

ESPESORES MÍNIMOS EN PAVIMENTOS FLEXIBLES PARA BOGOTÁ D.C

Cálculo de espesores mínimos de carpetas asfálticas en pavimentos flexibles para Bogotá

Sergio Alejandro Marín Diab

**Proyecto de grado,
para optar al título de Ingeniero Civil**

**Dirigido por:
Magister. Juan Miguel Sánchez Durán**

Universidad Santo Tomás

Facultad de ingeniería civil

Bogotá D.C., Colombia

2019

ESPESORES MÍNIMOS EN PAVIMENTOS FLEXIBLES PARA BOGOTÁ D.C

Dedicatoria

Dedico este trabajo a mi familia ya que ellos nunca han dejado de confiar en mí en este camino tan largo, en especial a mi madre Diana Stella Diab Acosta y mi padre Sergio Hernando Marín Zuluaga, gracias a ellos es que estoy en el lugar en el que me encuentro tanto profesional como personalmente.

Dedicar este trabajo con especial cariño a Amira Acosta de Diab Yaffarf por ser un ejemplo de fortaleza, cariño e independencia.

Agradecimientos

Agradezco a cada una de las personas que estuvieron mi lado a través de este camino, a mis profesores y compañeros con los cuales compartí durante estos años.

Finalmente, a los ingenieros Juan Miguel Sánchez y María Alejandra Polanco, por toda la colaboración brindada durante la elaboración de este proyecto.

ESPESORES MÍNIMOS EN PAVIMENTOS FLEXIBLES PARA BOGOTÁ D.C

Resumen

El siguiente proyecto tiene como finalidad establecer por medio de diferentes metodologías de dimensionamiento de pavimentos los espesores mínimos seguros de mezclas asfálticas que funcionen de manera eficiente y permitan garantizar la durabilidad del pavimento de acuerdo con las cargas de los vehículos pesados que puedan circular en ellas, ya sean camiones como el de la basura o las gaseosas o los buses del sistema integrado de transporte público (SITP).

Palabras claves: Pavimento, Mezclas Asfálticas, Cargas,

Abstract:

The following project aims to establish by means of different pavement sizing methodologies the minimum safe thicknesses of asphalt mixtures that work efficiently and allow to guarantee the durability of the pavement according to the loads of the heavy vehicles that can circulate in them, whether they are trucks such as garbage or soft drinks or the buses of the integrated public transport system (SITP).

Key Works: Pavement, Asphalt Mixtures, Loads

ESPEORES MÍNIMOS EN PAVIMENTOS FLEXIBLES PARA BOGOTÁ D.C

Contenido

Introducción.....	13
Objetivos.....	14
General.....	14
Específicos	14
Justificación	15
Marco Teórico.....	16
Definición de pavimento.....	16
Tipos de pavimentos.....	16
Método AASHTO 86.....	17
Variables para el diseño	17
Restricciones de tiempo	17
Periodo de análisis	17
Confiabilidad.....	18
Efectos ambientales:	19
Criterios de comportamiento	19
Serviciabilidad:	19
Características de los materiales del pavimento	20
Coeficiente de capas:	20
Drenaje.....	21
Características estructurales del pavimento	21
Método Instituto del asfalto.	23
Criterios de diseño.....	23
Carril de diseño.	23
Área de contacto y presión de neumático	24

ESPESORES MÍNIMOS EN PAVIMENTOS FLEXIBLES PARA BOGOTÁ D.C

Estimación del tránsito vehicular	25
Factores recomendados de correlación:	26
Restricciones de tiempo	26
Propiedades de los materiales	27
Factores ambientales	29
Método racional SHELL.....	29
Parámetros de diseño	31
Tránsito	31
Temperatura.....	31
Resistencia de la subrasante	31
Características de la mezcla asfáltica:	32
Módulo de elasticidad dinámico	32
Diseño estructural.....	39
Clima 39	
Tránsito	40
Metodología.....	40
Metodología AASHTO 86	40
Metodología Instituto del Asfalto	45
Subrasante E= 22.5MPa	46
Subrasante E= 40MPa	49
Subrasante E= 50MPa	50
Subrasante E= 60MPa	51
Metodología SHELL	52
Subrasante E= 22.5MPa R= 85%.....	53
Subrasante E= 22.5MPa R= 95%.....	56
Subrasante E= 40MPa R= 85%	57
Subrasante E= 40MPa R= 95%	58

ESPESORES MÍNIMOS EN PAVIMENTOS FLEXIBLES PARA BOGOTÁ D.C

Subrasante E= 50MPa R= 85%	59
Subrasante E= 50MPa R= 95%	60
Subrasante E= 60MPa R= 85%	61
Subrasante E= 60MPa R= 95%	62
Metodología AASHTO - MEPDG.....	63
Resultados.....	76

ESPESORES MÍNIMOS EN PAVIMENTOS FLEXIBLES PARA BOGOTÁ D.C

Lista de tablas

	pág.
Tabla 1. Niveles de confiabilidad sugerida para diferentes carreteras.	17
Tabla 2. Determinación de la calidad del drenaje	20
Tabla 3. Especificaciones mínimas recomendadas	22
Tabla 4. Porcentaje de camión de carril de diseño	23
Tabla 5. Valor percentil para el diseño de la subrasante	26
Tabla 6. Espesores mínimos para superficies de concreto asfáltico	27
Tabla 7. Espesores de concreto asfáltico sobre base granulares	27
Tabla 8. Grado de asfalto de acuerdo al tipo de clima	28
Tabla 9. SN1 con diferente confiabilidad	40
Tabla 10. Espesores AASTHO 86	41
Tabla 11. Tránsito para los diferentes espesores de CA con diferentes confiabilidades	43
Tabla 12. Resultados espesores carpeta asfáltica N= 200.000	46
Tabla 13. Resultados espesores carpeta asfáltica SBR= 22,5MPa	47
Tabla 14. Resultados espesores carpeta asfáltica SBR= 40MPa	48
Tabla 15. Resultados espesores carpeta asfáltica SBR= 50MPa	49
Tabla 16. Resultados espesores carpeta asfáltica SBR= 60MPa	50
Tabla 17. Resultados espesores carpeta asfáltica N= 200.000 R= 85%	54
Tabla 18. Resultados espesores carpeta asfáltica SBR= 22.5MPa R= 85%	55
Tabla 19. Resultados espesores carpeta asfáltica SBR= 22.5MPa R= 95%	56
Tabla 20. Resultados espesores carpeta asfáltica SBR= 40MPa R= 85%	57
Tabla 21. Resultados espesores carpeta asfáltica SBR= 40MPa R= 95%	58

ESPESORES MÍNIMOS EN PAVIMENTOS FLEXIBLES PARA BOGOTÁ D.C

Tabla 22. Resultados espesores carpeta asfáltica SBR= 50MPa R= 85%	59
Tabla 23. Resultados espesores carpeta asfáltica SBR= 50MPa R= 95%	60
Tabla 24. Resultados espesores carpeta asfáltica SBR= 60MPa R= 85%	61
Tabla 25. Resultados espesores carpeta asfáltica SBR= 60MPa R= 95%	62
Tabla 26. Dimensionamiento inicial	64
Tabla 27. Valores de σ_x (Psi), σ_y (Psi) y σ_z (Psi).	70
Tabla 28. Valores de σ_{oct} (Psi), τ_{oct} (Psi), θ (Psi) y M_r (Psi).	70
Tabla 29. Segunda iteración E= 22.5MPa N= 200.000	72
Tabla 30. Tercera iteración E= 22.5MPa N= 200.000	72
Tabla 31. Cuarta iteración E= 22.5MPa N= 200.000	72
Tabla 32. Quinta iteración E= 22.5MPa N= 200.000	72
Tabla 33. Tipos de vehículos, tipos de ejes y cargas de ejes	73
Tabla 34. Resultados de repeticiones dependiendo del eje E= 22.5MPa N= 200.000	73
Tabla 35. Segundo dimensionamiento inicial	73
Tabla 36. Primera iteración E= 22.5MPa N= 200.000	74
Tabla 37. Segunda iteración E= 22.5MPa N= 200.000	74
Tabla 38. Tercera iteración E= 22.5MPa N= 200.000	74
Tabla 39. Cuarta iteración E= 22.5MPa N= 200.000	74
Tabla 40. Quinta iteración E= 22.5MPa N= 200.000	75
Tabla 41. Resultados de repetición dependiendo del eje 22.5MPa E=200.000	76
Tabla 42. Resultados resumen 22.5Mpa	77
Tabla 43. Resultados resumen 40Mpa	77
Tabla 44. Resultados resumen 50Mpa	77

ESPESORES MÍNIMOS EN PAVIMENTOS FLEXIBLES PARA BOGOTÁ D.C

Tabla 45. Resultados resumen 60Mpa	77
Tabla 46. Resumen AASHTO 86	77
Tabla 47. Resumen Instituto de asfalto	78
Tabla 48. Resumen Shell R=85%	78
Tabla 49. Resumen Shell R=95%	78
Tabla 50. Resumen AASHTO-MEPDG	78

Lista de figuras

	pág.
Figura 1. Factores de ajuste por presión de llantas	24
Figura 2. HELKELLOM	32
Figura 3. VAN DERPOEL	33
Figura 4. Temperatura mezcla/ambiente	34
Figura 5. HEUKELOM	35
Figura 6. Determinar si la mezcla es S1 o S2	36
Figura 7. Fatiga del asfalto	37
Figura 8. Deformación del asfalto	38

ESPESORES MÍNIMOS EN PAVIMENTOS FLEXIBLES PARA BOGOTÁ D.C

Lista de gráficas

	pág.
Grafica 1. Espesores vs transitos R= 70%	43
Grafica 2. Espesores vs transitos R= 80%	44
Grafica 3. Espesores vs transitos R= 90%	44
Grafica 4. Espesores granulares vs espesores carpeta asfáltica N= 200.000	49
Grafica 5. Espesores granulares vs espesores carpeta asfáltica	50
Grafica 6. Espesores granulares vs espesores carpeta asfáltica	51
Grafica 7. Espesores granulares vs espesores carpeta asfáltica	52
Grafica 8. Espesores granulares vs espesores carpeta asfáltica	53
Grafica 9. Espesores granulares vs espesores carpeta asfáltica N= 200.000 R= 85%	56
Grafica 10. Espesores granulares vs espesores carpeta asfáltica	57
Grafica 11. Espesores granulares vs espesores carpeta asfáltica	58
Grafica 12. Espesores granulares vs espesores carpeta asfáltica	59
Grafica 13. Espesores granulares vs espesores carpeta asfáltica	60
Grafica 14. Espesores granulares vs espesores carpeta asfáltica	61
Grafica 15. Espesores granulares vs espesores carpeta asfáltica	62
Grafica 16. Espesores granulares vs espesores carpeta asfáltica	63
Grafica 17. Espesores granulares vs espesores carpeta asfáltica	64

Introducción

Uno de los factores que aporta al desarrollo socio-económico de los países y regiones son las carreteras y vías urbanas; puesto que estas suelen ser el único medio de transporte de tanto personas como de carga, es así como el estado de estas vías de comunicación hace más o menos competitivas a las regiones y ciudades de nuestro país.

Esta red de vías permite a los habitantes satisfacer necesidades básicas como lo son la educación, trabajo, salud y alimentación. En Bogotá por ejemplo mucha de las vías que son utilizadas para el tránsito de diferentes vehículos como lo son (SITP, vehículos recolectores de basura) se encuentran en malas condiciones lo que influye en la calidad de vida de los usuarios y habitantes de las zonas por donde transitan este tipo de vehículos.

Por ende, se hacen necesario cuestionar la planificación y métodos de diseño que se utilizan para la construcción de estas vías que sea acorde con el uso que se les da a estas.

Para el desarrollo de este trabajo se utilizarán las metodologías AHHTO 86, Instituto del Asfalto y SHELL, ya que estos métodos son los más utilizados al momento de diseñar los espesores de las carpetas asfálticas, y así poder hallar los espesores mínimos mediante cada uno de estas metodologías y compararlas con la metodología AASHTO-MEPDG la cual no se limita a los estándares de peso utilizados de 8,2 toneladas, los cuales son inferiores al peso real de los vehículos que transitan por la ciudad.

ESPESORES MÍNIMOS EN PAVIMENTOS FLEXIBLES PARA BOGOTÁ D.C

Objetivos

General

Establecer espesores mínimos de capas de rodadura mediante métodos de diseño adecuados al tránsito de ejes que circulan por las vías de Bogotá, buscando obtener estructuras con una estabilidad suficiente para satisfacer las solicitudes actuales de los vehículos de carga y transporte público.

Específicos

1. Realizar los cálculos necesarios para hallar los espesores de carpeta asfáltica mínimos mediante los métodos AASHTO 86, instituto de asfalto y Shell
2. Realizar los cálculos necesarios para halla los espesores de carpeta asfáltica mínimos según la metodología AASHTO-MEPDG, el cual tiene en cuenta las cargas reales de los diferentes tipos de vehículos.
3. Mediante un análisis comparativo concluir cuál debería ser el espesor mínimo que debería adoptarse para diseño según las características de cada tipo de vía.

ESPESORES MÍNIMOS EN PAVIMENTOS FLEXIBLES PARA BOGOTÁ D.C

Justificación

La mayor parte de los diseños de pavimentos flexibles en Bogotá se hacen a partir de un tránsito estimado en ejes equivalentes de 80 kN (8,2 toneladas). Al adoptarse esta carga de referencia, que es la establecida por AASHTO, se está subestimando el daño que los vehículos comerciales más pesados (buses y camiones) producen sobre los pavimentos, especialmente en las capas asfálticas y en menor medida en la subrasante.

Así entonces, para vías locales de bajo tránsito e incluso para rutas del SITP, se suelen dimensionar y construir espesores de carpetas asfálticas menores a los realmente requeridos, que empiezan a deteriorarse prematuramente cuando circulan camiones muy cargados o buses excesivamente llenos como los nuevos del SITP e incluso el bus eléctrico dual de TransMilenio.

De acuerdo con lo expuesto, en el presente proyecto de grado se pretenden establecer unos espesores mínimos de referencia, así como unos parámetros de diseño a tener en cuenta para evaluar correctamente el tránsito de vehículos pesados (SITP, TransMilenio, camiones de construcción, de basuras y otros) con cargas por ejes mayores al eje de referencia normalmente usado en nuestro medio para diseño (eje simple de doble llanta de 8,2 toneladas).

ESPESORES MÍNIMOS EN PAVIMENTOS FLEXIBLES PARA BOGOTÁ D.C

Marco Teórico

En este marco conceptual se presentará la descripción de los términos y metodologías, que se consideran relevantes en el presente trabajo de grado; para esto fue necesario la utilización de diversas fuentes bibliográficas que dieran una descripción general de términos como: pavimento, tipos de pavimento, Método AASHTO 86, Método SHELL, Instituto del asfalto, entre otros.

Definición de pavimento

Se considera al pavimento como un conjunto de capas las cuales reciben una carga de forma directa, esta carga se transmite a las demás capas de una forma disipada para así poder contar con una superficie de rodadura homogénea y eficiente para sus requerimientos.

El espesor de las capas también responde a un factor económico, ya que se busca el menor espesor que cumpla con la reducción de los esfuerzos hacia las capas inferiores.

La resistencia del pavimento no solo depende de la calidad de los materiales si no también al proceso constructivo en el cual existen dos procesos en los cuales hay que tener especial cuidado los cuales son: la compactación y la humedad.

Existen criterios subjetivos en el proceso de modelación y diseño de pavimentos flexibles. Se observa una tendencia a la aplicación de fórmulas que ya son obsoletas por su tendencia ser empíricas o aplicada a zonas donde no son eficientes, sin tener en cuenta patrones establecidos por entidades como SHELL, AASTHO.

Tipos de pavimentos

Existen varios tipos de pavimentos, pero los dos más usados en la ciudad de Bogotá, son: pavimento flexible y pavimento rígido, el pavimento flexible consta en su estructura más básica de una capa de rodadura, una base y una subbase, tiene un costo inicial mucho menor al del

ESPESORES MÍNIMOS EN PAVIMENTOS FLEXIBLES PARA BOGOTÁ D.C

concreto rígido, pero por su necesidad de un mantenimiento continuo suben estos costos, tiene un periodo de vida de 10 a 15 años, el pavimento rígido consta de un concreto hidráulico el cual en algunas oportunidades necesita de un refuerzo de acero, es un concreto el cual no necesita mucho mantenimiento y su periodo de vida va desde los 20 hasta los 40 años.

Método AASHTO 86

A partir de los resultados de AASHTOROAD TEST, el cual fue un experimento que se realizó en Estados Unidos, para conocer el daño que se producía por el tránsito a los pavimentos, gracias a este experimento nació la “Guía AASHTO para el diseño de pavimento rígido y flexible” el cual se utilizó durante muchos años, en 1986 llega la AASHTO-86 guía en la cual se tomaron conceptos como módulo de elasticidad de la subrasante, drenaje, temperatura, entre otros conceptos, para tener una guía mucho más especializada al momento de diseñar pavimentos.

Variables para el diseño

Restricciones de tiempo.

Periodo de diseño: Es el tiempo en el cual dura la estructura sin necesidad de realizar mantenimiento.

El tiempo entre mantenimientos.

Periodo de análisis

Tránsito

Es la cantidad de ejes equivalentes de 8,2 Ton que transitan por un punto.

ESPESORES MÍNIMOS EN PAVIMENTOS FLEXIBLES PARA BOGOTÁ D.C

Confiabilidad

“Se entiende por confiabilidad de un proceso diseño-comportamiento de un pavimento a la probabilidad de que una sección de dicha usando proceso, se comportara satisfactoriamente bajo las condiciones de tránsito y ambientales durante el periodo de diseño.

La confiabilidad pretende incorporar algún grado de certidumbre al procedimiento de diseño, para asegurar las diferentes alternativas de este se mantengan para el periodo de análisis. El factor de confiabilidad de diseño tiene en cuenta las variaciones al azar tanto en a la predicción del tránsito como en la predicción del comportamiento y por lo tanto proporciona un nivel predeterminado de confianza en que los tramos del pavimento sobrevivirán al periodo para el cual fueron diseñados. En general, a medida que crece el volumen del tránsito, la dificultad de que presente tránsito divergente y la expectativa pública de disponibilidad, aumentan el riesgo de no cumplir con dichas expectativas, debe ser minimizado. Esto se logra escogiendo niveles mayores de confiabilidad que se encuentran en la tabla N° 1.

Los niveles más elevados corresponden a las vías que reciben mayor uso, mientras que los niveles más bajo, el 50% corresponde a carreteras locales.” (*Alfonso Montejo Fonseca., 2002*).

ESPESORES MÍNIMOS EN PAVIMENTOS FLEXIBLES PARA BOGOTÁ D.C

Tabla 1.

Niveles de confiabilidad sugeridos para diferentes carreteras

Clasificación	Niveles de confiabilidad recomendado	
	Urbana	Rural
Autopistas interestatales y otras	85 - 99,9	80 - 99,9
Arterias principales	80 - 99	75 - 95
Colectores de tránsito	80 - 95	75 - 95
Carreteras locales	50 - 80	50 - 80

Tomada de: *Alfonso Montejo Fonseca. (2002). Ingeniería de pavimentos para carreteras.*

Efectos ambientales:

Los diferentes cambios ambientales como la temperatura y la humedad.

Criterios de comportamiento

Serviciabilidad:

“Se define como la idoneidad que tiene el mismo para servir a la clase de tránsito que lo va a utilizar. La mejor forma de evaluarla es a través de índice de servicio presente (PSI), el cual varía de 0 (carretera imposible) hasta 5 (carretera perfecta).

Para AASHTO se deben usar valores de 2.5 para autopistas y vías principales y 2.0 para las demás carreteras.” (*Alfonso Montejo Fonseca., 2002*).

La serviciabilidad final del pavimento (Pt) depende del tránsito como también del índice de servicio inicial (P0).

Cuando se establezca P0 y Pt, teniendo en cuenta la siguiente ecuación se define el cambio total en el índice de servicio.

ESPESORES MÍNIMOS EN PAVIMENTOS FLEXIBLES PARA BOGOTÁ D.C

Ecuación 1.

Cambio total en el índice de servicio

$$\Delta PSI = P_o - P_t$$

Dónde:

P0: índice de servicio inicial

Pt: índice de servicio final

Propiedades de los materiales

Módulo resiliente de la subrasante

Este módulo se determina con equipos los cuales no son de una fácil adquisición y por este motivo se ha establecido correlaciones como se muestra a continuación:

$Mr(\text{psi}) = 1500 \text{ CBR}$

Para suelos finos y para suelos granulares corresponde la siguiente ecuación:

$Mr = 4326 \times \ln \text{CBR} + 241.$

Características de los materiales del pavimento

Este método no tiene requisitos específicos respecto a la calidad de los materiales, para el uso de este método se debe tener en cuenta el empleo de un coeficiente de capa para poder convertir su espesor en un número estructural (SN) el cual es indicativo del espesor requerido.

Coeficiente de capas:

Estos coeficientes existen para convertir los coeficientes a números reales (SN), “siendo cada coeficiente una medida de la capacidad relativa de cada material para funcionar como parte de la estructura del pavimento” (Alfonso Montejó Fonseca., 2002).

ESPESORES MÍNIMOS EN PAVIMENTOS FLEXIBLES PARA BOGOTÁ D.C

Bogotá tiene una temperatura de 14°C por lo que a_1 se toma como 0.395.

Características estructurales del pavimento

Drenaje

Este método de libertad al ingeniero a considerar cuál es su valor de drenaje teniendo en cuenta la siguiente tabla la cual caracteriza esta característica.

