



**ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE UNA ESTRUCTURA DE PAVIMENTO
FLEXIBLE EN UNA VÍA DE TRAFICO PESADO, CASO PARTICULAR VÍA
URBANA EN LA CIUDAD DE BOGOTÁ BARRIO SANTA CATALINA**

CASTAÑEDA ORJUELA YIZEL ANDREA

SALAMANCA QUIROGA CRISTIAN FERNANDO

UNIVERSIDAD LA GRAN COLOMBIA

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

BOGOTÁ D.C

2016



**ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE UNA ESTRUCTURA DE PAVIMENTO
FLEXIBLE EN UNA VÍA DE TRAFICO PESADO, CASO PARTICULAR VÍA
URBANA EN LA CIUDAD DE BOGOTÁ BARRIO SANTA CATALINA**

CASTAÑEDA ORJUELA YIZEL ANDREA

SALAMANCA QUIROGA CRISTIAN FERNANDO

Trabajo de grado como opción parcial para optar al título de Ingeniero Civil

ING. MARTIN ERNESTO RIASCOS CAIPE

Asesor Disciplinar

LIC. LAURA MILENA CALA CRISTANCHO

Asesora Metodológica

UNIVERSIDAD LA GRAN COLOMBIA

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

BOGOTÁ D.C

2016



CONTENIDO

1.	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	16
1.1	PREGUNTA.....	17
2	JUSTIFICACIÓN.....	18
3	OBJETIVOS.....	19
3.1	OBJETIVO GENERAL	19
3.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	19
4	ANTECEDENTES.....	20
5	MARCO DE REFERENCIA	22
5.1	MARCO CONCEPTUAL	22
5.1.1	Volumen de tránsito	22
5.1.2	Factor camión	24
5.1.3	Número de ejes equivalentes.....	25
5.1.4	Ensayos para definir resistencia del subsuelo	29
5.1.5	Formula IVANOV.....	35
5.1.6	Parámetros para diseño con el método SHELL	36
5.1.7	Parámetros para diseño con el método AASHTO	43
5.1.8	Esfuerzos, deformaciones y deflexiones admisibles para estructuras de pavimento flexible.	52
5.2	MARCO GEOGRÁFICO	55
5.2.1	Marco Demográfico	57



5.3	MARCO LEGAL	59
6	DISEÑO METODOLÓGICO	60
6.1	ENFOQUE DE INVESTIGACIÓN	60
6.2	TIPO DE INVESTIGACIÓN	60
6.3	DISEÑO MUESTRAL.....	60
6.3.1	Población	60
6.3.2	Muestra y tipo de muestreo	60
6.4	FASES DE LA INVESTIGACIÓN.....	61
6.5	INSTRUMENTOS Y TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN 61	
6.6	ensayos in situ y laboratorio	62
7	DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	64
7.1	CARACTERIZACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL SUELO 64	
7.1.1	Ensayo CBR.....	64
7.1.2	Mejoramiento de la subrasante	66
7.2	CARGA VEHICULAR.....	67
7.2.1	Cálculo de Tránsito	67
7.2.2	Aforos vehiculares.....	67
7.2.3	Cálculo factor camión.....	69
7.2.4	Número de ejes equivalentes	70



7.3	EVALUACIÓN DEL DISEÑO DE LA ESTRUCTURA DE PAVIMENTO BAJO EL MÉTO SHELL Y AASTHO	72
7.3.1	Método de Shell	72
7.3.2	Aplicación del método Shell	73
7.3.3	Determinación del stiffness de la mezcla asfáltica.	78
7.3.4	Determinar si la mezcla es del tipo S1 o S2.....	79
7.3.5	Identificación del código total de la mezcla.	82
7.3.6	Diseño Estructural.....	83
7.3.7	Empleo de las gráficas de diseño	83
7.4	MÉTODO de aashto	86
7.4.1	Características de la rigidez de las capas	86
7.4.2	Coeficientes estructurales de las capas	90
7.4.3	Condiciones de drenaje.....	93
7.4.4	Determinación del número estructural.....	94
7.4.5	Chequeo del número estructural	94
7.5	ESFUERZOS, DEFORMACIONES Y DEFLEXIONES ADMISIBLES para estructuras de pavimento flexible.	97
7.5.1	Esfuerzos, deformación y deflexión admisibles de la estructura diseñada por el método Shell	98
7.5.2	Esfuerzos, deformación y deflexión admisibles de la estructura diseñada por el método AASHTO.....	104
7.6	Comparacion Esfuerzos, deformación y deflexión admisibles de la estructura diseñada por el método AASHTO y Shell.....	108



7.7	PRESUPUESTO.....	114
8	CONCLUSIONES.....	119
9	RECOMENDACIONES.....	121



ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1 Tabla de factores de equivalencia MOPT-UNIVERSIDAD DEL CAUCA	25
Ilustración 2. Elementos para determinar CBR	31
Ilustración 3 Montaje de muestra para penetración	34
Ilustración 4. Estructura Tricapa	38
Ilustración 5 Factor de Ponderación.	39
Ilustración 6 Determinación de T800 e IP	41
Ilustración 7 Nomograma de VAN DER POEL para determinar el módulo dinámico del asfalto	42
Ilustración 8 Grafica para hallar a_1 en función del módulo resiliente del concreto asfáltico.....	47
Ilustración 9 Variación de coeficiente a_2 con diferentes parámetros de resistencia de la base granular.	48
Ilustración 10 Variación de coeficiente a_3 con diferentes parámetros de resistencia de la subbase granular.	48
Ilustración 11 Localización general de Bogotá y localidad de Kennedy.....	55
Ilustración 12. Localización del proyecto	56
Ilustración 13 Movimientos aforo	67
Ilustración 14. Grafica Factor de ponderación- MMAT.....	74
Ilustración 15. Nomograma para calcular el índice de penetración y la temperatura T800.....	76
Ilustración 16 Nomograma de Van Der Poel para determinar el modulo dinámico (Stiffness) del asfalto.	78



Ilustración 17. Nomograma para el cálculo del módulo dinámico (Stiffness) de las mezclas asfálticas.....	79
Ilustración 18 Relaciones entre la rigidez de la mezcla y la rigidez del asfalto.	79
Ilustración 19 Nomograma de fatiga basado en S_{mix} y V_b	80
Ilustración 20 Características de fatiga para asfalto tipo F1 y para asfalto tipo F2	81
Ilustración 21 Carta HN49.....	84
Ilustración 22 Nomograma de Van der Poel para determinar el módulo de rigidez del asfalto	87
Ilustración 23 Nomograma para el cálculo del módulo dinámico de mezclas asfálticas.....	88
Ilustración 24 Carta M-1: Clasificación de la rigidez de la mezcla en función de la rigidez de la mezcla y el asfalto	89
Ilustración 25 Grafica para hallar a_1 en función del módulo resiliente del concreto asfáltico.....	90
Ilustración 26 Variación de coeficiente a_2 en bases tratadas con asfalto para diferentes parámetros de resistencia.	91
Ilustración 27 Variación de coeficiente a_2 con diferentes parámetros de resistencia de la base granular.	92
Ilustración 28 Variación de coeficiente a_4 con diferentes parámetros de resistencia de la subbase granular.	93
Ilustración 29 Programa Ecuación AASHTO 93.....	95
Ilustración 30 Programa PAS5.....	¡Error! Marcador no definido.
Ilustración 31 .Datos entrada Estructura propuesta.	100
Ilustración 32 . Datos calculados	100



Ilustración 33 Datos entrada Estructura propuesta.	101
Ilustración 34 Datos calculados	102
Ilustración 35 . Datos entrada Estructura propuesta.	106
Ilustración 36 Datos calculados	107



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Representación esquemática de los vehículos de transporte de carga más comunes en el país	26
Tabla 2 Esquematzación de los diferentes tipos de ejes y su carga máxima	26
Tabla 3 Fórmulas simplificadas.....	27
Tabla 4 Periodos de diseño en función del tipo de carretera	27
Tabla 5 Factor de distribución por carril	29
Tabla 6 Categorías de tránsito	43
Tabla 7 Correspondencia entre capas granulares, el tipo de pavimento y las categorías de tránsito	44
Tabla 8. Requisitos de los agregados para bases granulares	45
Tabla 9 Requisitos de los agregados para subbases granulares.....	46
Tabla 10 Diferentes niveles de drenaje de la estructura de pavimento.....	49
Tabla 11 Valores m_i recomendados para modificar los coeficientes de capas de base y subase granulares.	49
Tabla 12 Niveles de confiabilidad sugeridos para el diseño de carreteras	50
Tabla 13. Composición de población por edad y sexo. Localidad Kennedy,	57
Tabla 14 Composición de normas y aplicación al proyecto	59
Tabla 15. Fases de la investigación.....	61
Tabla 16. Apique 1 muestra analizada antes de la inmersión.....	64
Tabla 17. Apique 1 muestra analizada después de la inmersión.....	64
Tabla 18. Apique 2 muestra analizada antes de la inmersión.....	65



Tabla 19. Apique 2 muestra analizada después de la inmersión	65
Tabla 20 Cálculos para mejoramiento de la subrasante según la fórmula de IVANOV	66
Tabla 21 Distribución de Camiones	70
Tabla 22 Cálculos del factor Camión	70
Tabla 23 TPD y cargas de los vehículos.....	71
Tabla 24 Temperatura promedio registrada en Bogota año 2015.....	73
Tabla 25 Calculo de factor de ponderación.	75
Tabla 26 Propuestas de alternativas de capas método Shell	84
Tabla 27 Estructura de pavimento diseñada a partir del método SHELL Alternativa 1.....	85
Tabla 28 Estructura de pavimento diseñada a partir del método SHELL Alternativa 1.....	85
Tabla 29. Base y Subbase granular.....	90
Tabla 30 Resumen de diseño de pavimentos AASHTO	95
Tabla 31 Estructura de pavimento diseñada a partir del método AASHTO Alternativa 3.....	96
Tabla 32 Esfuerzos, deformación y deflexión admisibles para el diseño por el método Shell.....	98
Tabla 33 Esfuerzos, deformación y deflexión de la estructura diseñada por el método Shell.....	98
Tabla 34 Datos de interfase entre las capas Alternativa 1.....	99
Tabla 35 Datos de interfase entre las capas Alternativa 2.....	101



Tabla 36 Porcentaje de solicitudes de la estructura diseñada por el método Shell.....	103
Tabla 37 Esfuerzos, deformación y deflexión admisibles para el diseño por el método AASTHO.	104
Tabla 38 Esfuerzos, deformación y deflexión de la estructura diseñada por el método Shell.	105
Tabla 39 Datos de interfase entre las capas Alternativa 3.....	106
Tabla 40 Porcentaje de solicitudes de la estructura diseñada por el método AASTHO	108
Tabla 41 Esfuerzos, deformación y deflexión admisibles para el diseño por el método SHELL Y AASTHO	109
Tabla 42 Comparación de valores de presupuestos.....	118



ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1 Volúmenes vehicular periodo de 30 minutos valores totales.....	68
Gráfica 2 Volúmenes vehiculares horaria Movimiento 1 total accesos.	69
Gráfica 3. Deformación radial admisible de tracción en la base de la capa asfáltica	110
Gráfica 4. Deformación vertical admisible de compresión sobre la subrasante ...	111
Gráfica 5. Esfuerzo vertical admisible de compresión sobre la subrasante	112
Gráfica 6. Deflexión admisible en la superficie de la estructura de pavimento	113
Gráfica 7 Comparación de alternativas según el valor del presupuesto	118



ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO 1 RESULTADOS DE ENSAYOS DE CBR	124
ANEXO 2 AFOROS, FACTOR CAMIÓN Y TPD.....	125
ANEXO 3 NUMERO DE EJES EQUIVALENTES	126
ANEXO 4 FORMULA DE IVANOV	127
ANEXO 5 DISEÑO DE AASHTO	128



TÍTULO

Análisis del comportamiento de una estructura de pavimento flexible en una vía de tráfico pesado, caso particular vía urbana en la ciudad de Bogotá barrio Santa Catalina

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN

La línea de investigación apropiada para el proyecto es Geotecnia

SUB LÍNEA DE INVESTIGACIÓN

La sub línea que mejor se acopla al trabajo es la de pavimentos

SEMILLERO DE INVESTIGACIÓN

El semillero de investigación tiene por nombre SIGUC – II.

INVESTIGADORES

Yizel Andrea Castañeda Orjuela

Cristian Fernando Salamanca Quiroga

ASESORES

Disciplinar: Ing. Martin Ernesto Riascos Caipe

Metodológico: Lic. Laura Milena Cala Cristancho

Director de área: Ing. Christian Gutiérrez



1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La estructura de pavimento flexible es una de las más utilizadas en los diferentes proyectos que se implementa en la ciudad de Bogotá, sin embargo, no se tiene en cuenta el periodo de servicio al cual estará expuesta la vía, esto obedece principalmente a la circulación de vehículos pesados a baja velocidad la cual afecta las estructuras que se proyectan para un periodo determinado, por lo tanto, su vida útil se ve reducida por los efectos de dicho tránsito que conforma aproximadamente el 20% del parque automotor colombiano de acuerdo con el Ministerio de Transporte¹.

En Colombia estos vehículos prestan un servicio de carga para el transporte de mercancías y productos a nivel nacional, de ellos, gran parte tienen como principal punto de destino la ciudad de Bogotá, por ello, se evidencia la necesidad de investigar el periodo de diseño al que se proyecta actualmente las vías bogotanas, dado que algunas no están cumpliendo con los parámetros requeridos por la norma del INVIAS, por lo tanto, se presentan fallas en el pavimento por diferentes causas las cuales afectan la movilidad de la ciudad.

Para la ciudad de Bogotá estas estructuras presentan condiciones de deterioro por el efecto de este tipo de vehículos que transitan regularmente sobre ella, debido a que por condiciones particulares como la cantidad y tipo de vehículos que se proyectaron, se incrementaron de forma aleatoria a razón de algunas condiciones específicas de la zona que posiblemente no se evaluaron de forma inicial.

Estas afectaciones pueden presentarse posiblemente por diseños deficientes o materiales de baja calidad para su construcción. Sin embargo, una de las principales variables en diseño que afecta su servicio es el factor camión; básicamente esta variable es la que establece una cantidad considerable de especificaciones en la vía, es decir, sobre la cual se establece detalles de la estructura.

Dada las diferentes condiciones que se pueden presentar en el desarrollo de una estructura de pavimento, actualmente se efectúa el estudio y análisis de la zona

¹ MINISTERIO DE LA REPUBLICA. Parque Automotor de transporte de carga en Colombia. Informe de la subdirección operativa de transporte automotor. Bogotá, 2000.



con el objeto de evidenciar las diferentes afectaciones que presenta la comunidad del barrio Santa Catalina.

Actualmente el sector en estudio es un punto de tránsito de vehículos principalmente de carga, los cuales ingresan por el occidente de Bogotá y concurren a este sitio dado que allí se encuentran talleres mecánicos especializados para este tipo de automotores. Además de ello, las condiciones de la vía se prestan para improvisar puntos de taller y parqueo de los mismos, que genera condiciones de inseguridad dado que es innumerable el número de vehículos que allí se encuentran e impiden que las autoridades tengan control de la zona, por el tamaño de los vehículos y porque generan puntos que se prestan para la delincuencia y el hurto de los habitantes del sector.

En la actualidad la vía no cuenta con una estructura de pavimento, debido a que se tiene una estructura de afirmado en condiciones medias, es decir, no posee una carpeta asfáltica, ni estructura de pavimento, tan solo presenta material tipo recebo, que funciona en condiciones óptimas para el tránsito de vehículos livianos, no obstante, con el paso del tiempo y el tránsito de vehículos pesados, el afirmado ha sufrido daños internos ocasionando que se generen baches sobre la vía lo que ocasiona embotellamientos, daños a los vehículos y accidentes.

En la zona de estudio se presenta liberación de partículas producidas por la no firmeza del terreno. Probablemente esta puede ser una de las causas para generar enfermedades respiratorias en los habitantes del sector, igualmente se evidencia que en temporadas de lluvia la acumulación de polvo genera taponamientos en las alcantarillas aledañas generando problemas de inundación en algunas calles.

Debido a que en la actualidad se presentan problemas de deformaciones en las vías principales de la ciudad de Bogotá, esta investigación se enfoca en analizar un diseño que sea óptimo en cuanto a problemas asociados a la carga que ejercen los vehículos comerciales, para evitar problemas de ahuellamiento.

1.1 PREGUNTA

¿Cuál es el comportamiento ante la deflexión y deformación de una estructura de pavimento flexible en una vía de tráfico pesado, caso particular vía urbana en la ciudad de Bogotá barrio Santa Catalina?



2 JUSTIFICACIÓN

En la ciudad de Bogotá, actualmente se evidencia el deterioro temprano de algunas estructuras de pavimento, esto como resultado de la falta de un riguroso acompañamiento a los contratistas en el proceso de diseño o construcción por parte de los entes de control. Se generará un análisis sobre la afectación de los vehículos de carga en el barrio Santa Catalina, analizando los efectos de carga pesada sobre la estructura de pavimento lo cual servirá para generar una alternativa de diseño de pavimento para la zona de estudio en la ciudad de Bogotá.

Esta alternativa de solución buscará plantear un diseño de pavimento flexible mediante las metodologías de SHELL y AASHTO que sea acorde a las características propias del suelo de estudio, debido a que en los últimos años esta zona presenta problemas sociales y de tránsito, dado que a lo largo de su composición vial se encuentran talleres especializados en vehículos de carga, por lo que el estado de la vía presenta dificultad de acceso, así como la liberación de material particulado generando problemas de salubridad en la zona.

Esta investigación busca presentar un análisis y chequeo del comportamiento de una estructura de pavimento mediante los métodos SHELL y AASHTO, evaluando deformaciones y deflexiones. Esto como solución para la situación y condiciones anteriormente señaladas, dados los conocimientos previamente adquiridos se realizarán los estudios técnicos y aplicación de los métodos utilizados bajo la normatividad para poder presentar alternativas que sean ajustables al presupuesto y realización.



3 OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

Analizar el comportamiento de una estructura de pavimento flexible en una vía de tráfico pesado, caso particular vía urbana en la ciudad de Bogotá barrio Santa Catalina.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar las propiedades mecánicas de un suelo tipo Aluvial 200 en la subrasante teniendo en cuenta los vehículos de carga pesada.
- Determinar el comportamiento del tráfico pesado calculando el número de ejes equivalentes que transitan sobre la vía de estudio.
- Realizar el chequeo de los esfuerzos y deformaciones generados en una estructura de pavimento flexible diseñado bajo el método de AASHTO y Shell.



4 ANTECEDENTES

Varios expertos a nivel nacional y local han desarrollado investigaciones encaminadas a estudiar el daño producido a los pavimentos a partir de la Evaluación de factores camión de los vehículos comerciales de carga que circulan por la red vial.

En Colombia se desarrolló un estudio en el que se analizaron 38 operativos de pesaje a través de un aforo para determinar la cantidad de vehículos que pasan por los diferentes departamentos seleccionados. En el estudio se menciona que:

Cada operativo de pesaje se llevó a cabo durante 7 días calendario, con una intensidad de 24 horas por día, donde se pesaron de forma estática todos los ejes de los camiones que circulaban en un solo sentido. A partir de los operativos realizados se obtuvo una muestra de 59.622 camiones pesados, correspondientes a 151.736 ejes de distintas configuraciones de camiones entre los distintos departamentos del país.²

Cabe resaltar que uno de los aspectos más relevantes en el análisis y diseño estructural de pavimentos, es obtener datos reales y actualizados del factor camión. En la actualidad los factores reportados por INVIAS son utilizados frecuentemente en el análisis de cargas de tránsito para el diseño.

Los resultados obtenidos permitieron concluir que departamentos que poseen una alta frecuencia de sanciones por violación de los límites máximos de carga tienden a exhibir factores camión elevado. Por ejemplo, los altos valores de factor camión calculados para las vías analizadas en el departamento, coinciden con la alta frecuencia de sanciones 61% del total aplicado por efectos de sobrecarga en los departamentos.³

Para la zona de estudio, la ciudad de Bogotá cuenta con evaluaciones previas de las principales vías, el cual reporta el número de vehículos de

² MACEA, Luis F; FUENTES, Luis G y ALVAREZ, Alex E. Evaluación de factores camión. de los vehículos comerciales de carga que circulan por la red vial principal colombiana. Marzo, 2013. En: Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquia N.º 66 pp. 57-69.

³ INVIAS. Guía Metodológica para el Diseño de Obras de Rehabilitación de Pavimentos Asfálticos de Carretera. Bogotá, Colombia. 2008. pp. 57, 62.



carga que circulan y son esenciales para no exceder los límites inicialmente estimados en sus diseños, lo anterior, permite minimizar la incertidumbre optimizando los procesos de diseño de pavimentos y la gestión de estos para su conservación.

Dentro del análisis que se va desarrollar es importante contar con información en campo y posterior análisis de los espectros de carga. A nivel de estudio local se cuenta con datos de factores de daño de vehículos que transitan por las vías principales⁴.

Como dato de estudio se cuenta con el sondeo que realizó la Alcaldía de Kennedy identificando la zona como un tramo de malla vial local-intermedia donde:

El Instituto de Desarrollo Urbano IDU, realizó en 2000 un inventario vial de las doce localidades de Bogotá. En este estudio se encontró que según el índice de fallas que es obtenido de la ponderación por severidad y extensión de los daños, el 60,2% de las vías de la localidad se encontraba en buen estado, el 20,5% en estado regular y sólo el 2,4% en muy mal estado.⁵

⁴ MURGUEITIO A., BENAVIDES C., SOLANO E. Estudio de los Factores dado de los Vehículos que circulan por las Carreteras Colombianas. En: XI Simposio Colombiano sobre Ingeniería de Pavimentos. Cartagena D. T. y C. pp. 332-342. 1997.

⁵ ALCALDÍA LOCAL DE KENNEDY .Economía Regional y Social. Actualización del diagnóstico social de la localidad de Kennedy. Bogotá. 2001.



5 MARCO DE REFERENCIA

5.1 MARCO CONCEPTUAL

En este capítulo se presentan los conceptos utilizados para la realización del presente informe:

5.1.1 Volumen de tránsito

Es el número de vehículos que pasan por un punto o sección transversal dados, de un carril o de una calzada, durante un periodo determinado. Como se expresa a continuación:

$$Q = \frac{N}{T} \quad \text{Ecuación 1}$$

Dónde:

Q = Vehículos que pasan por unidad de tiempo (Vehículos / periodo).

