

SISTEMATIZACIÓN DE PAVIMENTOS ARTICULADOS

HECTOR PORFIRIO ORTIZ BURGOS

UNIVERSIDAD DE NARIÑO
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERIA CIVIL
SAN JUAN DE PASTO
2005

SISTEMATIZACIÓN DE PAVIMENTOS ARTICULADOS

HECTOR PORFIRIO ORTIZ BURGOS

Trabajo presentado como requisito parcial para optar
el título de Ingeniero Civil.

Asesor
JAIRO ILDEBRANDO REVELO JIMÉNEZ.
Ingeniero Civil

UNIVERSIDAD DE NARIÑO
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERIA CIVIL
SAN JUAN DE PASTO
2005

“Las ideas y conclusiones aportadas en la presente tesis de grado son
responsabilidad exclusiva de sus autores

Artículo primero del acuerdo número 036 de Marzo 9 de 1966, emanado del
Honorable Consejo Directivo de la Universidad de Nariño

Nota de aceptación:

Presidente del jurado

Jurado

Jurado

San Juan de Pasto, Mayo de 2005

AGRADECIMIENTOS

El autor expresa su agradecimiento a:

JAIRO REVELO JIMÉNEZ, Ingeniero Civil Director del Trabajo de Grado, quien por sus amplios conocimientos y experiencia en la rama de la Ingeniería supo asesorar y guiar el desarrollo de los temas planteados, solucionando los interrogantes, clarificando las dudas y determinando las pautas a tratar en el contenido del proyecto.

A Dios por darme fuerza y salud para seguir adelante.

*A mi Padre, hermanos, familiares y amigos
Que siempre me brindaron su apoyo
incondicional para lograr superar todos los
peldaños en busca del logro final en mi
profesión.*

Héctor Porfirio

GLOSARIO

ADOQUIN: pieza prefabricada en concreto de forma regular, que se coloca como capa de rodadura.

AGREGADOS: materiales pétreos (arena y grava), necesarios para la elaboración de concreto para adoquín, capa de arena y sello.

BASE: capa de la estructura de pavimento que absorbe gran cantidad de esfuerzos producidos por el tráfico, disminuyendo así la carga sobre las capas inferiores del pavimento.

C.B.R: valor que representa la capacidad de soporte de las subrasantes (California Bearing Ratio).

CAPA DE RODADURA: superficie plana de apariencia uniforme que permite el desplazamiento ágil del tráfico.

COMPACTACION: procedimiento que permite realizar un ajuste de los elementos correspondientes mediante el uso de equipo mecánico.

CONFINAMIENTO: característica que evita que los adoquines se desplacen por empuje horizontal producido por el tráfico.

PAVIMENTO: superficie artificial de característica dura y llana.

SELLO DE ARENA: material que se coloca para llenar los espacios entre adoquines.

SUBRASANTE: superficie que se obtiene al realizar el descapote y cajeo del material para implementar la estructura del pavimento.

TRABAZON: es un mecanismo que se basa en la colocación de los adoquines y que permite la transmisión de esfuerzos entre los adoquines.

TRAFICO: cantidad de vehículos que transitan por una vía

RESUMEN

Dadas las condiciones sociales y económicas existentes en los países en vías de desarrollo, la pavimentación con adoquines de concreto adquiere un significado especial al involucrar mano de obra tanto en la fabricación como en la construcción y es en algunos casos la única alternativa de pavimentación posible para las comunidades, todo lo anterior sin olvidar la necesidad de un adecuado soporte técnico.

El presente estudio permite contar con una información precisa y detallada de todos los conceptos necesarios para un adecuado tratamiento de los proyectos de pavimentación con adoquines de concreto.

El éxito fundamental de este tipo de pavimentos se enfoca directamente desde la selección y en cada uno de sus componentes a saber: diseño, fabricación y construcción acompañados de su respectivo análisis de costos.

Para optar una metodología de diseño se presentan varias alternativas donde se involucran en términos generales las mismas variables a tener en cuenta y la respectiva formulación de métodos para determinar los factores constitutivos.

El cuanto a la fabricación de los adoquines se hace énfasis en el conocimiento de las formas existentes y en el control permanente de los elementos integrantes con el fin de obtener un producto de buena calidad y que cumpla con los requisitos exigidos ya que de la buena selección de materiales, mezcla, elaboración, curado transporte y almacenamiento depende el éxito del pavimento.

La construcción no deja de presentar situaciones que exigen un conocimiento previo del funcionamiento de cada una de las capas que conforman la estructura del pavimento ya que su eficaz control de acuerdo a las normas existentes más el criterio aportado por el profesional a cargo permitirán entregar una obra de alta calidad.

No deja de ser importante conocer todos los costos que implica la formulación de un pavimento de adoquines de concreto, se presenta una guía que plantea de manera detallada el cálculo de los elementos constitutivos tanto en la fabricación como en la construcción.

Finalmente se habla sobre la manera como detectar los problemas que presenta un pavimento de adoquines de concreto y la manera de tratarlos dependiendo del diagnóstico elaborado y aplicando la experiencia y criterio para lograr la solución óptima y favorable al pavimento.

SUMMARY

Given the existent social and economic conditions in the developing countries, the pavimentación with concrete paving stones acquires a special meaning when involving manpower as much in the production as in the construction and it is in some cases the only alternative of possible pavimentación for the communities, all the above-mentioned without forgetting the necessity of an appropriate support technician.

The present study allows to have a precise and detailed information of all the necessary concepts for an appropriate treatment of the pavimentación projects with paving stones of concrete.

The fundamental success of this type of pavements is focused directly from the selection and in each one of its components that is: I design, production and construction accompanied by their respective analysis of costs.

To opt a design methodology several alternatives they are presented where they are involved in general terms the same variables to have in bill and the respective formulation of methods to determine the constituent factors.

The as much as to the production of the paving stones emphasis is made in the knowledge in the existent ways and in the permanent control of the integral elements with the purpose of obtaining a product of good quality and that it fulfills the requirements demanded since from the good selection of materials, it mixes, elaboration, cured transport and storage depends the success of the pavement.

The construction doesn't stop to present situations that demand a previous knowledge of the operation from each one of the layers that conform the structure of the pavement since its effective control according to the existent norms more the approach contributed by the professional to position will allow to give a work of high quality.

He/she doesn't stop to be important to know all the costs that it implies the formulation of a pavement of paving stones of concrete, a guide it is presented that outlines in a detailed way the calculation of the constituent elements as much in the production as in the construction.

Finally it is talked about the way like to detect the problems that it presents a pavement of paving stones of concrete and the way to treat them depending on the elaborated diagnosis and applying the experience and approach to achieve the good and favorable solution to the pavement.

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCION	16
1. DEFINICIONES GENERALES	18
1.1 PAVIMENTO	18
1.1.1 Estructura del pavimento	18
1.1.1.1 Subrasante	18
1.1.1.2 Base	19
1.1.1.3 Elementos de superficie	19
1.2 ADOQUIN	19
1.2.1 Reseña histórica	19
1.2.2 Usos del pavimento de adoquin de concreto	22
1.2.3 Ventajas	22
1.2.3.1 Apariencia	23
1.2.3.2 Seguridad	23
1.2.3.3 Durabilidad	23
1.2.3.4 Costo de construcción	24
1.2.4 Limitaciones	25
1.3 ADOQUINES DE CONCRETO NORMA ICONTEC 2017	25
1.3.1 Requisitos generales	26
1.3.1.1 Dimensionales	26
1.3.1.2 Tolerancias	26
1.3.1.3 Modulo de rotura	27
1.3.1.4 Toma de muestras	27
1.3.2 Ensayos	27
1.3.2.1 Características dimensionales	27
1.3.2.2 Determinación del modulo de rotura	27
1.3.2.3 Determinación de la absorción de los adoquines	28

	pág.
2. PAVIMENTOS DE ADOQUINES DE CONCRETO	30
2.1 ESPECIFICACIONES PARA PAVIMENTO	30
2.2 CONSTRUCCION DE PAVIMENTOS DE ADOQUINES DE CONCRETO PARA TRAFICO VEHICULAR COMUN	31
2.2.1 Subrasante	32
2.2.2 Bases	32
2.2.3 Capa de rodadura	34
2.2.4 Confinamiento	42
2.3 DRENAJE	42
2.3.1 Drenaje superficial	42
2.3.2 Drenaje subterráneo	43
3. DISEÑO DE ESPESORES PARA PAVIMENTO DE ADOQUINES DE CONCRETO	44
3.1 FUNDAMENTOS DE DISEÑO	44
3.1.1 Diseño de pavimentos de adoquines para tráfico exclusivamente peatonal.	44
3.1.2 Diseño para vías de tráfico peatonal y vehicular doméstico o de solo automóviles.	46
3.1.3 Diseño de pavimentos de adoquines para tráfico eventual de vehículos pesados.	47
3.2 DISEÑO DE PAVIMENTO DE ADOQUINES PARA TRAFICO VEHICULAR NORMAL	48
3.2.1 Recapitulación métodos existentes de diseño	51
3.2.1.1 Método de diseño del Japón	51
3.2.1.2 Método de diseño australiano	53
3.2.1.3 Método de diseño de la CEMENT AND CONCRETE ASSOCIATION de Australia (CCA).	54 62
3.2.1.4 Método de diseño en Israel	63
3.2.1.5 Método de diseño en Alemania	63

	pág.	
3.2.1.6	Método de la National Concrete Masonry Association (NCMA)	65
3.2.1.7	Método del diseño en el Reino Unido	69
3.2.1.8	Método de la Cement and Concrete Association del Reino Unido	70
3.2.1.9	Método de diseño de Sudáfrica	72
3.2.1.10	Método de diseño de la Portland Cement Association.	77
3.2.1.11	Método de diseño de U.S Army Corps of Engineers (COE).	80
3.3	MÉTODO DE DISEÑO DEL ICPC PARA PAVIMENTOS DE ADOQUINES DE CONCRETO.	83
3.3.1	Parámetros de diseño	83
3.3.1.1	Capacidad potente de la subrasante	85
3.3.1.2	El tráfico	90
3.3.1.3	El periodo de diseño (Periodo de análisis del tráfico)	91
3.3.2	Utilización tabla 30 para diseño simplificado de pavimentos de adoquines de concreto.	93
3.3.3	Clasificación de las vías	93
4.	FABRICACIÓN DE ADOQUINES DE CONCRETO	96
4.1	MATERIALES	96
4.2	GRANULOMETRIA DE LOS AGREGADOS	97
4.3	PROPORCIONES Y MEZCLA DE LOS MATERIALES	99
4.4	RESISTENCIA	99
4.5	OPERACIÓN DE LAS MAQUINAS	100
4.6	CURADO Y TRANSPORTE	101
5.	CONSTRUCCION DE PAVIMENTOS ARTICULADOS	103
5.1	PREPARACION DE LA SUPERFICIE EXISTENTE	103
5.1.1	Colocación y nivelación de la capa de arena	103
5.2	COLOCACION DE LOS ADOQUINES	103
5.2.1	Ajustes	104
5.2.1.1	Compactación inicial	104
5.2.2	Sello de juntas y compactación final	104

	Pág.	
5.2.3	Confinamiento	105
5.2.4	Limitaciones en la ejecución	105
5.2.5	Apertura al tránsito	105
5.2.5.1.	Conservación	105
6.	COSTO DE LOS PAVIMENTOS ARTICULADOS	106
6.1	ESQUEMA PARA EL CALCULO DE COSTOS	106
6.2	COSTOS DIRECTOS DE FABRICACION	106
6.3	CALCULO DE LOS DIFERENTES RENGLONES	107
6.4	MATERIALES	108
6.5	COSTOS INDIRECTOS	109
6.6	CALCULO DE LOS DIFERENTES RENGLONES	111
6.7	MATERIALES	111
7.	REPAVIMENTACIÓN CON ADOQUINES DE CONCRETO	113
7.1	TRAFICO PEATONAL	113
7.2	TRAFICO DE VEHICULOS ESPECIALES	114
7.3	MANTENIMIENTO	114
7.4	RECONSTRUCCION Y REPARACION	115
7.5	TECNICAS DE RECONSTRUCCION	116
7.6	PROCEDIMIENTOS	120
	CONCLUSIONES	123
	RECOMENDACIONES	124
	BIBLIOGRAFIA	125

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Elementos estructurales del pavimento articulado	20
Tabla 2. Requisitos para los suelos de subrasante y bases granulares en pavimentos de adoquines de concreto.	33
Tabla 3. Requisitos para las bases granulares en pavimentos de adoquines de concreto	33
Tabla 4. Granulometría de la arena para la capa de asiento	35
Tabla 5. Granulometría de arena para sello	40
Tabla 6. Causas de deterioro de los pavimentos.	45
Tabla 7. Estructura para pavimentos de adoquines de concreto para tráfico exclusivamente peatonal.	46
Tabla 8. Estructura para pavimentos de adoquines de concreto para tráfico peatonal y de automóviles (únicamente).	47
Tabla 9. Estructura para pavimentos de adoquines de concreto para tráfico tráfico vehicular.	49
Tabla 10. Clasificación de las vías urbanas en función del tráfico y el NVCDC.	50
Tabla 11. Espesores constructivos mínimos para bases	56
Tabla 12. Peso promedio del eje trasero	58
Tabla 13. Diseño de pavimentos de concreto de cemento, de adoquines de concreto y de asfalto, sobre bases de suelo-cemento, para diferentes categorías de tráfico y capacidad de soporte del suelo.	59
Tabla 14. Diseño de pavimentos de concreto de cemento, de adoquines de concreto y de asfalto, sobre bases granulares, para diferentes categorías de tráfico y capacidad de soporte del suelo.	61
Tabla 15. Tipos de vías y zonas de tránsito relacionadas con la clase de tránsito	64

	pág.
Tabla 16. Factores de daño de ejes de carga	66
Tabla 17. Categorías de tránsito típicas para diseño	67
Tabla 18. Espesores de subbase para vías residenciales	69
Tabla 19. Valores del CBR de la subrasante en porcentaje	69
Tabla 20. Espesores de subbase granular “tipo 1”	70
Tabla 21. Factores de equivalencia y por daño de diferentes ejes de carga	71
Tabla 22. Valores de CBR estimados para los suelos británicos, compactados al contenido de humedad natural.	72
Tabla 23. Clasificación del tránsito para propósitos del diseño estructural	74
Tabla 24. Grupos de la CBR de la subrasante empleados para el diseño estructural	75
Tabla 25. Factores de equivalencia de ejes estándar (ESAL) para camiones convencionales y otros vehículos.	78
Tabla 26. Espesor requerido de base y sub-base granular (excluye el espesor del adoquín y capa de arena).	79
Tabla 27. Categorías de tránsito típicas para diseño y ESAL	81
Tabla 28. Conversión de ejes estándar equivalente (ESAL) a equivalentes	82
Tabla 29. Definición del índice de diseño de carga Caterpillar 988B9	83
Tabla 30. Diseño simplificado de pavimentos de adoquines de concreto.	88
Tabla 31. Estructura para pavimentos de adoquines de concreto para tráfico vehicular.	95
Tabla 32. Granulometría de los agregados	97
Tabla 33. Resumen de los costos de fabricación de adoquines de concreto por m ² .	106
Tabla 34. Resumen costos directos de construcción.	110
Tabla 35. Identificación de daños y procedimientos.	117

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Granulometría de arena de la capa de asiento	36
Figura 2. Granulometría arena de sello	41
Figura 3. Secciones transversales típicas de sistemas de pavimentos de adoquín.	65
Figura4. Relación aproximada entre las clasificaciones del suelo (unificada, AASTHO) y los valores de CBR y k.	87
Figura 5. Granulometría completa de los agregados (arena y agregado grueso)	98

INTRODUCCIÓN

El pavimento es una estructura que pasa desapercibida ante el común de la gente, quizá porque se construye sobre el suelo, porque no tiene el atractivo de un gran edificio, ni la espectacularidad de un puente, ni mucho menos la majestuosidad de una central hidroeléctrica. Pero no cabe duda de que su importancia es equiparable con cualquiera de los ejemplos mencionados.

De los pavimentos se habla normalmente cuando se deterioran o cuando no existen, es decir se toma conciencia de ellos más por la ausencia que por la presencia de servicio que ellos prestan.

Desafortunadamente el deterioro de los pavimentos crece a un ritmo que se ha vuelto incontrolable, es así como poco a poco se han ido inutilizando muchos kilómetros de carreteras de carácter nacional, departamental y municipal.

Los pavimentos pueden fallar por materiales inadecuados, espesores insuficientes, error de estimación del tipo de suelo, subestimación del tráfico ya sea en frecuencia o en peso de los vehículos, deficiencia en la construcción o bien porque el pavimento llega a su periodo de diseño.

Para la construcción de la capa de rodadura de un pavimento se pueden presentar diferentes alternativas equivalentes, pero la selección definitiva del tipo de pavimento depende fundamentalmente de consideraciones económicas, en las que se debe evaluar, para las mismas condiciones de tráfico y de capacidad de soporte del suelo, tanto el costo inicial como el de mantenimiento, con el fin de determinar el tipo de pavimento que tenga el menor costo total y que se constituye realmente en el más económico.

Además, cuando se trata de construir pavimentos que permitan en el futuro, la construcción o reparación de redes de servicio se debe pensar en la necesidad de levantar parcialmente el pavimento que se instale, para una vez terminadas las labores reinstalarlo con la posibilidad de lograr una inversión relativamente baja. Para facilitar esta situación la capa de rodadura debe estar conformada por adoquines, piezas prefabricadas que se unen por fricción, lo que hace fácil su retiro.

Dentro de la construcción de los pavimentos de adoquines, es de importancia primordial la participación comunitaria, lo que se ha demostrado en gran cantidad de comunidades donde en los últimos años se ha pavimentado con adoquines de concreto. Dicha participación ha permitido bajos costos de construcción.

Sin embargo la participación de la comunidad provoca dificultades de tipo técnico

y que gracias a la experiencia se ha podido identificar y resolver mediante una capacitación y dirección técnica que la comunidad no esta en capacidad de proveerse así misma. De ahí que la responsabilidad recae sobre las entidades que promueven las labores de pavimentación ya que si este proceso involucra actividades manuales, no se puede subestimar la importancia de la excelente programación, control y dirección de la obra.

Fabricar adoquines de concreto de calidad requiere un proceso técnico, racional, organizado, que se debe aprender y conlleva investigar y experimentar hasta obtener la calidad necesaria.

Se pretende crear conciencia en la importancia de llevar a una culminación exitosa en la construcción de los pavimentos articulados haciendo énfasis en todos y cada uno de los componente: Formulación, diseño, construcción y puesta al servicio del pavimento.

1. DEFINICIONES GENERALES

1.1 PAVIMENTO

Quizás la definición más clara y precisa es la siguiente: Superficie artificial que se construye para que el piso este sólido y llano, la función primordial del pavimento es la de mantener una superficie suave y segura para que el tránsito sobre este sea más rápido, confortable, seguro y económico, bajo diversas condiciones de clima.

Los pavimentos de acuerdo con la deformación presentada bajo condiciones de carga, que a su vez depende necesariamente de la composición estructural; se clasifican en: Pavimentos rígidos, flexibles y articulados.

Los rígidos no presentan deformaciones locales considerables cerca del punto de aplicación de la carga, sino que se deforman muy poco pero en una área apreciable, típico de este grupo son los pavimentos de concreto hidráulico.

Los flexibles presentan deformaciones superficiales apreciables cerca del punto de aplicación de la carga, los pavimentos de superficie asfáltica son ejemplo de este grupo.

Los pavimentos articulados comparten las características de los pavimentos flexibles con la diferencia de que por no estar ligados entre sí los elementos de la superficie actúan en forma articulada, los pavimentos con adoquines son típicos de este grupo.

1.1.1 Estructura del pavimento. De abajo hacia arriba, podemos distinguir en un Pavimento Articulado los siguiente elementos estructurales: Subrasante, base y elementos de superficie. La subrasante puede recibir un tratamiento especial en su porción superior, y en este caso se da a dicha zona el nombre de subrasante mejorada. Cuando el espesor de la base permite construirla en varias capas y es económicamente factible emplear materiales de calidad inferior en las capas más profundas, estas reciben el nombre de subbase y el resto el de base propiamente dicha.

1.1.1.1 Subrasante. Recibe este nombre el material más superficial remanente en los cortes o colocado en los terraplenes, durante las operaciones normales de explanación de la vía. Su función es recibir finalmente las cargas del peso propio del pavimento y las de los vehículos que transiten sobre él.

Desde el punto de vista de la geometría de la respectiva sección, se distinguen subrasantes en corte, en terraplén o mixtas. Desde el punto de vista del material

que la constituyen, la subrasante puede ser en roca o en tierra y esta a su vez se califica como arenosa, limosa, etc., según la naturaleza del suelo que la integre.

1.1.1.2 Base. Se entiende por base la capa o serie de capas de materiales seleccionados y compactos que se coloca sobre la subrasante y bajo la capa de rodadura con el objetivo de aumentar la capacidad estructural del pavimento mediante el incremento de su espesor, pero que supe también otras funciones menores, como facilitar el drenaje, contribuir al control de los cambios volumétricos de la subrasante, facilitar la construcción de los elementos superiores y servir eventualmente como superficie de rodadura provisional.

Teniendo en cuenta los materiales constitutivos y los sistemas de construcción utilizados, las bases se pueden clasificar en granulares no tratadas y estabilizadas. Las granulares no tratadas se caracterizan por estar compuestas por gravas, arenas o mezclas de ellas, a veces con algo de limo y arcilla, naturales o trituradas, sin aditivos de ninguna clase.

Entre las bases estabilizadas, que son aquellas que además del agregado conllevan algún aditivo estabilizador, se emplean las de suelo-cemento y las granulares estabilizadas con cemento o asfalto.

1.1.1.3 Elementos de superficie. La superficie de los pavimentos articulados la constituyen bloques de piedra, ladrillo, madera, concreto (Adoquines) u otros materiales duros y resistentes, colocados uno al lado del otro; las juntas pueden sellarse con arena fina o algún otro material. Estos elementos tienen por finalidad proporcionar una superficie de rodamiento suave y segura, impermeabilizar y servir como motivo de ornato. Ver tabla 1.

1.2 ADOQUIN

1.2.1 Reseña histórica. Los adoquines de concreto son elementos macizos, prefabricados, de espesor uniforme e iguales entre sí, con forma de prisma recto tal que al colocarlos sobre una superficie encajan unos con otros de manera que solamente queden juntas entre ellos.

La historia de los pavimentos de adoquines se confunde con la historia del primer pavimento que se construyó, con superficie limpia y duradera, hace unos 25 siglos; el empedrado. Su aparición se debió a la necesidad sentida por el hombre de tener vías durables, que permitieran el desplazamiento rápido y seguro por ellas en cualquier época del año.

Tabla 1. Elementos estructurales de pavimento articulado

ELEMENTO	TIPOS COMUNES	FUNCIONES	MATERIALES BÁSICOS DE CONSTRUCCIÓN
SUBRASANTE	<ol style="list-style-type: none"> 1. Según Sección <ol style="list-style-type: none"> 1.1 Subrasante en Corte 1.2 Subrasante en lleno 1.3 Subrasante mixta 2. Sección en Material <ol style="list-style-type: none"> 2.1 Subrasante en roca 2.2 Subrasante suelo arenoso 2.3 Subrasante en suelo limoso 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Servir de fundación al pavimento 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Roca 2. Suelo 3. Agua
BASE O SUB BASE	<ol style="list-style-type: none"> 1. Bases granulares simples <ol style="list-style-type: none"> 1.1 Gradación abierta 1.2 Gradación densa 1.3 Gradación intermedia 2. Bases de suelo estabilizado <ol style="list-style-type: none"> 2.1 Suelo-cemento 2.2 Suelo-asfalto 3. Bases especiales 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Dar capacidad. Estimular al pavimento 2. Amortiguar cambios de la subrasante. 3. Facilitar el drenaje 4. Facilitar la construcción 5. Servir de rodadura provisional 6. Prevenir bombeo 	Agregados Agua Suelo Cemento Asfalto Arena Otros
ELEMENTO DE SUPERFICIE	<ol style="list-style-type: none"> 1. Bloques de piedra 2. Bloques de madera 3. Bloques de ladrillo 4. Bloques de concreto (adoquines) 5. Bloques de otros materiales 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Proveer superficie suave y segura 2. Mejorar capacidad estructural 3. Impermeabilizar 4. Limpieza 5. Ornato 	Piedra Madera Ladrillo Concreto Otros

Fuente: ICPC.

A medida que se fueron refinando los carros de tracción animal, se buscó una superficie de rodadura más continua que permitiera un tránsito más cómodo; para lograr esto se abandonó la práctica de colocar las piedras en estado natural y se comenzó a tallarlas en forma de bloques para obtener un mejor ajuste entre ellas. Puede decirse que con esto aparece el primer pavimento de adoquines, pues la palabra española Adoquín proviene del Arabe “ ad - dukkän ” que quiere decir “piedra escuadrada ”.

Los pavimentos de piedra se siguieron construyendo hasta comienzos del siglo XX y el hecho de que gran cantidad de ellos aún se encuentran en servicio y en buen estado, obedece a su durabilidad y buen comportamiento.

Debido al proceso acelerado de 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 acorde con las necesidades de esa época. Por esto, el pavimento de adoquines de piedra comenzó a ser reemplazado por pavimentos de adoquines de arcilla cocida, de bloques de madera y se desarrollaron las técnicas de pavimentación con concreto y con asfalto; estas últimas de uso corriente y predominante en la actualidad.

Si bien la pavimentación con bloques de madera se abandonó muy pronto, algunos países europeos construyeron grandes extensiones de pavimento de arcilla cocida, con resultados aceptables a pesar del desgaste acelerado de las piezas. Al comenzar la reconstrucción de Europa después de 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 con grandes ventajas sobre los de arcilla sobre todo desde el punto de vista de la durabilidad. Posteriormente el desarrollo en Alemania de máquinas vibrocompresoras para elaborar en serie de piezas de concreto llevó a industrializar la elaboración de los adoquines, lo que permitió que este sistema de pavimentación se popularizara al comienzo en Europa y posteriormente se difundiera por el resto del mundo.

En Colombia, aunque hubo alguna producción de adoquines durante los años cincuenta y sesenta, sólo después de 1975 se comenzaron a utilizar realmente los pavimentos de adoquines.

Las investigaciones y desarrollos más destacados, que le han dado al pavimento de adoquines un soporte técnico sólido, comenzaron en la década de los setenta. En Colombia se dispone de normalización propia y de conocimientos para el diseño y construcción de pavimentos de adoquines, en igualdad de condiciones técnicas a las de otras alternativas de pavimentación con concreto o asfalto. Además, se han formulado planes amplios de pavimentación en diferentes regiones del país y se dispone de obras ejecutadas en la mayoría de los campos

de aplicación de los adoquines, que son los más claros ejemplos de la versatilidad, durabilidad y bondades de este tipo de pavimentación.

1.2.2 Usos del pavimento de adoquín de concreto. Los pavimentos de adoquines de concreto tienen un rango de aplicación casi tan amplio como el de los otros tipos de pavimentos.

Se pueden utilizar en áreas donde el nivel de carga no es un factor determinante en el diseño como andenes, zonas peatonales, terrazas y plazas; en vías internas de urbanizaciones, calles y avenidas, con tráfico vehicular que puede ir desde unos cuantos vehículos livianos, hasta gran número de vehículos pesados; en zonas de carga, patios de puertos, plataformas de aeropuertos, estaciones de servicio y zonas donde se tienen cargas muy altas e inclusive tráfico de vehículos montados sobre orugas.

Este rango amplio de aplicaciones implica la necesidad de formular diseños diferentes para la estructura del pavimento según el tipo de tráfico que va a soportar y las características del suelo sobre el cual se va a construir, con variaciones en el espesor de los adoquines y en el material y espesor de la base. Este diseño se puede elaborar con métodos apropiados que garanticen el buen desempeño y durabilidad del pavimento, lo que se refuerza con unos adecuados procedimientos y controles durante la construcción.

1.2.3 Ventajas. Los pavimentos de adoquines poseen unas características particulares que se traducen en ventajas, estas características especiales, que fundamentalmente se derivan de la naturaleza segmentada del pavimento, del sistema constructivo empleado y de la fabricación industrial de los adoquines permiten explicar las múltiples ventajas que presenta su utilización, sobre los otros tipos de pavimento, en varios aspectos específicos:

Ventajas debido al proceso de construcción: los adoquines que conforman la capa de rodadura son elementos prefabricados que llegan listos al lugar de la obra; por lo tanto su calidad se controla en fábrica; para su verificación se dispone en Colombia de la Norma ICONTEC 2017 “ Adoquines de hormigón ”.

La construcción de la capa de rodadura involucra, además de la colocación de los adoquines, el llenado de las juntas y la compactación de la capa terminada. Sin embargo el de adoquines es un pavimento de muy fácil terminado, donde no intervienen procesos térmicos ni químicos, ni periodos de espera.

Debido a la sencillez del proceso constructivo, toda la estructura del pavimento se puede construir y dar al servicio en un mismo día, por lo cual las interrupciones en el tráfico son mínimas y se logran economías en tiempo, equipos, materiales, costos financieros y sociales; además como se trabaja en pequeñas zonas a la vez, cualquier área se puede adoquinar por etapas con lo cual no se altera

ninguna economía de escala, cosa que si ocurriese con otros tipos de pavimento; esto resulta especialmente útil para la pavimentación de unas cuantas vías cuando no se dispone de los recursos completos para acometer un plan a gran escala; se puede, por lo tanto, adoquinar en varias etapas, a medida que se vayan produciendo las piezas o se obtengan los recursos.

