

GUÍA PARA EL DISEÑO DE PAVIMENTOS RÍGIDOS EN VÍAS URBANAS CON
APLICACIÓN EN MUNICIPIOS CON POBLACIONES MENORES A 50 000
HABITANTES

ANDRES CAMILO JAIMES CHINOME

UNIVERSIDAD SANTO TOMAS SECCIONAL TUNJA
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL
TUNJA
SEPTIEMBRE 2020

GUÍA PARA EL DISEÑO DE PAVIMENTOS RÍGIDOS EN VÍAS URBANAS CON
APLICACIÓN EN MUNICIPIOS CON POBLACIONES MENORES A 50 000
HABITANTES

ANDRES CAMILO JAIMES CHINOME

Monografía para obtener el título de Ingeniero Civil

Director: Ángel Francisco Daza Pinzón, Ingeniero Civil, Especialista en Patología
de la Construcción, (C) Magister en Gestión y Auditorías Ambientales

UNIVERSIDAD SANTO TOMAS SECCIONAL TUNJA

FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL

TUNJA

SEPTIEMBRE 2020

Nota de aceptación:



Vo. Bo Angel Francisco Daza Pinzón
Firma Digital

Firma del Director

Firma del Jurado

Firma del Jurado

Tunja, septiembre 28 de 2020

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a Dios todo poderoso y a la virgen quienes llenándome de fe y salud me han iluminado para seguir adelante, a mis padres y hermanos quienes siempre me han brindado su apoyo incondicional y demás familiares que me han acompañado a lo largo de estos años de vida universitaria.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar quiero agradecer a mi tutor el ingeniero Ángel Francisco Daza Pinzón, Especialista en Patología de la Construcción, (C) Magister en Gestión y Auditorías Ambientales, quien con sus conocimientos y apoyo me guio para la realización de la presente monografía.

A la universidad Santo Tomas por brindarme todos los recursos y logística requerida en mi proceso de formación; y en especial a todos los profesores que contribuyeron en mi formación académica. A todos mis compañeros con los que he compartido momentos de academia y sociales, por su incondicional amistad.

A mi familia por su apoyo, en especial mis padres quienes siempre han estado ahí para darme su apoyo.

Muchas gracias a todos.

CONTENIDO

	Pág.
RESUMEN	14
ABSTRAC	15
1. DESCRIPCIÓN DE LA PROBLEMÁTICA	17
2. JUSTIFICACIÓN	18
3. OBJETIVOS	22
3.1 OBJETIVO GENERAL.....	22
3.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS	22
4. METODOLOGÍA.....	23
5. REVISIÓN BIBLIOGRAFICA.....	24
5.1 PAVIMENTOS	24
5.2 PAVIMENTOS RÍGIDOS.....	24
5.3 METODOS DE DISEÑO PARA PAVIMENTOS RIGIDOS	27
5.4 PORTLAND CEMENT ASSOCIATION (PCA).....	38
5.5 MANUAL DE DISEÑO DE PAVIMENTOS DE CONCRETO PARA VÍAS CON BAJOS, MEDIOS Y ALTOS VOLÚMENES DE TRÁNSITO – INVIAS.....	43
5.6 GUIA DE DISEÑO DE PAVIMENTOS CON BAJOS VOLUMeNES DE TRANSITO Y VIAS LOCALES PARA LA CIUDAD DE BOGOTA (IDU)	49
6. COMPARACIÓN DE LOS MÉTODOS	55
6.1 TRANSITO Y PERIODO DE DISEÑO.....	55
6.2 LA SUBRASANTE Y MATERIAL DE SOPORTE PARA EL PAVIMENTO	57
6.3 PLACA DE CONCRETO HIDRAULICO	59

6.4 CLIMA Y DRENAJE	59
6.5 TRANSFERENCIA DE CARGA.....	59
6.6 ANÁLISIS DE COSTOS	61
7. ANÁLISIS Y RECOMENDACIONES DE LAS VARIABLES.....	63
8. PROPUESTA PARA EL DISEÑO DE PAVIMENTOS RIGIDOS EN VÍAS URBANAS CON APLICACIÓN EN MUNICIPIOS CON POBLACIONES MENORES A 50 000 HABITANTES	72
8.1 PARAMETROS DE DISEÑO	72
8.2 DESARROLLO DE METODOLOGIA	79
9. CONCLUSIONES.....	81
10. RECOMENDACIONES adicionales.....	83
11. GLOSARIO.....	84
BIBLIOGRAFÍA.....	87
ANEXOS.....	¡Error! Marcador no definido.

LISTA DE TABLAS

Pág.

Tabla 1. Niveles de confiabilidad, R, en función del tipo de carretera	30
Tabla 2. Valores Z_r , correspondientes a niveles seleccionados de confiabilidad	31
Tabla 3. Calidad del drenaje.....	34
Tabla 4. Valores de coeficiente de drenaje, Cd.....	34
Tabla 5. Valores del coeficiente de transmisión de carga, J.....	35
Tabla 6. Correlación entre la resistencia a la compresión y el módulo de elasticidad.....	35
Tabla 7. Efectos de la Subbase no Tratadas sobre los valores K	40
Tabla 8. Valores K de Diseño Subbase Tratadas con Cemento	40
Tabla 9. Factores de seguridad de carga.....	41
Tabla 10. Tasas anuales de crecimiento de transito “r” y sus correspondientes factores de proyección.....	42
Tabla 11. Categoría de transito par la selección de espesores	44
Tabla 12. Clasificación de la subrasante de acuerdo con su resistencia.....	45
Tabla 13. Clasificación de los materiales soporte para el pavimento de concreto	45
Tabla 14. Valores resistencia a la flexotracción del concreto (módulo de rotura)..	46
Tabla 15. Denominación del sistema de transferencia de carga y confinamiento lateral.	46
Tabla 16. Espesores de losa de concreto (cm) de acuerdo con la combinación de variables y T0 como factor principal.....	48
Tabla 17. Espesores de losa de concreto (cm) de acuerdo con la combinación de variables y T1 como factor principal.....	48
Tabla 18. Espesores de losa de concreto (cm) de acuerdo con la combinación de variables y T2 como factor principal.....	49
Tabla 19. Categoría de tránsito de diseño.....	50
Tabla 20. Correlaciones entre CBR Vs MR.....	51

Tabla 21. Tipos de Subrasante para Bogotá.	51
Tabla 22. Capacidad portante equivalente para el diseño de las estructuras de pavimento	52
Tabla 23. Estructuras de pavimento rígido diseñadas para la ciudad de Bogotá D.C.	54
Tabla 24. Clasificación del Tránsito.....	56
Tabla 25. Uso típico de las diferentes clases de subbase granular.....	58
Tabla 26. Variables y parámetros utilizados en los métodos de diseño para pavimento rígido.	60
Tabla 27. Dimensionamiento de la estructura de pavimento.....	61
Tabla 28. Análisis económico comparativo	62
Tabla 29. Datos asumidos para el análisis de las variables.	63
Tabla 30. Clasificación Tránsito.	72
Tabla 31. Valores de K, para losas apoyadas sobre subbase granular.....	76
Tabla 32. Uso típico de las diferentes clases de subbase granular.....	76
Tabla 33. Resistencia a la flexotracción mínima.	78
Tabla 34. Valores de coeficiente de drenaje, Cd.....	78
Tabla 35. Formato de campo para el aforo de tránsito; Error! Marcador no definido.	
Tabla 36. Factor de daño por tipo de vehículo Error! Marcador no definido.	
Tabla 37. Factor direccional Error! Marcador no definido.	
Tabla 38. Cálculo ejes acumulados de 8.2 Ton (ESAL); Error! Marcador no definido.	
Tabla 39. Recomendación para barras de transferencia de carga; Error! Marcador no definido.	
Tabla 40. Calidad del drenaje..... Error! Marcador no definido.	
Tabla 41. Valores de coeficiente de drenaje, Cd..... Error! Marcador no definido.	
Tabla 42. Volúmenes de Aforo vehicular..... Error! Marcador no definido.	
Tabla 43. Cálculos de ejes equivalentes. Error! Marcador no definido.	

LISTA DE FIGURAS

pág.

Figura 1. Esquema de pavimento de concreto simple con juntas.....	25
Figura 2. Esquema de pavimento de concreto reforzado.	26
Figura 3. Esquema de pavimento de concreto continuamente reforzado.	27
Figura 4. Correlación aproximada entre la clasificación de los suelos y los diferentes ensayos.	36
Figura 5. Correlación del módulo efectivo de reacción por pérdida de potencial de soporte.....	37
Figura 6. Porcentaje de camiones en el carril de diseño.	42
Figura 7. Análisis de sensibilidad ESAL.....	64
Figura 8. Análisis de sensibilidad del periodo de diseño.....	65
Figura 9. Análisis de sensibilidad del CBR	66
Figura 10. Análisis de sensibilidad de la confiabilidad	67
Figura 11. Análisis de sensibilidad del índice de servicio final	68
Figura 12. Análisis de sensibilidad del Cd	69
Figura 13. Análisis de sensibilidad de J.	70
Figura 14. Análisis de sensibilidad del MP en función del tránsito.....	71
Figura 15. Análisis de sensibilidad del MR en función del CBR.....	71
Figura 16. Correlación aproximada entre la clasificación de los suelos y los diferentes ensayos.....	75
Figura 17. Correlación del módulo efectivo de reacción por pérdida de potencial de soporte.....	77
Figura 18. Representación esquemática de los vehículos de transporte de carga más comunes en el país	¡Error! Marcador no definido.
Figura 19. Esquema de juntas longitudinales.	¡Error! Marcador no definido.
Figura 20. Esquema de juntas transversales	¡Error! Marcador no definido.

Figura 21. Vista en planta de las juntas de expansión alrededor de elementos incorporados dentro del pavimento..... **¡Error! Marcador no definido.**

Figura 22. Vista en planta de las juntas de expansión en los cruces de las vías **¡Error! Marcador no definido.**

Figura 23. Esquema de las juntas de expansión o aislamiento**¡Error! Marcador no definido.**

Figura 24. Procesos del ciclo del agua **¡Error! Marcador no definido.**

Figura 25. Mapa de Precipitaciones..... **¡Error! Marcador no definido.**

Figura 26. Clasificación del drenaje interno de un pavimento**¡Error! Marcador no definido.**

Figura 27. Reseña Fotográfica de la vía **¡Error! Marcador no definido.**

Figura 28. Vista en planta de la vía en estudio **¡Error! Marcador no definido.**

Figura 29. Aforo Vehicular **¡Error! Marcador no definido.**

Figura 30. Distribución porcentual vehicular. **¡Error! Marcador no definido.**

Figura 31. Cuantificación TPD. **¡Error! Marcador no definido.**

Figura 32. Información exploración de campo. **¡Error! Marcador no definido.**

Figura 33. Formato de campo de apiques. **¡Error! Marcador no definido.**

Figura 34. Ensayos de clasificación para la muestra 1.**¡Error! Marcador no definido.**

Figura 35. Ensayos de clasificación para la muestra 2.**¡Error! Marcador no definido.**

Figura 36. Ensayo de CBR en condición natural. **¡Error! Marcador no definido.**

Figura 37. Ensayo de CBR en condición saturada. . **¡Error! Marcador no definido.**

Figura 38. Valor del módulo de reacción de la subrasante, K. para el ejemplo. **¡Error! Marcador no definido.**

Figura 39. Valor del módulo de reacción combinado, K combinado, para el ejemplo **¡Error! Marcador no definido.**

Figura 40. Valor del módulo de reacción efectivo, K efectivo, para el ejemplo. **¡Error! Marcador no definido.**

Figura 41. Valor mínimo del módulo de rotura, Sc , para el ejemplo.¡Error!
Marcador no definido.

Figura 42. Fórmula para calcular el módulo de reacción, Ec .¡Error! **Marcador no definido.**

Figura 43. Valor del coeficiente de drenaje, Cd , para el ejemplo.¡Error! **Marcador no definido.**

Figura 44. Procesamiento de la ecuación simplificada en Excel.¡Error! **Marcador no definido.**

Figura 45. Sección transversal típica de la vía ejemplo.¡Error! **Marcador no definido.**

Figura 46. Distribución de la carga ¡Error! **Marcador no definido.**

Figura 47. Comportamiento del pavimento por la temperatura¡Error! **Marcador no definido.**

Figura 48. Alabeo por gradiente térmico ¡Error! **Marcador no definido.**

Figura 49. Esquema de una fundación liquida. ¡Error! **Marcador no definido.**

Figura 50. Carta de Bradbury para la determinación de C , $C1$ Y $C2$ ¡Error!
Marcador no definido.

Figura 51. Alabeo por humedad..... ¡Error! **Marcador no definido.**

Figura 52. Posiciones de la carga dentro de la losa. ¡Error! **Marcador no definido.**

Figura 53. Fenómeno de bombeo..... ¡Error! **Marcador no definido.**

Figura 54. Chequeo de esfuerzos y deformaciones ejemplo tipo¡Error! **Marcador no definido.**

ANEXOS

Pág.

Anexo A. Tránsito	¡Error! Marcador no definido.
Anexo B. Suelos	¡Error! Marcador no definido.
Anexo C. Diseño de juntas	¡Error! Marcador no definido.
Anexo D. Análisis de precios unitarios.....	¡Error! Marcador no definido.
Anexo E. Coeficiente de drenaje, Cd	¡Error! Marcador no definido.
Anexo F. Ejercicio práctico.....	¡Error! Marcador no definido.
Anexo G. Esfuerzos y deformaciones en los pavimentos rígidos	¡Error! Marcador no definido.
Anexo H. Carta de autorización de la entidad.....	141

RESUMEN

Esta monografía tiene como objetivo presentar una guía de diseño de pavimentos rígidos para vías urbanas con aplicación en municipios con poblaciones menores a cincuenta mil habitantes, con base en el estudio de los diferentes métodos de diseño más utilizados en el país. Para esto se realizó una exploración de los métodos existentes (AASHTO, PCA, INVIAS, IDU), con el fin de identificar las variables requeridas por cada uno de estos al momento de realizar el diseño estructural del pavimento rígido, y así poder compararlos y establecer las variables y parámetros que se deben tener en cuenta en la guía de diseño objeto de esta monografía.

El método AASTHO 93 es el que mejor se adapta a las condiciones requeridas, por ser el más completo técnicamente y el que mejores resultados proyecta desde el punto de vista económico. Por estos motivos esta metodología es la base principal para la elaboración de la guía; cuyo aporte principal es la recordación de valores constantes para algunas variables utilizadas en el método AASHTO 93 que permitieron simplificar la formula general, facilitando su uso a la hora de realizar el cálculo del espesor de losa.

Teniendo en cuenta la población objeto de esta monografía en la cual no se esperan altos volúmenes de vehículos comerciales, el estudio correspondiente al método PCA 84 solo se consideró como una herramienta de verificación para los análisis por fatiga y erosión.

Vale destacar que las metodologías colombianas adoptadas por el INVIAS y el IDU contemplan apartes de la metodología AASHTO 93 pero sus alcances están enfocados para su implementación en carreteras y en grandes ciudades.

Palabras Claves: pavimento rígido, diseño, métodos, variables, guía.

ABSTRAC

The objective of this monograph is to present a design guide for rigid pavements for urban roads with application in municipalities with populations of less than fifty thousand inhabitants, based on the study of the different design methods most used in the country. For this, an exploration of the existing methods (AASHTO, PCA, INVIAS, IDU) was carried out, in order to identify the variables required by each of these when carrying out the structural design of the rigid pavement, and thus be able to compare and establish them the variables and parameters that must be taken into account in the design guide object of this monograph.

The AASTHO 93 method is the method that best adopts the required conditions, as it is the most technically complete and the one that projects the best results from an economic point of view. For these reasons, this methodology is the main basis for the elaboration of the guide; whose main contribution is the remembrance of constant values for some variables used in the AASHTO 93 method that allowed simplifying the general formula, facilitating its use when calculating the slab thickness.

Taking into account the population object of this monograph in which high volumes of commercial vehicles are not expected, the study corresponding to the PCA 84 method was only considered as a verification tool for the fatigue and erosion analyzes.

It is worth noting that the Colombian methodologies adopted by INVIAS and IDU contemplate sections of the AASHTO 93 methodology, but its scope is focused on its implementation on highways and in large cities.

Keywords: rigid pavement, design, methods, variables, guide.

INTRODUCCIÓN

En Colombia existen diversos métodos para el diseño de pavimentos rígidos, mediante los cuales se recomienda una estructura de pavimento, acorde a las características del suelo de soporte, las solicitudes del tránsito y el medio ambiente; además, de presentar una relación beneficio-costó óptima. El mejoramiento de las vías es de vital importancia para el crecimiento económico del país, razón por la cual es necesario llevar a cabo proyectos de pavimentación en los diferentes municipios de Colombia.

En el presente trabajo se busca incentivar el uso de pavimentos rígidos en municipios pequeños y medianos como una alternativa viable, razón por la cual se planteó la creación de una guía práctica para el diseño de estructuras de pavimento rígido adaptada a municipios con poblaciones menores a los 50 000 habitantes, en la cual se consideren los parámetros básicos que garanticen la estabilidad de las obras, guardando un equilibrio entre lo técnico y lo económico, con el fin de brindar una herramienta de consulta para los entes territoriales. Esta guía tendrá como base los métodos más conocidos en el país (AASHTO 93, PCA 84, INVIAS, IDU).

Para la creación de la guía se estudió previamente cada uno de los métodos de diseño, con el fin de identificar las variables y parámetros requeridos por cada uno de estos, analizando su comportamiento de acuerdo a las condiciones requeridas para el caso de los estudios relacionados con el tránsito, la capacidad portante y el entorno natural; de otra parte se hicieron los respectivos estudios de costos de acuerdo a las estructuras de pavimento obtenidas para una vía tipo con el fin de analizar la alternativa que presenta mejor relación benéfico-costó.

1. DESCRIPCIÓN DE LA PROBLEMÁTICA

Existen diferentes metodologías para el diseño de pavimentos rígidos que se utilizan en el país, partiendo del método universal AASHTO, hasta aplicaciones empresariales como el PCA e institucionales (INVIAS, IDU) con aplicación práctica en grandes ciudades, razón por la cual surge la inquietud de analizar los métodos mencionados para establecer si es factible adoptar una metodología para entes territoriales pequeños o intermedios.

Por tal razón y para efectos de establecer el alcance de la monografía, la población objeto será los municipios con menos de 50.000 habitantes, cuyos tránsitos en promedio para atender la demanda de acuerdo al crecimiento del parque automotor de los vehículos comerciales registrado en el país es inferior a 5.000.000 de ejes equivalentes.

Teniendo en cuenta lo anteriormente mencionado se establece una pregunta problema que será la base del trabajo. ¿Es posible adoptar una metodología para el diseño de pavimentos rígidos en municipio pequeños o intermedios?

2. JUSTIFICACIÓN

El 88% de los municipios colombianos tienen menos de 50 000 habitantes, razón por la cual es importante elaborar una guía práctica para el diseño de pavimentos rígidos enfocados a dicha población, en la que se consideren los parámetros básicos que garanticen la estabilidad de las obras, guardando un equilibrio entre lo técnico y lo económico, con el fin de brindar una herramienta de consulta para los entes territoriales.

Teniendo en cuenta lo anteriormente mencionado, es importante recalcar los beneficios que otorga la implementación de pavimentos rígidos en áreas urbanas con respecto a otras alternativas (pavimentos flexibles o articulados). Entre las ventajas del uso de pavimentos rígidos se encuentran:

Costos Totales Inferiores: “Al comparar el valor neto de las diferentes alternativas de pavimentación, el pavimento rígido puede presentar costos iniciales mayores, pero la ventaja que tiene este con respecto a otras alternativas radica en el periodo de diseño, el cual al ser mayor genera una reducción significativa en los costos de mantenimiento, usualmente estas actividades se realizan en intervalos de 5 a 10 años y solo se requiere subsanar detalles de sellados de juntas”¹.