N = Número total de vehículos que pasan (vehículos)

T = Período determinado (unidades de tiempo)

5.1.1.1 Volúmenes de tránsito absolutos o totales

Es el número total de vehículos que pasan durante un lapso de tiempo determinado, dependiendo de la duración se tienen los siguientes volúmenes de tránsito totales o absolutos⁶:

- Tránsito anual (TA): Es el número total de vehículos que pasan durante un año, en este caso T = 1 año.
- Tránsito mensual (TM): Es el número total de vehículos que pasan durante un mes, en este caso T = 1 mes.
- Tránsito semanal (TS): Es el número total de vehículos que pasan durante una semana, en este caso T = 1 semana.

⁶ CORDOBA MAQUILON, Jorge Eliecer. Metodología métodos de tránsito, Volúmenes de tránsito.[citado 06 Mar., 2016] Disponible en: <http://es.slideshare.net/marco11390/volumen-de-tránsito>

- Tránsito diario (TD): Es el número total de vehículos que pasan durante un día, en este caso $T = 1$ día.
- Tránsito horario (TH): Es el número total de vehículos que pasan durante una hora, en este caso $T = 1$ hora.
- Tasa de flujo o flujo (q): Es el número total de vehículos que pasan durante un período inferior a una hora, en este caso $T < 1$ hora.

5.1.1.2 Volúmenes de tránsito promedio diarios.

Se define el volumen de tránsito promedio diario (TPD), como el número total de vehículos que pasan durante un periodo dado (en días completos) igual o menor a un año y mayor que un día, dividido entre el número de días del periodo.

De acuerdo al número de días de este período, se presentan los siguientes volúmenes de tránsito promedio diario, dado en vehículos por día:

- Tránsito promedio diario anual (TPDA)

$$TPDA = \frac{TA}{365} \quad \text{Ecuación 2}$$

- Tránsito promedio diario mensual (TPDM):

$$TPDM = \frac{TM}{30} \quad \text{Ecuación 3}$$

- Tránsito promedio diario semanal (TPDS)

$$TPDM = \frac{TS}{7} \quad \text{Ecuación 4}$$

5.1.1.3 Características de los volúmenes de tránsito

Los volúmenes de tránsito siempre deben ser considerados como dinámicos, por lo que solamente son precisos para el periodo de duración de los aforos, sin embargo, debido a que sus variaciones son generalmente rítmicas y repetitivas, es importante tener un conocimiento de sus características, para así programar aforos, relacionar volúmenes en un tiempo y lugar, volúmenes de otro tiempo y lugar y prever con la debida anticipación la actuación de las fuerzas dedicadas al control del tránsito y labor preventiva, así como las de conservación.



Por lo tanto, es fundamental, en la planeación y operación de la circulación vehicular, conocer las variaciones periódicas de los volúmenes de tránsito dentro de las horas de máxima demanda, en las horas de día, en los días de la semana y en los meses del año.

5.1.1.4 Distribución y composición del volumen de tránsito

La distribución de los volúmenes de tránsito debe ser analizada por carriles esto como punto de partida en el estudio de tránsito que se va desarrollar en el proyecto. Tratándose de tres o más carriles de operación en un sentido, el flujo se asemeja a una corriente hidráulica.

Al realizar la medición de los volúmenes de tránsito por carril en zonas urbanas, la mayor velocidad y capacidad, generalmente se logran en el carril de la izquierda siempre y cuando presenta más de un carril en un sentido, mientras que para vías compuestas por un solo carril para cada sentido la aceleración resulta similar, sin embargo se debe tener en cuenta las fricciones laterales, como paradas de autobuses, taxis y los giros a la izquierda o derecha los cuales causan un flujo más lento en los carriles.

En los estudios de volúmenes de tránsito es muy útil conocer la composición y variación de los distintos tipos de vehículos. La composición vehicular se mide en términos de porcentajes sobre el volumen total. Por ejemplo, porcentaje de automóviles, de autobuses y de camiones.

5.1.2 Factor camión

Se entiende por el Factor Camión (F.C.) el número de aplicaciones de ejes sencillos con carga equivalente de 8.2 Ton

Formas de obtener el Factor camión

- Pesaje (costoso)
- Asumir el F.C. de una vía conocida, y con características similares
- Estimar el F.C. por algún método empírico (MOPT - Universidad del Cauca)

Se debe tener presente la siguiente ecuación tomada de MOPT Universidad del Cauca.

$$FC = \frac{A\% * FE + B\% * FE}{\Sigma A + B\%} \quad \text{Ecuación 5}$$

Dónde:

A: porcentaje de camiones tipo C-2

Fe: factores de equivalencia dados por el método MOPT – Universidad del Cauca.

B: porcentaje de vehículos pesados que emplean el carril de diseño.

Ilustración 1 Tabla de factores de equivalencia MOPT-UNIVERSIDAD DEL CAUCA

TIPO DE VEHICULO	FACTORES DE EQUIVALENCIA	
	Mopt - Ingerouute	universidad del Cauca
C - 2 pequeño		1.14
	1.4 (promedio)	
C - 2 grande		3.44
C - 3	2.4	3.76
C2 - S1		3.37
C - 4	3.67	6.73
C3 - S1		2.22
C2 - S2		3.42
C3 - S2	4.67	4.4
C3 - S3	5	4.72
Bus P - 600 pequeño		0.4
	0.2 (promedio)	
Bus P - 900 grande		0.1
Bus doble piso 4 ejes		0.05

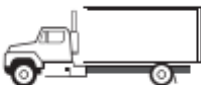
Fuente: MONTEJO, Alfonso. Ingeniería para pavimentos de carreteras. 2 ed. Bogotá: Universidad Católica 2001.p. 193

5.1.3 Número de ejes equivalentes

Según el Ministerio de Transporte, los vehículos transmiten las cargas a la estructura de pavimento a través de las ruedas, las cuales se encuentran dispuestas en ejes, por lo cual a través de la resolución 4100 de 2004 reglamentan el peso que pueden transmitir tanto los vehículos, como los diferentes ejes de carga. En la Tabla 1 se muestra los vehículos de transporte más comunes en el

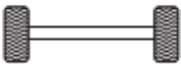
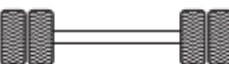
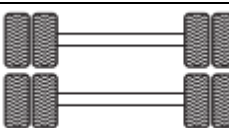
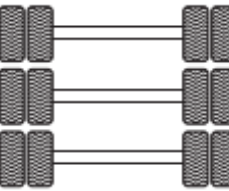
país y en la Tabla 2 se muestra el esquema de los diferentes tipos de ejes y su peso correspondiente.

Tabla 1 Representación esquemática de los vehículos de transporte de carga más comunes en el país

Designación	Configuración	Asignación
2		Camión de dos ejes Camión sencillo
3		Camión de tres ejes Doble Troque
3S2		Tractocamión de tres ejes con semirremolque de dos ejes
3S3		Tractocamión de tres ejes con semirremolque de tres ejes

Fuente: Ministerio de transporte. Resolución 4100 de 2004.

Tabla 2 Esquematización de los diferentes tipos de ejes y su carga máxima

Descripción	Configuración	Peso, Ton
Eje simple direccional		6.0
Eje simple llanta doble		11.0
Eje tándem llanta doble		22.0
Eje tridem llanta doble		24.0



Fuente: Ministerio de transporte. Resolución 4100 de 2004

5.1.3.1 Estimación de factores de daño

Se estimarán los factores de daño que los vehículos causarán al pavimento, se adoptarán la metodología AASHTO para pavimento flexible. El Instituto Nacional de Vías para pavimento flexible en el manual de diseño de pavimentos asfálticos en vías con medios y altos volúmenes de tránsito, realiza un cálculo del factor de equivalencia de carga por eje. A continuación, en la Tabla 3 se presentan las formulas simplificadas.

Tabla 3 Fórmulas simplificadas

Tipo de eje	Fórmula para el cálculo del factor de equivalencia
Simple de rueda doble	$(\text{carga del eje en (Ton)}) / 8.2)^4$
Tándem	$(\text{carga del eje en (Ton)}) / 15)^4$
Tridem	$(\text{carga del eje en (Ton)}) / 23)^4$

Fuente: INVIAS. Pavimentos asfálticos en vías con medios y altos volúmenes de tránsito.

5.1.3.2 Periodo de diseño

Es definido como el periodo seleccionado al iniciar el diseño, este será seleccionado dependiendo de las exigencias del servicio, en la mayoría de ocasiones será mayor a la vida útil del pavimento. En la Tabla 4 se muestra el periodo de diseño en función del tipo de carretera.

Tabla 4 Periodos de diseño en función del tipo de carretera

Tipo de Carretera	Periodo de diseño (años)
Urbana de tránsito elevado	30-50
Interurbana de tránsito elevado	20-50
Pavimentada de baja intensidad de tránsito	15-25
De baja intensidad de tránsito, pavimentación con grava	10-20

Fuente: AASHTO, Guide for Design of Pavement Structures 1993.



5.1.3.3 Factor de crecimiento

Tiene en cuenta la variación del tránsito en el periodo de diseño considerado, el cual es utilizado para determinar las cargas equivalentes acumuladas. El factor de crecimiento se calcula mediante la Ecuación 6 o Ecuación 7.⁷

$$FC = \frac{\{(1+TC)^n - 1\}}{TC} \quad \text{Ecuación 6}$$

$$FC = \frac{\{(1+r)^n - 1\}}{\ln(1+r)} \quad \text{Ecuación 7}$$

Donde,

r ó Tc = Porcentaje de factor de crecimiento

n = Periodo de diseño

5.1.3.4 Factor tránsito atraído y generado

Es el volumen del tránsito que, sin cambiar ni su origen ni su destino, puede ocupar la futura vía pavimentada como ruta alterna, afluyendo a ella a través de otras vías existentes.⁸

5.1.3.5 Factor por distribución de carril

Generalmente, para la mayoría de las carreteras se considera una distribución por carril del 50%, salvo que la información obtenida indique otro comportamiento. En cuanto a los factores de distribución del flujo vehicular por carril, la AASHTO recomienda como guía la utilización de la Tabla 5.⁹

⁷ CORREDOR, Gustavo. Obtención y manejo de la información de tránsito. [Separata]. Managua, Agosto 2010. Pág. 2-29.

⁸ NOTAS DE PAVIMENTOS. Estudio de tránsito definiciones generales. [en línea]. Marzo [cita 07 de marzo de 2016]. En: <http://notasdepavimentos.blogspot.com.co/2011/04/estudio-del-tránsito-definiciones.html>.

⁹ HIGUERA SANDOVAL, Carlos Hernando. Nociones sobre los métodos de diseño de estructuras de pavimentos para carreteras – volumen 2. Universidad pedagógica y tecnológica de Colombia. Facultad de Ingeniería. Escuela de transportes y vías. Tunja, 2010.

Tabla 5 Factor de distribución por carril

NÚMERO DE CARRILES DE CADA DIRECCIÓN	PORCENTAJE DE EJES EQUIVALENTES DE 8.2 TONELADAS EN EL CARRIL DE DISEÑO
1	100
2	80 – 100
3	60 – 80
4	50 - 75

Fuente: Higuera Sandoval, Carlos Hernando. Nociones sobre los métodos de diseño de estructuras de pavimentos para carreteras – volumen 2.

5.1.3.6 Cálculo de número de ejes equivalentes

El número de ejes equivalentes es calculado mediante la Ecuación 5 indicada a continuación:

El número de ejes equivalentes es calculado mediante la Ecuación 5 indicada por el libro Nociones sobre el Método de estructuras de Pavimentos para Carreteras a continuación:

$$N = 365 * TPD_0 * F_{TAG} * F_c * F_{ca} * F_{eq} \quad \text{Ecuación 8}$$

Dónde:

TPD_0 = Transito promedio diario

F_{eq} = Factor de equivalencia

F_{ca} = Factor de distribución por carril

F_{TAG} = Factor transito atraído y generado

F_c = Factor de crecimiento

F_{eq} = Factor de equivalencia



5.1.4 Ensayos para definir resistencia del subsuelo

La resistencia del subsuelo es de suma importancia debido a que con ello se definirá la capacidad mecánica del suelo y así se obtendrá un parámetro inicial para realizar el diseño.

5.1.4.1 CBR (*California Bearing Ratio*)

Ensayo para la determinación de un índice de resistencia de los suelos de subrasante, subbase y base.

5.1.4.2 Equipos y materiales

- Prensa: Se utiliza para establecer la penetración de un pistón en la muestra. Debe estar equipada con una cabeza o base móvil que se mueva a una velocidad uniforme de 1.27 mm/min (0.05"/min), con una tolerancia de más o menos 20%.

La máquina debe estar equipada con un dispositivo indicador de carga que tenga una aproximación de lectura adecuada para la máxima carga prevista durante la penetración. La aproximación de lectura deberá ser de 44 N (10 lbf) o menos, si la prensa tiene una capacidad de carga de 44.5 KN (10 kib) o más; deberá ser de 22 KN (5 lbf) si la capacidad de carga es de 22.3 KN (5 kip), y deberá ser de 8.9 N (2 lbf) para una capacidad de carga mínima de 11.2 KN (2.5 kip).¹⁰

El dispositivo de la penetración debe dar lecturas con una aproximación a los 0.025 mm (0.001") más cercanos y estar asociado a un accesorio de montaje, el cual debe establecer una conexión entre el medidor de penetración, el pistón de penetración y el borde del molde, para brindar medidas de penetración correctas. El ensamble del medidor a algún componente del marco de carga sometido a esfuerzo produce inexactitudes en las lecturas.¹¹

¹⁰ INVIAS. Norma de ensayos de materiales para carreteras. INV E – 148- 13. 2014. Instituto nacional de vías.

¹¹ Ibid., p 412

- Moldes
- Disco espaciador
- Martillos de compactación
- Aparato medidor de expansión
- Placa de metal perforada
- Un trípode
- Sobrecargas metálicas
- Pistón de penetración
- Tanque
- Horno
- Balanzas
- Tamices
- Regla metálica
- Material misceláneo

Ilustración 2. Elementos para determinar CBR



Fuente: Sistemas de ensayos. Madrid

5.1.4.3 Procedimiento

El ensayo consiste en un pistón circular penetrando a una velocidad constante. El ensayo se utiliza para expresar el CBR de una muestra compactada en un molde especificado.

- Según la norma de INVIAS, si se desea obtener el CBR óptimo de humedad y a un determinado porcentaje del peso unitario seco máximo, dichos golpes de cada capa deberán variar lo necesario para que los pesos unitarios secos resultantes presenten valores por encima y por debajo del valor deseado. Si se desea tener un CBR de un suelo al 95% de compactación, resulta compactar especímenes de 56, 25, 10 golpes por capa. En la Fotografía 1 se observa la muestra dentro del molde.

Fotografía 1. Molde con muestra tomada



Fuente: Elaboración propia

- La norma indica que el molde se debe ajustar a la placa base y se une al collar de extensión. A continuación, se inserta el disco espaciador dentro del molde y se coloca papel filtro grueso sobre el disco.

Fotografía 2. Trípode de medida con sus patas sobre los bordes del molde



Fuente: Elaboración propia

- A continuación se sumerge el molde en el tanque con las pesas de sobrecargas colocadas, dejando libre acceso al agua por la parte superior e inferior de la muestra. Se toma la primera lectura para medir la expansión, colocando el trípode de medida con sus patas sobre los bordes del molde, haciendo coincidir el vástago del deformímetro con el de la placa perforada se anota la lectura y al igual el día siguiente. Se mantiene la probeta durante las 96 horas (4 días) con el nivel de agua constante, al final del periodo de inmersión se coloca el trípode y se lee el deformímetro para medir el hinchamiento y calcular posteriormente la expansión, como un porcentaje de altura inicial del espécimen, se muestra la colocación del tripode.
- Luego se procede al ensayo de penetración (es importante que no transcurra mucho tiempo desde que se retire la sobre carga hasta cuando se coloca de nuevo en el ensayo de penetración). El ensayo de penetración consiste en aplicar una sobrecarga de 44 N (10lbf) para que el pistón

asiente, se monta el dial medidor de manera que se logre medir la penetración del pistón, en la Ilustración 3 se muestra el montaje de la muestra.

Ilustración 3 Montaje de muestra para penetración



Fuente: 03 de marzo de 2016 En: Pagina web: <http://fq.cl/2010/02/ensayo-cbr-california-bearing-ratio.html>

- Finalmente se desmonta el molde y se toman los datos que nos muestra la pantalla del aparato para determinar el CBR. Este nos permite configurarlo para el ensayo que necesitemos. En la Fotografía 3 se muestra la toma de datos.

Fotografía 3 Equipo en toma de datos



Fuente: Elaboración propia.

5.1.5 Formula IVANOV

La fórmula de IVANOV se utiliza para determinar el valor de capacidad equivalente, cuando el material de la subrasante da un resultado menos al 3%, con esta fórmula se realiza el cálculo del espesor de el mejoramiento que se debe emplear para tener un mejor valor de CBR.

$$h_1 = \frac{2a}{n} * \left[\frac{\left(1 - \frac{E_{inferior}}{E_{equivalente}}\right)}{\frac{2}{\pi} \left(1 - \frac{1}{n^{3.5}}\right)} \right] \quad \text{Ecuación 9}$$

$$n = \left(\frac{E_{superior}}{E_{inferior}} \right)^{\frac{1}{2.5}}$$

$h_1 =$	Corresponde al espesor del material granular
$a =$	Radio de carga
$n =$	Relación entre módulos de las capas inferior y superior
$E_{inferior} =$	Modulo de capa inferior, kg/cm^2
$E_{superior} =$	Modulo de capa superior, kg/cm^2
$E_{equivalente} =$	Modulo equivalente a la profundidad analizada, kg/cm^2



5.1.6 Especificación base granular

5.1.6.1 DESCRIPCIÓN

Esta especificación se refiere al suministro, colocación y compactación de material de base granular aprobado sobre una sub base, afirmado o subrasante, en una o más capas, de acuerdo con los alineamientos y dimensiones que se indiquen en los planos del proyecto o que establezca el Interventor.

5.1.6.2 MATERIALES

5.1.6.2.1 Agregados pétreos

Los materiales para construir la base granular pueden ser gravas naturales o materiales provenientes de la trituración de fragmentos rocosos o una mezcla de ambos. Las partículas deberán ser duras y resistentes, de características uniformes, libres de terrones de arcilla u otras sustancias objetables y deberán satisfacer los siguientes requisitos:

5.1.6.2.2 Granulometría

Deberá ajustarse a alguna de las siguientes franjas:

Tamiz		Porcentaje que pasa	
Normal	Alternativo	BG-38	BG-25
37.5 mm	1 1/2"	100	-
25.0 mm	1"	70-100	100
19.0 mm	3/4"	60-90	70-100
9.50 mm	3/8"	45-75	50-80
4.75 mm	No.4	30-60	35-65
2.00 mm	No.10	20-45	20-45
425 µm	No.40	10-30	10-30
75 µm	No.200	5-15	5-15

La franja por emplear será establecida en los documentos del proyecto o la que indique el Interventor.



Con el fin de evitar segregaciones y garantizar los niveles de densidad y resistencia exigidos por la presente especificación, el material que suministre el Constructor debe dar lugar a una curva granulométrica uniforme y sensiblemente paralela a los límites de la franja autorizada, sin saltos bruscos de la parte superior de un tamiz a la inferior del adyacente, etc.

El tamaño máximo nominal del agregado por utilizar no podrá exceder la mitad del espesor de la capa compactada.

5.1.6.3 Límites de consistencia

La fracción del material de base granular que pase el tamiz No.40 deberá presentar un índice plástico no mayor al tres por ciento (3%).

5.1.6.4 Limpieza

El equivalente de arena de la fracción inferior al tamiz No. 4, deberá ser cuando menos de treinta por ciento (30%).

5.1.6.5 Resistencia a la abrasión

El desgaste del material, determinado mediante la máquina de los Angeles, no podrá ser superior al cuarenta por ciento (40%).

5.1.6.6 Capacidad de soporte

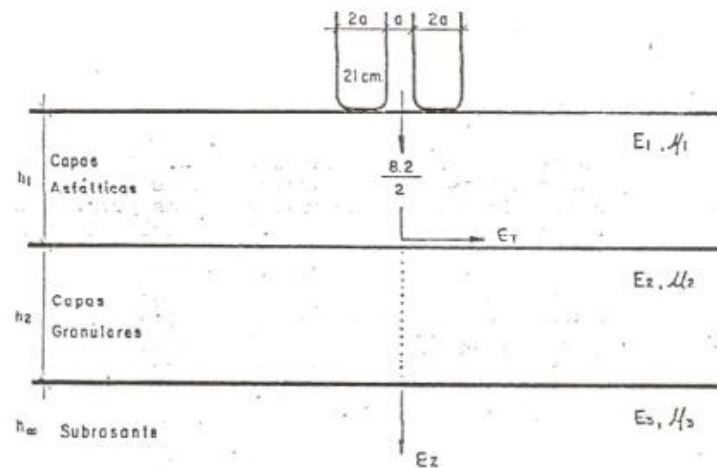
El material compactado al cien por ciento (100%) de la densidad máxima del Proctor Modificado, deberá presentar un CBR igual o superior a ochenta por ciento (80%).

5.1.7 Parámetros para diseño con el método SHELL

Este método considera la estructura del pavimento como un sistema multicapa linealmente elástico, bajo la acción de las cargas de tránsito, en el cual los materiales se encuentran caracterizados por su 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.

El procedimiento básico supone al pavimento como una estructura tricapa (Ilustración 4), en la que la capa superior corresponde a las carpetas asfálticas, la intermedia a las capas granulares y la inferior, que es infinita en sentido vertical, corresponde a la subrasante.

Ilustración 4. Estructura Tricapa



Fuente: MONTEJO, Alfonso. Ingeniería para pavimentos de carreteras. 2 ed. Bogotá: Universidad Católica 2001.p. 254

5.1.7.1 Parámetros de diseño

Período de Diseño: Al igual que para el método anterior se verificó la estructura para 10 años de periodo de diseño.