Todos los procesos que intervienen en la construcción son sencillos y requieren de la utilización de poca maquinaria.

Como la labor de colocación de las piezas es fundamentalmente artesanal, se utiliza mano de obra, que, según se organice el proceso constructivo, se puede multiplicar al crear varios frentes de trabajo simultáneamente.

Como los adoquines son piezas pequeñas que no están unidas rígidamente unas con otras el pavimento de adoquines se adapta a cualquier variación en el alineamiento horizontal o vertical de la vía sin elaborar juntas de construcción.

1.2.3.1 Apariencia. Por estar conformado por muchas piezas iguales el pavimento de adoquines induce un cierto sentido de orden en la vía. Además la existencia de las juntas entre adoquines elimina la monotonía que presenta la superficie continua de los otros pavimentos.

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

1.2.3.2 Seguridad. Los pavimentos de adoquines se prestan par incorporar señales, o se pueden colocar en medio de otros pavimentos sirviendo como zonas de aviso para disminución de velocidad o zonas permanentes de velocidad restringida.

Además, por su rugosidad, los pavimentos de adoquines tienen una distancia de frenado menor que otros tipos de pavimentos, lo que se traduce en seguridad tanto para los peatones como para quienes se desplazan en los vehículos.

1.2.3.3 Durabilidad. Una combinación de baja relación agua-cemento, baja absorción y alta compacidad, calidad de los agregados, características que en general poseen los adoquines fabricados industrialmente, permiten que estos elementos resistan mejor que otros tipos de pavimentos la acción del tráfico de llantas, la intemperie y el derrame de combustibles y aceites, lo que los hace ideales para la pavimentación de parqueaderos, estaciones de servicio, patios industriales, etc., además les confiere una gran durabilidad que sobrepasa

normalmente la vida de diseño del pavimento. Esto último permite reutilizarlos en un gran porcentaje al reconstruir el pavimento.

En cuanto al grado de compactación de la mezcla, se sugiere que durante el proceso de fabricación se efectúen controles permanentes de densidades, así como también verificar el peso unitario de los adoquines, secados al horno.

Un adoquín, como tal, tiene una vida casi ilimitada. Aunque la estructura del pavimento puede sufrir algún deterioro después de estar en servicio por 20 ó más años, con una reparación menor el pavimento de adoquines puede alcanzar una vida útil de 40 años y los adoquines estar todavía en condiciones de servir por muchos más.

Bajo el efecto de las cargas y del medio ambiente, todo pavimento sufre un deterioro a través del tiempo y requiere de un mantenimiento periódico. En el caso de los pavimentos de adoquines, la conservación se reduce a eliminar la vegetación que eventualmente aparezca en las juntas, reponer el sello de arena o corregir la regularidad superficial cuando sea necesario. Esto último significa levantar los adoquines de la zona afectada, corregir el nivel de las capas inferiores y recolocar los mismos adoquines, proceso de gran facilidad y económico.

1.2.3.4 Costo de construcción. La construcción de un pavimento de adoquines no requiere de mano de obra especializada, ni maquinaria especial, esto lo hace especialmente recomendable en planes de autoconstrucción.

Para la fabricación de los adoquines y para la compactación del pavimento se utiliza maquinaria de la cual existe producción nacional de buena calidad y rendimiento.

Los materiales que se requieren para su construcción se consiguen en cualquier lugar del país y no consume derivados del petróleo.

La competencia con otros tipos de pavimento, desde el punto de vista de los costos, se debe plantear siempre, entre alternativas equivalentes, para unas determinadas condiciones locales de precios y disponibilidad de materiales y servicios. Nunca se debe generalizar.

El pavimento de adoquines en concreto, en la ciudad, resulta especialmente competitivo en vías de tráfico liviano y medio, donde pueden tener un costo inicial similar o inferior al de un pavimento equivalente de asfalto, aun sin tener en cuenta las ventajas adicionales ya enumeradas para el pavimento de adoquines; en un centro urbano pequeño o en zonas semi-rurales y rurales su costo es por lo general muy inferior al de otros tipos de pavimento.

Toda labor, desde la fabricación de los adoquines hasta el terminado del

pavimento, puede incorporar gran cantidad de recursos comunitarios y mano de obra local. Esto hace que sea realmente económico en planes de acción comunal o patrocinados por entidades de fomento.

1.2.4 Limitaciones. De la misma manera que con los otros tipos de pavimentos la estructura del pavimento de adoquines se debe apartar del nivel freático del terreno.

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 se 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.

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 65 km./hora.

Como la construcción se realiza básicamente en forma manual el rendimiento es, en general, inferior al obtenido en otros tipos de pavimentos. Sin embargo, es posible aumentar el rendimiento con la utilización de equipos especialmente diseñados para la colocación mecánica de los adoquines.

Lo expuesto anteriormente refleja la versatilidad, bondad y economía de la pavimentación con adoquines de concreto. La gran acogida que ha tenido este sistema de pavimentación durante los últimos años en ciudades y poblaciones colombianas y los resultados arrojados por los planes promovidos por diversas entidades, con innegables beneficios socioeconómicos, son ejemplos más que suficientes, sobre los cuales se puede medir el verdadero alcance de la pavimentación de adoquines como generadora de bienestar para la comunidad.

1.3 ADOQUINES DE CONCRETO NORMA ICONTEC 2017

Siendo un elemento macizo prefabricado posee una forma de prisma recto, cuyas bases son polígonos que permiten conformar una superficie completa. Se toma el rectángulo de mayor área que se pueda inscribir sobre la cara inferior del adoquín, la cara superior será la que soporte directamente el tráfico, algunos adoquines presentan un corte oblicuo en sus aristas al que se conoce como bisel, el cual permite disminuir el desprendimiento de los agregados y facilita la colocación,

además minimiza el efecto de succión de arena de las juntas producida por los neumáticos de los vehículos, al mismo tiempo mejora el aspecto del pavimento, destacando su condición de carpeta segmentada. Para fines de cálculo se ha establecido las siguientes definiciones:

- **Espesor.** Dimensión en dirección perpendicular a la superficie de desgaste.
- **Largo.** Dimensión del eje mayor del rectángulo inscrito.
- **Ancho.** Dimensión del eje menor del rectángulo inscrito.
- **Lote.** Conjunto de adoquines que se fabrican bajo condiciones de producción presumiblemente uniformes
- y se someten a inspección como un conjunto unitario.
- **Muestra.** Conjunto de adoquines extraídos de un lote que sirve para obtener información necesaria que permita apreciar una o más características de este lote.

Los materiales usados para la fabricación del adoquín deberán cumplir con requisitos suficientes para garantizar una buena calidad del producto final; el cemento será el aceptado por las Normas ICONTEC. Los agregados finos y gruesos serán de una granulometría adecuada además también tienen su propia norma que los acepta o rechaza, el tamaño máximo del agregado grueso de ser de 12,7 mm. El agua debe ser limpia, exenta de sustancias en suspensión o en disolución que puedan afectar desfavorablemente la calidad del concreto.

En el eventual uso de aditivos para el concreto éstos deberán cumplir con las normas establecidas para ellos, en algunos casos se usan pigmentos para obtener adoquines con color, dichos pigmentos no deberán tener sustancias que afecten la resistencia del concreto.

Generalmente cada fabricante posee una línea de productos con características definidas, sobre todo en lo que hace relación con la textura del adoquín; al respecto anotamos que una alta rugosidad de la superficie de desgaste y el bisel de la misma pueden ser deseables desde el punto de vista del comportamiento del adoquín en el pavimento, pero no son indispensables.

1.3.1 Requisitos generales.

1.3.1.1 Dimensionales. La longitud (largo), no será mayor de 250 mm, el espesor no será menor de 60 mm y se preferirán dimensiones múltiplos de 20 mm así: 60, 80, 100, 120 y 140 mm.

1.3.1.2 Tolerancias. Las tolerancias en el espesor serán ± 3 mm, la medida

especificada por el productor. Las tolerancias en las dimensiones largo y ancho serán ± 2 mm, de las medidas especificadas por el productor.

1.3.1.3 Módulo de rotura. Los adoquines ensayados en cuanto a su resistencia, como se especifica más adelante; tendrán un Módulo de Rotura promedio, para la muestra, no menor de 4,5 Mpa (45,9 kgf/cm²), e individual no menor de 3,6 Mpa (36,7 kgf/cm²).

1.3.1.4 Toma de muestras. Un lote para la inspección estará formado por 5000 adoquines de iguales características físicas (forma, tamaño, color). Se debe tomar 5 adoquines como muestra de cada lote o fracción de lote, el cual se dividirá en cinco zonas aproximadamente iguales y de cada zona se debe tomar un adoquín, teniendo en cuenta referenciar a que lote corresponde cada uno, se revisará las características del adoquín para determinar si cumple con las dimensiones, si no cumple se tomará otra unidad y si esta tampoco llena los requisitos se rechazará el lote.

1.3.2 Ensayos.

1.3.2.1 Características dimensionales. La verificación de las dimensiones se debe efectuar con un instrumento que permita medir variaciones de 1 mm. Es necesario contar con una regla, escuadra, planímetro.

El largo y el ancho de los adoquines debe medirse con una regla metálica, sobre rectas perpendiculares trazadas en su cara superficial inferior que deben seguir las direcciones principales del elemento. El espesor se determina con un instrumento de medida de igual precisión; en el punto central del elemento, determinado por la intersección de las diagonales dibujadas en su cara superior; la perpendicularidad se verificará en todos sus costados mediante escuadra metálica, comprobando que nunca se produzca una desviación superior al 2%. Para comprobar que el área plana efectiva es igual o superior al 80% se coloca sobre el área biselada una hoja de papel y sobre esta un papel calco, se recorre el perímetro superior del bisel con un lápiz con lo que el papel calco dejará estampado en el papel blanco el contorno de la superficie neta, se mide la superficie por medio de un planímetro debidamente calibrado, se compara la superficie neta con la superficie de la cara opuesta que se puede también determinar con un procedimiento similar

1.3.2.2 Determinación del módulo de rotura. Cada adoquín se debe llevar hasta la rotura, por flexión, como una viga simplemente apoyada, cuyo eje coincidirá con el eje mayor del rectángulo inscrito, mediante la aplicación de una carga uniformemente distribuida a lo ancho del adoquín y sobre la proyección, en la superficie de desgaste, del eje menor del rectángulo inscrito.

Los adoquines deberán permanecer durante 24 horas antes del ensayo, a

temperatura y humedad ambiente.

Para el ensayo son necesarios: Una prensa o máquina para el ensayo de vigas a flexión, con placas de tamaño apropiado para que haya soporte completo de las varillas de apoyo del adoquín y la varilla para la aplicación de la carga.

Procedimiento: El adoquín se debe colocar en la máquina de ensayo con la superficie de desgaste hacia arriba. Como apoyos y elemento de transmisión de carga se deben utilizar tres varillas lisas de acero, del mismo diámetro el cual debe estar comprendido entre 9,5 mm y 16 mm y con una longitud igual o mayor que el ancho respectivo del adoquín en el eje de contacto.

Las varillas de apoyo se deben colocar paralelas entre sí, perpendicular al eje mayor del rectángulo inscrito y con la proyección vertical de su eje (punto de apoyo) 10 mm hacia adentro de los lados menores del rectángulo inscrito. La varilla para la transmisión de carga se debe colocar en la superficie de desgaste sobre la proyección del eje menor del rectángulo inscrito.

La carga se debe aplicar a una velocidad que produzca un aumento en el esfuerzo cercano a 0,5 Mpa por segundo (5,09 kgf/cm² - s).

El Módulo de Rotura o resistencia a flexotensión del hormigón debe calcularse para cada adoquín según la siguiente fórmula:

$$MR = \frac{3 PL}{2 BH^2}$$

Siendo:

MR = Módulo de Rotura, en Mpa.

P = Carga de Rotura, en N.

L = Distancia entre los ejes de los apoyos, equivalente a la longitud del eje mayor del rectángulo inscrito, menos 20 mm, en mm.

B = Longitud del eje menor del rectángulo inscrito en mm.

H = Espesor del adoquín, en mm.

El valor calculado para el Módulo de Rotura, en N/mm², se dará en la unidad equivalente MPA, con una exactitud de 0,1.

1.3.2.3 Determinación de la absorción de los adoquines. Se toma 5 elementos de cada lote, los cuales se sumergen en agua a temperatura ambiente, durante 24 horas con el objeto de saturarlo, se deja drenar libremente durante un minuto y se seca la superficie con un paño seco sin que pierda su grado de saturación, inmediatamente se pesa el adoquín registrado como Peso saturado

P_n , con aproximación de un gramo. Luego se somete el elemento al horno a temperatura constante entre 100°C y 105°C durante 24 horas como mínimo, y hasta que dos pesadas sucesivas, con dos horas de intervalo, muestren una pérdida de peso no superior al 0,2% entre ellas. El peso así obtenido será el peso seco P_s .

La absorción de cada unidad A se calculara de acuerdo a la expresión:

$$A(\%) = [(P_n - P_s) / P_s] \times 100$$

2. PAVIMENTOS DE ADOQUINES DE CONCRETO

2.1 ESPECIFICACIONES PARA PAVIMENTOS

En estas especificaciones se presentan los requisitos, fundamentales que se deben seguir para la construcción de pavimentos de adoquines de concreto, según el desarrollo que ha tenido esta actividad hasta el momento.

El cuerpo de la obra lo conforman las especificaciones para la construcción de pavimentos de adoquines de concreto para tráfico vehicular común. Lo relativo a pavimentos para otro tipo de tráfico se plantea más adelante.

Además de los elementos ya mencionados de la estructura del pavimento, forman parte de la capa de rodadura la capa de arena, los adoquines y el sello de arena; así como también el confinamiento y el drenaje.

- **Capa de arena.** Es una capa de poco espesor de arena gruesa y limpia, que se coloca directamente sobre la base; sirve de asiento a los adoquines y de filtro para el agua que eventualmente pueda penetrar por las juntas entre los adoquines.
- **Sello de arena.** Esta constituido por arena fina que se coloca como llenante de las juntas entre los adoquines; sirve como sello de las mismas y contribuye al funcionamiento, como un todo, de los elementos de la capa de rodadura.
- **Confinamiento.** Su función es evitar que los adoquines se desplacen por el empuje horizontal que les ejerce el tráfico. Como estructura de confinamiento se pueden emplear bordillos, andenes, muros o la estructura de otro pavimento.
- **Drenaje.** Es todo aquello que contribuye a la recolección, conducción y evacuación del agua, tanto de la superficie como del interior del pavimento. Al drenaje superficial corresponden las pendientes tanto longitudinales como transversales, cunetas, sumideros, etc., al subterráneo las redes de desagüe, filtros etc.

Según el tráfico a soportar los pavimentos de adoquines se dividen en tres categorías:

- Para tráfico peatonal.
- Para tráfico vehicular común.
- Para tráfico de vehículos especiales o para cargas puntuales muy altas.

➤ **Diseño.** El diseño del pavimento trata dos aspectos fundamentales:

El diseño Geométrico de la vía que determina los niveles y perfiles, los sistemas y las estructuras del drenaje, el confinamiento, el patrón de colocación y los demás detalles constructivos.

Para el diseño de espesores se puede utilizar varios métodos de cálculo, que se detallan más adelante.

Ambos aspectos quedarán bien definidos antes de iniciar la obra, de manera que tanto la construcción como el comportamiento del pavimento puedan ser evaluados contra planos y diseños, y la interventoría pueda así ejercer su función con claridad.

2.2 CONSTRUCCIÓN DE PAVIMENTOS DE ADOQUINES DE CONCRETO PARA TRAFICO VEHICULAR COMÚN

El tráfico común es aquel constituido por automóviles, buses y camiones con llantas neumáticas, cargas por eje y presiones de inflado acordes con la reglamentación para vías públicas.

➤ **Organización del trabajo.** El proceso constructivo de un pavimento de adoquines comprende las siguientes actividades fundamentales:

- Construcción de las obras de drenaje
- Transporte ordenado de los materiales
- Adecuación de la subrasante
- Construcción de la base
- Construcción del confinamiento
- Colocación y nivelación de la capa de arena
- Colocación de la capa de rodadura, que a su vez comprende:
 - Colocación de los adoquines
 - Sellado con arena y compactación en dos etapas
 - Limpieza de la obra

La prohibición a circular sobre la capa de arena, una vez extendida, divide la obra en dos áreas de trabajo que deben tener suministro de materiales y equipo desde direcciones opuestas. Puesto que el proceso constructivo deberá avanzar siempre en una misma dirección, por un lado se traerán los materiales para la base y la capa de arena, y por el otro la arena para el sello, los adoquines y el equipo de compactación

Se puede tener un tren de obra que se vaya desplazando, con diferentes cuadrillas trabajando en cada una de las etapas o una sola cuadrilla que construya cada tramo en su totalidad.

La cuadrilla mínima de trabajo será de tres obreros, quienes llevarán a cabo, conjuntamente todas las labores, rotándose para no sobrecargar a uno u otro con la actividad que implica el mayor esfuerzo físico, que por lo general es la colocación de adoquines.

Antes de comenzar la obra y conociendo la disponibilidad de mano de obra y equipo, se debe planificar la secuencia de construcción, el transporte de los materiales y su distribución. Se definirá por ejemplo si se pavimenta en franjas continuas en la dirección del avance de la obra (por carriles) o completando franjas en sentido transversal.

Se debe tener especial cuidado al colocar las primeras hileras, ya que es necesario que el adoquín quede en ángulo preciso de modo de no tener que cambiar la posición de los adoquines ya colocados. Para una colocación “espina de pescado”, esta operación es más difícil ya que el eje principal del adoquín está a 45°, con respecto al eje del pavimento.

2.2.1 Subrasante. Estará conformada por material libre de materia orgánica y homogénea, se compactará lo necesario, con una humedad cercana a la óptima hasta alcanzar un 90 % de la densidad máxima seca para pavimentos urbanos. El espesor efectivo de compactación en cualquier caso deberá comprender por lo menos los 20 cm superiores de la subrasante, para así construir la base; se dará el perfil especificado, que será el mismo de la capa de rodadura, de tal manera que al colocar la base y la capa de arena, ambas con espesor uniforme en toda el área del pavimento, se llegue a las cotas de diseño conservando el perfil.

Dependiendo del tipo de suelo presente en la subrasante podrán usarse distintos tipos de rodillo, a saber:

Para la compactación de gravas y arenas se deben emplear rodillos vibratorios lisos o neumáticos; no se recomienda el uso de rodillos “pata de cabra”.

Para terrenos arcillosos son más adecuados los rodillos “pata de cabra” pero no así los rodillos vibratorios.

Para material de rellenos, en la mayoría de los casos los valores máximos del porcentaje que pasa el tamiz #200 serán de un 20%, un límite líquido máximo del 30% y un índice de plasticidad máximo del 6%.

Para subbases se establece entre un 15% y un 20% como porcentaje máximo de finos y valores inferiores a 35% para el límite de plasticidad.

2.2.2 Bases. En la construcción de las bases, los materiales deben cumplir con los requisitos locales, o en su defecto las Normas de Construcción para Carreteras MOPT C-Serie 200, del Ministerio de Obras Públicas y Transporte de Colombia y

al menos con los siguientes requisitos: Ver tablas 2 y 3

Tabla 2. Requisitos para los suelos de subrasante y bases granulares en pavimentos de adoquines de concreto.

TIPO DE SUELO	CLASIFICACIÓN UNIFICADA	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN (Mpa)	
		7 días	28 días
Arenosos y cascajosos	GW, GC, SW, SC, SP, SM, GP	2	2,7
Limosos	ML y CL	1,7	2
Arcillosos	MH y CH	1,4	1,7

Fuente: ICPC.

Tabla 3. Requisitos para las bases granulares en pavimentos de adoquines de concreto

CBR	> 80 %
Límite líquido (*)	< 25 %
Índice de plasticidad (*)	< 6
Granulometría - Tamaño máximo - Fracción que pasa el tamiz 74 μ (N° 200)	38,1 mm (1½") Menor que los 2/3 de la fracción que pasa el tamiz 420 μ (N° 40)
Compactación	> 97 % (Proctor modificado)
Desgaste en la máquina de los Ángeles	< 50 %

(*) De la fracción que pasa el tamiz 420 μ (N° 40).

Fuente: ICPC.

La experiencia en varios proyectos, ha demostrado que un contenido de finos mayor del 15% en las subbases inadecuado por causar cambios volumétricos excesivos cuando los valores de los límites líquido y plástico estén en los valores máximos establecidos.

Los tipos de bases que no estén incluidas en las normas anteriores, cumplirán con los requisitos especificados por el diseño de espesores del pavimento.

El material se compactará por capas, con un espesor suelto de no menos de 10 cm ni más de 20 cm, se hará con el mismo equipo de compactación empleado para la preparación de la subrasante. Se compactará hasta el nivel especificado en el proyecto con una humedad igual o ligeramente inferior a la óptima requerida, hasta obtener una densidad seca no menor de un 95% de la densidad máxima seca determinada por el ensayo Proctor Modificado AASTHO T-180 para pavimentos urbanos.

El número de pasadas de rodillo puede determinarse en una zona de prueba al costado del camino, en experimentación se ha logrado obtener que la densidad del material aumenta visiblemente hasta unas 10 pasadas de rodillo, después de las cuales la variación es muy pequeña. Por esto, si luego de unas 15 pasadas de rodillo no se obtiene la compactación deseada se deberá disminuir el espesor de la capa a compactar, o aumentar el peso del rodillo.

La base tendrá una densidad uniforme en toda su extensión y profundidad y este requisito se observara de manera especial en las zonas cercanas a las estructuras de confinamiento, sumideros, cajas de inspección, etc., donde el proceso de compactación es más difícil de llevar a cabo.

La superficie de la base, evaluada con una regla de tres metros sobre una línea que no este afectada por cambios en pendientes de la vía, no se separará de la regla más de 10 mm (1 cm). Además, cualquier punto de la superficie estará dentro de + 0 y - 10 mm (1 cm) de la cota de diseño, y el espesor no será menor que el proyectado menos 5 mm (0,5 cm).

Se deberá colocar un espesor mínimo de base de suelo cemento de: 100 mm para subrasantes con CBR menor o igual a 6 y 75 mm para valores mayores que 6. El espesor mínimo de base granular será de: 150 mm para subrasantes con CBR menor o igual a 6 y 100 mm para valores mayores que 6.

2.2.3 Capa de rodadura. Esta formada por la arena que servirá de asiento para los adoquines, dicha arena debe ser limpia, con una granulometría continua tal que la totalidad de la arena pase por el tamiz ICONTEC 9,51 mm (3/8") y no más del 5 % pase por el tamiz ICONTEC 74 (N° 200).

Se recomienda los siguientes límites dentro de los cuales deberá estar la curva granulométrica.

El manejo de la arena se hará con el cuidado de no contaminar y se deberá proteger de la lluvia para que su contenido de humedad sea lo más uniformen posible. Antes de utilizarla es recomendable revolverla para buscar su homogeneidad. Ver tabla 4 y Figura 1.

Tabla 4. Granulometría de la arena para la capa de asiento

TAMIZ		% QUE PASA	
NORMA ICONTEC 32	DESIGNACIÓN ALTERNA	MÍNIMO	MÁXIMO
9,51 mm	3/8"	100	100
4,76 mm	Nº 4	90	100
2,38 mm	Nº 8	75	100
1,19 mm	Nº 16	50	95
595 µ	Nº 30	25	60
297 µ	Nº 50	10	30
149 µ	Nº 100	0	15
74 µ	Nº 200	0	5

FUENTE: ICPC.

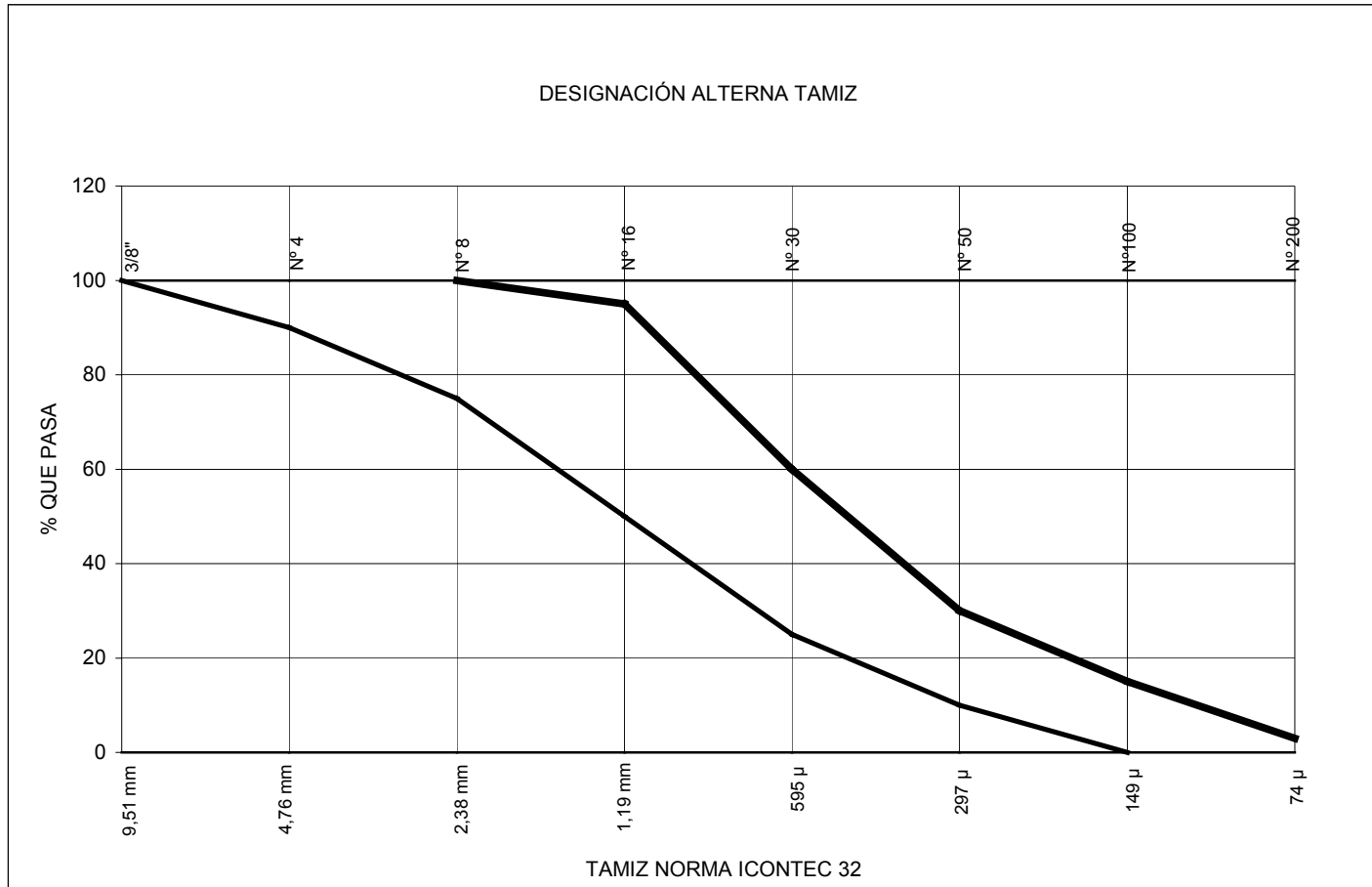
Desde cuando se tamiza la arena hasta la colocación de los adoquines sobre la capa de arena conformada, esta no sufrirá ningún proceso de compactación, para que se pueda garantizar una densidad uniforme en toda la capa.

La colocación se deberá hacer con un espesor uniforme en toda el área del pavimento, por lo cual no se podrá compensar irregularidades o deficiencias en el nivel de la base. Se deberá extender por tramos cortos a medida que se vaya avanzando con la capa de adoquines.

Para colocar la capa de arena se recomienda utilizar tres reglas, dos a modo de rieles, puestos directamente sobre la base, y otra como enrasadora de la arena distribuida previamente entre los rieles.

El espesor suelto de la capa de arena, será tal que, una vez compactado el pavimento, la capa de arena quede con un espesor entre 30 y 40 mm (3 y 4 cm); esto se puede verificar en un pequeño tramo de ensayo. Por lo general un espesor suelto de 40 mm (4 cm) resulta adecuado. Además se ha encontrado que espesores entre 40 y 60 mm el pavimento funciona prácticamente igual, presentando casi el mismo asentamiento bajo cargas idénticas. Pero cuando la capa de arena se reduce a 20 mm de espesor, el pavimento se comporta de mejor manera llegando a presentarse reducciones en el asentamiento del orden del 40%.

Figura 1. Granulometría arena de la capa de asiento.



Fuente: ICPC (2003)

Es aconsejable manejar reglas de tres metros que proporcionen una zona de trabajo suficientemente amplia, y que a la vez sirvan para verificar las tolerancias del nivel de la subrasante, de la base y del pavimento ya terminado. Comúnmente se utilizan secciones de madera o perfiles huecos de aluminio.

El desplazamiento de la enrasadora se deberá efectuar siguiendo siempre la dirección de los rieles, sin movimiento a lado y lado, y arrastrando un sobreespesor de arena que garantice que toda la capa quedará completa. Es conveniente que la enrasadora sea manejada por dos personas, una vez enrasada la capa de arena podrán retirarse los rieles; la huella dejada por estos se deberá llenar por métodos manuales, con arena suelta hasta alcanzar el nivel del resto de la capa.

Si la arena ya colocada sufre algún tipo de compactación se le dará varias pasadas con un rastrillo para devolverle la soltura y se enrasará de nuevo.

No se permitirá colocar adoquines sobre una capa de arena que haya soportado lluvia o escorrentía, lo que implicará tener que levantarla, devolverla a la zona de almacenamiento y reemplazarla por arena uniforme y suelta.

