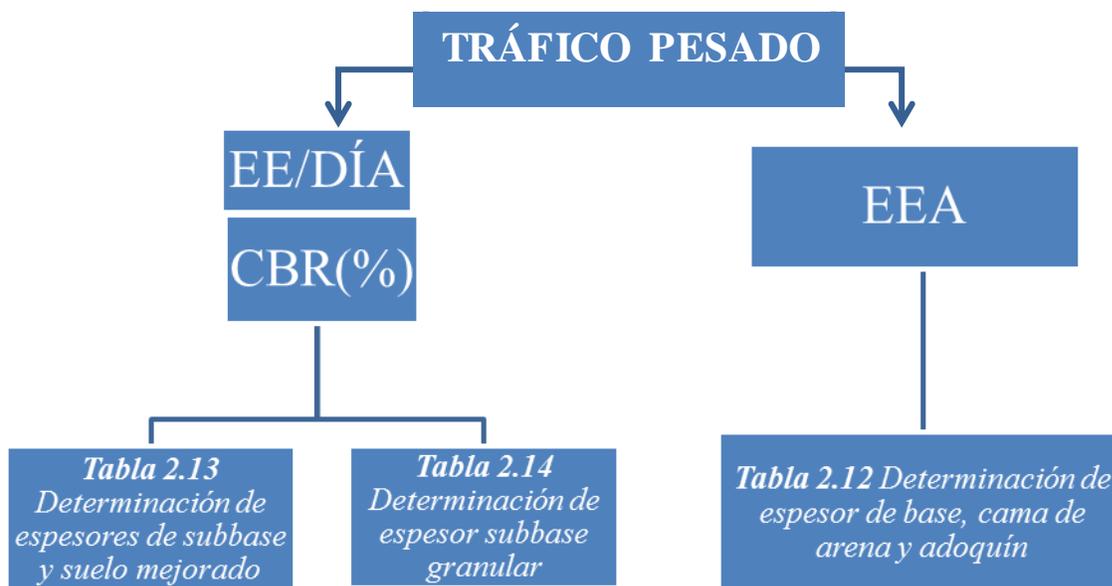


Figura 3.4: *Flujograma para el diseño de pavimentos de adoquines con tráfico pesado*
Fuente: (elaboración propia).

En el resto de los viales se utilizará pavimento flexible de hormigón asfáltico caliente y pavimento rígido de hormigón hidráulico, los diseños ya calculados por el EMPAI serán los siguientes (Grisel, 2019):

➤ Pavimento asfáltico:

-30 mm o 0.03 m de hormigón asfáltico caliente denso.

-50 mm o 0.05 m de hormigón asfáltico caliente semidenso.

-150 mm o 0.15 m base de material de mejoramiento calizo, CBR>80% compactado a más del 95% del próctor modificado LL=25%, LP=6%

- 150 mm o 0.15 m subbase de mejoramiento calizo, CBR>25% compactado a más del 95% del próctor modificado LL=25%, LP=6%.

-espesor variable de material de levante (puede ser material producto de las excavaciones ya sea calcarenitas o arena, nunca turba) $CBR > 15\%$, $LL < 30\%$