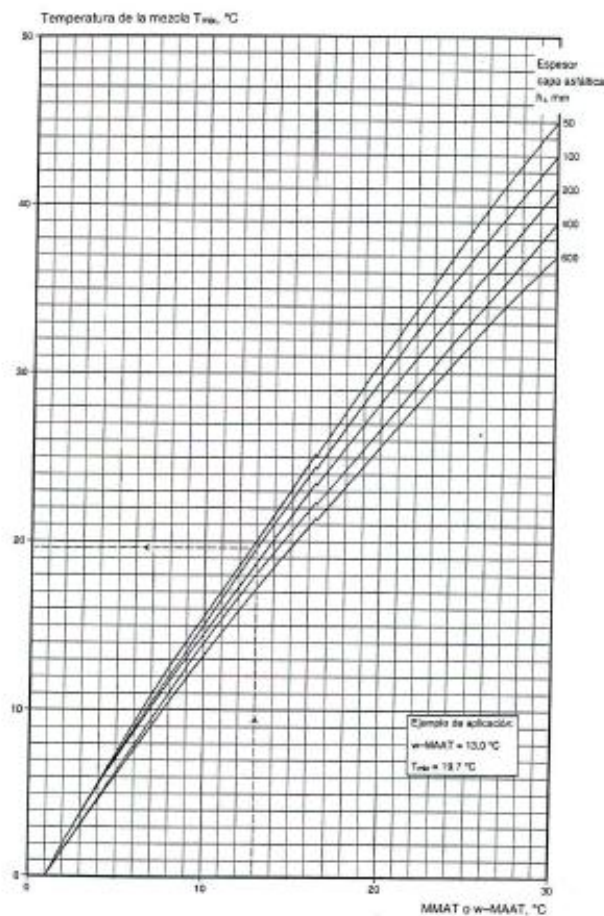
Tránsito: Se expresa como el número acumulado de ejes equivalentes de 8.2 Ton, por eje sencillo que se presentan en el carril de diseño.

Temperatura: Las variaciones diarias y estacionales de la temperatura no presentan influencia significativa en el módulo de elasticidad de las capas granulares, en cambio son muy importantes en las propiedades del asfalto, dado que es 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 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 (WMMAT) en la región del proyecto a partir de las temperaturas medias mensuales del aire (MMAT) y con ellos obtener unos factores de ponderación que se obtienen de la Ilustración 5.

Resistencia de la subrasante: El método exige conocer el módulo de resiliencia. Con base en el CBR se puede determinar en términos de Kg/cm^2 .

Ilustración 5 Factor de Ponderación.



Fuente: MONTEJO, Alfonso. Ingeniería para pavimentos de carreteras. 2 ed. Bogotá, Universidad Católica 2001.p. 291



5.1.7.2 Características de la mezcla asfáltica:

Aun cuando existan muchos tipos de mezclas asfálticas, la SHELL considera que son dos las propiedades fundamentales de ellas, que inciden en su comportamiento.

- a) Módulo de elasticidad dinámico
- b) Resistencia de la mezcla a la fatiga, es decir, a la acción repetida de las cargas.

En cuanto al 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.

El método considera únicamente dos tipos de cemento asfáltico, para la elaboración de las mezclas asfálticas; los de penetración 50 (1/2 mm) que se emplean en climas calientes y los de penetración 100 que se emplean en climas fríos. Con base en lo anterior, la SHELL reconoce para el diseño ocho tipos de mezclas asfálticas y presenta gráficas de diseño diferentes para cada una de ellas, estas son:

S1 F1 – 50 S2F1 – 50

S1F2 – 50 S2F2 – 50

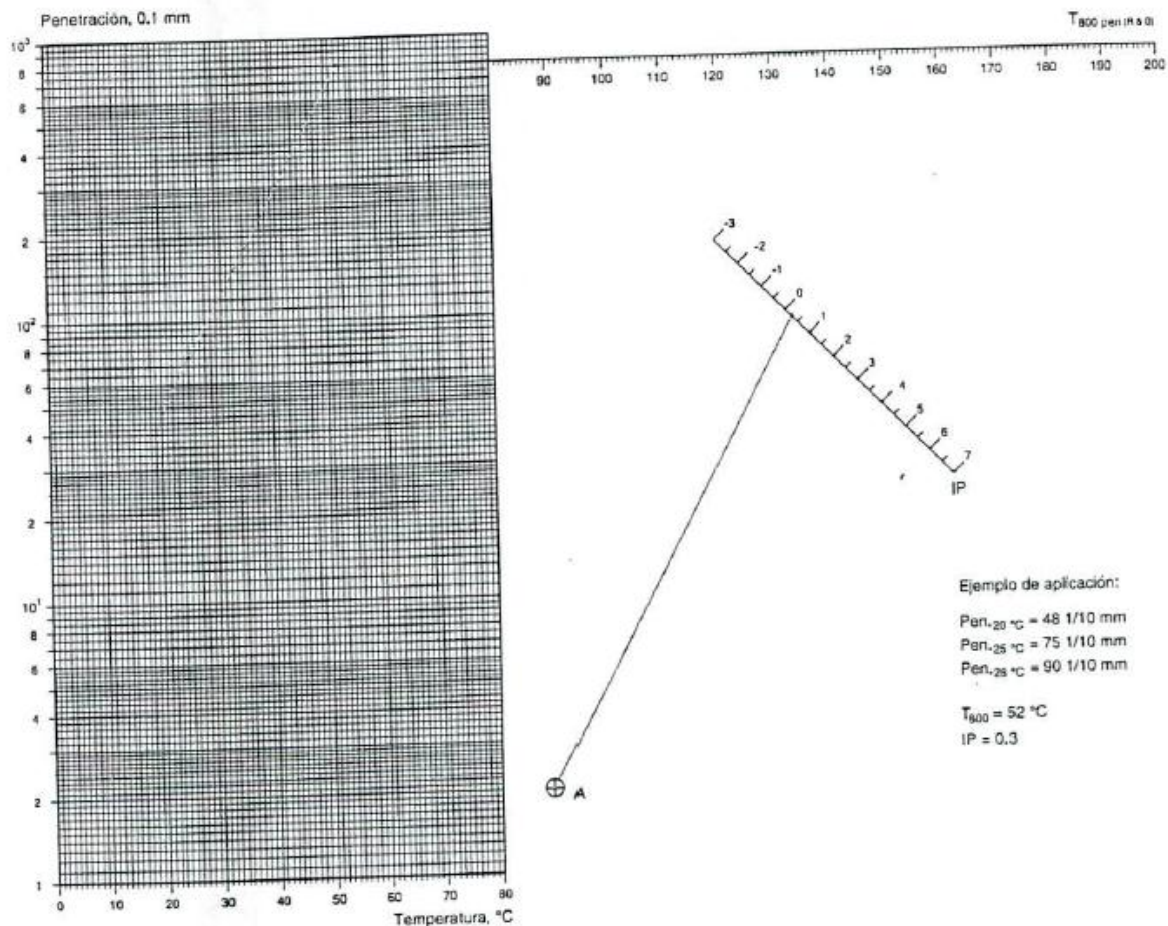
S1F1 – 100 S2F1 – 100

S1F2 – 100 S2F2 – 100

Para determinar el tipo de mezcla asfáltica, la SHELL presenta una serie de gráficas que están en función de ensayos rutinarios de laboratorio. El procedimiento a seguir considera los siguientes pasos:

- Determinación del índice de penetración de la temperatura T800 del asfalto: Con el asfalto que se va a usar en la construcción se hacen varios ensayos de penetración a diferentes temperaturas para determinar su susceptibilidad térmica y con ayuda de la gráfica de HELKELLOM (Ilustración 6) 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.

Ilustración 6 Determinación de T800 e IP

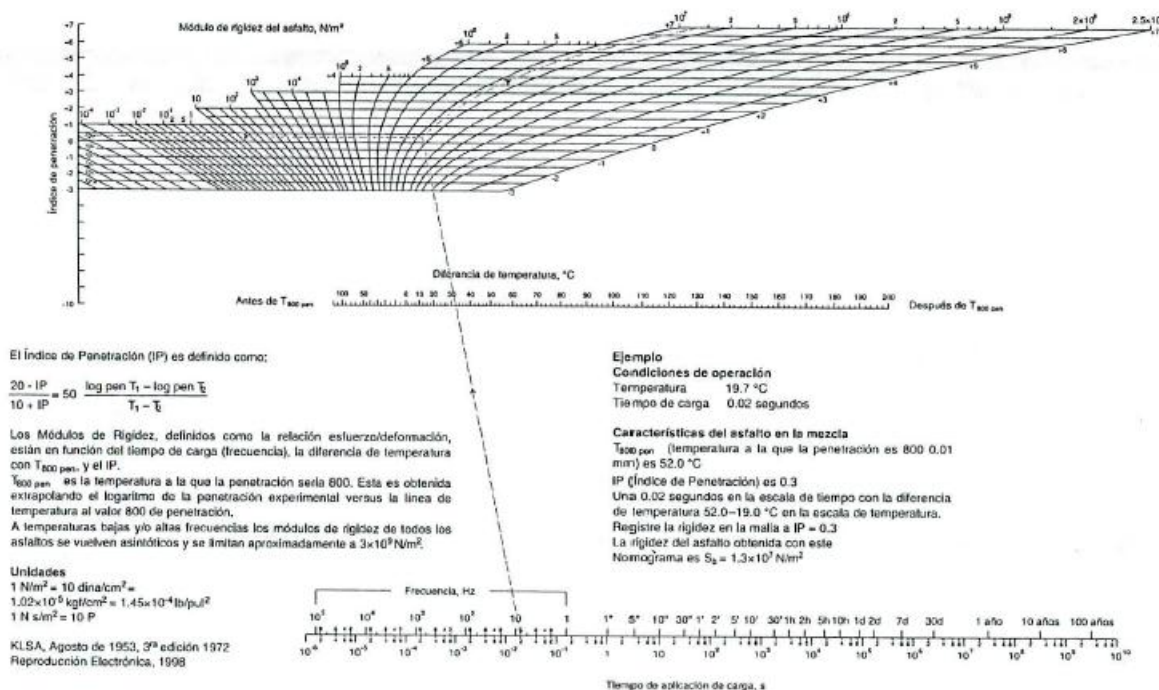


Fuente: MONTEJO, Alfonso. Ingeniería para pavimentos de carreteras. 2 ed. Bogotá: Universidad Católica 2001.p. 293

- Determinación de la rigidez del asfalto a la temperatura de trabajo en obra: Se emplea en la gráfica de Van Der Poel (Ilustración 7) 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 –

$$\Delta T = T_{800} - T_{mezcla} \quad \text{Ecuación 10}$$

Ilustración 7 Nomograma de VAN DER POEL para determinar el módulo dinámico del asfalto



Fuente: MONTEJO, Alfonso. Ingeniería para pavimentos de carreteras. 2 ed. Bogotá: Universidad Católica 2001.p. 294

5.1.7.3 Determinación del stiffness del asfalto a la temperatura de trabajo en obra

Para la determinación del *stiffness* del asfalto, se requiere la temperatura de trabajo en obra, el índice de penetración (Ip) y el tiempo de aplicación de carga. El método SHELL recomienda emplear un tiempo de 0.02 segundos cuando se

trabaja vías urbanas lo cual corresponde a una velocidad de 50 – 60 km/hora. Esto también como referencia a los estudios realizados por el IDU para la caracterización por zonas en Bogotá y utilizando la siguiente ecuación.

$$\Delta T = T800 - Tmezcla \quad \text{Ecuación 11}$$

5.1.8 Parámetros para diseño con el método AASHTO

Debido a los diferentes diseños realizados a nivel nacional y en la ciudad de Bogotá se debe realizar la elección de parámetros específicos para el tipo de vía a diseñar, esto dependerá de la cantidad de vehículos que pasen sobre la estructura, el tipo de suelo que se encuentre en la zona de estudio y demás detalles que se consideren exclusivos para el diseño a realizar.

5.1.8.1 Categorías de tránsito

Para seleccionar la categoría de tránsito se seguirá la normatividad del IDU, debido a que la estructura será diseñada para una vía colocada en este sector. La categoría de tránsito será definida debido a que con esta definición se escogerán los materiales y mezclas para la construcción de la estructura de pavimento. En la Tabla 6 se muestra las categorías de tránsito:

Tabla 6 Categorías de tránsito

Categoría de Tránsito	Nivel de tránsito	
	Criterio 1 VPD ₀	Criterio 2 NAEE_80, millones
T0	VPD ₀ < 20	NAEE_80 < 0.2
T1	20 ≤ VPD ₀ < 50	0.2 ≤ NAEE_80 < 0.5
T2	50 ≤ VPD ₀ < 150	0.5 ≤ NAEE_80 < 1.5
T3	150 ≤ VPD ₀ < 300	1.5 ≤ NAEE_80 < 3.0
T4	300 ≤ VPD ₀ < 750	3.0 ≤ NAEE_80 < 7.5
T5	VPD ₀ ≥ 750	NAEE_80 ≥ 7.5

Fuente: INSTITUTO DE DESARROLLO URBANO. Especificaciones IDU – ET -2011. Sección 107-11 p.p. 8-9.

VPD₀: número de vehículos pesados por día en el carril de diseño, durante el primer año deservicio de las obras, donde vehículos pesados son buses y camiones con peso de 3.5 toneladas o más.



NAEE_80: número acumulado de ejes equivalentes de 80kN en el período de diseño, en el carril de diseño.¹²

5.1.8.2 Capas granulares de base y subbase

Suministro, extensión, humedecimiento, mezcla, conformación y compactación de un material granular aprobado, el cual formará parte de la estructura de un pavimento, el tipo de capa granular a emplear se definirá en función de la importancia de la vía, del nivel de tránsito, de tipo de pavimento y de la posición de la capa dentro de la estructura de pavimento. En la Tabla 7 se muestra el tipo de base y subbase que se debe escoger según el tránsito.

Tabla 7 Correspondencia entre capas granulares, el tipo de pavimento y las categorías de tránsito

Tipo de capa	Categorías de tránsito			PEATONAL
	T0-T1	T2-T3	T4-T5	
Pavimento Asfáltico				
Base Granular	BG-C	BG-B	BG-A	
Subbase granular	SBG-C	SBG-B	SBG-A	
Pavimento de Losas de Concreto de Cemento Pórtland				
Base Granular	BG-B	BG-A	NA	
Subbase granular	SBG-B	SBG-A	SBG-A	
Andenes y Estructuras peatonales				
Base Granular				NA
Subbase granular				SBG PEA

Fuente: INSTITUTO DE DESARROLLO URBANO. Especificaciones IDU – ET -2011. Sección 400-11 p.p. 1-2.

5.1.8.3 Requisitos de los agregados para bases granulares

Según el IDU (Instituto de Desarrollo Urbano), los agregados pétreos que se deben emplear en la construcción de la base y subbase granular, deben cumplir con el requerimiento de la Tabla 8 y Tabla 9.

¹² INSTITUTO DE DESARROLLO URBANO. Especificaciones IDU – ET – 2011. Sección 107-11. pp 8-9.

Tabla 8. Requisitos de los agregados para bases granulares

Ensayo		Norma de ensayo	Clase de Base Granular		
			BG_C	BG_B	BG_A
Dureza					
Desgaste Los Angeles (Gradación A)	En seco, 500 revoluciones, % máximo	INV E-218-07	40	40	35
Micro Deval, % máximo	Agregado Grueso (FT)	INV E-238-07	30	25	20
10% de finos	Valor en seco, kN mínimo	INV E-224-07	60	75	100
	Relación húmedo/seco, % mínimo		75	75	75
Durabilidad					
Pérdidas en ensayo de solidez en sulfatos, % máximo	Sulfato de Magnesio	INV E-220-07	18	18	18
Limpieza					
Límite Líquido, % máximo		INV E-125-07	25	25	25
Índice de Plasticidad, % máximo		INV E-126-07	3	No plástico	No plástico
Equivalente de Arena, % mínimo		INV E-133-07	20	20	20
Valor de Azul de Metileno, máximo		INV E-235-07	10	10	10
Terrones de arcilla y partículas deleznales, % máximo		INV E-211	2	2	2
Geometría de las Partículas					
Partículas Fracturadas	1 cara	INVE-227-07	60	85	85
Mecánicamente, % mínimo	2 caras		40	60	60
Índice de Aplanamiento, % máximo (2)		INV E-230-07	35	35	35
Índice de Alargamiento, % máximo (3)		INV E-230-07	35	35	35
Angularidad del Agregado Fino, % mínimo (RO)		INV E-239-07	35	35	35
Capacidad de Soporte					
CBR, % mínimo referido al 100 % de la densidad seca máxima, según el ensayo INV E-142-07 (AASHTO T 180), método D, después de 4 días de inmersión.		INV E-148-07	80	100	100

Fuente: INSTITUTO DE DESARROLLO URBANO. Especificaciones IDU – ET -2011. Sección 400-11 p.p. 2.

Tabla 9 Requisitos de los agregados para subbases granulares

Ensayo		Norma de ensayo	Clase de Base Granular			
			SBG_PEA	SBG_C	SBG_B	SBG_A
Dureza						
Desgaste Los Ángeles (Gradación A)	En seco, 500 revoluciones, % máximo	INV E-218-07	50	45	40	40
Micro Deval, % máximo	Agregado Grueso (FT)	INV E-238-07	NA	35	35	30
10% de finos	Valor en seco, kN mínimo	INV E-224-07	NA	40	50	60
	Relación húmedo/seco, % mínimo			65	70	75
Durabilidad						
Pérdidas en ensayo de solidez en sulfatos, % máximo	Sulfato de Magnesio	INV E-220-07	18	18	18	18
Limpieza						
Límite Líquido, % máximo		INV E-125-07	40	25	25	25
Índice de Plasticidad, % máximo		INV E-126-07	10	6	3	3
Equivalente de Arena, % mínimo		INV E-133-07		18	18	20
Valor de Azul de Metileno, máximo		INV E-235-07		10	10	10
Terrones de arcilla y partículas deleznales, % máximo		INV E-211-07		2	2	2
Geometría de las Partículas						
Partículas Fracturadas	1 cara	INVE-227-07	NA	NA	NA	50
Mecánicamente, % mínimo	2 caras		NA	NA	NA	30
Índice de Aplanamiento, % máximo (2)		INV E-230-07	NA	NA	NA	NA
Índice de Alargamiento, % máximo (3)		INV E-230-07	NA	NA	NA	NA
Angularidad del Agregado Fino, % mínimo (RO)		INV E-239-07	NA	NA	NA	NA
Capacidad de Soporte						
CBR, % mínimo Referido al 100 % de la densidad seca máxima, según el ensayo INV E-142 (AASHTO T 180), método D, después de 4 días de inmersión.		INV E-148-07	20	30	40	60

Fuente: INSTITUTO DE DESARROLLO URBANO. Especificaciones IDU – ET -2011. Sección 400-11 p.p. 3.

Los módulos de elasticidad dinámicos para concreto asfáltico, subbase granular y subbase estabilizada se establecieron a partir de experiencias locales y cartas de la AASHTO¹³.

Para el módulo resiliente de la subrasante la ecuación propuesta es para CBRs menores al 8%

$$MR = 100 \times CBR$$

Ecuación 12

¹³ ETA S.A. Estudios y diseños de la carrera Séptima, tramo calle 185 – Calle 200. Contrato N° 207-99 con el IDU, 1999. Pag. 38.

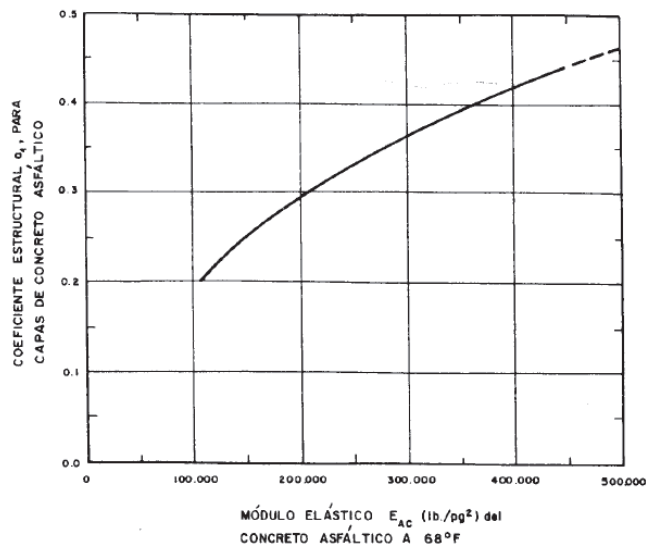
La ecuación para CBRs mayores al 8%

$$MR = 130 \times CBR^{0.714} \quad \text{Ecuación 13}$$

5.1.8.4 Coeficientes de Capa

“Los coeficientes de capas permiten convertir los espesores reales a números estructurales (SN), siendo cada coeficiente una medida de la capacidad relativa de cada material para funcionar como parte de la estructura del pavimento”¹⁴. En la Ilustración 8 se muestra la gráfica para hallar a_1 en función del módulo resiliente, en la Ilustración 9 se muestra la gráfica para obtener a_2 con una capa granular y en la Ilustración 10 se presente la gráfica para obtener el a_3 para las capas de subbase granular.

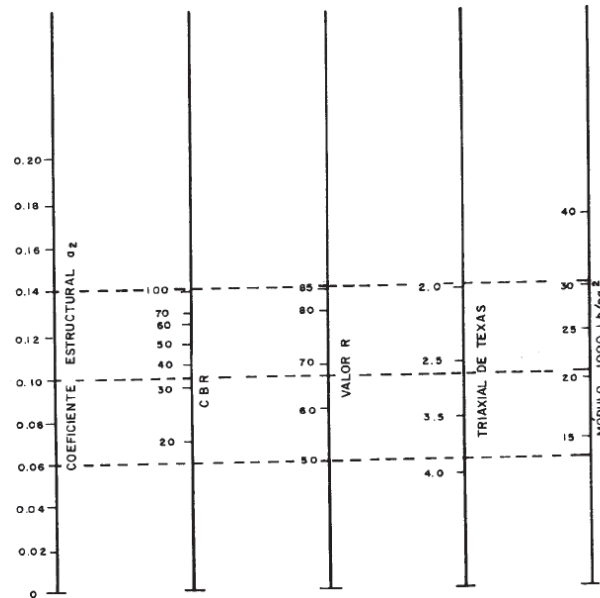
Ilustración 8 Grafica para hallar a_1 en función del módulo resiliente del concreto asfáltico.



Fuente: Montejo, Alfonso. Ingeniería para pavimentos de carreteras. pp. 268

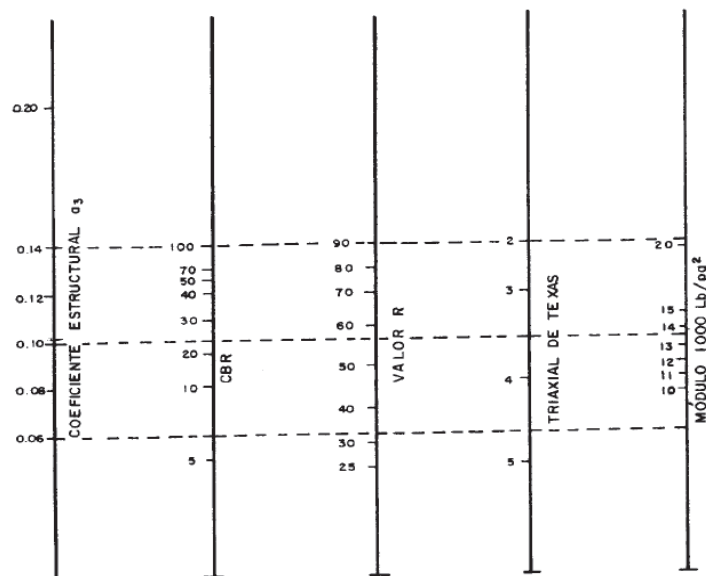
¹⁴ MONTEJO FONSECA, Alfonso. Ingeniería de pavimentos para carreteras Tomo I. Universidad Católica de Colombia, Bogotá 2002. pp. 268

Ilustración 9 Variación de coeficiente a_2 con diferentes parámetros de resistencia de la base granular.