En las zonas donde el tráfico sobre el pavimento de adoquines vaya a ser escaso, para evitar la proliferación de hierba en las juntas, se podrá aplicar por aspersion, un herbicida sobre la capa de arena ya nivelada, antes de colocar los adoquines.

Los adoquines se transportarán desde la planta prefabricadora hasta la obra de manera ordenada, por métodos manuales o mecánicos que no alteren el acabado de las piezas. Así mismo, el transporte de los adoquines dentro de la obra se hará utilizando sistemas que sean eficientes y que tampoco alteran la calidad, los adoquines se podrán al alcance de la mano de los colocadores para lograr un mayor rendimiento en esta actividad. Una manera efectiva de hacerlo es mediante la disposición de pequeños arrumes a lo largo del borde de avance de la colocación de adoquines o utilizando camas largas que contengan adoquines suficientes para varias hileras.

La colocación de los adoquines seguirá un patrón uniforme que se controlará con hilos para asegurar su alineamiento transversal y/o longitudinal.

El patrón de colocación está regido por la forma de los adoquines, al respecto existe una controversia entre dos escuelas, las que pueden ser llamadas "Australiana" por un lado y "Británica" por el otro, la primera asegura que los adoquines dentados con calce geométrico en sus cuatro costados proveen una mayor distribución de cargas; los segundos consideran que los adoquines dentados no son mejores que otros y que pavimentos de comportamiento exitoso, construidos con adoquines de bordes suaves o rectos, son una prueba de ello.

No es posible hasta el momento asegurar cual alternativa es la más correcta, sin embargo, las extensas investigaciones realizadas en Australia y Sudáfrica con pavimentos bajo tráfico dan mayor fuerza a los argumentos aquí expuestos.

La clasificación propuesta por ellos indica que se puede distinguir tres categorías principales:

- **Categoría 1.** Adoquines rectangulares (modulares), con una relación largo/ancho igual a dos; con un ancho de 100 ± 15 mm ($10 \pm 1,5$ cm), para que se puedan coger en una sola mano; con bordes rectos, dentados u ondulados y que se puedan colocar en hileras o siguiendo el patrón “espina de pescado”.
- **Categoría 2.** Adoquines con tamaño y proporciones similares a los anteriores pero que solo se pueden colocar en hileras.
- **Categoría 3.** Adoquines con un tamaño mayor que el de los anteriores, con formas características y que solo se pueden colocar siguiendo un solo patrón, que siempre conforma hileras fácilmente identificables.

Para la categoría 1 se preferirá patrón “espina de pescado”, dispuesto en cualquier ángulo sobre la superficie pues no tiene un sentido preferencial de circulación.

En vías con sentido de circulación definido y adoquines de la categoría 1 se podrán colocar en hileras, siempre y cuando estas sean perpendiculares a dicho sentido de circulación.

Para la categoría 1 el patrón de colocación “espina de pescado” se podrá seguir de manera continua sin necesidad de alterar su rumbo al doblar esquinas o seguir trazados curvos. Si los adoquines se colocan en hileras estas deberán cambiar de orientación para respetar siempre la perpendicularidad al sentido preferencial de circulación.

Para la categoría 2 los adoquines se colocarán preferiblemente en hileras perpendiculares al sentido preferencial de circulación.

Si se tienen adoquines de la categoría 3 que se pueden colocar en hileras, estas quedarán, de ser posibles, perpendiculares a la dirección preferencial del tráfico. Los otros diseños de esta categoría no tendrán ninguna restricción.

Los adoquines se colocarán directamente sobre la capa de arena ya enrasada. Se colocarán al tope de manera que las caras laterales generen juntas que no exceda los 5 mm (0,5 cm). No se nivelarán individualmente.

En zonas o vías con pendientes bien definidas, la construcción del pavimento y de manera especial la colocación de los adoquines se hará preferencialmente de

abajo hacia arriba.

Una vez colocados los adoquines que quepan enteros dentro de la zona de trabajo, se colocarán ajustes en los espacios que hayan quedado libres contra las estructuras de drenaje o de confinamiento. Dichos ajustes se harán preferiblemente, partiendo adoquines en piezas con la forma necesaria en cada caso.

Los ajustes de espacios, con una área equivalente a $\frac{1}{4}$ o menos de la de un adoquín, se harán después de la compactación inicial e inmediatamente antes de comenzar el sellado de las juntas, llenándolos con un mortero constituido por una parte de cemento, cuatro de arena y poca agua.

Para la compactación de la capa de adoquines se utilizará una máquina vibrocompactadora de placa (rana).

Para adoquines de 60 mm de espesor se recomienda que el equipo tenga una placa con una área entre 0,2 y 0,4 m², una fuerza centrífuga entre 7 y 16 kN y una frecuencia de vibración entre 75 y 100 Hz. Para adoquines de 80 mm o más el área deberá estar entre 0,25 y 0,5 m², la fuerza centrífuga entre 15 y 20 kN la frecuencia entre 75 y 100 Hz.

Cuando se terminen los ajustes con piezas partidas, se procederá de inmediato a la compactación inicial de la capa de adoquines mediante, al menos, dos pasadas, desde diferentes direcciones, de una máquina vibrocompactadora de placa. Si no se dispone de este equipo se podrán utilizar rodillos manuales, duplicándose el número de pasadas. Se podrá llevar a cabo una compactación adicional con una compactadora de rodillos pequeña o con un equipo de compactación con llantas neumáticas, esto ayudará a que las deformaciones posteriores en el pavimento sean menores.

El área adoquinada se compactará hasta un metro del borde de avance de la obra o de cualquier borde no confinado. Al terminar la jornada de trabajo los adoquines habrán recibido, al menos, la compactación inicial, excepto la franja de un metro ya descrita.

Después de la compactación inicial pueden resultar algunos adoquines partidos, los cuales todavía son fáciles de extraer en esta etapa de la construcción y deben ser reemplazados. En el pavimento terminado solamente se admitirá un 1 % de adoquines partidos y ninguno exhibirá fractura múltiple.

Inmediatamente de la compactación inicial se procederá al sellado de las juntas entre adoquines y a la compactación final, previa ejecución de los ajustes con mortero. Durante la compactación final, cada punto del pavimento recibirá al menos cuatro pasadas del equipo recomendado, preferiblemente desde varias

direcciones. En cada pasada se cubrirá toda el área en cuestión antes de repetir el proceso. Se recomienda acometer la compactación, tanto inicial como final, en áreas mayores que 20 m² para que se justifique la puesta en marcha del equipo motorizado.

La superficie de adoquines ya terminada, evaluada con una regla de tres metros sobre una línea que no este afectada por cambios en las pendientes de la vía, no se separará de la regla más de 10 mm (1 cm), medidos siempre sobre la superficie de los adoquines, nunca sobre los biseles ni las juntas.

Para el sello entre adoquines la arena utilizada estará libre de materia orgánica y contaminantes como se pueda, y tendrá una granulometría continua tal que la totalidad de la arena pase por el Tamiz ICONTEC 2,38 mm (Nº 8) y no más del 15% pase el Tamiz ICONTEC 74 µ (Nº 200). Ver tabla 5 y Figura 2.

Se recomienda los siguientes limites dentro de los cuales deberá estar la curva granulométrica.

Tabla 5. Granulometría de la arena para sello.

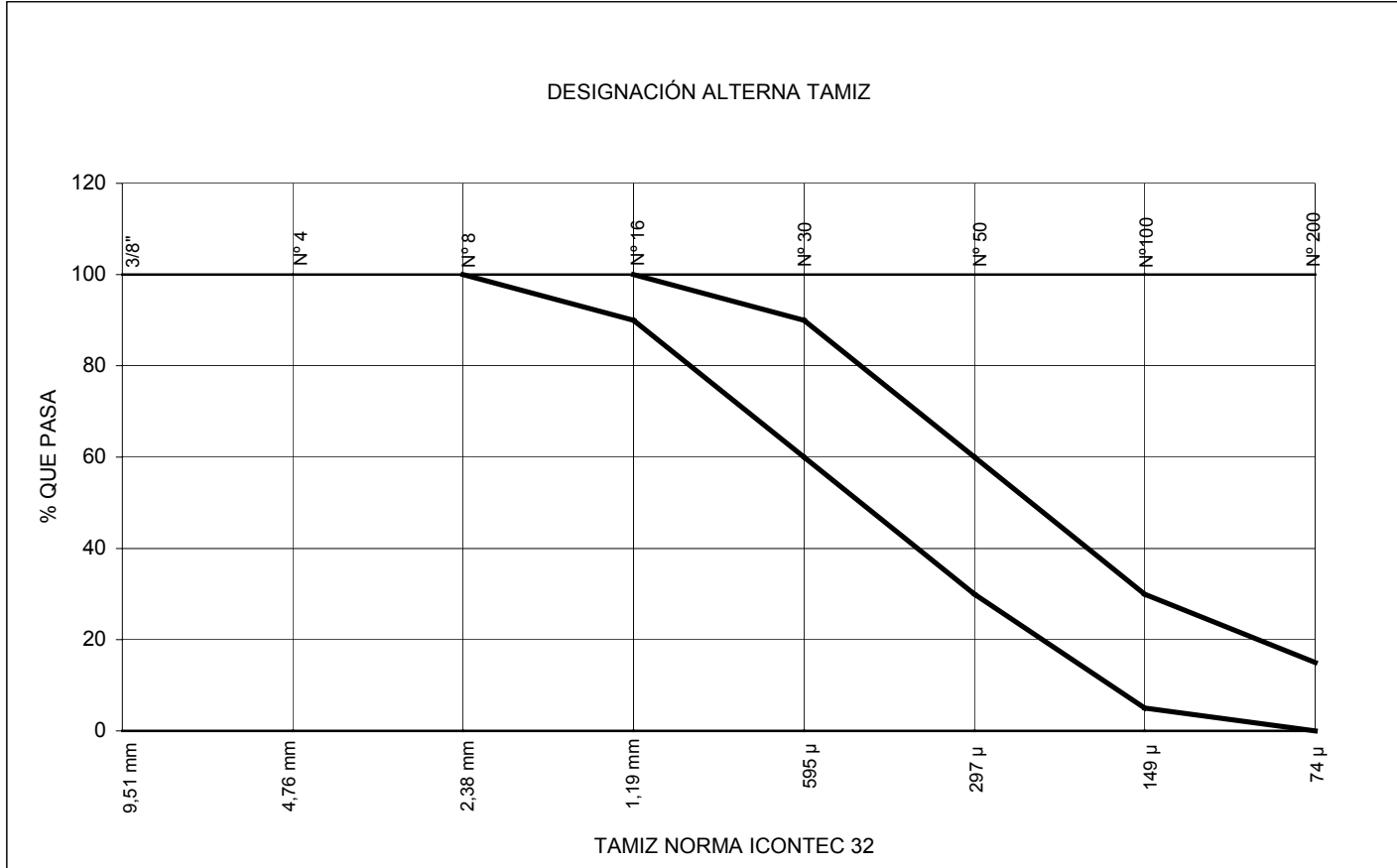
TAMIZ		% QUE PASA	
NORMA ICONTEC 32	DESIGNACION ALTERNA	MINIMO	MAXIMO
2,38 mm	Nº 8	100	100
1,19 mm	Nº 16	90	100
595 µ	Nº 30	60	90
297 µ	Nº 50	30	60
149 µ	Nº 100	5	30
74 µ	Nº 200	0	15

Fuente: ICPC.

Las arenas utilizadas comúnmente para elaborar morteros para revoques pañete son por lo general adecuadas para ser utilizadas como material para sello de arena. El manejo de la arena para el sellado de las juntas estará lo suficientemente seca y suelta como para que pueda penetrar, por barrido, dentro de las juntas.

Se recomienda dejar secar el arena bajo techo y luego pasarla por un tamiz o zaranda de 5 mm, para que quede suelta y al mismo tiempo eliminarle los sobrantes.

Figura 2. Granulometría arena de sello.



Fuente: ICPC

Para la colocación de arena de sello de las juntas entre adoquines se utilizará una escoba o cepillo de cerdas largas y duras barriendo, repetidamente y en distintas direcciones, una cantidad moderada de la misma. Dicho barrido se repetirá antes de, o simultáneamente con cada pasada del equipo vibrocompactadora y al final de la operación de manera que las juntas queden totalmente llenas. Si se pasa la vibrocompactadora de placa sobre cantidades exageradas de arena distribuida irregularmente sobre los adoquines se puede alterar la nivelación de los mismos.

Se dejará, durante al menos dos semanas, un sobrante de arena esparcida sobre toda la superficie del pavimento de adoquines ya terminado, de manera que el tráfico y las probables lluvias ayuden a acomodar la arena y con esto a que el sello se consolide. Si esto sino es posible y la interventoría exige que el pavimento quede limpio al terminarlo, el constructor regresará a las dos semanas y efectuará un barrido de más arena para rellenar los espacios que se hayan abierto por acomodación de la arena dentro de las juntas.

No se permitirá el lavado del pavimento con chorro de agua a presión, ni inmediatamente después de su terminación, ni a edades posteriores; dicho método puede desalojar material de dentro de las juntas, con el consiguiente perjuicio. Se aconseja la limpieza por barrido o cepillado. La utilización de manguera, como para el lavado de automóviles o regado de plantas, no es perjudicial siempre y cuando no se trate de lavar las juntas con el chorro de agua.

2.2.4 Confinamiento. Se refiere a la estructura capaz de impedir el desplazamiento lateral de la capa de adoquines debido al empuje del tráfico vehicular, y además deberá resistir directamente dicho empuje. El confinamiento rodeará completamente el área del pavimento de adoquines, bajo una o varias de las siguientes formas: muros, andenes, estructuras de drenaje, bordillos, la estructura completa de otro pavimento, o similares.

La parte superior de la estructura de confinamiento podrá sobresalir o estar a no más de 30 mm (3 cm) por debajo de la superficie del pavimento; la parte inferior llegará hasta por lo menos 100 mm (10 cm) por debajo de la capa de arena. La estructura de confinamiento se debe construir antes de colocar la capa de rodadura. De no ser así se tendrá cuidado especial para no perturbar los adoquines del borde, ni antes de, ni durante dicha actividad.

2.3 DRENAJE

2.3.1 Drenaje superficial. Se asegurará el flujo de las aguas hacia las estructuras de drenaje mediante la disposición de pendientes adecuadas. La pendiente transversal a uno o ambos lados de una vía será al menos del 3%. Cuando el área que se vaya a pavimentar tenga una sección diferente a la de una vía (parqueaderos, plazas, patios, etc.), la pendiente mínima será del 2% pudiéndose disponer hacia uno o varios lados de dicha área o alternadamente

formando quiebres.

Las pendientes de la superficie del pavimento conducirán el agua hacia quiebres o cunetas elaboradas con adoquines, concreto vaciado, o prefabricados.

Sí la pendiente longitudinal es menor del 2,5% se construirán cunetas a uno o ambos lados de la vía, según el perfil transversal, se podrá utilizar como pared de la cuneta el bordillo o confinamiento, siempre y cuando este sea debidamente estanco, en el caso de construir cunetas con adoquines, la transición entre estas y la superficie del pavimento podrá ser continua, o escalonada en no más de 30 mm (3 cm), Sí la pendiente longitudinal es menor del 1% las cunetas se construirán en concreto.

Las cotas de la superficie terminada del pavimento, estarán por lo menos 15 mm (1,5 cm) por encima del nivel de cualquier estructura existente dentro del pavimento (cunetas de concreto, sumideros, llaves transversales, etc.).

2.3.2 Drenaje subterráneo. será de especial cuidado, se garantizará que el nivel freático este al menos 400 mm (40 cm) por debajo de la cota de la subrasante, mediante la construcción de las estructuras de drenaje necesarias (filtros).

Cuando se tengan bases no drenantes o se coloque la capa directamente sobre superficie estanca, se construirá en la parte más baja del pavimento, por dentro de la capa de arena, un sistema de filtros que garantice la evacuación del agua que pueda penetrar a través de las juntas. Se podrá utilizar como filtro un cordón o mecha de material filtrante, por donde pueda fluir el agua, o un tubo metálico de aproximadamente 25 mm (como mínimo), de diámetro (1") con perforaciones a los lados, envuelto en un material que impida el paso de la arena hacia el interior del mismo. Cualquiera que sea el tipo de filtro que se construya se llevará a desaguar a la estructura de drenaje que reciba las aguas que van por la superficie.

También se puede optar por la colocación de un geotextil previo diseño adecuado para satisfacer las necesidades del drenaje, el geotextil debe tener una buena transmisión hidráulica, el uso de geotextiles tiene como fortaleza la homogeneidad de un producto industrial que posee como garantía el buen comportamiento mecánico e hidráulico, y su único problema radica en la imposibilidad de hacerle mantenimiento, sin embargo, es prácticamente imposible que el geotextil se colmate.

Cabe anotar que los filtros se construirán además en la parte más baja o depresiones de las zonas adoquinadas, en el lado alto de las llaves o sumideros transversales, o cuando al empalmar con otro tipo de pavimento el de adoquines provenga de un nivel superior.

3. DISEÑO DE ESPESORES PARA PAVIMENTO DE ADOQUINES DE CONCRETO

Los métodos de diseño desarrollados se dividen en dos grupos según el tipo de tráfico que vayan a soportar; pavimentos para tráfico exclusivamente peatonal, pavimentos para tráfico peatonal y vehicular doméstico o solo de automóviles y tráfico eventual de vehículos pesados, soportados por llantas neumáticas y pavimentos para vehículos especiales, con cargas por eje muy altas, montados sobre llantas neumáticas, metálicas u orugas, o para cargas estáticas y/o puntuales de gran magnitud. Trataremos el primero de estos grupos.

Las guías aquí presentadas están basadas en los documentos elaborados por Cook y Burtwell, presentados en la V conferencia internacional sobre la Pavimentación con Adoquines de Concreto, realizada en Tel-Aviv, Israel en junio de 1996, también se trae para información una recapitulación de las metodologías existentes para el diseño de espesores de pavimentos de adoquines.

3.1 FUNDAMENTOS DE DISEÑO

3.1.1 Diseño de pavimentos de adoquines para tráfico exclusivamente peatonal. Partiendo de la base de que son pavimentos para tráfico livianos, es decir, sin tráfico vehicular, con muy poco tráfico vehicular o con cargas por eje muy bajas. Debido a esto, con frecuencia se construyen estructuras deficientes desde el punto de vista de su capacidad de carga, con materiales de baja calidad y con bajos niveles de control; sin embargo en algunos casos, por buscar seguridad o por desconocimiento del problema se llegan a tener estructuras cuya capacidad sobrepasa la necesidad real (sobrediseño).

Este diseño es crítico, dado el crecimiento de las ciudades lo que conlleva congestión, presentándose tráfico vehicular no presupuestado en el diseño, lo que causa deterioro al pavimento, enumeramos algunas causas de deterioro. Ver tabla 6.

Causas de deterioro más frecuentes para pisos peatonales

Tabla 6. Causas del deterioro de los pavimentos.

CAUSAS DEL DETERIORO	TIPO DE DETERIORO
DEBIDAS A LOS PEATONES	
Desgaste de la superficie por abrasión	Superación de la vida de diseño del material de superficie o deficiencia en el material especificado, cambio en el tipo de usuario (ej.:De peatones a carros de supermercado, patines, monopatines), uso de calzado con elementos metálicos en la suela.
Manchas o desgaste de la superficie por ataque químico	Derrame de líquidos, sólidos agresivos o adherentes, acumulación de aguas sucias, deficiencia en las actividades de aseo.
AJENAS A LOS PEATONES	
Diseño y especificaciones deficientes	Espesores inadecuados, confinados laterales inadecuados, ahuellamiento, hundimientos, fisuración de losetas, separación anormal entre elementos modulares de la superficie, drenaje insuficiente, ingreso de agua.
Construcción defectuosa	Materiales o métodos constructivos incorrectos, espesores insuficientes en las capas, regularidad superficial deficiente, compactación inadecuada falta de especificaciones para compactación según el tráfico.
Abuso (tráfico vehicular, Trabajos en conducciones etc.)	Circulación de vehículos pesados, consolidación o hundimiento del lleno de brechas, ahuellamiento, fisuración, pérdida de trabazón entre elementos modulares de la superficie, fijación de tensores y postes, canalización superficial de líneas
Daño debido a la vegetación	Crecimiento de hierba, aparición de raíces de árboles, embombamientos.
Desgaste de la superficie	Pérdida de la textura de la superficie, desgaste.
Daño de la superficie percibido por el usuario	Apariencia inaceptable de la superficie como descascaramiento, fisuración, materiales mal combinados.

Fuente: ICPC

La única manera de remediar esta situación es poner al día las prácticas de mantenimiento para los pavimentos existentes y adoptar prácticas de diseño y construcción racionales, para que los que se vayan a construir en el futuro sean durables.

La categoría de diseño de pavimentos de adoquines para tráfico exclusivamente peatonal solo se debe asumir cuando “no exista riesgo alguno” de circulación de vehículos, incluyendo aún los carros limpiadores o barrederos de pisos, los carros de trabajo de jardinería, vehículos de entrega de mercancía, la única excepción para considerar estos vehículos sería que no tuviera importancia el deterioro del pavimento, lo que contradice las premisas de estabilidad y durabilidad.

Por lo tanto esta clasificación se limita exclusivamente al interior de edificaciones o zonas de difícil acceso para vehículos, delimitadas por desniveles con escalas, en la siguiente tabla se presenta la estructura típica mínima para este tipo de pavimento, con tres opciones para el material de base: Suelo cemento, material granular para base o material granular para subbase.

Tabla 7. Estructura para pavimentos de adoquines de concreto para tráfico exclusivamente peatonal.

ESTRUCTURA DEL PAVIMENTO		
Adoquines de concreto		60 mm
Capa de arena	Suelo-cemento	40 mm
Base	Material granular base	75 mm*
una de las tres	Material granular subbase	100 mm*
		125 mm*

Fuente: ICPC.

3.1.2 Diseño para vías de tráfico peatonal y vehicular doméstico o de solo automóviles. Esta categoría cubre, fundamentalmente, el acceso a viviendas o a garajes, áreas para el estacionamiento de vehículos de visitantes, por fuera se consideran aún las vías internas de la urbanización.

Se parte del principio de que de todas maneras se debe tener alguna idea de la calidad o capacidad portante del suelo; para ello se propone un ensayo sencillo, consiste en colocarse sobre el suelo ejerciendo presión, apoyado en el extremo trasero de uno de los tacones, se evalúa la profundidad de la huella; y dependiendo de la profundidad de ella, si es profunda, poco profunda o inexistente, se mira en la tabla 8 y así obtenemos el espesor de la base para los

siguientes materiales: de suelo cemento, de material granular para base o de material granular para súbbase.

Para cualquiera de las condiciones de suelo y material de base mencionados, se utiliza adoquines de 60 mm de espesor y una capa de arena que no sobrepase los 50 mm, y que preferiblemente debe ser de 40 mm.

Tabla 8. Estructura para pavimentos de adoquines de concreto para trafico peatonal y de automóviles (únicamente)

EVALUACIÓN DE LA SUBRASANTE: AL SOPORTAR EL PESO DE UN HOMBRE APOYADO EN EL EXTREMO DE SU TACÓN		HUELLA PROFUNDA	HUELLA POCO PROFUNDA	NO DEJA HUELLA
ESTRUCTURA DEL PAVIMENTO				
Adoquines de concreto		60 mm	60 mm	60 mm
Capa de arena		40 mm	40 mm	40 mm
Base una de las tres	Suelo cemento	110 mm	90 mm	75 mm
	Material granular para base categoría 1)	170 mm	135 mm	100 mm
	Material granular para subbase (categoría 2)	250 mm	200 mm	150 mm

Fuente: ICPC

3.1.3 Diseño de pavimentos de adoquines para tráfico eventual de vehículos pesados. Esta categoría no incluye zonas aparentemente peatonales por las cuales van a entrar diariamente vehículos de entrega de mercancía, de transporte público, de atención de emergencias, etc., las cuales se deben tratar como un vía vehicular, incluyendo los andenes en zonas donde pueden estar sometidos, potencialmente, a la circulación o al estacionamiento de vehículos.

Evaluación del tráfico: cuando se evalúa el tráfico eventual sobre el pavimento de una zona peatonal, normalmente es difícil obtener una cifra clara. El problema parte de que cuando el tráfico es de vehículos de entrega de mercancías, de vehículos que circulan muy lentamente por congestión de tráfico, o que se estacionan en lugares no diseñados para tal efecto, el daño o deformación que causan es mayor que el que ocasionarían si simplemente circularan a velocidad normal sobre dicho pavimento. Por esto la National Paving and Kerbing

Association - NPKA (Asociación Nacional de Productores de Adoquines y Bordillos) del Reino Unido, sugiere que cada paso de un de estos vehículos equivalga a un eje estándar; y que se asuma que pasa, al menos, uno por día en zonas residenciales y cinco en zonas comerciales.

En general, para pavimentos de adoquines se recomienda, cuando se tenga tráfico canalizado. Multiplicar el tráfico por tres. En carriles de ancho normal no se genera canalización, pero si se puede dar en pendientes o al llegara a cruces con semáforos. Cuando se espera tener velocidades de más de 50 km/h se debe multiplicar el tráfico por dos para disminuir los efectos dinámicos de las cargas de los vehículos.

Los seis primeros rangos de tráfico que aparecen en la tabla 9 (1 a 1.500.000 ejes estándar) son los que más comúnmente se acomodan a los pavimentos para tráfico eventual de vehículos. Los rangos restantes se utilizan para vías de tráfico vehicular corriente. El rango de 500.000 a 1.500.000 ejes estándar es una mezcla entre la tabla dada por Cook para tráfico liviano y por Knapton para tráfico vehicular corriente. Para efectos de congruencia se ha consignado en una sola tabla. Ver tabla 9.

Evaluación de la Subrasante: siempre se debe tratar de obtener el valor de CBR, pero para zonas peatonales, incluyendo los andenes, que normalmente tienen instalaciones o conducciones debajo, se debe utilizar un CBR del 2%, que puede ser conservador pero que busca proteger contra dichas irregularidades

3.2 DISEÑO DE PAVIMENTO DE ADOQUINES PARA TRÁFICO VEHICULAR NORMAL

Después de estudiar varios de los métodos existentes y analizar sus limitaciones en cuanto a las formas de los adoquines permitidas, los materiales utilizables en la base y los niveles de tráfico para los cuales son aplicables, se escogieron las recomendaciones de Cook Knapton, presentadas como resultado de la investigación de las propiedades mecánicas adicionales de los pavimentos de adoquines, para ello diseño un aparato experimental que simula un pavimento sometido a carga vertical. Ver tabla 10.

Tabla 9. Estructura para pavimentos de adoquines de concreto para trafico vehicular.

PAVIMENTOS DE ADOQUINES PARA TRAFICO VEHICULAR									
CBR de la subrasante	1	2	3	4	5	6 a 7	8 a 10	11 a 30	
Subrasante mejorada	600	400	300	250	0	0	0	0	
SUBBASE DE:	150	150	150	150	225	200	175	150	
Material Granular Categoría 1									
Ejes estándar durante la Construcción	De 1 A 50		De 51 A 200		De 201 A 500		De 501 A 5000		
SUBBASE DE:	25		50		75		100		
Material Granular Categoría 1									
EJES ESTANDAR ACUMULADOS DURANTE SU UTILIZACION (PERIODO DE DISEÑO)									
Desde:	1	101	1001	10001	100001	500001	1500001	4000001	8000001
Hasta:	100*	1000*	10000*	100000*	500000*	1500000*	4000000	8000000	12000000
RODADURA DE:									
Adoquines	60	60	60	80	80	80	80	80	80
Capa de Arena	40	40	40	40	40	40	40	40	40
BASE DE MATERIAL: Una de las siguientes, como espesor único o convertida en varios espesores de diferentes materiales.									
Granular Categoría 1									
Estabilizado con cemento, categoría 1									

Fuente: ICPC.

* Rangos usualmente designados como tráfico liviano.

Tabla 10. Clasificación de las vías urbanas en función del tráfico y el NVCDC.

CATEGORIA DE LA VIA	NVCDC	TRAFICO DIARIO	CARACTERISTICAS
Vía de servicio secundaria	1 a 5	Máximo de 30 predios	Poca longitud, da acceso directo a edificaciones. No tienen circulación de buses.
Vía de servicio primaria	6 a 20	Máximo de 150 predios	Reciben trafico de varias vías de servicio secundarias. No tienen circulación de buses.
Vía colectora	21 a 60	Pueden ser de longitud considerable. Recogen el tráfico de las vías de servicio secundarias y primarias de un área y lo conducen a vías mayores. Tienen circulación de buses.	
Vía arteria	61 a 200	Hasta 6.000 vehículos en ambas direcciones	Pueden tener varios kilómetros de longitud.
Vía regional	201 a 700	Hasta 30.000 vehículos en ambas direcciones	Canaliza el tráfico entre zonas residenciales, industriales y comerciales. Atraviesan un área urbana. Soportan el tráfico intermunicipal.
Calles industriales	201 a 700	Se asume el de una vía regional	Hace parte de zonas industriales. Tienen volumen de tráfico relativamente bajo, pero básicamente camiones.
Calle comercial	Por conteo directo	Hace parte de centros comerciales: se congestiona con frecuencia. Tiene velocidad de circulación baja, volumen de tráfico alto y número reducido de camiones.	
Autopistas		Mueven altos volúmenes de tráfico a velocidades altas, con sentidos de circulación separados. Requieren de un diseño cuidadoso por fuera del alcance del presente documento.	

Fuente: ICPC.

NVCDC – Número de Vehículos Comerciales por Día por Carril: Se obtiene por conteo directos de tráfico en vías con características similares a las de que se van a pavimentar, o se determina según las características de vías que aparecen en esta tabla.