Tabla 2

Determinación de la calidad del drenaje

Calidad del drenaje	Término para remoción del agua
Excelente	2 horas
Buena	1 día
Aceptable	1 semana
Pobre	1 mes
Muy pobre	(El agua no drena)

Tomada de: *Alfonso Montejo Fonseca. (2002). Ingeniería de pavimentos para carreteras.*

Características estructurales del pavimento

Este método se utiliza para vías con tránsitos superior a 50.000 ejes equivalentes de 8.2 toneladas y la ecuación utilizada para el diseño de pavimentos flexibles, deriva de los resultados obtenidos por la AASHTO ROAD TEST es:

Ecuación 2

Ecuación para el diseño de pavimentos flexibles

$$\log W_{18} = ZR \times S_0 + 9.36 \log(SN + 1) - 0.20 + \frac{\log(\Delta PSI / 4.2 - 1.5)}{0.40 (1.094 / (SN + 1)^{5.19})} + 2.32 \log Mr - 8.07$$

ESPESORES MÍNIMOS EN PAVIMENTOS FLEXIBLES PARA BOGOTÁ D.C

Donde:

W18: Número estimado de ejes simples equivalentes de 8.2 toneladas

ZR: Desviación estándar.

So: Error estándar de la predicción del tránsito y de la predicción del comportamiento.

Δ PSI: Diferencia entre el índice de servicio inicial (Po) y el final (Pt)

Mr: Módulo resiliente.

SN: $a_1d_1 + a_2d_2m_2 + a_3d_3m_3$.

El SN es un número abstracto que expresa la resistencia estructural de un pavimento requerido, para una combinación dada de soporte del suelo (Mr) del tránsito total (W18), de la serviciabilidad terminal, y de las condiciones ambientales.

Selección de los espesores de las capas

Teniendo el numero estructural se utiliza la siguiente formula:

$$SN = a_1 D_1$$

el método recomienda los siguientes mínimos.

Tabla 3

Espesores mínimos recomendados(pulg)

No. De ejes equivalentes (millones)	Concreto asfáltico	Base granular
<0,05	1,0 o TDS	4
0,05 - 0,15	2,00	4
0,15 - 0,50	2,50	4
0,50 - 2,00	3,00	6
2,00 - 7,00	3,50	6
>7,00	4,00	6

Tomada de: *Alfonso Montejo Fonseca. (2002). Ingeniería de pavimentos para carreteras.*

ESPESORES MÍNIMOS EN PAVIMENTOS FLEXIBLES PARA BOGOTÁ D.C

Método Instituto del asfalto.

Este método es uno de los más usados al momento de realizarse diseños de pavimentos flexibles el cual se basa en el establecimiento de un límite de deflexión a la estructura del pavimento, siendo este límite función del número e intensidad de aplicaciones de carga. “El primer paso para la aplicación del método del Instituto Norteamericano de Asfalto consiste en determinar el número de tránsito para el periodo de diseño. Por otro lado, el método permite el empleo de concreto asfáltico o emulsiones asfálticas en la totalidad o en parte de la estructura del pavimento, e incluye varias combinaciones de capa de rodadura y bases de concreto asfáltico” (Ing. Figueroa 2016).

Criterios de diseño

Mediante esta metodología, se asume que las cargas le producen a la estructura del pavimento 2 deformaciones las cuales son:

“La deformación horizontal de tensión (E_r) en el fondo de la capa asfáltica más profunda, ya se trate de concreto asfáltico o de una capa tratada con asfalto emulsificador.

la deformación vertical de compresión (E_c), en la parte superior de la capa subrasante si E_r es excesiva, se producirán fisuras en la capa asfáltica mientras que si (E_c) es excesiva, se producirán deformaciones permanentes en la superficie del pavimento” (Ing. Figueroa 2016).

Carril de diseño.

Para carreteras de dos carriles, cualquiera de los dos carriles puede ser el carril de diseño, pero para carreteras de carriles múltiples, es el carril externo.

Entonces para el cálculo del porcentaje de, el actual método recomienda los siguientes valores.

ESPESORES MÍNIMOS EN PAVIMENTOS FLEXIBLES PARA BOGOTÁ D.C

Tabla 4

Porcentaje de camiones en el carril de diseño

N° de carriles	% de camiones en carril de diseño
2	50
4	45
6 o mas	40

Tomada de: Ing. Figueroa (2016). *Diseño de pavimentos flexibles, métodos del instituto de asfalto parámetros de diseño.*

Área de contacto y presión de neumático

Se sabe que, si la presión del neumático es alta la carga puede producir más daño, por lo que también se puede concluir que si la presión es baja el daño va a ser menor.

Hay que tener en cuenta la presión del neumático no siempre es igual a la presión del contacto.

Existen factores que ajustan los ejes equivalentes de diseño para diferentes presiones de contacto de las llantas con el pavimento, en función de su presión de inflado y de la carpeta asfáltica.

ESPESORES MÍNIMOS EN PAVIMENTOS FLEXIBLES PARA BOGOTÁ D.C

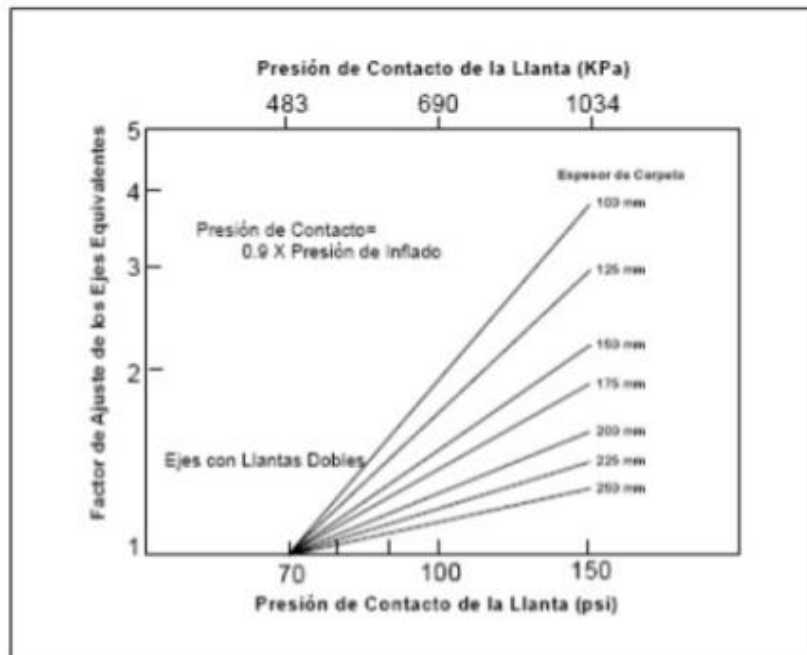


Figura 1. Factor de ajuste de los ejes equivalentes por presión de llantas Tomada de: Ing. Figueroa. (2016). *Diseño de pavimentos flexibles, métodos del instituto de asfalto parámetros de diseño.*

Estimación del tránsito vehicular

Para estimar el tránsito vehicular, es necesario contar con una estación de conteo la cual como su nombre lo indica, se dedica a contar la cantidad de automóviles, buses, camiones, etc., que pasan por un punto determinado de una vía y así contar con una base de datos confiable.

Teniendo esa información se afecta cada grupo vehicular por u factor de equivalencia de carga.

Factor de equivalencia entre la carga real y la carga estándar de 8,2 Ton.

Ecuación 3.

Cargas ejes simples equivalentes

$$ESAL = 365(IMD \times F_t) \times \frac{(1 + r)^n - 1}{r}$$

ESPESORES MÍNIMOS EN PAVIMENTOS FLEXIBLES PARA BOGOTÁ D.C

Donde:

ESAL: Carga por eje simple equivalente a 80KN.

IMD: Índice medio diario de cada grupo vehicular.

Fi: Factor de equivalencia de carga de cada grupo vehicular.

r (%): Tasa de crecimiento anual en porcentaje.

N: Periodo de diseño en años.

Evaluación de los materiales

Existen factores para la evaluación de los materiales que se van a utilizar al momento del diseño de los pavimentos, pero el factor más importante es el del módulo de resiliencia (M_r) de la subrasante.

Factores recomendados de correlación:

$M_r = 1500 * CBR$	Para $CBR < 10\%$. (AASHTO) - Origen Heukelom & Klomp (1962).
$M_r = 3000 * CBR^{0.65}$	Para $7.2\% < CBR < 20\%$ -Origen Sudáfrica.
$M_r = 4362 * \ln CBR + 241$	Para suelos granulares.
$M_r = 2555 * CBR^{0.64}$	Amplia gama de valores – Origen AASHTO 2004 Design Guide.

Las ecuaciones están en unidades (PSI)

Restricciones de tiempo

Se diseña n pavimento para que resista un número determinado de cargas para un periodo determinado de tiempo.

ESPESORES MÍNIMOS EN PAVIMENTOS FLEXIBLES PARA BOGOTÁ D.C

Tabla 5.

Valor percentil para el diseño de la subrasante

Nivel de Tránsito	Valor Percentil Diseño Subrasante
Menor a 10,000 ejes equivalentes	60
Entre 10,000 y 1'000,000 ejes equivalentes	75
Mayor a 1'000,000 de ejes equivalentes	87.5

Tomada de: Ing. Figueroa (2016). *Diseño de pavimentos flexibles, métodos del instituto de asfalto parámetros de diseño.*

Propiedades de los materiales

Según la clase de agregados de puede clasificar las mezclas como:

Tipo I: Mezcla elaborada con agregados procesados de gradación densa.

Tipo II: Mezcla elaborada con agregados semi-procesados.

Tipo III: Mezcla elaborada con arenas o arenas limosas.

En cuanto a requerimientos de espesores mínimos, en función del nivel de tránsito en ejes equivalentes, el método recomienda los siguientes valores:

ESPESORES MÍNIMOS EN PAVIMENTOS FLEXIBLES PARA BOGOTÁ D.C

Tabla 6.

Espesores mínimos para superficies de concreto asfáltico.

Tráfico de Diseño (EAL)	Espesor mínimo	
	(cm)	(pulg)
10 ⁴	5	2
10 ⁵	5	2
10 ⁶	7.5	3
10 ⁷	10	4
> 10 ⁷	13	5

Tomada de: Ing. Figueroa (2016). *Diseño de pavimentos flexibles, métodos del instituto de asfalto parámetros de diseño.*

Para superficies de concreto asfáltico construido sobre bases granulares sin estabilizar:

Tabla 7.

Espesores de concreto asfáltico sobre bases granulares

Tráfico de diseño EAL	Condición de tránsito	Espesor (cm)
≤10 ⁴	Vías de tránsito liviano	7.5
10 ⁴ – 10 ⁶	Vías de tránsito medio	10
≥10 ⁶	Vías de tránsito medio a pesado	12.5

Tomada de: Ing. Figueroa (2016). *Diseño de pavimentos flexibles, métodos del instituto de asfalto parámetros de diseño.*

ESPESORES MÍNIMOS EN PAVIMENTOS FLEXIBLES PARA BOGOTÁ D.C

Factores ambientales

El método contempla los siguientes factores medioambientales y los siguientes tipos de asfalto:

Tabla 8.

Grado de asfalto de acuerdo al tipo de clima.

Condiciones de temperatura.	Grado de asfalto.	
Frío, °T promedio anual menor a 7 °C.	AC-5 AR-2000 Pen 120/150	AC-10 Ar-4000 Pen 85/100
Templado, °T promedio anual entre 7 °C y 24 °C.	AC-10 AR-4000 Pen 85/100	AC-20 Ar-8000 Pen 60/70
Cálido, °T promedio anual mayor a 24 °C.	AC-20 Ar-8000 Pen 60/70	AC-40 Ar-16000 Pen 40/50

Tomada de: *Ing. Figueroa (2016). Diseño de pavimentos flexibles, métodos del instituto de asfalto parámetros de diseño.*

Método racional SHELL

Se considera al pavimento como un sistema multicapa en el cual, para el dimensionamiento de estas capas, se tiene en cuenta dos cualidades importantes de los materiales las cuales son el módulo de elasticidad de Young (E) y su relación de Poisson (μ). Los materiales de la estructura se consideran homogéneos y se asume que las capas tienen una extensión infinita en sentido horizontal.

En su nivel más básico de capas esta compuesta por una carpeta asfáltica, una parte granular y una subrasante.

ESPESORES MÍNIMOS EN PAVIMENTOS FLEXIBLES PARA BOGOTÁ D.C

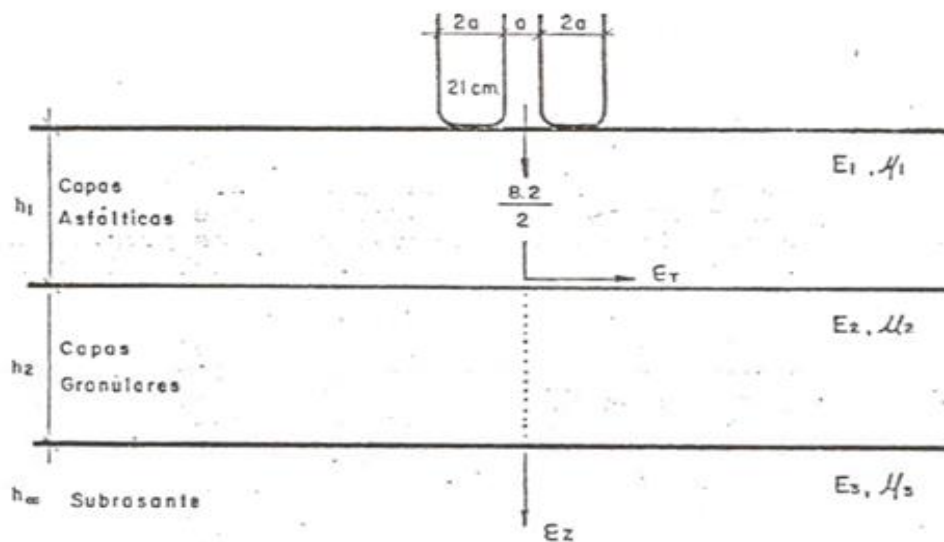


Ilustración 1. Estructura tricapas. Tomada de: *Alfonso Montejo Fonseca. (2002). Ingeniería de pavimentos para carreteras.*

En el diseño se eligen los espesores de las capas asfálticas y granulares teniendo en cuenta las características de sus materiales (E, μ), de manera que se cumpla un determinado criterio de deformaciones.

“Si la deformación horizontal por tracción ϵ_t en la fibra inferior de las capas asfálticas supera la admisible, se producirá el agrietamiento de ellas.

Si la deformación vertical por compresión en la subrasante ϵ_z es excesiva, se producirá una deformación permanente de la subrasante y por consiguiente del pavimento.

Partiendo de estos conceptos, la SHELL ha logrado determinar las combinaciones de espesores de las diferentes capas del pavimento que garantizan el cumplimiento de los valores ϵ_t y ϵ_z durante el periodo de diseño. Para facilitar la aplicación del método por parte del diseñador.” (*Alfonso Montejo Fonseca. 2002*).

ESPESORES MÍNIMOS EN PAVIMENTOS FLEXIBLES PARA BOGOTÁ D.C

Parámetros de diseño

Tiene un periodo de diseño entre 10 a 15 años.

Tránsito

Se expresa como el número acumulado de ejes equivalentes de 8.2 ton.

Temperatura

“Las variaciones diarias y estacionales de la temperatura no presentan influencia significativa en el módulo de elasticidad de las capas granulares, pero en cambio son muy importantes en las propiedades del asfalto, ya que éste un producto susceptible térmicamente y por lo tanto las mezclas que se construyan con él van a presentar un módulo de elasticidad diferente según el clima del lugar donde se construirá la obra. El comportamiento de una mezcla igual es diferente en clima frío que en caliente. A fin de considerar este efecto, el método desarrollará un procedimiento para estimar una temperatura media anual ponderada del aire en la región del proyecto a partir de las temperaturas medias mensuales del aire y con ellos obtener unos factores de ponderación” (*Alfonso Montejo Fonseca. 2002*).

Resistencia de la subrasante

Para este método es de vital importancia conocer el módulo de resiliencia (M_r)

También se debe determinar la resistencia con base al módulo de elasticidad o módulo resiliente, el espesor y la resistencia de apoyo.

$M_R = 107. \text{ CBR } N/m^2$

ESPESORES MÍNIMOS EN PAVIMENTOS FLEXIBLES PARA BOGOTÁ D.C

Características de la mezcla asfáltica:

SHELL considera que son dos las propiedades más importantes de ellas que inciden en su comportamiento.

Módulo de elasticidad dinámico

“El módulo de elasticidad dinámica el método distingue dos tipos de muestra; las S1 que son mezclas corrientes de concreto asfáltico de alta rigidez, con contenidos normales o promedios de agregados, de asfalto y de vacíos con aire. Las mezclas de tipo S2 son mezclas de baja rigidez, mezclas abiertas que tiene un alto contenido de vacíos con aire y un bajo contenido de asfaltos. En cuanto a la fatiga el método distingue dos tipos de mezcla: Las F1 que tienen alta resistencia y que tienen cantidades moderadas de vacíos con aire y de asfalto, y las F2, de baja resistencia y que tienen alto volúmenes de vacío con aire” *(Alfonso Montejo Fonseca. 2002)*

Para determinar el tipo de mezcla, SHELL presenta unas gráficas que están en función de ensayos de laboratorio.

Se realizan varios ensayos de penetración al asfalto que se va a utilizar a diferentes temperaturas, así se determina su susceptibilidad térmica y con ayuda de la gráfica de HELKELLOM (Figura 2) se halla el índice de penetración (IP) que es una medida de la susceptibilidad térmica del asfalto, y también el T800 que es la temperatura a la cual la penetración es de 800 décimas de milímetro.

ESPESORES MÍNIMOS EN PAVIMENTOS FLEXIBLES PARA BOGOTÁ D.C

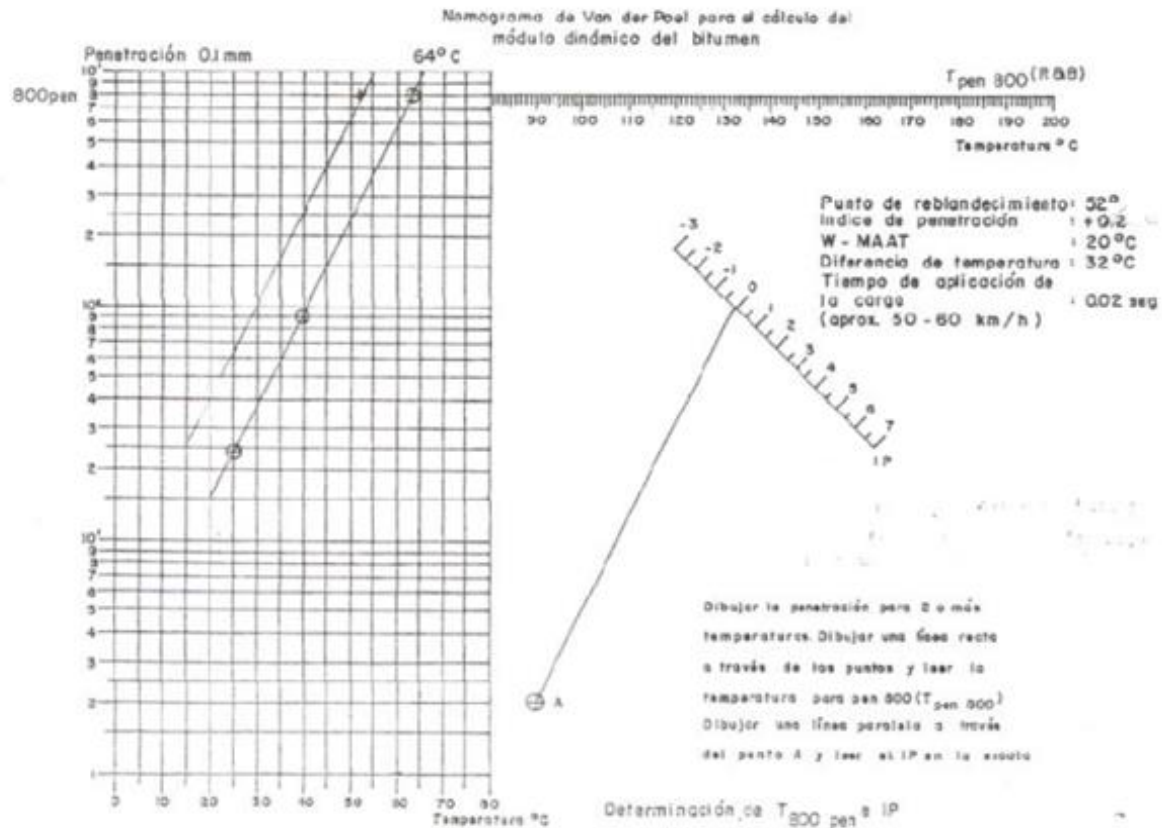


Figura 2. Grafica HELKELLOM Tomada de: Alfonso Montejo Fonseca. (2002). Ingeniería de pavimentos para carreteras.

Se emplea en la gráfica de VAN DER POEL (Figura 3) Para ello es necesario conocer:

- Índice de penetración.
- Tiempo de aplicación de carga. La SHELL recomienda emplear un tiempo de 0.02 s. Que corresponde a una velocidad del vehículo de 50 – 60 Km/h
- $\Delta T = T_{800} - T_{mezcla}$.