Economía en capas granulares: Alfaro², señala que las losas de concreto son las encargadas de recibir y disipar la mayor parte de las cargas aplicadas por los vehículos, y, transmitir las a las capas inferiores en menor magnitud, por esta razón a diferencia de los pavimentos flexibles, los rígidos cuentan solo con una capa granular (Base o Subbase) o en algunos casos con ninguna, es decir se apoyan

¹ ALFARO, Marcelo. Ventajas comparativas entre pavimentos de concreto y pavimentos de asfalto, 2015. Colombia: Asociación de productores de cemento.

² Ídem.

directamente sobre la subrasante, gracias a esto se logra una reducción del impacto ambiental, al requerirse menores volúmenes de materiales pétreos, y también al reducirse los volúmenes de excavación.

Durabilidad: “Las superficies de hormigón duran más, debido a que este a lo largo de su vida útil sigue adquiriendo resistencia en menor proporción. La vida útil de los pavimentos frecuentemente sobrepasa el periodo de diseño estimado”³.

Resistencia: “El hormigón resiste sin sufrir deterioros sustantivos los derrames de gasolina y diésel, así como los efectos de la intemperie. Los pavimentos rígidos transmiten bajas presiones al suelo de fundación”⁴.

Resistencia a altas temperaturas: “El hormigón no es afectado significativamente por el calor, no se vuelve pegajoso, ni se volatilizan algunos de sus componentes (no es contaminante). En zonas calurosas, (especialmente en áreas urbanas) se mantiene fresco, reduciendo la temperatura del entorno”⁵.

Indeformabilidad: “En las zonas de frenado y arranque de vehículos pesados, el hormigón no se deforma”⁶.

Textura: La superficie del pavimento rígido genera mayor seguridad al usuario, gracias a que esta se puede adaptar de acuerdo a la solicitud de la vía por medio de diversas técnicas disponibles para darle textura, ya sea durante la construcción

³ Ibid., p.2.

⁴ (GARNICA, Paul. GOMEZ, José. SESMA, Jesús. Mecánica de materiales para pavimentos. México: Instituto mexicano del transporte, 2002.)

⁵ Idem.

⁶ Ibid., p.3.

o una vez que el pavimento ha estado en servicio y requiera de una mayor resistencia al deslizamiento.

Drenaje: “Al ser un material poco susceptible a deformaciones y ensanchamientos generan superficies con buenas características de drenaje superficial para las aguas lluvias”⁷.

Seguridad: Arteaga⁸, menciona que gracias a su uniformidad y textura los pavimentos rígidos prestan una mayor seguridad al usuario, y en épocas de lluvias es menos probable que ocurran siniestros a causa de deslizamiento en superficies mojadas (hidroplaneo).

Señalización: “Para implementar la señalización horizontal peatonal y vehicular (cebras, líneas, flechas), el hormigón permite que los estampados y la pintura sean más duraderas”⁹.

Economía en Iluminación: “El hormigón es un material tres veces más reflectante que el asfalto, lo que brinda mayor seguridad al usuario aumentando la visibilidad durante la noche, esta capacidad reflectante del material puede ayudar a disminuir el consumo de energía hasta en un 30%, reduciendo también los costos de iluminación en las vías”¹⁰.

⁷ ARTEAGA, Jefferson. Análisis del comportamiento de la base-cemento para pavimentos con adición de residuos PET reciclado. Bogotá: Universidad Católica de Colombia, 2018.

⁸ Ídem.

⁹ Ídem.

¹⁰ VASQUÉZ, Bruno. Análisis comparativo entre un pavimento rígido y un pavimento flexible para la ruta Santa Elvira-el Arenal. Chile: Universidad Austral de Chile, 2014.

Rapidez de puesta en obra: “Con el hormigón se pueden alcanzar altas resistencias en cuestión de horas. La resistencia del hormigón se puede predecir y controlar con mayor facilidad”¹¹.

Costo Social de Mantenimiento: “Para la rehabilitación de los pavimentos de asfalto, se requiere ejecutar desvíos que perjudican a vecinos y usuarios. En las construcciones con hormigón se minimizan estos aspectos”¹².

Reparaciones: “El concreto se repara con facilidad sin importar las condiciones climáticas, la implementación de aditivos de diversas características permite realizar trabajos de cualquier tipo con gran rapidez y eficiencia”¹³.

Mano de obra y materiales: Patiño¹⁴, señala que las cuadrillas utilizadas para la colocación del pavimento flexible debe ser especializadas, en cambio para la construcción de los pavimentos rígidos se puede emplear personal de la región. Los materiales utilizados en los pavimentos rígidos son más accesibles, en comparación con los materiales utilizados en los pavimentos flexibles.

¹¹ Ídem.

¹² Ibíd., p.22.

¹³ PATILLO, Juan. Consideraciones generales sobre diseño de pavimentos asfálticos. Chile: Ingenieros de construcción, 2012.

¹⁴ Idem.

3. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

Presentar una guía de diseño de pavimentos rígidos para vías urbanas que sea aplicable a los municipios con poblaciones menores a 50 000 habitantes, con base en los diferentes métodos de diseño más utilizados en el país.

3.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Analizar los métodos más empleados en el país para el diseño de pavimentos rígidos.
- Identificar las variables y parámetros requeridos en las diferentes metodologías para el diseño de la estructura de un pavimento rígido.
- Calcular los espesores de la estructura del pavimento rígido utilizando los métodos analizados.
- Estimar los costos por metro de construcción de una vía con pavimento rígido.
- Recomendar la metodología más adecuada para el diseño de pavimentos rígidos teniendo en cuenta la población objeto de estudio.

4. METODOLOGÍA

Con el propósito de establecer una guía de diseño de pavimento rígido con aplicación en vías urbanas de municipios con poblaciones menores a los 50 000 habitantes se plantan las siguientes fases:

FASE 1. DEFINICION Y DELIMITACION DEL TEMA DEL ESTUDIO Y REVISION DOCUMENTAL PARA PROPONER LA ESTRUCTURA CONCEPTUAL DE LA MISMA.

Se realizó una investigación sobre las metodologías de diseño más utilizados en el país (AASHTO, PCA, INVIAS e IDU), con el fin de identificar las variables requeridas para llevar a cabo el diseño de la estructura del pavimento, además de los criterios que se deben cumplir para poder hacer uso de estos métodos.

FASE 2. DESARROLLO DE LA MONOGRAFIA DE ACUERDO A LA ESTRUCTURA CONCEPTUAL DEFINIDA. CULMINACION DEL PROCESO DE REVISION DOCUMENTAL Y PROPUESTA DE GUIA

Una vez analizados los métodos y definidas sus variables de diseño se realizan a nivel de ejercicio los cálculos de la estructura del pavimento rígido de una vía tipo para cada una de las alternativas de diseño, con el fin de identificar las diferencias y/o similitudes existentes entre estos y así poder establecer cuáles son los métodos que presentan mejores resultados desde el punto de vista beneficio – costo.

Con base al análisis de los resultados obtenidos se propone una guía de diseño empleando las variables que se consideren esenciales a la hora de realizar los cálculos para las estructuras de pavimentos rígidos en vías urbanas y con aplicación en municipios pequeños o intermedios.

5. REVISIÓN BIBLIOGRAFICA

5.1 PAVIMENTOS

Lara & Villanueva¹⁵, mencionan que un pavimento es una estructura conformada por un conjunto de capas superpuestas de materiales seleccionados de distintas características, las cuales deberán garantizar la estabilidad y funcionalidad de la misma ante las cargas impuestas por el tránsito y la acción del medio ambiente. Los pavimentos se clasifican de acuerdo con sus características en rígidos y articulados.

5.2 PAVIMENTOS RÍGIDOS

Están constituidos por una losa de concreto hidráulico, apoyada sobre la subrasante o sobre una capa de material seleccionado la cual se denomina subbase. “Debido a la rigidez y alto módulo de elasticidad del concreto hidráulico, los pavimentos rígidos basan su capacidad estructural en las losas de hormigón, estas distribuyen las cargas en áreas grandes logrando transmitir presiones al suelo de fundación en menor magnitud, por esta razón, el comportamiento de un pavimento rígido es suficientemente satisfactorio aun cuando existan zonas débiles en la subrasante”¹⁶.

5.2.1 Tipos de Pavimentos rígidos

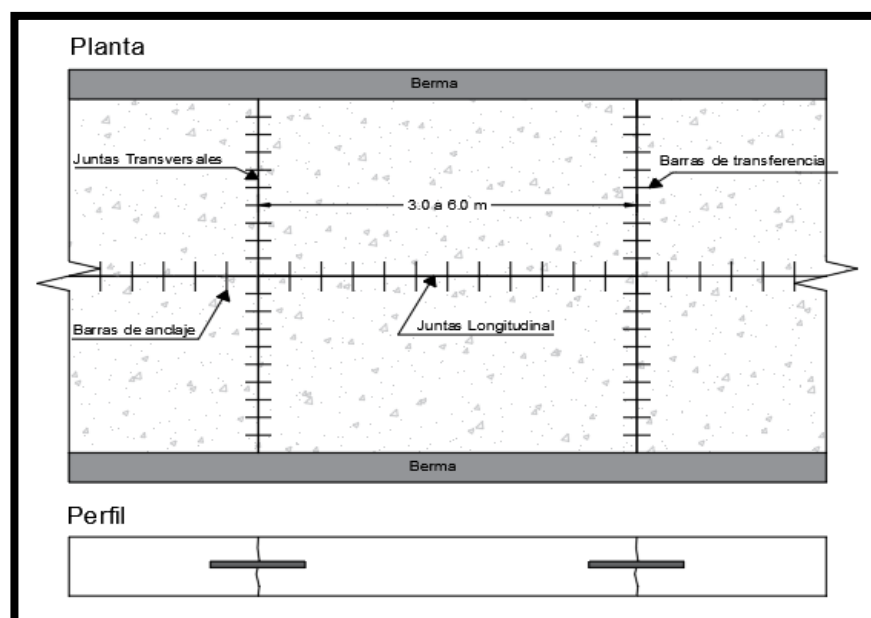
5.2.1.1 Pavimento de concreto simple con juntas

¹⁵ LARA, Stephanie. VILLANUEVA, Dayan. Diseño de la estructura de pavimento del tramo comprendido entre el K+000 al K0+100 del barrio Ricaurte del municipio de Ibagué. Tolima: Universidad Cooperativa de Colombia, 2019.

¹⁶ Montejo, A. Ingeniería de pavimentos. Bogotá: Universidad Católica de Colombia. (2006).

Este sistema no utiliza armadura de refuerzo en las placas de concreto. El espaciamiento entre las juntas de construcción transversales varía entre 3 y 6 metros (Figura 1), con el fin de controlar la fisuración de las losas causadas por la reacción del concreto ante los cambios de temperatura y humedad. “Dependiendo del diseño, la transferencia de carga entre las losas adyacentes se puede llevar a cabo mediante trabazón de agregados o mediante el uso de barras de transferencia (barras de acero liso). Además, se colocan barras de anclaje en las juntas longitudinales, en dirección perpendicular al eje de la vía. Este tipo de pavimento es el más usado debido a que su construcción es más sencilla y económica”¹⁷.

Figura 1. Esquema de pavimento de concreto simple con juntas.



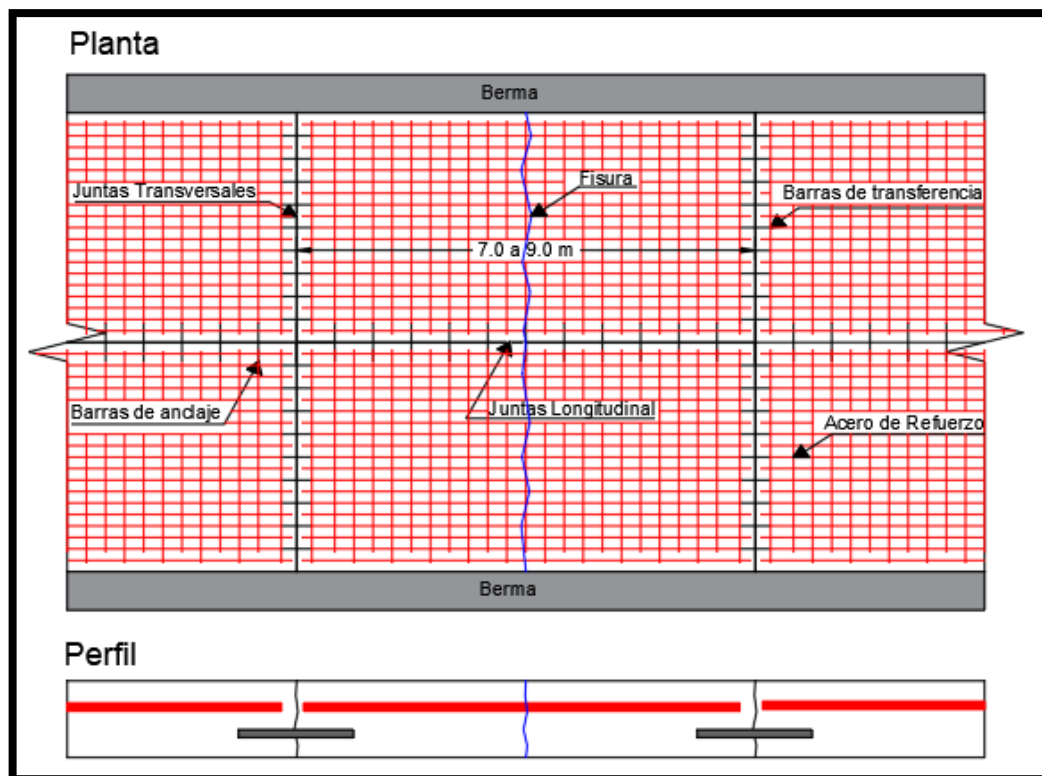
Fuente: INVIAS. Estudio e investigación del estado actual de las obras de la red nacional de carreteras. Bogotá: Instituto Nacional de Vías. (2006).

¹⁷ INVIAS. Estudio e investigación del estado actual de las obras de la red nacional de carreteras. Bogotá: Instituto Nacional de Vías. (2006).

5.2.1.2. Pavimentos de concreto reforzado

Este sistema utiliza acero de refuerzo por esta razón la distancia entre juntas transversales aumenta a valores de 7 y 9 metros (Figura 2). A pesar de contar con material de refuerzo, se espera que se produzcan fisuras controladas dentro de la losa. El uso de barras o trabazón de agregados en las juntas transversales es necesario para poder garantizar la transferencia de cargas entre las losas¹⁸.

Figura 2. Esquema de pavimento de concreto reforzado.



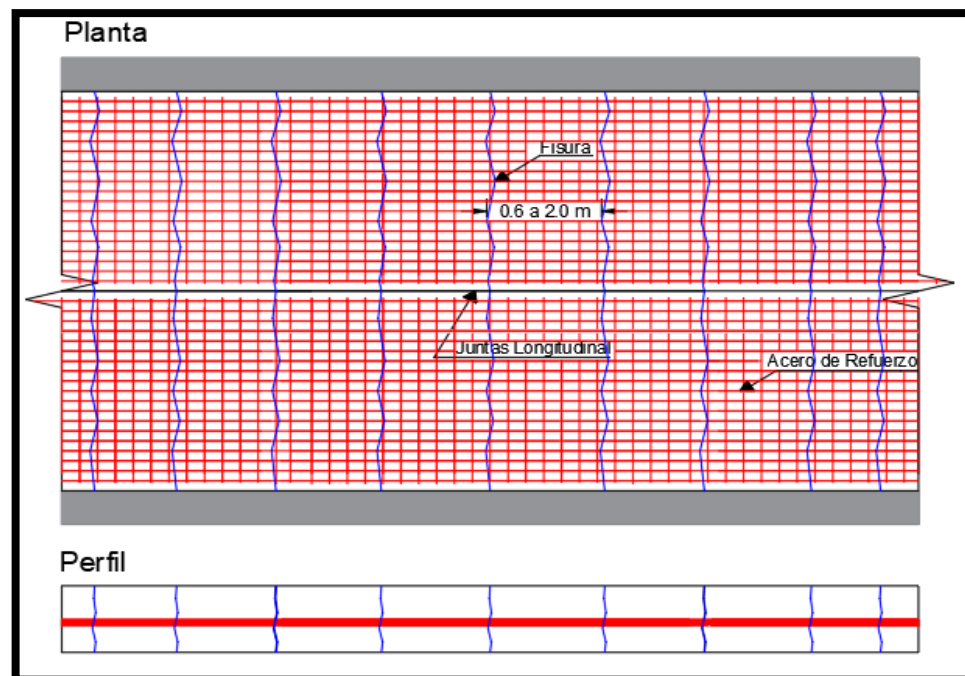
Fuente: Elaboración propia.

¹⁸ Ídem.

5.2.1.3. Pavimento de concreto continuamente reforzados

Este sistema no requiere juntas de contracción debido al refuerzo continuo que presenta, el cual se asemeja al utilizado en losas de entrepiso. La aparición de fisuras transversales se asocia al acero de refuerzo de la losa, estas normalmente tienen una abertura aproximada de 0.5 milímetros y presentan un espaciamiento típico de 0.60 a 2.0 metros entre fisuras¹⁹.

Figura 3. Esquema de pavimento de concreto continuamente reforzado.



Fuente: Elaboración propia.

5.3 METODOS DE DISEÑO PARA PAVIMENTOS RIGIDOS

Existen varios métodos de dimensionamiento para el diseño de la estructura del pavimento rígido, los cuales están basados en modelos matemáticos y en

¹⁹ Ídem

consideraciones practicas producto de la experiencia. Estos métodos presentan diferentes propuestas para realizar el diseño de la estructura del pavimento incluido el uso de catálogos de pavimentos tipo, el uso de ábacos y métodos prácticos de cálculo. En Colombia los métodos de diseño para pavimentos rígidos más utilizados son los propuestos por la AASHTO en 1993 y la PCA en 1984, los cuales son métodos empíricos universales, con características y resultados diferentes, estas metodologías fueron tomadas en cuenta para la elaboración de las guías de diseño desarrolladas por el INVIAS y el IDU.

5.3.1. American Association Of State Highway And Transportation Officials (AASHTO)

“Este método de diseño tiene origen en el ensayo vial AASHO (1958-1960) realizado a escala real en Ottawa, Illinois (Estados Unidos), en el cual, basándose en el desgaste que experimentaban las vías, se fueron representando las relaciones deterioro-solicitud, introduciendo el concepto de serviciabilidad en el diseño de pavimentos”²⁰.

Según IBCH²¹, las primeras ediciones de la guía AASHTO para el diseño de pavimentos se realizaron en 1961 y 1972, en estas se incluyen los desarrollos e investigaciones basadas en las tecnologías de los pavimentos, de los vehículos y las observaciones sobre el comportamiento de las estructuras puestas en servicio con la metodología propuesta. En 1981 se revisó parte de la guía correspondiente al diseño de pavimentos rígidos y en 1993 se publicó una nueva versión de la guía AASHTO, la cual incorpora la revisión del diseño de sobre capas, diseño de

²⁰ IBCH. (2006). Diseño de Pavimentos AASHTO-93. La Paz: Instituto Boliviano del Cemento y el Hormigon.

²¹ Ídem.

subbases delgadas, erosión de la subbase y confinamiento lateral, además, de los cambios realizados a la ecuación general de diseño de la guía a la cual se le agregaron algunos factores tales como: el error estándar combinado, la diferencia de serviciabilidad y el coeficiente de drenaje²².