Fuente: Montejo, Alfonso. Ingeniería para pavimentos de carreteras. pp. 269

Ilustración 10 Variación de coeficiente a_3 con diferentes parámetros de resistencia de la subbase granular.



Fuente: Montejo, Alfonso. Ingeniería para pavimentos de carreteras. pp. 273

5.1.8.5 Drenaje

A pesar de la importancia que se concede al drenaje en el diseño de carreteras, los métodos corrientes de dimensionamiento de pavimentos incluyen con frecuencia capas de base de baja permeabilidad y consecuentemente de difícil drenaje.

Tabla 10 Diferentes niveles de drenaje de la estructura de pavimento

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)

Fuente: Montejo, Alfonso. Ingeniería para pavimentos de carreteras. pp. 271

Se muestra en la Tabla 11 los valores que la AASHTO para m_i de acuerdo con la calidad del drenaje y el tiempo. Los factores allí mostrados solo aplican para bases granulares.

Tabla 11 Valores m_i recomendados para modificar los coeficientes de capas de base y subbase granulares.

Calidad del drenaje	% de tiempo de exposición de la estructura del pavimento a nivel de humedad próximos a la saturación			
	<1%	1-5%	5-25%	>25%
Excelente	1.40-1.35	1.35-1.30	1.30-1.20	1.20
Bueno	1.35-1.25	1.25-1.15	1.15-1.00	1.00
Aceptable	1.25-1.15	1.15-1.05	1.00-0.80	0.80
Pobre	1.15-1.05	1.05-0.80	0.80-0.60	0.60
Muy pobre	1.05-0.95	0.95-0.75	0.75-0.40	0.40

Fuente: Montejo, Alfonso. Ingeniería para pavimentos de carreteras. pp. 274



El tratamiento para el nivel esperado de drenaje de un pavimento flexible se logra a través del empleo de coeficientes de capas modificadas; esto es, se podría utilizar un coeficiente de capa más alto. El factor de modificación se denomina m_i y ha sido integrado desde la ecuación (SN) a partir de capa (a_i) y el espesor de (d_i).

5.1.8.6 Nivel de confiabilidad

Se define “como nivel de confiabilidad un proceso de diseño – comportamiento de un pavimento a la probabilidad de que una sección diseñada usando dicho proceso, se comportará satisfactoriamente bajo las condiciones de tránsito y ambientales durante el período de diseño”¹⁵. En la Tabla 12 se muestra los niveles de confiabilidad sugeridos para el diseño en la zona de estudio.

Tabla 12 Niveles de confiabilidad sugeridos para el diseño de carreteras

CLASIFICACIÓN	NIVEL DE CONFIABILIDAD RECOMENDADO	
	Urbana	Rural
Autopistas interestatales y otras	85 – 99.9	80 – 99.9
Arterias principales	80 – 99	75 – 95
Colectoras de Tránsitos	80 – 95	75 – 95
Carreteras locales	50 – 80	50 – 80

Fuente: Montejo, Alfonso. Ingeniería para pavimentos de carreteras. pp. 264

5.1.8.7 Desviación estándar total

Según los valores desarrollados en la AASHTO ROAD TEST los valores S_o no incluyen error por el tránsito. El error del tramo donde se desarrollaron varias pruebas fue de 0.35 para los pavimentos flexibles, lo cual corresponde una desviación estándar total de 0.45.

¹⁵Ibid., p. 264



5.1.8.8 *Serviciabilidad*

La *Serviciabilidad* de un pavimento 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 del índice de servicio presente (psi), el cual varía de 0 (carretera imposible) hasta 5 (carretera perfecta).

La escogencia de un índice más bajo que puede tolerarse antes de que sea necesario un refuerzo o una rehabilitación, la AASHTO sugiere un valor de 2.5 para las autopistas y vías principales y 2.0 para las demás carreteras.

En el ensayo AASHTO, se obtuvo un valor de 4.2 para los pavimentos flexibles, pero cada entidad podrá elegir un valor apropiado para sus condiciones y características constructivas.

Una vez establecido P_0 y P_t , se aplica la siguiente ecuación para definir el cambio total en el índice de servicio:

$$\Delta PSI = P_0 - P_t \quad \text{Ecuación 14}$$

5.1.8.9 *Módulo resiliente de la subrasante*

La base es la caracterización de los materiales de la subrasante en este método, es el módulo resiliente o elástico. Se determina mediante la ecuación 9 o ecuación 10.

5.1.8.10 *Determinación del número estructural*

La fórmula a utilizar será:

$$SN = a_1 d_1 + a_2 d_2 m_2 + a_3 d_3 m_3 \quad \text{Ecuación 12}$$

SN= Número estructural

a_i = Coeficiente estructural de la capa i , el cual depende de la característica del material con que ella se construya.

m_i = Coeficiente de drenaje de la capa i

d_i = Coeficiente de la capa i en pulgadas

5.1.9 Esfuerzos, deformaciones y deflexiones admisibles para estructuras de pavimento flexible.

5.1.9.1 DEPAV

Los parámetros usados deben ser:

- Radio de curvatura: 10.78cm
- Presión de contacto: 5.61 kg/cm²
- Distancia entre llantas: 32.41 cm
- Módulos de elasticidad E_i en kilogramos por centímetro cuadrado de las distintas capas.
- Relaciones de Poisson μ_i de las distintas capas
- Espesores de las capas H_i
- Tipo de interfase entre las capas

5.1.9.2 Esfuerzos, deformaciones y deflexiones admisibles

La estructura de pavimento diseñada se debe chequear por medio del método racional, con el propósito de verificar que los esfuerzos, deformaciones y deflexión críticos no superen valores admisibles

La Ley de fatiga de la Shell se expresa de la siguiente manera:

$$\epsilon_{r adm} = (0,856 V_b + 1,08) E 1^{-0,36} \left(\frac{N}{K}\right)^{-0,20} \quad \text{Ecuación 15}$$

Dónde:

$\epsilon_{r adm}$: Deformación de tracción admisible de la capa asfáltica (mm)

V_b : Porcentaje de Volumen de asfalto.

E_i : Modulo dinámico de la mezcla.

N : Transito de diseño expresado en ejes equivalentes de 8.2 Kn.

K : coeficiente de calaje.

5.1.9.3 Criterio de la Shell para determinar la deformación vertical admisible de compresión sobre la subrasante. ϵ_{zadm}

El criterio de deformación admisible de compresión sobre la subrasante este en función del nivel de confiabilidad y sus expresiones de cálculo para diferentes niveles de confianza son las siguientes:

- Para un nivel del 50%

$$\epsilon_{r adm} = 2.8 \times 10^{-0.20} N^{-0.25} \quad \text{Ecuación 16}$$

- Para un nivel 85%

$$\epsilon_{r adm} = 2.10 \times 10^{-0.20} N^{-0.25} \quad \text{Ecuación 17}$$

- Para un nivel de 95%

$$\epsilon_{r adm} = 1.8 \times 10^{-0.20} N^{-0.25} \quad \text{Ecuación 18}$$

5.1.9.4 Esfuerzo vertical admisible de compresión sobre la subrasante.

La determinación del esfuerzo admisible de compresión sobre la subrasante se hace según el criterio Dormon-kerhoven y de la CRR de Bélgica, las expresiones son las siguientes:

5.1.9.4.1 Criterio de Dormon-kerhoven

Contempla el esfuerzo vertical admisible, transito de diseño y módulo resiliente de la subrasante

$$\phi_{r adm} = \frac{0.007 \times E}{1 + 0.7 \log N} \quad \text{Ecuación 19}$$

5.1.9.4.2 Criterio de la CRR de Bélgica.

CBR capacidad de soporte de la subrasante (%)

$$\phi_{r adm} = \frac{0.9607 \times CBR^{1.2}}{N^{-0.299}} \quad \text{Ecuación 20}$$



5.1.9.5 Deflexión vertical admisible en la superficie Azadmo

Las medidas de deflexión son un criterio de deformabilidad que permite evaluar el estado y la capacidad estructural de un pavimento en función del número de aplicaciones de carga que este es capaz de soportar antes de alcanzar la falla.

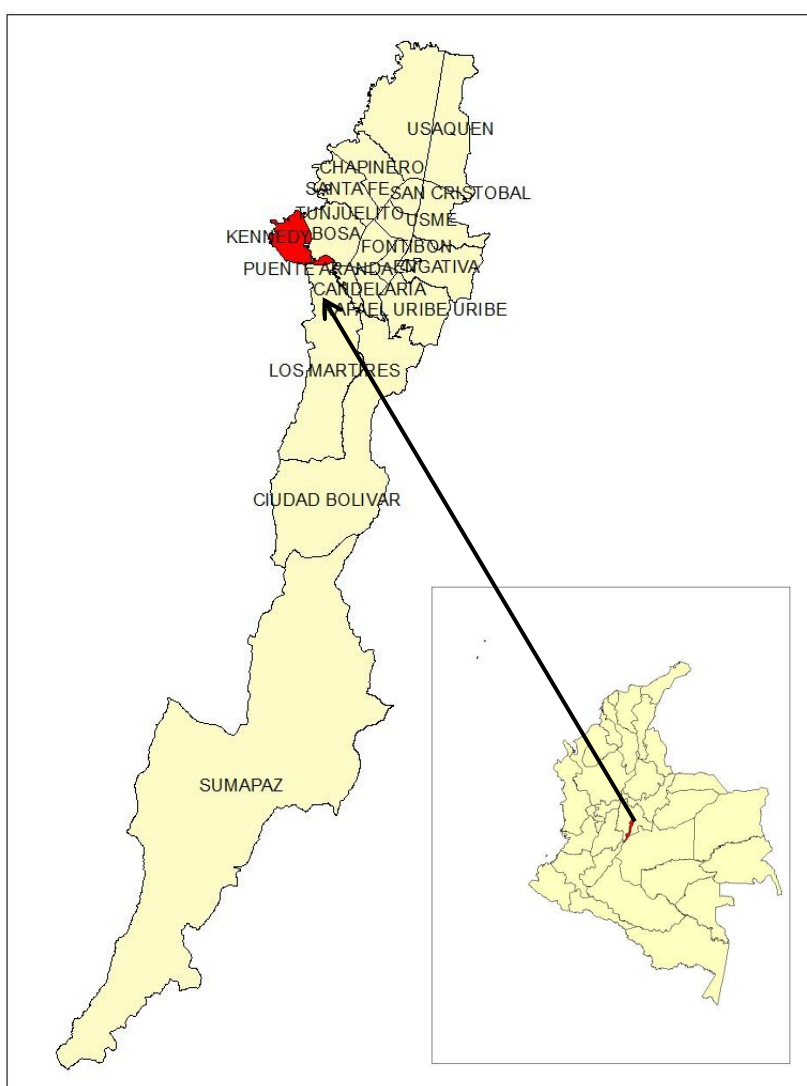
La deflexión vertical admisible de superficie de la estructura de pavimento se calcula con la expresión propuesta por Yang H. Huang:

$$\Delta_{r\,adm} = 26,32202N^{-0,2438} \qquad \text{Ecuación 21}$$

5.2 MARCO GEOGRÁFICO

El proyecto se encuentra localizado en el departamento de Cundinamarca, ciudad Bogotá D.C., localidad de Kennedy, barrio Santa Catalina el cual corresponde a la UPZ No. 46.

Ilustración 11 Localización general de Bogotá y localidad de Kennedy



Fuente: Elaboración propia. Software ARCGIS

Ilustración 12. Localización del proyecto



Fuente: Google Maps

5.2.1 Marco Demográfico

El proyecto está ubicado en la localidad de Kennedy en la UPZ No. 46 Castilla, en el cual predomina los estratos socio económicos 2 y 3. La localidad representa el 14.33% de la población de la ciudad, donde el 30% es menor de 20 años.

En la Tabla 13 se observa de la composición de la población por edad y sexo

Tabla 13. Composición de población por edad y sexo. Localidad Kennedy, año2013

GRUPO DE EDAD	TOTAL	HOMBRES	MUJERES
Dependencia económica			
Menores de 15 años	262,076	131,353	130,723
15-64	643,110	295,523	347,586
Mayores de 64 años	46,144	18,262	64,406
Fuerza Laboral			
PET 12 años y más	735,038	336,756	398,283

Fuente: D.A.P.D, Subdirección de Desarrollo Social, Área de Desarrollo Humano Y Progreso Social, Bogotá, D.C., 2013.

En la localidad, las agrupaciones de edades y de población demandante de servicio educativos según el DANE, el 85 % de los estudiantes de la UPZ No. 46 pertenecen a escuelas y colegios Distritales. En cuanto a vivienda, la población está en un rango de 5,3 personas por hogar, haciéndola una de las localidades con más habitantes, 443 por hectárea, con un desarrollo de 109 hectáreas construidas el cual está en un rango bajo si se toma el número de habitantes de la zona.¹⁶

¹⁶ Dirección de Evaluación - Secretaría de Educación del Distrito - SED -. (s.f.). Recuperado el 6 de diciembre de 2012, de sitio Web Secretaría de Educación del Distrito: <http://www.sedbogota.edu.co/evaluacion>.



Referente a seguridad, este presenta indicadores bajos que son analizados como delitos de alto impacto al igual que el indicador de homicidios, este refleja un porcentaje bajo si analiza o compara con otras UPZ de la localidad.

5.3 MARCO LEGAL

El marco legal tiene como fin dar a conocer la normatividad vigente que aplica para la ejecución del proyecto y por las cuales se rigen los diseños de pavimento flexibles con sus diferentes variables y análisis. A continuación, se presenta una tabla de resumen donde se indica la norma y su título.

Tabla 14 Composición de normas y aplicación al proyecto

NÚMERO DE NORMA, ENTIDAD O AUTOR	DESCRIPCIÓN	APLICACIÓN
Instituto Nacional de Vías y Transporte INVIAS 2013	Normas de ensayo para materiales de carreteras	Sección 100, INV E 172 y INV E 148
Instituto de Desarrollo Urbano IDU	Especificaciones técnicas generales de materiales y construcción para proyectos de infraestructura vial y de espacio público en Bogotá D.C. 2011	Capítulo 3 y 4
Instituto de Desarrollo Urbano IDU	Diseño de pavimentos para bajos volúmenes de tránsito y vías locales para Bogotá D.C.	Caracterización de Sub-rasante

Fuente: Elaboración Propia

6 DISEÑO METODOLÓGICO

6.1 ENFOQUE DE INVESTIGACIÓN

Es un enfoque cuantitativo dado que es necesaria la recolección de datos numéricos a través de la estadística, con la cual, se dé una solución a un problema ingenieril. La presente investigación es utilizada para determinar un diseño óptimo de una estructura de pavimento flexible, para realizar un análisis y chequeo de deflexiones y deformaciones logrando determinar el comportamiento de la estructura.

6.2 TIPO DE INVESTIGACIÓN

La investigación es de tipo cuantitativo debido a que se realizará el cálculo de cada una de las metodologías seleccionadas para determinar un diseño óptimo.

6.3 DISEÑO MUESTRAL

6.3.1 Población

La población involucrada para el método analítico son los vehículos de carga pesada, así mismo a la población residente del sector que se ve afectada día a día por el estado actual de la vía.

6.3.2 Muestra y tipo de muestreo

La muestra escogida será los vehículos de carga pesada que circula en el barrio Santa Catalina en la localidad de Kennedy de la ciudad de Bogotá, dado que es la zona que presenta mayor afectación en su malla vial, para ello, se realizará para el análisis un muestreo probabilístico, del cual se tendrá en cuenta el muestreo aleatorio simple en el cual debe asegurarse que todos los miembros de la población sean incluidos en la lista y luego seleccionar al azar el número deseado de sujetos para así poder desarrollar el método analítico.

6.4 FASES DE LA INVESTIGACIÓN

Tabla 15. Fases de la investigación

NOMBRE DE LA FASE	ACTIVIDADES A REALIZAR
Caracterizar	• Toma de muestras mediante apiques. • Realizar ensayos de laboratorio CBR.
Determinar	• Identificar el número de vehículos que pasan por esta zona. • La periodicidad con la que transitan. • Determinar el método probabilístico que se va desarrollar • Calcular el número de ejes equivalentes
Evaluar	• Revisión de las diferentes normas para diseño de pavimentos. • Diseño de la estructura • Chequeo y Análisis de deformaciones y esfuerzos mediante Depav • Comparación de deformaciones y esfuerzos mediante fórmulas teóricas • Comparación de alternativas mediante presupuesto

Fuente: Elaboración Propia

6.5 INSTRUMENTOS Y TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN

Para poder determinar el factor camión que es un punto clave en nuestro trabajo se deben conocer o recolectar los siguientes datos:

- Información sobre los volúmenes y cargas de tráfico de la vía, para ello es necesario un conteo manual clasificado con el fin de poder estimar variables confiables.
- PDT: Promedio diario de tráfico en un sentido; para ello será vital importancia consultar los datos del Instituto de Desarrollo Urbano – IDU así como del Instituto Nacional de Vías – INVIAS, con el cual se obtendrán los datos recolectados en los últimos años y así realizar un análisis más cercano a la realidad.

6.6 ENSAYOS IN SITU Y LABORATORIO

6.6.1.1 Toma de muestras in Situ

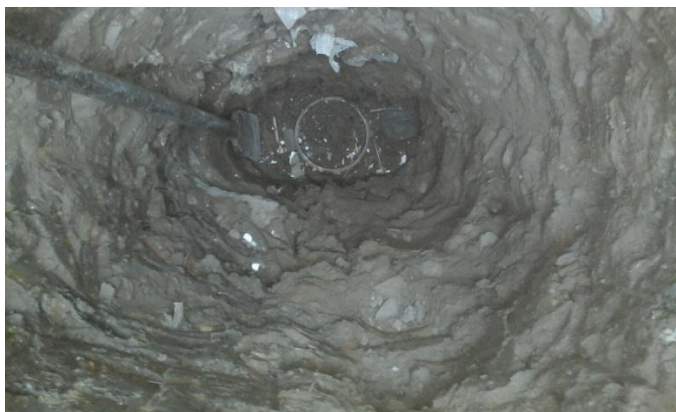
Para la toma de muestra se realizaron dos apiques, los cuales fueron realizados hasta una profundidad de 1,6 m donde se encontró el suelo natural; se tomaron las 2 muestras. A continuación, se muestra el registro fotográfico.

Fotografía 4 Extracción de muestra apique 1



Fuente: Elaboración propia

Fotografía 5 Extracción de muestra apique 2



Fuente: Elaboración propia

7 DISCUSIÓN DE RESULTADOS

7.1 CARACTERIZACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL SUELO

7.1.1 Ensayo CBR

Los resultados arrojados en el laboratorio se indican en la Tabla 16, Tabla 17, Tabla 18, Tabla 19 y en el ANEXO 1.

Tabla 16. Apique 1 muestra analizada antes de la inmersión

MUESTRA ANTES DE INMERSION	
MOLDE No.:	3
MASA MOLDE (g):	4322
MASA MOLDE + MUESTRA (g):	7894
MASA MUESTRA HUMEDA (g):	3572
VOLUMEN MUESTRA (cm ³):	2123
HUMEDAD NATURAL DE LA MUESTRA (%)	317
DENSIDAD SECA (kg/m ³):	1278
C.B.R. A 0,100 pulg (%):	1.2
C.B.R. A 0,200 pulg (%):	0.9
Sobrecarga de penetración (kg)	10

Fuente: Elaboración propia

Tabla 17. Apique 1 muestra analizada después de la inmersión

MUESTRA DESPUES DE INMERSION	
MOLDE No.:	37
MASA MOLDE (g):	4131
MASA MOLDE + MUESTRA (g):	8217
MASA MUESTRA HUMEDA (g):	4086
VOLUMEN MUESTRA (cm ³):	2123
HUMEDAD NATURAL DE LA MUESTRA (%)	35.2
DENSIDAD SECA (kg/m ³):	1424
C.B.R. A 0,100 pulg (%):	0.7
C.B.R. A 0,200 pulg (%):	0.7
Sobrecarga de penetración (kg)	10
LECTURA ANTES DE INMERSIÓN (mm)	9.49
ALTURA DE LA MUESTRA (mm)	121
LECTURA 24 HORAS (mm)	9.52
LECTURA 48 HORAS (mm)	9.66
LECTURA 72 HORAS (mm)	9.78
LECTURA 96 HORAS (mm)	
EXPANSION TOTAL (%)	0.24%

Fuente: Elaboración propia

Tabla 18. Apique 2 muestra analizada antes de la inmersión

MUESTRA ANTES DE INMERSION	
MOLDE No.:	37
MASA MOLDE (g):	4131
MASA MOLDE +MUESTRA (g):	7453
MASA MUESTRA HUMEDA (g):	3322
VOLUMEN MUESTRA (cm ³):	2123
HUMEDAD NATURAL DE LA MUESTRA (%)	29.4
DENSIDAD SECA (kg/m ³):	1209
C.B.R. A 0,100 pulg (%):	2.0
C.B.R. A 0,200 pulg (%):	1.8
Sobrecarga de penetracion (kg)	10

Fuente: Elaboración propia

Tabla 19. Apique 2 muestra analizada después de la inmersión

MUESTRA ANTES DE INMERSION	
MOLDE No.:	37
MASA MOLDE (g):	4131
MASA MOLDE +MUESTRA (g):	7947
MASA MUESTRA HUMEDA (g):	3816
VOLUMEN MUESTRA (cm ³):	2123
HUMEDAD NATURAL DE LA MUESTRA (%)	36.5
DENSIDAD SECA (kg/m ³):	1317
C.B.R. A 0,100 pulg (%):	1.4
C.B.R. A 0,200 pulg (%):	1.4
Sobrecarga de penetracion (kg)	10
LECTURA ANTES DE INMERSIÓN (mm)	3.98
ALTURA DE LA MUESTRA (mm)	117
LECTURA 24 HORAS (mm)	4.06
LECTURA 48 HORAS (mm)	4.17
LECTURA 72 HORAS (mm)	4.21
LECTURA 96 HORAS (mm)	
EXPANSION TOTAL (%)	0.20%

Fuente: Elaboración propia

Los resultados que arrojaron los laboratorios de CBR son, antes de la inmersión de 1.2 % a 2.0 % para cada apique respectivamente, mientras que las muestras en inmersión arrojaron valor de 0.7% a 1,4 %. Según Montejo en su libro de Ingeniería de pavimentos para carreteras en el capítulo 5, título clasificación de subrasante indican que cuando el CBR de la subrasante sea inferior a 2% este requerirá un tratamiento especial de adecuación.