Vehículo comercial: Aquel con dos o más ejes (incluyendo el direccional); seis o más llantas (incluyendo las dos delanteras); y que pesa descargado 1,5 t o más. Los buses no se consideran como vehículos comerciales pues ya se han tenido en cuenta, según la clasificación de las vías, y no entran en los conteos.

En él los adoquines se asientan sobre una cama de arena, la que a su vez descansa sobre una base de concreto. En puntos determinados de esta base se coloca una serie de celdillas de presión y sobre los adoquines se aplica carga a través de una placa circular de 250 mm.

Knapton aplicó cargas hasta 25 kN (presiones de hasta 510 kN/m²), y registro las presiones en las celdas correspondientes a cada carga aplicada, esta experiencia, realizada con varias formas y arreglo del Instituto de Asfalto, de manera similar a como lo hicieron Lilley y Walker con el método de diseño del Road Research Laboratory de Gran Bretaña y Rollings con el del Corps of engineers de los Estados Unidos.

Sin embargo, aun persistía duda acerca de sí estos métodos de diseño reflejaban el comportamiento real de los pavimentos de adoquines bajo tráfico. Por ello, la Concrete Masonry Association de Australia, patrocinaron en 1978 un exhaustivo programa de ensayos de pavimentos a escala natural sometidos a cargas móviles dirigido por el profesor B. Schackel, el que posteriormente fue ratificado por el mismo investigador en el National Institute of Transport and Road Research de Pretoria, Sudáfrica, empleando un simulador de vehículos pesados.

Estas experiencias demostraron que los pavimentos de adoquines se van rigidizando con el tráfico, aumentando con ello su capacidad de disipación de carga y que las deformaciones permanentes se acumulan, fundamentalmente, al principio de la vida del pavimento. Hasta que se alcanza un estado de trabazón total, más allá del cual la deformación del pavimento es muy pequeña.

Además estos ensayos permitieron, ver, que el comportamiento de los pavimentos depende fuertemente de la forma de los adoquines. Más aún, la forma de los adoquines tiene una influencia significativa en la velocidad con que el pavimento alcanza el estado de trabazón total y determina la magnitud de carga por rueda que el pavimento pueda resistir sin fallar.

La modificación propuesta consiste en que al espesor total del concreto asfáltico calculado, que se colocaría directamente sobre la subrasante, se le restan los 160 mm equivalentes al aporte estructural de la capa de rodadura y el resto se transforma, mediante los factores de conversión correspondientes, en una base de una o dos capas, de material granular, suelo cemento, concreto pobre, o de otro tipo para el cual se conozca su comportamiento estructural y especificaciones constructivas.

3.2.1 Recapitulación métodos existentes de diseño.

3.2.1.1 Método de diseño del Japón. Se basa en el método utilizado para pavimentos de asfalto, para ello compararon los pavimentos de asfalto con los pavimentos de adoquines de concreto, con referencia a la deformación sobre

pavimentos a escala natural.

La construcción se realiza con un CBR determinado, se encontró que el coeficiente de resistencia relativa de la capa de adoquines fue de 1,01 a 1,17 veces el del asfalto. Se estudió los esfuerzos sobre el pavimento para conocer la capacidad de distribución de las cargas, observando un incremento de la distribución de cargas debido al enclavamiento de los adoquines, los esfuerzos en la base decrecen en un 35% de las cargas aplicadas lo que confirma la alta capacidad de distribución de las cargas que es similar a la del asfalto.

Además el ahuellamiento en la superficie de los adoquines se desarrolla lentamente, llegando a ser más pequeño que el de los pavimentos de asfalto. Estas mediciones se hicieron a una T° de 30°C a la cual el ahuellamiento del pavimento de asfalto presenta un desarrollo rápido, situación importante puesto que en verano la temperatura excede los 55°C, lo cual afecta el servicio.

El profesor Miura estimó en 1.620 MN/m² el Módulo elástico de la capa de adoquines, tratando la estructura del pavimento formado por dos capas, en base a los experimentos. Takeshita propuso la siguiente relación:

$$a = \left(0.00525 \times E^{0.46}\right) / 0.44$$

Donde a = Coeficiente de resistencia relativa

E = Módulo elástico de varios materiales (kgf/cm²)

Se comprobó que la arena utilizada de capa de asiento y la de sello poseen bajos valores de módulo elástico lo que causa el decrecimiento aparente del módulo elástico de la capa de adoquines.

Determinación de espesores de diseño: Se determina por las ecuaciones:

$$TA = \frac{3.84 \times N^{0.16}}{CBR^{0.3}}$$

Y

$$TA = a_1 h_1 + a_2 h_2 + \dots + a_n h_n$$

Siendo TA = Espesor de diseño, o sea el espesor requerido de profundidad de mezcla caliente para pavimento asfáltico.

N = Número de llantas de carga equivalente a 49 kN, esperadas en una dirección en 10 años después de la construcción.

a_n = Coeficiente de resistencia relativa de cada capa que hace parte del pavimento.
 h_n = Espesor de cada capa del pavimento.

Esquema de diseño estructural en el Japón: La estructura se determina por las siguientes ecuaciones con base en la subrasante el tránsito (número equivalente de llantas de carga de 49 kN):

$$H = \frac{28 \times N^{0.1}}{CBR^{0.6}} \quad \text{Y} \quad TA = \frac{3.84 \times N^{0.16}}{CBR^{0.3}}$$

Donde H= Espesor del pavimento (cm)

El coeficiente de resistencia relativa de la capa de adoquines ha sido tomado conservativamente como 1 basados en resultados del estudio.

3.2.1.2 Método de diseño australiano. Este método trata de resumir y evaluar el conocimiento que se ha alcanzado en el desarrollo de métodos de diseño basados científicamente. El diseño se inicia con las siguiente etapas principales:

Selección de la forma y espesor de las unidades; los ensayos de tránsito han demostrado que el funcionamiento de los pavimentos son dependientes de la forma del adoquín empleado.

La selección del patrón de colocación; la experiencia en estudios han permitido concluir que el funcionamiento del pavimento depende del tipo de colocación del adoquín, con óptimos niveles de funcionamiento asociados con la traba en espina de pescado. Se excluye el empleo de adoquines que no se puedan colocar con traba en espina de pescado para la mayoría de pavimentos con tránsito principal.

Para el diseño se cuenta con los siguiente parámetros:

- Ejes o carga por llanta (t.)
- Número de ejes de carga
- Presión de inflado de las llantas (Mpa)
- Resistencia de la subrasante expresado como CBR (%)

Análisis han demostrado que estos parámetros son de diferente importancia relativa en el diseño de un pavimento para una vía y un pavimento industrial. Por ejemplo, dentro del rango de interés práctico, la presión de inflado de las llantas son de pequeña significancia en el diseño de vías y solo tiene influencia marginal en el diseño de áreas firmes o compactas para estacionamiento de aviones.

La distinción entre vías y aplicaciones industriales es hecha con base en el

máximo eje de carga, cuando exceda la carga máxima legal permitida en vías (82 kN en Australia), el diseñador es referido a métodos específicos para vehículos industriales. Cuando la resistencia de la subrasante expresada como un valor de CBR es menor de 5 % para un pavimento de una vía, entonces puede existir la posibilidad de mejorar la subrasante; en Australia se ha utilizado la estabilización o alternativamente el empleo de geotextil.

El próximo paso es la elección del tipo de subbase que puede ser: Con material granular sin liga o material estabilizado con cemento, además deberá obedecer a un análisis de costos.

Para el diseño de pavimentos con subbases granulares se cuenta con curvas producto de numerosos ensayos, que involucran la deformación tolerable, el valor de CBR de la subrasante y el espesor de la subbase granular.

Para la aplicación de estas curvas solo es necesario especificar la deformación terminal que puede ser tolerable en el pavimento. Se recomienda diseños con deformaciones entre 5 y 10 mm para vías con tránsito pesado; terminales de buses, y ahuellamiento de hasta 15 mm para vías de tránsito residencial liviano.

3.2.1.3 Método de diseño de la CEMENT AND CONCRETE ASSOCIATION de Australia (CCA). El método se basa en investigaciones y pruebas efectuadas por Concrete Masonry Association de Australia y la CCA de Australia; en pavimentos a escala natural, utilizando un simulador de vehículos pesados bajo la dirección de B. Shackel.

Los principales objetivos del método es el de asegurar el comportamiento satisfactorio durante la vida de diseño del pavimento y no exceder los límites de las deformaciones (100 mm), aceptables para pavimentos flexibles, en situaciones y cargas similares.

- **Procedimiento de diseño.** Clasificación del tránsito: Se ha clasificado de dos de acuerdo a las cargas de tránsito esperada: el número de vehículos comerciales de más de 3 t. de peso bruto, que pasa por el pavimento en cada periodo de 24 horas durante un periodo de 20 años.

El volumen esperado de ejes estándar a que se somete el pavimento durante 20 años después de la construcción.

Un eje estándar equivale a 8,2 t, es decir, la carga que ejerce una fuerza de 8.160 kg. a través del eje sencillo de llanta doble.

Una vez determinada la clasificación del tránsito, se establece la forma, el espesor, el patrón de colocación y la resistencia del adoquín. El procedimiento exige la determinación de la resistencia de la subrasante en términos del

California Bearing Ratio CBR, el cual puede medirse por uno de los siguientes métodos:

- Determinarlo mediante el empleo del Penetrómetro Dinámico (CN 973 o similar), se debe ajustar los resultados si las mediciones no fueron realizadas en estado de saturación.

Solo a falta de la solución anterior, se utilizará la clasificación del terreno por un experto en suelos, asimilando a suelos con valores de CBR conocidos.

Cálculos basados en mediciones en la obra, empíricamente correlacionados, tomando criterios de clasificación de suelos húmedos y no húmedos y permitiendo ajustes del contenido de humedad con datos de precipitación anual.

- **Tráfico canalizado.** Cuando se tengan zonas con tráfico canalizado, bahías para buses y plataformas de carga, se debe diseñar para un tráfico de, al menos, 2.000.000 de ejes estándar.
- **Alteración de la circulación e impacto.** Cuando se tengan cambios bruscos en la pendiente longitudinal o zonas de impacto como en rampas de acceso (sin las transiciones debidas), resaltos, etc., se recomienda aumentar el espesor de diseño de la base en un 40 % a lo largo de un tramo con una longitud de un vehículo antes y uno después del punto en cuestión. Si se trata de zonas de detención obligada de los vehículos como porterías, peajes y servicios al vehículo por taquillas, el tramo debe ser dos vehículos antes y uno después. Como longitud del vehículo se tomará la del vehículo más pesado que circula por ese punto.
- **Cambio en la categoría o tipo del pavimento.** Cuando se tengan cambios en la categoría de un pavimento, paso de una vía con mucho tráfico a otra de poco tráfico o viceversa, o del tipo de pavimento, paso de un pavimento de concreto o de asfalto a uno de adoquines o viceversa, se debe aumentar el espesor de la base en un 40% al menos en una franja de 1 m de ancha antes de la línea de cambio, de la cual la mitad será una transición entre el espesor típico y el aumentado.
- **Estaciones de servicio.** Cuando la estación de servicio es para automóviles, se debe diseñar para un tráfico de, al menos, 500.000 ejes estándar. Si es fundamentalmente para camiones, se debe diseñar para, mínimo, 2.000.000 ejes estándar.
- **Factores de conversión.** En Colombia se han utilizado tradicionalmente los siguientes factores: 0,77 para suelo-cemento para base; 0,5 para material granular para base y 0,4 para material granular para subbase. De esta

manera, 10 mm de concreto asfáltico calculado se pueden convertir, al dividirlo por dichos factores en: 13 mm de suelo-cemento, 20 mm de base granular o 25 mm de subbase granular.

- **Espesores mínimos.** Desde el punto de vista constructivo, se sugieren los siguientes espesores en función de la capacidad portante de la subrasante o capa inferior, tal como aparece en la tabla 11.
- **Capa de rodadura de adoquines y arena.** Las primeras investigaciones de Knapton dieron como resultado que una capa de rodadura de adoquines de 80 mm de espesor y 40 mm de arena tenía una capacidad de distribución de carga de 1,3 veces la de una capa de concreto asfáltico de 100 mm de espesor. Por esto se trabajó con un factor de conversión de 1,6 en el diseño de espesores empleado por el ICPC. Con el tiempo se ha reducido este factor a una cifra más cercana a 1, con el fin de poder dar cabida a las imprecisiones de diseño, de caracterización de los materiales y constructivas que se puedan presenta.

Tabla 11. Espesores constructivos mínimos para bases.

TIPO DE MATERIAL	CBR DE LA SUBRASANTE O CAPA INFERIOR, %	ESPESOR MÍNIMO, mm
Granular para subbase	<= 6	200
	> 6	150
Granular para base	<= 6	150
	> 6	100
Suelo-cemento	<= 6	100
	> 6	75

Fuente: ICPC.

Según el factor de 1, la equivalencia es de 100 mm de concreto asfáltico para adoquines de 60 mm y capa de arena de 40 mm de espesor; y de 120 mm de concreto asfáltico para adoquines de 80 mm y capa de arena de 40 mm de espesor.

Por esta razón, los valores de la tabla anterior, son mayores a los recomendados por el ICPC.

- **Cálculo de espesores.** Para el cálculo de los espesores se ha utilizado la fórmula del Instituto del Asfalto en la cual, con los valores del CBR de la subrasante y con el Número de Diseño Relativo al Tráfico, NDT, se calcula el espesor total de asfalto que se colocaría directamente sobre la subrasante. El

NDT expresa la carga del tránsito como el número de ejes estándar de 8,2 t que pasarían por la vía en un día, asumiendo un periodo de diseño de 20 años. Se debe anotar que el total de ejes para los 20 años se puede obtener por diversos métodos, cuya descripción no se contempla en el presente trabajo.

$$\text{Todo Asfalto, mm} = (233,4 + 100 \log \text{NDT}) / \text{CBR}^{0,4}$$

Al valor del Todo Asfalto se le resta el aporte que hace la capa de rodadura y el resto se convierte a un espesor único de material de base o a una combinación de un espesor de base y otro de subbase.

- **Consideraciones finales.** Después de lo expuesto en este documento, no se pretende sacar conclusiones pues básicamente lo que se ha hecho ha sido coordinar los métodos de diseño de pavimentos de adoquines de concreto utilizados en el Reino Unido, para que se puedan aplicar de manera práctica a las condiciones imperantes en cualquier localidad, con énfasis en la solución de la incógnita de ¿Qué hacer con los pavimentos para tráfico muy liviano? Pero dado que en el país se ha utilizado tradicionalmente el método propuesto por el ICPC con base en el Instituto del Asfalto, se presenta este último con algunos cambios con respecto a las premisas de diseño imperantes en 1985, para que se puedan establecer comparaciones y los diseñadores tengan mayor número de herramientas con que trabajar.

Aunque no resulta tan claro, los espesores de todo asfalto calculados por el método del Instituto del Asfalto dan espesores netos mayores que los de la Norma Británica. Pero al utilizar diferentes factores de conversión se obtiene una inversión en los espesores calculados, con diferencias mucho mayores, porcentualmente, que las obtenidas para los espesores de asfalto. De ahí la importancia del criterio del diseñador para determinar con que factores trabajar con uno u otro método de diseño o de definición del Todo Asfalto.

Pero estos no son los únicos métodos de diseño existentes. Casi cada país o institución ha desarrollado el suyo, por lo cual se invita a los diseñadores a investigar las múltiples opciones disponibles y ahondar en la difícil tarea de juzgar cual es la más adecuada para el medio Colombiano.

- **Consideraciones para la elección del tipo de pavimento.** Utilizando las tablas 12 y 13 se pueden obtener diferentes alternativas equivalentes de diseño, pero la selección definitiva del tipo de pavimento depende fundamentalmente de consideraciones económicas, en las que se debe evaluar, para las mismas condiciones de tráfico y de capacidad de soporte del suelo, tanto el costo inicial como el de mantenimiento, con el fin de determinar el pavimento que tenga menor costo total, que es realmente el más económico.
- **Peso de los vehículos.** En base a la clasificación de las vías, se adoptaron

diferentes características para el vehículo típico que circula por cada una, el peso promedio del eje trasero de los vehículos comerciales, considerado en la tabla 12, en toneladas es:

Tabla 12. Peso promedio del eje trasero.

PESO DEL EJE TRASERO (Ton)	SENCILLO	TÁNDEM	TRÍDEM
Vía de servicio secundario	8,2	15	18,2
Vía de servicio primario	9	17	20
Vía colectora	10	18	22
Vía arteria	11	20	24
Vía regional	12	23	27

Fuente: ICPC

Selección de los espesores de los pavimentos: Los espesores registrados en las tablas 13 y 14 se obtuvieron con base en los métodos propuestos por la Portland Cement Association (Thickness Design for Concrete Pavements), por el Asphalt Institute (Asphalt Pavements for Highways and Streets) y por el ICPC (Diseño de espesores para Pavimentos de Adoquines de Concreto), para los pavimentos de concreto, de asfalto y de adoquines respectivamente.

Tabla 13. Diseño de pavimentos de concreto de cemento, de adoquines de concreto y de asfalto, sobre bases de suelo-cemento, para diferentes categorías de tráfico y capacidad de soporte del suelo.

Tipo de pavimento	Capacidad soporte del suelo	Estructura del pavimento <u>Capa de rodadura</u> Base (suelo-cemento)(a)	Clasificación de la vía según su categoría y el número de vehículos comerciales por día y carril (NVDCD)				
			Servicio secundaria	Servicio primaria	Colectora	Arteria	Regional
			1 - 5	6 – 20	21 - 50	51 - 200	201 - 700
Espesor de las capas (mm)							
Pavimento de concreto de cemento	Baja CBR<=3	<u>Placa de concreto (b)</u>	<u>140</u>	<u>150</u>	<u>170</u>	<u>185</u>	<u>190(d)</u>
		Base suelo-cemento	100	100	100	100	100
	Media 3<CBR<=15	<u>Placa de concreto (b)</u>	<u>125</u>	<u>145</u>	<u>160</u>	<u>170</u>	<u>180(d)</u>
		Base suelo-cemento	100	100	100	100	100
	Buena CBR>15	<u>Placa de concreto (b)</u>	<u>120</u>	<u>140</u>	<u>155</u>	<u>165</u>	<u>170(d)</u>
		Base suelo-cemento	100	100	100	100	100
Pavimento de adoquines de concreto (c)	Baja CBR<=3	<u>Adoquines de concreto</u>	<u>60 u 80</u>	<u>60</u>	<u>80</u>	<u>80</u>	<u>100</u>
		Base suelo-cemento	100(f)	140	110	160	210
	Media 3<CBR<=15	<u>Adoquines de concreto</u>	<u>60 u 80</u>	<u>60 u 80</u>	<u>80</u>	<u>80</u>	<u>100</u>
		Base suelo-cemento	100 (f)	(f)	(f)	100	120
	Buena CBR>15	<u>Adoquines de concreto</u>	<u>60 u 80</u>	<u>60 u 80</u>	<u>80</u>	<u>80</u>	<u>100</u>
		Base suelo-cemento	75 (f)	(f)	75(f)	75 (f)	75 (f)
Pavimento de asfalto	Baja CBR<=3	<u>Concreto de asfalto (e)</u>	<u>100</u>	<u>100</u>	<u>125</u>	<u>125</u>	<u>150</u>
		Base suelo-cemento	120(f)	180	200	250	280
	Media 3<CBR<=15	<u>Concreto de asfalto (e)</u>	<u>100</u>	<u>100</u>	<u>125</u>	<u>125</u>	<u>150</u>
		Base suelo-cemento	100 (f)	100	100	130	130
	Buena CBR>15	<u>Concreto de asfalto (e)</u>	<u>100</u>	<u>100</u>	<u>125</u>	<u>125</u>	<u>150</u>
		Base suelo-cemento	75 (f)	75 (f)	75 (f)	75 (f)	75 (f)

Fuente: ICPC

(a) El suelo cemento debe tener una resistencia a la compresión a los 7 días de 2; 1,7 y 1,4 Mpa para suelos arenosos, limosos y arcillosos, respectivamente.

(b) El concreto debe tener un módulo de rotura a los 28 días mayor que 4 Mpa (=40kgf/cm²). Las juntas transversales deberán tener preferiblemente una inclinación de uno en el sentido longitudinal por seis en el sentido transversal, de manera que la llanta izquierda pase la junta antes que la derecha.

(c) Además de la estructura indicada se requiere, entre los adoquines y las base, de una capa de 50 mm de espesor, de arena con las características ya indicadas.

(d) En las vías regionales las juntas transversales de las placas de los pavimentos de concreto deben estar dotadas de pasadores de acero para asegurar una adecuada transferencia de cargas.

(e) Espesores mínimos recomendados por el Asphalt Institute.

(f) Espesores mínimos para bases de suelo-cemento

75 mm si el CBR de la subrasante es > 6%

100 mm si el CBR de la subrasante es ≤ 6%

Tabla 14. Diseño de pavimentos de concreto de cemento, de adoquines de concreto y de asfalto, sobre bases granulares, para diferentes categorías de tráfico y capacidad de soporte del suelo.

			Clasificación de la vía según su categoría y el número de vehículos comerciales por día y carril (NVCDC)					
Tipo de pavimento	Capacidad soporte del suelo	Estructura del pavimento <u>Capa de rodadura</u> Base (suelo-cemento)(a)	Servicio secundaria	Servicio primaria	Colectora	Arteria	Regional	
			1 - 5	6 - 20	21 - 50	51 - 200	201 - 700	
			Espesor de las capas (mm)					
Pavimento de concreto de cemento	Baja CBR<=3	<u>Placa de concreto (b)</u> Base suelo-cemento	<u>175</u> 150	<u>185</u> 150	<u>190</u> 150	<u>200</u> 150	<u>210 (d)</u> 150	
	Media 3<CBR<=1	<u>Placa de concreto (b)</u> Base suelo-cemento	<u>165</u> 100	<u>170</u> 100	<u>180</u> 100	<u>190</u> 100	<u>200 (d)</u> 100	
	5	<u>Placa de concreto (b)</u> Base suelo-cemento	<u>160</u> 0	<u>165</u> 0	<u>175</u> 0	<u>185</u> 0	<u>200 (d)</u> 100	
	Buena CBR>15							
Pavimento de adoquines de concreto (c)	Baja CBR<=3	<u>Adoquines de concreto</u> Base suelo-cemento	<u>60 u 80</u> 150(f)	<u>60</u> 230	<u>80</u> 180	<u>80</u> 260	<u>80</u> 230	<u>100</u> 430
	Media 3<CBR<=1	<u>Adoquines de concreto</u> Base suelo-cemento	<u>60 u 80</u> 100 (f)	<u>60 u 80</u> (f)	<u>80</u> (f)	<u>80</u> 140 (f)	<u>80</u> 200	<u>100</u> 200
	5	<u>Adoquines de concreto</u> Base suelo-cemento	<u>60 u 80</u> 100 (f)	<u>60 u 80</u> 100 (f)	<u>80</u> 100 (f)	<u>80</u> 100 (f)	<u>80</u> 100 (f)	<u>100</u> 100 (f)
	Buena CBR>15							
Pavimento de asfalto	Baja CBR<=3	<u>Concreto de asfalto (e)</u> Base suelo-cemento	<u>100</u> 200	<u>100</u> 300	<u>125</u> 330	<u>125</u> 400	<u>150</u> 450	
	Media 3<CBR<=1	<u>Concreto de asfalto (e)</u> Base suelo-cemento	<u>100</u> (f)	<u>100</u> 150	<u>125</u> 150	<u>125</u> 210	<u>150</u> 220	
	5	<u>Concreto de asfalto (e)</u> Base suelo-cemento	<u>100</u> 100 (f)	<u>100</u> 100 (f)	<u>125</u> 100 (f)	<u>125</u> 100	<u>150</u> 100	
	Buena CBR>15							

Fuente: ICPC.

(a) El material granular de la base debe tener: Límite líquido < 25 , índice de plasticidad < 4 , CBR $\geq 80\%$ y desgaste en la máquina de los Angeles ≤ 50 .

(b) El concreto debe tener un módulo de rotura a los 28 días mayor que 4 Mpa ($=40\text{kgf/cm}^2$). Las juntas transversales deberán tener preferiblemente una inclinación de uno en el sentido longitudinal por seis en el sentido transversal, de manera que la llanta izquierda pase la junta antes que la derecha.

(c) Además de la estructura indicada se requiere, entre los adoquines y las base, de una capa de 50 mm de espesor, de arena con las características ya indicadas.

(d) En las vías regionales las juntas transversales de las placas de los pavimentos de concreto deben estar dotadas de pasadores de acero para asegurar una adecuada transferencia de cargas.

(e) Espesores mínimos recomendados por el Asphalt Institute.

(f) Espesores mínimos para bases de suelo-cemento

75 mm si el CBR de la subrasante es $> 6\%$

100 mm si el CBR de la subrasante es $\leq 6\%$

3.2.1.4 Método de diseño en Israel. La rápida demanda de adoquines en Israel en la década pasada aumentó la necesidad de desarrollo de un método de diseño para este tipo de pavimento, que sea adecuado a las condiciones locales. Esta necesidad fue compartida tanto por diseñadores, quienes no estaban familiarizados con los pavimentos de adoquines, como por los fabricantes quienes han estado trabajando para competir con los tipos de pavimentos más convencionales, principalmente los pavimentos flexibles asfálticos.

El procedimiento de diseño siguió los lineamientos de investigadores y organizaciones; por ejemplo el U.S Army Corps Engineers (COE), La Cement & Concrete Association del Reino Unido, que ha desarrollado métodos para pavimentos flexibles, con algunas modificaciones.

La estructura del pavimento se determina por medio de curvas, se debe conocer de antemano el valor de CBR y la categoría de tránsito; para el tránsito se estableció cinco categorías, variando desde liviano (hasta 150 vehículos comerciales por día) a muy pesado (hasta 15.000 por día), para la conformación de las diferentes capas se tomo las equivalentes basadas en las que componen un pavimento flexible teniendo en cuenta los comentarios de Schackel, Knapton, Miura y otros.

Con estudios posteriores se adoptó los siguientes valores de capas equivalentes:

A. Para categoría de tránsito ocasional a muy pesado:

Adoquines de concreto / concreto bituminoso	1,45
Adoquines de concreto / base granular	2,30
Arena de apoyo / base granular	0,50

B. Para categoría de tránsito industrial pesado o muy pesado:

Adoquines de concreto / concreto bituminoso	1,45
Adoquines de concreto / base granular	2,00
Arena de apoyo / base granular	0,50

Estas equivalencias se colocaron en las curvas de diseño de pavimentos flexibles logrando así las curvas de diseño de pavimentos de adoquines.

Sin embargo el método no ha sido probado por falta de presupuesto lo que impide tener plena confianza en su uso, por lo que se comparó con resultados de diseños de otros países para condiciones idénticas concluyendo que los resultados del método Israelí, para valores de CBR (5% y 10%) y varias categorías de tránsito, son generalmente los más conservativos. Dada su desarrollo el cual es cuestionable desde el lado científico, se piensa en su reemplazo por un método más racional.

3.2.1.5 Método de diseño en Alemania. En 1986 se estableció un catalogo de espesores estandarizados para vías y zonas urbanas, que permite seleccionar entre varias sugerencias, la estructura que considere las condiciones actuales más probables.

El tránsito, dependiendo del número de vehículos pesados por día (VB); definido como:

$$VB = DTV(sv) \times f_1 \times f_2 \times f_3 \times f_4$$

Donde: DTV(sv) = Número promedio de camiones con un peso total máximo \geq 8,2 t por día.

f_i = Factores que consideran el tránsito futuro, número de carriles, ancho de carriles y pendientes respectivamente.

En la clase VI, de tránsito liviano, el volumen de tránsito VB es de 10 vehículos por día, el empleo de los pavimentos de adoquines de concreto están dirigidos de la clase III a la VI (medio a muy liviano). Ver tabla 15.

Tabla 15. Tipos de vías y zonas de tránsito relacionadas con la clase de tránsito

TIPO	CLASE DE TRÁNSITO
Vías mayores Calles industriales Zonas peatonales con cargas de tránsito pesado Carriles de buses en terminales de transporte Entradas a parqueaderos de camiones	III
Vía distribuidora local Zonas peatonales con cargas de tránsito Zonas de parqueadero de buses de camiones (constantemente utilizadas) Zonas de tránsito para automóviles y camiones en carreteras	IV
Vías fronterizas Zonas peatonales Zonas de parqueo de automóviles y algunos camiones (constantemente utilizados) Sitios de parqueo de camiones y buses (de escasa utilización)	V
Vías fronterizas Zonas de parqueadero de automóviles (constantemente utilizados) Sitios de parqueo para automóviles y algunos buses (de escasa utilización)	VI

La profundidad de construcción total necesaria depende primero que todo de la capacidad de soporte de las capas de base y subbase; y en el caso de que la capacidad de soporte sea menor de 45 N/mm², se deberá estabilizar o tomar medidas al respecto.

$$\text{Profundidad de construcción (cm)} = \text{mínima profundidad} = A + B + C + D + E$$

Donde:

A = Condiciones climáticas (3 zonas climáticas de 0 a + 15 cm.

B = Alineamiento vertical (corte, terraplén) + 5 hasta -5 cm

C = Alineamiento horizontal; si está situado sobre pendiente + 5 cm.

D = Condiciones de agua; si el nivel freático esta a menos de 200 cm debajo de la rasante + 5 cm

E = Zonas de borde de adoquín, condiciones de drenaje de 0 hasta -10 cm

Se cumplirá con la colocación de un espesor mínimo de las capas de base y

subbase de lo contrario la capacidad de soporte en la parte superior de la base no se obtendrá.