5.3.1.1. Variables de diseño

Para el diseño de pavimentos rígidos la AASHTO 93 involucra varios factores, todos importantes a la hora de predecir el comportamiento de la estructura de pavimento, evitando así posibles daños que lleven al deterioro acelerado de esta, disminuyendo su vida útil. Una vez establecidos los valores de cada variable se hace uso de la ecuación general para el diseño de pavimentos rígidos, esta ecuación se muestra a continuación:

$$\log W_{18} = Z_r S_o + 7.35 \log(D + 1) - 0.06 + \frac{\log\left(\frac{\Delta PSI}{4.5 - 1.5}\right)}{1 + \frac{1.624 \times 10^7}{(D + 1)^{8.46}}} + (4.22 - 0.32 P_t) \log \left\{ \frac{M_r C_D (D^{0.75} - 1.132)}{215.63 J \left[D^{0.75} - \frac{18.42}{\left(\frac{E_c}{k}\right)^{0.25}} \right]} \right\}$$

- **Tránsito (W18)**

En el método de la AASHTO los pavimentos se diseñan para que resistan un determinado número de cargas durante su vida útil. El cálculo del tránsito de diseño requiere la transformación a número equivalentes de ejes patrón (ejes simples de cuatro ruedas cargados con 8.2 toneladas) de los diferentes vehículos que

²² González, G., & Vanegas, E. (2016). Comparación de las metodologías AASHTO y PCA para el diseño de pavimento rígido. Cartagena: Universidad de Cartagena .

circularan sobre la vía a lo largo del periodo de diseño. La guía de la AASHTO tiene nueve tablas, para tres índices de servicio final, que cuentan con factores de equivalencia para cada uno de los tres ejes principales (sencillo, tándem, trídem).

- **Confiabilidad (R) y Desviación Estándar Normal (Zr)**

La confiabilidad de diseño se refiere al grado de certidumbre (seguridad) que se tiene con respecto a que una determinada alternativa de diseño alcance a durar en la realidad el tiempo establecido en el periodo seleccionado, “también se puede entender la confiabilidad como la contraparte de la probabilidad de falla, es decir, que entre mayor sea la confiabilidad menor será la probabilidad de falla de la estructura durante el periodo de diseño”²³.

Los niveles de confiabilidad se pueden establecer de acuerdo a la función de la vía (Tabla 1). Las vías de mayor importancia (Autopistas, arterias principales) se les asignan un nivel de confiabilidad mayor dado que son vías donde el flujo vehicular es constante y por lo tanto no se espera que hallan interrupciones en la movilidad a causa de constantes mantenimientos²⁴.

Tabla 1. Niveles de confiabilidad, R, en función del tipo de carretera

CLASIFICACIÓN FUNCIONAL	NIVELES DE CONFIABILIDAD R (%)	
	URBANA	RURAL
Autopistas y carreteras importantes	85 – 99.9	80 – 99.9
Arterias principales	80 – 99	75 – 95
Colectores	80 – 95	75 – 95
locales	50 – 80	50 – 80

Fuente: Guía AASHTO para diseño de estructuras de pavimento – AASTHO 93

²³ Méndez, R. [Geotecnia Aplicada]. (2020, Abril 21). Concreto hidráulico para pavimentos [Archivo de video]. Recuperado de <https://youtu.be/H2qpbxyDwnY>

²⁴ Londoño, C. A. (2001). *Diseño, Construcción y Mantenimiento de Pavimentos Rígidos*. Bogotá: ICPC.

El valor de la desviación estándar normal Z_r se define en función del valor de confiabilidad asumido para el diseño (Tabla 2)

Tabla 2. Valores Z_r , correspondientes a niveles seleccionados de confiabilidad

CONFIABILIDAD R (%)	DESVIACIÓN ESTÁNDAR NORMAL Z_r
50	0.000
60	-0.253
70	-0.524
75	-0.674
80	-0.841
85	-1.037
90	-1.282
91	-1.340
91	-1.405
93	-1.476
94	-1.555
95	-1.645
96	-1.751
97	-1.881
98	-2.054
99	-2.327
99.9	-3.090
99.99	-3.750

Fuente: Guía AASHTO para diseño de estructuras de pavimento – AASTHO 93

- **Desviación Estándar Global (S_o)**

Este valor representa la desviación conjunta de la desviación estándar de la predicción del tránsito en el periodo de diseño, con la desviación estándar de la predicción del comportamiento del pavimento²⁵, es decir, del número de

²⁵ Ídem.

repeticiones de ejes patrón que puede soportar el pavimento hasta que su nivel de servicio final este por debajo del valor establecido en el diseño.

La guía de la AASHTO define este factor en función del tipo proyecto, en esta se recomienda adoptar un valor S_o igual a 0.35 para construcciones nuevas y de 0.40 para rehabilitaciones o sobre capas²⁶.

Índice de servicio (ΔPSI)

Se define como la capacidad que tiene un pavimento de prestar un buen servicio al usuario durante su vida útil²⁷, este se clasifica en una escala de 0 a 5, en donde 0 significa que el pavimento se encuentra en condiciones intransitables y 5 cuando el pavimento se encuentra en excelentes condiciones. Este índice se obtiene de la variación del índice de servicio inicial (P_o) y el final (P_t).

El índice de servicio final representa el valor más bajo tolerable del pavimento antes de que este requiera una rehabilitación o reconstrucción. “Se sugiere para vías de gran importancia adoptar un valor P_t mayor o igual a 2.5, y para vías con flujo vehicular medio-bajo este valor puede ser igual a 2”²⁸.

El índice de servicio inicial dependerá en gran parte de la calidad de la construcción, por esta razón, asignarle a este un valor igual a 5 es poco común. En los ensayos

²⁶ AASHTO. (1993). Guide for design of pavement structures. Washington: American Association of State Highway and Transportation Officials.

²⁷ González, G., & Vanegas, E. Comparación de las metodologías AASHTO y PCA para el diseño de pavimento rígido. Cartagena: Universidad de Cartagena. (2016).

²⁸ Ídem.

viales AASHO, se estableció que el valor de P_o en promedio es igual a 4.5 en el caso de los pavimentos rígidos”²⁹.

Módulo de Rotura del Concreto en Mpa (M_r o S_c)

El módulo de rotura, también conocido como resistencia a la flexión, es importante como variable de entrada para el diseño de pavimentos rígidos, debido a que el concreto trabaja principalmente a flexión. Este parámetro permite controlar el agrietamiento por fatiga originado por las cargas cíclicas a las que está sometido el pavimento. Los valores del módulo de rotura varían entre 3.8 Mpa (400 psi) y 4.8 Mpa (700 psi). Para determinar las características de flexión del concreto se realiza un ensayo el cual esta normalizado en la ASTM C78, en este se utiliza una probeta prismática de concreto medido a los 28 días, a la cual se les aplica una carga en los tercios de la luz, forzando la falla en el tercio central de la probeta³⁰.

Coeficiente de drenaje (C_d)

Este coeficiente se obtiene de acuerdo a la evaluación de dos parámetros. El primero es la condición de drenaje del sector donde se va construir la vía, la AASHTO clasifica esta condición de acuerdo al tiempo que tarda el agua infiltrada en ser evacuada del pavimento (Tabla 3), y el segundo es el tiempo (expresado en porcentaje) que va estar expuesto el pavimento a niveles de humedad próximos a la saturación durante un año, este dato depende de la precipitación media anual.

²⁹ AASHTO. (1993). Guide for design of pavement structures. Washington: American Association of State Highway and Transportation Officials.

³⁰ González, G., & Vanegas, E. (2016). Comparación de las metodologías AASHTO y PCA para el diseño de pavimento rígido. Cartagena: Universidad de Cartagena .

Combinando los parámetros anteriores se obtienen valores del coeficiente de drenaje recomendados por la guía AASHTO (Tabla 4).

Tabla 3. Calidad del drenaje.

Calidad del Drenaje	Excelente	Bueno	Aceptable	Pobre	Muy pobre
Tiempo de remoción de agua	2 horas	1 día	1 semana	1 mes	Agua no drenada

Fuente: Guía AASHTO para diseño de estructuras de pavimento – AASTHO 93

Tabla 4. Valores de coeficiente de drenaje, Cd.

CALIDAD DEL DRENAJE	PORCENTAJE DEL TIEMPO QUE LA ESTRUCTURA DEL PAVIMENTO ESTÁ EXPUESTA A NIVELES DE HUMEDAD PRÓXIMOS A LA SATURACIÓN			
	< 1%	1% - 5%	5% - 25%	>25%
Excelente	1.25 – 1.2	1.20 – 1.15	1.15 – 1.10	1.10
Bueno	1.20 – 1.15	1.15 – 1.10	1.10 – 1.00	1.00
Mediano	1.15 – 1.10	1.10 – 1.00	1.00 – 0.90	0.90
Malo	1.10 – 1.00	1.00 – 0.90	0.90 – 0.80	0.80
Muy Malo	1.00 – 0.90	0.90 – 0.80	0.80 – 0.70	0.70

Fuente: Guía AASHTO para diseño de estructuras de pavimento – AASTHO 93

Coeficiente de Transferencia de carga (J)

Este factor expresa la capacidad que tienen los pavimentos rígidos de transmitir parte de las cargas generadas por el tránsito de una losa a otra por medio de las juntas transversales³¹. La eficiencia de la transferencia de carga depende de múltiples factores como, el tipo de pavimentos que se vaya a diseñar (simple, reforzado o continuamente reforzado), el tipo de berma (de concreto o de asfalto) y la existencia o no de elementos de transmisión de carga (barras de acero liso o

³¹ Ídem.

trabazón de agregados). Una vez establecidas estas condiciones se procede a entrar a la Tabla 5 y elegir el valor del coeficiente de carga (J).

Tabla 5. Valores del coeficiente de transmisión de carga, J

Tipo de Pavimento	Berma	De Asfalto		De Concreto	
	Dispositivos de transmisión de cargas	SI	NO	SI	NO
	No reforzado o reforzado con juntas	3.2	3.8 – 4.4	2.5 – 3.1	3.6 – 4.2
	Reforzado continuo	2.9 – 3.2	–	2.3 – 2.9	–

Fuente: Guía AASHTO para diseño de estructuras de pavimento – AASTHO 93

Módulo de Elasticidad del Concreto (E_c)

Es un parámetro que indica la rigidez y la capacidad de distribución de cargas que tiene una losa de pavimento rígido. Este se puede determinar a través de un ensayo descrito en la norma ASTM C469, o en su defecto, correlacionarlo con la resistencia a la compresión del concreto (f'_c), para este último el código colombiano de construcciones sismo resistentes (NSR 10) establece que el valor del módulo de elasticidad puede calcularse con las ecuaciones presentadas en la Tabla 6.

Tabla 6. Correlación entre la resistencia a la compresión y el módulo de elasticidad.

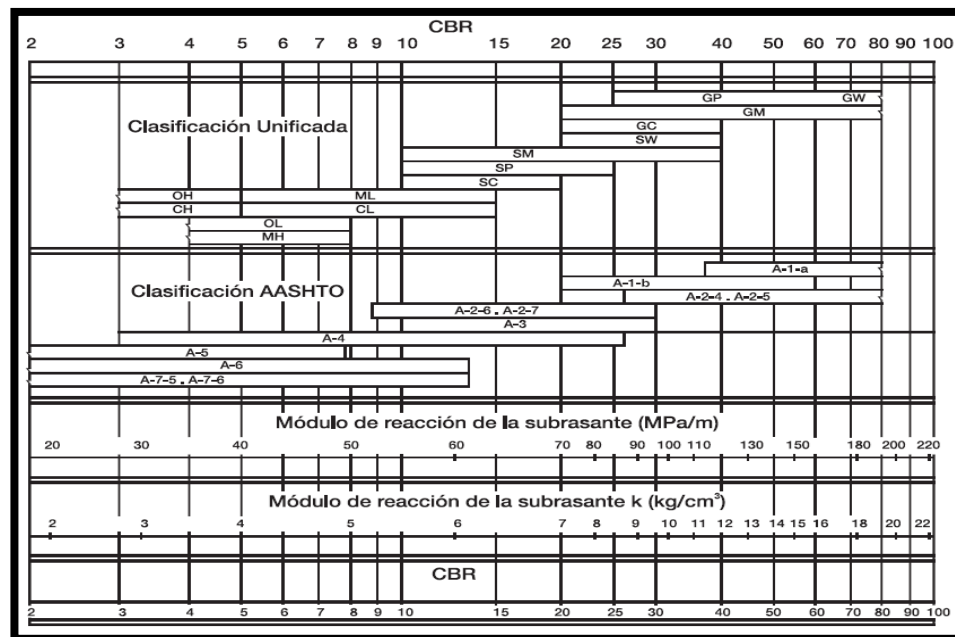
Tipos de agregado y origen	Módulo de elasticidad E_c (Mpa – kg/cm ²)
Grueso – Ígneo	$E_c = 5500\sqrt{f'_c} - 17500\sqrt{f'_c}$
Grueso – Metamórfico	$E_c = 4700\sqrt{f'_c} - 15000\sqrt{f'_c}$
Grueso – Sedimentario	$E_c = 3600\sqrt{f'_c} - 11500\sqrt{f'_c}$
Sin información	$E_c = 3900\sqrt{f'_c} - 12500\sqrt{f'_c}$

Fuente: Manual de Diseño de Pavimentos de Concreto para Vías con Bajos, Medios y Altos Volúmenes de Tránsito – INVIAS

Módulo de Reacción en Mpa/m de la superficie de Apoyo del Pavimento (K)

Este parámetro determina las condiciones del suelo y la capacidad de soporte del mismo ante los esfuerzos transmitidos por la losa de concreto. “Este factor se obtiene a partir de un ensayo de placa, el cual da como resultado el valor de K. Debido al costo y la logística asociada a este ensayo es común que este no se realice y en cambio se calcule el valor de K a partir de correlaciones con el CBR”.³² (Figura 4). En el caso de usar una capa de subbase granular o estabilizada, el módulo de reacción de esta, afectara el de la subrasante conformando un módulo de reacción combinado, el cual permite disminuir el espesor de la placa de concreto.

Figura 4. Correlación aproximada entre la clasificación de los suelos y los diferentes ensayos.

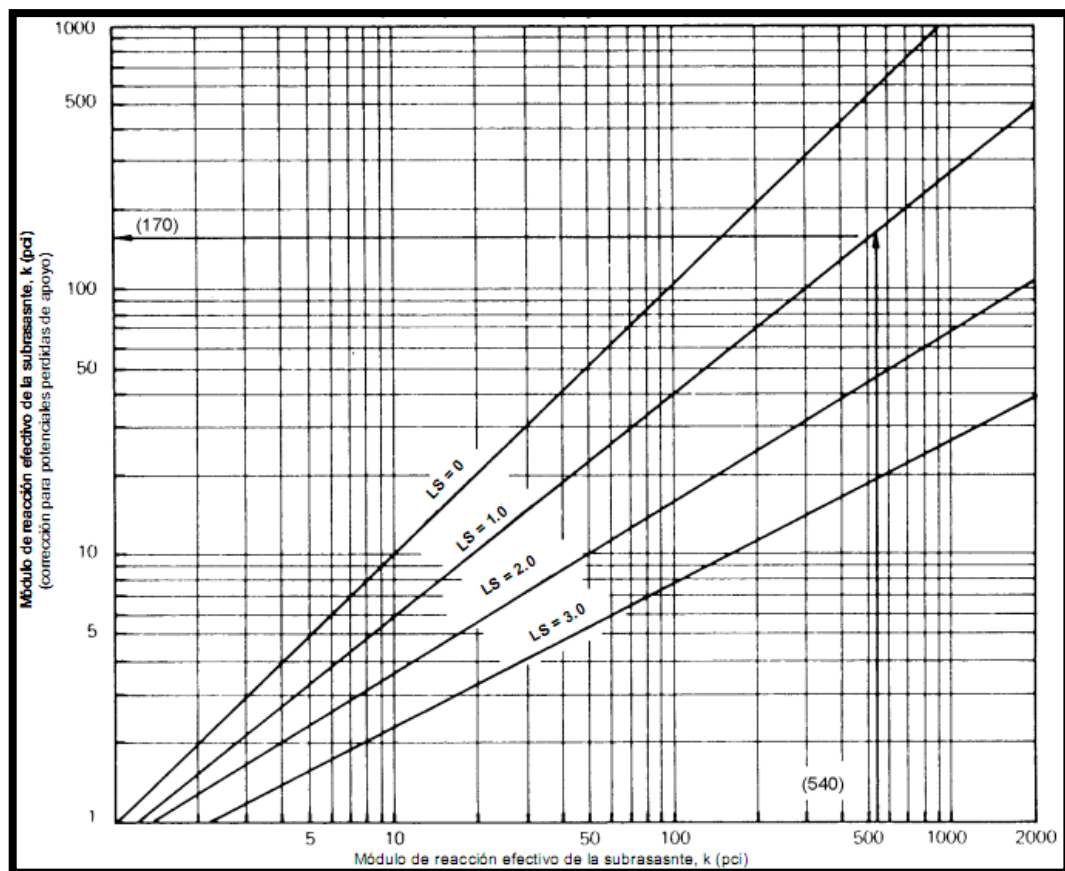


Fuente: Manual de Diseño de Pavimentos de Concreto para Vías con Bajos, Medios y Altos Volúmenes de Tránsito – INVIAS

³² Méndez, R. [Geotecnia Aplicada]. (2020, Abril 21). Bases y sub-bases granulares- Funciones [Archivo de video]. Recuperado de <https://youtu.be/N3Rsl4nkQy8>

La AASHTO teniendo en cuenta las posibles fallas por erosión en el sistema de apoyo de la losa de concreto, establece un factor de pérdida de soporte (L_s), el cual conlleva una reducción del módulo de reacción efectivo del conjunto subbase y subrasante como se muestra en la Figura 5. La AASTHO recomienda que, para bases granulares sin tratar se tomen valores de L_s entre 1.0 y 3.0³³.

Figura 5. Correlación del módulo efectivo de reacción por pérdida de potencial de soporte.



Fuente: Guía AASHTO para diseño de estructuras de pavimento – AASTHO 93

³³ Méndez, R. [Geotecnia Aplicada]. (2020, Abril 21). Bases y sub-bases granulares- Funciones [Archivo de video]. Recuperado de <https://youtu.be/N3Rsl4nkQy8>

5.4 PORTLAND CEMENT ASSOCIATION (PCA)

El método de la Portland Cement Association (PCA) fue desarrollado en Estados Unidos, su enfoque se considera empírico-mecanicista, debido a que está basado en las ecuaciones propuestas por Westergaard en 1926, los aportes con respecto a los efectos de las bases realizado por Burmister en 1945, la elaboración de las cartas de influencia por parte de Pickett y Ray para simplificar el diseño y el trabajo de análisis por elementos finitos realizados por Tayabji y Colley, en el cual se estudió el comportamiento de una losa de espesor variable y dimensiones finitas (180 x 144) a la cual se aplicaron cargas de centro, de borde y de esquina, considerando diferentes condiciones de apoyo y soporte³⁴.

Este método utiliza también como base, el análisis de resultados de modelos a escala y ensayos viales como la prueba Arlington Test, en la cual se estudió el efecto que tiene el uso de distintos tipos de subbases, juntas y bermas de concreto en el comportamiento del pavimento.

El método PCA busca controlar dos criterios. El primero es análisis de fatiga, el cual busca impedir el agrietamiento de las losas, producto de las cargas cíclicas a las que está sometido el pavimento. El segundo es el análisis de erosión, con este se espera limitar las deflexiones en los bordes de la losa, como consecuencia de la erosión de la superficie de apoyo (fenómeno de bombeo).

Los criterios de diseño de espesores de este método están basados en la experiencia del comportamiento general de los pavimentos.

³⁴ LONDOÑO. Op. Cit., p.28.