Debido a lo anterior se debe realizar un mejoramiento sobre la capa de subrasante para esto se utiliza la fórmula de IVANOV la cual se define en el numeral 5.1.5.

7.1.2 Mejoramiento de la subrasante

Los cálculos del mejoramiento de la subrasante una vez aplicada la fórmula de IVANOV se presentan en el ANEXO 4, el valor de CBR es tomado debido a el promedio de los resultados obtenidos en los ensayos realizados en el laboratorio continuación se muestra un resumen de los cálculos:

Tabla 20 Cálculos para mejoramiento de la subrasante según la fórmula de IVANOV

CBR		E_{INFERIOR}	E_{SUPERIOR}
SUBRASANTE	MATERIAL GRANULAR	Kg/cm ²	
1.40	20.0	165	1104

n	$n^{3.5}$	$h_1(\text{cm})$	$h_1 / 2a$	$\tan^{-1}(n \cdot h_1 / 2a)$	$1 - (1/n^{3.5})$	$2/\pi$	$2/\pi \cdot J^*$	E_{equiv}	$\text{CBR}_{\text{equiv}}$
2.14	14.27	20.0	0.66	(rad) 0.95	0.93	0.64	0.56	Kg/cm ² 379	4.5

SISTEMA EQUIVALENTE		
CBR EQUIVALENTE =	4.5	%
$E_{\text{EQUIVALENTE}} =$	378.8	kg/cm ²

Fuente: Elaboración Propia

Para cada uno de los diseños se realizará un mejoramiento de la subrasante de 20 cm con material granular y así se podrá trabajar con un valor de CBR de 4.5%.

7.2 CARGA VEHICULAR

7.2.1 Cálculo de Tránsito

Para esta fase metodológica se debe establecer condiciones de estudio:

- Un aforo, vehicular estableciendo horas pico y valles para poder determinar el flujo de vehículos que transitan por la zona de estudio.

Una vez con los datos se procede al cálculo de factor camión utilizando como referencia datos estándar tanto de la norma INVIAS como los MOPT. INGEROUTE y por el propuesto por la Universidad del Cauca.

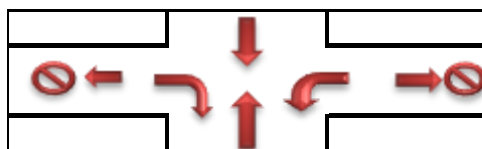
Estos datos se encuentran presente en el ANEXO 2

7.2.2 Aforos vehiculares

La información acopiada durante la toma de datos en campo, se tabuló cada treinta minutos (30 min) con base en los volúmenes registrados por cada movimiento. El resumen de dichos resultados se presenta en el ANEXO 2 del presente documento de acuerdo con todos los movimientos aforados.

ACCESO OCCIDENTE:

Ilustración 13 Movimientos aforo



Fuente: Elaboración Propia.

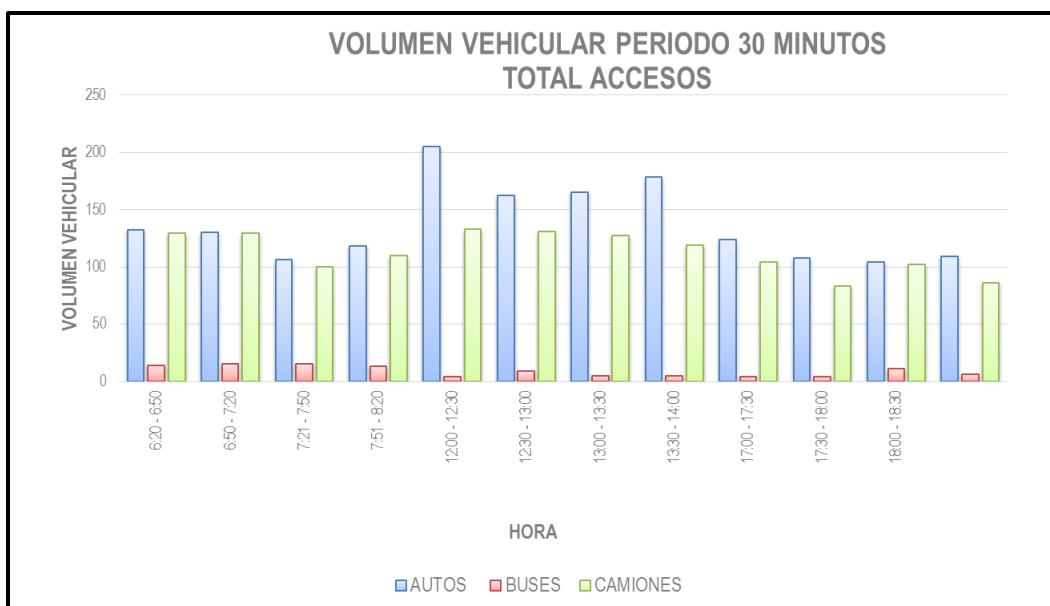
- Movimiento 1: Occidente. Oriente.
- Duración de conteo cada 30 min.

ACCESO ORIENTE:

- Movimiento 1: Oriente- Occidente.
- Duración de conteo cada 30 min.

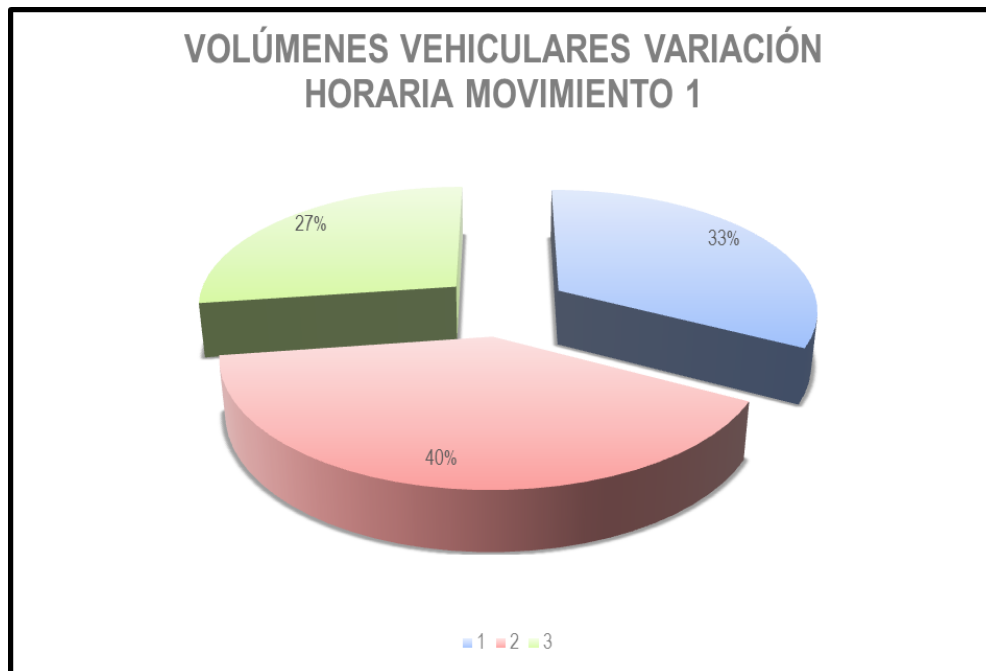
En el presente capítulo se realizan los cálculos de acuerdo con la Información recopilada en el aforo realizado el 13 y 18 de febrero del 2016.

Gráfica 1 Volúmenes vehicular periodo de 30 minutos valores totales.



Fuente: Elaboración Propia.

Gráfica 2 Volúmenes vehiculares horaria Movimiento 1 total accesos.



Fuente: Elaboración Propia.

Se determinó que la vía tiene una alta densidad vehicular como consecuencia del horario en que se realizó el aforo, correspondiente de las 6:00 a.m. a las 7:00 p.m., por lo cual, los vehículos que circulan por esta zona pueden transitar a velocidades lentas dado que converge un cruce de oriente hacia el sur y del occidente hacia sur, además por el estado en que se encuentra la vía.

La carrera 12B presenta una alta capacidad de alojamiento vehicular debido a los carriles sentido Occidente-Oriente, la demanda de esta vía debido al horario es mejor a lo que debería trabajar.

7.2.3 Cálculo factor camión

Se entiende por factor camión al número de aplicaciones de ejes sencillos con carga equivalente de 8.2 toneladas, correspondientes al paso de un vehículo comercial (bus o camión).

De acuerdo al procedimiento mencionado en el numeral 5.1.2 y el ANEXO 2, en los diseños será determinado mediante el método MOPT. INGEROUTE.

Si bien el pesaje constituye el medio más preciso para determinar las características de equivalencia del tránsito real con respecto a ejes sencillos de 8.2 toneladas, lo costoso que resultan estos estudios impide efectuarlos para todos los diseños de pavimento que se deseen desarrollar.

Se procede a realizar el cálculo y la distribución de los camiones con el cálculo obtenido de los datos de aforos relacionados y presentados en el ANEXO 2.

Tabla 21 Distribución de Camiones

DISTRIBUCIÓN CAMIONES			
TIPO	%	# VH	Factor
C-2	49,19%	666	1,40
C-3	21,49%	291	2,40
C-3-S1	7,46%	101	3,67
C-3-S3	21,86%	296	5,00

Fuente: Elaboración Propia.

Una vez iterados los datos, se procede a realizar el despeje de la Ecuación 5 arrojando los siguientes resultados:

Tabla 22 Cálculos del factor Camión

Factor Camión Total	$F_c = \frac{A\% * FE + B\% * FE}{\sum A + B\%}$
Factor Camión Total	1.83

Fuente: Elaboración Propia.

7.2.4 Número de ejes equivalentes

El número de ejes equivalentes será calculado como se indicó en el numeral 5.1.3. A continuación se muestra el cálculo realizado para este ítem, sin embargo, la memoria de cálculo es presentada en el ANEXO 3. El TPD realizado en el numeral se indica la cantidad de vehículos que pasarán en la vía un día en su vida de diseño. A continuación en la Tabla 23 se muestra el resultado de la multiplicación entre la carga de cada uno de los ejes y la cantidad de vehículos de esa denominación que transitan sobre la vía de diseño.

Tabla 23 TPD y cargas de los vehículos

Tipo de Vehículo	Cargas por Eje	Cargas por eje (Ton)	TPD ₀	Cargas de vehiculos (Ton/eje)
Buses	6(S)+11(S)	3.5	33	116.3
C2P	5(S)+11(S)	3.4	83	280.3
C2G	6(S)+11(S)	3.5	76	267.9
C3	6(S)+22(T)	4.9	40	194.1
C4	6(S)+11(S)+22(T)	8.2	40	322.0
C5	6(S)+22(T)+22(T)	9.5	22	209.9
C6	6(S)+22(T)+24(T)	6.1	103	628.3
			396	

Fuente: Elaboración Propia.

Con base a la anterior información se puede determinar que la cantidad de vehículos que pasarán sobre la vía en un día será de 396.

El periodo de diseño seleccionado será de 10 años, debido a que la AASHTO menciona que deberá ser mayores estudios realizados a lo largo de los años recomienda este periodo.

Adicional a lo que se calculó se debe indicar cuál es el factor de crecimiento durante los años de diseño que se adoptaron, en esta ocasión fueron 10 años.

Para el factor de crecimiento se investigó el desarrollo del contrato IDU-163-05 el cual fue desarrollado entre el IDU y la firma CIVILTEC ingenieros LTDA el objeto del contrato fue “Estudios y Diseños para la Construcción, Evaluación para la Rehabilitación y Actualización de Estudios de Accesos a Barrios y Pavimentos locales – Grupo, en Bogotá D.C.”

De allí se adoptó los valores de factor de crecimiento indicados en la zona de Bosa y Kennedy, de allí se extrae que el valor de crecimiento será de un 4.22 %.

Para la determinación del tránsito atraído se consultó el contrato IDU-234 desarrollado entre el IDU y la compañía Consorcio ACI LTDA – SEDIC S.A. contrato que tiene por objeto “Estudios y diseños de pavimentos locales y accesos

a barrios en las localidades de Engativá, Kennedy y Fontibón de Santa Fe de Bogotá”.

En este informe se indica que debido a que la gran mayoría de vías se encuentran desarrolladas y debido a su topografía y geografía, las mismas no se presentarán mayores evoluciones, por lo tanto, se escogió para sus diseños un 2% para el tránsito atraído.

El factor por distribución de carril según la Tabla 5 será de 100 %, debido a que el número de carriles que se está calculando es de 1.

$$N = 365 * 396 * 2.0 * 12.4 * 1.0 = 3.584.592$$

Es importante tener en cuenta que el número de ejes equivalentes calculados es un dato importante el cual nos indica, cuál será la carga total que pasara sobre la vía a diseñar, por esto es importante siempre este factor con esto se podrá analizar el soporte que deberá tener la estructura.

- Evaluar el diseño de la estructura de pavimento bajo el método AASHTO y Shell.

7.3 EVALUACIÓN DEL DISEÑO DE LA ESTRUCTURA DE PAVIMENTO BAJO EL MÉTODO SHELL Y AASTHO

7.3.1 Método de Shell

Para la realización del diseño de pavimento flexible de este proyecto se tienen en cuenta los siguientes datos:

- a) Periodo de diseño (10 años).
- b) El tránsito. El número de ejes equivalentes de 8.2 toneladas, para este proyecto es de 3.584.592 ejes. (Ver ANEXO 3)
- c) La temperatura. Con la ayuda de la información encontrada en la página Web del IDEAM, se realiza el cálculo de la Temperatura media mensual del aire.

Tabla 24 Temperatura promedio registrada en Bogota año 2015

MES	MMAT,C°
Enero	13,4
Febrero	14,1
Marzo	14,3
Abril	14,5
Mayo	14,6
Junio	14,1
Julio	14
Agosto	14,2
Septiembre	14,1
Octubre	14,2
Noviembre	14,5
Diciembre	13,9

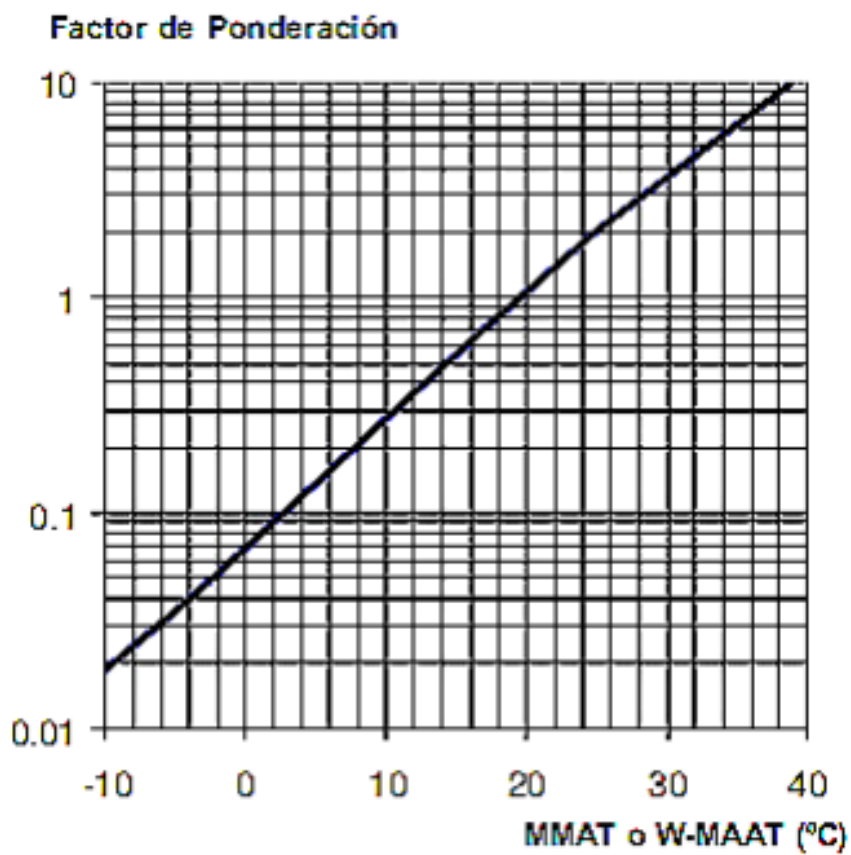
Fuente: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia, IDEAM

7.3.2 Aplicación del método Shell

7.3.2.1 Factor de Ponderación.

Para el cálculo de la temperatura media mensual del aire, es necesario utilizar la curva de ponderación de temperatura.

Ilustración 14. Grafica Factor de ponderación- MMAT



Fuente: SHELL INTERNATIONAL PETROLEUM COMPANY LIMITED. Manual de Diseño de Pavimentos. Londres: SHELL, 1985. 328 p.

Para cada temperatura de la
Tabla 24 se ingresa a la

Ilustración 14 , Curvas de ponderación de temperaturas, para el cálculo de factor de ponderación y se encontraron los siguientes resultados:

Tabla 25 Calculo de factor de ponderación.

MES	MMAT,C°	Factor de Ponderación
Enero	13,4	0,42
Febrero	14,1	0,47
Marzo	14,3	0,49
Abril	14,5	0,50
Mayo	14,6	0,51
Junio	14,1	0,47
Julio	14	0,46
Agosto	14,2	0,48
Septiembre	14,1	0,47
Octubre	14,2	0,48
Noviembre	14,5	0,5
Diciembre	13,9	0,45
Factor de ponderación promedio.	14,2	0,48

Fuente: Elaboración propia.

El valor del factor de ponderación promedio es de 0,48. El valor de la temperatura media anual es de 14,2 °C.

7.3.2.2 Cálculo del Módulo resiliente de la Subrasante.

Con el valor del CBR de la subrasante de 4.5%, se utiliza la siguiente expresión:

$$Mr = 10x^7 X CBR \left(\frac{N}{m^2} \right) \text{ Ecuación 22}$$

$$Mr = 10^7 \times 4.5 \% = 4.5 \times 10^7 \left(\frac{N}{m^2} \right)$$



7.3.2.3 Determinación del índice de penetración y la temperatura T800 del asfalto.

El asfalto que se utiliza en las plantas de producción de mezcla asfáltica en la Ciudad de Bogotá, tienen los siguientes valores de penetración y punto de ablandamiento:

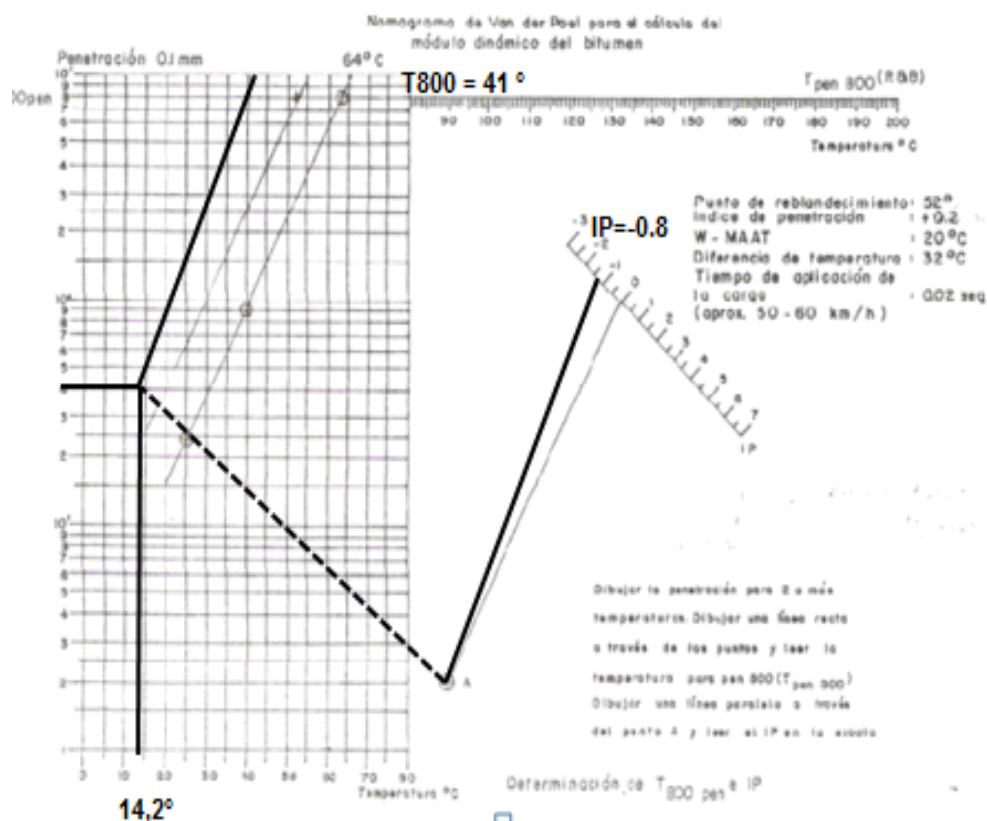
- ✓ Asfalto 80-100

Características del asfalto.

- ✓ Penetración original, 0.1mm: 70
- ✓ Punto de ablandamiento, °C: 25
- ✓ Características del asfalto envejecido en prueba de película delgada
- ✓ Penetración residual, 0.1mm: 44
- ✓ Punto de ablandamiento, °C: 41

Con los valores de penetración y punto de ablandamiento, para el asfalto envejecido en prueba de película delgada, se procede a calcular el T800 y el Índice de Penetración,

Ilustración 15. Nomograma para calcular el índice de penetración y la temperatura T800.