ESPEORES MÍNIMOS EN PAVIMENTOS FLEXIBLES PARA BOGOTÁ D.C

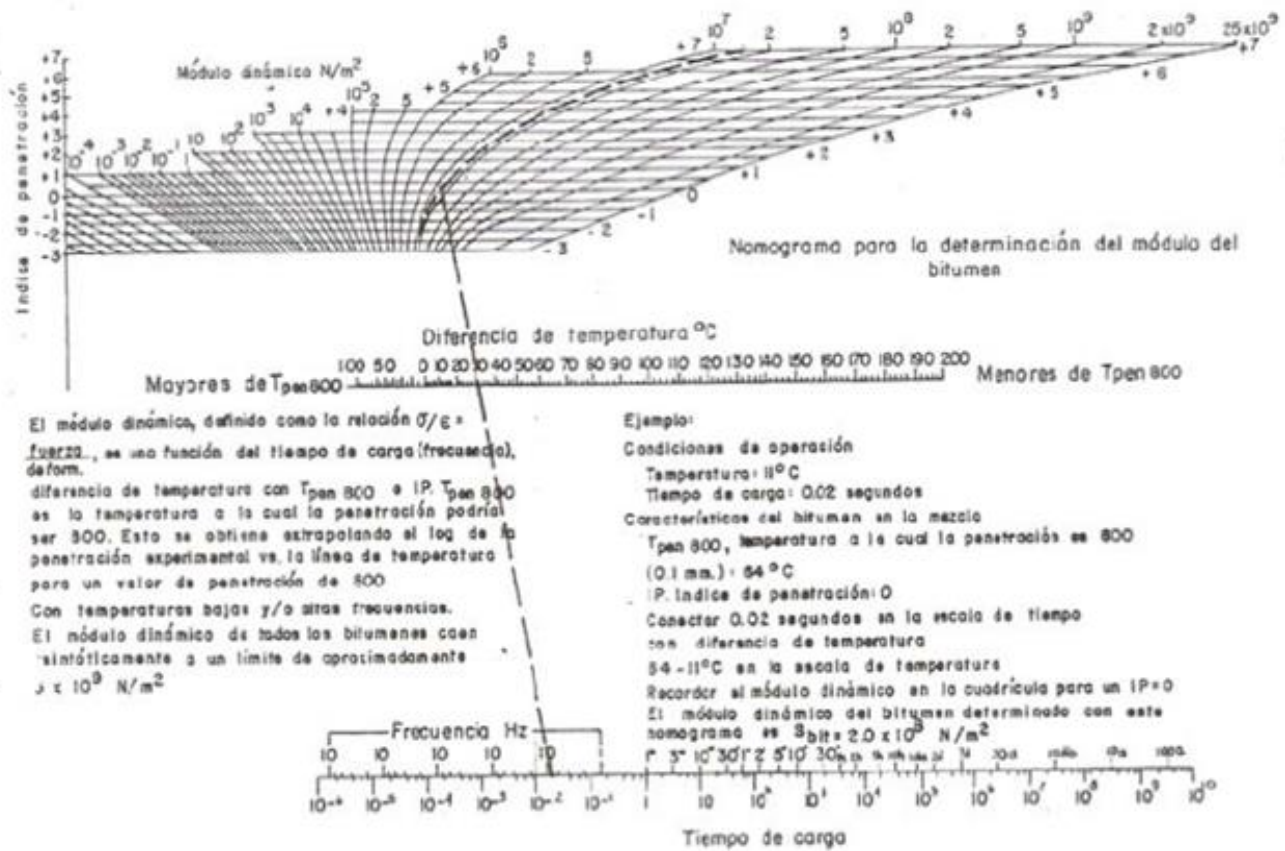


Figura 3. Gráfica VAN DER POEL Tomada de: Alfonso Montejó Fonseca. (2002). Ingeniería de pavimentos para carreteras.

Siendo T_{mezcla} la temperatura de la mezcla que es función de la temperatura ambiente y se obtiene de la gráfica de la figura 4.

ESPESORES MÍNIMOS EN PAVIMENTOS FLEXIBLES PARA BOGOTÁ D.C

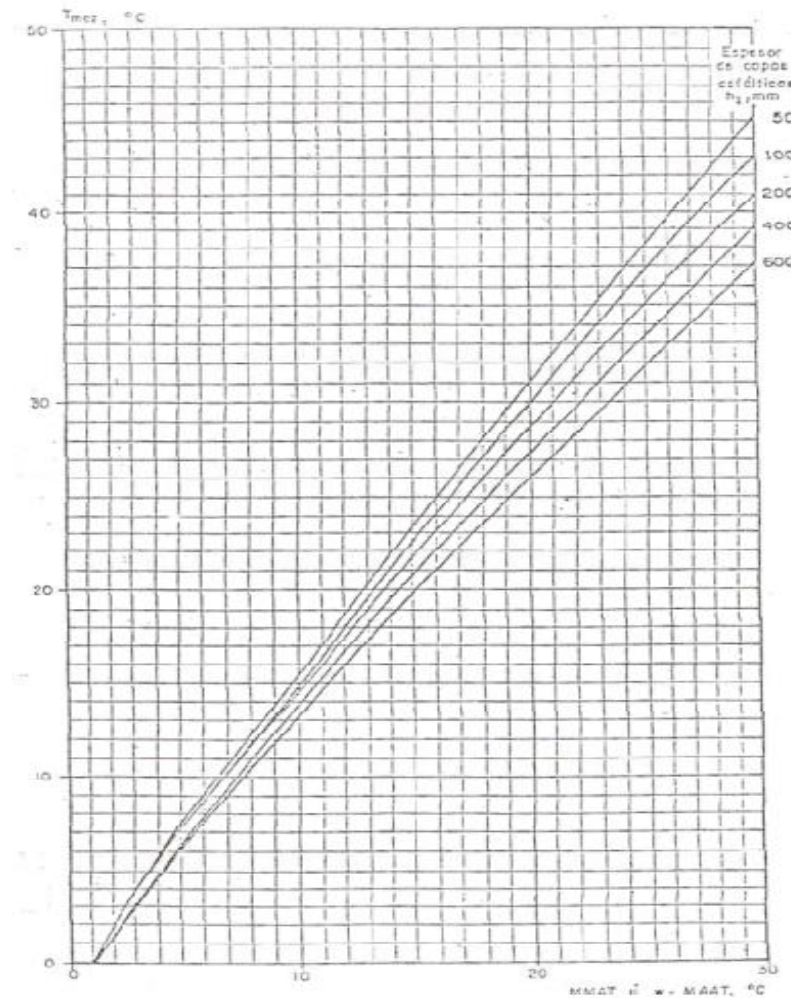


Figura 4. Gráfica temperatura mezcla/ambiente Tomada de: Alfonso Montejo Fonseca. (2002).
Ingeniería de pavimentos para carreteras.

Se emplea en la gráfica de HEUKELOM (Figura 5) y para ello es necesario conocer, además del módulo de elasticidad dinámica del asfalto, la composición volumétrica de la mezcla asfáltica de acuerdo con el diseño de ella en el laboratorio.

ESPESORES MÍNIMOS EN PAVIMENTOS FLEXIBLES PARA BOGOTÁ D.C

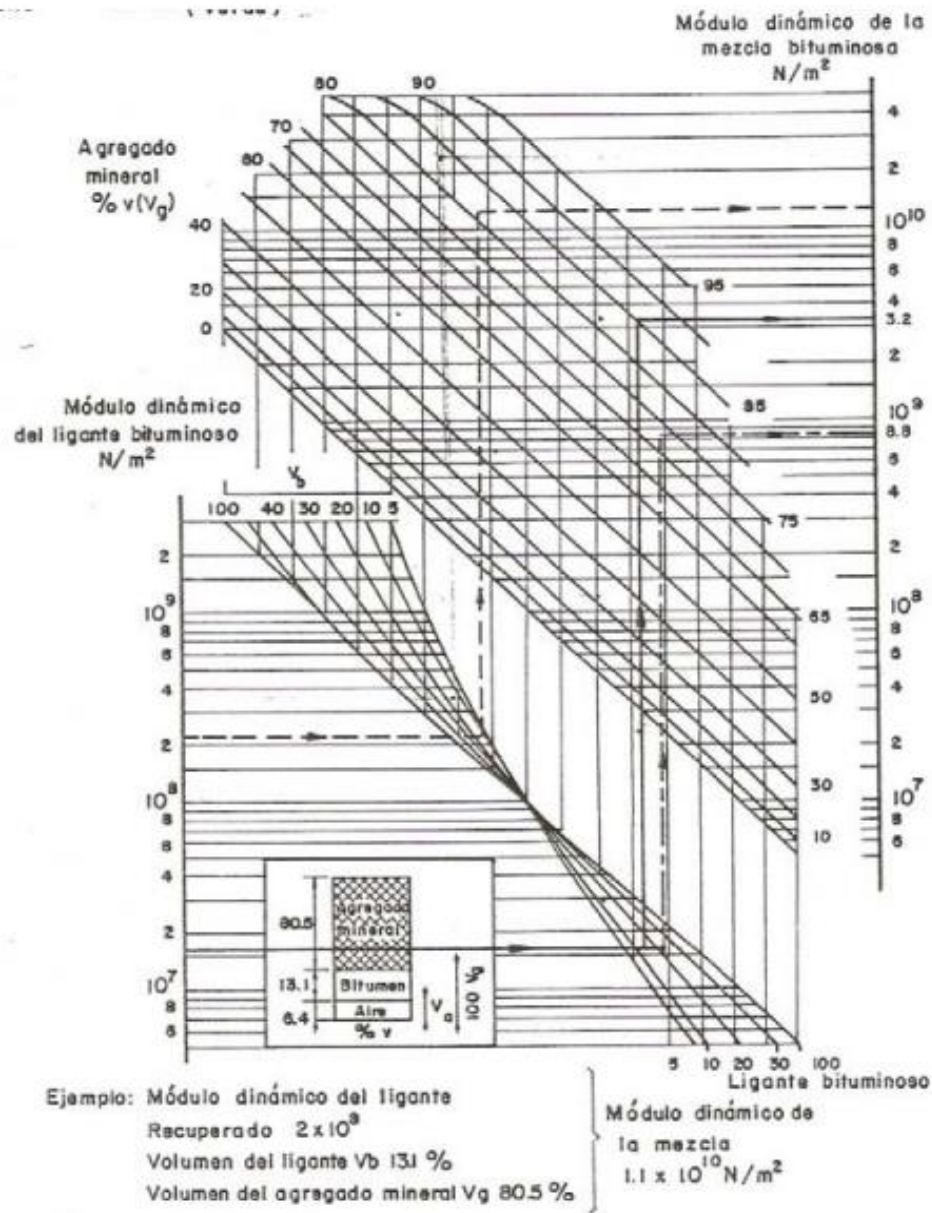


Figura.5 Gráfica de HEUKELOM Tomada de: Alfonso Montejo Fonseca. (2002). Ingeniería de pavimentos para carreteras.

Se emplea la figura 6 en la cual se ubica el punto de confluencia del módulo de elasticidad dinámica del asfalto y de la mezcla.

ESPESORES MÍNIMOS EN PAVIMENTOS FLEXIBLES PARA BOGOTÁ D.C

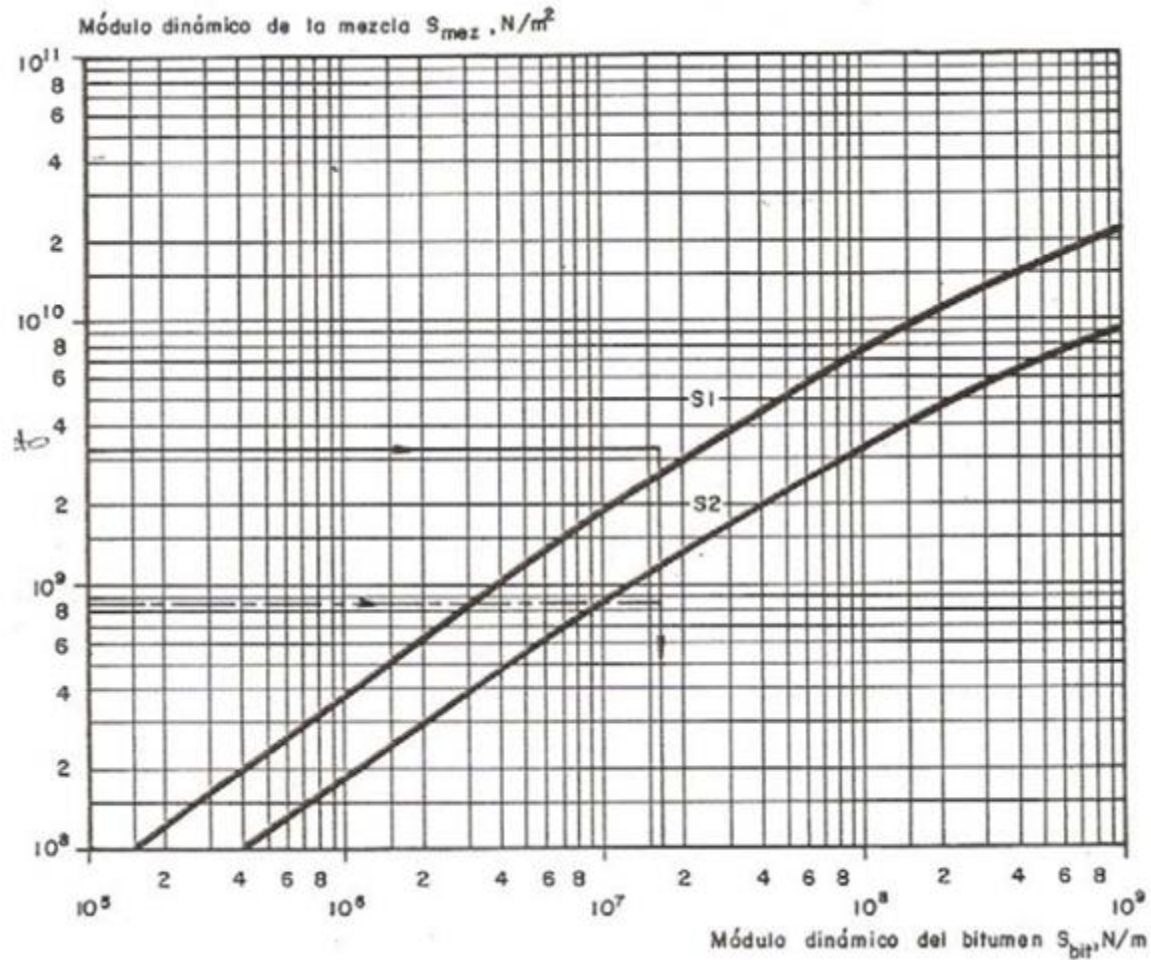


Figura 6 Gráfica para determinar si la mezcla es S1 o S2 Tomada de: Alfonso Montejo Fonseca. (2002). Ingeniería de pavimentos para carreteras.

Se emplea la figura 7, “se entra a ella con módulo de elasticidad dinámica, se prolonga la línea que los une hasta el marco del cuadro, de allí se traza una horizontal hasta hallar la recta que corresponde al tránsito expresado como N de allí se traza una vertical hasta hallar en la abscisa inferior la deformación horizontal por tracción” (Alfonso Montejo Fonseca. 2002)

ESPESORES MÍNIMOS EN PAVIMENTOS FLEXIBLES PARA BOGOTÁ D.C

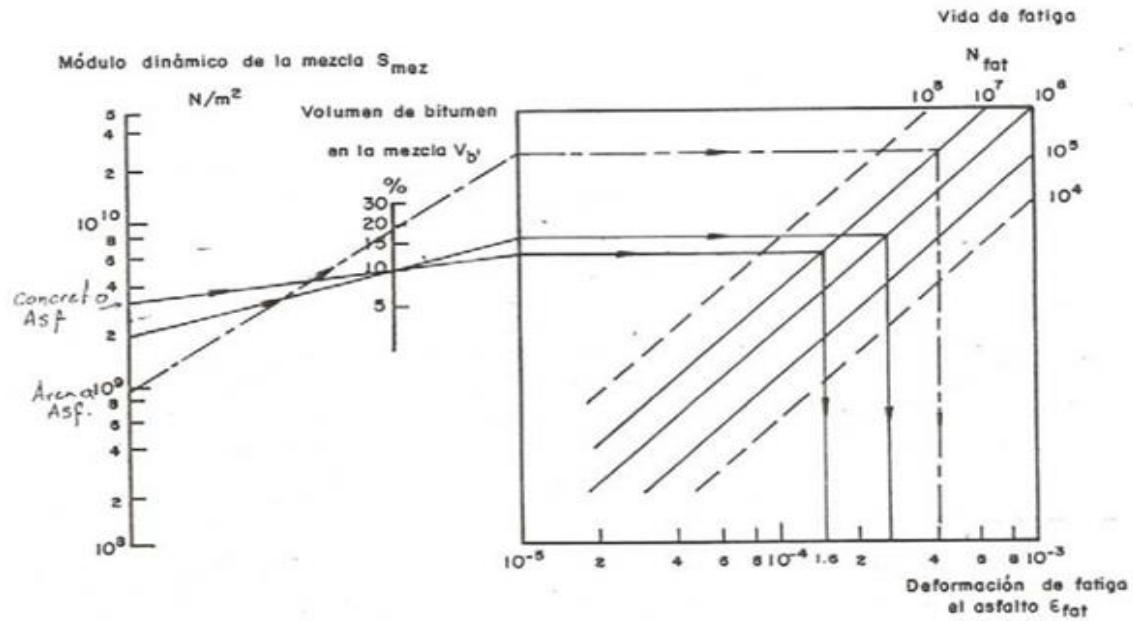


Figura 7. Gráfica deformación de fatiga del asfalto. Tomada de: Alfonso Montejo Fonseca. (2002). Ingeniería de pavimentos para carreteras.

Se emplean las gráficas de la figura 8, en ambas gráficas se busca el punto de confluencia entre el módulo de elasticidad dinámica de la mezcla y la deformación por tracción et.

ESPESORES MÍNIMOS EN PAVIMENTOS FLEXIBLES PARA BOGOTÁ D.C

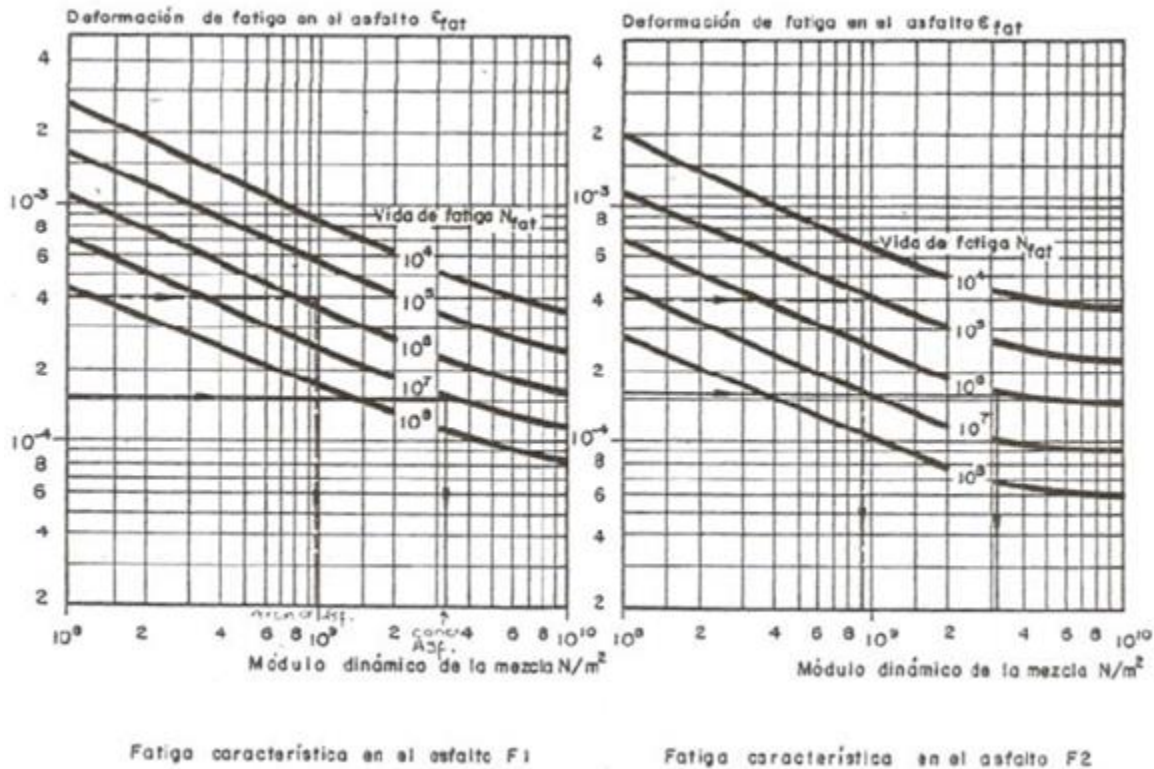


Figura 8. Gráfica deformación de fatiga en el asfalto. Tomada de: *Alfonso Montejo Fonseca. (2002). Ingeniería de pavimentos para carreteras.*

Diseño estructural.

Gracias a las gráficas se puede conocer los espesores necesarios de la capa granulares y asfálticas en función de 4 parámetros, como son:

- Clima
- Módulo de elasticidad de la subrasante.
- Código de la mezcla

ESPESORES MÍNIMOS EN PAVIMENTOS FLEXIBLES PARA BOGOTÁ D.C

Tránsito

El uso de cualquier gráfica requiere el conocimiento de 4 parámetros de las cuales tres son siempre fijos, cualquiera que sea la gráfica empleada.