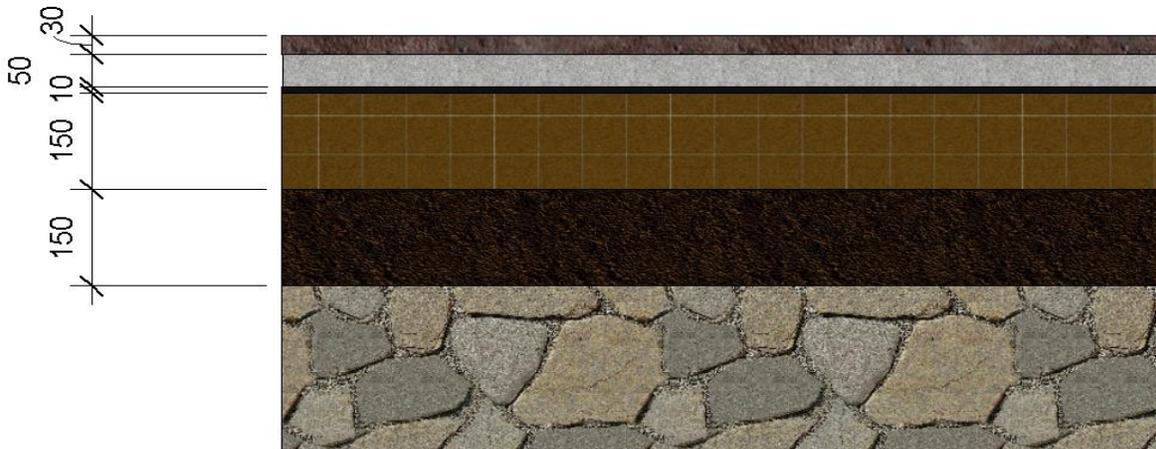


Figura 3.5: Pavimento asfáltico
Fuente: (elaboración propia).

➤ Pavimento de hormigón:

-hormigón fundido in situ $R'_{bk}=30\text{Mpa}$. Losas fundidas en paños alternos y con juntas machimbradas: 200 mm o 0.20m

-base de material de mejoramiento calizo, $CBR > 80\%$ compactado a más del 95% del próctor modificado $LL=25\%$, $LP=6\%$: 250 mm o 0.25m

-espesor variable de material de mejoramiento calizo, $CBR > 25\%$ compactado a más del 95% del próctor modificado $LL=25\%$, $LP=6\%$.

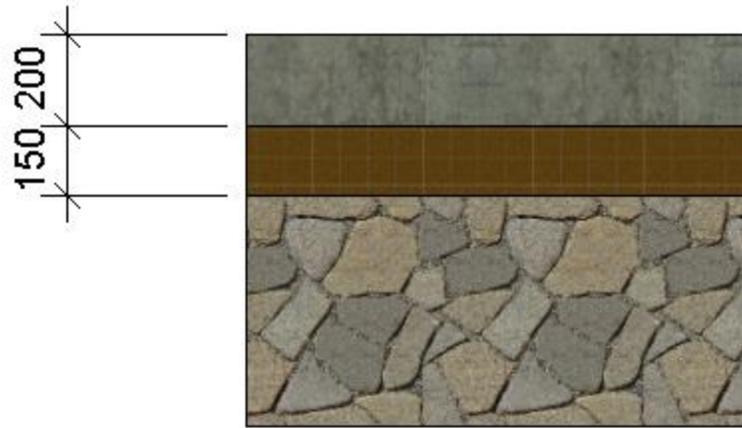


Figura 3.6: *Pavimento de hormigón*
Fuente: *(elaboración propia).*

CONCLUSIONES PARCIALES

- El empleo de adoquines en la pavimentación constituye una alternativa condicionada fundamentalmente por la reducción de costos que esta tecnología posibilita.
- Se aplicó la guía propuesta, a partir del cual se obtuvo el diseño del pavimento de adoquines de la rotonda de Varadero.

CONCLUSIONES

1. Dada la importancia de obtener tipos de pavimentos que sean competitivos en el mundo, se hace necesario explorar propuestas diferentes, haciendo énfasis en los procesos que sean técnica y económicamente factibles para llevar a cabo su realización.
2. La guía propuesta para diseñar pavimentos de adoquines en Cuba, permitió contar con dimensiones adecuadas para usos tan diversos como calles, caminos menores, espacios industriales, áreas peatonales y estacionamientos. La guía corresponde a modelos extranjeros que han sido calibrados en condiciones similares a las que se pueden encontrar en el país.
3. La guía propuesta por el autor permitió la obtención del diseño del pavimento de la rotonda de Varadero de adoquines.