Fuente: MONTEJO, Alfonso. Ingeniería para pavimentos de carreteras. 2 ed. Bogotá: Universidad Católica 2001.p. 291

$$T_{800} = 41^{\circ}\text{C} \text{ y } I_p = -0.8$$

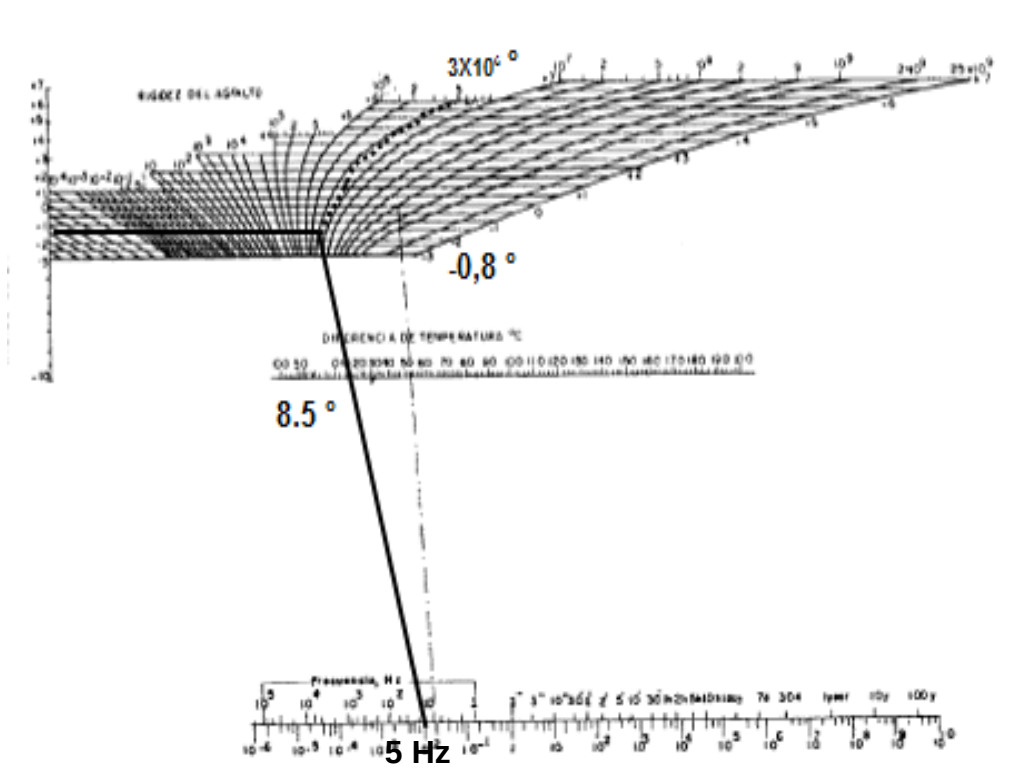
7.3.2.4 Determinación del stiffness del asfalto a la temperatura de trabajo en obra.

Para la determinación del stiffness del asfalto se empleará la Ilustración 9. Se requiere tener, el índice de penetración ($I_p = -0.8$) y el tiempo de aplicación de carga. La Shell recomienda emplear un tiempo de 0.02 segundos que corresponde a una velocidad de 50 – 60 km/hora. Así como el $\Delta t = T_{800} - T_{mezcla}$, donde T_{mezcla} es la temperatura de la mezcla que es función de la temperatura ambiente y se obtiene el valor de $T_{mezcla} = 32.5^{\circ}\text{C}$. Es decir que

$$\Delta t = 41^{\circ}\text{C} - 32.5^{\circ}\text{C} = 8.5^{\circ}\text{C}$$

Ecuación 23

Ilustración 16 Nomograma de Van Der Poel para determinar el modulo dinámico (Stiffness) del asfalto.



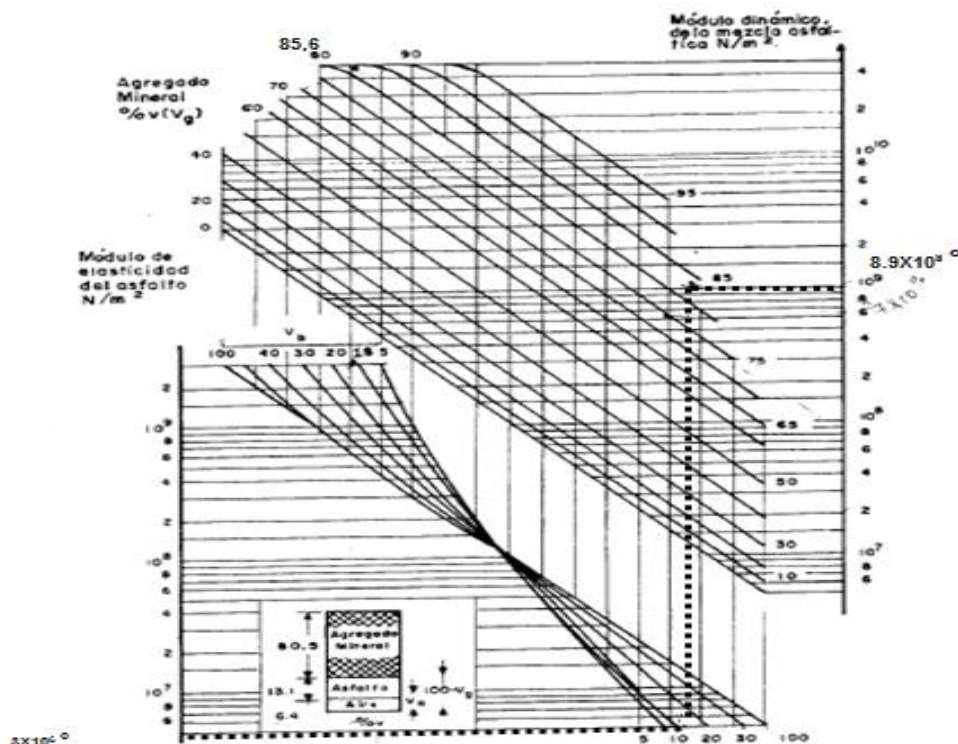
Fuente: ARENAS LOZANO, Hugo León. Tecnología del cemento asfáltico. 5 ed. Popayán: Unicauca, 2005. p. 197.

7.3.3 Determinación del stiffness de la mezcla asfáltica.

Se emplea la Ilustración 16 y para ello es necesario conocer, además del Stiffness del Asfalto ($3 \times 10^6 \text{ N/m}^2$), la composición volumétrica de la mezcla asfáltica con el diseño de ella en el laboratorio. Para el caso de las mezclas asfálticas utilizadas en la ciudad de Bogotá, se realizó un estimativo según el Diseño Marshall de la siguiente composición, adicional esto se estima emplear un tiempo de 0.02 segundos que corresponde a una velocidad de 50 – 60 km/hora:

- % Agregados 85.6
- % Asfalto efectivo 11.3
- % Vacíos con aire 3.1

Ilustración 17. Nomograma para el cálculo del módulo dinámico (Stiffness) de las mezclas asfálticas



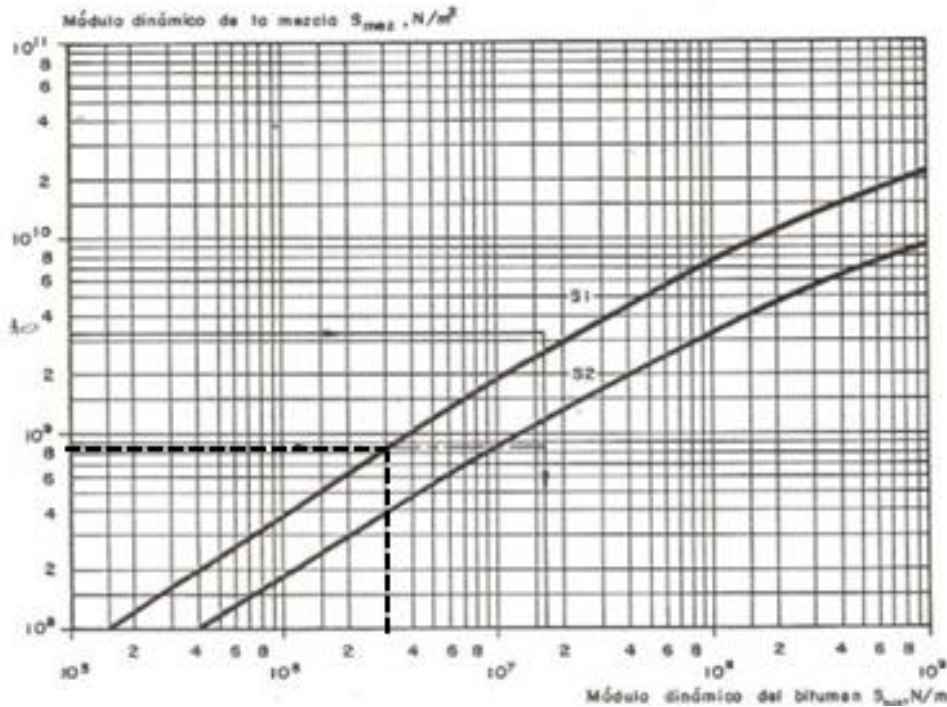
Fuente: MONTEJO, Alfonso. Ingeniería para pavimentos de carreteras. 2 ed. Bogotá: Universidad Católica 2001.p. 295

El valor obtenido del módulo dinámico de la mezcla asfáltica es de $8.9 \times 10^8 \text{ N/m}^2$.

7.3.4 Determinar si la mezcla es del tipo S1 o S2

Para identificar el código de la mezcla se hace necesario emplear la Ilustración 18 en la cual se ubica el punto de convergencia del stiffness del asfalto y de la mezcla.

Ilustración 18 Relaciones entre la rigidez de la mezcla y la rigidez del asfalto.



Fuente: MONTEJO, Alfonso. Ingeniería para pavimentos de carreteras. 2 ed. Bogotá: Universidad Católica 2001.p. 297

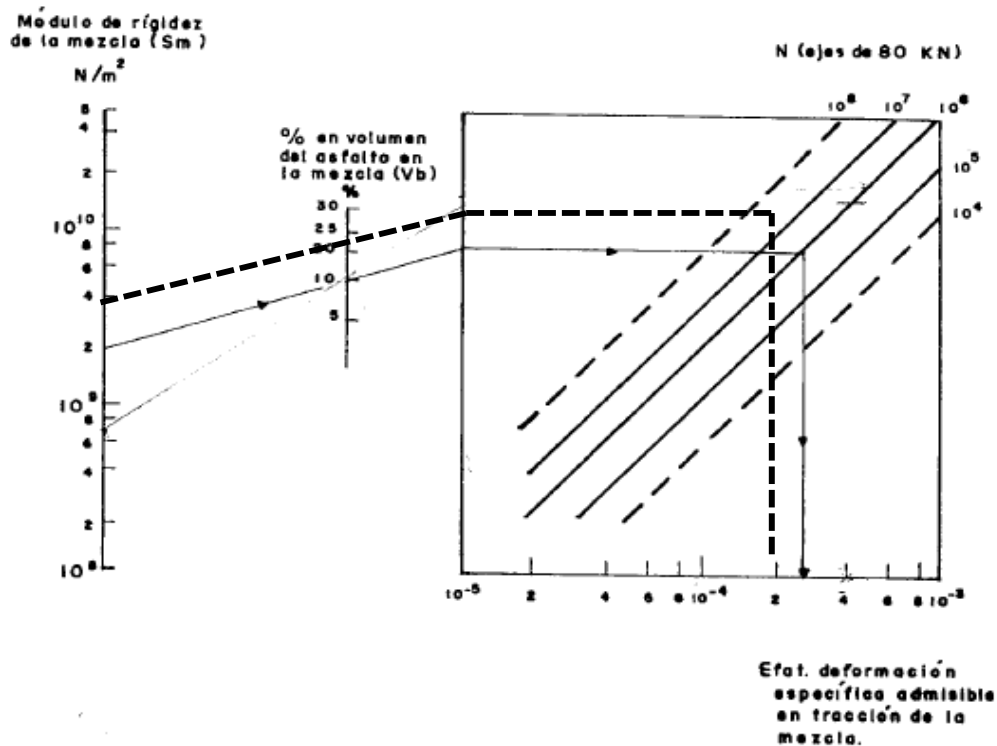
Con el stiffness del asfalto de $3 \times 10^6 \text{ N/m}^2$ y el stiffness de la mezcla de $8.9 \times 10^8 \text{ N/m}^2$. Se observa que el punto de convergencia se encuentra más cercano a la curva S1, por lo que este es el tipo de mezcla que se adoptara.

Determinación de la deformación máxima admisible de tracción en la fibra inferior de las capas asfálticas:

Se emplea la Ilustración 19 se entra a ella con módulo de elasticidad dinámica de $8.9 \times 10^8 \text{ N/m}^2$, volumen del asfalto (11.3%) se prolonga la línea que los une hasta el marco del cuadro, posteriormente 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 que es

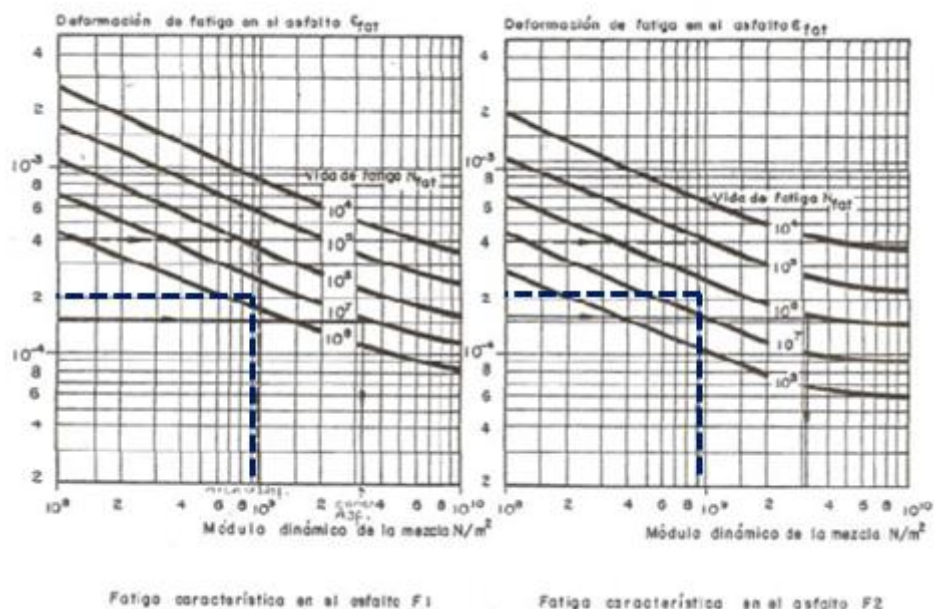
$$\epsilon_t = 3.7 \times 10^{-4}\%$$

Ilustración 19 Nomograma de fatiga basado en Smix y Vb



Fuente: MONTEJO, Alfonso. Ingeniería para pavimentos de carreteras. 2 ed. Bogotá: Universidad Católica 2001.p. 298

Ilustración 20 Características de fatiga para asfalto tipo F1 y para asfalto tipo F2



Fuente: MONTEJO, Alfonso. Ingeniería para pavimentos de carreteras. 2 ed. Bogotá: Universidad Católica 2001.p. 298

Se escoge el valor más aproximado al número de ejes equivalentes para este caso se adopta el F1 dado que está más cerca al valor mencionado anteriormente.

7.3.5 Identificación del código total de la mezcla.

Teniendo en cuenta los resultados de los códigos de rigidez y de fatiga de la mezcla, se concluye que la mezcla es del tipo S1-F1, código al que se debe adicionar, el tipo de asfalto con base en la penetración obtenida. Para el asfalto utilizado en los procedimientos anteriores se tiene una penetración residual de 44 (1/10mm) para 25 °C, se adopta el valor de 50, debido a que solo existe elección entre 50 o 100. Por lo que se obtiene un tipo de mezcla con el siguiente código:

S1 – F1 – 50

7.3.6 Diseño Estructural

7.3.7 Empleo de las gráficas de diseño

En una gráfica SHELL los espesores necesarios de las diversas capas del pavimento se hallan en base a cuatro parámetros:

- a) Tránsito expresado, como N, el cual varía entre 10.000 ejes y 100.000.000 ejes.
- b) Clima, evaluado por la temperatura media anual ponderada del aire y presenta valores para (4° - 12° - 20° - 28°C).
- c) Módulo de elasticidad de la subrasante de 2.5, 5×10^7 , $1, 2 \times 10^8$ N/m² tendrá equivalencia en CBR 2.5, 5, 10 y 20% respectivamente.
- d) Código de la mezcla (ocho en total).

En cualquier grafica de diseño tres de los valores son constantes y el otro variable y por lo tanto, deberá escogerse una gráfica de diseño apropiada en función de los datos que se dispongan.¹⁷

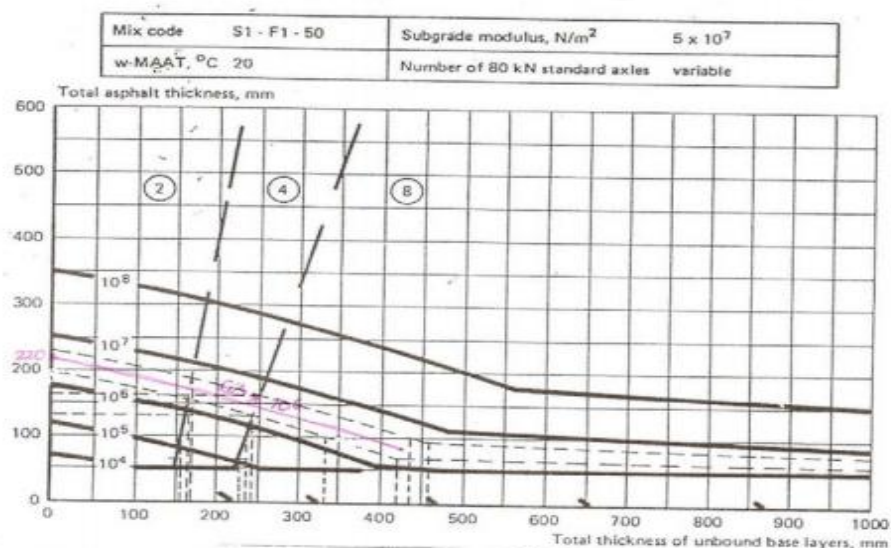
Para el caso de este diseño el resumen de los parámetros es el siguiente:

- a. N = 1,861 ejes
- b. Módulo de elasticidad de la subrasante 4.5×10^7 (N/m²)
- c. Código de la mezcla: **S1 – F1 – 50**.

Alternativa 1: Inicialmente se toma de la Carta HN 49 y los valores de las dimensiones de la capa de asfalto para un Número de ejes equivalentes de 3.584.592

¹⁷ ASPHALT INSTITUTE. Asphalt Paving Manuals Resurfacing and Asphalt Concrete Paving Mix Design Methods for Hot-Mix Asphalt Paving Construction of Hot Mix Asphalt Pavements. Washington: Asphalt Institute, 2008. p. 49.

Ilustración 21 Carta HN49



Fuente: MONTEJO, Alfonso. Ingeniería para pavimentos de carreteras. 2 ed. Bogotá: Universidad Católica 2001.p. 303

Se identifican los Siguiente Valores:

Interpolaciones para las condiciones del proyecto:

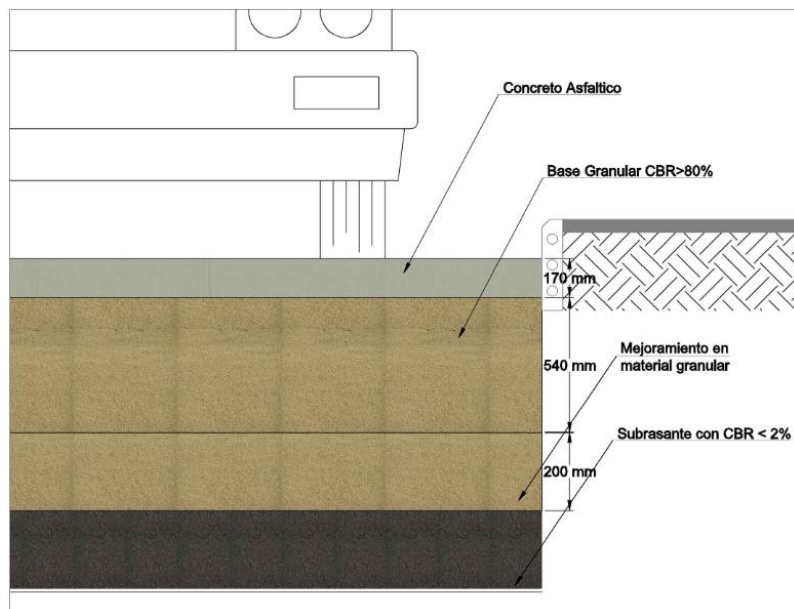
- N = 1.861 ejes
- Módulo de elasticidad de la subrasante : 4.5×10^7 (N/m²)
- Código de la mezcla: **S1 – F1 – 50**.