“El juego de gráficas básicas de diseño SHELL (Gráficas HN1 a 128) muestra los espesores totales de las capas granulares (h₂). En ellas el parámetro variable es N siendo los valores fijos la temperatura, MR de la subrasante y el código de la mezcla” (Alfonso Montejo Fonseca. 2002)

Metodología

Con base en una primera etapa de recopilación bibliográfica se establecerán unos parámetros de diseño para Bogotá, ya con éstos se determinarán los espesores mínimos requeridos de capas asfálticas por la metodología AASHTO 1986, El Instituto del Asfalto y SHELL. Seguidamente se dimensionarán espesores recomendables y mínimos por metodología AASHTO-MEPDG, método en el cual se puede analizar el daño realizado por cada eje real, para proceder a continuación con el análisis de los resultados obtenidos, la elaboración de gráficos con espesores mínimos y su comparación para establecer así las conclusiones y recomendaciones tanto para diseño como para futuras investigaciones complementarias.

Metodología AASHTO 86

Parámetros que se utilizarán para el cálculo de espesores de carpeta asfáltica para la metodología AASHTO 86:

Para este método, se van a tener en cuenta diferentes tránsitos, pero se les va a dar mayor importancia a los tránsitos de 200.000, 500.000, 1.500.000, 3.000.000 y 7.500.000 ejes equivalentes.

ESPESORES MÍNIMOS EN PAVIMENTOS FLEXIBLES PARA BOGOTÁ D.C

1. R = confiabilidad del 70%, 80% y 90%
2. Z_R = Dependiendo de la confiabilidad se tienen Z_R diferentes
3. SO = 0.45
4. P_o = 4.2
5. $DPSI$ = 2.2
6. CBR = El CBR depende del número de ejes equivalentes, si este es menor o igual a 500.000 se tiene un CBR de 80% por el contrario si este es mayor se tiene un CBR del 100%
7. M_r = Depende del CBR ,
8. SN_1 = 0.06

teniendo el tránsito, se procede a hallar el SN_1 de los diferentes tránsitos con sus diferentes confiabilidades, ASHTOO 86 tiene confiabilidades del 70%, 80% y 90%, se diseña con las diferentes confiabilidades dependiendo del tránsito existente.

Tabla 9.

SN_1 con diferentes confiabilidades.

W18	SN1		
	R=90%	R=80%	R=70%
50.000	1,22	1,11	1,04
150.000	1,5	1,38	1,29
200.000	1,57	1,45	1,36
500.000	1,84	1,71	
1.000.000	2,00	1,85	
1.500.000	2,14	1,98	
2.000.000	2,24	2,08	
3.000.000	2,39	2,22	
5.000.000	2,58		
7.500.000	2,75		
10.000.000	2,88		

ESPESORES MÍNIMOS EN PAVIMENTOS FLEXIBLES PARA BOGOTÁ D.C

En las tablas se muestran los SN1 de no solo los tránsitos mencionados anteriormente, sino también de tránsitos adicionales, esto para poder ver cómo se comporta más detenidamente los cambios de espesores de un tránsito a otro.

Tenido los SN1 procedemos a hallar los espesores según esta metodología.

Tabla 10.

Espesores ASHTOO 86

ESPESORES MINIMOS AASHTO			
W18	R=90%	R=80%	R=70%
50.000	7,85	7,14	6,69
150.000	9,65	8,87	8,30
200.000	10,10	9,32	8,75
500.000	11,83	11,00	
1.000.000	12,86	11,90	
1.500.000	13,76	12,73	
2.000.000	14,40	13,38	
3.000.000	15,37	14,28	
5.000.000	16,59		
7.500.000	17,68		
10.000.000	18,52		

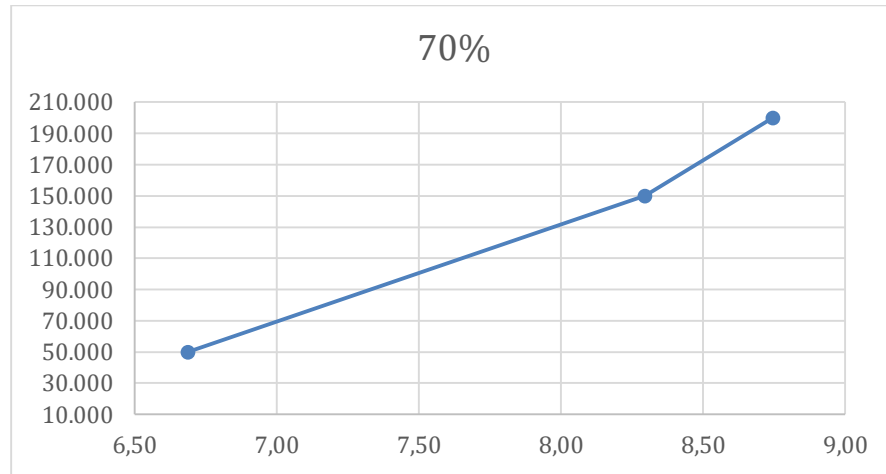
La tabla muestra los espesores en cm, los cuales van desde los 6,69 cm hasta los 18,52 cm.

A continuación, se muestran las gráficas detalladas del comportamiento de los cambios de los espesores a medida que varía tanto el transito como las confiabilidades.

ESPESORES MÍNIMOS EN PAVIMENTOS FLEXIBLES PARA BOGOTÁ D.C

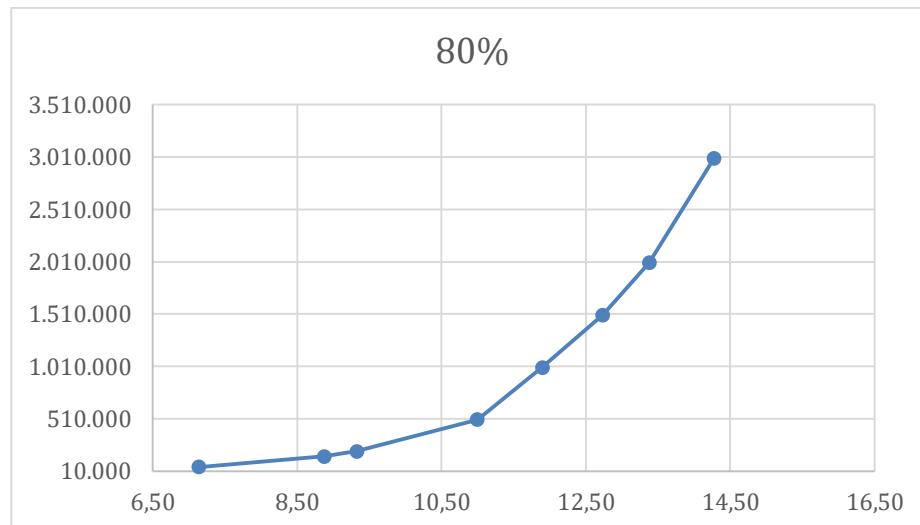
Grafica 1.

Espesores (cm) vs tránsito con 70% de confiabilidad



Grafica 2.

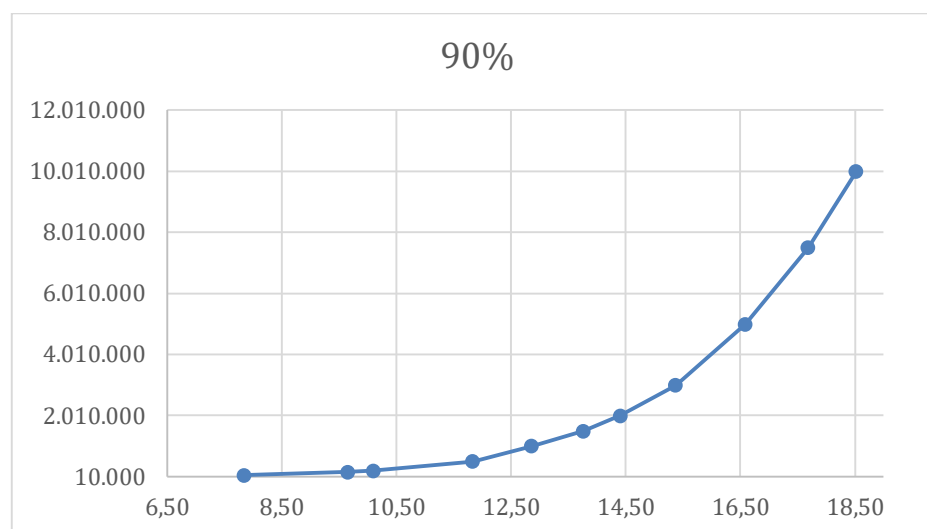
Espesores (cm) vs tránsito con 80% de confiabilidad



ESPESORES MÍNIMOS EN PAVIMENTOS FLEXIBLES PARA BOGOTÁ D.C

Grafica 3.

Espesores (cm) vs tránsitos con 90% de confiabilidad



Se puede desarrollar esta actividad de forma contraria, teniendo el espesor de la carpeta asfáltica y retroceder hasta llegar a su correspondiente tránsito.

Tabla 11.

Tránsito para los diferentes espesores de CA con diferentes confiabilidades.

d (cm)	SN1	R=90%	R=80%	R=70%
7	1,089	28.703	45.387	62.987
8	1,244	55.966	88.365	122.649
9	1,400	104.362	164.961	229.027
10	1,555	186.655	294.507	409.003
11	1,711	322.559	625.196	868.916
12	1,866	661.221	1.042.664	1.447.324
13	2,022	1.073.017	1.692.586	2.349.063
14	2,177	1.690.609	2.666.993	3.702.464
15	2,333	2.602.408	4.107.355	5.712.149
16	2,488	3.915.721	6.183.033	8.577.432
17	2,644	5.786.093	9.115.933	12.687.474
18	2,799	8.365.011	13.209.934	18.316.046
19	2,955	11.939.009	18.836.541	26.159.711

ESPESORES MÍNIMOS EN PAVIMENTOS FLEXIBLES PARA BOGOTÁ D.C

Metodología Instituto del Asfalto

Parámetros que se utilizarán para el cálculo de espesores de carpeta asfáltica para la metodología Instituto del Asfalto:

Para este método, se van a tener en cuenta los tránsitos de 200.000, 500.000, 1.500.000, 3.000.000 y 7.500.000 ejes equivalentes

1. Para este método se van a utilizar diferentes resistencias de subrasantes las cuales van a ser de 22,5MPa, 40MPa, 50MPa y 60MPa
2. $V_b = 11\%$
3. $V_v = 5\%$
4. $M = -0.012$
5. $C = 0.97$
6. $E^* = 2.445,7\text{MPa}$
7. $K = 9.000$
8. $E \text{ Carpeta Asfáltica} = 24.954\text{Kg/cm}^2$
9. Radio de carga= 10,8cm
10. Presión de contacto= 5,60kg/cm²
11. Distancia entre centros= 32,4cm
12. carpeta asfáltica= 0.35
13. Granulares= 0.40
14. SBG= 0.45
15. Subrasante $E = 22.5\text{MPa}$

ESPESORES MÍNIMOS EN PAVIMENTOS FLEXIBLES PARA BOGOTÁ D.C

Subrasante $E = 22.5\text{MPa}$

Se inicia hallando las deformaciones admisibles las cuales dependen del número de ejes equivalentes, C y E^* . A continuación, y con ayuda del programa DEPAV (versión 1.1 de 1992), se procede a realizar un proceso de iteración, en el cual se va cambiando el espesor de la carpeta asfáltica hasta llegar a las deformaciones admisibles exactas o a su menor aproximación, así se hayan los espesores de las carpetas asfálticas mínimos requeridos para cumplir con los estándares de calidad para diferentes espesores de granulares, los cuales van desde los 10cm hasta los 100cm.

Para cada espesor de granulares se tienen diferentes resistencias, ya que esta depende, tanto de su espesor como también de la resistencia de la carpeta asfáltica y de K .

Este proceso se repite para los diferentes tránsitos mencionados anteriormente.

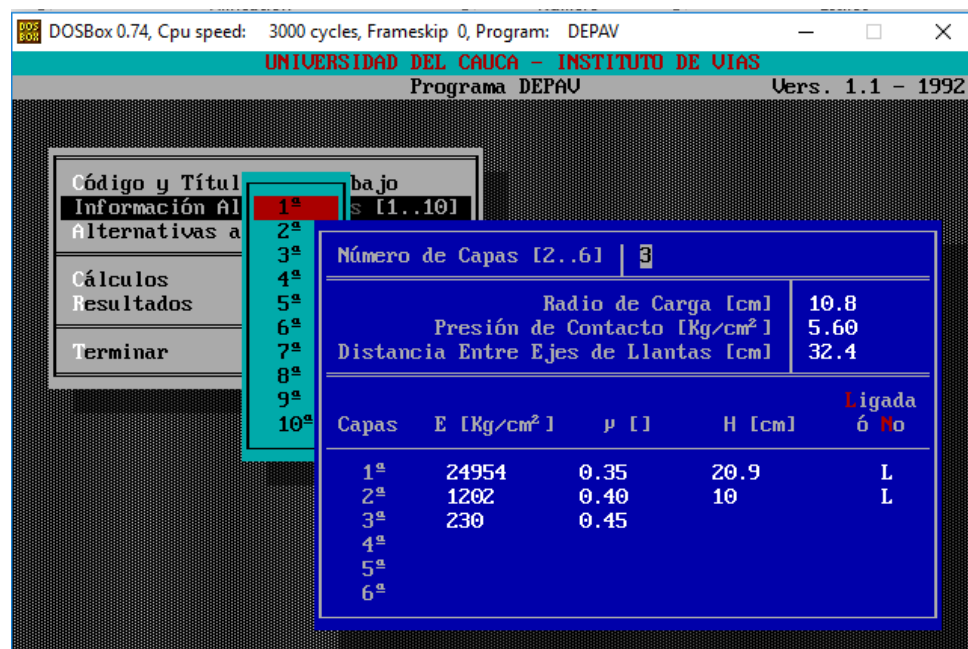


Imagen 1. Ejemplo del programa DEPAV

ESPESORES MÍNIMOS EN PAVIMENTOS FLEXIBLES PARA BOGOTÁ D.C

DOSBox 0.74, Cpu speed: 3000 cycles, Frameskip 0, Program: DEPAV

UNIVERSIDAD DEL CAUCA – INSTITUTO DE VIAS
Programa DEPAU Vers. 1.1 – 1992

Título del Trabajo : XXXXXXXXXX					
Número de Capas : 3			Alternativa : 1		
Capa N°	Z (cm)	Epsilon T	Sigma T (Kg/cm²)	Epsilon Z	Sigma Z (Kg/cm²)
1ª	0.00	2.3300E-04 C	1.1319E+01 B	-1.8300E-04 C	5.5982E+00 A
	20.90	-2.3700E-04 C	-7.9944E+00 B	2.2100E-04 B	3.1509E-01 B
2ª	20.90	-2.3700E-04 C	-2.2739E-01 C	3.8500E-04 B	3.1509E-01 B
	30.90	-3.1700E-04 C	-4.6192E-01 C	4.5000E-04 C	1.9680E-01 C
3ª	30.90	-3.1700E-04 C	3.7627E-02 C	6.8300E-04 C	1.9680E-01 C

Deflexión = 93.410 mm/100
Radio de Curvatura = 281.480 m

1 Ayuda 2 3 Inform 4 Posic 5 6 Estruct 7 8 Imprim 9 10 Salir

Imagen 2. Ejemplo de los resultados del programa EPAV

El primer resultado marcado en rojo en la parte superior izquierda, equivale a las deformaciones transversales admisibles (ϵ_t , adm), el segundo resultado marcado en rojo en la parte inferior derecha, equivale a las deformaciones verticales admisibles (ϵ_v , adm), se debe constatar que alguna de las dos cumpla y que la otra no sobrepase a las deformaciones admisibles calculadas.

Para el SBR= 22,5MPa y un número de ejes equivalentes de 200.000 tenemos las siguientes deformaciones admisibles:

t_{adm} 4,09E-04

$\epsilon_{v,adm}$ 6,85E-04

ESPEORES MÍNIMOS EN PAVIMENTOS FLEXIBLES PARA BOGOTÁ D.C

Tabla 12.

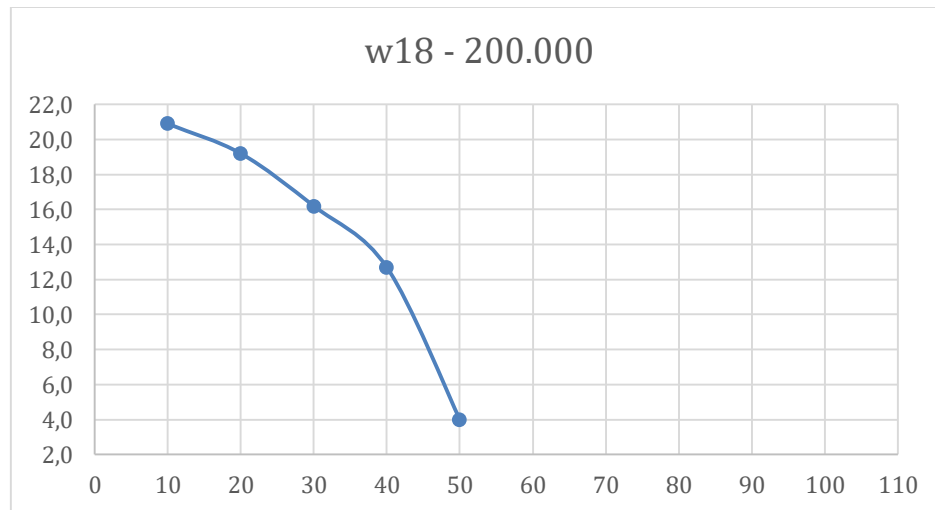
Resultados espesores carpeta asfáltica $N= 200.000$

hgr (cm)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
hca (cm)	20,9	19,2	16,2	12,7	4,0					
Egr (kg/cm ²)	1.202	1.216	1.295	1.436	2.100					
$\varepsilon_{t,act}$	2,37E-04	2,39E-04	2,60E-04	2,98E-04	3,49E-04					
	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
$\varepsilon_{v,act}$	6,84E-04	6,84E-04	6,84E-04	6,84E-04	6,84E-04					
	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple

Para los espesores de granulares mayores a 60 cm, el espesor de la carpeta asfáltica para $N= 200.000$ se aproxima a cero.

Grafica 4.

Espesores granulares vs espesor carpeta asfáltica $N=200.000$



Se realiza el mismo procedimiento para $N= 500.000$, $1.500.000$, $3.000.000$ y $7.500.000$ teniendo los siguientes resultados.

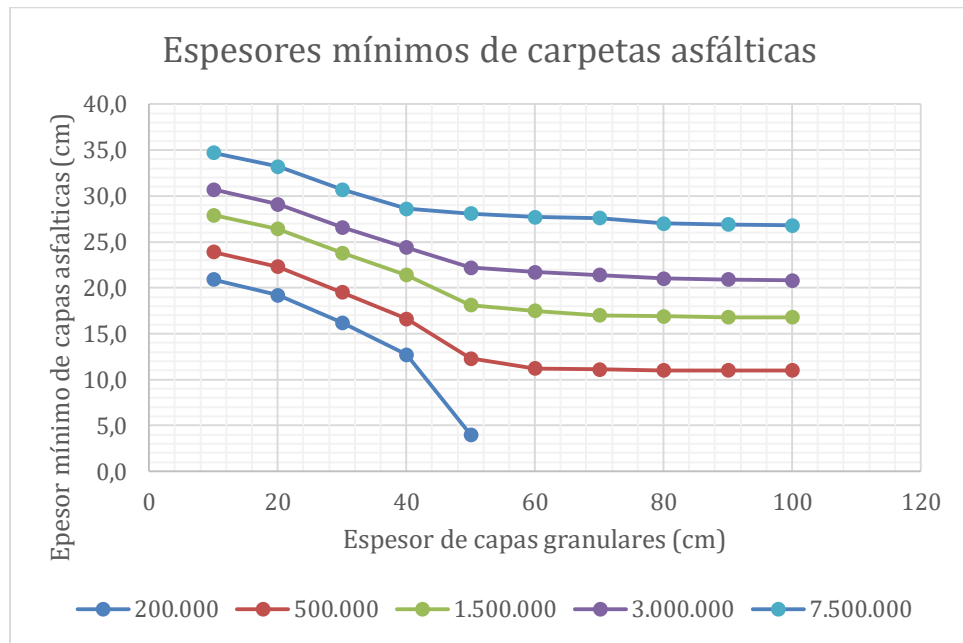
Tabla 13. Resultados espesores carpetas asfálticas SBR= 22.5MPa

hca (cm)	hgr (cm)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
N	200.000	20,9	19,2	16,2	12,7	4,0					
	500.000	23,9	22,3	19,5	16,6	12,3	11,2	11,1	11,0	11,0	11,0
	1.500.000	27,9	26,4	23,8	21,4	18,1	17,5	17,0	16,9	16,8	16,8
	3.000.000	30,7	29,1	26,6	24,4	22,2	21,7	21,4	21,0	20,9	20,8
	7.500.000	34,7	33,2	30,7	28,6	28,1	27,7	27,6	27,0	26,9	26,8

ESPESORES MÍNIMOS EN PAVIMENTOS FLEXIBLES PARA BOGOTÁ D.C

Grafica 5.