RECOMENDACIONES

1. Se recomienda al Departamento de Construcciones de la Universidad de Matanzas implementar en la preparación de los estudiantes de la carrera el estudio de pavimentos de adoquines.
2. A la Empresa de Proyectos de Arquitectura e Ingeniería de Matanzas continuar con los estudios pertinentes para el diseño y construcción de este tipo de pavimentos para aumentar su implementación en el país.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ACOSTA, GRISEL (2019) Memoria Descriptiva “Rotonda de entrada a Varadero”. Archivo del EMPAI. Código del Servicio: 068-18-6-01-1.Matanzas, Cuba.
2. ARAYA, ADOLFO J. MARÍA (2017) Por razones técnicas, ecológicas, estructurales y economía, Argentina.
3. BAHAMONDES, RODRIGO (2013) Análisis de métodos de diseño de pavimentos de adoquines de hormigón, Chile.
4. ECHAVEGUREN NAVARRO, TOMÁS (2013) Manual de Diseño de Pavimentos de Adoquines de Hormigón. Instituto del Cemento y del Hormigón de Chile, Chile.
5. HAMMONS, M. I. (1999). Effects of Transverse Shear on Edge Stresses in Concrete, Pavements. Journal of Transportation Engineering,. In M. I. HAMMONS.
6. LÓPEZ, F. M. (2014). Enfoque mecanicista para determinar el número de repeticiones que conducen al fallo por fatiga en pavimentos de hormigón simple. Santa Clara, Cuba.
7. MENDOZA SÁNCHEZ, J. F., QUESADA BERMÚDEZ, F. M., & TREJO TREJO, J. A. (17 de enero de 2016). Publicaciones@imt.mx. Obtenido de <http://www.imt.mx>
8. Ministerio dos Transportes. (2005) Manual de Projeto de Interseções. (2ª Edição). Río de Janeiro: Instituto de Resquisas Rodoviaras.
9. Oficina Nacional de Normalización. (2014). NC 998. Adoquines de hormigón (adocretos). Especificaciones Primera ed. La Habana, Cuba.
10. Oficina Nacional de Normalización. (2004). NC-334. Pavimentos Flexibles. Métodos de Cálculo. La Habana, Cuba.
11. OLIVA ESCOBAR, JORGE A. (2005) Propuesta para la automatización de los cálculos de diseños estructurales y especificaciones de pavimentos con adoquines de concreto. Tesis de pregrado en Ingeniería Civil. Universidad de El Salvador, El Salvador.

12. ORIHUELA, JOHA (2018) Resurrección de los adoquines en Matanzas, Cuba.
13. PALACIOS-ELÍAS, EDWIN (2016) Determinación de la tasa de infiltración de los pavimentos de adoquines en el casco urbano de la ciudad de Piura. Tesis de pregrado en Ingeniería Civil. Universidad de Piura, Perú.
14. PEÑA, R. A. (2014). Análisis de la estructura de pavimento de la Vía Rápida Varadero-Cárdenas. Trabajo de Diploma en Ingeniería Civil. Universidad de Matanzas, Cuba.
15. PCA. (1984). *Thickness Design for Concrete Highway and Street Pavements Thickness Concrete Pavement Design* (Vol. ISO10P): *Portland Cement Association*.
16. PUERTOS DEL ESTADO (2007). Recomendaciones para el Proyecto y Construcción de Pavimentos Portuarios. ROM 4.1-94. Departamento Técnico de Tecnología y Normativa. España.
17. RC 3542:2014 construcción y reparación de pavimentos empleando adoquines de hormigón (adocretos).
18. SANTOS PÉREZ, ORLANDO (2016). Solución conceptual de intersección a desnivel semidireccional en el nudo de entrada a varadero. Trabajo de diploma en Ingeniería Civil. Universidad de Matanzas, Cuba.