Tabla 26 Propuestas de alternativas de capas método Shell

ALTERNATIV A N°	ESPESOR DE LAS CAPAS GRANULARES, h2(mm)		ESPESOR DE LA CAPA ASFÁLTICA, h1(mm)
	CBR≥20	CBR≥80	
1	-	540	170
2	260	370	130

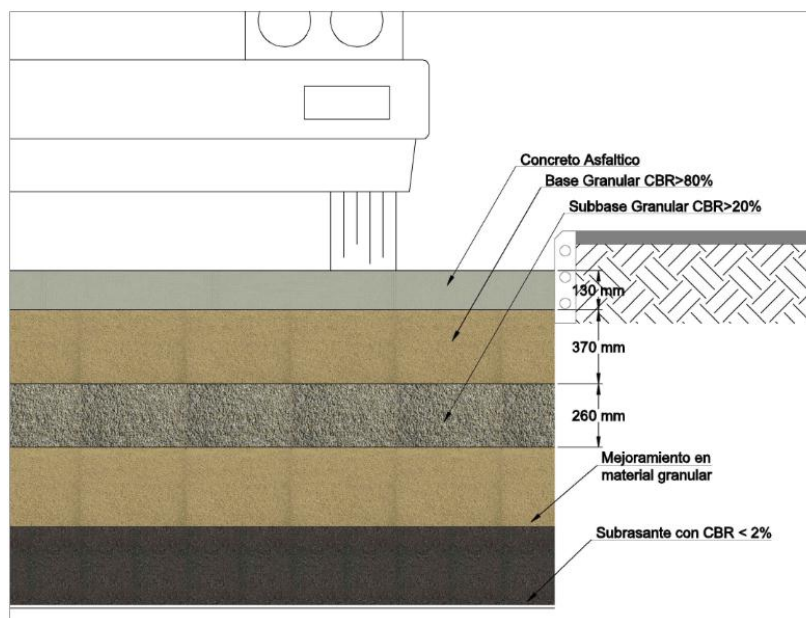
Fuente: Elaboración Propia

Tabla 27 Estructura de pavimento diseñada a partir del método SHELL Alternativa 1



Fuente: Elaboración propia

Tabla 28 Estructura de pavimento diseñada a partir del método SHELL Alternativa 1



Fuente: Elaboración propia

7.4 MÉTODO DE AASHTO

7.4.1 Características de la rigidez de las capas

7.4.1.1 Capa Asfáltica

- Índice de penetración: Se utiliza la fórmula de Pfeifer los datos de temperatura y penetración, se obtiene que la susceptibilidad térmica del asfalto es (A)

El T800 en el nomograma para calcular el índice de penetración y la T800 arroja el valor de 41°

$$A = \frac{\log 70 - \log 800}{25 - 41} = 0.066$$

Por lo cual el índice de penetración será:

$$IP = \frac{20 - (500 \times 0.066)}{1 + (50 \times 0.066)} = -3.0$$

- Diferencia de temperatura (ΔT): Diferencia entre T800 y la temperatura de la mezcla asfáltica, que para la AASHTO es fija de 20 °C.

$$\Delta T = 41^{\circ}\text{C} - 20^{\circ}\text{C} = 21^{\circ}\text{C}$$

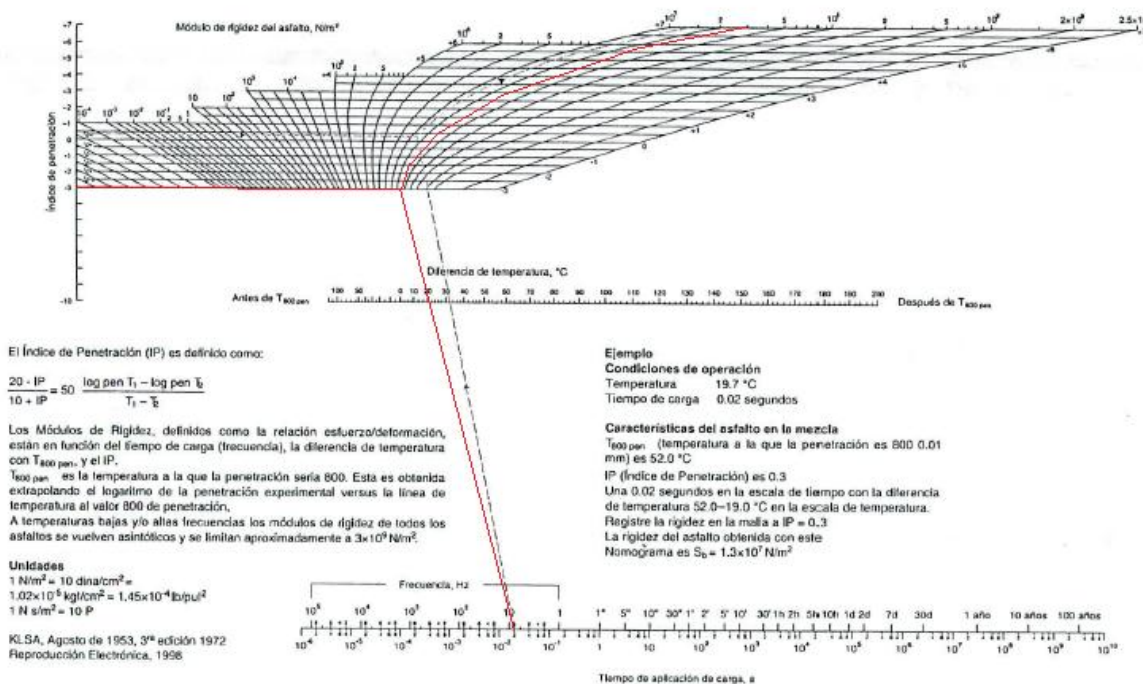
- Módulo dinámico (Sb): Se utiliza el nomograma de Van der Poel con los siguientes datos

Tiempo de carga: 0.02 seg

Diferencia de temperatura: 21°C

Índice de penetración: -3

Ilustración 22 Nomograma de Van der Poel para determinar el módulo de rigidez del asfalto



Fuente: SHELL INTERNATIONAL PETROLEUM COMPANY LIMITED. Shell pavement design manual – asphalt pavements and overlays for road traffic. Londres, 1978. p. A-2

Módulo de rigidez: $S_b = 4.0 \times 10^7 \text{ N/m}^2$

Modulo dinámico de la mezcla (S_{mix}): Se utilizará el nomograma de Bonnaure, donde se tendrán en cuenta los siguientes datos:

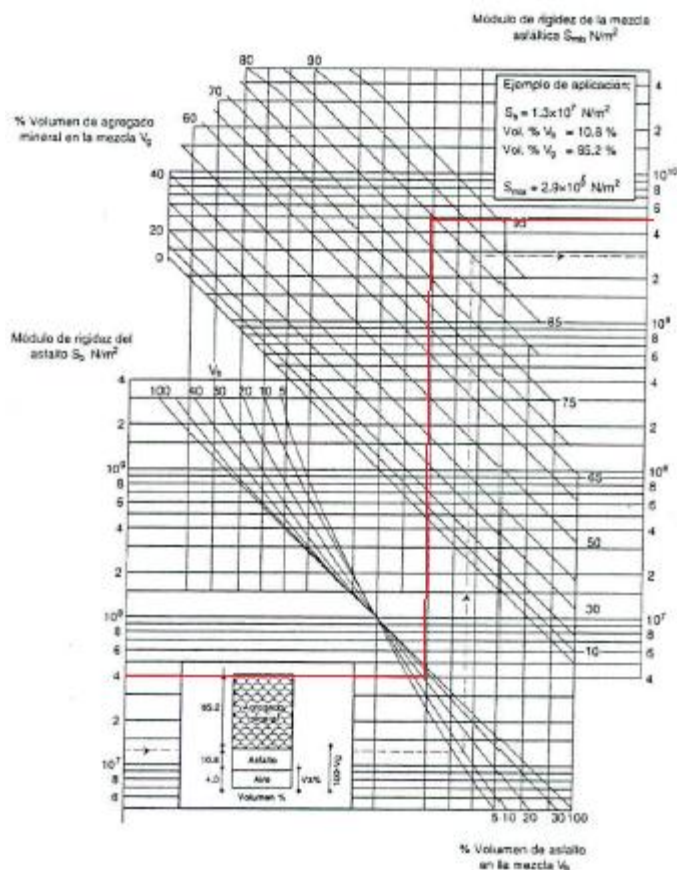
Para el caso de las mezclas asfálticas utilizadas en la ciudad de Bogotá, se realizó un estimativo según el Diseño Marshall de la siguiente composición:

% Agregados 85.6

% Asfalto efectivo 11.3

% Vacíos con aire 3.1

Ilustración 23 Nomograma para el cálculo del módulo dinámico de mezclas asfálticas



Fuente: SHELL INTERNATIONAL PETROLEUM COMPANY LIMITED. Shell pavement design manual – asphalt pavements and overlays for road traffic. Londres, 1978. p. A-4

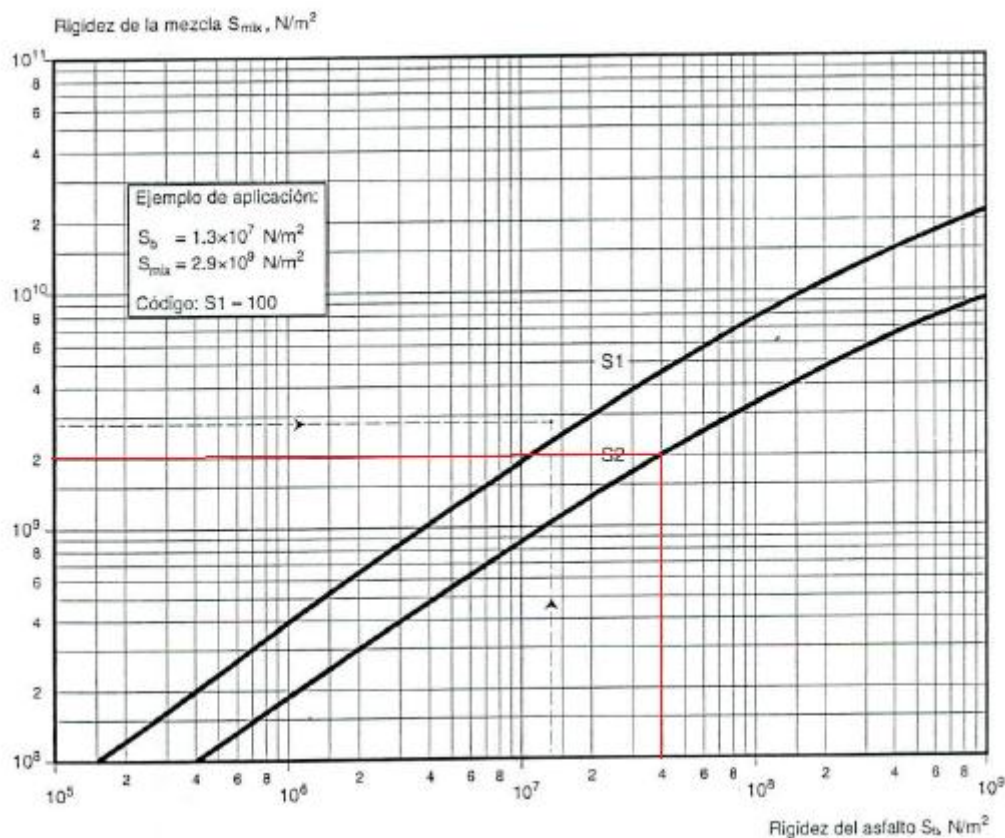
Módulo de rigidez de la mezcla es $S_{mix} = 5 \times 10^9$ N/m^2

La relación de Poisson de se adopta es de 0.35

7.4.1.2 Base tratada con emulsión asfáltica

Modulo dinámico de la base estabilizada con emulsión (Ebee): Con un módulo dinámico del asfalto $S_b = 4.0 \times 10^7$ N/m^2 , para una mezcla abierta de baja rigidez con asfalto de penetración 100 1/100 mm (Tipo S2-100) y con ayuda de la carta M-1 de la Shell.

Ilustración 24 Carta M-1: Clasificación de la rigidez de la mezcla en función de la rigidez de la mezcla y el asfalto



Fuente: SHELL INTERNATIONAL PETROLEUM COMPANY LIMITED. Shell pavement design manual – asphalt pavements and overlays for road traffic. Londres, 1978. p. 59

El modulo dinámico de la base estabilizada es $E_{bee} = 2.0 \times 10^9 \text{ N/m}^2$

7.4.1.3 Base granular y Subbase granular

Según el valor de numero de ejes equivalentes donde el resultado de su cálculo es 3.584.592 según Instituto de Desarrollo Urbano (IDU) se debe determinar en qué rango de transito se encuentra el número de ejes equivalentes, para este caso y según la Tabla 6 el transito se clasifica como T3, con este tránsito se puede definir el tipo de base y subbase granular que se debe utilizar para el diseño, según la Tabla 7 en la clasificación que se encuentra el transito se podrá utilizar una base granular tipo BG-B y como subbase granular SBG-B.

Debido al tipo de base y subbase el IDU indica que debe tener un porcentaje mínimo de CBR, de la siguiente manera:

Tabla 29. Base y Subbase granular

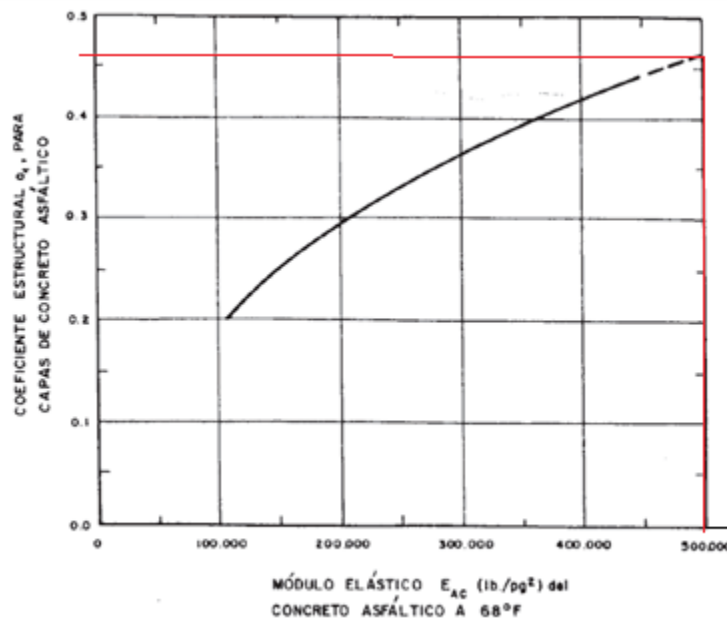
Material	CBR %	E (kg/cm ²)
Base granular	100%	2,109
Subbase granular	40%	1,265

Fuente: Elaboración propia

7.4.2 Coeficientes estructurales de las capas

- Coeficiente de la capa asfáltica (a_1): Se tiene el módulo de elasticidad de 50,985 Kg/cm² = 725000 lb/in² según la Ilustración 25 el coeficiente será de 0.46

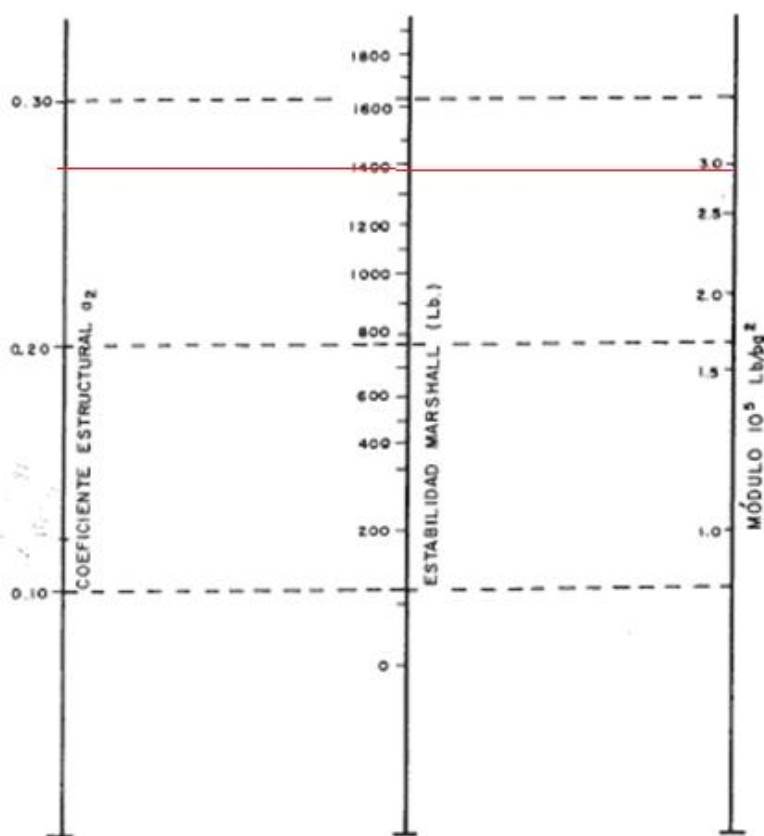
Ilustración 25 Grafica para hallar a_1 en función del módulo resiliente del concreto asfáltico.



Fuente: Montejo, Alfonso. Ingeniería para pavimentos de carreteras. pp. 268

- Coeficiente estructural de la capa de base asfáltica (a_2): Se tiene el módulo de elasticidad de $20394 \text{ Kg/cm}^2 = 290000 \text{ lb/in}^2$ según la Ilustración 26 el coeficiente será de 0.26

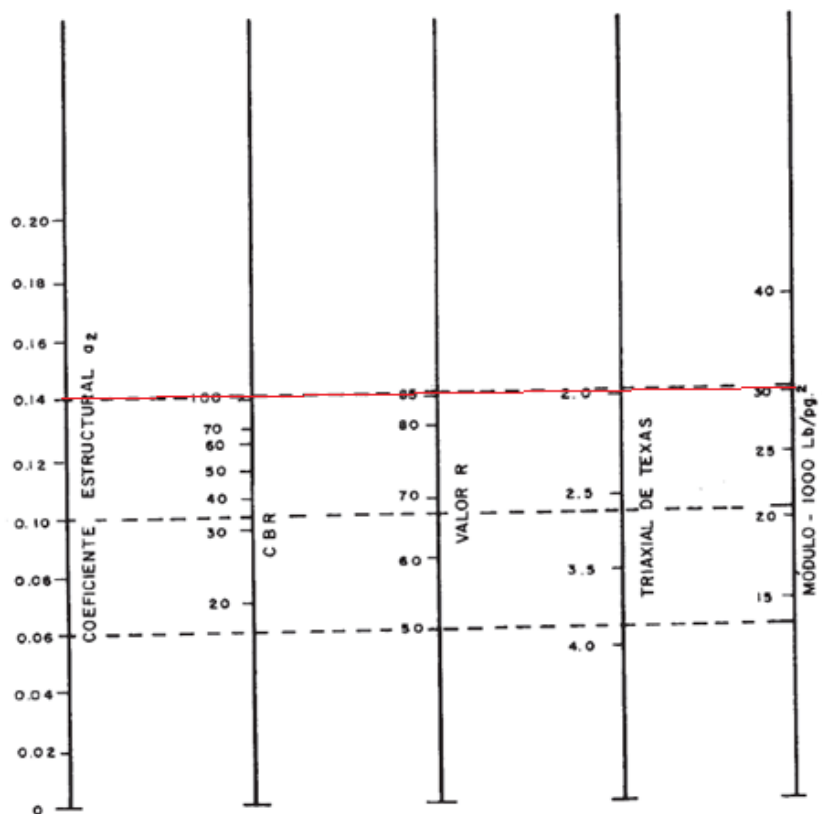
Ilustración 26 Variación de coeficiente a_2 en bases tratadas con asfalto para diferentes parámetros de resistencia.



Fuente: Montejo, Alfonso. Ingeniería para pavimentos de carreteras. pp. 272

- Coeficiente estructural de la capa de base granular (a_3): Se tiene un valor de CBR de 100% según la Ilustración 27 el coeficiente será de 0.14

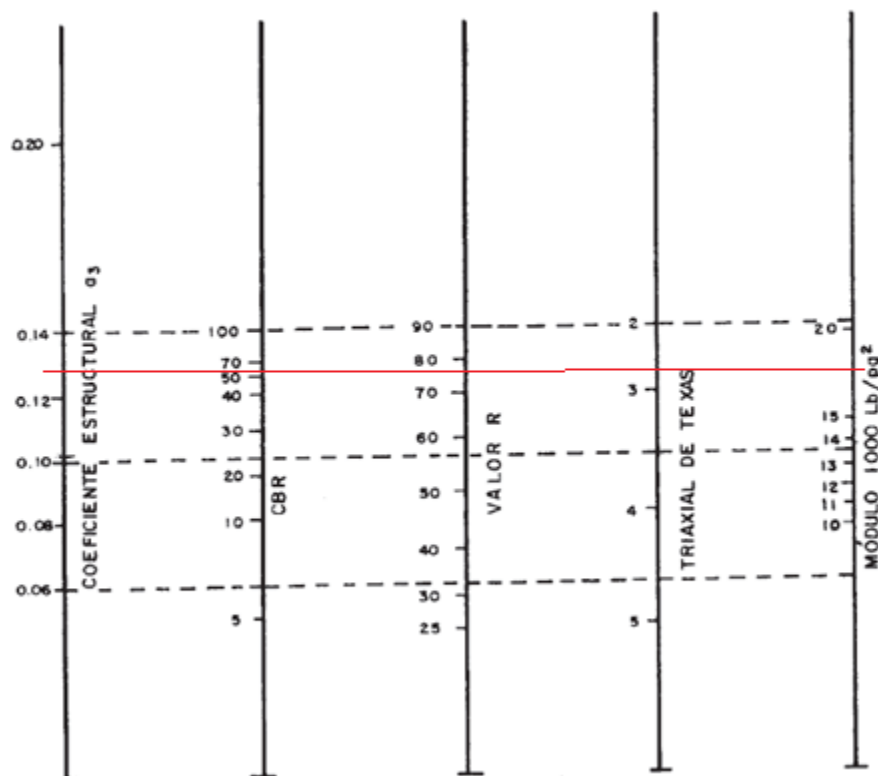
Ilustración 27 Variación de coeficiente a_2 con diferentes parámetros de resistencia de la base granular.



Fuente: Montejo, Alfonso. Ingeniería para pavimentos de carreteras. pp. 269

- Coeficiente estructural de la capa de base granular (a_4): Se tiene un valor de CBR de 60% según la Ilustración 28 el coeficiente será de 0.13

Ilustración 28 Variación de coeficiente a_4 con diferentes parámetros de resistencia de la subbase granular.



Fuente: Montejo, Alfonso. Ingeniería para pavimentos de carreteras. pp. 273

7.4.3 Condiciones de drenaje

Según la Tabla 10 y la Tabla 11 se considera que la calidad de drenaje para la base granular será bueno y para la subbase granular será aceptable para ambos casos se indica que el tiempo al que estará expuesta la estructura será mayor al 25%. Por lo tanto, los coeficientes de drenaje recomendados son:

- Base granular: $m_3 = 1.0$
- Subbase granular $m_4 = 0.80$

7.4.4 Determinación del número estructural

Nivel de confiabilidad: Según la Tabla 12 se tomara como vía urbana y como una arteria principal por lo cual sus valores de confiabilidad serán de 80 – 99 %, por lo cual se tomará el valor del 90%.

Desviación estándar: La desviación estándar desarrollado por la AASHTO será de 0.45

Nivel de Serviciabilidad: De acuerdo con los ensayos realizados por la AASHTO, recomiendan un valor de Serviciabilidad inicial de $P_o = 4.2$ y una Serviciabilidad final de $P_t = 2.0$. Por lo tanto y aplicando la ecuación obtendremos:

$$\Delta PSI = 4.2 - 2.0 = 2.2$$

Módulo resiliente de la subrasante: Para un CBR de 4.5 % se estima que el módulo resiliente de la subrasante (M_r) es:

$$M_r = 100 * 4.5 = 450 \frac{kg}{cm^2}$$

7.4.5 Chequeo del número estructural

El chequeo del número estructura se realiza con la ayuda de dos programas, el primero de ellos es el AASHTO 93 el cual fue desarrollado por el Ingeniero Luis Ricardo Vásquez Varela en el año 2000 en Manizales, el cálculo se muestra a continuación:

Ilustración 29 Programa Ecuación AASHTO 93



Fuente: Elaboración Propia

El número estructural seleccionado será de 4.23.

Se indican diferentes espesores de capas por lo cual es importante realizar la comparación del número estructural hallado mediante el programa y el número estructural del pavimento.