Espesores granulares vs espesor carpeta asfáltica



Subrasante E= 40MPa

Se realiza el mismo procedimiento, pero con una resistencia de la subrasante de 40MPa en donde tenemos los siguientes resultados:

Tabla 14

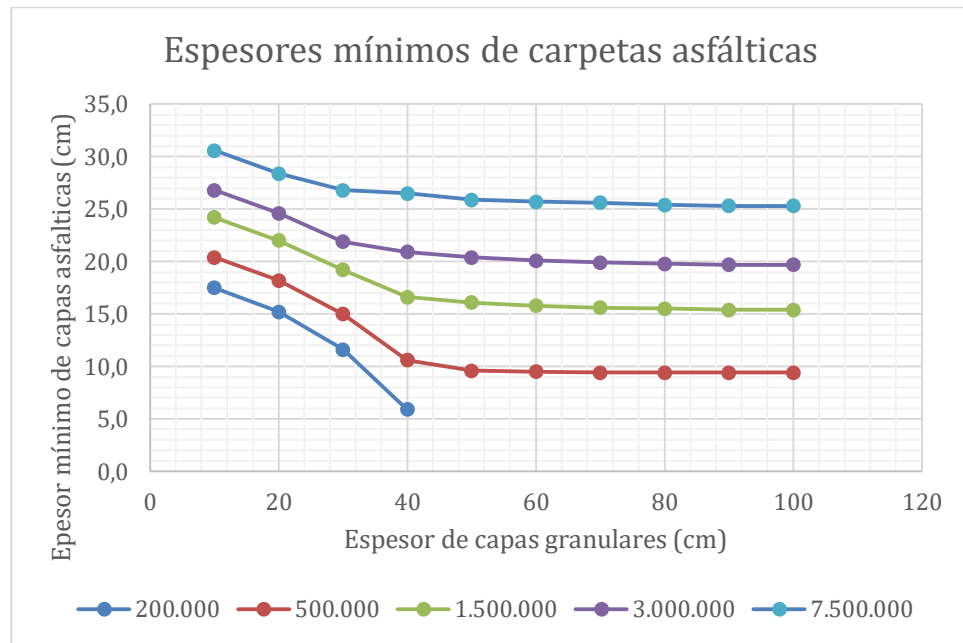
Resultados espesores carpetas asfálticas SBR= 40MPa

hca (cm)	hgr (cm)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
N	200.000	17,5	15,2	11,6	5,9						
	500.000	20,4	18,2	15,0	10,6	9,6	9,5	9,4	9,4	9,4	9,4
	1.500.000	24,2	22,0	19,2	16,6	16,1	15,8	15,6	15,5	15,4	15,4
	3.000.000	26,8	24,6	21,9	20,9	20,4	20,1	19,9	19,8	19,7	19,7
	7.500.000	30,6	28,4	26,8	26,5	25,9	25,7	25,6	25,4	25,3	25,3

ESPESORES MÍNIMOS EN PAVIMENTOS FLEXIBLES PARA BOGOTÁ D.C

Grafica 6.

Espesores granulares vs espesor carpeta asfáltica



Subrasante E= 50MPa

Se realiza el mismo procedimiento, pero con una resistencia de la subrasante de 50MPa en donde tenemos los siguientes resultados:

Tabla 15.

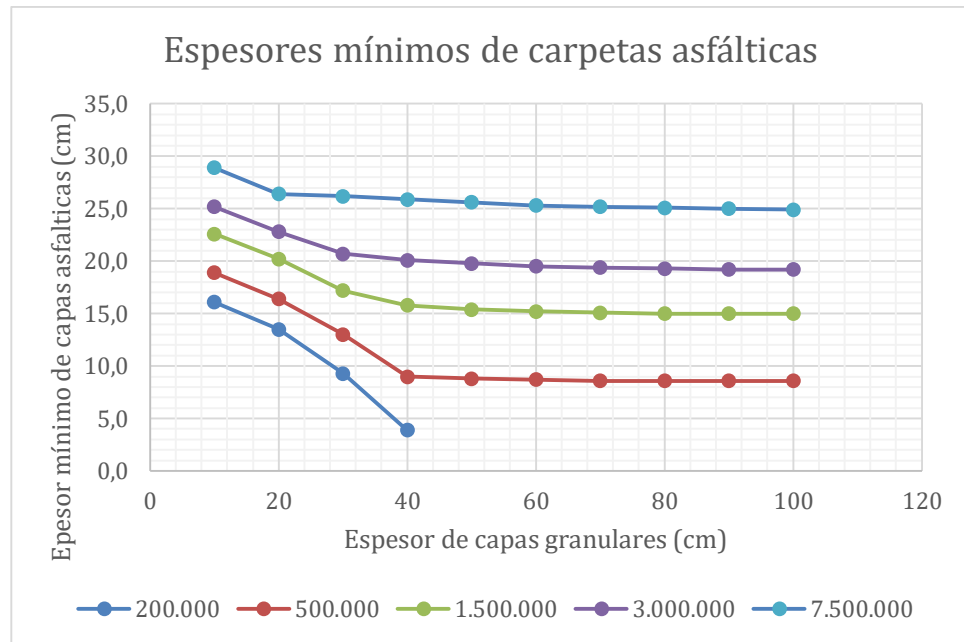
Resultados espesores carpetas asfálticas SBR= 50MPa

hca (cm)	hgr (cm)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
N	200.000	16,1	13,5	9,3	3,9						
	500.000	18,9	16,4	13,0	9,0	8,8	8,7	8,6	8,6	8,6	8,6
	1.500.000	22,6	20,2	17,2	15,8	15,4	15,2	15,1	15,0	15,0	15,0
	3.000.000	25,2	22,8	20,7	20,1	19,8	19,5	19,4	19,3	19,2	19,2
	7.500.000	28,9	26,4	26,2	25,9	25,6	25,3	25,2	25,1	25,0	24,9

ESPESORES MÍNIMOS EN PAVIMENTOS FLEXIBLES PARA BOGOTÁ D.C

Grafica 7.

Espesores granulares vs espesor carpeta asfáltica



Subrasante E= 60MPa

Se realiza el mismo procedimiento, pero con una resistencia de la subrasante de 60MPa en donde tenemos los siguientes resultados:

Tabla 16.

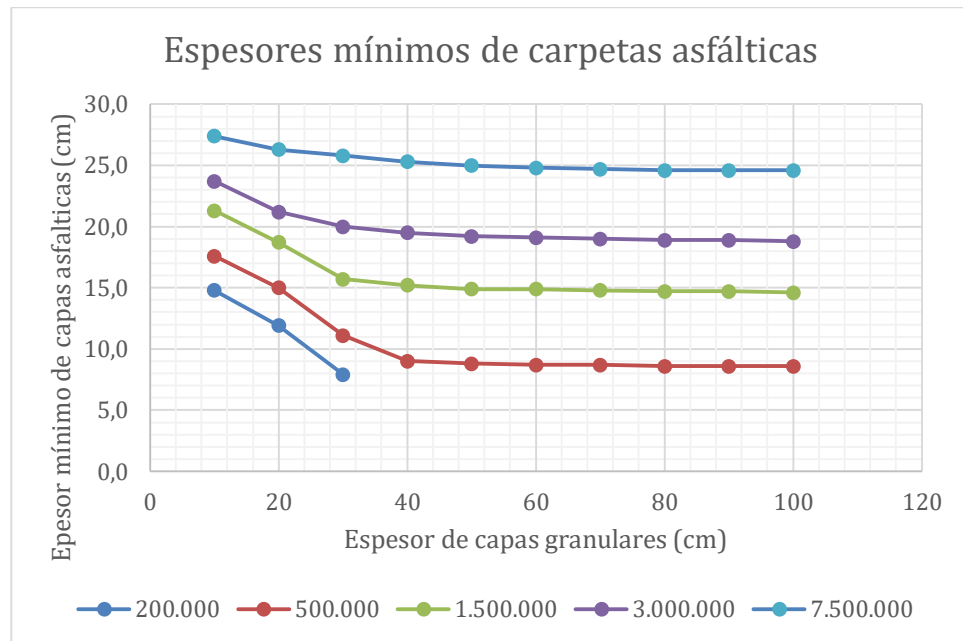
Resultados espesores carpetas asfálticas SBR= 60MPa

hca (cm)	hgr (cm)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
N	200.000	14,8	11,9	7,9							
	500.000	17,6	15,0	11,1	9,0	8,8	8,7	8,7	8,6	8,6	8,6
	1.500.000	21,3	18,7	15,7	15,2	14,9	14,9	14,8	14,7	14,7	14,6
	3.000.000	23,7	21,2	20,0	19,5	19,2	19,1	19,0	18,9	18,9	18,8
	7.500.000	27,4	26,3	25,8	25,3	25,0	24,8	24,7	24,6	24,6	24,6

ESPESORES MÍNIMOS EN PAVIMENTOS FLEXIBLES PARA BOGOTÁ D.C

Grafica 8.

Espesores granulares vs espesor carpeta asfáltica



Metodología SHELL

Parámetros que se utilizarán para el cálculo de espesores de carpeta asfáltica para la metodología Shell:

Para este método se van a tener en cuenta los tránsitos de 200.000, 500.000, 1.500.000, 3.000.000 y 7.500.000 ejes equivalentes

1. Para este método se van a utilizar diferentes resistencias de subrasantes las cuales van a ser de 22,5MPa, 40MPa, 50MPa y 60MPa
2. R= confiabilidad del 85% y 95%
3. Vb= 11%
4. K= 3.3 cuando la confiabilidad es del 85% y 1.0 cuando la confiabilidad es del 95%
5. Smix= $2,45 \times 10^9 \text{ N/m}^2$
6. E Carpeta Asfáltica= 24.954 Kg/cm^2

ESPESORES MÍNIMOS EN PAVIMENTOS FLEXIBLES PARA BOGOTÁ D.C

7. Radio de carga= 10,8cm
8. Presión de contacto= 5,60kg/cm²
9. Distancia entre centros= 32,4cm
10. carpeta asfáltica= 0.35
11. Granulares= 0.40
12. SBG= 0.45

Subrasante E= 22.5MPa R= 85%

Al igual que en la metodología anterior (Instituto del Asfalto), se Inicia hallando las deformaciones admisibles las cuales dependen del número de ejes equivalentes N, Vb, Smix y K. Paso seguido se realiza el proceso de iteración de los espesores de las carpetas asfálticas hasta encontrar el espesor que cumpla con las deformaciones admisibles calculadas anteriormente o su menor aproximación con la ayuda del programa DEPAV (versión 1.1 de 1992), así se hayan los espesores de las carpetas asfálticas mínimos requeridos para cumplir con los estándares de calidad para diferentes espesores de granulares, los cuales van de desde los 10cm hasta los 100cm.

Para cada espesor de granulares se tienen diferentes resistencias ya que esta depende, tanto de su espesor como también de la resistencia de la carpeta asfáltica y de K.

Este proceso se repite para los diferentes tránsitos y confiabilidades mencionadas anteriormente.

ESPESORES MÍNIMOS EN PAVIMENTOS FLEXIBLES PARA BOGOTÁ D.C

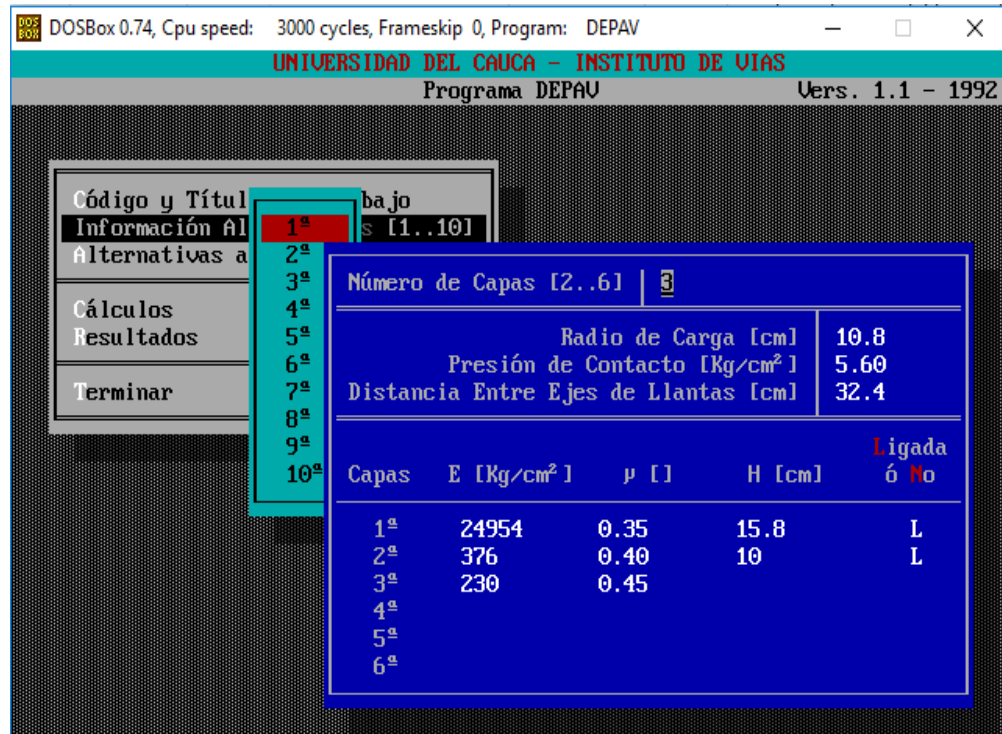


Imagen 3. Ejemplo programa DEPAV

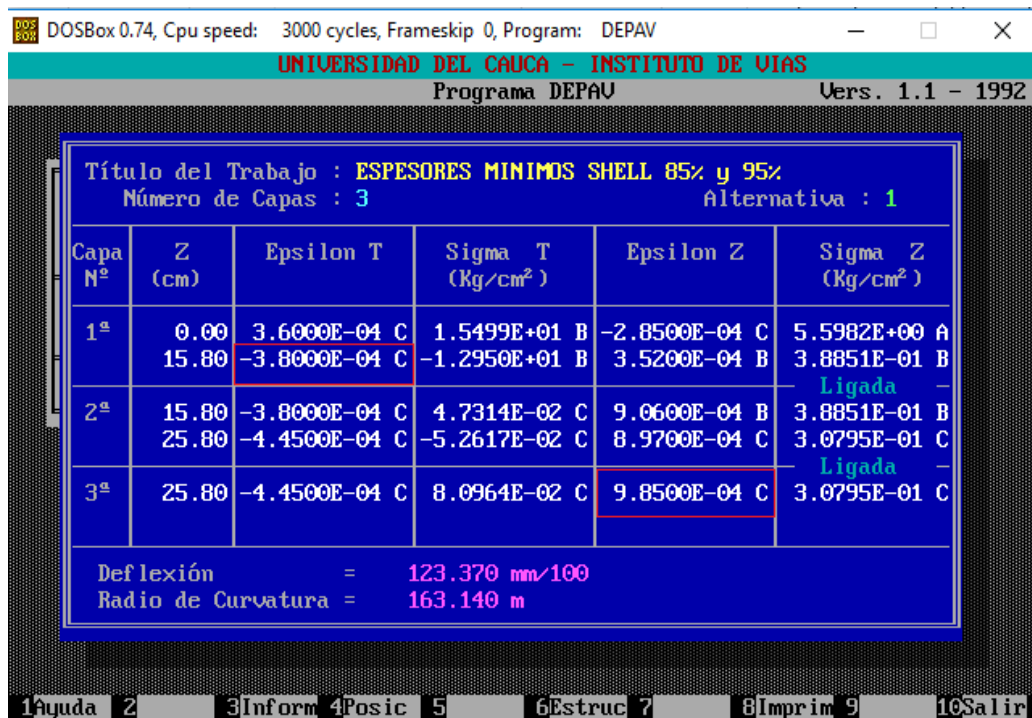


Imagen 4. Ejemplo programa DEPAV

ESPESORES MÍNIMOS EN PAVIMENTOS FLEXIBLES PARA BOGOTÁ D.C

Para el SBR= 22,5MPa R= 85% y un numero de ejes equivalentes de 200.000 tenemos las siguientes deformaciones admisibles:

t_{adm} 4,84E-04

$\epsilon_{v,adm}$ 9,93E-04

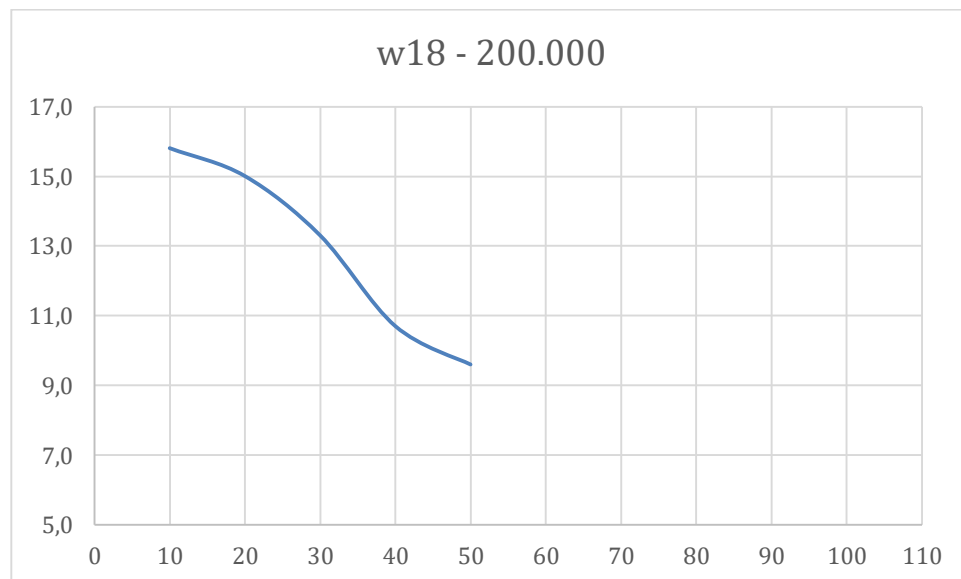
Tabla 17.

Resultados espesores carpetas asfálticas N= 200.000 y R= 85%

hgranulares	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Egranulares	376	513	616	701	775					
hca	15,8	15,0	13,3	10,7	9,6					
$\epsilon_{t,act}$	3,80E-04	3,79E-04	4,01E-04	4,63E-04	4,82E-04					
	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
$\epsilon_{3,act}$	9,85E-04	9,92E-04	9,92E-04	9,92E-04	7,64E-04					
	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple

Grafica 9

Espesores granulares vs espesor carpeta asfáltica N=200.000 y R= 85%



Se realiza el mismo procedimiento para N= 500.000, 1.500.000, 3.000.000 y 7.500.000 y un R=85% teniendo los siguientes resultados.

ESPESORES MÍNIMOS EN PAVIMENTOS FLEXIBLES PARA BOGOTÁ D.C

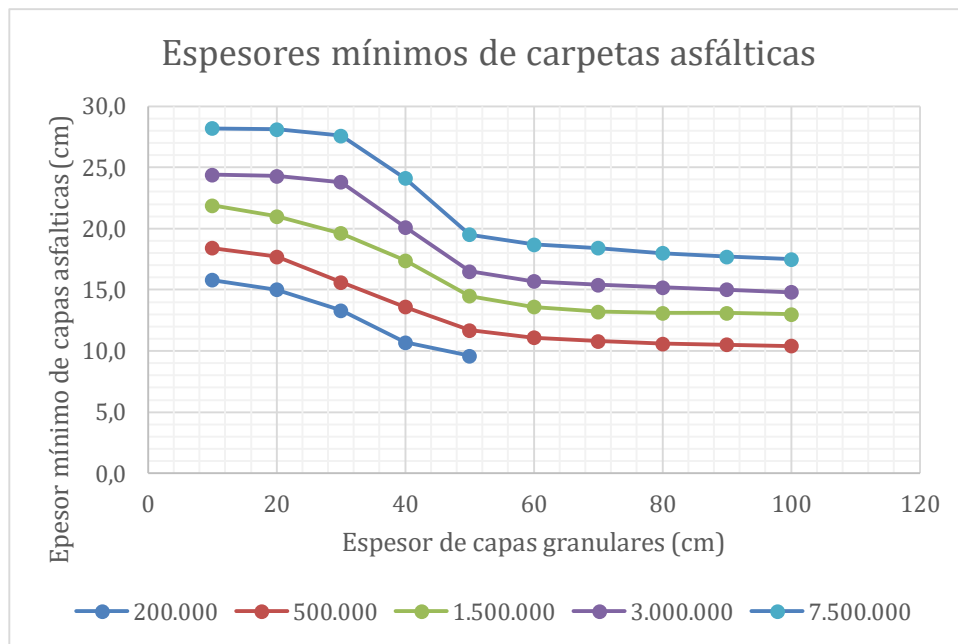
Tabla 18.

Resultados espesores carpetas asfálticas SBR= 22.5MPa y R= 85%

hca (cm)	hgr (cm)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
N	200.000	15,8	15,0	13,3	10,7	9,6					
	500.000	18,4	17,7	15,6	13,6	11,7	11,1	10,8	10,6	10,5	10,4
	1.500.000	21,9	21,0	19,6	17,4	14,5	13,6	13,2	13,1	13,1	13,0
	3.000.000	24,4	24,3	23,8	20,1	16,5	15,7	15,4	15,2	15,0	14,8
	7.500.000	28,2	28,1	27,6	24,1	19,5	18,7	18,4	18,0	17,7	17,5

Grafica 10.