5.4.1. Variables de diseño

Después de seleccionar el tipo de pavimento (simple, reforzado, continuamente reforzado), el tipo de subbase (granular o estabilizada) si es necesaria y el uso o no de barras de transferencia y bermas; el espesor de diseño es determinado con base en las siguientes variables.

5.4.1.1. Módulo de rotura del concreto (MR)

Los esfuerzos de flexión a los que están sometidas las losas de concreto por la acción del tráfico, son mayores a los esfuerzos de compresión, debido a esto es necesario conocer la resistencia a flexión a través del módulo de rotura del concreto (MR). “Esta resistencia se tiene en cuenta al momento de realizar el análisis por fatiga, el cual controla el agrietamiento del pavimento causado por la acción de las cargas repetitivas de los vehículos pesados”³⁵.

El presente método utiliza la resistencia a la flexión medida por el ensayo de módulo de rotura sobre vigas de 15x15x75 cm, cargándolas en los tercios de la luz, para un periodo de curado de 28 días, el ensayo se rige por la norma ASTM C78 y ASTM C293. En Colombia se establecen valores de MR entre 38 kg/cm² a 45 Kg/cm².

5.4.1.2. Módulo de reacción de la subrasante o del conjunto subrasante-subbase (K)

Al igual que el método AASHTO, el método de la PCA define el soporte de la subrasante en términos del módulo de reacción K, este se calcula a través del

³⁵ Montejo, A. (2006). Ingeniería de pavimentos. Bogota: Universidad Católica de Colombia.

ensayo de placa o por medio de correlaciones con el CBR. En algunos casos la losa de concreto no se puede apoyar directamente sobre la subrasante debido a que su capacidad portante es insuficiente para las condiciones del tránsito, razón por la cual se coloca una capa granular o estabilizada denominada subbase, con el fin de incrementar el valor de K.

El efecto que tiene el uso de subbases granulares o tratadas sobre el valor de K se puede observar en las Tablas 7 y 8.

Tabla 7. Efectos de la Subbase no Tratadas sobre los valores K

Valores K de la Subrasante, PCI	Valores de K de la Subbase, PCI			
	4 pulg	6 pulg	9 pulg	12 pulg
50	65	75	85	110
100	130	140	160	190
200	220	230	270	320
300	320	330	370	430

Fuente: Diseño de espesor para pavimentos de hormigón en carreteras y calles, PCA 84

Tabla 8. Valores K de Diseño Subbase Tratadas con Cemento

Valores K de la Subrasante, PCI	Valores de K de la Subbase, PCI			
	4 pulg	6 pulg	9 pulg	10 pulg
50	170	230	310	390
100	280	400	520	640
200	470	640	830	--

Fuente: Diseño de espesor para pavimentos de hormigón en carreteras y calles, PCA 84

5.4.1.3. Tránsito de diseño

En esta variable es necesario conocer el espectro de cargas por ejes más pesados y la frecuencia con la cual estos circularan por la vía durante el periodo de diseño del pavimento. Estos valores se obtienen a partir de la estimación del tránsito promedio diario (TPD) actual de la vía y las cargas por eje de los vehículos comerciales, estas cargas se multiplican por un factor de seguridad, el cual está dado en función del tipo de vía y el nivel de tráfico (Tabla 9).

Tabla 9. Factores de seguridad de carga.

TIPO DE VIA	Fsc
Vías de carriles múltiples en las cuales se espera un flujo de tránsito ininterrumpido con un elevado volumen de tránsito pesado.	1.2
Carreteras y vías urbanas arterias en las que se espera un volumen moderado de tránsito de vehículos pesados.	1.1
Calles residenciales y otras vías que vayan a soportar bajos volúmenes de tránsito de camiones.	1.0

Fuente: Diseño de espesor para pavimentos de hormigón en carreteras y calles, PCA 84[—]

Un método para poder determinar el tránsito de diseño, consiste en el uso de tasas anuales de crecimiento vehicular y factores de proyección. La PCA facilita el uso de la Tabla 10 para seleccionar el valor del factor de proyección del tránsito el cual está en función del periodo de diseño y la tasa anual de crecimiento vehicular, en esta última se debe tener en cuenta las variaciones que se puedan presentar como consecuencia del tránsito atraído y generado. Este factor de proyección se multiplica por el TPD actualizado para obtener el TPD de diseño³⁶.

Una vez determinado el TPD de diseño y teniendo en cuenta que para el método PCA las cargas generadas por vehículos livianos no son tomadas en cuenta, se procede a calcular el TPD de vehículos comerciales, entendiendo como vehículos comerciales la suma de buses y camiones. Si la vía tiene múltiples carriles se debe hacer uso de la Figura 6, para obtener el porcentaje de vehículos comerciales que circularan por el carril de diseño. Estos valores se multiplican por el número de días en un año (365) y el periodo de diseño establecido con el fin de establecer el número de vehículos comerciales que pasaran por el carril de diseño a lo largo del periodo de diseño³⁷.

³⁶ Idem.

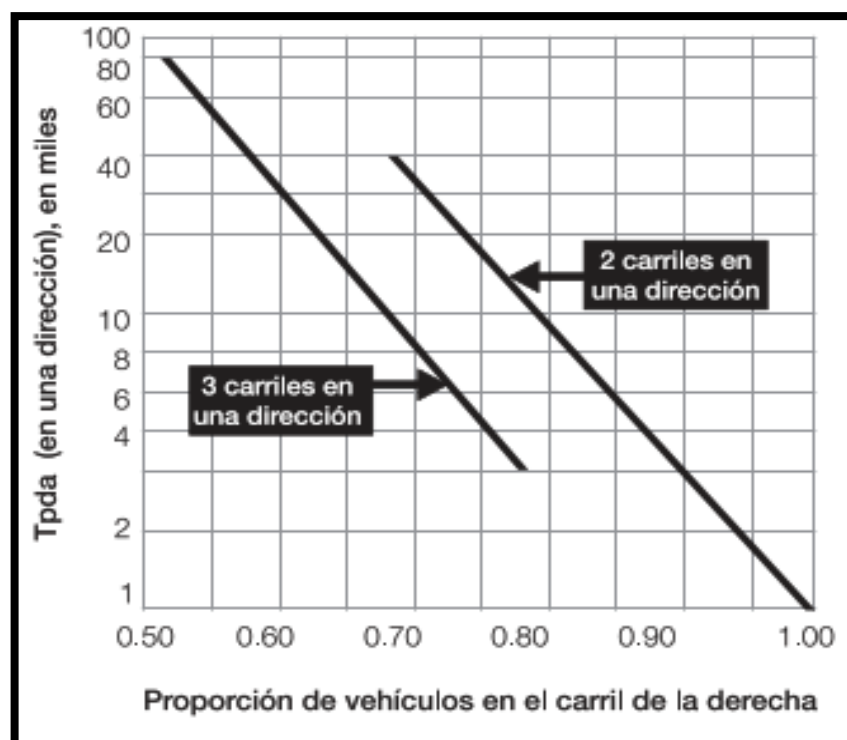
³⁷ Ídem.

Tabla 10. Tasas anuales de crecimiento de transito “r” y sus correspondientes factores de proyección.

Tasa de crecimiento anual de transito %	Factores de proyección
	20 años
1	1.1
1.5	1.2
2	1.2
2.5	1.3
3	1.3
3.5	1.4
4	1.5
4.5	1.6
5	1.6
5.5	1.7
6	1.8

Fuente: Diseño de espesor para pavimentos de hormigón en carreteras y calles, PCA 84

Figura 6. Porcentaje de camiones en el carril de diseño.



Fuente: Manual de Diseño de Pavimentos de Concreto para Vías con Bajos, Medios y Altos Volúmenes de Tránsito – INVIAS

5.5 MANUAL DE DISEÑO DE PAVIMENTOS DE CONCRETO PARA VÍAS CON BAJOS, MEDIOS Y ALTOS VOLÚMENES DE TRÁNSITO – INVIAS

El método de diseño del INVIAS corresponde a un documento resultado de un convenio interinstitucional de cooperación técnica entre el Ministerio de Transporte, el INVIAS y el ICPC, orientado hacia el diseño de pavimentos rígidos aplicable para carreteras de diversa índole³⁸, razón por la cual el abordaje de este manual se hace con el fin de identificar los parámetros adoptados en las variables de diseño, que puedan ser tenidas en cuenta para utilizar en los métodos empíricos universales de la AASTHO y PCA con el fin de introducir datos que correspondan a las condiciones nuestras.

5.5.1. Variables utilizadas

5.5.1.1. Tránsito y el periodo de diseño

El INVIAS teniendo en cuenta la información de conteos y pesajes de vehículos, que se hacen periódicamente en el territorio colombiano, diseñó la Tabla 11 producto de los espectros de carga obtenidos con la distribución de peso para los diferentes tipos de ejes por cada 1000 camiones, en las diferentes estaciones de peaje en el país, estos fueron afectados por los respectivos factores de equivalencia establecidos por la AASTHO 93³⁹.

³⁸ INVIAS. (2008). Manual de diseño de pavimentos de concreto para vías con bajo, medios y altos volúmenes de tránsito. Bogotá: Instituto Colombiano de productores de cemento.

³⁹ Idem.

Tabla 11. Categoría de tránsito por la selección de espesores

Categoría	Tipo de Vía	TPDs	Ejes acumulados de 8,2 Ton
T0	(Vt) – (E)	0 a 200	< 1'000.000
T1	(Vs) – (M o A) – (CC)	201 a 500	1'000.000 a 1'500.000
T2	(Vp) – (A) – (AP-MC-CC)	501 a 1.000	1'500.00 a 5'000.000
T3	(Vp) – (A) – (AP-MC-CC)	1.001 a 2.500	5'000.000 a 9'000.000
T4	(Vp) – (A) – (AP-MC-CC)	2.501 a 5.000	9'000.000 a 17'000.000
T5	(Vp) – (A) – (AP-MC-CC)	5.001 a 10.000	17'000.000 a 25'000.000
T6	(Vp) – (A) – (AP-MC-CC)	Más de 10.001	25'000.000 a 100'000.000

Fuente: Manual de Diseño de Pavimentos de Concreto para Vías con Bajos, Medios y Altos Volúmenes de Tránsito – INVIAS

En esta tabla se definen siete (07) categorías en función del tipo de vía, el tránsito promedio diario semanal (TPDs), y el número de ejes acumulados de 8.2 ton, que pasaran por el carril de diseño durante el periodo de diseño, el cual corresponde a 20 años.

El tipo de vía se clasifica de acuerdo a su importancia (Vías Primarias, secundarias y terciarias), sus características (Autopistas, carreteras multicarril, carreteras de dos direcciones), y el ancho de la sección vial (Anchas, medias, estrechas).

5.5.1.2. La subrasante

El manual establece cinco (05) clases de suelo (Tabla 12), clasificados de acuerdo al valor obtenido en el ensayo de relación de soporte de california del suelo (CBR) evaluado según la norma INVE-148-07, este valor se correlaciona con el módulo de reacción de la subrasante (k) el cual es un parámetro usado en las ecuaciones de diseño de los métodos AASHTO y PCA.

Tabla 12. Clasificación de la subrasante de acuerdo con su resistencia

Clase o Tipo	CBR (%)	Módulo resiliente (kg/cm ²)
S1	< 2	< 200
S2	2 – 5	200 – 500
S3	5 – 10	500 – 1.000
S4	10 – 20	1.000 – 2.000
S5	>20	>2.000

Fuente: Manual de Diseño de Pavimentos de Concreto para Vías con Bajos, Medios y Altos Volúmenes de Tránsito – INVIAS

El INVIAS recomienda caso de tener una subrasante con un CBR menor o igual 2, llevar a cabo un tratamiento especial como la sustitución parcial o total de los materiales inaceptables, o la modificación de sus características con base en mejoramientos mecánicos o con la adición de productos de cal, cemento u otros que ayuden a mejorar las características de la subrasante (Artículo INV 230-07)⁴⁰.

5.5.1.3. Material de soporte para el pavimento

En el manual se tienen en cuenta tres tipos de soporte para el pavimento, tal y como se indica en la Tabla 13, de la cual se resalta la recomendación del espesor de 150 mm de la base granular (Artículo INV 330-07) o estabilizada con cemento (Artículo INV-341-07).

Tabla 13. Clasificación de los materiales de soporte para el pavimento de concreto

Denominación	Descripción
SN	Subrasante Natural
BG	Base Granular
BEC	Base Estabilizadas con Cemento

Fuente: Manual de Diseño de Pavimentos de Concreto para Vías con Bajos, Medios y Altos Volúmenes de Tránsito – INVIAS

⁴⁰ Ibid., p.24.

5.5.1.4. Características del concreto para pavimentos

El manual propone cuatro (04) calidades de concreto de acuerdo con el nivel de tránsito, tal y como se ilustra en la Tabla 14, cuyas resistencias a la flexotracción se evalúan a los 28 días y se miden con el ensayo de la viga simple cargada en los tercios de la luz.

Tabla 14. Valores de resistencia a la flexotracción del concreto (módulo de rotura)

Descripción	Resistencia a la flexión (kg/cm ²)	Número de camiones por día
MR 1	38	<25
MR 2	40	25 – 150
MR 3	42	150 – 300
MR 4	45	>300

Fuente: Manual de Diseño de Pavimentos de Concreto para Vías con Bajos, Medios y Altos Volúmenes de Tránsito – INVIAS

5.5.1.5. Transferencias de carga y confinamiento lateral

El manual tiene en cuenta para la determinación del espesor de las losas de concreto, la presencia de pasadores de carga (dovelas) en las juntas transversales y las condiciones de confinamiento lateral del pavimento, como son el uso de las bermas y los bordillos Tabla 15.

Tabla 15. Denominación del sistema de transferencia de carga y confinamiento lateral.

Denominación	Descripción
D	Dovelas
B	Bermas
No D	No Dovelas
No B	No Bermas

Fuente: Manual de Diseño de Pavimentos de Concreto para Vías con Bajos, Medios y Altos Volúmenes de Tránsito – INVIAS

5.5.2. Metodología de diseño

El manual tiene en cuenta recomendaciones de los métodos AASHTO y PCA, para la elaboración de las cartas de diseño que se proponen en el catálogo de las estructuras, que corresponden a seis tablas como resultado del análisis de las metodologías mencionadas teniendo en cuenta las variables que influyen directamente en el diseño, los espesores registrados en los catálogos son el resultado del análisis de más de 70 000 diseños, permitiendo obtener un espectro amplio de espesores, de los cuales se desecharon aquellas estructuras que tenían espesores muy reducidos por considerarlos frágiles y por el otro lado se excluyeron los que mostraban valores superiores a 30 cm, dejando para estos casos que el diseñador recurra a otras fuentes de información⁴¹. Los resultados se presentan tabulados en función de las variables anteriormente expuestas y se presentan en las Tablas 16, 17 y 18.

Dado que los parámetros de calificación del estado superficial del pavimento no se contemplan específicamente en las metodologías de diseño, se espera que al final de su construcción se cumpla con todos los requerimientos exigidos para el recibo de las obras contemplados en los términos de referencia de los contratos (INVIAS, 2008).

⁴¹ Idem.

Tabla 16. Espesores de losa de concreto (cm) de acuerdo con la combinación de variables y T0 como factor principal.

Tránsito T0																					
		S1				S2				S3				S4				S5			
		D YB	D Y No B	No D YB	No D Y No B	D YB	D Y No B	No D YB	No D Y No B	D YB	D Y No B	No D YB	No D Y No B	D YB	D Y No B	No D YB	No D Y No B	D YB	D Y No B	No D YB	No D Y No B
SN	MR 1			24	28	23	27	23	27	21	24	21	24	20	24	20	24	20	23	20	23
	MR 2			23	27	22	26	22	26	20	24	20	24	20	23	20	23	19	22	19	22
	MR 3			23	26	21	25	21	25	20	23	20	23	19	22	19	22	19	22	19	22
	MR 4			21	24	20	24	20	24	19	22	19	22	18	21	18	21	18	21	18	21
BG	MR 1			23	26	22	26	22	26	21	24	21	24	20	23	20	23	20	23	20	23
	MR 2			22	25	21	25	21	25	20	23	20	23	19	22	19	22	19	22	19	22
	MR 3			21	24	20	24	20	24	29	22	19	22	19	22	19	22	18	21	18	21
	MR 4			20	23	19	23	19	23	28	21	18	21	18	21	18	21	17	20	18	20
BEC	MR 1			20	23	19	22	19	22	18	21	18	21	18	20	18	20	17	20	17	20
	MR 2			19	22	19	21	19	21	17	20	17	20	17	20	17	20	17	19	17	19
	MR 3			18	21	18	21	18	21	17	19	17	19	16	19	17	19	16	19	17	19
	MR 4			18	20	17	20	18	20	16	19	17	19	16	18	17	18	15	18	17	19

Fuente: Manual de Diseño de Pavimentos de Concreto para Vías con Bajos, Medios y Altos Volúmenes de Tránsito – INVIAS

Tabla 17. Espesores de losa de concreto (cm) de acuerdo con la combinación de variables y T1 como factor principal.

Tránsito T1																					
		S1				S2				S3				S4				S5			
		D YB	D Y No B	No D YB	No D Y No B	D YB	D Y No B	No D YB	No D Y No B	D YB	D Y No B	No D YB	No D Y No B	D YB	D Y No B	No D YB	No D Y No B	D YB	D Y No B	No D YB	No D Y No B
SN	MR 1			24	28	23	27	23	27	21	25	21	25	21	24	21	24	20	23	20	23
	MR 2			23	27	22	26	22	26	21	24	21	24	20	23	20	23	20	23	20	23
	MR 3			22	26	22	25	22	25	20	23	20	23	19	22	19	22	19	22	19	22
	MR 4			20	25	21	24	21	24	19	22	19	22	18	21	19	21	18	21	19	21
BG	MR 1			23	26	22	26	22	26	21	24	21	24	20	24	20	24	20	23	20	23
	MR 2			22	26	22	25	22	25	20	23	20	23	20	22	20	23	19	22	19	22
	MR 3			21	25	21	24	21	24	19	23	19	23	19	23	19	22	19	22	19	22
	MR 4			20	24	20	23	20	23	18	22	19	22	18	21	19	21	18	21	19	21
BEC	MR 1			20	23	20	23	20	23	18	21	18	21	18	21	18	21	18	20	18	20
	MR 2			19	22	19	22	19	22	18	20	18	20	17	20	18	20	17	20	18	19
	MR 3			19	21	18	21	19	21	17	20	18	20	17	19	18	19	16	19	18	19
	MR 4			19	21	17	20	19	20	16	19	18	19	16	18	18	19	15	18	18	18

Fuente: Manual de Diseño de Pavimentos de Concreto para Vías con Bajos, Medios y Altos Volúmenes de Tránsito – INVIAS

Tabla 18. Espesores de losa de concreto (cm) de acuerdo con la combinación de variables y T2 como factor principal.