Aunque se recomienda adoquines de 80 mm de espesor se permite el uso en un rango de 60 a 140 mm, y una arena de mas de 30 mm de espesor dependiendo de la clase y tamaño del adoquín.

Los adoquines tendrán como longitud máxima 280 mm, la resistencia del concreto a la compresión será mayor de 60 Mpa, la arena tendrá un espesor máximo de 5 cm cuando esté compactada.

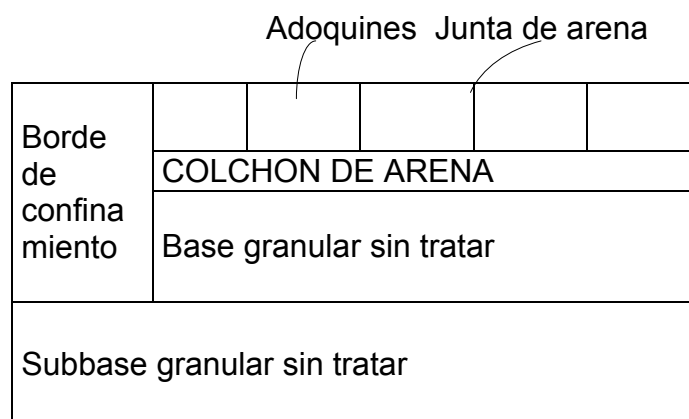
El diseño de pavimento de adoquines para zonas industriales, transitadas por camiones especiales de servicio pesado, no esta dentro de la estandarización del 86; para ello se desarrollo un diseño estructural.

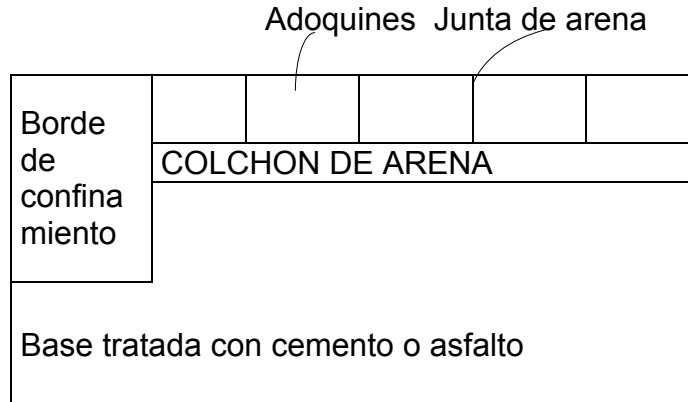
3.2.1.6 Método de la National Concrete Masonry Association (NCMA).

Consideraciones de diseño: La NCMA considera dos estructuras típicas de pavimentos de adoquín (Ver figura 3). El diseño estructural se basa en una evaluación de:

- El tránsito esperado.
- Materiales de subrasante y para la estructura del pavimento.
- Las condiciones climáticas del sitio.

Figura 3. Secciones transversales típicas de sistemas de pavimentos de adoquín.





Fuente: ICPC.

Una regla general debe ser el mayor cuidado del diseñador en la medida que la capacidad de resistencia de la subrasante decrece y el nivel del tránsito previsto se incrementa.

Tabla 16. Factores de daño de ejes de carga.

EJE SIMPLE		EJE TÁNDEM	
Carga (lb)	Factor de daño (F)	Carga (lb)	Factor de daño (F)
2	0.002	10	0.1
6	0.01	14	0.8
10	0.80	18	0.8
14	0.94	22	0.17
18	1.00	26	0.94
22	2.44	30	0.62
26	5.21	34	1.07
30	10.03	38	1.75
34	17.87	42	2.73
38	24.95	46	4.11

Fuente: ICPC.

En el diseño es usual expresar el daño relativo causado por magnitudes de ejes de carga en función de un eje estándar. Este eje de carga estándar es un eje simple de 80 kN.

En la tabla 17 se detallan las categorías de tránsito típicas para ser utilizadas en el diseño.

Tabla 17. Categorías de tránsito típicas para diseño

CATEGORÍA TRÁNSITO	CATEGORÍAS DE TRÁNSITO TÍPICAS PARA DISEÑO	REPETICIÓN DE DISEÑO*
M	Zonas peatonales, áreas de piscinas, pistas de bicicletas.	
A	Calles zonas residenciales, áreas de parqueo (solo autos), menos de 15 vehículos comerciales por día	50.000
B	Calles residenciales menores (15 a 50 vehículos comerciales por día) estaciones de servicio	150.000
C	Terminal de camiones, áreas de almacenamiento pisos de industria liviana **, calles residenciales (50 a 150 vehículos comerciales por día) paraderos de buses	500.000
D	Vías secundarias urbanas (150 a 500 vehículos comerciales por día) pisos de industria media y pesada, y áreas de acceso industrial**	1.500.000
E	Vías secundarias urbanas (500 a 1.500 vehículos comerciales), área y pisos de industria pesada	5.000.000

Fuente: ICPC

* Vida de diseño en ejes estándar de 8,2 t.

** Si el tráfico es canalizado, incrementar la curva de tránsito en una categoría. La velocidad no excederán los 60 km/h.

En cuanto a la subrasante es necesidad imperiosa el hecho de conocer su resistencia mediante el CBR, el nivel de compactación será del 95 % de la densidad máxima. Algunos ajustes se pueden efectuar para incrementar el valor del CBR de diseño. Sí el nivel freático esta dentro de los 600 mm de la superficie de la subrasante; lo mejor es emplear un valor de CBR saturado. Para profundidades del nivel freático mayores de 600 mm de la subrasante, el valor de CBR de diseño puede incrementarse así:

Diseño de CBR saturado	Incremento en el CBR de diseño
2 o menos	+ 1 %
3 a 10 %	+ 2 %
10 o mayor	no se recomienda cambio

Las capas de subbase granular sin liga y el material de la base, deberán tener una resistencia superior a la mínima requerida. Un CBR mínimo de 20 % es el recomendado para repeticiones de tránsito menores de 500.000 (curvas M, A, B, y C de la tabla 17); y un CBR de 30 % mínimo para altas repeticiones de tránsito (curvas D y E de la tabla 17), además el material tendrá un Índice de plasticidad menor de 10 y un Límite Líquido < 25.

Para bases de material granular el CBR mínimo es de 80 %, el IP < 6 % y LL < 25, la compactación será del 100 % de la densidad AASHTO T-180.

Los espesores mínimos tendrán un valor de 100 mm para toda capa granular suelta y para bases tratadas con cemento, para bases tratadas con asfalto 75 mm, para diseños con altas repeticiones de tránsito el espesor mínimo será de 150 mm.

En áreas donde se espere la acción de las heladas éstas se manifiestan por dos mecanismos por separado:

- Levantamiento del pavimento originado por la expansión del agua.
- Reducción de resistencia en el material causado por el ablandamiento de los pavimentos congelados durante el periodo de deshielo.

Se dispone de curvas para diseño de espesores de bases para materiales granulares sin liga, materiales tratados con asfalto y materiales tratados con cemento respectivamente, valores que están en función de la resistencia de la subrasante y del tránsito.

La base para convertir espesores de materiales granulares requeridos a estabilizados con asfalto y cemento, se realizaron por valores de equivalentes (2,56 para Base Tratada con Asfalto y 1,6 para base tratada con cemento). Estos valores indican que 2,5 cm de base tratada con asfalto equivalen a 6,4 cm de material granular sin liga; y 2,5 cm de base tratada con cemento equivalen a 4 cm de material granular sin liga.

3.2.1.7 Método de diseño en el Reino Unido. este método para vías de tránsito liviano, utiliza técnicas de equivalencia con respecto a los pavimentos asfálticos; basadas en las investigaciones de Knapton y para pavimentos de servicio pesado, se basa en el método de la Asociación Británica de Puertos.

El autor ha analizado los mecanismos de disipación de cargas y ha desarrollado teorías sobre la traba de los adoquines que define como la incapacidad de un adoquín individual para moverse independientemente de sus vecinos, la traba tiene tres componentes: traba vertical, rotacional y horizontal.

Para tránsito liviano en 1976 se publicó una guía de diseño para vías residenciales, con un periodo de diseño de 25 años, Se daba tablas como la tabla 18, donde se elegían espesores de subbase del pavimento de adoquines.

Tabla 18. Espesores de subbase para vías residenciales.

TIPO DE VÍA	TIPO DE SUBRASANTE				
	ARCILLA DENSA	LIMO	ARCILLA LIMOSA	ARCILLA ARENOSA	ARENA
Hasta 25 veh/día 25 a 50 veh/día	380 mm (530 mm)	380 mm (530 mm)	180 mm (290 mm)	130 mm (220 mm)	80 mm (80 mm)
	420 mm (570 mm)	420 mm (570 mm)	200 mm (320 mm)	150 mm (250 mm)	150 mm (150 mm)
	450 mm (600 mm)	450 mm (600 mm)	220 mm (340 mm)	170 mm (270 mm)	150 mm (150 mm)

Fuente: ICPC.

Los valores entre paréntesis se utilizan cuando el nivel freático esta dentro de los 600 mm de la rasante.

La tabla 19 nos indica que más del 70% de los pavimentos del Reino Unido están sobre suelos con CBR asumido sea de 2% o 3% y muy pocos tienen CBR mayor de 5%.

Tabla 19. Valores de CBR de la subrasante en porcentaje.

CBR	PORCENTAJE DE TODOS LOS DISEÑOS CON EL CBR INDICADO
1 o <	5
2	43
3	30
4	74
5 o más	8

Fuente: ICPC.

Se presentan dos posibilidades, con respecto al diseño la primera cuando únicamente se necesita una capa de material entre la subrasante y el adoquín y otra cuando son necesarias dos capas, en ambos casos los materiales irán sin liga. La capa única será de material “tipo 1” (material granular de subbase no plástico, mientras en el segundo caso un tipo 1 esta sobre cualquier material tipo 2 (material granular de subbase con $IP < 6$)

La tabla 20 nos muestra los espesores promedio de las capas para diseños de una sola capa.

Tabla 20. Espesores de subbase granular “tipo 1”

CBR	ESPESORES DE SUBBASE (MM) PARA TRES NIVELES DE TRÁNSITO (EJES ESTÁNDAR ACUMULADOS X 10^6)		
	0,1	0,1 a 1,0	1,0 a 5,0
1	450	450	
2	370	350	400
3	260	275	325
4	225	200	250
5 o más	150		

Fuente: ICPC.

Cuando se exceda de 300 mm se recomienda usar dos capas en el diseño.

Existen inconvenientes que pueden ocasionar variaciones de hasta un 50%. Dichas causas pueden ser: Severa canalización del tránsito, incrementando los espesores de diseño hasta en un 20 %

Falta de confianza en los datos de investigación del sitio, incrementando los espesores de diseño hasta un 25%.

Sitios de lleno variable, incrementando los espesores de diseño hasta un 20%

El empleo de malla geotextil, que reducen los espesores de diseño 10%.

3.2.1.8 Método de la Cement and Concrete Association del Reino Unido. La estructura del pavimento adoquinado comprende los siguientes elementos en la construcción:

- Subbase
- Base
- Capa de arena fina de unos 50 mm de espesor
- Capa de rodadura. (Los adoquines mismos)
- Confinamiento

Para pavimentos destinados a transportar un total de ejes estándar menor de 1,5 x 106, no se requerirá base, solo subbase. Los adoquines se colocarán en espina de pescado.

La influencia de un vehículo depende principalmente de los ejes de carga. La tabla 11 muestra la influencia del daño relativo de diferentes ejes, fluctuando de 900 a 18.000 kg. y compara estos con el eje estándar de 8.165, el cual tiene un factor de daño igual a la unidad.

Tabla 21. Factores de equivalencia y por daño de diferentes ejes de carga.

EJE DE CARGA		FACTOR DE EQUIVALENCIA
KG.	(LBS)	
910	(2.000)	0,0002
1.810	(4.000)	0,0025
2.720	(6.000)	0,01
3.630	(8.000)	0,03
4.540	(10.000)	0,09
5.440	(12.000)	0,19
6.350	(14.000)	0,35
7.260	(16.000)	0,61
8.160	(18.000)	1,0
9.070	(20.000)	1,5
9.980	(22.000)	2,3
10.890	(24.000)	3,2
11.790	(26.000)	4,4
12.700	(28.000)	5,8
13.610	(30.000)	7,6
14.520	(32.000)	9,7
15.420	(34.000)	12,1
16.320	(36.000)	15,0
17.230	(38.000)	18,6
18.140	(40.000)	22,8

Fuente: ICPC.

Subrasante: Esta puede ser un suelo natural o material de lleno, el valor de soporte tendrá una gran influencia en el diseño y funcionamiento del pavimento.

Se recomienda que para valores de CBR de la subrasante menores de 5%, se requeriría colocar una capa, la cual tendría un CBR de por lo menos 5% superior al de la subrasante.

Tabla 22. Valores de CBR estimados para los suelos británicos, compactados al contenido de humedad natural.

TIPO DE SUELO	ÍNDICE DE PLASTICIDAD	CBR (PORCENTAJE)	
		MÁS DE 600 MM	MENOS DE 600 MM
Arcilla densa	70	2,0	1,0
	60	2,0	1,5
	50	2,5	2,0
	40	3,0	2,0
Arcilla limosa	30	5,0	3,0
Arcilla arenosa	20	6,0	4,0
	10	7,0	5,0
Limo		2,0	1,0
Arena (mal gradada)	No plástico	20,0	10,0
Arena (mal gradada)	No plástico	40,0	15,0
Grava arenosa (bien gradada)	No plástico	60,0	20,0

Fuente: ICPC.

- **Subbase.** Su espesor depende de los parámetros de CBR de la subrasante y del número acumulado de ejes estándar.
- **Base.** Por razones prácticas se tiene que las bases estabilizadas de cemento no serán menores de 100 mm y los materiales bituminosos menores de 75 mm.
- **Capa de arena.** Se define como arena angulosa, limpia, de 50 mm compactada, no conteniendo más de 3% de limos y arcilla y con, no más del 10% por peso retenido en la malla 5 mm.
- **Capa de rodadura.** Los adoquines tendrán un espesor mínimo de 80 mm, para cualquier vía con tránsito pesado o pavimento industrial.

3.2.1.9 Método de diseño de Sudáfrica. Es un método aplicable para vías de uso normal e industrial, se basa en una combinación de métodos existentes, experiencias y teorías fundamentales del diseño estructural, características y comportamiento de los materiales.

Proceso de diseño

PASO 1: SELECCIÓN DE LA CATEGORÍA DEL PAVIMENTO

Empleo del adoquín

Categoría de la vía

PASO 2: ESTRATEGIA PARA SELECCIONAR EL DISEÑO

Periodo estructural

Periodo de análisis

Estrategia alternativa

PASO 3: ESTIMACIÓN DE CARGAS DE DISEÑO

Clases de tránsito

Otras aplicaciones de carga

PASO 4: MATERIALES

Disponibilidad

Costos unitarios

Experiencia

PASO 5: MEDIO AMBIENTE

Clima de la región

Subrasante

CBR de diseño

PASO 6: DISEÑO ESTRUCTURAL

Comportamiento del pavimento

Condiciones extremas

Patrón de colocación del adoquín

Catálogo

PASO 7: CONSIDERACIONES PRACTICAS

Drenaje (superficial y sub-superficial)

Compactación

Problemas de subrasante

Sección transversal

PASO 8: ANÁLISIS DE COSTOS

Valor presente de costos

Costos de construcción

Porcentaje de descuento

Costos de mantenimiento

Valor de salvamento

Repetir si es necesario

- **Vías.** áreas de parqueo y vías vehiculares, áreas de servicios, rural, urbana.
- **La estrategia de diseño.** Implica un periodo de análisis el cual es de planeamiento y durante el cual es innecesaria la reconstrucción completa de el pavimento; el periodo de diseño estructural se define como aquel durante el cual se predice con alta confianza que no se requerirá mantenimiento estructural del pavimento.

El periodo de análisis es en realidad un periodo de costos, se relaciona frecuentemente con la geometría existente. Se tendrá periodo de diseño corto cuando el pavimento ha de tener una vida limitada.

Las cargas de diseño de vías y otros pavimentos, el daño acumulado por efecto de las cargas individualmente aplicadas, se expresan como el número equivalente de ejes de carga simple de 80 kN (E80).

Se requiere la estimación del tránsito acumulado equivalente, que se obtiene ya sea por estimación basada en la experiencia y el uso del nomogramas; o por medio del cálculo detallado en la estimación del tránsito inicial, TPD, ratas de crecimiento y carril o factores de distribución de área.

Tabla 23. Clasificación del tránsito para propósitos del diseño estructural.

CLASE DE TRÁNSITO	TRÁNSITO ACUMULADO EQUIVALENTE EN E80	DESCRIPCIÓN	CATEGORÍA PAVIMENTO
ER	$< 0,05 \times 10^6$	Vías residencial	R (ii)
EO	$< 0,2 \times 10^6$	Tránsito muy livianos, pocos vehículos pesados	R(i),R(iii)
E1	$0,2 \text{ a } 0,8 \times 10^6$	Tránsito liviano pocos vehículos pesados	R (ii)
E2	$0,8 \text{ a } 3,0 \times 10^6$	Tránsito medio pocos vehículos pesados	R (ii) R (iii) I R (ii)
E3	$3,0 \text{ a } 12,0 \times 10^6$	Volumen alto de tránsito, muchos vehículos pesados	R (ii),(iv) I (iii)
E4	$12 \text{ a } 50 \times 10^6$	Volumen muy alto, o muchos vehículos muy pesados	R(iv) I(iii) + I(iv)

Fuente: ICPC.

Para lograr la equivalencia de cargas aplicadas, se utiliza el factor de carga

equivalente, el cual relaciona el número de repeticiones de un eje de carga dado con el número equivalente E80. Este factor es función de:

- Tipo de materiales
- Definición de las condiciones terminales
- Constitución del pavimento

La siguiente expresión permite calcular el factor de equivalencia:

$$F = \left[P / 80 \right]^n$$

Donde:

F: Factor de equivalencia de carga

P: Es la carga del eje aplicado

n: Varía desde n=2 para materiales granulares, hasta n=6 para materiales tratados con cemento.

Con respecto al medio ambiente, Paso 5, se define las condiciones climáticas particularmente la humedad y la temperatura; el clima determina la meteorización de la roca natural.

El parámetro de diseño de la subrasante es el CBR saturado, como representativo de la densidad final esperada en el sitio. Para propósitos de construcción el CBR de la subrasante esta limitado a cuatro grupos, indicados en la tabla 24.

Tabla 24 Grupos de CBR de la subrasante empleados para el diseño estructural.

CBR DE LA SUBRASANTE
< 3 %
3 % - 7 %
7 % - 15 %
> 15 %

Fuente: ICPC.

Para el diseño estructural, paso 6 se puede adoptar varios procesos de diseño, tales como el diseño mecánico, el método de diseño estructural, curvas de diseño o el catálogo dado.

El catálogo puede no ser aplicable cuando surgen condiciones especiales,

situaciones en las cuales nos serviría de guía.

Consideraciones prácticas, paso de diseño 7:

Drenaje y compactación. La experiencia indica que el inadecuado drenaje, es probablemente el responsable que más pavimentos fallen en Sudáfrica.

Problemas de subrasante u problemas especiales pueden presentarse en la subrasante, los cuales requerirán de tratamiento individual; el método asume que esos problemas han sido tenidos en cuenta separadamente. Los problemas que requieren ser considerados son:

- El excesivo cambio de volumen de algunos suelos como resultado del cambio de humedad (expansivos)
- Fallas en el soporte estructural (ej. sumideros)
- Soporte uniforme que resulta de la amplia variación en los tipos y estados del suelo.
- Presencia de los suelos solubles, los cuales pueden migrar hacia arriba y causar agrietamiento, desintegración de bases tratadas y pérdida de la densidad de bases no tratadas.
- Excesiva deflexión y rebote de suelos de altísima resiliencia (resistencia a fracturar por choque), durante y después de la pasada de cargas.
- Efecto del material del adoquín
- Efecto del tamaño del adoquín
- Patrón de colocación, la mayoría de los adoquines pueden ser colocados solo en forma alargada, lo cual puede conducir a un comportamiento menos óptimo de los pavimentos bajo tránsito pesado. Por ello se recomienda la utilización de la traba espina de pescado.
- Resistencia al patinazo y calidad de la rodada

Otros aspectos a tener en cuenta son:

- Efecto de la resistencia del adoquín
- Colocación de los adoquines
- Tolerancias de colocación y geométricas
- Bordes y confinamiento
- Efecto de hermeticidad

- Amortiguamiento de la capa de arena y especificaciones de esta
- Efecto del tiempo de sellado de las juntas
- Rasantes de gran pendiente
- Mantenimiento

Análisis de costos, paso de diseño 8; El costo de un proyecto a través del periodo de análisis, es el costo de construcción más los costos de mantenimiento, menos el valor de salvamento. Tenemos que el valor presente de costos (PWOC) se puede estimar como:

$$PWOC = C + M_1x(1+r)^{-X_1} + \dots + M_jx(1+r)^{-X_j} + \dots - Sx(1+r)^{-Z}$$

Donde PWOC = Valor presente al inicio de la construcción

M_i = Costos del mantenimiento, expresados en términos de costos corrientes

r = Tasa real de descuento

X_j = Número de años desde el presente hasta j mantenimientos, medidos dentro del periodo de análisis

Z = Periodo de análisis

S = Valor de salvamento al final del periodo de análisis, expresado en términos de valores presentes.

3.2.1.10 Método de diseño de la Portland Cement Association. Es un procedimiento basado en el método del U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS a partir de investigaciones en pistas de prueba. Su método de pavimentos flexibles fue modificado conservativamente, admitiendo el efecto de traba en los pavimentos de adoquines de concreto.

El fundamento del método radica en la colocación de capas sucesivas, de mayor resistencia sobre el suelo de la subrasante, de tal manera que se logre que el ahuellamiento del pavimento debido a la deformación por cortante o densificación, sean evitados. Para ello se diseña adecuadas capas y se controla la compactación de las mismas.

Los factores de diseño a estudiar son: El tipo, magnitud y frecuencia de las cargas de vehículos y las resistencias de la subrasante, subbase y base.

- **Tránsito.** La estimación del tránsito se realiza transformando las cargas a un común denominador: Al equivalente de carga simple de 18.000 lb (80 kN), o ESAL (Eje Equivalente de carga Estándar). Valores de ESAL para diferentes magnitudes se indican para camiones convencionales y otros vehículos de carga en la tabla 25.

Tabla 25. Factores de equivalencia de ejes estándar (ESAL) para camiones convencionales y otros vehículos.

EJE DE CARGA LB X103	FACTOR ESAL		PESO BRUTO LB X103	FACTOR ESAL	
	EJE SENCILLO	EJE TÁNDEM		VEHÍCULOS CARGADOS	MONTA CARGAS
4	0,002		5	0,007	0,001
6	0,008		10	0,032	0,030
8	0,020	0,01	15	0,12	0,260
10	0,060	0,02	20	0,04	1,400
12	0,130	0,05	25	0,90	5,30
14	0,270	0,05	30	2,10	16,00
16	0,530	0,14	35	4,50	44,00
18	1,000	0,21	40	9,00	105,00
20	1,800	0,33	45	17,00	
22	3,200	0,49	50	31,00	
24	5,300	0,71	55	54,00	
26	8,800	1,00	60	91,00	
28	14,000	1,40	65	150,00	
30	22,000	1,90	70	24,00	
34		3,30	80	560,00	
38		5,60	90	1200,00	
42		9,00	100	2600,00	
46		14,00	110	5100,00	
50		21,00	120	9500,00	

Fuente: ICPC.

En un problema de diseño el número de repeticiones de carga esperada durante la vida de diseño es multiplicada por el respectivo factor ESAL y la suma de todos ellos es utilizada para determinar el espesor de diseño en la tabla 26, donde los espesores de arena y adoquín no se incluyen.

Tabla 26. Espesor requerido de base y sub-base granular (excluye el espesor del adoquín y capa de arena).

EJES DE CARGA ESTÁNDAR EQUIVALENTE (ESAL)	ESPEORES DE BASE Y SUB-BASE CBR DE LA SUBRASANTE									
	2	2,5	3	3,5	4	5	6	8	10	15
1.000	10,1	8,2	6,7	5,6	4,6					
2.000	11,5	9,4	7,8	6,6	5,6	4,0				
4.000	12,8	10,6	8,9	7,6	6,5	4,8				
8.000	14,2	11,8	10,0	8,6	7,4	5,6	4,2			
10.000	14,7	12,2	10,3	8,9	7,7	5,8	4,4			
20.000	16,0	13,4	11,4	9,9	8,6	6,6	5,1		Mínimo 4,0	
40.000	17,4	14,6	12,5	10,9	9,5	7,4	5,9			
80.000	18,8	15,8	13,6	11,9	10,6	8,3	6,6	4,1		
100.000	19,2	16,2	14,0	12,2	10,8	8,5	6,8	4,3		
200.000	20,6	17,5	15,1	13,2	11,7	9,3	7,5	4,8		
400.000	22,0	18,7	16,2	14,2	12,6	10,1	8,2	5,4		
800.000	23,4	19,9	17,3	15,2	13,5	10,9	8,9	6,0		
1 x 10 ⁶	23,8	20,3	17,6	15,5	13,8	11,2	9,2	6,2	4,0	
2 x 10 ⁶	25,2	21,5	18,7	16,5	14,8	12,0	9,9	6,8	4,5	
4 x 10 ⁶	26,6	22,7	19,8	17,6	15,7	12,8	10,6	7,3	5,0	
8 x 10 ⁶	28,0	23,9	20,9	18,6	16,6	13,6	11,3	7,9	5,4	
10 x 10 ⁶	28,4	24,3	21,3	18,9	16,9	13,9	11,5	8,1	5,6	

EQUIVALENTE CATERPILLAR 988B	ESPEORES DE BASE Y SUBBASE (PULG) CBR DE LA SUBRASANTE									
	2	2,5	3	3,5	4	5	6	8	10	15
100	27,8	23,4	20,3	17,9	16,0	13,2	11,1	8,3	6,4	
200	32,2	27,3	23,7	21,0	18,8	15,6	13,3	10,1	8,0	mín.
400	36,0	30,5	26,6	23,5	21,2	17,6	15,1	11,6	9,3	6,0
800	39,9	33,8	29,5	26,2	23,6	19,7	16,9	13,1	10,6	6,7
1.000	41,4	35,2	30,7	27,2	24,5	20,5	17,7	13,7	11,1	7,1
2.000	45,3	38,6	33,7	29,9	27,0	22,6	19,5	15,3	12,5	8,2
4.000	47,8	40,6	35,5	32,6	28,5	23,9	20,6	16,2	13,3	8,8
8.000	51,8	44,1	38,5	34,3	31,0	26,0	22,5	17,8	14,6	9,8
10.000	53,4	45,5	39,8	35,4	32,0	26,9	23,3	18,4	15,1	10,2
20.000	56,7	48,3	42,3	37,7	34,0	28,7	24,8	19,7	16,2	11,0
40.000	59,2	50,5	44,2	39,4	35,6	30,0	26,0	20,6	17,0	11,7
80.000	63,5	54,1	47,3	42,2	38,2	32,2	27,9	22,2	18,4	12,7
100.000	64,3	54,8	48,0	42,8	38,7	32,7	28,3	22,3	18,7	12,9
200.000	68,7	58,5	51,2	45,7	41,3	34,9	30,3	24,1	20,1	14,0

Fuente: ICPC.

- **Subrasante.** Su resistencia se evalúa por el CBR, ensayo ASTM D-188. Como el ensayo se efectúa sobre muestras saturadas, algunos ajustes se hacen para subrasantes cuya saturación no se espera. Para profundidades del nivel freático mayores de 60 cm bajo superficie de la subrasante el ajuste es: Para valores de CBR de 2 o menos, incrementar el CBR en 1; para valores de CBR entre 3 y 10 incrementar el CBR en 2; para CBR mayores de 10 no es necesario efectuar cambios.
- Los espesores para bases estabilizadas se determinan dividiendo el espesor de diseño requerido para bases granulares sin liga por el factor apropiado de equivalencia para el tipo de material estabilizado, por ejemplo el factor de equivalencia de una base tratada con cemento de alta calidad (CTB) se toma usualmente como 1,65 (1" de CTB es equivalente a 1,65" de base granular de alta calidad). Así de este modo, si 11,5" (290 mm) de base tratada es determinada, el espesor requerido de CTB es $11,5/1,65 = 7.0"$ (175 mm).

Los espesores mínimos sugeridos para capas de base sin liga o estabilizados son 100 mm para la mayoría de condiciones y 150 mm para situaciones de cargas pesadas.

- **Acción de las heladas.** Cuando pueda esperarse penetración de hielo en las capas de arena, se deberá considerar en el diseño las consecuencias de la acción de las heladas, las cuales se manifiestan por dos mecanismos que se mencionaron en el Método de la National Concrete Masonry Association (NCMA).
- **Diseño de espesores.** En el proceso se determinan los espesores de la capa de base y subbase; en cuanto al espesor del adoquín, la práctica ha determinado el empleo de adoquines de 60 mm para tránsito liviano, 80 mm de espesor para pavimentos que transportan camiones y vehículos pesados, y 100 o 120 mm para situaciones de cargas muy pesadas (ESAL mayor de los $1,5 \times 10^6$).

En la parte inferior de la tabla 26 se muestra los espesores requeridos para cargas de industria pesada en las que el tránsito ha sido evaluado en términos de las cargas equivalentes del CATERPILLAR 988B. Si hay una mezcla de cargas pesadas tabla 27 con otro tránsito evaluado por ESAL tabla 25, este último puede ser convertido a cargas equivalentes del CATERPILLAR 988B con el uso de la tabla 28.