Espesores granulares vs espesor carpeta asfáltica



Subrasante E= 22.5MPa R= 95%

Se realiza el mismo procedimiento, pero con una resistencia de la subrasante de 22.5MPa y un R= 95% en donde tenemos los siguientes resultados:

ESPESORES MÍNIMOS EN PAVIMENTOS FLEXIBLES PARA BOGOTÁ D.C

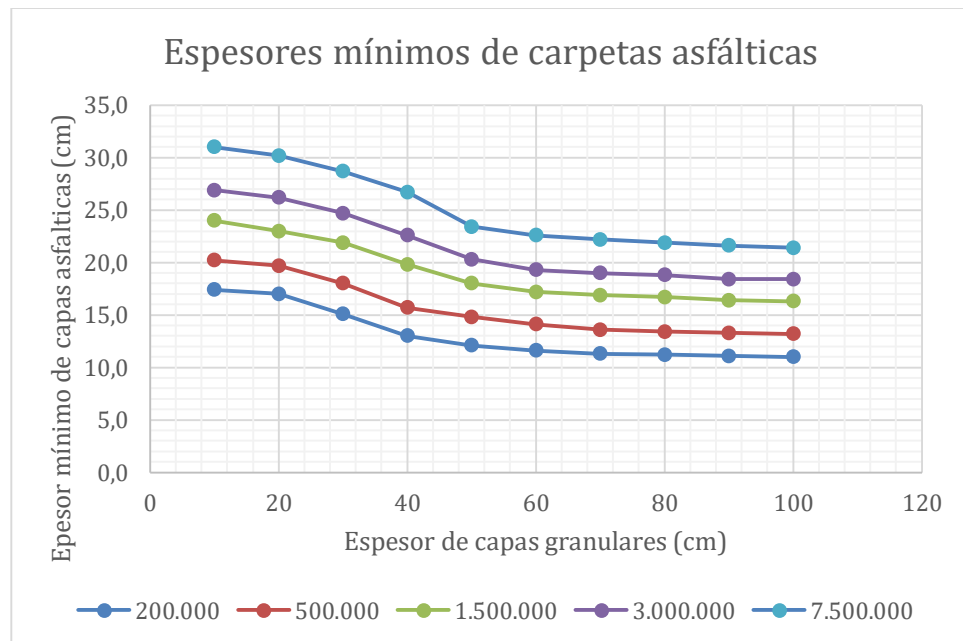
Tabla 19.

Resultados espesores carpetas asfálticas SBR= 22.5MPa y R= 95%

hca (cm)	hgr (cm)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
N	200.000	17,4	17,0	15,1	13,0	12,1	11,6	11,3	11,2	11,1	11,0
	500.000	20,2	19,7	18,0	15,7	14,8	14,1	13,6	13,4	13,3	13,2
	1.500.000	24,0	23,0	21,9	19,8	18,0	17,2	16,9	16,7	16,4	16,3
	3.000.000	26,9	26,2	24,7	22,6	20,3	19,3	19,0	18,8	18,4	18,4
	7.500.000	31,0	30,2	28,7	26,7	23,4	22,6	22,2	21,9	21,6	21,4

Grafica 11.

Espesores granulares vs espesor carpeta asfáltica



Subrasante E= 40MPa R= 85%

Se realiza el mismo procedimiento, pero con una resistencia de la subrasante de 40MPa y un R= 85% en donde tenemos los siguientes resultados:

ESPESORES MÍNIMOS EN PAVIMENTOS FLEXIBLES PARA BOGOTÁ D.C

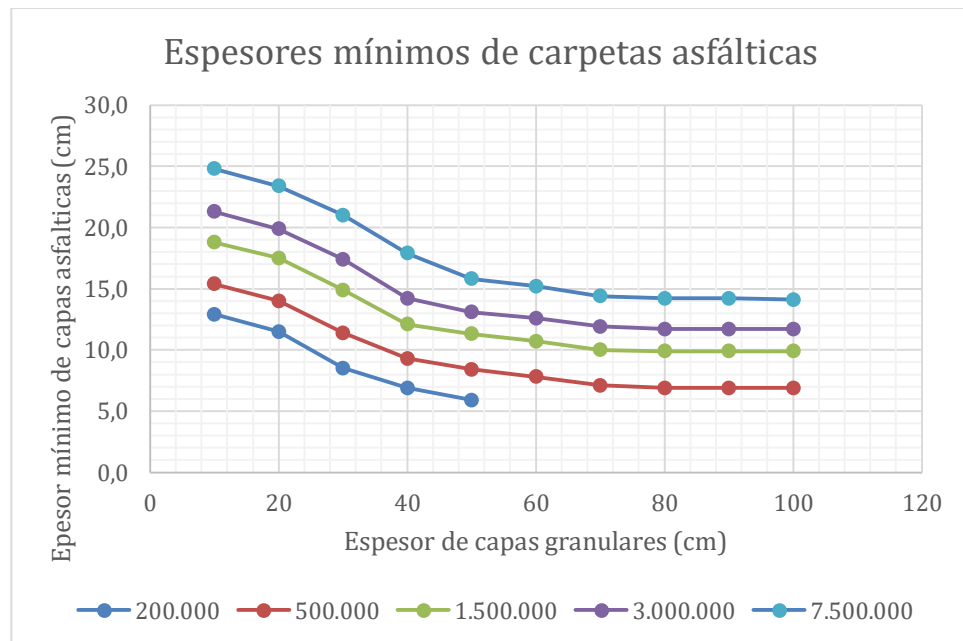
Tabla 20.

Resultados espesores carpetas asfálticas SBR= 40MPa y R= 85%

hca (cm)	hgr (cm)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
N	200.000	12,9	11,5	8,5	6,9	5,9					
	500.000	15,4	14,0	11,4	9,3	8,4	7,8	7,1	6,9	6,9	6,9
	1.500.000	18,8	17,5	14,9	12,1	11,3	10,7	10,0	9,9	9,9	9,9
	3.000.000	21,3	19,9	17,4	14,2	13,1	12,6	11,9	11,7	11,7	11,7
	7.500.000	24,8	23,4	21,0	17,9	15,8	15,2	14,4	14,2	14,2	14,1

Grafica 12.

Espesores granulares vs espesor carpeta asfáltica



Subrasante E= 40MPa R= 95%

Se realiza el mismo procedimiento, pero con una resistencia de la subrasante de 40MPa y un R= 95% en donde tenemos los siguientes resultados:

ESPESORES MÍNIMOS EN PAVIMENTOS FLEXIBLES PARA BOGOTÁ D.C

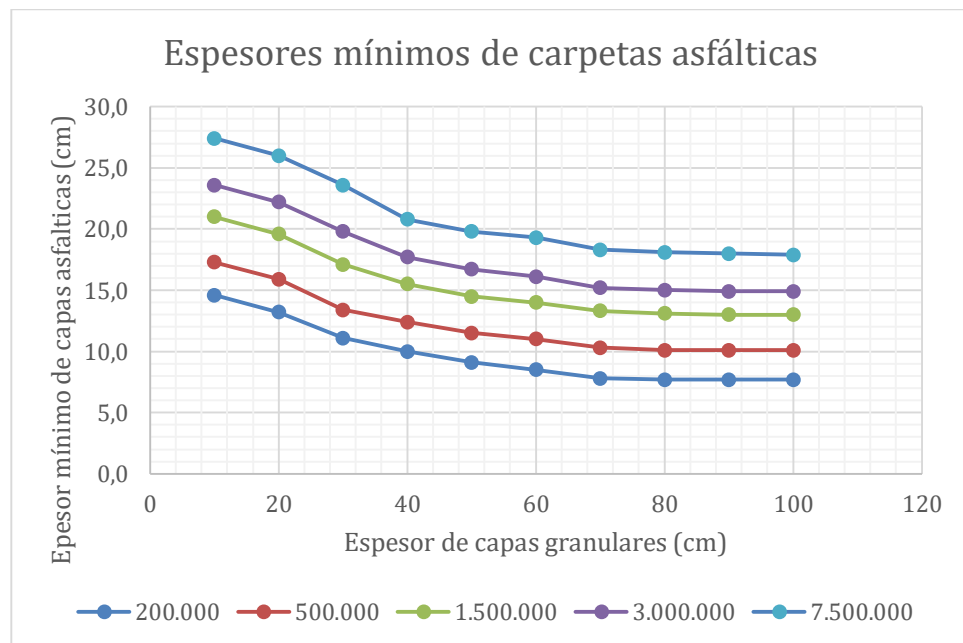
Tabla 21.

Resultados espesores carpetas asfálticas SBR= 40MPa y R= 95%

hca (cm)	hgr (cm)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
N	200.000	14,6	13,2	11,1	10,0	9,1	8,5	7,8	7,7	7,7	7,7
	500.000	17,3	15,9	13,4	12,4	11,5	11,0	10,3	10,1	10,1	10,1
	1.500.000	21,0	19,6	17,1	15,5	14,5	14,0	13,3	13,1	13,0	13,0
	3.000.000	23,6	22,2	19,8	17,7	16,7	16,1	15,2	15,0	14,9	14,9
	7.500.000	27,4	26,0	23,6	20,8	19,8	19,3	18,3	18,1	18,0	17,9

Grafica 13.

Espesores granulares vs espesor carpeta asfáltica



Subrasante E= 50MPa R= 85%

Se realiza el mismo procedimiento, pero con una resistencia de la subrasante de 50MPa y un R= 85% en donde tenemos los siguientes resultados:

ESPESORES MÍNIMOS EN PAVIMENTOS FLEXIBLES PARA BOGOTÁ D.C

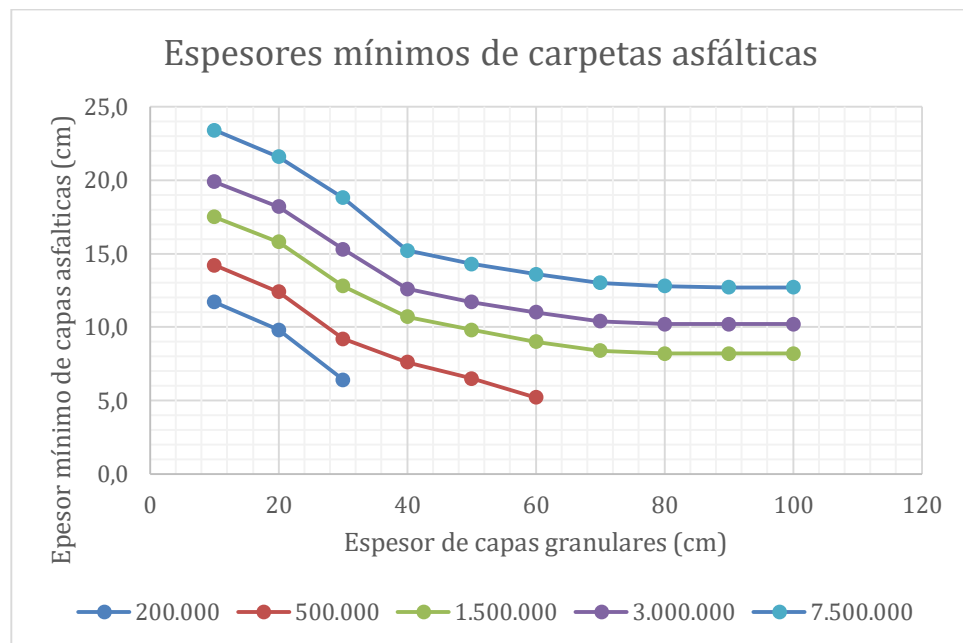
Tabla 22.

Resultados espesores carpetas asfálticas SBR= 50MPa y R= 85%

hca (cm)	hgr (cm)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
N	200.000	11,7	9,8	6,4							
	500.000	14,2	12,4	9,2	7,6	6,5	5,2				
	1.500.000	17,5	15,8	12,8	10,7	9,8	9,0	8,4	8,2	8,2	8,2
	3.000.000	19,9	18,2	15,3	12,6	11,7	11,0	10,4	10,2	10,2	10,2
	7.500.000	23,4	21,6	18,8	15,2	14,3	13,6	13,0	12,8	12,7	12,7

Grafica 14.

Espesores granulares vs espesor carpeta asfáltica



Subrasante E= 50MPa R= 95%

Se realiza el mismo procedimiento, pero con una resistencia de la subrasante de 50MPa y un R= 95% en donde tenemos los siguientes resultados:

ESPESORES MÍNIMOS EN PAVIMENTOS FLEXIBLES PARA BOGOTÁ D.C

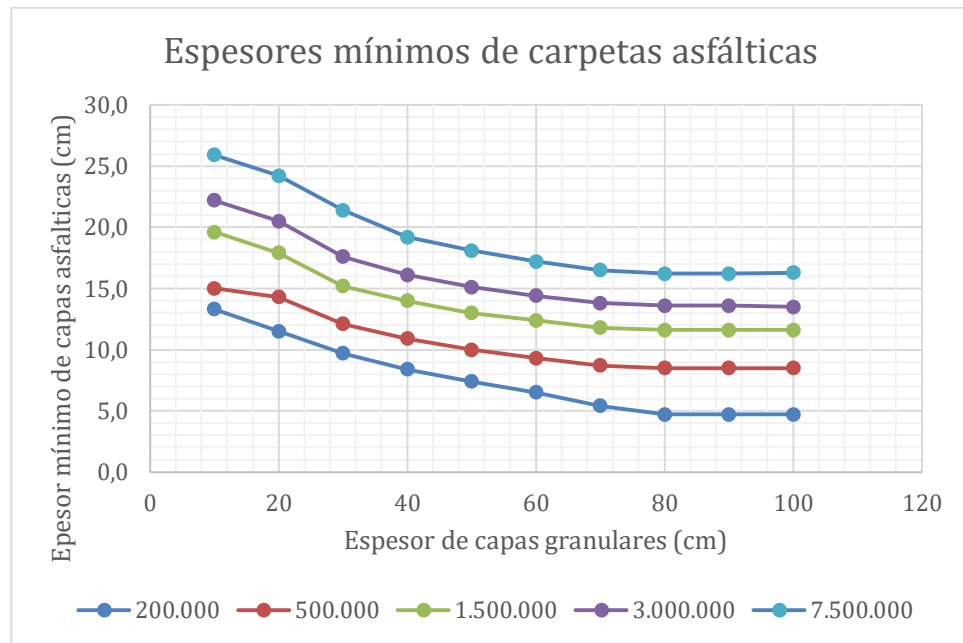
Tabla 23.

Resultados espesores carpetas asfálticas SBR= 50MPa y R= 95%

hca (cm)	hgr (cm)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
N	200.000	13,3	11,5	9,7	8,4	7,4	6,5	5,4	4,7	4,7	4,7
	500.000	15,0	14,3	12,1	10,9	10,0	9,3	8,7	8,5	8,5	8,5
	1.500.000	19,6	17,9	15,2	14,0	13,0	12,4	11,8	11,6	11,6	11,6
	3.000.000	22,2	20,5	17,6	16,1	15,1	14,4	13,8	13,6	13,6	13,5
	7.500.000	25,9	24,2	21,4	19,2	18,1	17,2	16,5	16,2	16,2	16,3

Grafica 15.

Espesores granulares vs espesor carpeta asfáltica



Subrasante E= 60MPa R= 85%

Se realiza el mismo procedimiento, pero con una resistencia de la subrasante de 60MPa y un R= 85% en donde tenemos los siguientes resultados:

ESPESORES MÍNIMOS EN PAVIMENTOS FLEXIBLES PARA BOGOTÁ D.C

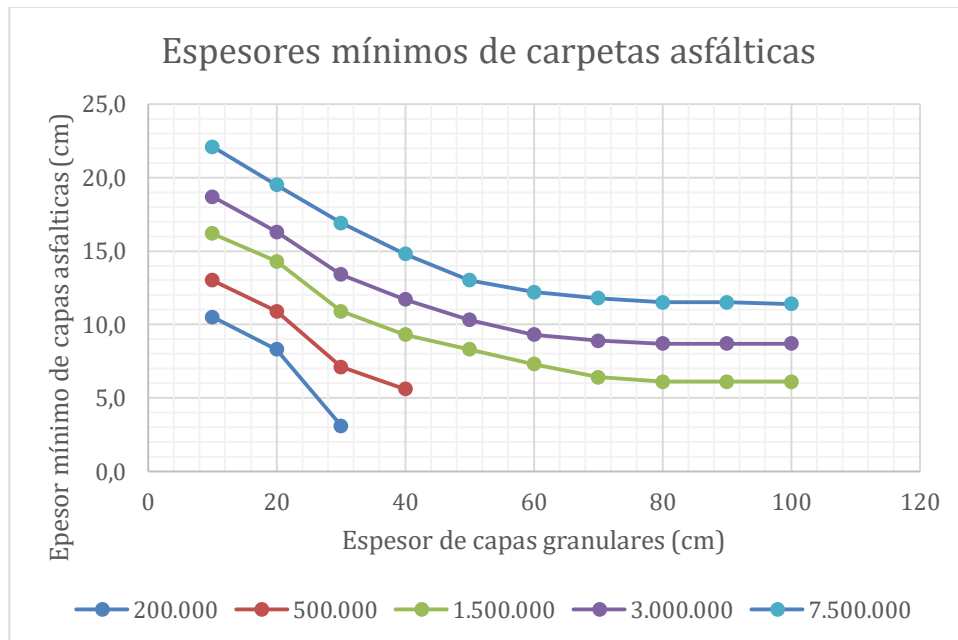
Tabla 24.

Resultados espesores carpetas asfálticas SBR= 60MPa y R= 85%

hca (cm)	hgr (cm)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
N	200.000	10,5	8,3	3,1							
	500.000	13,0	10,9	7,1	5,6						
	1.500.000	16,2	14,3	10,9	9,3	8,3	7,3	6,4	6,1	6,1	6,1
	3.000.000	18,7	16,3	13,4	11,7	10,3	9,3	8,9	8,7	8,7	8,7
	7.500.000	22,1	19,5	16,9	14,8	13,0	12,2	11,8	11,5	11,5	11,4

Grafica 16.

Espesores granulares vs espesor carpeta asfáltica



Subrasante E= 60MPa R= 95%

Se realiza el mismo procedimiento, pero con una resistencia de la subrasante de 60MPa y un R= 95% en donde tenemos los siguientes resultados:

ESPESORES MÍNIMOS EN PAVIMENTOS FLEXIBLES PARA BOGOTÁ D.C

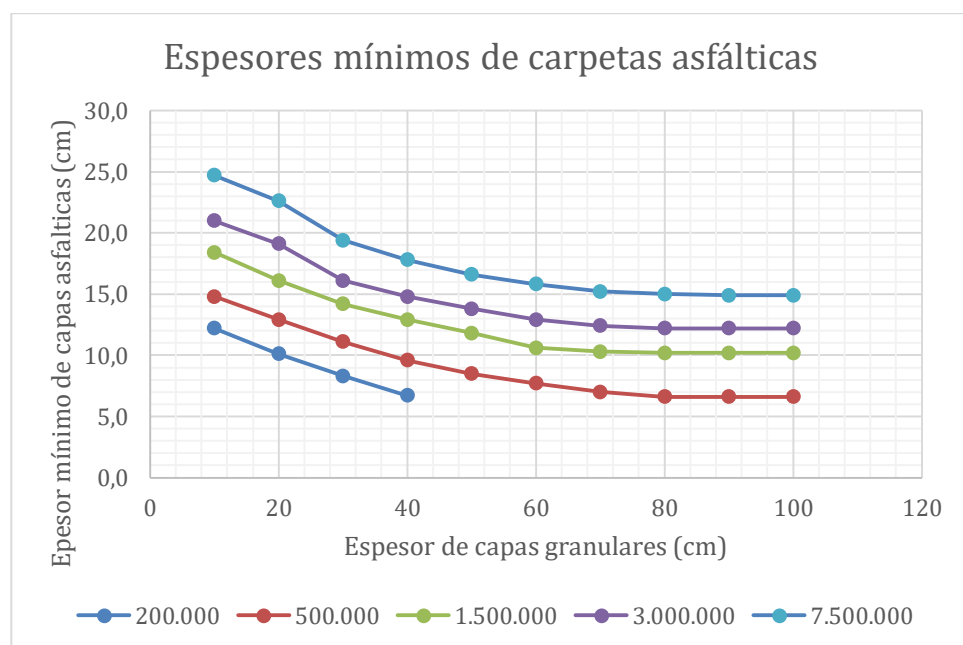
Tabla 25.

Resultados espesores carpetas asfálticas SBR= 60MPa y R= 95%

hca (cm)	hgr (cm)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
N	200.000	12,2	10,1	8,3	6,7						
	500.000	14,8	12,9	11,1	9,6	8,5	7,7	7,0	6,6	6,6	6,6
	1.500.000	18,4	16,1	14,2	12,9	11,8	10,6	10,3	10,2	10,2	10,2
	3.000.000	21,0	19,1	16,1	14,8	13,8	12,9	12,4	12,2	12,2	12,2
	7.500.000	24,7	22,6	19,4	17,8	16,6	15,8	15,2	15,0	14,9	14,9

Gráfica 17.

Espesores granulares vs espesor carpeta asfáltica



Metodología AASHTO - MEPDG

Mediante este método es posible analizar el daño que tiene cada eje sin necesidad de calcular dicho daño solo con ejes de 80KN, si no se podrá analizar el daño de cada eje individual real dependiendo del tipo de vehículo.

Parámetros que se utilizarán para el cálculo de espesores de carpeta asfáltica para la metodología AASHTO-MEPDG:

ESPESORES MÍNIMOS EN PAVIMENTOS FLEXIBLES PARA BOGOTÁ D.C

1. Para este método se van a tener en cuenta los tránsitos de 200.000, 500.000, 1.500.000, 3.000.000 y 7.500.000 ejes equivalentes
2. Para este método se van a utilizar diferentes resistencias de subrasantes las cuales van a ser de 22,5MPa, 40MPa, 50MPa y 60MPa
3. R = confiabilidad del 70%, 80% y 90% dependiendo del N
4. Z_r = Depende de R
5. S_o = 0,45
6. P_o = 4,2
7. P_t =2,0
8. ΔPSI = 2,2
9. k_f1 = 0,007566
10. V_a = 5
11. V_b = 12
12. M = 0,076870588
13. C = 1,193632371
14. CH = 264,73
15. b_f1 = 1,00
16. k_f2 = -3,9492
17. b_f2 = 1,00
18. E_{CA} = 354.797Psi
19. k_f3 = -1,281
20. b_f3 = 1,00
21. T° = 14°C

ESPESORES MÍNIMOS EN PAVIMENTOS FLEXIBLES PARA BOGOTÁ D.C

22. $\phi (^{\circ}) = 30^{\circ}$

23. $K_0 = 0,500$

24. carpeta asfáltica= 0.35

25. Granulares= 0.40

26. SBG= 0.45

27. SBR= 0.5

28. CBR de BG= 80 si $N < 500.000$ y 100 si $N > 500.001$

29. CBR de SBG= 30 si $N < 500.000$, 40 si $500.001 < N < 3.000.000$ y 60 si $N > 3.000.001$

30. $SN = 3,10$

31. $E(Psi)$ de CA= depende del a_i

32. a_i = depende de la temperatura.