		Tránsito T2																			
		S1				S2				S3				S4				S5			
		D Y B	D Y No B	No D Y B	No D Y No B	D Y B	D Y No B	No D Y B	No D Y No B	D Y B	D Y No B	No D Y B	No D Y No B	D Y B	D Y No B	No D Y B	No D Y No B	D Y B	D Y No B	No D Y B	No D Y No B
SN	MR 1	25	29	25	29	24	28	24	28	22	26	22	26	22	25	22	25	21	25	22	25
	MR 2	24	28	25	28	24	27	24	27	22	25	22	25	21	24	22	24	21	24	22	24
	MR 3	24	27	25	27	24	28	26	28	21	24	22	24	20	23	22	23	20	23	22	23
	MR 4	22	26	25	26	23	27	26	27	20	23	22	24	19	22	22	23	19	22	22	23
BG	MR 1	24	28	24	28	23	27	23	27	22	25	22	25	21	25	22	25	21	24	21	24
	MR 2	23	27	23	27	23	26	23	26	21	24	22	24	21	24	22	24	20	23	21	23
	MR 3	22	26	23	26	23	27	25	27	20	24	22	24	20	23	22	23	20	23	21	23
	MR 4	21	25	23	25	22	26	25	26	19	23	22	23	19	22	22	23	19	22	21	23
BEC	MR 1	21	24	21	24	21	24	21	24	19	22	21	22	19	22	20	22	19	21	20	22
	MR 2	20	23	21	23	20	23	21	23	19	21	21	22	18	21	20	22	18	20	20	22
	MR 3	19	23	21	23	20	23	23	24	18	21	21	22	18	20	20	22	17	20	20	22
	MR 4	19	22	21	23	19	22	23	24	17	20	21	22	17	19	20	22	17	19	20	22

Fuente: Manual de Diseño de Pavimentos de Concreto para Vías con Bajos, Medios y Altos Volúmenes de Tránsito – INVIAS

5.6 GUIA DE DISEÑO DE PAVIMENTOS CON BAJOS VOLUMENES DE TRANSITO Y VIAS LOCALES PARA LA CIUDAD DE BOGOTA (IDU)

El método de diseño del IDU corresponde a un documento resultado de un trabajo de cooperación técnica entre El Instituto de Desarrollo Urbano, El Banco de Desarrollo para América Latina y la Universidad Nacional de Colombia, para que sea una herramienta en el diseño de pavimentos aplicado a condiciones urbanas, con el fin de garantizar el tránsito permanente, optimizando recursos técnicos y económicos (IDU, 2013).

Este manual tiene aplicación práctica para estructuras de pavimento sometidas a bajos niveles de tránsito para las condiciones climáticas, geotécnicas, hidráulicas y períodos de diseño para vías locales de la ciudad de Bogotá. Igualmente, los tipos de materiales y espesores se ajustan a los procesos constructivos comunes en las diferentes localidades de la ciudad, considerando que, en algunas zonas de esta los sistemas de redes de servicios públicos limitan la profundidad de las intervenciones (IDU, 2013).

5.6.1. Variables utilizadas

5.6.1.1. El tránsito y el periodo de diseño

El IDU mediante la Tabla 19 tiene en cuenta la clasificación y configuración de los vehículos, para categorizar el tránsito que circula por las vías objeto de análisis y por tanto, la clasificación de los vehículos se realiza acorde con su uso (comercial, no comercial) y a su peso (vehículos livianos y pesados), para aquellos con una carga mayor neta a 3.5 toneladas.

El número de vehículos comerciales se determina a partir del conteo de tránsito y a partir de este se define el número de ejes equivalentes, que es un parámetro necesario para el uso de los catálogos propuestos por la guía.

Respecto al tiempo para el cual se estima que la estructura de pavimento va a funcionar con un nivel de servicio adecuado, es de 20 años.

Tabla 19. Categoría de tránsito de diseño.

Denominación	Número de vehículos comerciales día	Numero de ejes equivalentes de 8.2 (NEE) para 20 años
T1 – 1	$VDPo \leq 50$	$NEE \leq 2.345.000$
T2 – 1	$50 < VDPo \leq 100$	$2.345.000 < NEE \leq 4.690.000$
T2 – 2	$100 < VDPo \leq 150$	$4.690.000 < NEE \leq 7.000.000$

Fuente: Guía de diseño de pavimentos con bajos volúmenes de tránsito y vías locales para la ciudad de Bogotá (IDU)

5.6.1.2. Subrasante

La guía del IDU caracteriza la subrasante de acuerdo con la clasificación de suelos de la AASTHO, la determinación de estado hídrico asociado con la humedad natural y los límites de Atterberg.

Respecto al comportamiento mecánico de los materiales, la guía establece que las respuestas de los materiales se desarrollan en el rango elástico y se asocia el comportamiento mecánico al esfuerzo cortante de un suelo bajo condiciones de humedad y densidad controladas (IDU, 2013). Para la determinación del esfuerzo cortante se podrá utilizar ensayos directos y/o correlaciones, anotando que en la práctica tradicional usualmente se emplea el ensayo CBR como parámetro de resistencia para la evaluación de materiales en estructuras de pavimento.

En la Tabla 20, se relacionan los valores de correlación adoptados.

Tabla 20. Correlaciones entre CBR Vs MR.

	Valor de CBR	Módulo Resiliente (Mpa)
1	$\text{CBR} \leq 4\%$	$7.5 * \text{CBR}$
2	$4\% < \text{CBR} \leq 9\%$	$10 * \text{CBR}$

Fuente: Guía de diseño de pavimentos con bajos volúmenes de tránsito y vías locales para la ciudad de Bogotá (IDU)

En la ciudad de Bogotá, se han determinado cinco (05) tipos de subrasante (SR) los cuales están asociados a rangos de valores de resistencia de los suelos de subrasante, tal y como se resume en la Tabla 21

Tabla 21. Tipos de Subrasante para Bogotá.

Tipo de Subrasante	CBR (%)	Módulo Resiliente (Mpa)
SR 1	< 1.5	< 11.25
SR 2	$1.5 - 2.5$	$11 - 19$
SR 3	$2.5 - 3.5$	$19 - 26$
SR 4	$3.5 - 4.0$	$26 - 40$
SR 5	> 4.0	> 40

Fuente: Guía de diseño de pavimentos con bajos volúmenes de tránsito y vías locales para la ciudad de Bogotá (IDU)

La guía recomienda actividades de mejoramiento en el suelo de la subrasante para CBR menores al 4% o un valor de Modulo Resiliente de 40 MPa, casos en los cuales se utiliza como reemplazo material de rajón y se deberá garantizar que la Capacidad

portante equivalente (CPE) sea superior al 3% de CBR, valor que será variable de entrada para definir los diseños de las estructuras de pavimento, de acuerdo a la Tabla 22 (IDU, 2013).

Tabla 22. Capacidad portante equivalente para el diseño de las estructuras de pavimento

ENSAYO	CPE			
	CPE 1	CPE 2	CPE 3	CPE 4
CBR %	3 – 3.9	4 – 4.9	5 – 5.9	> 6
E (Mpa)	22.5 – 38.4	40 – 49	50 – 59	> 60
K sub Mpa/m	28 – 34.3	35 – 39.5	40 – 42.7	> 43

Fuente: Guía de diseño de pavimentos con bajos volúmenes de tránsito y vías locales para la ciudad de Bogotá (IDU)

5.6.1.3. Material de soporte para el pavimento

La calidad y durabilidad de las estructuras de pavimento exigen el uso de materiales con características físicas, químicas y mecánicas capaces de resistir los esfuerzos inducidos por el tránsito y el medio ambiente. En la guía se hace una descripción de los diferentes materiales y su aplicación en las diferentes capas que conforman las estructuras de pavimento, pero, teniendo en cuenta los fines del presente trabajo solo se mencionara el material natural de subbase granular no tratada con un espesor igual a 15 cm, esta se define como una capa de la estructura del pavimento que tiene como objetivo soportar y transmitir las cargas aplicadas en la superficie de rodadura, controlar cambios de volumen de la subrasante y mitigar el ascenso capilar.

5.6.1.4. Concreto hidráulico

La guía del IDU, define el concreto como un material compuesto por agregado pétreo fino y grueso, agentes cementantes, agua, refuerzo y aditivos. Este se usa para construir las losas que funcionarán como capa de rodadura y soportaran las

cargas inducidas por el tráfico. Las losas estarán amarradas mediante barras de transferencia o por simple trabazón de agregados, para evitar agrietamientos por fatiga producto de las cargas a las que está expuesto el pavimento.

El concreto hidráulico a utilizar deberá tener valores de módulo de rotura iguales a 4.0 y 4.5 MPa evaluado según la norma INE E-414-07. También se deberá contar con el valor de la resistencia a la tracción indirecta evaluado a los 28 días teniendo en cuenta la norma INV E-411-07. Por último, el valor mínimo del módulo de elasticidad debe ser igual a 303.100 kg/cm o 4 310 200 psi (NTC 4025) (IDU, 2013).

5.6.1.5. Clima y drenaje

En la guía se describen las variables climáticas y los tipos de drenaje que permitirán la evacuación de la precipitación y/o el agua de escorrentía en la vía, con el fin de garantizar la seguridad de los usuarios y la integridad de las estructuras. El clima es un parámetro fundamental que está asociado con la vida útil de los pavimentos, siendo la temperatura y la presencia de agua los dos factores más relevantes. Los cambios de temperatura pueden generar el fenómeno de alabeo y la presencia de agua determinara el tipo y magnitud de las obras de drenaje necesarias para evitar fenómenos como la erosión de la capa de apoyo, provocando daños en los pavimentos que reducen su nivel de servicio y por ende su vida útil. Las obras de drenaje deben ser superficiales y sub superficiales, en el primer caso se debe garantizar el bombeo y la pendiente longitudinal que permita la evacuación de las aguas de escorrentía hacia los sistemas de cunetas hasta llegar a los sumideros, y en el segundo caso el propósito principal es controlar los niveles freáticos adyacentes a la estructura de pavimento, para lo cual se deben colocar filtros con la capacidad hidráulica adecuada (IDU, 2013).

5.6.2. Diseño propuesto

El catálogo de la estructura presentada en la guía del IDU y representada en la Tabla 23 está en función del Número de Vehículos Comerciales y/o Número de Ejes Equivalentes y de la Capacidad Portante Equivalente – CPE que indica la resistencia al esfuerzo cortante, para la evaluación de materiales del conjunto formado por la subrasante y la capa de mejoramiento, en caso de que esta última exista.

Tabla 23. Estructuras de pavimento rígido diseñadas para la ciudad de Bogotá D.C.

Convenciones: Losas de concreto hidráulico Capa antierosiva Subbase Granular Subrasante				
TRANSITO T1-1				
TRANSITO	CPE 1 (3.0 – 3.9)	CPE 2 (4.0 – 4.9)	CPE 3 (5.0 – 6.0)	CPE 4 (>6)
T1 – 1 VPDo < 50 NEE < 2.345.000	22 15 37	22 15 37	22 15 37	22 15 37
TRANSITO T2-1				
TRANSITO	CPE 1 (3.0 – 3.9)	CPE 2 (4.0 – 4.9)	CPE 3 (5.0 – 6.0)	CPE 4 (>6)
TA – 1 50 < VPDo < 100 2.345.000 ≤ NEE < 4.690.000	24 15 39	24 15 39	24 15 39	24 15 39
TRANSITO T2-2				
TRANSITO	CPE 1 (3.0 – 3.9)	CPE 2 (4.0 – 4.9)	CPE 3 (5.0 – 6.0)	CPE 4 (>6)
T2 – 2 100 < VPDo < 150 4.690.000 ≤ NEE < 7.000.000	26 15 41	25 15 40	25 15 40	25 15 40

Fuente: Guía de diseño de pavimentos con bajos volúmenes de tránsito y vías locales para la ciudad de Bogotá (IDU)

6. COMPARACIÓN DE LOS MÉTODOS

En Colombia los métodos de diseño para los pavimentos de concreto más utilizados son los propuestos por la AASHTO en 1993 y la PCA en 1984, los cuales son métodos empíricos universales, con características y resultados diferentes, que fueron tomados en cuenta para la realización de las metodologías INVIAS e IDU y que consecuentemente serán el soporte de la guía objeto de este trabajo.

Para el diseño de la guía objeto de este trabajo, se analiza primero cuales son las variables que intervienen como parámetros de entrada, con el fin de asumir criterios en cada una de ellos.

6.1 TRANSITO Y PERIODO DE DISEÑO

Los métodos universales difieren en la determinación de esta variable, dado que para el método de la AASHTO el transito se obtiene calculando el número de ejes equivalentes para el periodo de diseño, y para la PCA toman relevancia el número de vehículos comerciales en el carril de diseño durante el periodo de diseño y la caracterización de carga por eje, para lo cual se utilizan valores internacionales o adaptaciones hechas en el país, pero que claramente permite deducir que este método es más útil cuando hay un flujo constante de camiones lo cual se refleja en vías nacionales mas no en vías urbanas, por lo cual se toma una primera decisión, la cual consiste en dar mayor relevancia al método AASHTO y utilizar el Método PCA como verificación en su componente racional para analizar los criterios de falla relacionados con los esfuerzos de fatiga y erosión.

Para definir los tránsitos promedios diarios o ejes equivalentes, entran en el análisis los métodos colombianos, debido a que, el IDU presenta una caracterización de los volúmenes de tránsito en vías urbanas que son aplicables a la guía en diseño y el

INVIAS tiene una propuesta similar para el tránsito por carretera que también es considerado teniendo en cuenta que es muy aplicado en la metodología AASTHO.

Teniendo en cuenta los volúmenes de tránsito de la guía del IDU, el número máximo de ejes equivalentes de 8.2 ton esperado oscila entre 4 690 000 y 7 000 000, este rango se sitúa en la tabla del INVIAS en la categoría T2 el cual contempla hasta 5 000 000 de ESAL, valor que se tiene en cuenta por ser más conservador dado la población objeto de estudio.

Al revisar las normas y especificaciones vigentes del INVIAS del año 2012, en los capítulos correspondientes a subbases y pavimentos de concreto, se encontró que en esta se incorporó la variable tránsito en función del número de ejes acumulados para llevar a cabo la caracterización de la calidad de los agregados y la resistencia mínima que debe tener la placa de concreto, cuyos rangos de tránsito establecidos se pueden contemplar en la Tabla 24.

Tabla 24. Clasificación del Tránsito.

NIVEL DE TRÁNSITO	NÚMERO DE EJES EQUIVALENTES DE 80 kN EN EL CARRIL DE DISEÑO, N_{80kN} , MILLONES
NT 1	$N_{80kN} \leq 0.5$
NT 2	$0.5 < N_{80kN} \leq 5.0$
NT 3	$N_{80kN} > 5.0$

Fuente: Especificaciones generales de construcción de carreteras, INVIAS 2013.

Por esta razón y teniendo en cuenta que es la información más actualizada y practica para establecer los parámetros utilizados en el cálculo de la estructura del pavimento, para la guía en desarrollo se propondrán dos tipos de tránsito NT1 y NT2 de acuerdo a los valores de referencia del INVIAS y los cuales son consecuentes con los tipos de vía en estudio de acuerdo a la población objeto.

El periodo de diseño asumido en todos los métodos es de 20 años, valor que se asume en la guía propuesta, considerando que este es el valor utilizado para este tipo de estructuras de acuerdo a las especificaciones técnicas de las autoridades en la materia y teniendo en cuenta la relación beneficio costo que genera el usar un periodo de diseño igual a 20 años, ya que se ha demostrado que una disminución en el periodo de diseño representa en cuanto a costos una disminución muy baja, que no compensan al ser analizados con otros escenarios, tales como los costos de mantenimiento y la estabilidad de la estructura.

6.2 LA SUBRASANTE Y MATERIAL DE SOPORTE PARA EL PAVIMENTO

La subrasante es una variable muy importante en todos los métodos revisados, teniendo en cuenta que el tipo de suelo y su capacidad portante, es fundamental para el diseño de la estructura de pavimento. Todos los métodos permiten la correlación del CBR para calcular el Módulo de Reacción de la Subrasante, k .

Cabe aclarar que para el uso de los catálogos planteados por las metodologías Colombianas no es estrictamente necesario determinar el valor del módulo de reacción, debido a que, en el caso de las memorias propuestas por el INVIAS con el valor del CBR se puede clasificar la subrasante sin necesidad de calcular el valor de K , y en el caso del método planteado por el IDU es necesario determinar el valor de la capacidad portante equivalente el cual también se puede determinar sabiendo el valor del CBR de la subrasante.

Para el material de soporte, los métodos AASTHO y PCA contemplan subbases granulares o estabilizadas con cemento, de igual forma en el método INVIAS e IDU se incorporan otros tratamientos adicionando emulsión, cemento asfáltico o cal. Para los efectos del presente estudio se modelarán diferentes alternativas con subbase granular de 15 cm de espesor, considerando que es el valor asumido en los métodos colombianos

Teniendo en cuenta el conjunto Subrasante – Subbase, el método AASTHO presenta un factor de seguridad para el cálculo del K, ya que se diseña con base en el módulo de reacción efectivo, el cual no es aplicable en los demás, excepto en la guía del IDU donde indican que para CBR de la subrasante < 4% hay que hacer un mejoramiento del suelo para calcular la Capacidad Portante Equivalente – CPE y entrar al diseño propuesto.

Por lo anteriormente expuesto el método AASTHO presenta mayores variables de análisis para la determinación de la estructura de pavimento y es considerado un soporte de las metodologías colombianas, razón por la cual para la metodología de la guía propuesta se partirá de dicha base, teniendo en cuenta que la población objeto son las ciudades pequeñas e intermedias donde predominan los vehículos livianos y comerciales con cargas equivalentes menores a 5 000 000 de ESAL.

Desde el punto de vista cualitativo, las especificaciones del INVIAS definen tres clases de subbase en función de la calidad de los agregados (clases A, B y C) en función del nivel de tránsito del proyecto Tabla 25, cuyas características se detallan en el Capítulo 3 Artículo 320-13 y que para los efectos de la guía se aplican las Subbase Clase B y C

Tabla 25. Uso típico de las diferentes clases de subbase granular

CLASE DE SUBBASE GRANULAR	NIVEL DE TRÁNSITO
Clase C	NT 1
Clase B	NT 2
Clase A	NT 3

Fuente: Especificaciones generales de construcción de carreteras, INVIAS 2013.

6.3 PLACA DE CONCRETO HIDRAULICO

El método de la ASSHTO permite el cálculo del espesor de la losa en función del módulo elástico y el módulo de rotura, en el método de la PCA es una variable de entrada para verificar el cumplimiento de los criterios de falla relacionados con los esfuerzos de fatiga, y en las metodologías colombianas corresponde a los espesores que se recomiendan en función de las variables de entrada, razón por la cual para dar cumplimiento a las especificaciones de construcción del INVIAS, se tendrá como referencia las resistencias a la flexotracción a 28 días mínimo (MPa), determinadas en función de las características del tránsito y que para los efectos de este estudio corresponden a 3.8 MPa para tránsito NT1 y 4.0 MPa para tránsitos NT2, de acuerdo a lo estipulado Capítulo 5 Artículo 500-13.

6.4 CLIMA Y DRENAJE

El método AASTHO es el único que contempla en sus parámetros explícitamente un factor de drenaje, aunque los demás métodos si enfatizan la importancia de evitar la presencia de agua en la estructura del pavimento y de soporte, y, por lo tanto, se debe considerar el tiempo que la estructura estará expuesta a niveles de humedad cercanos al punto de saturación y la calidad del drenaje propuesto en la guía objeto de estudio.

6.5 TRANSFERENCIA DE CARGA

Todos los métodos estudiados permiten la evaluación de la estructura del pavimento teniendo o no en cuenta la transferencia de cargas a través de pasadores en las juntas transversales y/o el confinamiento mediante la colocación de sardineles. Por tal razón esta variable es tomada en cuenta en la guía objeto de esta monografía. Teniendo en cuenta todo lo expuesto anteriormente y para los fines prácticos, en la Tabla 26, se presenta una relación de los métodos estudiados y las variables y parámetros que se utilizan en cada uno de ellos.

Tabla 26. Variables y parámetros utilizados en los métodos de diseño para pavimento rígido.