3.2.1.11 Método de diseño de U.S Army Corps of Engineers (COE). El COE ha adoptado un procedimiento de diseño para pavimento de adoquines que combina su método corriente de diseño de CBR con un equivalente de espesores para incorporar la superficie de adoquines.

Tabla 27. Categorías de tránsito típicas para diseño y ESAL.

CATEGORÍA TRÁNSITO	TRÁNSITO DE DISEÑO	REPETICIÓN DE ESAL *
A	Senderos, parqueo de automóviles	100.000
B	Calles residenciales menores (hasta 25 TPDC) Calles residenciales y colectoras (25 a 500 TPDC)	4000.000
C	Áreas de almacenaje y áreas industriales livianas	600.000
D	Áreas industriales de medio - pesada (500 a 1000 TPDC**)	1.500.000
E	Áreas industriales de servicio pesado (1.000 a 1.500 TPDC**)	

* Vida de diseño en ejes estándar de 8,2 t.

** Tránsito promedio diario de camiones, excluyendo camionetas.

VEHÍCULO	PESO VEHÍCULO	NÚMERO DE LLANTAS	CARGA EJE SENCILLO	FACTOR EQUIVALENTE
Caterpillar 988B*	74,0 t	4	29,6 t	1,00
Hyster 700 *	80,0 t	6	20,2 t	0,80
Kalmar*	91,5 t	6	21,5 t	2,13
Clark C500*	88,7 t	6	20,3 t	1,65
Taylor 66*	95,0 t	6	22,2 t	1,76
Cargador Clark 512	69,0 t	6	12,5 t	0,28
Cargador ferranti	100,8 t	4	25,2 t	0,60
Grúa elevadora 80 t	123,2 t	4**	31,2 t	3,64
Grúa móvil de 80 t	53,3 t	12	4,5 t	0,50

Fuente: ICPC.

* Montacargas

** Cuatro patas fijas para sostenimineto

Tabla 28. Conversión de ejes estándar equivalente (ESAL) a equivalentes de carga Caterpillar 988B9

EJES DE CARGA ESTÁNDAR Equivalente (ESAL)	CBR DE LA SUBRASANTE								
	2	3	4	5	6	8	10	15	20
10.000	16	16	16	16	15	13	11	6	2
40.000	25	24	24	24	23	20	16	9	3
100.000	33	32	32	31	30	26	21	10	3
400.000	49	48	48	47	44	38	31	14	4
1 x 10 ⁶	64	63	63	61	58	49	39	17	4
4 x 10 ⁶	97	95	94	91	87	73	57	23	5
10 x 10 ⁶	130	125	122	119	113	94	73	29	5
40 x 10 ⁶	195	187	181	177	167	139	106	39	6
100 x 10 ⁶	250	240	234	230	217	179	135	47	7

Fuente: ICPC.

- **Bases del diseño.** El pavimento flexible más común consiste en una superficie de concreto asfáltico sobre capas de calidad decreciente, normalmente la base y subbase encima de la subrasante; esto en contraste con un pavimento rígido, el cual se basa en la flexión de una losa de concreto para transmitir las cargas a la subrasante.

Dado que los pavimentos de adoquines transmite las cargas y fallan lo mismo que los pavimentos flexibles, la modificación del procedimiento de diseño existente del COE para pavimentos flexibles parece ser el procedimiento más apropiado de diseño de pavimentos de adoquines.

El COE Adoptó las sugerencias hechas por Knapton después de sus estudios que determinaron que el diseño de recubrimientos con adoquines de concreto y la capa de arena, pudieran ser considerados como equivalentes a 160 mm del concreto asfáltico convencional, valor que se redondeo a 165 mm. El cálculo del espesor del adoquín no se hace en el diseño sino que es seleccionado según el tipo y peso de los vehículos que utilizarán el pavimento.

Además de lo anterior el método del COE evalúa la resistencia de cada capa en términos del CBR. La teoría elástica propuesta por Boussinesq se utiliza para determinar la distribución de esfuerzos dentro del pavimento.

- **Aplicación.** El COE diseña vías, calles y áreas de almacenamiento convencionales, en términos de un índice de diseño, el cual depende de el tipo de vehículos y de la cantidad de tránsito que el pavimento soportará, el índice de diseño se define en la tabla 29 y se suministran algunos espesores de adoquines de concreto recomendados.

Tabla 29. Definición del índice de diseño.

INDICE DE DISEÑO	DESCRIPCION TRÁNSITO TIPICO	EJE DE CARGA EQUIVALENTE	ESPESOR ADOQUIN
1	Solo vehículos pasajeros, sin camiones	$3,10 \times 10^3$	60 mm
2	Hasta 950 v/d* con hasta 10% de camiones de 2 ejes.	1.35×10^4	80 mm
3	Hasta 2.500 v/d* con hasta 10% de camiones de 2 ejes.	5.90×10^4	80 mm
4	Hasta 4.200 v/d* con hasta 14% de camiones de 2 ejes y 1% de 3 ejes.	2.60×10^5	80 mm
5	Hasta 5.800 v/d* con 14% de camiones de 2 ejes y 1% de 3 a 5 ejes.	1.15×10^6	80 mm
6	Hasta 5.300 v/d* con 15% de camiones de 2 ejes y 10% de 3 a 5 ejes.	$5,00 \times 10^6$	80 mm
7	Vehículos cargados de 22.4 t y montacargas de 13.4t.	2.25×10^7	80 mm
8	Vehículos cargadas de 35.8 t y montacargas de 22.4 t.	1.00×10^8	80 mm
9	Hasta 10 repeticiones por día de vehículos cargados de 54 t.	4.40×10^8	100 mm
10	Hasta 100 repeticiones por día de vehículos cargados de 54t.	2.00×10^9	

Fuente: ICPC.

* Vehículos por día

El eje simple estándar equivalente es de 8.2 t.

3.3 MÉTODO DE DISEÑO DEL ICPC PARA PAVIMENTOS DE ADOQUINES DE CONCRETO.

3.3.1 Parámetros de diseño. En el caso de los pavimentos de adoquines la capacidad estructural de la superficie de rodado esta dada fundamentalmente por la transmisión de esfuerzos entre elementos vecinos.

Los pavimentos de adoquines tienen un comportamiento inicial diferente al que

tienen cuando la estructura ha sufrido el proceso de compactación de la arena de apoyo y de generación de los mecanismos de transmisión de cargas entre los adoquines. Inicialmente, los pavimentos de adoquines, comparados con los pavimentos con superficie de concreto asfáltico, presentan deformaciones más altas, pero después de ser solicitados más de 1.000 veces por una carga de llanta de 5.000 kg., las deformaciones son menores.

Una vez se logra su comportamiento estructural como una superficie continua íntegra, que atiende las cargas de una manera solidaria entre el adoquín solicitado y sus vecinos, se puede concebir el pavimento de adoquines como una estructura de capas homogéneas, elásticas e isotrópicas cuyo comportamiento se puede predecir con base en las propiedades mecánicas de cada capa.

Aunque lo más importante es comprender el funcionamiento del pavimento como una superficie continua y no como una serie de elementos discretos, se ha dado también desarrollos importantes, para establecer los esfuerzos y deformaciones generados en las juntas entre adoquines; para ello se ha recurrido a los modelos por elementos finitos en los cuales se simplifica la estructura sustituyendo las fuerzas de fricción entre los adoquines, por una serie de resortes de cortante o amortiguadores y con base en las condiciones de borde y en las ecuaciones de compatibilidad se encuentran los componentes de fuerzas y los desplazamientos sufridos por el adoquín y sus juntas.

Por medio de ensayos se ha logrado establecer que los adoquines y la arena pueden absorber hasta el 65 % de los esfuerzos aplicados.

Podemos hablar de que la estabilidad de la estructura será función de la rigidez de las capas superiores y del potencial de cambio volumétrico de las inferiores. El asentamiento excesivo de la subrasante producirá la deformación general de toda la estructura y su falla eventual, no obstante la buena calidad de la base y la capa de rodadura.

Los ensayos de Knapton y otros investigadores han demostrado que por efecto de la transmisión de esfuerzos verticales entre adoquines, las presiones aplicadas sobre la superficie del pavimento pueden llegar a reducirse en un 40% a nivel de la subbase, haciendo con esto evidente la capacidad estructural de esta capa.

El mecanismo que permite la transmisión de esfuerzos entre los adoquines se denomina “trabazón” y se le define como la capacidad de estos elementos para resistir un desplazamiento relativo con respecto a sus vecinos. Esto se traduce en la transmisión de cargas superficiales aplicadas en áreas pequeñas, ampliándolas a áreas más extensas de la capa de subbase manteniendo las presiones en la subrasante dentro de límites admisibles. Esta propiedad va mejorando con el uso, produciendo progresivamente un estado de trabazón total llamado “hermeticidad”, la capa de rodadura va adquiriendo mayor rigidez y los adoquines dejan de

constituir una mera capa de desgaste para transformarse en una capa estructural. Una vez alcanzada la condición de “hermeticidad”, el pavimento logra una condición de equilibrio que no es afectada significativamente, ni por el volumen de tránsito ni por la magnitud de las cargas por rueda, dentro de un rango de 2,4 a 7 toneladas.

En la trabazón podemos distinguir tres tipos fundamentales:

- **Trabazón vertical.** Se consigue a través de la arena que rellena las juntas entre adoquines, este material proviene, en primer lugar, de la capa de arena de sienta desde la cual asciende durante la vibración de los adoquines en promedio unos 25 mm, relleno el perímetro inferior de los bloques, y en segundo lugar del material de sello esparcido y compactado al finalizar la construcción del pavimento. Una vez obtenida esta trabazón la carga del adoquín puede transmitirse por esfuerzos de corte a sus vecinos.
- **Trabazón rotacional.** Una carga, aplicada asimétricamente sobre un adoquín tiende a hacerlo rotar. Para que ello suceda, es necesario que dicho bloque desplace lateralmente a sus vecinos, sin embargo, si estos están impedidos de desplazarse mediante una restricción en los bordes del pavimento, se consigue la trabazón rotacional.
- **Trabazón horizontal.** Las fuerzas horizontales de aceleración o frenado pueden producir un lento desplazamiento horizontal de los adoquines a lo largo de la huella principal de la calzada, y las presiones generadas, pueden llegar a romper las esquinas de los adoquines. Este fenómeno puede reducirse en gran medida aparejando los adoquines en “espina de pescado”, y más aún si se emplean adoquines de caras dentadas. El “corrimiento” no puede ser eliminado totalmente en sectores de frenaje severo pero las medidas propuestas minimizan sus efectos evitando la rotura de adoquines y una mala impresión visual.

3.3.1.1 Capacidad portante de la subrasante. La causa principal de fallas en los pavimentos de adoquines son las deformaciones permanentes originadas por las tensiones de corte que se producen al paso de vehículos. Desde este punto de vista, la correcta determinación de la resistencia admisible del terreno es casi más importante que el diseño mismo de los espesores de pavimento, la capacidad portante de la subrasante sobre la que va a estar apoyado el pavimento, se evalúa mediante los ensayos de California Bearing Ratio, CBR (Relación de Soporte de California) o de k (Módulo de Reacción de la Subrasante); los ensayos para determinar el CBR “in situ” proporcionan valores con la densidad y el grado de humedad existente en el momento de realizar la prueba, y no en condiciones de saturación total, que es el valor empleado para el diseño, por ser el más desfavorable. Se puede mejorar el ensayo saturando el suelo por 24 horas o más, sin embargo esto no siempre se consigue y los valores obtenidos del CBR en esas

condiciones son más elevados.

Si se tiene seguridad del CBR en estado de saturación y al mismo tiempo se puede anticipar que las condiciones reales del terreno durante su vida estructural nunca alcanzarán esos límites, se pueden hacer algunos ajustes al CBR para efectos de diseño:

Si el nivel freático esta comprendido dentro de los 60 cm bajo el nivel de la plataforma, es mejor mantener el valor del CBR saturado.

Si dicho nivel esta por debajo de los 60 cm bajo la plataforma, el CBR de diseño puede mejorarse tal como se indica a continuación:

▪ **Mejoramiento del CBR si no hay napa superficial.**

CBR de diseño saturado	Mejoramiento en CBR de diseño
2 % o menos	+1%
3 a 10 %	+2%
10 % o más	no se recomienda cambio

Si no se dispone de medidas directas de la capacidad resistente del suelo de fundación puede obtenerse mediante el conocimiento del tipo de suelo (según las clasificaciones UNIFICADA O AASTHO) y sus condiciones de humedad, pueden servir como guía.

El gráfico 4, nos permite relacionar ambas clasificaciones con los resultados de los dos ensayos propuestos, de tal manera que cualquiera que sea la forma como se disponga la información, se puede utilizar directamente como valor de CBR en la ecuación de diseño de espesores y en la tabla 30 “Diseño Simplificado de pavimentos de adoquines de concreto”, en la cual se han agrupado los suelos en tres categorías:

De baja capacidad de soporte: Con altos contenidos de arcilla o limo; en estado húmedo son blandos y tienen un CBR menor o igual a 3%.

Tabla 30. Diseño simplificado de pavimentos de adoquines de concreto.

CLASIFICACIÓN DE LA VÍA	SERVICIO SECUNDARIA	SERVICIO PRIMARIA	COLECTOR A	ARTERIA
NUMERO DE VEHÍCULOS COMERCIALES POR DÍA Y POR CARRIL (NVDCD)(a)	1 A 5	6 A 20	21 A 60	61 A 200
NUMERO DE EJES EQUIVALENTES DE 8,2 TONELADAS DURANTE EL PERIODO DE ANÁLISIS	DE 1 A 50.000	DE 50.001 A 500.000	DE 500.001 A 2.500.000	DE 2.500.001 A 15.000.000
ESPESOR DE LOS ADOQUINES EN MILÍMETROS (mm)	60 U 80	60 80	80	80

TIPO DE BASE	CAPACIDAD DE SOPORTE DEL SUELO, CBR (%)	ESPESOR DE LA BASE (mm)			
--------------	---	-------------------------	--	--	--

	CBR <= 3	150(b)	230 180	260	330
GRANULAR	3 < CBR <= 15	(b)	(b)	(b)	140(b)
	CBR > 15	100(b)	100(b)	100(b)	100(b)
	CBR <= 3	100(c)	140 110	160	210
SUELO CEMENTO	3 < CBR <= 15	(c)	(c)	(c)	(c)
	CBR > 15	75(c)	75(c)	75(c)	75(c)

Fuente: ICPC.

(a) VEHÍCULO COMERCIAL: Aquel con dos o más ejes y 6 o más llantas, en ambos casos incluyendo el eje direccional (delantero). No se tiene en cuenta los buses.

(b) ESPESORES MÍNIMOS PARA BASES GRANULARES: 150 mm si CBR de la subrasante es <= 6%
100 mm si CBR de la subrasante es > 6%

(c) ESPESORES MÍNIMOS PARA BASES DE SUELO CEMENTO: 100 mm si CBR de la subrasante es <= 6%
75 mm si CBR de la subrasante es > 6%

De regular capacidad de soporte: Casi siempre arenosos con algún contenido de limo y arcilla; moderadamente estables en estado húmedo; con un CBR mayor que 3 y menor igual que 15%.

De buena o excelente capacidad de soporte; Arenas o cascajos limpios o limosos, bien o mal gradados; estables aún en estado de saturación; con un CBR mayor que 15%.

Si bien estos tres rangos cubren la totalidad de los suelos, la mayoría se encuentra dentro de los dos primeros.

Cuando se tienen suelos con un CBR menor que 3% puede resultar más económico mejorar la calidad a la subrasante, mediante una estabilización con cemento, para suelos arcillosos, que colocar el espesor de base que se necesite. En estos casos el drenaje no es una solución adecuada debido a su baja permeabilidad.

Para otro tipo de suelos con valores de CBR de 1%, se deberá remover y reemplazar el material existente por material granular de CBR $\geq 15\%$ con un espesor de 60 cm, para suelos con CBR 2 a 4% el espesor a remover será de 25 cm, debiendo emplearse material granular de CBR $> 10\%$

En estos casos el CBR a usar en el diseño de la subbase será de 5% en el caso de pavimentos urbanos y 3% en el caso de pavimentos industriales.

En suelos finos de CBR muy bajos (0,5 a 3%), se puede aplicar directamente sobre la subrasante perfilada, un geotextil de características anticontaminantes que evite el descenso del material grueso de la subbase hacia la subrasante e impida el ascenso de los finos además, por su resistencia a la tracción ayuda a repartir las cargas en áreas más amplias y drena el agua a través del tejido, en este caso para diseño el CBR puede ser aumentado en 1%, sin perjuicio del aumento debido al mejoramiento del suelo cuando corresponda.

En la evaluación de la capacidad portante debe intervenir un laboratorio de mecánica de suelos que entregue, al ingeniero diseñador, no una evaluación puntual sino un recuento de la calidad del suelo, a lo largo de la vía. El número y el lugar de los muestreos son parámetros técnicos que no se deben dejar al azar sino que deben programar de común acuerdo entre el diseñador y quienes realizan el estudio.

La construcción de la Subbase o base en el pavimento, con el fin de absorber las presiones que recibe de las capas superficiales y las transmite uniformemente al terreno de fundación; es de sumo cuidado así como la determinación de su espesor que se constituye en una variable importante en el diseño, para ello se presentan gran cantidad de métodos.

Para subbases o bases granulares en la figura tenemos curvas que están basadas en una revisión crítica de los diversos métodos de diseño que se han propuesto y relacionan el espesor mínimo recomendado para ellas con el CBR del suelo y el tráfico que deberá soportar el pavimento.

En numerosos casos es conveniente emplear subbases y/o bases estabilizadas con cemento en lugar de subbases de material granular.

Es recomendable emplear bases tratadas si se desea impedir la penetración de agua superficial al suelo de fundación, si esta es susceptible de deterioro en su capacidad resistente con la humedad; además exigen un menor espesor equivalente que el correspondiente al subbases granulares. Este menor espesor compensa en muchos casos el costo que significa el tratamiento, con una economía en excavaciones y en rellenos compactados.

Para efectos de diseño, se puede suponer que 1 cm de material estabilizado con cemento es equivalente a 1,6 cm de material granular compactado (de CBR 50%).

Esto nos permite hacer combinaciones de bases estabilizadas con subbases de material granular, por ejemplo, una subbase de material granular de 30 cm de espesor podría ser reemplazada por una subbase tratada con cemento de 19 cm de espesor, o bien, por una combinación de 10 cm de material tratado (16 cm equivalente en material granular) más una subbase granular de 14 cm.

La resistencia mínima a compresión del material granular tratado debe ser de 45 kg./cm² a los 7 días. Para obtener esta resistencia se requiere del orden de 70 kg. de cemento por m³ de subbase. El espesor mínimo recomendado para bases tratadas con cemento es de 10 cm.

Es conveniente tener presente que existen otros factores que pueden ser también incluidos en el diseño, como: color, textura, forma y la colocación, son aspectos eminentemente estéticos y merecen ser tenidos en cuenta por el diseñador.

3.3.1.2 El tráfico. Es junto con la capacidad portante de la subrasante la otra variable que determina el espesor del pavimento. Para este método de diseño, el tráfico se evalúa como el Número de diseño Relativo al tráfico (NDT), que opera como un simplificador, cuya función principal es convertir la carga de todos los vehículos con cualquier peso y configuración de ejes, en cargas equivalentes a las de vehículos con dos ejes tales que el posterior esté dotado de cuatro llantas y soporte una carga de 8.200 kilos.

Siendo el $NDT = NV \times FC \times FPV$, es necesario conocer:

- El Número de Vehículos (NV) que como promedio diario se espera que circulen por el carril de diseño en el primer año de servicio del pavimento.

- La configuración de sus ejes y la magnitud de las cargas que llevan, con el fin de determinar el factor camión (FC) y
- El crecimiento anual del tráfico como factor de proyección de vehículos (FPV).

El Número de Vehículos (NV) se obtiene mediante conteos en vías similares a las que se van a pavimentar. Para ello se selecciona un periodo lo suficientemente largo, por lo menos siete días, durante el cual se determina el número promedio diario, por carril, de los vehículos comerciales (buses y camiones) que utilizarán la vía en el periodo escogido.

El Factor Camión (FC) se encuentra sumando los cocientes, elevados a la cuarta potencia, entre el peso dado (en toneladas) de cada uno de los ejes de todos los vehículos comerciales y 8,2, 14,5 o 18,2, según tengan dichos ejes una configuración sencilla, tandem o tridem respectivamente, y dividiendo dichos cocientes por el número de vehículos que se han pesado así:

$$FC = \frac{\left[\frac{\text{peso por ejesencillo}}{8.2} \right]^4 + \left[\frac{\text{peso por ejetandem}}{14.5} \right]^4 + \left[\frac{\text{peso por ejetridem}}{18.2} \right]^4}{\text{númerodevehículos}}$$

El crecimiento anual del tráfico (FPV) es un factor que se obtiene mediante la expresión:

$$FPV = \frac{(1 + i)^n - 1}{20 i}$$

En donde:

n = Número de años que se ha tomado para el periodo de análisis del tráfico.

i = Crecimiento anual del tráfico expresado como un porcentaje (%)

Se establece que un crecimiento del 4% anual del tránsito, es aconsejable ya que para el diseño valores menores o mayores no alteran en forma sustancial el resultado, sin embargo si se trata de crecimientos mayores, y se dispone de datos de distribución de tráfico, se recomienda un análisis más detallado.

3.3.1.3 El periodo de diseño (Periodo de análisis del tráfico). Es el periodo, a partir de la puesta en servicio del pavimento, para el cual se evalúa el tráfico que va a soportar la vía y al final del cual se espera que el nivel de servicio sea al menos de 2,5 según el Ensayo Vial AASTHO. Este último requisito permite que

casi siempre la vida útil real del pavimento sea mayor que la de diseño pues comúnmente solo se considera “acabado” un pavimento cuando ya es intransitable.

Casi siempre los periodos de diseño se fijan teniendo en cuenta solamente las asignaciones presupuestales disponibles para la construcción y no las economías reales de la permanencia de la estructura y de los costos de mantenimiento. En el pavimento de adoquines la influencia del periodo de diseño en el espesor de la estructura solo es considerable para valores de CBR muy bajos; por esto se aconseja tener periodos de diseño de 20 años, aunque pueden ser menores o mayores. Se debe anotar que cuando se a efectuar un análisis de alternativas equivalentes para pavimentación, el tener periodos de diseño iguales para cada alternativa se considera como uno de los requisitos mínimos.

En el diseño del pavimento con los parámetros de diseño ya determinados expresados como CBR y NDT se calcula el Espesor de Base (FB) del material que se tenga para la construcción de esta, con la fórmula:

$$EB = \left[\left[\frac{233.4 + 100 \text{Log} NDT}{CBR^{0.4}} \right] - 160 \right] x (FD)$$

Valor este que se debe ajustar al inmediatamente superior que sea múltiplo de 5

El Factor Base (FB) es un valor que nos permite transformar un espesor determinado de concreto asfáltico en otro de diferente material, que aporte la misma capacidad estructural. En este método de diseño se consideran dos tipos: Bases de suelo cemento y Bases Granulares, cuyos FB son 1,2 y 2 respectivamente, cuando estas cumplen con los requisitos establecidos para bases.

Los métodos de diseño se han desarrollado sobre el espesor patrón de 80 mm, permitiendo bajo diferentes criterios, la utilización de piezas de diferentes espesores. Se ha tomado como espesor mínimo 60 mm pues adoquines más delgados tienen muy poca capacidad de transferencia de cargas. La incidencia del espesor en el funcionamiento del pavimento se ha determinado experimentalmente con base en tramos de ensayo. En dichos ensayos se ha tomado como patrón el adoquín de 80 mm de espesor y se ha encontrado que bajo las mismas cargas los pavimentos construidos con adoquines de 60 mm y 100 mm presentan una deformación mayor del 6% y una menor del 3% respectivamente, es decir, que la diferencia de comportamiento entre los adoquinados construidos con piezas de 60 mm y 80 mm de espesor es mayor que la de los construidos con piezas de 80 mm y 100 mm.

Se pueden utilizar adoquines de 60 mm para tráfico peatonal, y vehicular hasta

50.000 ejes estándar reemplazando directamente los 80 mm supuestos en el método de diseño. Para tráficos entre 50.001 y 500.000 ejes estándar se podrán utilizar adoquines de 80 mm, o 60 mm compensando esta reducción en el espesor en el espesor de las piezas con un aumento en el espesor de la base, equivalente a 50 mm de base granular de buena calidad. Para tráficos mayores de 500.000 ejes se utilizarán adoquines de 80 mm. Adoquines de 100 y 120 mm solo serán necesarios en pavimentos para más de 15.000.000 de ejes estándar o para pavimentos clasificados dentro de la c categoría de cargas especiales.

3.3.2 Utilización tabla 30 para diseño simplificado de pavimentos de adoquines de concreto. La tabla 30 esta concebida como una ayuda para el diseño de pavimentos de adoquines de concreto en las vías urbanas, donde es muy difícil determinar el peso de los automotores; por ello se opto por una clasificación según el número de vehículos comerciales, por día y por carril (NVCDC) que en promedio diario han de circular por ellas en el primer año de su utilización tal como se estableció en los parámetros de diseño.

3.3.3 Clasificación de las vías.

- **Vías de servicio secundarias.** Son aquellas de poca longitud cuya función principal es la de dar acceso directo a las edificaciones. Prestan servicio al tráfico generado por 30 predios como máximo, con un NVCDC de 5 o menos.
- **Vías de servicio primarias.** Reciben los vehículos de varias vías de servicio secundarias. Prestan servicio al tráfico generado por 150 predios como máximo y el NVCDC esta dentro de 6 y 20.
- **Vías colectoras.** recogen el tráfico de las vías de servicio primarias y secundarias de una área determinada y lo conducen a un sistema de vías de mayor rango, su longitud puede ser considerable y el NVCDC varía entre de 21 y 60.
- **Vías arterias.** pueden tener varios kilómetros de longitud y su función es canalizar el flujo de vehículos entre zonas de uso residencial, industrial y comercial. El tráfico diario puede ser de aproximadamente 6.000 vehículos en ambas direcciones y el NVCDC oscila entre de 61 y 200.

Para cada clasificación de la vía según la capacidad de soporte del suelo la tabla de diseño simplificado determina, el espesor del adoquín y el de la base, bien sea granular o de suelo cemento.

A las estaciones de servicio (bombas de gasolina) se les podrá construir pavimentos equivalentes a los de vías de servicio primarias o a los de vías colectoras según que su tráfico preferencial sea automóviles o de camiones respectivamente.

La tabla de diseño simplificado fue establecida para un periodo de 20 años; si se quiere utilizar para periodos de diseño diferentes, se corregirán los espesores de bases así: 4 mm de incremento o reducción en el espesor de bases de suelo cemento por cada 5 años de aumento o disminución de periodo de diseño, respectivamente y 8 mm en el caso de bases granulares.

Otro método que nos permite, con sencillez, diseñar nuestro pavimento. Parte de la consideración del tipo de subrasante existente, por medio de su CBR; se tiene que para valores de CBR menor a 5 se debe hacer una mejora en los espesores que van de 600 mm para CBR del 1% a 250 mm para CBR del 4%, como aparece en la tabla 31. Con esto se igualan las opciones a un CBR de más de 5%. Luego se especifica una subbase, dada en espesores para Material Granular para Base, Categoría 1, aunque se pueden transformar en espesor de material granular para base, Categoría 2 (subbase). Para valores de CBR entre 6 y 10 se compensa en la subbase la no existencia de la subrasante mejorada. Esta subbase hace parte de la estructura del pavimento como tal.

Luego se entra a considerar si la vía va a soportar el tráfico de construcción, según cuatro categorías, entre 1 y 5000 ejes estándar, para los cuales hay que proveer un espesor adicional de material expresado en función de material granular para subbase Categoría 2 entre 25 y 100 mm. Si las edificaciones vecinas ya están construidas no se coloca ningún material.

Luego de esto viene el cálculo del espesor de la estructura de base en función del número de ejes estándar que va a soportar el pavimento a lo largo de su vida útil, con categoría de 500.000 a 12.000.000 para tráfico vehicular corriente y de 1 a 1.500.000 para tráfico vehicular liviano. Este espesor se ha dado para dos materiales diferentes: Granular para base, Categoría 1 o estabilizado con cemento, Categoría 1.

Tabla 31. Estructura para pavimentos de adoquines de concreto para tráfico vehicular.

PAVIMENTO DE ADOQUINES PARA TRÁFICO VEHICULAR									
CBR de la subrasante	1	2	3	4	5	6 a 7	8 a 10	11	a
Subrasante mejorada	600	400	300	250	0	0	0	30	
SUBBASE DE:	150	150	150	150	225	200	175	0	
Material Granular Categoría 1									150
Ejes estándar durante la construcción	De 1 a 50		De 51 a 200		De 201 a 500		De 501 a 5000		
SUBBASE DE:	25		50		75		1000		
Material Granular Categoría 1									
EJES ESTÁNDAR ACUMULADOS DURANTE SU UTILIZACIÓN (PERIODO DE DISEÑO)									
Desde:	1	101	1001	10001	100001	500001	1500001	4000001	8000001
Hasta:	100*	1000*	10000*	100000*	500000*	1500000*	4000000	8000000	12000000
RODADURA DE:									
ADOQUINES	60	60	60	80	80	80	80	80	80
CAPA DE ARENA	40	40	40	40	40	40	40	40	40
BASE DE MATERIAL: Una de las siguientes, como espesor único o convertida en varios espesores de diferentes materiales.									
Granular Categoría 1	150	200	310	380	480	530	590	670	720
Estabilizado con cemento Categoría 1	100	150	190	230	290	320	350	400	430

Fuente: ICPC.