33. m_i = para CA es 1.0 BG es 0.95 y para SBG es 0.90

34. Subrasante $E = 22.5MPa$

Se inicia dimensionando la carpeta asfáltica, la base granular y la subbase granular cumpliendo con el número estructural efectivo (SN_{eff}) el cual tiene que ser mayor al número estructural requerido (SN_{req}).

Tabla 26.

Dimensionamiento inicial

CAPA	CBR(%)	E (Psi)	a_i	m_i	d_i (cm)	d_i (in)	SN_{eff}	SN_{req}	
CA		354.797	0,395	1,00	9	3,54	1,40	1,37	Ok
BG_C	80	27.927	0,130	0,95	15	5,91	2,13	1,75	Ok
SBG_C	30	15.262	0,111	0,90	25	9,84	3,11	3,10	Ok
SBR		3.264							

ESPESORES MÍNIMOS EN PAVIMENTOS FLEXIBLES PARA BOGOTÁ D.C

A continuación, y con las dimensiones dadas en el paso anterior, hayamos las profundidades de análisis.

Prof. análisis
5,02
7,97
11,91
16,83

Con ayuda del programa WinJULEA y con el dimensionamiento inicial se haya σ_x (Psi), σ_y (Psi) y σ_z (Psi).

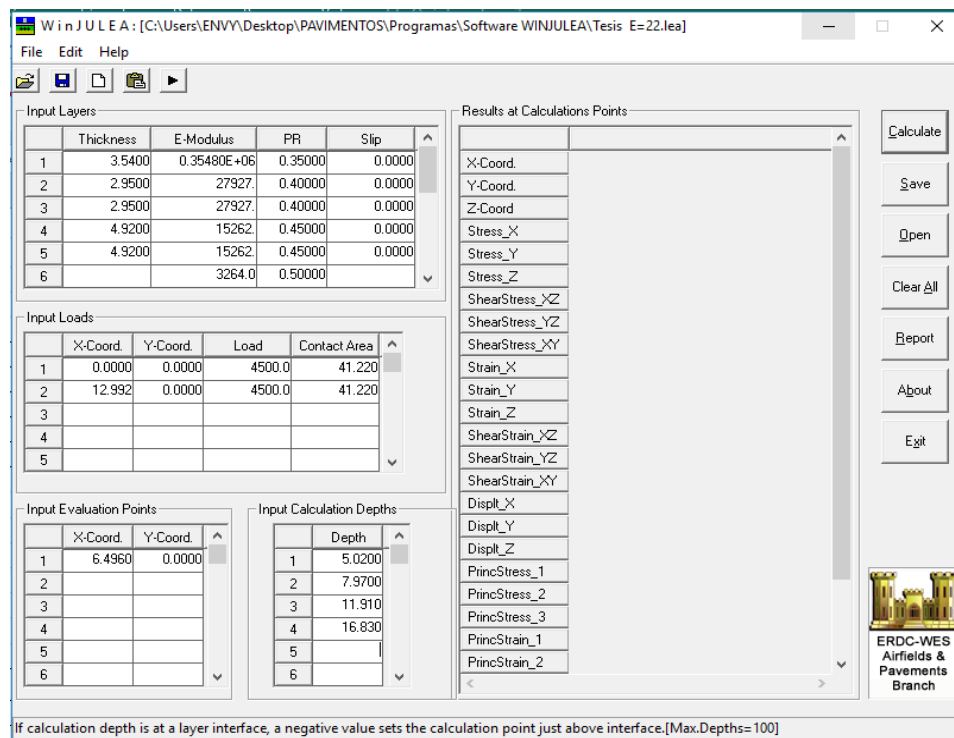


Imagen 5. Ejemplo programa WinJULEA

ESPEORES MÍNIMOS EN PAVIMENTOS FLEXIBLES PARA BOGOTÁ D.C

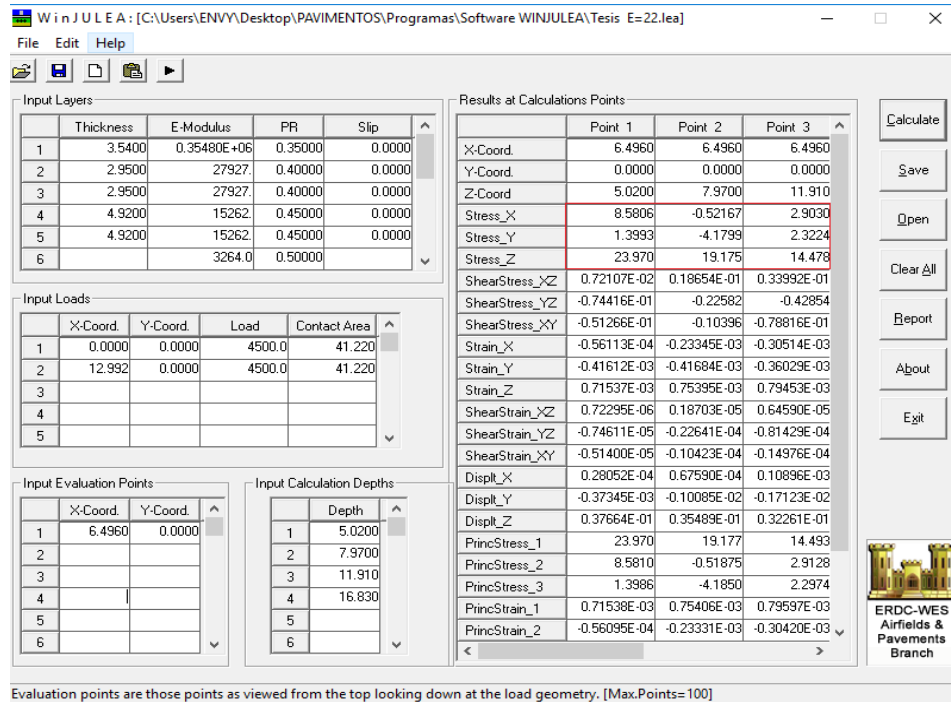


Imagen 6. Ejemplo programa WinJULEA

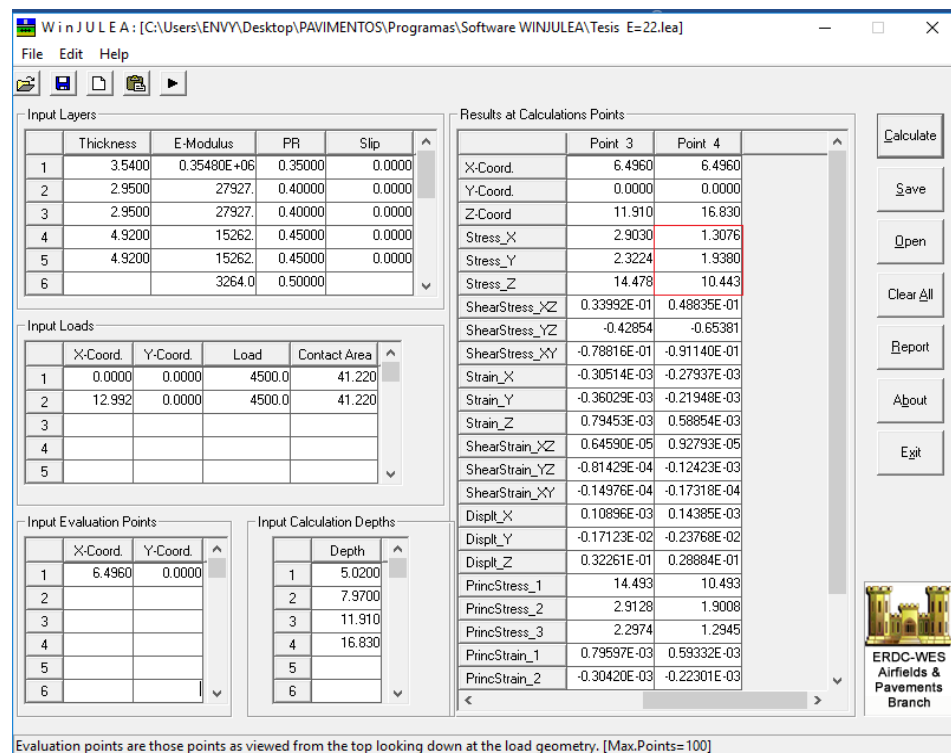


Imagen 7. Ejemplo programa WinJULEA

ESPESORES MÍNIMOS EN PAVIMENTOS FLEXIBLES PARA BOGOTÁ D.C

Los valores encerrados en rojo corresponden a los valores de σ_x (Psi), σ_y (Psi) y σ_z (Psi), en las profundidades de análisis calculadas anteriormente.

Tabla 27.

Valores de σ_x (Psi), σ_y (Psi) y σ_z (Psi).

	γ (lb/ft ³)	σ_{vb} (Psi)	σ_{vm} (Psi)	h (in)	E (Psi)	μ	Ligada	σ_x (Psi)	σ_y (Psi)	σ_z (Psi)
CA	140,57	0,29		3,54	354.797	0,35	Sí			
BG	127,85	0,22	0,40	2,95	27.927	0,40	Sí	8,5806	1,3993	23,97
BG	127,85	0,22	0,62	2,95	27.927	0,40	Sí	-0,52167	-4,1799	19,175
SBG	120,86	0,34	0,90	4,92	15.262	0,45	Sí	2,903	2,3224	14,478
SBG	120,86	0,34	1,24	4,92	15.262	0,45	Sí	1,3076	1,938	10,443
SBR					3.264	0,50				

Con los valores de σ_x (Psi), σ_y (Psi) y σ_z (Psi), se calculan los valores de σ_{oct} (Psi), τ_{oct} (Psi), θ (Psi) y Mr (Psi).

Tabla 28

. Valores de σ_{oct} (Psi), τ_{oct} (Psi), θ (Psi) y Mr (Psi).

σ_{oct} (Psi)	τ_{oct} (Psi)	θ (Psi)	τ_{oct} (Psi)	Mr (Psi)	Error
11,317	9,415	34,74	9,50	14.716	89,8%
4,824	10,257	15,71	10,40	8.960	211,7%
6,568	5,598	21,50	5,81	11.326	34,8%
4,563	4,166	16,17	4,46	9.409	62,2%

Se repiten los pasos mostrados anteriormente hasta que el error del Mr (Psi) sea menos a 5%, cada repetición se realiza con el programa WinJULEA cambiando en cada repetición el Mr (Psi) resultado del ejercicio anterior (marcado en rojo).

ESPEORES MÍNIMOS EN PAVIMENTOS FLEXIBLES PARA BOGOTÁ D.C

Tabla 29.

Segunda iteración $E=22,5\text{MPa}$ $N= 200.000$

	γ (lb/ft ³)	σ_{vb} (Psi)	σ_{vm} (Psi)	h (in)	E (Psi)	μ	Ligada	σ_x (Psi)	σ_y (Psi)	σ_z (Psi)	σ_{oct} (Psi)	τ_{oct} (Psi)	θ (Psi)	τ_{oct} (Psi)	Mr (Psi)	Error
CA	140,57	0,29		3,54	354.797	0,35	Sí									
BG	127,85	0,22	0,40	2,95	14.716	0,40	Sí	3,9065	0,12725	14,3	6,111	5,992	19,13	6,08	10.252	43,5%
BG	127,85	0,22	0,62	2,95	8.960	0,40	Sí	3,4517	1,8719	12,145	5,823	4,517	18,70	4,66	10.155	-11,8%
SBG	120,86	0,34	0,90	4,92	11.326	0,45	Sí	1,3716	0,48672	9,3256	3,728	3,975	12,98	4,19	8.123	39,4%
SBG	120,86	0,34	1,24	4,92	9.409	0,45	Sí	0,92634	0,53372	6,767	2,742	2,850	10,71	3,14	7.175	31,1%
SBR					3.264	0,50										

Tabla 30.

Tercer iteración $E=22,5\text{MPa}$ $N= 200.000$

	γ (lb/ft ³)	σ_{vb} (Psi)	σ_{vm} (Psi)	h (in)	E (Psi)	μ	Ligada	σ_x (Psi)	σ_y (Psi)	σ_z (Psi)	σ_{oct} (Psi)	τ_{oct} (Psi)	θ (Psi)	τ_{oct} (Psi)	Mr (Psi)	Error
CA	140,57	0,29		3,54	354.797	0,35	Sí									
BG	127,85	0,22	0,40	2,95	10.252	0,40	Sí	5,4226	2,2689	14,545	7,412	5,205	23,03	5,30	11.536	-11,1%
BG	127,85	0,22	0,62	2,95	10.155	0,40	Sí	1,724	-0,256	12,097	4,522	5,417	14,80	5,56	8.753	16,0%
SBG	120,86	0,34	0,90	4,92	8.123	0,45	Sí	1,5346	0,6523	9,2686	3,819	3,871	13,25	4,08	8.242	-1,4%
SBG	120,86	0,34	1,24	4,92	7.175	0,45	Sí	0,88538	0,48491	6,7172	2,696	2,848	10,57	3,14	7.112	0,9%
SBR					3.264	0,50										

Tabla 31.

cuarta iteración $E=22,5\text{MPa}$ $N= 200.000$

	γ (lb/ft ³)	σ_{vb} (Psi)	σ_{vm} (Psi)	h (in)	E (Psi)	μ	Ligada	σ_x (Psi)	σ_y (Psi)	σ_z (Psi)	σ_{oct} (Psi)	τ_{oct} (Psi)	θ (Psi)	τ_{oct} (Psi)	Mr (Psi)	Error
CA	140,57	0,29		3,54	354.797	0,35	Sí									
BG	127,85	0,22	0,40	2,95	11.536	0,40	Sí	4,4599	0,90048	14,352	6,571	5,691	20,51	5,78	10.716	7,7%
BG	127,85	0,22	0,62	2,95	8.753	0,40	Sí	2,2957	0,45892	12,002	4,919	5,064	15,99	5,21	9.195	-4,8%
SBG	120,86	0,34	0,90	4,92	8.242	0,45	Sí	1,4157	0,53983	9,1893	3,715	3,887	12,94	4,10	8.110	1,6%
SBG	120,86	0,34	1,24	4,92	7.112	0,45	Sí	0,86996	0,47813	6,6596	2,669	2,826	10,49	3,12	7.076	0,5%
SBR					3.264	0,50										

Tabla 32.

Quinta iteración $E=22,5\text{MPa}$ $N= 200.000$

	γ (lb/ft ³)	σ_{vb} (Psi)	σ_{vm} (Psi)	h (in)	E (Psi)	μ	Ligada	σ_x (Psi)	σ_y (Psi)	σ_z (Psi)	σ_{oct} (Psi)	τ_{oct} (Psi)	θ (Psi)	τ_{oct} (Psi)	Mr (Psi)	Error
CA	140,57	0,29		3,54	354.797	0,35	Sí									
BG	127,85	0,22	0,40	2,95	10.716	0,40	Sí	4,9281	1,6104	14,401	6,980	5,420	21,73	5,51	11.120	-3,6%
BG	127,85	0,22	0,62	2,95	9.195	0,40	Sí	2,0892	0,21258	12,024	4,775	5,183	15,56	5,33	9.037	1,8%
SBG	120,86	0,34	0,90	4,92	8.110	0,45	Sí	1,4749	0,60101	9,2152	3,764	3,871	13,09	4,08	8.172	-0,8%
SBG	120,86	0,34	1,24	4,92	7.076	0,45	Sí	0,87907	0,48476	6,6817	2,682	2,833	10,53	3,13	7.093	-0,2%
SBR					3.264	0,50										

ESPESORES MÍNIMOS EN PAVIMENTOS FLEXIBLES PARA BOGOTÁ D.C

Con el $M_r(\text{Psi})$ calculado con un error menor al 5%, se procede a calcular el número de repeticiones que tendría el dimensionamiento inicial de la carpeta asfáltica, pero ya teniendo en cuenta el daño individual que ocasione los siguientes tipos de vehículos con sus respectivas cargas reales:

Tabla 33.

Tipo de vehículos, tipo de ejes y carga de ejes.

Vehículo	Eje	
	Tipo	Carga (kN)
Eje AASHTO	SRD	80
Busetón	SRS	34,34
	SRD	73,58
C2G	SRS	58,86
	SRD	107,91
Padrón	SRS	73,58
	SRD	122,63
C3	SRS	58,86
	TRD	215,82

El primer eje AASHTO es el eje de muestra, ya que el resultado de repeticiones de este nos muestra si concuerda con el número de repeticiones de diseño.

Con ayuda del programa WinJULEA se calcula σ_t para así poder hallar el número de repeticiones que tendría cada tipo de eje y de carga diferentes.

ESPESORES MÍNIMOS EN PAVIMENTOS FLEXIBLES PARA BOGOTÁ D.C

Tabla 34.

Resultados de repeticiones dependiendo el eje para $E = 22.5\text{Mpa}$ y $N = 200.000$

Vehículo	Eje		Input Loads					Input Eva Points		Depths	ϵ_t	Nf	Nf	Nf/3650	Feq	Fcamión
	Tipo	Carga (kN)	X-Coord.	Y-Coord.	Load	Contact Area	Radius	X-Coord.	Y-Coord.							
Eje AASHTO	SRD	80	0	0	4500,0	41,22	3,62	0	0	3,53	-5,87E-04	85.234	85.234	23		
			12,992	0	4500,0	41,22	3,62	6,496	0		-5,18E-04	139.665			1,00	
Busetón	SRS	34,34	0	400	3854,6	35,43	3,36	0	400	3,53	-4,55E-04	233.077			0,60	
	SRD	73,58	0	800	4130,0	37,96	3,48	0	800		-5,44E-04	115.104	77.052	21	1,21	1,81
			12,992	800	4130,0	37,96	3,48	6,496	800		-4,67E-04	210.306				
C2G	SRS	58,86	0	1200	6607,9	60,73	4,40	0	1200	3,53	-4,18E-04	325.813			0,43	
	SRD	107,91	0	1600	6057,3	55,67	4,21	0	1600		-5,14E-04	144.006	99.866	27	0,97	1,40
			12,992	1600	6057,3	55,67	4,21	6,496	1600		-4,94E-04	168.442				
Padrón	SRS	73,58	0	2000	8259,9	75,92	4,92	0	2000	3,53	-6,94E-04	43.997			3,17	
	SRD	122,63	0	2400	6883,3	63,26	4,49	0	2400		-8,53E-04	19.481	13.502	4	7,17	10,34
			12,992	2400	6883,3	63,26	4,49	6,496	2400		-8,20E-04	22.766				
C3	SRS	58,86	0	0	6607,9	60,73	4,40	0	0	3,53	-6,09E-04	73.754			1,89	
	TRD	215,82	0	0	6057,3	55,67	4,21	0	0		-7,01E-04	42.239			3,31	
			12,992	0	6057,3	55,67	4,21	6,496	0		-6,68E-04	51.188	26.858	7		5,20
			0	53,15	6057,3	55,67	4,21	0	26,57		-1,54E-04	16.766.680				
			12,992	53,15	6057,3	55,67	4,21	6,496	26,57		-1,70E-04	11.483.353				

El número de ejes equivalentes en el eje de muestra AASHTO es de 85.234 como muestra la tabla 37, pero el número de ejes equivalentes de diseño es de 200.000, por lo que a continuación se repite todo el procedimiento anteriormente mostrado, desde el dimensionamiento inicial hasta llegar a un espesor de carpeta asfáltica que cumpla con la cantidad de ejes equivalentes de diseño.

Tabla 35.

Dimensionamiento inicial segundo

CAPA	CBR(%)	E (Psi)	ai	mi	di (cm)	di (in)	SNeff	SNreq	
CA		354.797	0,395	1,00	12	4,72	1,87	1,37	Ok
BG_C	80	27.927	0,130	0,95	15	5,91	2,60	1,75	Ok
SBG_C	30	15.262	0,111	0,90	25	9,84	3,58	3,10	Ok
SBR		3.264							

ESPEORES MÍNIMOS EN PAVIMENTOS FLEXIBLES PARA BOGOTÁ D.C

Tabla 36.

Primera iteración $E=22,5\text{MPa}$ $N= 200.000$

	γ (lb/ft ³)	σ_{vb} (Psi)	σ_{vm} (Psi)	h (in)	E (Psi)	μ	Ligada	σ_x (Psi)	σ_y (Psi)	σ_z (Psi)	σ_{oct} (Psi)	τ_{oct} (Psi)	θ (Psi)	τ_{oct} (Psi)	Mr (Psi)	Error
CA	140,57	0,38		4,72	354.797	0,35	Sí									
BG	127,85	0,22	0,49	2,95	27.927	0,40	Sí	3,5902	-0,42808	13,726	5,629	5,956	17,88	6,07	9.829	184,1%
BG	127,85	0,22	0,71	2,95	27.927	0,40	Sí	-1,0068	-3,4396	10,984	2,179	6,305	7,96	6,47	5.936	370,4%
SBG	120,86	0,34	0,99	4,92	15.262	0,45	Sí	1,504	0,72751	8,3861	3,539	3,442	12,60	3,68	7.985	91,1%
SBG	120,86	0,34	1,34	4,92	15.262	0,45	Sí	0,72513	0,37329	6,1033	2,401	2,622	9,88	2,94	6.801	124,4%
SBR					3.264	0,50										

Tabla 37.