VARIABLES DE DISEÑO		METODOS DE DISEÑO			
		AASHTO-93	PCA	INVIAS	IDU
PERIODO DE DISEÑO (En años)		20	20	20	20
TRANSITO					
Clasificación Vehicular		NT1, NT2	VEH COM	T0, T1, T2	T 1-1,T2-1 y 2
Transito Promedio Diario - TPD		X	X	X	X
Ejes Acumulados 8.2 Ton (ESAL)		X	X	X	X
SUBRASANTE					
Caracterización del suelo		X	X	X	
Relación de Soporte de California (CBR)		X	X	X	CPE
K Subrasante		X	X	X	X
SUBBASE					
Espesor		X	X		
K Mejorado		X	X		
K Efectivo		X			
PLACA DE CONCRETO					
Módulo de Rotura (MR)		X	X	X	X
CLIMA Y DRENAJE					
TRANSFERENCIA DE CARGA					
PARAMETROS DE DISEÑO					
Numero ejes equivalentes 8.2 Ton, (W18)		X			
Desviación normal estándar, (R, Zr)		X			
Error estándar combinado, (So)		X			
Índice de servicio inicial, (Po)					
Índice de servicio terminal, (Pt)		X			
Diferencia índices servicio inicial y final, (Δ PSI)		X			
Módulo de reacción de soporte (K)		K Efectivo	K Mejorado		
Módulo de rotura del concreto, (Sc)		X	X		
Módulo de elasticidad del concreto, (Ec)		X			
Coeficiente de drenaje, (Cd)		X			
Coeficiente de carga pasadores y sardineles, (J)		SI/SI	SI/SI	SI/SI	X
Factores de seguridad	Verificación esfuerzo de fatiga		X		
	Verificación esfuerzo de erosión		X		

Fuente: Elaboración propia

6.6 ANÁLISIS DE COSTOS

En atención a los resultados de las estructuras de pavimento que arroja cada método estudiado y que se presenta en la Tabla 27, se presenta el análisis comparativo de costo/m² para una vía tipo con una longitud de 100 metros y un ancho promedio de 6 metros, cuyas cantidades son el producto de afectar las cubicaciones correspondientes a la excavación, suministro y colocación de subbase y la fabricación y colocación del concreto afectados por el costo de cada actividad de acuerdo al análisis de precios unitarios presentado en el Anexo D, dicho resultado arroja un costo/m² para cada actividad cuya sumatoria corresponde al costo de la intervención para cada alternativa, tal y como se evidencia en la Tabla 28.

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos se deduce que el costo/m² para los métodos universales es similar razón por la cual, cobra mayor relevancia la premisa actual de considerar el método AASHTO como el más adecuado a tener en cuenta para la elaboración de la guía objeto de esta monografía. De igual forma se puede evidenciar que las metodologías colombianas presentan un valor por metro cuadrado superior con un incremento del 28.5% en el costo/m² de pavimento en concreto, aumento que se hará significativo en el costo total de la obra de forma proporcional a la longitud de la vía a intervenir, ahorro que equivale a 264 000 000 por kilómetro.

Tabla 27. Dimensionamiento de la estructura de pavimento.

Método de diseño	AASHTO 93	PCA 84	INIVAS	IDU
Espesor de la Subbase (cm)	15	15	15	15
Espesor de la placa de concreto (cm)	16.5	16.5	22	22

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 28. Análisis económico comparativo

METODO AASTHO			
ITEM	COSTO/M3	ESPESOR (CM)	COSTO /M2
EXCAVACION	\$20.000	31,5	\$6.300
SUBASE GRANULAR	\$130.000	15,0	\$19.500
PLACA CONCRETO	\$780.000	16,5	\$128.700
Costo/m2 de Pavimento			\$154.500
METODO PCA			
ITEM	COSTO/M3	ESPESOR (CM)	COSTO /M2
EXCAVACION	\$20.000	31,5	\$6.300
SUBASE	\$130.000	15,0	\$19.500
PLACA CONCRETO *	\$780.000	16,5	\$128.700
Costo/m2 de Pavimento			\$154.500
METODOLOGIA INVIAS			
ITEM	COSTO/M3	ESPESOR (CM)	COSTO /M2
EXCAVACION	\$20.000	37,0	\$7.400
SUBASE	\$130.000	15,0	\$19.500
PLACA CONCRETO *	\$780.000	22,0	\$171.600
Costo/m2 de Pavimento			\$198.500
METODOLOGIA IDU			
ITEM	COSTO/M3	ESPESOR (CM)	COSTO /M2
EXCAVACION	\$20.000	37,0	\$7.400
SUBASE	\$130.000	15,0	\$19.500
PLACA CONCRETO *	\$780.000	22,0	\$171.600
Costo/m2 de Pavimento			\$198.500

Fuente: Análisis de Precios Unitarios INVIAS - junio 2020

Nota: * Este ítem contempla las juntas (corte, acero y sellado)

7. ANÁLISIS Y RECOMENDACIONES DE LAS VARIABLES

Dado que el método AASHTO es el que ofrece mejores resultados en cuanto a diseño y costos, se realiza un análisis detallado de sus variables con el fin de demostrar la importancia de cada una y su nivel de afectación en el cálculo del espesor de la losa.

Para este análisis se establecieron unos datos para una vía tipo Tabla 29, con el fin de identificar el comportamiento que tiene cada una de las variables utilizadas.

Tabla 29. Datos asumidos para el análisis de las variables.

Variables		Unidades	Valor
TRANSITO	W18	---	1,197,393
MODULO DE REACCION DE LA SUBRASANTE	K efectivo	PCI	135
MODULO DE ROTURA DEL CONCRETO	Mr o Sc	Mpa	4.0
		PSI	580
CONFIABILIDAD	R	%	50
DESVIACIÓN ESTANDAR NORMAL	Zr	---	0.000
DESVIACIÓN ESTANDAR GLOBAL	So	---	0.35
INDICE DE SERVICIO INICIAL	Po	---	4
INDICE DE SERVICIO FINAL	Pt	---	2.25
INDICE DE SERVICIO	Δ PSI	---	1.75
COEFICIENTE DE DRENAJE	Cd	---	1
COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE CARGA	J	---	2.8
MODULO DE ELASTICIDAD DEL CONCRETO	f'c	Kg/cm ²	230
	Ec	PSI	2,700,000
ESPESOR DE LA LOSA DE CONCRETO	D	Pulg	6.5
	D	cm	16.5

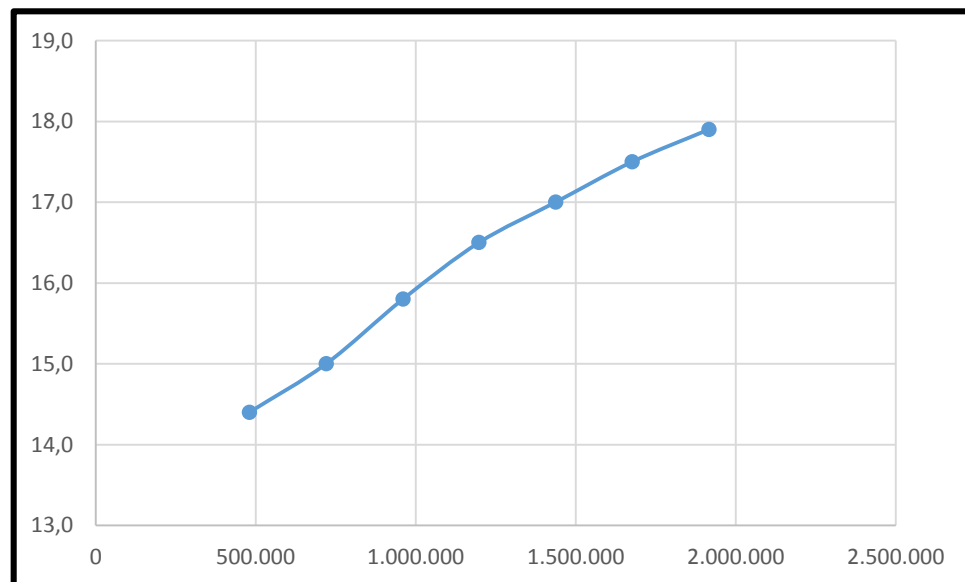
Fuente: Elaboración propia

7.1 TRANSITO

Para determinar el comportamiento de la variable tránsito en el diseño de la estructura del pavimento se procede a calcular el valor del espesor de la losa con los datos determinados de la vía tipo el cual es igual a 16.5 cm, esto con el fin de realizar variaciones en el valor del tránsito para determinar su efecto en el diseño.

Como resultado del análisis se obtiene la Figura 7 la cual muestra los espesores obtenidos de acuerdo a diferentes valores de tránsito (ESAL). En esta se puede observar que al aumentar el número de ejes acumulados de 8.2 se obtienen mayores espesores de la losa de concreto, debido a que, las cargas que serán ejercidas sobre esta aumentarán. Por esta razón el espesor para un tránsito de 500.000 ejes acumulados es de 14.2 cm y para un numero de ejes acumulados de 1.900.000 el espesor de la losa es igual 18 cm.

Figura 7. Análisis de sensibilidad ESAL



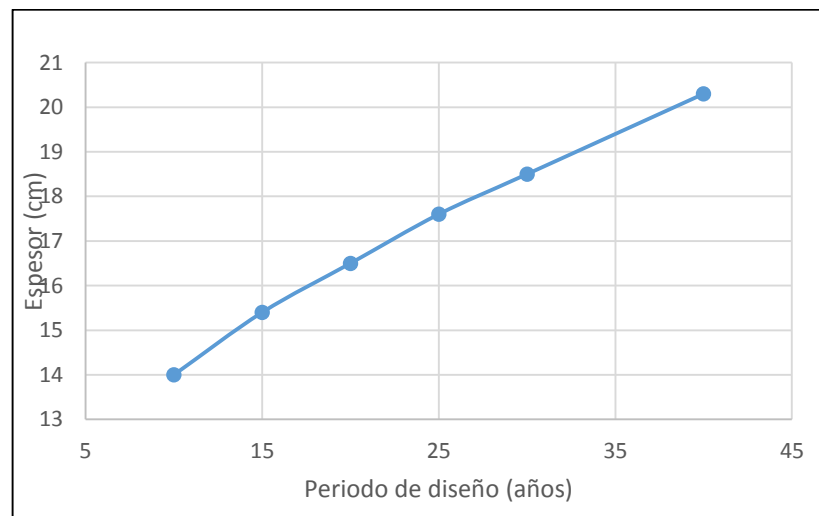
Fuente: Elaboración propia

7.2 PERIODO DE DISEÑO

Este factor es de gran importancia para determinar el valor del tránsito, el cual es una variable fundamental en el cálculo del espesor de la losa. Los diferentes métodos establecen un periodo de diseño igual a 20 años debido a que reducir este valor no representa una disminución significativa en los costos de inversión a largo plazo, en cambio utilizar este valor genera un balance beneficio/costo óptimo.

La Figura 8 muestra el comportamiento del espesor del pavimento al diseñarlos para distintos periodos. Se obtiene que para periodo de diseño de 10 años el espesor del pavimento se reduce 2.5 cm con respecto al obtenido para un periodo de diseño de 20 años, por esta razón no es recomendable reducir el periodo de diseño debido que la disminución en el espesor nos es significativa teniendo en cuenta que requerirá una rehabilitación más pronta lo que se traduce en más costos de inversión. En el caso de utilizar periodos de diseño mayores se está siendo más estricto con el diseño, y con los trabajos de mantenimiento.

Figura 8. Análisis de sensibilidad del periodo de diseño



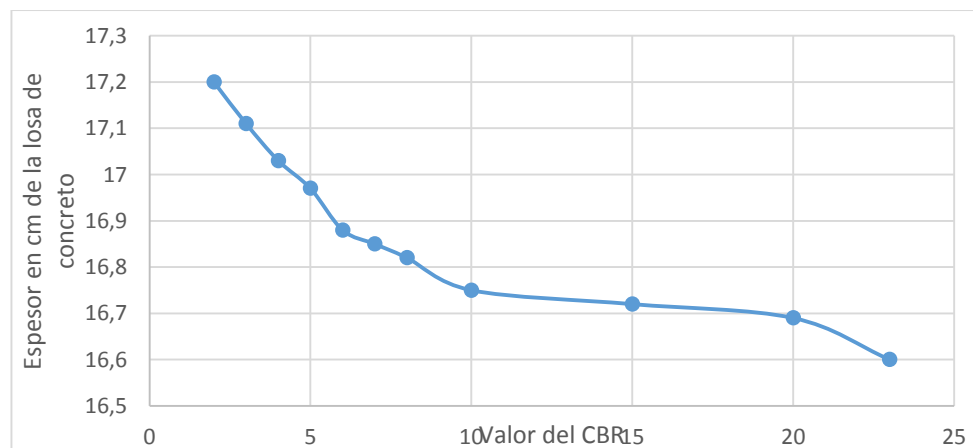
Fuente: Elaboración propia

7.3 SUBRASANTE

El valor del módulo de reacción k se obtiene a partir de correlaciones con el CBR, razón por la cual el valor que se obtenga en el ensayo de CBR afectará el cálculo del espesor de la losa. En la Figura 9 se observa los espesores obtenidos de acuerdo a los diferentes valores de CBR. El valor de K efectivo utilizado en el cálculo del espesor se obtuvo correlacionando cada valor de CBR para obtener el valor de k de la subrasante, el cual se mejoró por el uso de una subbase de 15 cm de espesor obteniendo el valor de K combinado, este valor se redujo debido al factor por pérdida de soporte (LS) el cual para efectos del análisis se tomó igual a 2.0, dando como resultado el k efectivo.

En la Figura 9 se puede observar que el espesor disminuye a medida que el valor de CBR mejora, pero esta disminución no es significativa ya que para un CBR igual a 2 el espesor que se obtiene es de 17.2 cm y para un CBR igual a 20 se obtiene un espesor de 16.7 cm, es decir que al aumentar el valor del CBR de 2 a 20 solo se obtiene una reducción de 0.6 cm en el espesor de la losa.

Figura 9. Análisis de sensibilidad del CBR

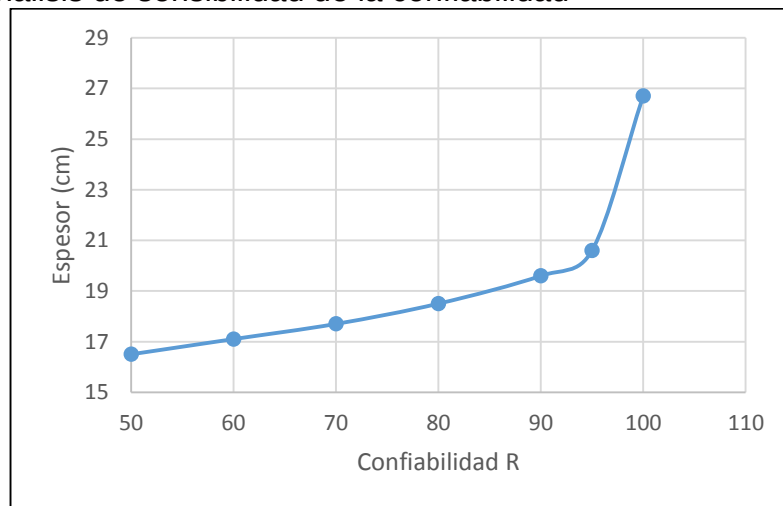


Fuente: Elaboración propia

7.4 CONFIABILIDAD

La confiabilidad que se elija para el proyecto determinara el valor de Z_r , el cual es utilizado en la ecuación de la AASHTO para el cálculo del espesor de la losa. En la Figura 10 se observa que a medida que el valor de confiabilidad aumenta el espesor de la losa también aumenta, este comportamiento se puede decir que es acertado debido a que para una confiabilidad de 50% se obtiene un espesor de 16.5 cm y para un valor de confiabilidad de 90% el espesor obtenido es 19.6 aumentando 3.1 cm, pero en el intervalo de 90 a 100% el espesor aumenta casi 7 cm, esto debido a que al elegir valores cercanos al 100% se exige que el pavimento presente cero fallas durante su vida útil.

Figura 10. Análisis de sensibilidad de la confiabilidad



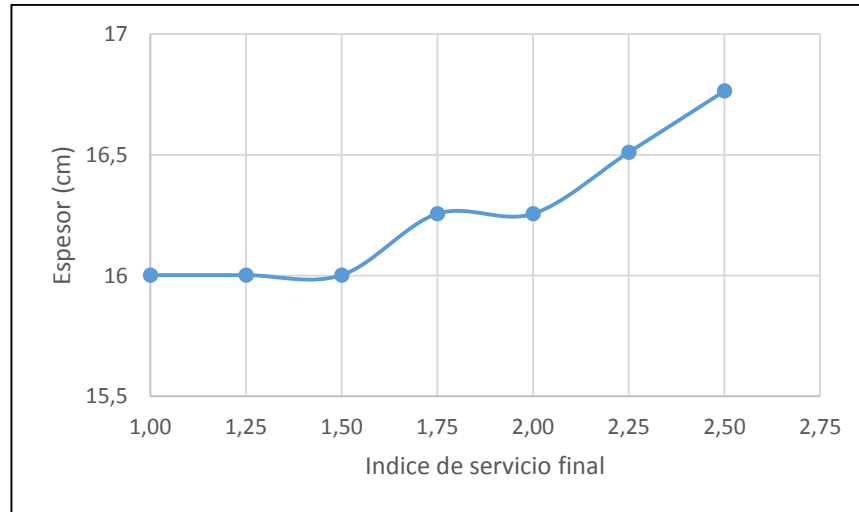
Fuente: Elaboración propia

7.5 SERVICIABILIDAD. ÍNDICE DE SERVICIO FINAL

El índice de servicio final determina cuando el pavimento deja de prestar un buen servicio al usuario y requiere una rehabilitación. Este valor es utilizado en la formula general de la AASHTO, razón por la cual se analiza su comportamiento en la determinación del espesor de la losa. En la Figura 11 se observa que para valores

Pt iguales a 1.0 y 1.5 el espesor de losa es igual a 16 cm, para Pt igual a 1.75 y 2.0 corresponde un espesor de 16.26 cm, para 2.25 el espesor es 16.5 cm y para 2.50 se obtiene un espesor de 16.76 cm. De acuerdo a los datos obtenidos se puede analizar que el valor de índice del servicio final varía con el espesor de la losa cuando es igual a 1.5, 2.0, 2.25 y 2.50 debido a que, al tomar valores intermedios a estos no generará espesores diferentes.

Figura 11. Análisis de sensibilidad del índice de servicio final

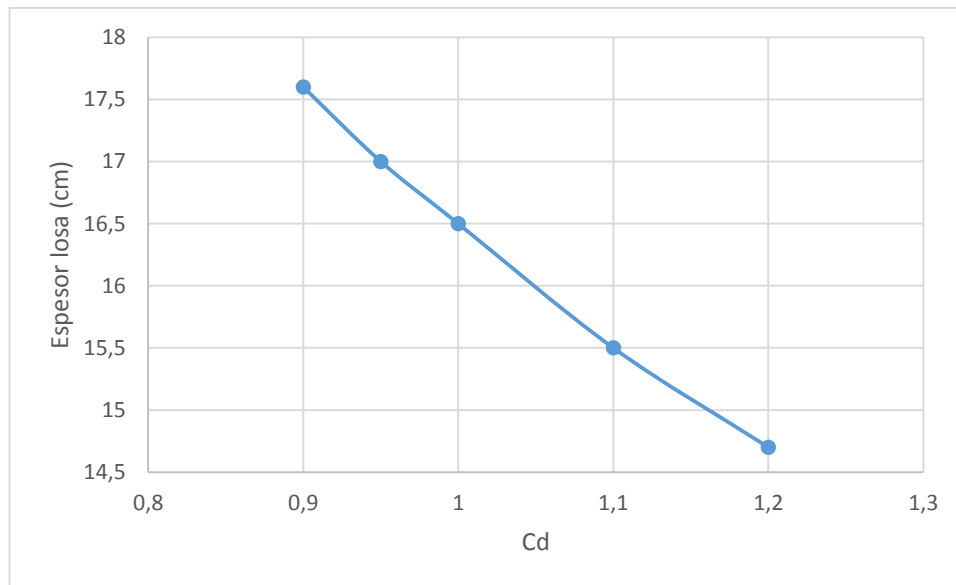


Fuente: Elaboración propia

7.6 COEFICIENTE DE DRENAJE

Este coeficiente está dado de acuerdo a las condiciones de drenaje de la vía el cual varía entre 0.7 y 1.25, para efectos del análisis se toma 0.9 como valor mínimo debido a que en las especificaciones técnicas se estipulan condiciones mínimas para garantizar un buen drenaje por eso el uso de valores menores no serán tenidos en cuenta. En la Figura 12 se observa que existe una relación inversa entre la calidad del drenaje y el espesor de la placa de concreto. Se recomienda usar un factor de C_d igual a 1 debido a que este garantiza la estabilidad de la obra para drenajes medianos y hasta malos.