* Rangos usualmente designados como tráfico liviano.

4. FABRICACIÓN DE ADOQUINES DE CONCRETO

Si bien se pueden fabricar adoquines de concreto con el método convencional de vaciado en moldes o formaletas, los bajos costos y los altos volúmenes de producción, deseables en un proceso eficiente, han llevado a su mecanización, utilizando máquinas vibrocompresoras para la prefabricación en serie de elementos de concreto.

Las recomendaciones que se anotan han surgido de la experiencia de muchas personas en diferentes lugares del país y de la bibliografía disponible sobre el tema. Sin embargo no se debe generalizar ya que los materiales y equipos de fabricación varían de un lugar a otro, por esta razón se deberá para cada caso realizar el ajuste correspondiente y se establece el proceso de control de calidad.

Los adoquines de concreto deberán satisfacer las especificaciones acordadas entre el comprador y el productor en cuanto a su forma, color, textura, dimensiones y resistencia.

4.1 MATERIALES

- **Cemento.** El cemento para la producción de adoquines cumplirá con las normas sobre especificaciones físicas, mecánicas y químicas. El cemento empacado en sacos se deberá almacenar en un lugar seco preferiblemente cerrado o cubierto con telas impermeables o plásticos que impidan que se humedezca. Las pilas o arrumes de sacos de cemento se deberán conformar, sobre tarimas, cuando el tiempo de almacenamiento haya sido superior a dos meses, salvo previa verificación.
- **Agregado fino.** Es el material que pasa el tamiz ICONTEC 4,76 mm (Nº 4), es decir con granos de un tamaño menor a medio centímetro. Se utiliza, generalmente, la misma arena usada para la elaboración de concreto. Debe ser un material limpio y uniforme y se asegurará de no contaminarla, así como también se impedirá que el agua sature la arena, aspecto que influye directamente en la elaboración de la mezcla.
- **Agregado grueso.** es el material pétreo retenido en el tamiz ICONTEC 4,76 mm (Nº 4), es decir con granos de un tamaño igual o mayor a medio centímetro, para la fabricación de adoquines se recomienda utilizar preferiblemente un agregado grueso con un tamaño máximo de 9,51 mm (3/8") y que en ningún momento sobrepase los 12,7 mm (1/2"). Si el tamaño máximo es igual o menor que el recomendado será más fácil obtener superficies lisas, bien terminadas y el manejo de la mezcla también será más fácil; si por el contrario el tamaño máximo del agregado es mayor, se dificultara el manejo de

la mezcla y tenderán a aparecer irregularidades en el acabado de los adoquines.

4.2 GRANULOMETRÍA DE LOS AGREGADOS

Se recomienda buscar una granulometría completa (arena y agregado grueso) lo más cercana posible a la siguiente:

Tabla 32. Granulometria de los agregados.

TAMIZ		
NORMA ICONTEC 32	DESIGNACIÓN ALTERNA	% QUE PASA (EN PESO)
12,70 mm	1/2"	100
9,51 mm	3/8"	100
4,76 mm	Nº 4	85
2,38 mm	Nº 8	65
1,19 mm	Nº 16	50
595 µ	Nº 30	35
297 µ	Nº 50	15
149 µ	Nº 100	5
74 µ	Nº 200	3

Fuente: ICPC.

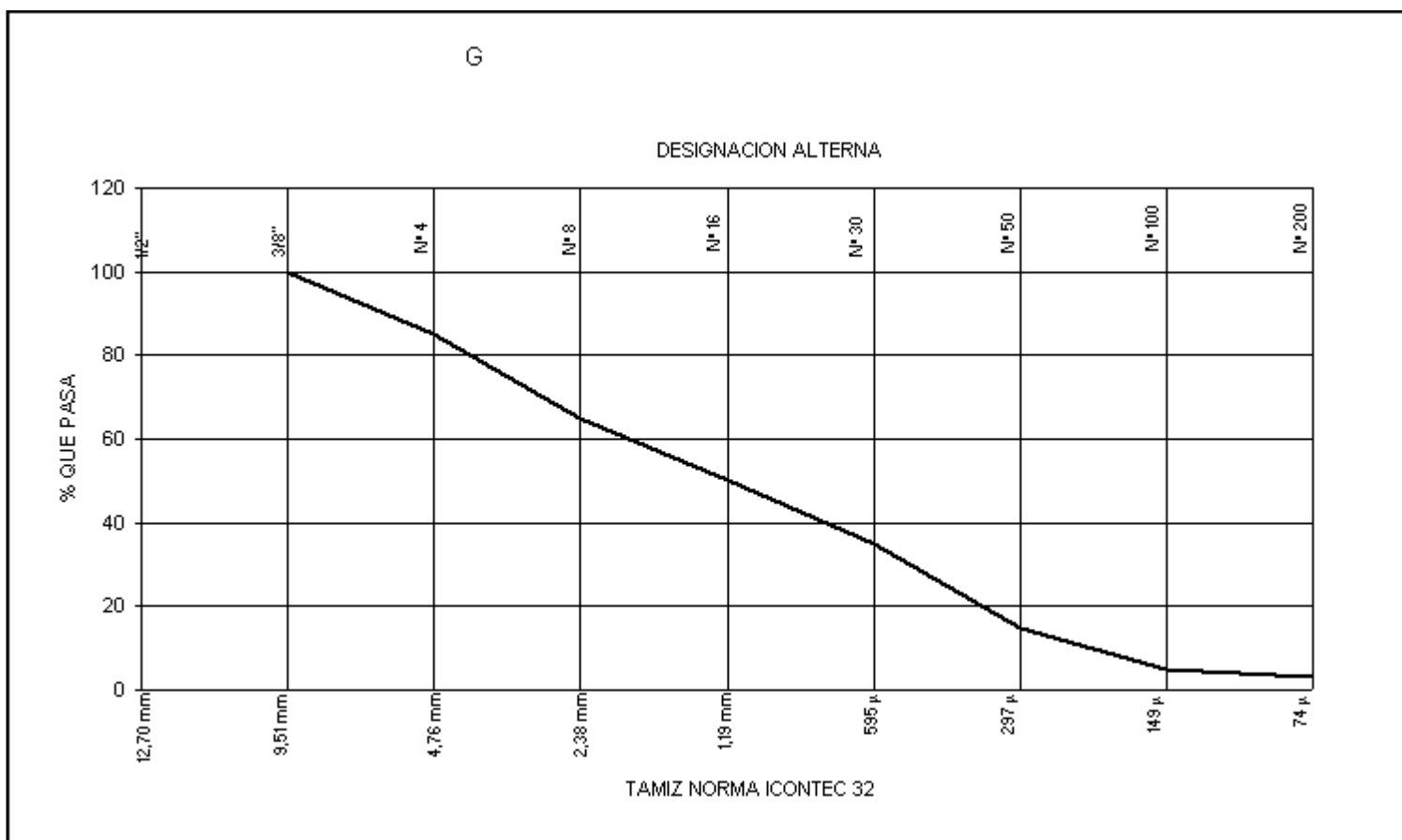
El agua de mezclado, como ya se había dicho, será limpia, sin contaminantes. Por lo general el agua potable es apta para ser utilizada como agua de mezcla así como también para el curado de los adoquines. Se recomienda utilizar en la mezcla una relación agua/cemento cercana a 0,35.

En el supuesto caso de utilizar colorantes estos deben ser minerales, estables, en forma de polvo. Por lo general su contenido va del 1% al 5% de la cantidad de cemento en peso, con un máximo de 10%. Con este tipo de pigmentos no se altera la resistencia del concreto, siempre y cuando la relación agua-cemento mantenga constante, por lo cual no se debe añadir pigmentos disueltos en agua, sino que se debe considerar como un agregado fino adicional a la mezcla.

Si se utiliza una mezcladora se recomienda echar primero los agregados seguidos por el colorante, mezclarlos durante un minuto y luego adicionar el cemento, mezclando por un minuto más antes de agregar el agua.

La intensidad del color de los adoquines aumenta con la cantidad de colorante adicionado, hasta el punto de saturación que se logra con una proporción cercana a una parte de colorante por 20 de cemento (5%), en peso.

Figura 5. Granulometría completa de agregados (arena y agregado grueso).



Fuente: ICPC.

Los aditivos que por alguna razón se utilicen cumplirán lo establecido en la Norma ICONTEC “Aditivos químicos para hormigón” y se incorporarán al concreto previamente disueltos en el agua de mezcla. Para su dosificación y utilización se deberá seguir las recomendaciones del fabricante del aditivo. Los más utilizados son los superplastificantes en proporciones entre el 1 y el 2 % del contenido de cemento, en peso, para fluidificar la mezcla, obtener mayor densidad y mejor acabado, manteniendo baja la relación agua cemento.

4.3 PROPORCIONES Y MEZCLA DE LOS MATERIALES

Cuando los materiales (agua, cemento, arena y agregado grueso) se van a dosificar por peso se recomienda utilizar las proporciones 0,35 : 1 : 4,5 : 0,8 es decir por cada medida de cemento 0,35 de agua, 4,5 de arena y 0,8 de agregado grueso. Si se dosifica por volumen las proporciones serán 0,5 : 1 : 3,2 : 0,6 es decir por cada porción de cemento, 0,5 de agua, 3,2 de arena y 0,6 de agregado grueso.

Se recomienda utilizar un contenido de cemento cercano a los 380 kg/m³.

Estos datos no son más que una guía para iniciar la producción. Según la limpieza y el tamaño de los agregados disponibles, el tipo y la duración del vibrado, la cantidad de material que se coloque en el molde, el método y periodo de curado que se emplee, se obtendrá diferentes resistencias, por lo cual se deberán modificar las proporciones de la mezcla según se requiera.

La cantidad de agua que se deba agregar a la mezcla depende fundamentalmente de la humedad que tengan los agregados y de la forma de estos. Mezclas con exceso de humedad generan burbujas en la cara superior de los adoquines contra los martillos compactadores, y al sacarlos del molde las caras verticales se comban; pero mezclas muy secas tienen muy poca cohesión y los adoquines, al salir del molde, se pueden fisurar o desbordar fácilmente; pueden quedar con huecos en su cara superior o dejar parte de la mezcla pegada a los martillos compactadores y además, ser muy sensibles al manejo brusco durante las primeras horas después de elaborados.

Aunque la mezcla de los materiales se puede hacer a mano, se obtendrá un incremento apreciable en la resistencia si se hace con una mezcladora, durante un periodo aproximadamente de dos minutos.

4.4 RESISTENCIA

Los adoquines de concreto tendrán en el momento de la utilización una resistencia tal que sean capaces de soportar, sin partirse, el tráfico de vehículos pesados, y no se desgasten con la abrasión producida por las llantas de los vehículos.

La buena calidad de un adoquín se verifica mediante el ensayo descrito en el presente documento, ensayo que permite evaluar todo tipo de piezas y que se puede efectuar fácilmente en cualquier laboratorio de concreto, de pavimentos, e inclusive en algunos laboratorios de suelos.

Cuando la calidad de los adoquines no cumple con los requisitos exigidos, podemos tener una o varias condiciones que obran en contra de la calidad del adoquín, entre ellas:

- Agua de mezcla en exceso o contaminada.
- Agregados con contenidos altos de materia orgánica, fracturados o recubiertos de polvo de trituración.
- Cementos envejecidos. Fisuración de los adoquines
- Contenido de cemento muy bajo.
- Proceso de mezclado deficiente.
- Fisuración de los adoquines al retirarlos del molde o por manejo inadecuado a edades tempranas.
- Condiciones de curado deficientes o por un periodo muy corto.

Teniendo en cuenta de que no ocurra lo descrito anteriormente, se puede lograr no solamente la buena calidad sino la homogeneidad de la producción.

4.5 OPERACIÓN DE LAS MAQUINAS

Para el manejo de cada tipo de máquina se deben seguir las recomendaciones del fabricante; sin embargo, pueden aparecer problemas, fácilmente corregibles, modificando ligeramente la rutina de manejo.

Algunos modelos de máquinas son muy sensibles a las diferencias de los espesores de las placas o tablas sobre las cuales se fabrican los adoquines, lo que ocasionan problemas con el enrase del molde; por lo tanto todas deben tener el mismo espesor según lo recomiende el fabricante de la máquina.

Cuando se termina de llenar el molde y el enrasador no arrastra todo el material sobrante, es una practica común el tratar de acomodar la mezcla vibrando por poco tiempo el molde, sin asentar los martillos compactadores, generalmente esto lleva a que el agregado grueso que este cercano a la superficie se separe y hace que la superficie quede rugosa, con parte del agregado expuesto. Por lo tanto se debe tener cuidado de enrasar bien el molde y aplicar simultáneamente la

vibración del mismo y los martillos compactadores.

Si después de estar operando correctamente la máquina al salir los adoquines del molde la cara superior queda irregular, muy rugosa y aparece gran cantidad de agregado grueso, puede ser que este tenga un tamaño máximo muy grande o se haya dosificado en cantidad mayor a la recomendada.

Se puede fabricar adoquines con mezcla coloreada en todo su volumen o en una capa de solo un centímetro de espesor en la superficie de desgaste, con el fin de disminuir los costos; esto será posible en aquellas máquinas que permitan incorporar la mezcla coloreada mecánica o manualmente, al comienzo o al final del llenado del molde.

4.6 CURADO Y TRANSPORTE

Después de elaborar los adoquines en la máquina, estos deben pasar por los periodos de fraguado, curado y reposo, antes de que estén listos para ser utilizados.

- **Fraguado.** Cuando se retiran de la máquina las tablas o placas, con los adoquines recién elaborados sobre ellas, se deben llevar hasta un lugar donde estos puedan reposar al menos 8 horas, que puede considerarse el tiempo mínimo de reutilización de las placas. Durante este periodo de fraguado, los adoquines no deben sufrir ningún daño y deben estar bajo techo, protegidos de la lluvia, de los rayos directos del sol y de la acción de vientos fuertes, para evitar el secado prematuro de las piezas.
- **Las tablas se deben colocar directamente en el piso.** Encarradas mediante soportes auxiliares o repisas, nunca apiladas sobre los adoquines frescos de las otras, y se debe disponer de suficiente cantidad de tablas como para acomodar la producción de un periodo. Se recomienda iniciar inmediatamente el curado de los adoquines cubriéndolos con láminas plásticas, bien ajustadas contra el piso, que eviten la pérdida acelerada del agua de la mezcla. Después de transcurridas las 8 horas se pueden retirar los adoquines de las tablas para poder reutilizarlas, y conformar arrumes para reasumir el proceso de curado de los mismos.
- **Curado.** El curado también se debe hacer en un recinto donde los adoquines estén protegidos del sol y del viento fuerte. Se puede curar por humedecimiento permanente con agua, de manera que los adoquines no se sequen en ningún momento; cubriéndolos con elementos que eviten la pérdida de humedad.
- **El secado y humedecido repetido a edades tempranas afecta la resistencia de los adoquines.** El curado, se debe hacer durante tres días

como mínimo y preferiblemente siete.

- **Reposo.** después de terminado el curado los adoquines se pueden almacenar en un recinto cubierto o a la intemperie, hasta que alcancen la resistencia especificada según la Norma ICONTEC 2017, respecto del módulo de rotura; momento en el cual se pueden despachar para su utilización.
- **Transporte.** El manejo durante el transporte debe ser el adecuado para que se puedan entregar las piezas de la calidad y apariencia que se requieran. Si los adoquines se cargan desordenadamente en volquetas y se descargan por volteo, las piezas no se deben partir al caer, pero si pueden sufrir despicados o desbordados. El manejo ordenado, a mano, del cargue y descargue de los adoquines puede tomar más tiempo pero da como resultado piezas más perfectas.

5. CONSTRUCCIÓN DE PAVIMENTOS ARTICULADOS

Una vez se haya construido y entregado a satisfacción previo ensayos de laboratorio de las densidades de las capas del pavimento es decir, sub-rasante, sub-base y base; se procede a la construcción del pavimento con adoquines que consiste en la colocación de una capa de arena , la colocación, compactación y confinamiento de los adoquines de concreto y el sello del pavimento, de acuerdo a los alineamientos y secciones indicados en los documentos del proyecto o determinados por el Interventor.

5.1 PREPARACIÓN DE LA SUPERFICIE EXISTENTE

La capa de arena de soporte de los adoquines se extenderá una vez se conozca el chequeo de la densidad y las cotas indicadas, todas las irregularidades que excedan los límites que acepta la especificación correspondiente a dicha unidad de obra, se deberá corregir a acuerdo a lo establecido en ella, a plena satisfacción.

5.1.1 Colocación y nivelación de la capa de arena. La arena se colocará seca y en un espesor uniforme tal que, una vez compactado el pavimento, la capa tenga en espesor entre treinta y cuarenta milímetros (30 mm – 40 mm).

Si la arena sufre algún tipo de compactación antes de colocar los adoquines, se someterá a la acción repetida de un rastrillo para devolverle su carácter suelto y se enrasará de nuevo.

La capa de arena deberá irse extendiendo coordinadamente con la colocación de los adoquines, de manera que ella no quede expuesta al término de la jornada de trabajo.

5.2 COLOCACIÓN DE LOS ADOQUINES

Los adoquines se colocarán directamente sobre la capa de arena nivelada, al tope unos con otros, de manera que generen juntas que no excedan los tres milímetros (3mm).

La colocación seguirá un patrón uniforme, el cual se controlará con hilos para asegurar su alineamiento transversal y longitudinal. Si los adoquines son rectangulares con relación largo/ancho de 2/1, el patrón de colocación será espina de pescado, dispuesto en cualquier ángulo sobre la superficie, patrón que se seguirá de manera continua, sin necesidad de alterar su rumbo al doblar esquinas o seguir trazados curvos. Si los adoquines se colocan en hileras, deberán cambiar de orientación para respetar la perpendicularidad a la dirección preferencial de

circulación.

Los adoquines de otras formas se tratarán de colocar en hileras perpendiculares a la dirección preferencial de circulación, pero sin cambiarles el sentido al doblar esquinas o seguir trazados curvos.

Los adoquines no se nivelarán individualmente, pero si se podrán ajustar horizontalmente para conservar alineamiento.

Para zonas en pendiente, la colocación de los adoquines se hará preferiblemente de abajo hacia arriba.

5.2.1 Ajustes. Una vez colocados los adoquines que quepan completos dentro de la zona de trabajo, se colocarán ajustes en las áreas que hayan quedado libres contra las estructuras de drenaje o de confinamiento.

Estos ajustes se harán, preferiblemente, partiendo adoquines en piezas con la forma necesaria. Los ajustes cuya área sea inferior a la cuarta parte del tamaño de un adoquín, se harán, después de la compactación final, empleando un mortero compuesto por una (1) parte de cemento, cuatro (4) de arena y poco agua.

5.2.1.1 Compactación inicial. Una vez terminados los ajustes con piezas partidas, se procederá a la compactación inicial de la capa de adoquines, mediante la pasada de una vibrocompactadora de placa, cuando menos dos (2) veces en direcciones perpendiculares.

El área adoquinada se compactará hasta un metro (1m) del borde del avance de la obra o de cualquier borde no confinado. Al terminar la jornada de trabajo,, los adoquines tendrán que haber recibido, al menos, la compactación inicial, excepto en la franja de un metro (1m) recién descrita.

Todos los adoquines que resulten partidos durante el proceso deberán ser extraídos y reemplazados.

5.2.2 Sello de juntas y compactación final. Inmediatamente después de la compactación inicial, se aplicará la arena de sello sobre la superficie en una cantidad equivalente a una capa de tres milímetros (3 mm) de espesor y se barrerá repetidamente y en distintas direcciones, con una escoba o cepillo de cerdas largas y duras. En el momento de su aplicación, la arena deberá encontrarse lo suficientemente seca para penetrar con facilidad por las juntas.

Simultáneamente se aplicará la compactación final, durante la cual cada punto del pavimento deberá recibir al menos cuatro (4) pasadas del equipo preferiblemente desde distintas direcciones.

Se podrá eventualmente utilizar un rodillo neumático o uno liso de rodillos pequeños, con el fin de reducir las deformaciones posteriores del pavimento.

5.2.3 Confinamiento. Los pavimentos de adoquines deberán tener una estructura de confinamiento que impida su desplazamiento lateral a causa del empuje del tránsito vehicular.

Las estructuras de confinamiento deberán rodear completamente el área pavimentada y deberán penetrar, por lo menos quince centímetros (15 cm) en la capa de base que se encuentre bajo la capa de arena y su nivel superior cubrirá, como mínimo, la mitad del espesor del adoquín después de compactado.

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

Si se tenían adoquines colocados sin compactar ni sellar, se verificará si la capa de asiento ha sufrido erosión y en tal caso se deberá retirar los adoquines, la capa de arena y repetir la instalación.

5.2.5 Apertura al tránsito. El tránsito automotor no se permitirá hasta que el pavimento haya recibido la compactación final y este completamente confinado.

5.2.5.1 Conservación. Durante un lapso de cuanto menos dos (2) semanas, se dejará un sobrante de arena esparcido sobre el pavimento terminado, de manera que el tránsito y las posibles lluvias ayuden a acomodar la arena en las juntas. No se permitirá lavar el pavimento con chorro de agua a presión, ni recién terminada su construcción, ni posteriormente.

6. COSTOS DE LOS PAVIMENTOS ARTICULADOS

Presentamos una guía, como base para adelantar el cálculo de los costos involucrados tanto en la fabricación de adoquines de concreto como en la construcción de pavimentos de este tipo.

Los renglones incluidos, los rendimientos, y consumos considerados para el cálculo de los costos por renglón, se basan en el esquema de fabricación propuesto para las máquinas vibrocompresoras de producción nacional y en la lista de costos unitarios para materiales e insumos en el lugar para el cual se vayan a calcular los costos.

Por supuesto, este no es un esquema definitivo; cada situación particular involucra costos adicionales o puede hacer caso omiso de algunos, o diferir en la manera como se analizan. Esto especialmente aplicable a los renglones de montaje, costos financieros y administración

6.1 ESQUEMA PARA EL CALCULO DE COSTOS

Tabla 33. Resumen de los costos de fabricación de adoquines de concreto por m².

6.2 COSTOS DIRECTOS DE FABRICACION

EQUIPO PARA LA FABRICACIÓN		
Máquina vibrocompresora		
Transporte de la máquina		
Mantenimiento de la máquina		
Instalación de la máquina		
Energía		
Tablas		
Estantería para curado		
Mezcladora		
Herramienta varia		
Costos financieros por equipo		
COSTO DIRECTO POR EQUIPO (TOTAL 1.1)(A)		

MATERIALES		
Mezcla para concreto (cemento, arena, agregado grueso y agua de mezcla)		
Agua de curado		
Pigmentos		
COSTO DIRECTO POR MATERIALES (TOT. 1.2)(B)		
COSTO DIRECTO DE MANO DE OBRA (C)		
COSTO DIRECTO TOTAL (TOTAL 1)(A+B+C)=(D)		
COSTOS INDIRECTOS		
Montaje de la planta (E)		
Administración (F)		
COSTO INDIRECTO TOTAL (TOTAL 2) (E+F)=(G)		
COSTOS TOTALES DE FABRICACIÓN (D+G)		

6.3 CÁLCULO DE LOS DIFERENTES RENGLONES

Costos de fabricación de adoquines

- **Máquina vibrocompresora.** Vida útil asumida, 10 años, con gasto de 2 moldes; verificada en condiciones de manejo adecuado; (Costo de la máquina (\$) + costo de 2 moldes (\$)) / (10 años x Rendimiento Anual (m²)).
- **Transporte de la máquina.** Su costo depende de la distancia del lugar de fabricación al de montaje (variable); (Costo de transporte de la máquina (\$)) / (10 años x Rendimiento Anual (m²)).
- **Mantenimiento de la máquina:** Se considera el 5% del costo inicial, anualmente, para engrase de la máquina, pintura, aceite quemado para tablas, brochas, esponjas; (Costo de la máquina (\$) x 0,05) / (Rendimiento Anual (m²)).
- **Instalación de la máquina.** según el montaje de que se disponga; como mínimo, la instalación eléctrica más un piso de concreto de unos 6 m², al cual se fija la máquina y que sirve para almacenar la mezcla; (Costo de instalación (\$)) / (10 años x Rendimiento Anual (m²)).
- **Energía.** Se tiene que un motor de 1,8 HP (usual en este tipo de máquina) consume aproximadamente 2,5 kW.h; (Costo de la energía (\$/kW.h) x 2,5

$\text{kW.h} \times \text{N}^\circ \text{ de horas por jornada} / (\text{Rendimiento por jornada (m}^2\text{)}).$

- **Tablas.** De (0,5 x 0,5 x 0,02) m, con duración promedio de tres años. Se requiere de un número de tablas suficiente para un día de producción, deben ser de madera de buena calidad, cepillada y pintada con esmalte antes de darlas al servicio, así: $(\text{Rendimiento diario (m}^2\text{)}) / (\text{Área de adoquines que se fabrica por ciclo (m}^2\text{)})$, tenemos $(\text{Costo de la madera (\$/m}^2\text{)} \times 0,25 \text{ (m}^2\text{)} \times \text{Número de tablas} \times 1,5 \text{ (m.obra)}) / (3 \text{ años} \times \text{Rendimiento anual (m}^2\text{)}).$
- **Estantería para curado.** Se propone un módulo de estantería para 200 tablas, para producciones mayores se podrán construir más módulos enteros o fracciones de módulo; $(\text{Costo de la madera (\$)} \times \text{número de tablas} \times 1,5 \text{ (m.obra)}) / (200 \text{ (tablas /estantería)})$; la madera será 40 piezas de 0,04 x 0,25 x 2,8 m y 33 piezas de 0,04 x 0,12 x 2.8 m.
- **Mezcladora.** Se considera un equipo opcional; puede ser alquilada o comprada por lo tanto si es alquilada se tendrá; $(\text{Costo alquiler mensual (\$)}) / (\text{Rendimiento mensual (m}^2\text{)})$. Si es comprada $(\text{Costo de la máquina (\$)}) / (10 \text{ años} \times \text{Rendimiento anual (m}^2\text{)})$.
- **Herramienta varia.** La constituyen las palas, carretillas, mangueras, etc., según tamaño de montaje; $(\text{Número de cada tipo de herramienta} \times \text{su valor unitario (\$)}) / (5 \text{ años} \times \text{Rendimiento anual (m}^2\text{)})$.
- **Costos financieros.** Según el esquema que se plantee, intereses y amortización; además de los ítems que presenten con financiación; $(\text{Costos financieros anuales (\$)}) / (\text{Rendimiento anual (m}^2\text{)})$

6.4 MATERIALES

- **Mezcla.** Se calculan las cantidades y los costos unitarios, según sea la dosificación, según sea la dosificación, por peso o por volumen, para 1 m³ de concreto compactado; $(\text{Contenido} \times \text{costo de agua} + \text{Contenido} \times \text{costo de cemento} + \text{Contenido} \times \text{costo de arena} + \text{Contenido} \times \text{costo de agregado grueso}) \times \text{espesor de los adoquines (m)}$.
- **Agua de curado.** Se calcula aproximadamente 0,01 m³ de agua por m² de adoquines; $(0,01 \text{ m}^3/\text{m}^2 \times \text{costo de agua (\$/m}^3\text{)})$.
- **Pigmentos.** su contenido dado como % del contenido de cemento en peso; $(\text{Contenido de cemento de la mezcla (kg./m}^3\text{)} \times \text{contenido de pigmento (\%)} \times \text{espesor de mezcla que se va a pigmentar (m)} \times \text{costo del pigmento (\$/Kg)})$.
- **Mano de obra.** Depende del esquema de trabajo que se maneje. Generalmente se tiene un maestro de obra, y el resto serán obreros rasos. Su

costo se puede calcular en función del salario mínimo mensual, asumiendo un 70 % adicional de prestaciones sociales; Número de salarios mínimos = (Número de maestros de obra x número de salarios mínimos devengados) + número de obreros rasos. Por lo tanto (Número de salarios mínimos x salario mínimo mensual (\$) x 1,7 (prestaciones)) / (Rendimiento mensual (m²)).

6.5 COSTOS INDIRECTOS

- **Montaje (local).** Se requiere de lugar cubierto de al menos 30 m² y de un patio de almacenamiento de materiales y producto terminado de cerca de 50 m², no necesariamente cubierto. Puede ser un terreno o una bodega y debe tener suministro de agua, energía eléctrica y demás instalaciones requeridas.

Debe tener facilidad para la recepción de los materiales y para el despacho de los adoquines hacia el lugar donde se vayan a utilizar.

El piso en el cual se instala la máquina vibrocompresora y el área de mezclado de materiales debe ser de concreto, para facilitar su limpieza y evitar contaminación.

Se debe disponer un sistema para el almacenamiento de las tablas con los adoquines frescos (colocados sobre el piso o en repisa), de tal manera que no se encarren unos sobre otros, al menos durante las primeras 8 horas después de fabricados.

Tanto el almacenamiento para las diferentes etapas del curado como el arrume final se hará ordenadamente, para que no interfiera una actividad con la otra.

Se obtendrán los costos de compra o alquiler del lote o bodega, de las mejoras (obras) que haya que efectuarle para que se pueda operar en él y se dividirá por la vida útil que se ha considerado para la máquina (10 años) y por el rendimiento anual (m²) en el caso de compra, o por el rendimiento mensual (m²) cuando se alquila.

Si se compra (Costo del lote (\$) + Costo de mejoras (\$)) / (10 años x rendimiento anual (m²)).