Segunda iteración $E=22,5\text{MPa}$ $N= 200.000$

	γ (lb/ft ³)	σ_{vb} (Psi)	σ_{vm} (Psi)	h (in)	E (Psi)	μ	Ligada	σ_x (Psi)	σ_y (Psi)	σ_z (Psi)	σ_{oct} (Psi)	τ_{oct} (Psi)	θ (Psi)	τ_{oct} (Psi)	Mr (Psi)	Error
CA	140,57	0,38		4,72	354.797	0,35	Sí									
BG	127,85	0,22	0,49	2,95	9.829	0,40	Sí	2,2848	0,39142	9,9906	4,222	4,151	13,65	4,27	8.361	17,6%
BG	127,85	0,22	0,71	2,95	5.936	0,40	Sí	2,5085	1,7531	8,5987	4,287	3,065	14,28	3,23	8.630	-31,2%
SBG	120,86	0,34	0,99	4,92	7.985	0,45	Sí	1,1348	0,68751	6,8335	2,885	2,798	10,64	3,03	7.149	11,7%
SBG	120,86	0,34	1,34	4,92	6.801	0,45	Sí	0,8117	0,59949	5,1853	2,199	2,114	9,27	2,43	6.536	4,1%
SBR					3.264	0,50										

Tabla 38.

Tercera iteración $E=22,5\text{MPa}$ $N= 200.000$

	γ (lb/ft ³)	σ_{vb} (Psi)	σ_{vm} (Psi)	h (in)	E (Psi)	μ	Ligada	σ_x (Psi)	σ_y (Psi)	σ_z (Psi)	σ_{oct} (Psi)	τ_{oct} (Psi)	θ (Psi)	τ_{oct} (Psi)	Mr (Psi)	Error
CA	140,57	0,38		4,72	354.797	0,35	Sí									
BG	127,85	0,22	0,49	2,95	8.361	0,40	Sí	3,3183	1,7506	10,106	5,058	3,626	16,16	3,74	9.303	-10,1%
BG	127,85	0,22	0,71	2,95	8.630	0,40	Sí	1,1808	0,21649	8,5346	3,311	3,715	11,36	3,88	7.466	15,6%
SBG	120,86	0,34	0,99	4,92	7.149	0,45	Sí	1,2383	0,79371	6,764	2,932	2,716	10,78	2,95	7.216	-0,9%
SBG	120,86	0,34	1,34	4,92	6.536	0,45	Sí	0,76852	0,5533	5,1248	2,149	2,106	9,12	2,42	6.465	1,1%
SBR					3.264	0,50										

Tabla 39.

Cuarta iteración $E=22,5\text{MPa}$ $N= 200.000$

	γ (lb/ft ³)	σ_{vb} (Psi)	σ_{vm} (Psi)	h (in)	E (Psi)	μ	Ligada	σ_x (Psi)	σ_y (Psi)	σ_z (Psi)	σ_{oct} (Psi)	τ_{oct} (Psi)	θ (Psi)	τ_{oct} (Psi)	Mr (Psi)	Error
CA	140,57	0,38		4,72	354.797	0,35	Sí									
BG	127,85	0,22	0,49	2,95	9.303	0,40	Sí	2,6719	0,91365	9,9854	4,524	3,928	14,56	4,04	8.708	6,8%
BG	127,85	0,22	0,71	2,95	7.466	0,40	Sí	1,5747	0,67899	8,4648	3,573	3,478	12,14	3,65	7.790	-4,2%
SBG	120,86	0,34	0,99	4,92	7.216	0,45	Sí	1,1534	0,71149	6,7035	2,856	2,726	10,56	2,96	7.112	1,5%
SBG	120,86	0,34	1,34	4,92	6.465	0,45	Sí	0,75599	0,54611	5,0789	2,127	2,089	9,06	2,40	6.434	0,5%
SBR					3.264	0,50										

ESPEORES MÍNIMOS EN PAVIMENTOS FLEXIBLES PARA BOGOTÁ D.C

Tabla 40.

Quinta iteración $E=22,5\text{MPa}$ $N= 200.000$

	γ (lb/ft ³)	σ_{vb} (Psi)	σ_{vm} (Psi)	h (in)	E (Psi)	μ	Ligada	σ_x (Psi)	σ_y (Psi)	σ_z (Psi)	σ_{oct} (Psi)	τ_{oct} (Psi)	θ (Psi)	τ_{oct} (Psi)	Mr (Psi)	Error
CA	140,57	0,38		4,72	354.797	0,35	Sí									
BG	127,85	0,22	0,49	2,95	8.708	0,40	Sí	2,97	1,3241	9,9889	4,761	3,757	15,27	3,87	8.976	-3,0%
BG	127,85	0,22	0,71	2,95	7.790	0,40	Sí	1,444	0,53363	8,4637	3,480	3,543	11,87	3,71	7.677	1,5%
SBG	120,86	0,34	0,99	4,92	7.112	0,45	Sí	1,1941	0,75648	6,7114	2,887	2,710	10,65	2,94	7.155	-0,6%
SBG	120,86	0,34	1,34	4,92	6.434	0,45	Sí	0,76347	0,55206	5,0886	2,135	2,090	9,08	2,41	6.445	-0,2%
SBR					3.264	0,50										

Tabla 41.

Resultados de repeticiones dependiendo el eje para $E= 22.5\text{Mpa}$ y $N= 200.000$

Vehículo	Eje		Input Loads					Input Eva Points		Depths	ε_t	Nf	Nf	Nf/3650	Feq
	Tipo	Carga (kN)	X-Coord.	Y-Coord.	Load	Contact Area	Radius	X-Coord.	Y-Coord.						
Eje AASHTO	SRD	80	0	0	4500,0	41,22	3,62	0	0	4,71	-4,56E-04	231.065	231.065	63	
			12,992	0	4500,0	41,22	3,62	6,496	0		-4,28E-04	296.223			1,00
Busetón	SRS	34,34	0	400	3854,6	35,43	3,36	0	400	4,71	-3,58E-04	600.790	200.493	55	0,49
	SRD	73,58	0	800	4130,0	37,96	3,48	0	800		-4,27E-04	300.913			0,98
			12,992	800	4130,0	37,96	3,48	6,496	800		-3,95E-04	407.007			
C2G	SRS	58,86	0	1200	6607,9	60,73	4,40	0	1200	4,71	-5,20E-04	137.346	56.524	15	2,16
	SRD	107,91	0	1600	6057,3	55,67	4,21	0	1600		-5,70E-04	96.055			3,08
			12,992	1600	6057,3	55,67	4,21	6,496	1600		-5,63E-04	100.863			
Padrón	SRS	73,58	0	2000	8259,9	75,92	4,92	0	2000	4,71	-5,91E-04	83.145	36.198	10	3,56
	SRD	122,63	0	2400	6883,3	63,26	4,49	0	2400		-6,25E-04	66.532			4,45
			12,992	2400	6883,3	63,26	4,49	6,496	2400		-6,31E-04	64.108			
C3	SRS	58,86	0	0	6607,9	60,73	4,40	0	0	4,71	-5,20E-04	137.346	61.077	17	2,16
	TRD	215,82	0	0	6057,3	55,67	4,21	0	0		-5,50E-04	109.987			2,69
			12,992	0	6057,3	55,67	4,21	6,496	0		-5,43E-04	116.281			
			0	53,15	6057,3	55,67	4,21	0	26,57		-1,67E-04	12.148.218			
			12,992	53,15	6057,3	55,67	4,21	6,496	26,57		-1,83E-04	8.541.239			

Como se puede ver en la tabla 41, en número de ejes equivalentes es de 231.065, por lo que cumple con el número de ejes equivalentes de diseño de 200.000.

Repetimos todos estos pasos para los diferentes $N= 200.000$, 500.000 , $1.500.000$, $3.000.000$ y $7.500.000$ con sus $E= 22.5\text{Mpa}$, 40Mpa , 50Mpa y 60Mpa .

ESPEORES MÍNIMOS EN PAVIMENTOS FLEXIBLES PARA BOGOTÁ D.C

Tabla 42.

Tabla resumen resultados $E=22,5\text{Mpa}$

N	Estructura (CA/BG/SBG)		SRD	Busetón	C2G	Padrón	C3
200.000	9/15/25	Nf	85.234	77.052	99.866	13.502	26.858
		FECE	1,00	1,81	1,40	10,34	5,20
200.000	12/15/25	Nf	231.065	200.493	56.524	36.198	61.077
		FECE	1,00	1,48	5,24	8,02	4,85
500.000	11/15/30	Nf	164.462	153.084	118.136	29.384	51.733
		FECE	1,00	1,17	1,52	6,11	3,47
500.000	15/15/30	Nf	589.007	462.949	145.859	90.974	152.825
		FECE	1,00	1,40	4,35	7,13	4,19
1.500.000	14/20/35	Nf	428.435	156.069	120.537	73.989	141.090
		FECE	1,00	3,14	4,06	6,62	3,47
1.500.000	18/20/35	Nf	1.556.884	1.049.670	277.954	190.694	408.195
		FECE	1,00	1,48	5,60	8,16	3,81
3.000.000	16/20/35	Nf	799.614	870.409	215.254	129.973	272.750
		FECE	1,00	0,98	3,94	6,53	3,11
3.000.000	21/20/35	Nf	3.099.091	2.375.095	576.679	384.572	859.237
		FECE	1,00	1,30	5,37	8,06	3,57
7.500.000	18/25/40	Nf	0	1.631.807	376.096	224.448	297.109
		FECE	1,00	0,88	3,82	6,41	4,84
7.500.000	25/25/40	Nf	0	9.329.856	1.681.308	1.179.455	2.744.093
		FECE	1,00	0,77	4,80	6,85	2,82

Tabla 43.

Tabla resumen resultados $E=40\text{Mpa}$

N	Estructura (CA/BG/SBG)		SRD	Busetón	C2G	Padrón	C3
200.000	13/15/30	Nf	83.535	82.869	18.918	11.295	27.959
		FECE	1,00	1,41	6,00	10,02	4,85
200.000	12/15/30	Nf	234.294	201.435	56.524	36.198	61.077
		FECE	1,00	1,49	5,30	8,21	4,91
500.000	11/15/35	Nf	161.875	156.665	47.605	31.137	51.118
		FECE	1,00	1,41	4,65	7,03	4,33
500.000	15/15/35	Nf	500.316	462.949	145.859	91.226	152.077
		FECE	1,00	1,10	3,43	5,29	3,28
1.500.000	14/25/45	Nf	428.435	509.549	120.201	72.903	140.538
		FECE	1,00	0,66	4,03	6,36	3,48
1.500.000	18/25/45	Nf	1.503.421	1.041.984	280.703	190.694	408.195
		FECE	1,00	1,44	5,09	7,30	3,53
3.000.000	16/20/40	Nf	809.168	861.447	215.254	129.973	268.335
		FECE	1,00	1,00	3,80	6,13	3,11
3.000.000	21/20/40	Nf	3.052.404	2.375.095	576.679	384.572	859.237
		FECE	1,00	1,29	4,90	7,24	3,56
7.500.000	18/25/50	Nf	1.458.265	1.652.080	379.158	228.271	498.660
		FECE	1,00	0,88	3,58	5,80	2,75
7.500.000	25/25/50	Nf	7.581.721	9.329.856	1.681.308	1.179.455	2.744.093
		FECE	1,00	0,72	4,04	5,64	2,76

ESPEORES MÍNIMOS EN PAVIMENTOS FLEXIBLES PARA BOGOTÁ D.C

Tabla 44.

Tabla resumen resultados $E=50\text{Mpa}$

N	Estructura (CA/BG/SBG)		SRD	Busetón	C2G	Padrón	C3
200.000	9/15/25	Nf	81.335	73.136	24.673	16.944	25.620
		FECE	1,00	1,81	5,37	7,82	5,17
200.000	12/15/25	Nf	233.888	200.493	56.524	36.198	60.907
		FECE	1,00	1,50	5,31	8,12	4,93
500.000	11/15/30	Nf	164.462	158.104	48.473	31.764	51.900
		FECE	1,00	1,42	4,64	7,04	4,34
500.000	14/15/30	Nf	504.980	462.949	146.491	90.974	153.308
		FECE	1,00	1,10	3,41	5,27	3,27
1.500.000	14/20/35	Nf	432.801	450.100	121.940	73.823	143.114
		FECE	1,00	1,10	4,04	6,35	2,45
1.500.000	18/20/35	Nf	1.501.331	1.049.670	278.037	189.722	401.678
		FECE	1,00	1,43	5,13	7,29	3,68
3.000.000	16/20/35	Nf	809.168	630.557	217.394	130.734	268.251
		FECE	1,00	1,36	3,79	6,13	3,10
3.000.000	21/20/35	Nf	3.068.209	2.074.138	570.540	384.572	806.947
		FECE	1,00	1,48	4,98	7,30	3,80
7.500.000	18/20/40	Nf	1.458.265	1.652.080	379.158	228.271	498.256
		FECE	1,00	0,88	3,58	5,80	2,75
7.500.000	25/20/40	Nf	8.234.636	9.133.930	1.681.308	1.179.455	2.678.327
		FECE	1,00	0,77	4,39	6,12	3,07

Tabla 45.

Tabla resumen resultados $E=60\text{Mpa}$

N	Estructura (CA/BG/SBG)		SRD	Busetón	C2G	Padrón	C3
200.000	9/15/20	Nf	88.763	78.523	26.894	18.554	27.781
		FECE	1,00	1,86	5,44	7,88	5,26
200.000	12/15/20	Nf	241.137	239.707	69.461	44.260	83.642
		FECE	1,00	1,29	4,44	6,80	3,69
500.000	11/15/25	Nf	168.442	162.056	49.361	32.484	52.944
		FECE	1,00	1,43	4,68	7,06	4,36
500.000	15/15/25	Nf	596.830	492.767	124.714	55.525	167.020
		FECE	1,00	1,33	5,16	11,44	3,87
1.500.000	14/15/30	Nf	441.702	459.399	124.785	75.911	145.106
		FECE	1,00	1,11	4,07	6,40	3,52
1.500.000	18/15/30	Nf	1.554.700	1.159.872	330.394	196.661	442.106
		FECE	1,00	1,34	4,42	7,48	3,33
3.000.000	16/20/35	Nf	818.865	891.804	221.084	143.587	261.516
		FECE	1,00	0,98	3,77	6,06	3,21
3.000.000	21/20/35	Nf	3.172.678	3.011.116	722.855	415.555	1.013.640
		FECE	1,00	1,09	4,31	7,44	3,12
7.500.000	18/15/35	Nf	1.478.577	1.658.434	383.488	229.002	501.128
		FECE	1,00	0,89	3,58	5,86	2,77
7.500.000	25/15/35	Nf	8.164.508	6.562.218	1.308.815	573.927	2.802.495
		FECE	1,00	1,14	5,71	13,38	2,60

ESPESORES MÍNIMOS EN PAVIMENTOS FLEXIBLES PARA BOGOTÁ D.C

Resultados

Después de hallar los espesores mínimos en los diferentes métodos, se tienen los siguientes resultados:

Tabla 46.

Tabla resumen resultados AASHTO 86

ESPESORES MINIMOS AASHTO			
W18	R=90%	R=80%	R=70%
50.000	7,85	7,14	6,69
150.000	9,65	8,87	8,30
200.000	10,10	9,32	8,75
500.000	11,83	11,00	
1.000.000	12,86	11,90	
1.500.000	13,76	12,73	
2.000.000	14,40	13,38	
3.000.000	15,37	14,28	
5.000.000	16,59		
7.500.000	17,68		
10.000.000	18,52		

Tabla 47.

Tabla resumen resultados Instituto de Asfalto

INSTITUTO DEL ASFALTO					
ESPESOR MINIMO DE CARPETA ASFALTICA (CM)					
	N= 200,000	N= 500,000	N= 1,500,000	N= 3,000,000	N= 7,500,000
E= 22,25Mpa	4	11,2	18,1	22,1	28,4
E= 40Mpa	5,9	10,1	16,2	21,4	26,6
E= 50Mpa	3,1	9,6	16,1	21,1	26,3
E= 60Mpa	7,9	9,4	15,9	20,9	26,1

ESPEORES MÍNIMOS EN PAVIMENTOS FLEXIBLES PARA BOGOTÁ D.C

Tabla 48

Tabla resumen resultados SHELL con R= 85%

SHELL R= 85%					
ESPESOR MINIMO DE CARPETA ASFALTICA (CM)					
	N= 200,000	N= 500,000	N= 1,500,000	N= 3,000,000	N= 7,500,000
E= 22,25Mpa	9,6	13,1	14,7	16,6	19,5
E= 40Mpa	7,6	9,7	12,3	13,8	16,2
E= 50Mpa	6,6	8,2	10,9	12,9	14,8
E= 60Mpa	3,1	8,4	10,6	11,1	13,7

Tabla 49

Tabla resumen resultados SHELL con R= 95%

SHELL R= 95%					
ESPESOR MINIMO DE CARPETA ASFALTICA (CM)					
	N= 200,000	N= 500,000	N= 1,500,000	N= 3,000,000	N= 7,500,000
E= 22,25Mpa	12,6	15,4	18,2	21,7	23,8
E= 40Mpa	11,4	14,1	16,1	18,2	21,1
E= 50Mpa	10,1	12,7	15,6	16,8	20
E= 60Mpa	9,9	12	15,3	16,2	19

Tabla 50.

Tabla resumen resultados AASHTO-MEPDG

AASHTO-MEPDG					
ESPESOR MINIMO DE CARPETA ASFALTICA (CM)					
	N= 200,000	N= 500,000	N= 1,500,000	N= 3,000,000	N= 7,500,000
E= 22,25Mpa	12	15	18	21	25
E= 40Mpa	12	15	18	21	25
E= 50Mpa	12	15	18	21	25
E= 60Mpa	12	15	18	21	25

Conclusiones y recomendaciones

Después de realizar los cálculos necesarios para obtener los espesores mínimos, tanto de los métodos usados comúnmente para el dimensionamiento de espesores de carpeta asfáltica como lo son AASHTO 86, Instituto del Asfalto y Shell, los cuales solo usan ejes de 80 kN de carga para realizar los cálculos pertinentes a los espesores de las carpetas asfálticas y el cálculo de los espesores mínimos en el método AASHTO-MEPDG, el cual permite tener en cuenta ejes con configuraciones y cargas diferentes al de referencia de 80 kN se tienen las siguientes conclusiones y recomendaciones:

- Los tres métodos de base los cuales son AASHTO 86, Instituto del Asfalto y Shell con confiabilidad del 95%, dan como resultados espesores mínimos de carpeta asfáltica muy similares entre ellos.
- Los espesores encontrados con los métodos convencionales de diseño y el método AASHTO-MEPDG cuando se tienen subrasantes blandas son similares.
- Cuando se tienen subrasantes regulares, los espesores de las carpetas asfálticas mínimas requeridas para los métodos convencionales son considerablemente menores que los del método AASHTO-MEPDG.
- Cuando se diseña con el método AASHTO-MEPDG se obtienen prácticamente los mismos espesores de carpetas asfálticas para un tránsito dado, sin importar la subrasante. Únicamente cambian los espesores de los materiales granulares en las estructuras diseñadas.
- Es necesario que se restrinja, impida y sancione el tránsito de vehículos pesados tipo tractocamiones por las calles de Bogotá. Los únicos vehículos pesados que deben

ESPESORES MÍNIMOS EN PAVIMENTOS FLEXIBLES PARA BOGOTÁ D.C

permitirse son los buses del SITP y camiones de dos y tres ejes, pero sólo en la malla vial arterial y con restricciones en la complementaria.

- Por otro lado, y viendo los resultados generales de los espesores de las carpetas asfálticas, se recomienda construir un mejoramiento (rajón, geomallas o geoceldas) siempre que se tengan subrasantes blandas, para así disminuir los espesores de carpeta asfáltica y reducir los costos iniciales de construcción y a futuro de mantenimiento y rehabilitación.

Bibliografía

- Arenas Lozano, H. L. (2006). *Teoría de los Pavimentos*. Bogotá D.C: Universidad del Cauca.
- Universidad Nacional De Colombia. (2006). *Manual para la inspección visual de Pavimentos Flexibles*. Bogotá D.C: Universidad Nacional De Colombia
- Ing. Figueroa. (2016). diseño de pavimentos flexibles, *método del instituto de asfalto parámetros de diseño*. octubre 2017, de universidad cesar vallejo Sitio web: <https://es.slideshare.net/AngeloAlvarezSifuentes/diseo-de-pavimentos-flexibles-mtodos-del-instituto-de-asfalto-parmetros-de-diseo>
- Universidad Nacional De Colombia. (2006). *Manual para la inspección visual de Pavimentos Flexibles*. Bogotá D.C: Universidad Nacional De Colombia.
- Carlos Hernando Higuera Sandoval. (2016). *nociones sobre métodos de diseño de estructuras de pavimento para carreteras*. Tunja: universidad tecnológica y pedagógica de Colombia.
- Carlos Hernando Higuera Sandoval. (2012). *nociones sobre evaluación y rehabilitación de estructuras de pavimento*. Tunja: universidad pedagógica y tecnológica de Tunja.
- AASHTO. (1993). Guide for desing of pavement structures. Washington D.C.