Figura 12. Análisis de sensibilidad del C_d



Fuente: Elaboración propia

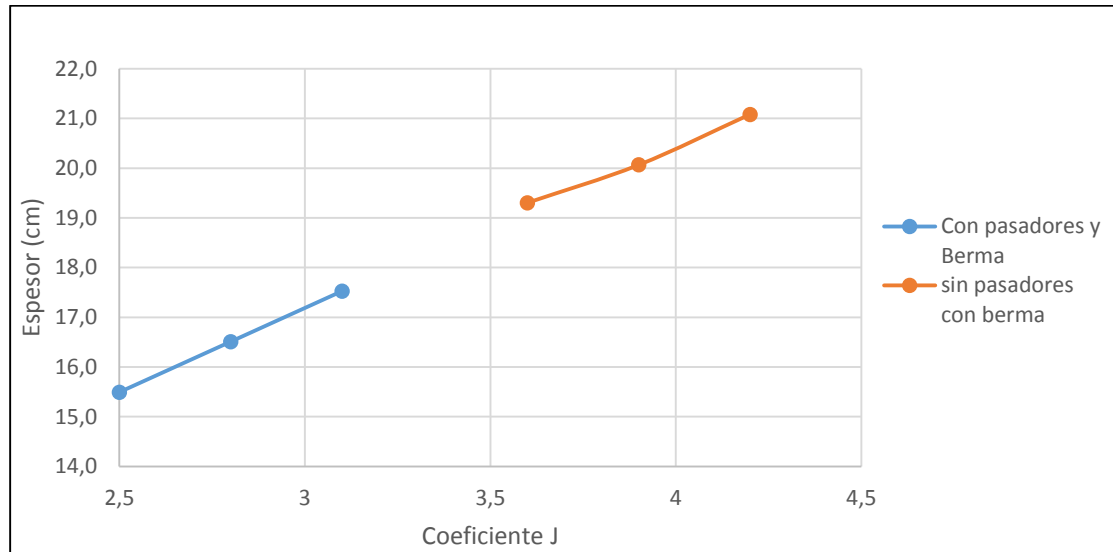
7.7 COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE CARGA

Este valor está en función del uso o no de barras de transferencia y el uso de bermas, la guía de la AASHTO establece unos rangos de valores de acuerdo al uso o no de estos elementos, en la Figura 13 se muestra el comportamiento de este coeficiente en la determinación del espesor de la losa. La figura muestra que el uso de barras de transferencia genera espesores que van desde 15 cm a 17 cm, por otro lado, la ausencia de estas da como resultado espesores más grandes que van desde 19 cm a 21 cm.

Se recomienda el uso de pasadores debido a que si se consideran mayores espesores con el fin de no incorporar estos elementos resulta más costoso por el tema de las excavaciones, posibles afectaciones a las estructuras de alcantarillados existentes y cuantía del concreto. También se recomienda el uso de estructuras que lleven al confinamiento del pavimento debido a que el confinamiento además de proveer un factor de seguridad para absorber los esfuerzos, hace parte del

urbanismo que separa la vía con el espacio público destinado a los andenes y demás elementos que los conforman. Tenido en cuenta estas recomendaciones se establece que para efectos de la guía se debe tomar un valor para el coeficiente de transmisión de carga igual a 2.8.

Figura 13. Análisis de sensibilidad de J.



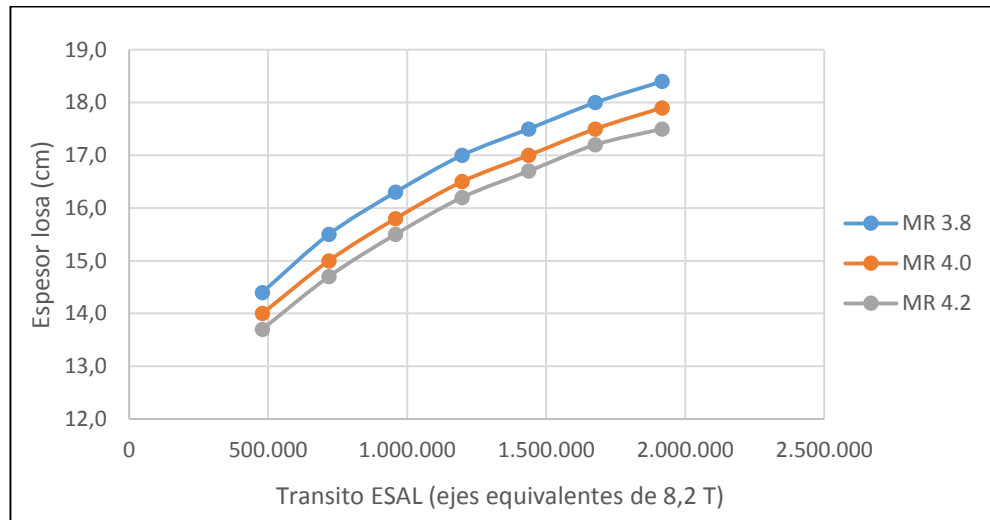
Fuente: Elaboración propia

7.8 MÓDULO DE ROTURA DEL CONCRETO

Para el análisis de la influencia de esta variable en el espesor del pavimento se hace uso de los valores obtenidos en el análisis de tránsito y de subrasante. En la Figura 14 se observa el espesor para los diferentes valores de tránsito, estos espesores son afectados por tres valores de módulo de rotura del concreto. Teniendo en cuenta esto se determina que a medida que el módulo de rotura es mayor los espesores van a disminuir, pero esta disminución no es significativa cuando se trabaja con tránsitos bajos debidos a que la reducción en los espesores es menor a 1 cm.

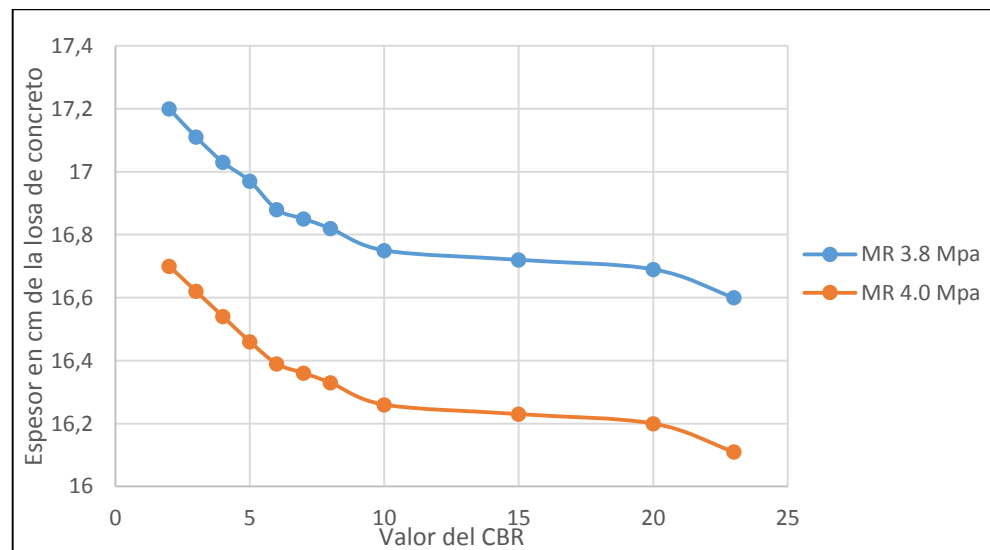
En el caso de la Figura 15 el análisis del módulo de rotura se hace teniendo en cuenta los espesores calculados con el valor del CBR, en este caso al aumentar el valor del MR se traduce en la disminución del espesor de la losa, pero al igual que en el caso anterior esta disminución no es significativa debido a que cambiar el uso de un MR de 3.8 MPa a un MR de 4.0 MPa solo reduce 0.5 cm el espesor de la losa.

Figura 14. Análisis de sensibilidad del MP en función del tránsito.



Fuente: Elaboración propia

Figura 15. Análisis de sensibilidad del MR en función del CBR



Fuente: Elaboración propia

8. PROPUESTA PARA EL DISEÑO DE PAVIMENTOS RIGIDOS EN VÍAS URBANAS CON APLICACIÓN EN MUNICIPIOS CON POBLACIONES MENORES A 50 000 HABITANTES

Teniendo en cuenta las metodologías estudiadas y las variables requeridas en cada una de estas, se elaborará una guía para el diseño de pavimentos rígidos, que tendrá como base principal la metodología AASHTO 93. La guía propuesta tiene como objetivo brindar una herramienta de consulta para los entes territoriales, en la cual se consideren los parámetros básicos que garanticen la estabilidad de las obras, guardando un equilibrio entre lo técnico y lo económico. En esta guía se busca establecer valores constantes de las variables utilizadas en el método AASHTO 93 teniendo en cuenta la población objeto de estudio, con el fin de facilitar el diseño de la estructura del pavimento. A continuación, se enuncian las variables de diseño a utilizar en la guía.

8.1 PARAMETROS DE DISEÑO

8.1.1 Transito

Para la guía en desarrollo se proponen dos tipos de transito NT1 y NT2 de acuerdo a los valores de referencia del INVIAS (Tabla 30) y los cuales son consecuentes con los tipos de vía en estudio de acuerdo a la población objeto. Se caracteriza a través del número de ejes equivalentes de 80 kN (8.2 Ton) que circulan en el carril y periodo de diseño, debiendo estimarse tal y como se detalla en el anexo A.

Tabla 30. Clasificación Tránsito.

NIVEL DE TRÁNSITO	NÚMERO DE EJES EQUIVALENTES DE 80 kN EN EL CARRIL DE DISEÑO, N_{80kN} , MILLONES
NT 1	$N_{80kN} \leq 0.5$
NT 2	$0.5 < N_{80kN} \leq 5.0$

Fuente: Especificaciones generales de construcción de carreteras, INVIAS 2013.

8.1.2 Evaluación de la confiabilidad

La evaluación de la confiabilidad conforma el primer miembro de la estructura original de la formula AASTHO, la cual desaparece en la fórmula propuesta para esta guía.

Dicho valor se establece en función de la clasificación funcional de la vía y del tránsito esperado en el carril de diseño, con lo cual se obtiene que para vías urbanas este valor oscila entre el 99.9% para autopistas y el 50% para vías urbanas locales, indicando que se debe dar una mayor confiabilidad que se traduce en una menor probabilidad de falla en el pavimento, a las vías de mayor jerarquía en las cuales no se espera que haya interrupciones en el tránsito que afecten la movilidad y de otra parte oscila entre el 50% para tránsito esperado menores a 5 millones y, a 85% para tránsitos superiores a 90 millones, razón por la cual teniendo en cuenta las características de las vías objeto de estudio y los tránsitos esperados en cuanto a su tipo y peso, se debe asumir un valor conservador en el espesor de la placa de concreto que garantice la estabilidad de la obra para las condiciones señaladas, el cual de acuerdo a las diferentes simulaciones realizadas y a la opinión de especialistas en el tema, se considera en el 50%, para luego definir el parámetro Z_r como factor de corrección de un resultado por confiabilidad, el cual guarda una relación directa con el espesor del pavimento y para el R definido, la desviación estándar normal es igual a cero.

Error Normal Combinado (S_o). Tiene en cuenta la desviación del diseño, la fluctuación de las variables involucradas en el diseño del pavimento, como lo son las propiedades de la subrasante y material de subbase, la estimación del tránsito y de las condiciones ambientales. Para el diseño de los pavimentos rígidos este valor oscila entre 0.35 y 0.40, el primero es para construcciones nuevas y el segundo para rehabilitaciones.

8.1.3 Serviciabilidad

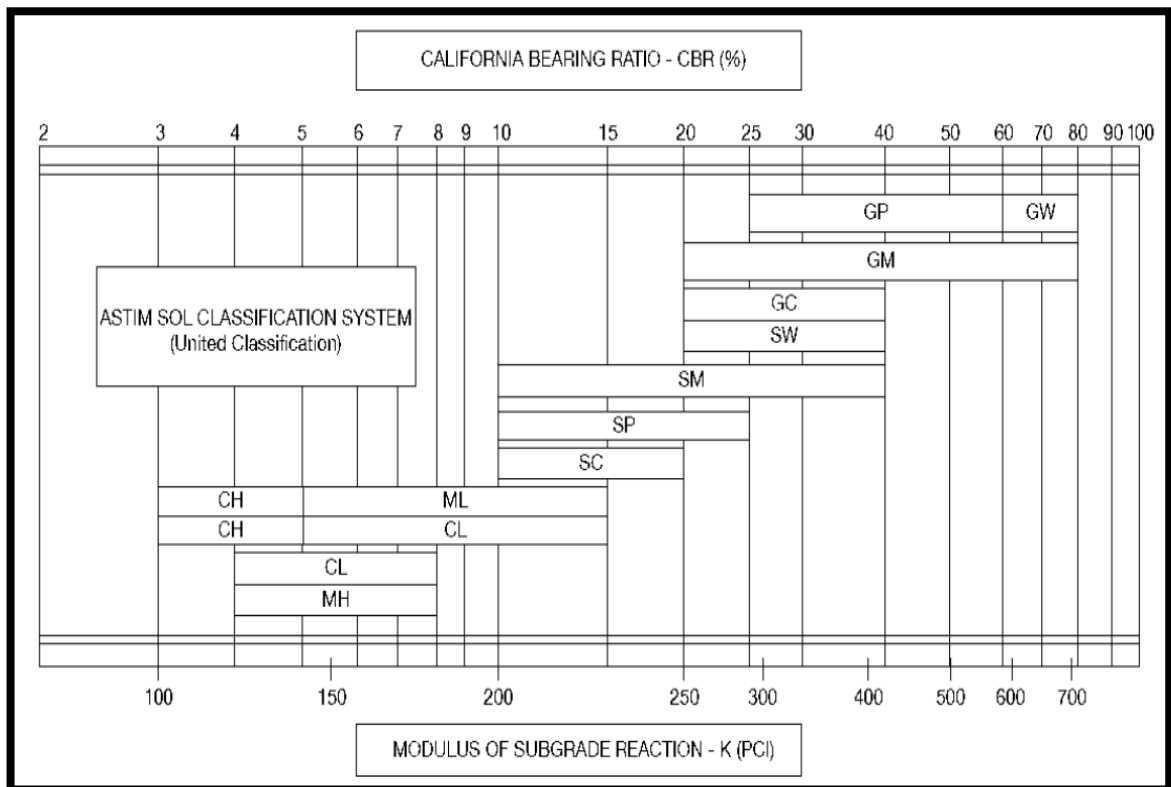
Es el parámetro que indica el nivel del servicio respecto al pavimento, que va desde cero cuando no existe pavimento y cinco como un pavimento perfecto, con lo cual se parte de un valor inicial de 4.0, para indicar un buen estado de la vía (teniendo en cuenta valores de referencia entre 3.5 y 4.5 verificados en Colombia) y en cuanto a la serviciabilidad final que considera la falla funcional del pavimento, para el caso de los pavimentos rígidos este valor esta entre 2 y 3 en función de la rigurosidad en la condición de falla estructural asumiéndose un valor de 2.50 para vías colectoras, 2.25 para calles comerciales e industriales y 2.00 para calles residenciales y guarda una relación directa con el espesor de la losa. La diferencia de estos dos valores nos da el índice de servicio.

8.1.4 Superficie de apoyo (SUBRASANTE Y SUBBASE)

Se caracteriza con el módulo de reacción K, que se define como la relación esfuerzo-deformación resultante de aplicar una carga unitaria para producir un desplazamiento de 5 mm, debido a que en el caso de pavimentos rígidos el funcionamiento se basa en que la placa de concreto tiene toda la función estructural y debe disipar todos los esfuerzos para que sean admisibles por la capa de soporte, la cual debe tener la capacidad de ser razonablemente uniforme para recibir los esfuerzos y distribuirlos de forma segura para que no se produzcan deformaciones permanentes en fallas dentro del suelo, por eso el modelo de reacción k, es la mejor forma de representar la capacidad que tiene la subrasante a recibir los esfuerzos provenientes de la estructura de pavimento.

Para los efectos prácticos se calcula el valor de K, a partir de correlaciones con el CBR Figura 16. Para la determinación de la clasificación de los suelos y el CBR se debe tener en cuenta la información presentada en el Anexo B.

Figura 16. Correlación aproximada entre la clasificación de los suelos y los diferentes ensayos



Fuente: Comparación de las metodologías AASHTO y PCA para el diseño de pavimento rígido (González, G., & Vanegas, E.).

El valor obtenido es mejorado por las condiciones de la capa de soporte que aporta la subbase, el cual se determina a partir de la Tabla 31, partiendo del K de la subrasante y las opciones de espesores de subbase se determina con el aumento de la capacidad de soporte del material sobre el cual se apoya la placa de concreto.

Las especificaciones del INVIAS definen tres clases de subbase en función de la calidad de los agregados (clases A, B y C) en función del nivel de tránsito del proyecto Tabla 32, cuyas características se detallan en el Capítulo 3 Artículo 320-13 y que para los efectos de la guía se aplican las Subbase Clase B y C.

Tabla 31. Valores de K, para losas apoyadas sobre subbase granular

Valor de K para subrasante	Valores de K para subbase por combinada			
	10 cm	15 cm	22.5 cm	30 cm
lb/pulg ³	lb/pulg ³	lb/pulg ³	lb/pulg ³	lb/pulg ³
73	85	96	117	140
147	165	180	210	245
220	235	245	280	330
295	320	330	370	430

Fuente: Manual de Diseño de Pavimentos de Concreto para Vías con Bajos, Medios y Altos Volúmenes de Tránsito – INVIAS

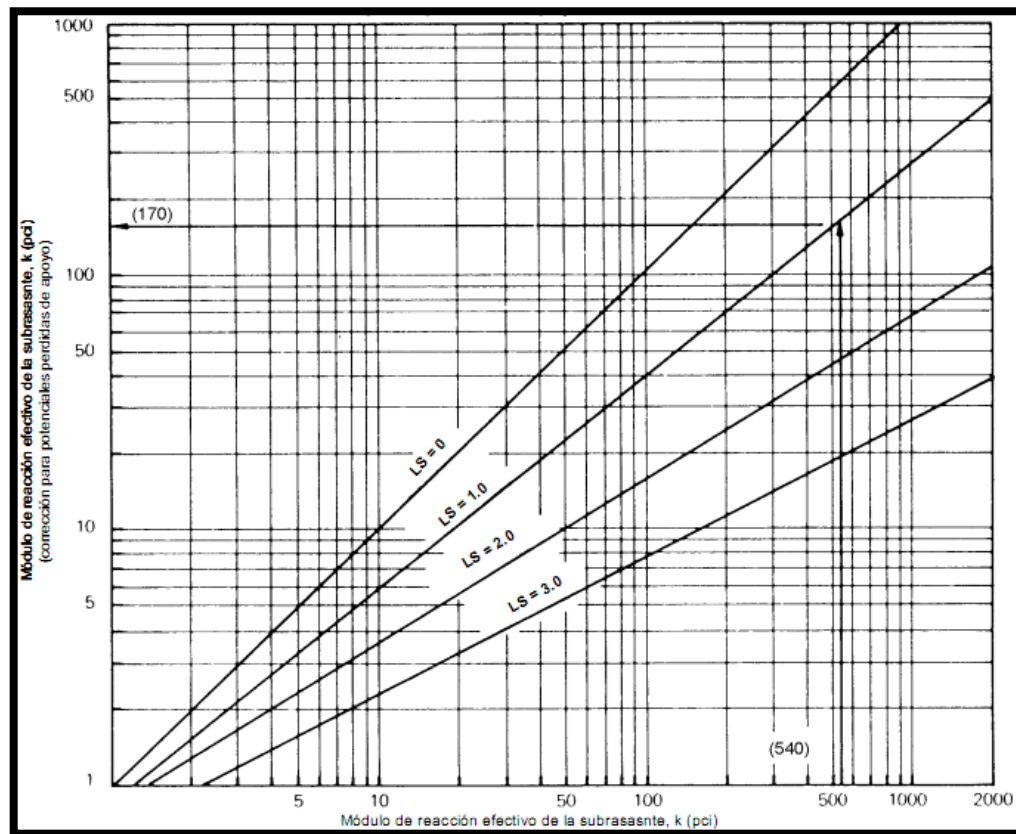
Tabla 32. Uso típico de las diferentes clases de subbase granular

CLASE DE SUBBASE GRANULAR	NIVEL DE TRÁNSITO
Clase C	NT 1
Clase B	NT 2

Fuente: Especificaciones generales de construcción de carreteras, INVIAS 2013.