Si se alquila ((Costo alquiler mensual (\$) / Rendimiento mensual (m²)) + (costo de las mejoras (\$)) / (10 años x rendimiento anual (m²))

- **Administración.** En este factor entran los costos por celaduría, manejo de la empresa (personal administrativo y de dirección técnica), servicios públicos (diferente al agua y energía ya considerados como materiales o insumos), impuestos o registros pagados por la empresa o directamente por el local (Cámara de Comercio, Predial, etc.), comercialización de los productos

(publicidad, vendedores, etc.), seguros, y las ganancias que se esperan obtener (como % del costo directo total). Todo lo anterior se debe llevar a un (costo de administración mensual (\$)) / (Rendimiento mensual (m²)).

En la tabla 34 se hace un resumen de los costos de construcción de un pavimento de adoquines de concreto por m²

Tabla 34. Resumen costos directos de construcción.

EQUIPO PARA LA CAPA DE ADOQUINES		
Vibrocompactadora de placa		
Mantenimiento y combustible para la vibrocompactadora		
Herramienta varia		
Costos financieros por equipo		
COSTO DIRECTO POR EQUIPO (TOTAL 1.1)(A)		
MATERIALES		
Subrasante		
Subbase		
Base		
Capa de arena		
Sello de arena		
Adoquines		
Transporte de adoquines		
Confinamiento		
Ajustes en mortero		
COSTO DIRECTO POR MATERIALES (TOTAL 1.2)(B)		
COSTO DIRECTO MANO DE OBRA (TOT.1.3)(C)		
COSTO DIRECTO TOTAL (TOTAL 1)(A+B+C)=(D)		
COSTOS INDIRECTOS		
Administración (E)		
COSTO INDIRECTO TOTAL (TOTAL 2)(E)		
COSTO TOTAL (D+E)		

6.6 CÁLCULO DE LOS DIFERENTES RENGLONES

Costos de construcción de un pavimento de adoquines de concreto

- **Costos directos**
- **Equipo**
- **Vibrocompactadora de placa (rana).** Supuestamente con una vida útil de 5 años, con dedicación exclusiva. Se puede asumir que se colocan tantos m² de adoquines como se fabrican; $(\text{Costo de la máquina } (\$)) / (5 \text{ años} \times \text{Rendimiento anual (m}^2))$, en el caso de ser comprada y si es alquilada será $(\text{Costo del alquiler por día } (\$)) / (\text{Rendimiento de colocación diario (m}^2))$.
- **Mantenimiento de la vibrocompactadora y combustible.** Se considera un 15% del costo inicial, anualmente para cubrir costos de mantenimiento; en el caso de ser comprada $(\text{Costo de la máquina } (\$) \times 0,15) / (\text{Rendimiento anual (m}^2))$, si se trata de un equipo alquilado $(\text{Costo del combustible por día } (\$)) / (\text{Rendimiento anual por día (m}^2))$.
- **Herramienta varia.** Se puede necesitar lo siguiente como equipo completo: 2 carretillas, 4 palas, 4 reglas de (0,05 x 0,10 x 3) m, 2 palustres, 2 escobas, 2 cinceles (una partidora o una cortadora), 2 mazos metálicos, 2 mazos de caucho, 2 zarandas (malla o angeo), 3 camas para transporte de adoquines, recipiente mezclador, un nivel (de mano, burbuja o manguera), formaletas de bordillo; se asume que este equipo dura unos 2 años; $(\text{Costo total de la herramienta varia } (\$)) / (2 \text{ años} \times \text{rendimiento anual (m}^2))$.
- **Costos financieros.** Según el esquema de que disponga (interese y amortización) y otros renglones financieros.

6.7 MATERIALES

- **Subrasante.** La excavación, cargue y deposito del material que sea necesario retirar + 20% por aumento de volumen e imprecisiones; $(\text{Costo de estas labores } (\$/\text{m}^3) \times \text{espesor retirado (m)} \times 1,2)$.
- **Subbase.** Pueden ser granulares, de suelo cemento, de concreto pobre, etc. Su espesor se define según el diseño de espesores (estructural). El costo unitario debe incluir el costo del transporte, la colocación y la compactación; $(\text{Costo de subbase } (\$/\text{m}^3) \times \text{espesor de base (m)} \text{ según diseño de espesores})$.
- **Base.** Igual tratamiento que para subbase; $(\text{Costo de base } (\$/\text{m}^3) \times \text{espesor de base (m)} \text{ según diseño de espesores})$.

- **Capa de arena.** 5 cm de arena gruesa y limpia, es decir, arena lavada para concreto o para pega de ladrillo o bloque; Costo de la arena ($\$/m^3$) x 0,05 (m^3/m^2).
- **Sello de arena.** 1 cm de arena fina, para pañete o revoque; Costo de la arena fina ($\$/m^3$) x 0,01 (m^3/m^2).
- **Adoquines.** Costo según el espesor (definido del diseño de espesores), en fábrica. (Puede ser el costo total calculado en el cuadro anterior); Costo de adoquines ($\$/m^2$).
- **Transporte de los adoquines.** Costo en función del número de adoquines por m^2 , del espesor, y de la distancia de la planta a la obra, incluye la mano de obra de cargue y descargue; Costo de transporte ($\$/m^2$).
- **Confinamiento.** Cuando sea necesario construirlo, pueden ser bordillos prefabricados o vaciados en el sitio; (Costo de bordillo ($\$/m$) x 2 (lados de la vía)) / (ancho de la vía (m)).
- **Ajustes en mortero.** Máximo, el equivalente a $\frac{1}{4}$ de adoquín, continuo a uno de los lados. Para adoquines de 0,2 m, el área será de 0,05 m^2 por metro de vía y la profundidad igual al espesor del adoquín (m); (Costo del mortero ($\$/m^3$) x 0,05 (m^2) x espesor del adoquín (m)) / (Ancho de la vía (m) x franja de 1 (m) de ancho).
- **Mano de obra.** El rendimiento de la colocación (actividades posteriores a la terminación de la base y construcción del confinamiento) varía según el tamaño de los adoquines y la destreza de los colocadores. Se ha obtenido, con cuadrillas de 5 hombres, rendimientos de 30 m^2 por jornada-hombre, es decir 150 m^2 para la cuadrilla; (Número de salarios mínimos x monto de salario mínimo mensual (\$) x 1,7 (prestaciones)) / (Rendimiento mensual (m^2)), donde Número de salarios mínimos = Número de maestros de obra x número de salarios devengados + número de obreros rasos.

COSTOS INDIRECTOS

- **Administración.** Se establecen los costos de celaduría, personal administrativo y de dirección técnica, impuestos, seguros, etc., y las ganancias que se buscan (generalmente como % del costo directo total). Todo esto nos llevará a (Costo de administración mensual (\$)) / (Rendimiento mensual (m^2)).

7. REPAVIMENTACIÓN CON ADOQUINES DE CONCRETO

Para utilizar adoquines de concreto como material de repavimentación se seguirán las siguientes recomendaciones: Evaluación de la capacidad estructural del pavimento existente, si bien se puede asumir que al colocar la capa de arena y los adoquines, debidamente sellados y compactados, directamente sobre la superficie del pavimento existente, se deberá evaluar el estado de la estructura del pavimento existente para establecer si se requiere de una capa de material de base que actúe como refuerzo adicional y al mismo tiempo estudiar las condiciones de confinamiento y drenaje para la capa de adoquines.

Para la repavimentación de pavimentos flexibles, los defectos de la superficie existente serán corregidos con material granular que tenga iguales especificaciones que las recomendadas para bases, también se podrá utilizar un concreto pobre con una resistencia a la compresión a los 7 días de 5 Mpa (50 kgf/cm²).

Para la repavimentación de pavimentos rígidos, los defectos de la superficie se corregirán con concreto pobre de resistencia similar a la anterior, se verificará la solidez del soporte de las losas y restituirlo cuando falte.

Una vez conformada la superficie del pavimento existente según lo descrito, se procederá a la corrección del pavimento de adoquines, a partir de la colocación de la capa de arena, siguiendo los procesos constructivos corrientes.

7.1 TRAFICO PEATONAL

El tráfico peatonal es aquel formado por personas, animales, bicicletas, motocicletas y vehículos similares.

Para la construcción de pavimentos para tráfico peatonal, no será necesario la construcción de una base como elemento estructural, la capa de arena se colocará directamente sobre la subrasante, debidamente perfilada y compactada, siempre y cuando no este conformada por material orgánico, en cuyo caso se debe retirar y colocar uno que sea adecuado. Se construirá una base cuando se requiera por consideraciones estructurales, es decir, una capacidad de soporte de la subrasante extremadamente baja, o cuando se espere la circulación eventual de vehículos más pesados que los normales.

Los requisitos de calidad de los adoquines será igual al ya manifestado, el patrón de colocación no tendrá ninguna restricción, debido a la baja solicitud de empujes, de todas formas se deberá contar con una superficie continua y completa.

7.2 TRAFICO DE VEHÍCULOS ESPECIALES.

Como tráfico de vehículos especiales se entiende la circulación de aquellos con presiones de inflado en sus llantas y con cargas en sus ejes que sobrepasan las reglamentadas para vías públicas, es decir, los vehículos para fuera de camino como cargadores, montacargas, grúas o puentes grúas, etc. Por cargas puntuales muy altas se entienden aquellas que generan en los apoyos una presión mayor que 5 Mpa (50 kgf/cm²), tal como sucede bajo los soportes de contenedores, patas auxiliares de grúas, etc.

La construcción de este tipo de pavimento tendrá una diferencia con respecto a los anteriores en el sentido de disminuir el espesor suelto de la capa de arena, con el fin de aminorar la magnitud del ahuellamiento que se genera con la utilización del pavimento. Esto requerirá de mayor cuidado durante su colocación y de una determinación más precisa de las cotas de la base compactada. El espesor compactado de la capa de arena no será mayor que 30 mm (3 cm).

Adicionalmente a la compactación establecida, estos pavimentos, una vez terminada su construcción, se compactará con equipo de llanta neumática o con equipo convencional, vibratorio, estático, de tamaño moderado.

7.3 MANTENIMIENTO

El mantenimiento de un pavimento de adoquines se puede resumir en las siguientes actividades:

- **Mantenimiento del sello de arena.** Al menos cada año se revisará el estado de sello de juntas y la existencia de vegetación dentro de estas. Se retirará el material vegetal y luego se sellará nuevamente las juntas con arena de sello, sin realizar compactación.
- **Renivelación de la superficie.** Cuando se tengan hundimientos localizados o huellas en aquellos puntos donde se tiene circulación canalizada, pero no se presenta alteración generalizada en toda la superficie del pavimento, se procederá a reparar la zona dañada retirando los adoquines, la capa de arena y corrigiendo el nivel superior de la base, si es necesario adicionar material a la base, se escarificará y se utilizará uno con las mismas propiedades que el existente compactándolo con equipo adecuado.

Cuando el área a compactar sea muy reducida se levantarán algunos adoquines adicionales para permitir la utilización de la máquina vibrocompactadora de placa y al mismo tiempo ensanchar el área donde se va a renivelar la arena, y poder ajustar de nuevo, en el espacio disponible, los adoquines que se retiraron previamente.

Para la ejecución del trabajo de renivelación se seguirán las recomendaciones que se establecieron anteriormente, teniendo en cuenta dejar los sobreespesores necesarios, tanto en la base como en la capa de arena , para que, una vez terminado el trabajo, la zona renivelada tenga las cotas deseadas.

7.4 RECONSTRUCCIÓN Y REPARACIÓN

- **Reconstrucción a escala menor.** Cuando un pavimento de adoquines de concreto presenta alteraciones moderadas en el nivel de toda su superficie, situación esta que no es frecuente, se puede acometer una reconstrucción a escala menor, siguiendo las recomendaciones para renivelación de la superficie descritas, pero ejecutando el trabajo sobre toda la superficie del pavimento. Una reconstrucción de este tipo no requiere del cambio de material de base sino del ajuste de su espesor hasta llevarlo a los niveles deseados.
- **Reconstrucción a escala mayor.** Cuando un pavimento de adoquines de concreto presenta huellas pronunciadas (30 mm (3 cm)) en zonas de mayor tráfico, y estas no corresponden a problemas localizados como cambio de materiales o deficiencia en el drenaje, y además van acompañadas de las irregularidades descritas en el párrafo anterior, son un indicativo de que el pavimento ha llegado al final de su vida útil, por lo cual se debe acometer una reconstrucción, a escala mayor, de toda su estructura. Esto implica levantar los adoquines y la arena, retirar el material de base, si este no es apto para ser reutilizado, o adicionarle material nuevo, mezclándolo con el existente, y continuar la construcción del pavimento.
- **Reparación por daños y obras específicas.** Cuando se presenten daños por mala compactación de las brechas, por mal funcionamiento de las redes de servicio o se necesite ejecutar trabajos como tendido o cambio de las mismas., se efectuará una reparación con las mismas características que una reconstrucción a escala mayor, pero solamente sobre el área específica. Se debe tener especial cuidado en la compactación de las brechas.

Antes de emprender la reparación o reconstrucción de un pavimento de adoquines, cualquiera que sea la escala del trabajo a ejecutar, se verificará la cota donde se encuentre el nivel freático, el adecuado funcionamiento del sistema de drenaje subterráneo, se dispone de uno, y la necesidad de modificar o no el esquema de drenaje superficial en cuanto a pendientes, estructuras y filtros, con el fin de que funcione como tal.

En una reparación o reconstrucción solo será indispensable incorporar material nuevo para reemplazar material defectuoso (base, adoquines), algunas piezas que haya sido necesario destruir para comenzar la capa de adoquines (generalmente 2 o 3), el material de base complementario y las arenas para el sello y la capa de arena.

7.5 TÉCNICAS DE RECONSTRUCCIÓN

La aproximación a una metodología para efectuar labores de reparación o reconstrucción de pavimentos de adoquines se plantea desde un punto de vista muy diferente a la de los otros tipos de pavimentos por cuanto todos los materiales que hacen parte del de adoquines llegan al sitio de construcción en su estado definitivo, es decir no existe ningún proceso químico o térmico que dilate en el tiempo alguna o muchas de las actividades involucradas.

Por lo anterior, el trabajo de reparación de pavimentos de adoquines es de labores simples, sencillas, y quizá por esto muchas veces se pasan por alto las recomendaciones que se dan para ejecutarlas o simplemente se omiten algunos procedimientos.

Como en todo proceso patológico, en el del pavimento de adoquines también se presenta una secuencia lógica de ocurrencia de una serie de fenómenos o manifestaciones sintomáticas que marcan la incorporación dentro de dicho proceso, de las diferentes capas componentes de la estructura. Casi siempre estos fenómenos son fácilmente identificables, pero su causa y el momento dentro del proceso al cual este corresponde pueden ser difíciles de determinar; por ejemplo unos adoquines desbordados pueden ser indicio de mala calidad de las piezas, de un inadecuado proceso o mala calidad de los materiales durante la construcción o de un diseño de espesores deficiente o inexistente.

El llegar a determinar la causa y el momento en el desarrollo del problema, es fundamental para poder decidir que tipo de labor correctora se debe acometer.

A continuación se presenta una tabla donde se han clasificado dichos fenómenos según donde aparecen (adoquines, capa de rodadura, estructura portante) y para cada una de las posibles causas se dan las pautas de las actividades que se deben desarrollar, tanto para la corroboración de la causa del fenómeno, como para la solución del problema. Estas pautas se han agrupado en 12 procedimientos básicos a los que hace referencia la tabla 35.

Tabla 35. Identificación de daños y procedimientos.

DAÑOS Y LOCALIZACIÓN	CAUSAS	ACTIVIDADES	PROCEDIMIENTO
ADOQUINES			
Despicado Desbordado Desconchamiento	Mala calidad de los Adoquines	Verificación de la calidad de los adoquines. Si es progresivo reemplazar los adoquines.	1 2
	Capacidad de soporte insuficiente por mal diseño o proceso constructivo defectuoso (mala calidad o espesor insuficiente en la base)	Verificación de la calidad de los adoquines. Revisión del diseño de espesores del pavimento Verificar calidad y dimensiones de toda la estructura del pavimento Si es progresivo reconstruir el pavimento.	1 4 5 6
Abrasión Desgaste de la superficie de rodadura	Mala calidad de los Adoquines	Verificación de la calidad de los adoquines. Si es severa reemplazar los adoquines.	1 2
	Cargas de impacto por elementos metálicos (herraduras, llantas metálicas, orugas, etc)	Verificación de la calidad de los adoquines. Constatar si fueron garantizados para este tipo de utilización Si es severa, reemplazar con adoquines adecuados u otro material	1 7
	Ataque químico (ácidos, materia orgánica, etc)	Suprimir el ataque químico. Mantener el pavimento aseado	2 8

Continuación tabla 35.

DAÑOS Y LOCALIZACIÓN	CAUSAS	ACTIVIDADES	PROCEDIMIENTO
ADOQUINES			
Rotura (simple o múltiple)	Irregularidad en el espesor y/o calidad de la capa de arena, o contaminación de la misma	Reconstruir la capa de rodadura con los mismos o nuevos adoquines	9
	Cargas de impacto, puntuales muy altas	Control de este tipo de cargas	10
	Equipo de compactación inadecuado durante la construcción	Utilizar los rangos específicos en cuanto a área, fuerza centrífuga y frecuencia de la vibrocompactadora de placa	11
CAPA DE RODADURA			
Migración Central	Por arrastre de los adoquines debido a: Juntas muy anchas (desplazamientos diferenciales) Construcción de arriba hacia abajo Pérdida del material de sello de la Junta Patrón de colocación inadecuado Desplazamiento de confinamiento o estructuras de drenaje transversales	Reconstrucción de la capa de rodadura con los mismos adoquines	2
Migración en los bordes (agrietamiento)	Por arrastre de las adoquines debido a: Pérdida de estabilidad o alineamiento de la estructura de confinamiento Ahuellamiento, hundimiento y desplazamiento por mala compactación de la base en la zona cercana al confinamiento.	Reconstrucción de la zona del pavimento desplazada, previa construcción de un confinamiento estable. Reconstrucción de la zona dañada.	3 3
Ondulación escalonamientos (no mayores de 1 cm)	Irregularidad en el espesor y/o calidad de la capa de arena o contaminación de la misma. Por mala construcción.	Reconstrucción de la capa de rodadura	2

Continuación tabla 35.

DAÑOS Y LOCALIZACIÓN	CAUSAS	ACTIVIDADES	PROCEDIMIENTO
ESTRUCTURA			
Ahuellamiento a edad temprana (mayor que 2 cm)	En los carriles de circulación obligada por capacidad de soporte insuficiente.	Revisión del diseño de espesores del pavimento. Verificar calidad y dimensiones de toda la estructura del pavimento. Reconstrucción de la zona dañada con espesores y materiales adecuados.	4 5 3
Ahuellamiento a edad tardía, 10 ó más años, (mayor que 2 cm)	En los carriles de circulación obligada por fatiga de la estructura de soporte, generalmente acompañada de irregularidades menores en el resto de la superficie. El pavimento (más no los adoquines) han llegado al final de su vida útil	Reconstrucción completa de toda el área del pavimento	6
Agua libre (fluyendo por entre los adoquines o juntas permanentemente inundadas)	Por drenaje deficiente que lleva a: Pérdida de sello por arrastre Bombeo de la capa de arena Migración de las piezas.	Verificación del estado del drenaje, tanto superficial como interno. Construcción de los filtros necesarios para abatir el nivel freático. Reconstrucción de la zona averiada.	12 3

7.6 PROCEDIMIENTOS

1. Verificación de la calidad de los adoquines. La norma ICONTEC 2017 “Adoquines de Hormigón”, contiene los requisitos de calidad que deben cumplir los adoquines y la manera de evaluarlos.

2. Reconstrucción de la capa de rodadura. Se retira los adoquines, la capa de arena y se corregirá el nivel superior de la base.

Si el área de reconstruir es reducida, se deberán levantar algunos adoquines adicionales para poder acomodar más fácilmente, en el espacio disponible, los adoquines retirados previamente o los nuevos.

3. Reconstrucción de la zona dañada o alterada. Para este tipo de trabajo se deberá levantar y retirar totalmente la estructura del pavimento de adoquines y reemplazar el material de base si no es el adecuado o completar el espesor requerido si el colocado era insuficiente.

Se ampliará la zona de trabajo hasta un tamaño tal que permita utilizar el equipo de compactación adecuado.

4. Revisión del diseño de espesores del pavimento. Se busca verificar la existencia real de un diseño que tenga en cuenta las condiciones de soporte de la subrasante y del tráfico que va a soportar el pavimento, en el caso de no existir se realizará uno con el cual se entrará a comparar los espesores encontrados.

5. Verificar la calidad y dimensiones de toda la estructura del pavimento. Se puede verificar midiendo espesores y tomando muestras de los materiales que componen las capas del pavimento.

Las dimensiones y calidad de los materiales deben cumplir con las especificaciones y se corregirán según sean defectuosos o insuficientes, para ello se harán apiques controlados.

6. Reconstrucción de toda el área de pavimento. Esta actividad estará precedida de un diseño o rediseño del pavimento tanto geométrico como de espesores. La labor de reconstrucción se podrá desarrollar por etapas o simultáneamente en toda el área del pavimento, teniendo en cuenta las recomendaciones sobre la construcción que pudieron ser omitidas en la primera oportunidad.

Si el pavimento ha llegado al final de su vida útil, se debe evaluar el material que se retira del pavimento existente para considerar la posibilidad de reutilizarlo. Generalmente se pueden recuperar algunos adoquines, los materiales de bases granulares pueden ser mezclados con material nuevo y recompactar, es ineludible

colocar arenas nuevas tanto en la capa como en el sello.

7. Constatar si los adoquines fueron garantizados para cargas de impacto o abrasión por elementos metálicos. Aunque los requisitos de calidad de la Norma están gobernados por la Resistencia a la Abrasión por llanta de caucho, esta puede no ser suficiente para resistir la abrasión por elementos metálicos como herraduras, llantas o ruedas metálicas, etc.; esta capacidad dependerá fundamentalmente del tipo y calidad del agregado, del contenido de cemento y del proceso de elaboración de los adoquines.

8. Suprimir el origen del ataque químico – mantener el pavimento aseado. No se utilizará adoquines en zonas donde exista ataque químico de ácidos, materia orgánica, sulfatos etc., que sean reconocidos como nocivo para concretos sin recubrimientos especiales y con contenidos de cemento y absorciones propias de un adoquín.

Puesto que los adoquines admiten infiltración, más no recubrimiento, se deberá suprimir el ataque antes que buscar que las piezas sean resistentes.

Cuando existan derrames ocasionales de sustancias dañinas, la limpieza rápida del pavimento con agua abundante lo protegerá de un daño mayor.

9. Permitir fractura simple de no más del 1% de adoquines – reemplazar aquellos con fractura múltiple. Los adoquines que cumplen con la norma ICONTEC tendrán una resistencia tal que no se debe partir bajo condiciones normales de tráfico, siempre se hayan seguido los procedimientos constructivos adecuados.

La fractura múltiple acelera el proceso de desintegración del adoquín y lleva a la pérdida completa de la pieza, por lo cual debe evitarse.

10. Controlar las cargas de impacto, puntuales y muy altas. Especialmente en patios de manejo de maquinaria o en talleres donde se levanta equipo con grúas y se deja caer sobre el pavimento, los adoquines pueden sufrir fracturas, situación que no es muy común y que puede evitarse con un buen manejo de los equipos.

11. Utilización de maquinaria recomendada para la compactación. Tradicionalmente se ha planteado la utilización con mucho éxito, de equipo vibrocompactador de placa, con diferentes características según el espesor de los adoquines que conforman la capa de rodadura que se va a compactar, así: para adoquines de 6 cm de espesor, placas con un área entre 0.2 y 0.4 m², fuerza centrífuga entre 7 y 16 kN y frecuencia entre 75 y 100 Hz; para adoquines de 8 cm de espesor placas con un área entre 0.25 y 0.5 m², fuerza centrífuga entre 15 y 20 kN y la misma frecuencia.

El uso de equipo muy pesado por fuera de estas recomendaciones, sobre adoquines de 6 cm, se pueden fisurar fácilmente por impacto. Si por el contrario se utiliza equipo muy liviano sobre adoquines gruesos, se dificulta la labor de compactación.

12. Verificación del estado del drenaje - Construcción de los filtros necesarios. Una condición fundamental para el buen comportamiento de un pavimento es el buen estado de sus sistemas de drenaje, tanto superficial como interno.

Se deberá garantizar que el nivel freático (en toda el área del pavimento) esté entre 40 y 60 cm por debajo de la cota de la subrasante. Este principio, que es universalmente aceptado en el diseño de los diferentes tipos de pavimento, también debe aplicarse al de adoquines.

Se debe buscar que las pendientes de la superficie sean adecuadas para lograr una rápida evacuación del agua.

Si el drenaje superficial (pendientes, quiebres, cunetas, rejillas, sumideros) y/o el drenaje subterráneo (redes de alcantarillado, filtros, etc.) no están funcionando tal como deberían, se deberá replantear el esquema que para estos haya dado el diseño geométrico para asegurar su correcto desempeño.

Por ninguna razón deberá presentarse bombeo de la arena de sello o de la base, o estancamiento del agua, ni en las juntas ni sobre la superficie del pavimento.

CONCLUSIONES

- El sistema de pavimentación con adoquines de concreto da una mejora considerable en el aspecto urbano y la limpieza en las poblaciones.
- Debido a la facilidad constructiva y la poca maquinaria que se emplea en su construcción la mayor parte del trabajo puede hacerse a mano y con personal no calificado, lo cual produce una economía de divisas y una fuente de empleo para el personal de la región.
- Debido a la calidad de los materiales que en la mayor parte son arenas, grava y cemento, se favorece la economía nacional.
- Un factor importante es la facilidad de remover al adoquín para hacer reparaciones o instalaciones de tuberías de agua, alcantarillado, drenaje, teléfonos, etc. Con la conveniencia de poder usar de nuevo los mismos materiales.
- La mayoría de los métodos de diseño se basan en el uso de tablas y/o gráficas las cuales con ayuda de fórmulas nos permiten de una manera práctica conocer el espesor de las diferentes capas del pavimento, una vez determinado el nivel de tráfico probable de la vía en consideración y las características del suelo de la subrasante las cuales nos determinan la capacidad de soporte.
- Los métodos de diseño coinciden en afirmar que se debe investigar mucho más para lograr diseños que involucren un conocimiento mayor del comportamiento, tanto de los materiales a utilizar como del pavimento mismo.

RECOMENDACIONES

- Un adecuado drenaje del pavimento es uno de los factores más importantes para un correcto comportamiento y duración del pavimento. La pendiente transversal debe ser como mínimo del 2% para asegurar una rápida evacuación del agua. La pendiente longitudinal mínima es del 0.5 %, para zonas llanas se debe proyectar alternancias de pendiente que asegure la evacuación de aguas, estas pendientes deben conseguirse en la explanada, manteniendo un espesor constante en el resto de las capas.
- Para garantizar una durabilidad del pavimento es necesario darle una total importancia a la construcción del mismo en todas las capas de su estructura incluso hasta el sello de arena, ya que al no existir un control total se produce deficiencias en cuanto a la construcción del pavimento.
- Se debe implementar, en la producción de adoquines, un control de calidad, mejorar las resistencias para las cuales se están diseñando, mayores trabajos de laboratorio son necesarios para verificar los resultados obtenidos y estudiar los procesos de producción en pro de mejorarla, para ello se debe realizar un cuidadoso chequeo de las fuentes de materiales para realizar la mejor selección de ellos.
- Es muy conveniente el uso del adoquinado de concreto debido a las facilidades de Diseño y Construcción. Sus resultados son satisfactorios en su aspecto y durabilidad.
- Es favorable a la Economía Nacional el empleo de este sistema de pavimento, ya que evita en alto porcentaje el gasto de divisas y provee empleo a la mano de obra nacional.
- Se recomienda promover el sistema de pavimentación con adoquinados por ser un sistema muy conveniente a los países de Latinoamérica.

BIBLIOGRAFIA

HORMIGON AL DIA. Pavimentación con Adoquines de Hormigón. Instituto Chileno del Cemento y del Hormigón. 1992. Vol II.

INSTITUTO COLOMBIANO DE PRODUCTORES DE CEMENTO - ICPC. Notas Técnicas. 5 – 179 – 1191.

_____ - ICPC. Notas Técnicas. 04 – 10 – 113.

_____ - ICPC. Notas Técnicas. 04 – 21 – 241.

_____ - ICPC. Notas Técnicas. 04 – 12 – 184.

_____ - ICPC. Notas Técnicas. 04 – 18 – 167.

_____ - ICPC. Notas Técnicas. 04 – 16 – 189.

_____ - ICPC. Notas Técnicas. 04 – 17 – 238.

INSTITUTO NACIONAL DE VIAS – INVIAS. Especificaciones Técnicas y de Construcción.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TECNICAS – ICONTEC. Norma 2017.

_____ ICONTEC. Norma 3829.

_____ ICONTEC. Norma 238.

ISAZA GUTIERREZ, Hernán. Tipos de pavimento y Elementos Estructurales. Universidad Nacional. Medellín.

MADRID, German. Propuesta para la Fabricación, Control de Calidad y Aceptación de adoquines de Hormigón para pavimentos. (5-190-642 ICPC). Medellín, 1983.

_____. Pavimentación con Adoquines de Concreto. Alternativas y Costos en Programas Comunitarios. Bogotá, 1987.

_____. Diseños de Pavimento de Adoquin de Concreto para Diferentes Condiciones de Tráfico. Universidad Nacional.

MEJIA ROJAS, Juan Guillermo. Comparación de Métodos de Diseño para Pavimentos en Adoquines de Concreto. Universidad Nacional de Colombia. Medellín, 1990.