La AASHTO teniendo en cuenta las posibles fallas por erosión en el sistema de apoyo de la losa de concreto, establece un factor de pérdida de soporte (Ls), el cual provoca una reducción del módulo de reacción efectivo del conjunto subbase y subrasante como se muestra en la Figura 17. La AASTHO recomienda que, para bases granulares sin tratar se tomen valores de Ls entre 1.0 y 3.0, para un valor promedio de 2.0. El valor resultante corresponde al K efectivo, y es el valor a introducir en la ecuación para determinar el espesor de la placa de concreto.

Figura 17. Correlación del módulo efectivo de reacción por pérdida de potencial de soporte



Fuente: Guía AASHTO para diseño de estructuras de pavimento - AASTHO93

8.1.5 Concreto

Los parámetros mecánicos con los cuales se caracteriza la losa de concreto son el módulo elástico (MPa) y el módulo de rotura (psi), medidos a los 28 días. Se tienen los siguientes valores de referencia, para el módulo de rotura o resistencia a la flexotracción, según las especificaciones técnicas de INVIA (Tabla 33), para cada nivel de tránsito hay una resistencia a la flexotracción mínima que se controla en campo y para el caso del módulo elástico es bastante común que este parámetro se obtenga a partir de correlaciones con la resistencia a la compresión simple.

Tabla 33. Resistencia a la flexotracción mínima.

TRANSITO	RESISTENCIA A LA FLEXOTRACCION A 28 DÍAS, MÍNIMO (MPa)
NT 1	3.8
NT 2	4.0

Fuente: Especificaciones generales de construcción de carreteras, INVIAS 2013.

8.1.6 Drenaje

En pavimentos rígidos influyen las condiciones de clima y de drenaje, variable que se tiene en cuenta a través del parámetro Coeficiente de drenaje Cd (Tabla 34), el cual depende de la calidad del drenaje, y del tiempo en que el agua sea evacuada de la vía, si esta tiene la capacidad de evacuar adecuadamente las aguas de escorrentía el drenaje es bueno, caso contrario si presenta una característica en que nunca drena el agua el drenaje será muy malo; y, por otra parte el porcentaje del tiempo que la estructura del pavimento está expuesta a grados de humedad próxima a la saturación, el cual se calcula de acuerdo al número de días con lluvia en el año, tal y como se detalla en el Anexo E.

Tabla 34. Valores de coeficiente de drenaje, Cd.

CALIDAD DEL DRENAJE	PORCENTAJE DEL TIEMPO QUE LA ESTRUCTURA DEL PAVIMENTO ESTÁ EXPUESTA A NIVELES DE HUMEDAD PRÓXIMOS A LA SATURACIÓN			
	< 1%	1% - 5%	5% - 25%	>25%
Excelente	1.25 – 1.2	1.20 – 1.15	1.15 – 1.10	1.10
Bueno	1.20 – 1.15	1.15 – 1.10	1.10 – 1.00	1.00
Mediano	1.15 – 1.10	1.10 – 1.00	1.00 – 0.90	0.90
Malo	1.10 – 1.00	1.00 – 0.90	0.90 – 0.80	0.80
Muy Malo	1.00 – 0.90	0.90 – 0.80	0.80 – 0.70	0.70

Fuente: Guía AASHTO para diseño de estructuras de pavimento – AASTHO 93

8.1.7 Transferencia de carga

El coeficiente de transferencia de cargas (J) es un parámetro adimensional que tiene en cuenta la capacidad que tienen los pasadores de transferir o distribuir cargas en la zona más propensa a falla, por lo tanto la forma en que se transmitan las cargas es importante para garantizar la duración del pavimento, influyendo también la utilización de bordillos en los costados para garantizar el confinamiento que genera una disipación de esfuerzos que contribuyen a tener un funcionamiento adecuado del pavimento y la utilización de pasadores, que son barras de acero que se colocan en el sentido longitudinal entre las losas de concreto para mejorar la forma como se transfieren las cargas entre las losas cuando un vehículo pasa por el pavimento.

En función de estos dos parámetros se determina el valor de J , que para la presente guía es de 2.8 el cual representa la condición promedio de un pavimento con losa confinada y junta con pasadores, con lo cual se garantiza un menor espesor de la losa porque se están garantizando las condiciones adecuadas para la transferencia de carga.

8.2 DESARROLLO DE METODOLOGIA

Para el cálculo del espesor de la losa de concreto se debe hacer uso de la ecuación simplificada, la cual se obtiene al determinar algunas variables con valores constantes facilitando así el cálculo de la estructura de pavimento. Para hacer uso de la guía se debe contar con los siguientes datos, el número de ejes equivalentes en el perdido de diseño (W_{18}), el módulo de reacción efectivo de la subrasante (K), el módulo de Rotura del concreto (Sc), el módulo de elasticidad del concreto (Ec) y el coeficiente de drenaje (Cd).

A continuación, se muestra la ecuación simplificada, las variables y parámetros de entrada que se deben tener en cuenta a la hora de realizar el diseño de la estructura de pavimento.

- **Ecuación Simplificada:**

$$\log W_{18} = 7.35 \log(D + 1) - 0.06 - \frac{0.234}{1 + \frac{1.624 \times 10^7}{(D + 1)^{8.46}}} + 3.5 * \log \left\{ \frac{S_c C_D (D^{0.75} - 1.132)}{603.764 \left[D^{0.75} - \frac{18.42}{\left(\frac{E_c}{k} \right)^{0.25}} \right]} \right\}$$

- **Variables Y Parámetros De Entrada**

Número de ejes equivalentes en el periodo de diseño, W_{18}

Módulo de reacción efectivo de la subrasante, K

% CBR

$K_{\text{SUBRASANTE}}$ (Figura 16)

SUBBASE: 15 cm

$K_{\text{COMBINADO}}$ (Tabla 31)

K_{EFECTIVO} (Figura 17)

Módulo de Rotura del concreto, Sc

Tipo de Tráfico: NT1 y NT2 (Tabla 33)

Módulo de elasticidad del concreto, Ec (Tabla 6)

Coeficiente de drenaje, Cd (Tabla 34)

En el Anexo F, se presenta a manera de ejemplo un diseño de la estructura de pavimento rígido, haciendo uso de la fórmula simplificada propuesta en la guía.

9. CONCLUSIONES

Revisadas las metodologías más usadas en el país para el diseño de las estructuras de pavimento rígidos con aplicación a vías urbanas se determinó que el método AASHTO 93 es el más completo y sobre el cual se basan las metodologías colombianas cuyo aporte fundamental es el de introducir parámetros con valores asociados a nuestro medio. Sin embargo, se debe ser muy cuidadoso debido a que este método utiliza más variables generando mayor incertidumbre, razón por la cual, es necesario elegir valores que representen adecuadamente las condiciones del sector donde se va realizar el proyecto, minimizando así posibles imprecisiones en los resultados que podrían afectar el diseño de la estructura del pavimento.

Tanto el método AASHTO como el PCA se fundamentan en criterios y parámetros efectivos para realizar el diseño del pavimento, pero a diferencia del método AASHTO, la PCA no tiene en cuenta en los diseños variables importantes como la serviciabilidad de la vía y las condiciones de drenaje, los cuales según los análisis realizados afectan significativamente el espesor de la placa de concreto.

Debido a que en la población objeto de estudio no es común que se presenten altos volúmenes de vehículos comerciales, se reduce el riesgo de pérdida de soporte del sistema de apoyo que se puedan presentar como causa de las cargas ejercidas en los bordes de las losas que presenten saturación en las capas de subbase y subrasante, razón por la cual en el método PCA para este tipo de situaciones toma mayor relevancia el análisis de fatiga de la losa.

En la metodología de diseño propuesta por el INVIAS y el IDU, no consideran variables específicas de diseño diferentes a las cuatro que tienen en común los métodos estudiados, razón por la cual el aporte de dichos manuales radica en la

contribución de resultados asociados a nuestro medio que pueden ser tenidos en cuenta como una referencia para validar el diseño obtenido con la guía propuesta.

De acuerdo al análisis de las metodologías estudiadas, se observó que cada una de estas trabaja con diferentes parámetros por lo cual se generan variaciones en los resultados de los espesores de la losa de concreto, pero también, se contempló que existen cuatro variables fundamentales que son utilizadas por los diferentes métodos como lo son el tránsito, resistencia del suelo de soporte (subrasante), propiedades de los materiales que conforman la estructura del pavimento (Subbase, concreto) y el uso o no de elementos de transferencia de carga (dovelas) y de confinamiento (sardineles).

Al hacer el análisis económico se encontró que la metodología AASHTO 93 arroja los valores que reflejan un menor costo por metro cuadrado, teniendo en cuenta las actividades relevantes para la ejecución del proyecto.

El análisis de sensibilidad de las variables que se utilizan en los métodos y los parámetros empleados permiten sintetizar la formula AASHTO con una expresión más simplificada, que garantiza los mismos resultados estimados en el análisis técnico, sin afectar las condiciones económicas y se brinda una herramienta de trabajo practico para que los entes territoriales pequeños e intermedios hagan uso de esta herramienta en forma confiable.

En términos generales se concluye que el aporte de esta monografía es la guía técnica como herramienta de consulta para los funcionarios de los entes territoriales y comunidad en general, que tengan interés por hacer proyectos para el mejoramiento de las condiciones viales en vías urbanas de municipios pequeños o intermedios.

10.RECOMENDACIONES ADICIONALES

Limitaciones de la guía: La guía propuesta se diseñó como un documento técnico de consulta practica para la elaboración de los proyectos en materia de pavimentación por parte de las entidades territoriales que están dentro de la población objeto de estudio, pero no pierde relevancia que dicha herramienta sea utilizada bajo la supervisión de un ingeniero con conocimientos básicos en pavimentos ya que los insumos correspondientes a los resultados de campo pueden conllevar a la necesidad de estudios adicionales para determinar la estructura adecuada del pavimento.

Diseño de Juntas: En el Anexo C, se presente un compendio con las recomendaciones a tener en cuenta para el diseño de las juntas transversales, longitudinales y de expansión o aislamiento.

Diagnóstico de las redes de servicios públicos: Es necesario determinar si las redes de servicios públicos de acueducto y alcantarillado existentes se encuentran en buen estado, con el fin que no sea necesario realizar su reposición en el corto plazo y se vea afectado el pavimento que se encuentra recientemente construido. Se debe presentar la información de cotas clave y localización de redes en planos, para efectos de control post y Planos ASBUILT.

Señalización Vial: Según el Código Nacional de Tránsito Terrestre en el Capítulo XII Señales de Tránsito, artículo 115 párrafo 2. “En todo contrato de construcción, pavimentación o rehabilitación de una vía urbana o rural será obligatorio incluir la demarcación vial correspondiente, la cual se debe realizar a partir de las especificaciones técnicas definidas en la Resolución 1885 de 2015 Ministerio de Transporte, por medio de la cual se adopta el manual de señalización vial - Dispositivos uniformes para la regulación del tránsito en calles, carreteras y ciclo rutas de Colombia.

11. GLOSARIO

Barras de transferencia: “Son barras de acero liso ubicadas en las juntas transversales de la vía, estas barras cumplen la función de transferir las cargas de una losa a otra, con el fin de controlar las deformaciones verticales que se puedan presentar en estas, producto de la aplicación de las cargas del tráfico”⁴².

Berma: “Parte exterior de la vía destinada al soporte lateral de la calzada y destinada ocasionalmente para proporcionar un espacio adecuado para la detención de vehículos de emergencia”⁴³.

Carril de diseño: “Es el carril por el cual se espera transiten la mayor parte de los vehículos de carga pesada”⁴⁴.

Deflexión: El desplazamiento vertical temporal de un pavimento proveniente de la aplicación de cargas de las ruedas de los vehículos.

Eje patrón: es un eje sencillo de cuatro ruedas cargado con 8.2 toneladas

Hidroplaneo: es un fenómeno que se presenta cuando las llantas del vehículo pierden contacto directo con la superficie del pavimento como consecuencia de una capa de agua, lo que ocasiona que el conductor pierda el control del vehículo.

⁴² PEÑA, Edgar. Proyectos de desarrollo. Bogotá: Escuela superior de administración pública, 2014

⁴³ Idem.

⁴⁴ Idem.

Juntas longitudinales: se construyen en paralelo al eje de la vía, estas pueden ser de contracción (controla el agrietamiento cuando se construyen dos o más carriles) o de construcción (separan los carriles).

Juntas transversales: Se construyen perpendicularmente al eje de la vía, estas controlan el agrietamiento de las losas provocado por el cambio de volumen que experimenta el concreto como consecuencia del cambio de temperatura y de humedad.

Módulo de reacción: es la capacidad de reacción de los suelos de subrasante y las capas de la estructura de pavimento ante cargas estáticas no repetidas

Nivel de servicio: es una medida de la calidad del flujo de tránsito por la vía. Se cuantifica con una serie de factores tales como la velocidad, el tiempo de recorrido, las interrupciones del tránsito, la libertad de manejo, la seguridad y los costos de operación.

Numero de ejes equivalentes: es el número de repeticiones de eje patrón que se necesitan para producir el mismo daño que ocasionan los diferentes tipos de ejes que transitan por la vía.

Pavimento: es una estructura compuesta por un conjunto de capas superpuestas de diferentes características, con el fin de mejorar las condiciones naturales del terreno o subrasante y de brindar al usuario mayor comodidad y seguridad al transitar sobre este.

Periodo de diseño: es el tiempo en el cual se espera que el pavimento funcione con un nivel adecuado de acuerdo a las solicitaciones de la vía, sin requerir actividades de rehabilitación

Sub base: es una capa granular compuesta por materiales triturados, arena y material grueso, esta capa es resistente a la erosión y permite el libre drenaje con el fin de prevenir el bombeo

Subrasante: es la capa de terreno natural sobre la cual se construirá la vía, las características y la calidad de esta determinaran en gran parte el diseño de la estructura del pavimento.

Transito atraído: corresponde al tránsito existente en otras vías, el cual debido al proyecto se transfiere a la vía intervenida.

Transito existente: corresponde al tránsito que circula normalmente por la vía antes de ser intervenida.

Transito generado: Corresponde al volumen de vehículos que se origina como producto del proyecto y del desarrollo del área de influencia.

Transito promedio diario: número promedio de vehículos que circulan por una vía durante un día.

Vías urbanas: vías ubicadas en zonas donde gran parte del terreno está ocupado por edificaciones.

BIBLIOGRAFÍA

- AASHTO. (1993). Guide for design of pavement structures. Washington: American Association of State Highway and Transportation Officials.
- ALFARO, Marcelo. Ventajas comparativas entre pavimentos de concreto y pavimentos de asfalto, 2015. Colombia: Asociación de productores de cemento.
- ARTEAGA, Jefferson. Análisis del comportamiento de la base-cemento para pavimentos con adición de residuos PET reciclado. Bogotá: Universidad Católica de Colombia, 2018.
- CARDENAS, M. (2017). Analisis del drenajesuperficial en vias urbanas apartir de un modelo hidrodinamico bidimensional . Medellin: Universidad Nacional de Colombia .
- CONSORCIO MJ. (2019). Estudios y Diseños Proyecto de Pavimentación Municipio de Barrancabermeja. Barrancabermeja: Alcaldia Municipal de Barrancabermeja.
- GARCIA, M. (2002). Catalogo de diseño de pavimentos rígidos de la PCA adaptados a las condiciones de transito colombianas. Popayan: Universidad del Cauca.
- GARNICA, Paul. GOMEZ, José. SESMA, Jesús. Mecánica de materiales para pavimentos. México: Instituto mexicano del transporte, 2002.
- GONZÁLEZ, G., & VANEGAS, E. (2016). Comparación de las metodologías AASHTO y PCA para el diseño pavimento rígido. Cartagena: Universidad de Cartagena.

- HUANG, Y. (2004). Pavement analysis and design. New York: Pearson. Obtenido de Conceptos básicos de diseño de pavimentos de concreto.
- IBCH. (2006). Diseño de Pavimentos AASHTO-93. La Paz: Instituto Boliviano del Cemento y el Hormigon.
- IBCH. (s.f.). Diseño de espesores para pavimentos de hormigon en carreteras y calles metodo de la Porland Cement Association. Ecuador : Instituto Boliviano del cemento y el hormigón.
- IDU. (2013). Guia Diseño de Pavimentos Para Bajos Volúmenes de tránsito y Vías Locales Para Bogota D.C. BOGOTA: Instituto de Desarrollo Urbano.
- INVIAS. (2006). Estudio e investigación del estado actual de las obras de la red nacional de carretras. Bogota: Instituto Nacional de Vias.
- INVIAS. (2008). Manual de diseño de pavimentos de concreto para vias con bajo,medios y altos volúmenes de tránsito. Bogota: Instituto Colombiano de productores de cemento.
- INVIAS. (2009). Manual de drenaje para carreteras. Bogota: Instituto Nacional de Vias.
- INVIAS. (2013). Especificaciones generales de construcción de carreteras. Bogota: Instituto Nacional de Vias.
- LONDOÑO, C. A. (2001). Diseño, Construcción y Mantenimiento de Pavimentos Rígidos. Bogota: ICPC.
- LÓPEZ, H. (2015). Análisis comparativo entre diferentes metodologías de diseño para estructuras de pavimento implementando los parámetros de diseño

requeridos para el corredor Mulaló – Loboguerrero. Bogota: Universidad Militar Nueva Granada.

MONTEJO, A. (2006). Ingeniería de pavimentos. Bogota: Universidad Católica de Colombia.

MORA, A., & Arguelles, C. (2015). Diseño de Pavimento Rígido Para la Urbanización Caballero y Gongora, Municipio de Honda, Tolima . Bogota: Universidad Catolica de Colombia .

OSPINA, J. (2018). Diseño estructural de pavimento rigido de las vías urbanas en el municipio de Espinal, departamento del Tolima. Ibagué: Universidad Cooperativa de Colombia.

PATILLO, Juan. Consideraciones generales sobre diseño de pavimentos asfálticos. Chile: Ingenieros de construcción, 2012.

PCA. (1984). Thickness Design for Concrete Highway and Street Pavements. Portland Cement Association.

VASQUÉZ, Bruno. Análisis comparativo entre un pavimento rígido y un pavimento flexible para la ruta Santa Elvira-el Arenal. Chile: Universidad Austral de Chile, 2014.