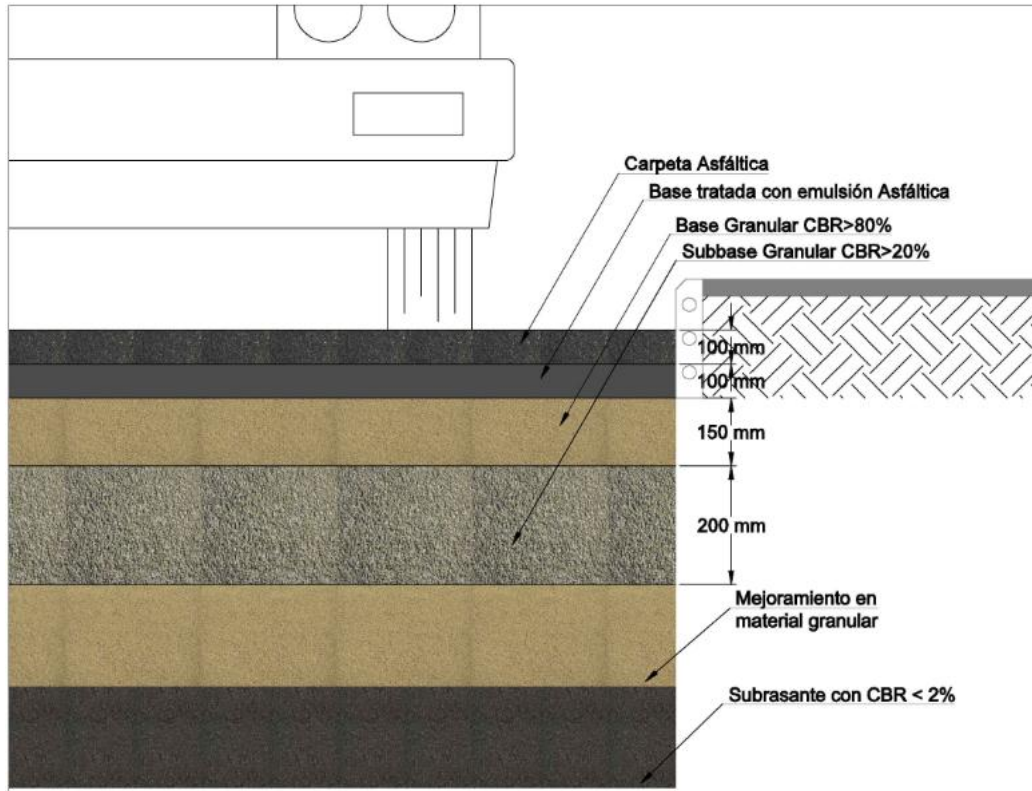
Tabla 30 Resumen de diseño de pavimentos AASHTO

	Coeficiente capa	Espesor capa (in)	SN
a_1	0.46	3.94	1.81
a_2	0.26	3.94	1.02
a_3	0.14	5.91	0.83
a_4	0.13	7.87	0.82
		21.65	4.48

Fuente: Elaboración Propia

$$SN_{\text{Tránsito}} = 4.23 < SN_{\text{Estructura}} = 4.48, \text{ Cumple}$$

Tabla 31 Estructura de pavimento diseñada a partir del método AASHTO Alternativa 3



Fuente: Elaboración Propia

7.5 ESFUERZOS, DEFORMACIONES Y DEFLEXIONES ADMISIBLES PARA ESTRUCTURAS DE PAVIMENTO FLEXIBLE.

La estructura de pavimento diseñada se debe chequear por medio del método racional, con el propósito de verificar que los esfuerzos, deformaciones y deflexión críticos no superen valores admisibles¹⁸

Ley de fatiga de la Shell se expresa de la siguiente manera:

$$\epsilon_{r adm} = (0,856 V_b + 1,08) E_1^{-0.36} \left(\frac{N}{K} \right)^{-0.20} \quad \text{Ecuación 24}$$

Información necesaria para determinar los esfuerzos, deformaciones y deflexión admisibles para la estructura se presenta a continuación:

- Tránsito, $N = 3.584.592$ eje equivalente de 8.2
- Nivel de Confianza Shell, $NC = 85\%$
- Capacidad de soporte de la Subrasante, $CBR = 4,5 \% = 45 \text{ MPa} = 450 \text{ kg/cm}^2$
- Porcentaje de volumen de asfalto de la mezcla, $V_b = 11,3 \%$
- Modulo dinámico de la capa asfáltica, $S_{mix} = 8,89 \times 10^8 \text{ N/m}^2 = 8890 \text{ Mpa}$.
- Coeficiente de Calage, $K = k_1 \times k_2 \times k_3 = 10 \times 2,5 \times 0,33 = 8,25$.

De acuerdo a las ecuaciones **13, 14, 15, 16, 17,18 y 19** mencionadas anteriormente y con los datos admisibles se procede a calcular y despejar cada ítem determinando la Tabla 32 Esfuerzos, deformación y deflexión admisibles para el diseño por el método Shell

¹⁸ Nociones sobre los métodos de diseño. Op. Cit, p.35.

Tabla 32 Esfuerzos, deformación y deflexión admisibles para el diseño por el método Shell

CRITERIO	PARÁMETRO	VALOR
Shell	Deformación radial admisible de tracción en la base de la capa asfáltica, ϵ_r adm	$2,584 \times 10^{-4}$
Shell (NC=85%)	Deformación vertical admisible de compresión sobre la subrasante ϵ_r adm	$3,046 \times 10^{-4}$
CRR de Belgica	Esfuerzo vertical admisible de compresión sobre la subrasante	0,455
Dormon-Kerhoven	Esfuerzo vertical admisible de compresión sobre subrasante	0,302
Huang	Deflexión admisible en la superficie de la estructura de pavimento.	0,113

Fuente: Elaboración Propia.

7.5.1 Esfuerzos, deformación y deflexión admisibles de la estructura diseñada por el método Shell

Utilizando el programa DEPAV de la Universidad del Cauca, se determinan los esfuerzos, deformaciones y deflexiones en cualquier punto del modelo estructural.

Tabla 33 Esfuerzos, deformación y deflexión de la estructura diseñada por el método Shell.

CRITERIO	ALTERNATIVA	DEFORMACIONES (mm/mm)		Esfuerzo Vertical, σ_z (kg/cm ²)	Deflexión Δz (mm)
		Radiales	Verticales		
DEPAV	1	$1,68 \times 10^{-5}$	$1,040 \times 10^{-4}$	$6,08 \times 10^2$	0,735
	2	$7,45 \times 10^{-5}$	$1,130 \times 10^{-4}$	$7,11 \times 10^2$	0,543

Fuente: Elaboración Propia.

A continuación se presentan los reportes de los resultados obtenidos con el programa DEPAV.

7.5.1.1 Alternativa 1

El programa DEPAV permite realizar análisis de deformaciones a la estructura diseñada de pavimento flexible, dicho software es utilizado en el proyecto para realizar un análisis detallado de las deformaciones presentadas en cada estructura diseñada y para ello se utilizarán los parámetros indicados por los creadores del mismo para su óptimo funcionamiento:

- Radio de curvatura: 10.78cm
- Presión de contacto: 5.61 kg/cm²
- Distancia entre llantas: 32.41 cm
- Módulos de elasticidad E_i en kilogramos por centímetro cuadrado de las distintas capas.
- Relaciones de Poisson μ_i de las distintas capas
- Espesores de las capas H_i
- Tipo de interfase entre las capas

Tabla 34 Datos de interfase entre las capas Alternativa 1

Material	E (Kg/cm2)	ν	H (cm)	Ligada / No
Concreto Ásfaltico	9075	0.35	17	L
Base Granular	8157	0.50	54	L
Subrasante	450	0.50		

Fuente: Elaboración propia

Ilustración 30 .Datos entrada Estructura propuesta.

Número de Capas [2..6]		3		
Radio de Carga [cm]		10.8		
Presión de Contacto [Kg/cm²]		5.59		
Distancia Entre Ejes de Llantas [cm]		32.4		
Capas	E [Kg/cm²]	μ []	H [cm]	Ligada ó No
1ª	50985	0.35	17	L
2ª	8157	0.50	54	L
3ª	450	0.50		
4ª				
5ª				
6ª				

Fuente: Captura Programa DEPAV, Elaboración propia.

Ilustración 31 . Datos calculados

UNIVERSIDAD DEL CAUCA – INSTITUTO DE VÍAS					
DISEÑO ESTRUCTURAL DE PAVIMENTOS – DEPAV					
Sept. 1993					
Título del Trabajo : Alternativa 1					
Número de Capas : 3					
Alternativa : 3					
Capa Nº	Z (cm)	Epsilon T	Sigma T (Kg/cm ²)	Epsilon Z	Sigma Z (Kg/cm ²)
1ª	0.00 17.00	7.6500E-05 B -6.5400E-05 B	8.5655E+00 B -3.9768E+00 B	-4.4800E-05 C 7.3100E-05 B	5.5880E+00 A 1.2542E+00 B
2ª	17.00 71.00	-6.5400E-05 B -5.4000E-05 C	3.1713E-01 C -7.9639E-01 C	1.0700E-04 B 1.0400E-04 C	1.2542E+00 B 6.0876E-02 C
3ª	71.00	-5.4000E-05 C	1.3562E-02 C	1.0400E-04 C	6.0876E-02 C
Deflexión = 26.750 mm/100					
Radio de Curvatura = 735.360 m					

Fuente: Captura Programa DEPAV, Elaboración propia.

7.5.1.2 Alternativa 2.

El programa DEPAV permite realizar análisis de deformaciones a la estructura diseñada de pavimento flexible, dicho software es utilizado en el proyecto para realizar un análisis detallado de las deformaciones presentadas en cada estructura diseñada y para ello se utilizarán los parámetros indicados por los creadores del mismo para su óptimo funcionamiento:

- Radio de curvatura: 10.78cm
- Presión de contacto: 5.61 kg/cm²
- Distancia entre llantas: 32.41 cm
- Módulos de elasticidad Ei en kilogramos por centímetro cuadrado de las distintas capas.
- Relaciones de Poisson μ_i de las distintas capas
- Espesores de las capas Hi
- Tipo de interfase entre las capas

Tabla 35 Datos de interfase entre las capas Alternativa 2

Material	E (Kg/cm ²)	ν	H (cm)	Ligada / No
Concreto Ásfaltico	9075	0.35	13	L
Base Granular	8157	0.40	37	L
Subbase Granular	2039	0.40	26	L
Subrasante	450	0.50		

Fuente: Elaboración propia

Ilustración 32 Datos entrada Estructura propuesta.

Número de Capas [2..6]		4		
Radio de Carga [cm]		10.8		
Presión de Contacto [Kg/cm ²]		5.59		
Distancia Entre Ejes de Llantas [cm]		32.4		
Capas	E [Kg/cm ²]	μ []	H [cm]	Ligada ó No
1ª	50985	0.35	13	L
2ª	8157	0.40	37	L
3ª	2039	0.40	26	L
4ª	450	0.50		
5ª				
6ª				

Fuente: Captura Programa DEPAV, Elaboración propia.

Ilustración 33 Datos calculados

UNIVERSIDAD DEL CAUCA – INSTITUTO DE VÍAS					
DISEÑO ESTRUCTURAL DE PAVIMENTOS – DEPAV					
Sept. 1993					
Título del Trabajo : Alternativa 2					
Número de Capas : 4					
Alternativa : 4					
Capa N°	Z (cm)	Epsilon T	Sigma T (Kg/cm²)	Epsilon Z	Sigma Z (Kg/cm²)
1ª	0.00 13.00	9.8300E-05 B -8.0400E-05 B	1.0136E+01 B -4.8334E+00 B	-5.9300E-05 C 9.3800E-05 A	5.5880E+00 A 1.7233E+00 B
2ª	13.00 50.00	-8.0400E-05 B -7.4500E-05 C	1.6213E-01 B -8.4737E-01 C	1.8800E-04 B 1.0300E-04 C	1.7233E+00 B 1.8559E-01 C
3ª	50.00 76.00	-7.4500E-05 C -7.5100E-05 C	-1.1930E-01 C -2.0292E-01 C	1.3500E-04 C 1.1300E-04 C	1.8559E-01 C 7.1175E-02 C
Deflexión = 31.840 mm/100					
Radio de Curvatura = 543.600 m					

Fuente: Captura Programa DEPAV, Elaboración propia.

Ilustración 34 Datos calculados

UNIVERSIDAD DEL CAUCA – INSTITUTO DE VÍAS					
DISEÑO ESTRUCTURAL DE PAVIMENTOS – DEPAV					
Sept. 1993					
Título del Trabajo : Alternativa 2					
Número de Capas : 4					
Alternativa : 4					
Capa N°	Z (cm)	Epsilon T	Sigma T (Kg/cm²)	Epsilon Z	Sigma Z (Kg/cm²)
4ª	76.00	-7.5100E-05 C	5.4146E-03 B	1.4500E-04 C	7.1175E-02 C
5ª					
6ª					
Deflexión = 31.840 mm/100					
Radio de Curvatura = 543.600 m					

Fuente: Captura Programa DEPAV, Elaboración propia.

7.5.1.3 Comparación de las solicitudes calculadas con las admisibles.

En la Tabla 36 Porcentaje de solicitudes de la estructura diseñada por el método Shell se presenta la comparación entre los esfuerzos, las deformaciones y deflexiones de servicio con respecto a las admisibles y el porcentaje de

solicitud definido como la relación porcentual entre los valores del servicio (calculados) y los valores Admisibles.

Tabla 36 Porcentaje de solicitudes de la estructura diseñada por el método Shell

CAPA		PARAMETRO	VALOR SERVICIO		VALOR ADMISIBLE	SOLICITACION %
Alternativa N°1	Capa Asfáltica	ϵ_r	$6,54 \times 10^{-4}$	<	$2,584 \times 10^{-4}$	40%
	Subrasante	ϵ_r	$1,040 \times 10^{-4}$	<	$3,046 \times 10^{-4}$	34%
		α	0,112	<	0,45	24%
		α	0,112	<	0,302	36%
	Estructura	Δz	0,753	<	0,664	113%
Alternativa N°2	Capa Asfáltica	ϵ_r	$7,45 \times 10^{-5}$	<	$2,584 \times 10^{-4}$	34%
	Subrasante	ϵ_r	$1,13 \times 10^{-4}$	<	$3,046 \times 10^{-4}$	37%
		α	0,127	<	0,45	28%
		α	0,127	<	0,302	42%
	Estructura	Δz	0,543	<	0,664	81%

Fuente: Elaboración Propia.

Comparando las deformaciones admisibles vs las deformaciones de servicio o calculadas, los valores admisibles deben ser mayores tanto en su capa asfáltica como en su estructura, cumpliendo así con el criterio de control de fatiga y ahuellamiento, es decir los valores calculados de servicio son menores a los valores de fatiga (admisibles), por lo tanto, el dimensionamiento de la estructura de pavimento por el método Shell es adecuado para los rangos de Subrasante y tránsito considerado.

7.5.2 Esfuerzos, deformación y deflexión admisibles de la estructura diseñada por el método AASHTO

Información necesaria para determinar los esfuerzos, deformaciones y deflexión admisibles para la estructura se presenta a continuación:

- Tránsito, $N = 3.584.592$ ejes equivalentes
- Nivel de Confianza Shell, $NC = 85\%$
- Capacidad de soporte de la Subrasante, $CBR = 4,5 \% = 45 \text{ MPa} = 450 \text{ kg/cm}^2$
- Porcentaje de volumen de asfalto de la mezcla, $V_b = 11,3 \%$
- Modulo dinámico de la capa asfáltica, $S_{mix} = 5.0 \times 10^9 \text{ N/m}^2$
- Coeficiente de Calage, $K = k_1 \times k_2 \times k_3 = 10 \times 2,5 \times 0,33 = 8,25$.

De acuerdo a las ecuaciones, **13, 14, 15, 16, 17,18 y 19** mencionadas anteriormente y con los datos admisibles se procede a calcular y despejar cada ítem determinando la Tabla 37 Esfuerzos, deformación y deflexión admisibles para el diseño por el método

Tabla 37 Esfuerzos, deformación y deflexión admisibles para el diseño por el método AASTHO.

CRITERIO	PARÁMETRO	VALOR
Shell	Deformación radial admisible de tracción en la base de la capa asfáltica, $\epsilon_r \text{ adm}$	$2,584 \times 10^{-4}$
Shell (NC=85%)	Deformación vertical admisible de compresión sobre la subrasante $\epsilon_r \text{ adm}$	$3,046 \times 10^{-4}$
CRR de Belgica	Esfuerzo vertical admisible de compresión sobre la subrasante	0,455
Dormon-Kerhoven	Esfuerzo vertical admisible de compresión sobre subrasante	0,302
Huang	Deflexión admisible en la superficie de la estructura de pavimento.	0,662

Fuente: Propia, Elaboración del Autor.

Utilizando el programa DEPAV de la Universidad del Cauca, se determinan los esfuerzos, deformaciones y deflexiones en cualquier punto del modelo estructural.

Tabla 38 Esfuerzos, deformación y deflexión de la estructura diseñada por el método Shell.

CRITERIO	ALTERNATIVA	DEFORMACIONES (mm/mm)		Esfuerzo Vertical , Oz (kg/cm ²)	Deflexión Az (mm)
		Radial, Er	Vertical, Ez		
DEPAV	3	$1,68 \times 10^4$	$2,42 \times 10^4$	$2,82 \times 10^1$	0,40

Fuente: Elaboración Propia.

A continuación se presentan los reportes de los resultados obtenidos con el programa DEPAV.

7.5.2.1 Alternativa 3

El programa DEPAV permite realizar análisis de deformaciones a la estructura diseñada de pavimento flexible, dicho software es utilizado en el proyecto para realizar una análisis detallado de las deformaciones presentadas en cada estructura diseñada y para ello se utilizarán los parámetros indicados por los creadores del mismo para su óptimo funcionamiento:

- Radio de curvatura: 10.78cm
- Presión de contacto: 5.61 kg/cm²
- Distancia entre llantas: 32.41 cm
- Módulos de elasticidad Ei en kilogramos por centímetro cuadrado de las distintas capas.
- Relaciones de Poisson μ_i de las distintas capas
- Espesores de las capas Hi
- Tipo de interfase entre las capas

Tabla 39 Datos de interfase entre las capas Alternativa 3

Material	E (Kg/cm ²)	v	H (cm)	Ligada / No
Carpeta Asfáltica	50,985	0.35	10	L
Base Tratada con emulsion Asfáltica	20,394	0.35	10	L
Base Granular	2,109	0.40	15	L
Subbase Granular	1,265	0.40	20	L
Subrasante	450	0.45		

Fuente: Elaboración propia

Ilustración 35 . Datos entrada Estructura propuesta.

Número de Capas [2..6]		5		
Radio de Carga [cm]		10.8		
Presión de Contacto [Kg/cm ²]		5.59		
Distancia Entre Ejes de Llantas [cm]		32.4		
Capas	E [Kg/cm ²]	μ []	H [cm]	Ligada ó No
1ª	50985	0.35	10	L
2ª	20394	0.35	10	L
3ª	2109	0.40	15	L
4ª	1265	0.40	20	L
5ª	450	0.45		
6ª				

Fuente: Captura Programa DEPAV, Elaboración propia.

Ilustración 36 Datos calculados

DISEÑO ESTRUCTURAL DE PAVIMENTOS - DEPAV					
Sept. 1993					
Título del Trabajo : ALTERNATIVA 3 Número de Capas : 5					
Alternativa : 5					
Capa N°	Z (cm)	Epsilon T	Sigma T (Kg/cm²)	Epsilon Z	Sigma Z (Kg/cm²)
1ª	0.00	1.3800E-04 B	1.3052E+01 B	-9.4500E-05 C	5.5880E+00 A
	10.00	-6.6600E-05 B	-3.5384E+00 B	9.2400E-05 B	2.4677E+00 B
2ª	10.00	-6.6600E-05 B	-7.5662E-01 C	1.3800E-04 B	2.4677E+00 B
	20.00	-1.6800E-04 C	-4.3541E+00 B	1.6400E-04 B	5.5778E-01 B
3ª	20.00	-1.6800E-04 C	-1.5499E-01 C	3.0500E-04 B	5.5778E-01 B
	35.00	-1.5000E-04 C	-3.0897E-01 C	2.4200E-04 C	2.8246E-01 C
Deflexión = 48.460 mm/100 Radio de Curvatura = 396.660 m					

Fuente: Captura Programa DEPAV, Elaboración propia.

Ilustración 37 Datos calculados

DISEÑO ESTRUCTURAL DE PAVIMENTOS - DEPAV					
Sept. 1993					
Título del Trabajo : ALTERNATIVA 3 Número de Capas : 5					
Alternativa : 5					
Capa N°	Z (cm)	Epsilon T	Sigma T (Kg/cm²)	Epsilon Z	Sigma Z (Kg/cm²)
4ª	35.00	-1.5000E-04 C	-1.1013E-01 C	2.8400E-04 C	2.8246E-01 C
	55.00	-1.5000E-04 C	-2.0802E-01 C	2.4600E-04 C	1.4990E-01 C
5ª	55.00	-1.5000E-04 C	3.9564E-03 B	3.2100E-04 C	1.4990E-01 C
6ª					
Deflexión = 48.460 mm/100 Radio de Curvatura = 396.660 m					

Fuente: Captura Programa DEPAV, Elaboración propia.

7.5.2.2 Comparación de las solicitudes calculadas con las admisibles.

En la Tabla 40 Porcentaje de solicitudes de la estructura diseñada por el método se presenta la comparación entre los esfuerzos, las deformaciones y deflexiones de servicio con respecto a las admisibles y el porcentaje de

solicitud definido como la relación porcentual entre los valores del servicio (calculados) y los valores Admisibles.

Tabla 40 Porcentaje de solicitudes de la estructura diseñada por el método AASHTO

CAPA		PARAMETRO	VALOR SERVICIO		VALOR ADMISIBLE	SOLICITACION %
Alternativa N°3	Capa Asfáltica	ϵ_r	$1,68 \times 10^4$	<	$2,584 \times 10^{-4}$	65%
	Subrasante	ϵ_r	$2,42 \times 10^4$	<	$3,046 \times 10^{-4}$	79%
		α	0,114	<	0,45	25%
		α	0,114	<	0,302	38%
	Estructura	Δz	0,4	<	0,662	60%

Fuente: Elaboración Propia.

Comparando las deformaciones Admisibles Vs las deformaciones de servicio o calculadas, los valores admisibles deben ser mayores tanto en sus capa asfáltica como en su estructura, cumpliendo así con el criterio de control de fatiga y ahuellamiento, es decir los valores calculados de servicio son menores a los valores de fatiga (admisibles), por lo tanto, el dimensionamiento de la estructura de pavimento por el método AASTHO es adecuado para los rangos de Subrasante y transito considerado.

7.6 COMPARACION ESFUERZOS, DEFORMACIÓN Y DEFLEXIÓN ADMISIBLES DE LA ESTRUCTURA DISEÑADA POR EL MÉTODO AASHTO Y SHELL

A continuación se hace una comparación de los esfuerzos, deformaciones y deflexiones admisibles de la estructura para cada uno de los métodos de análisis.

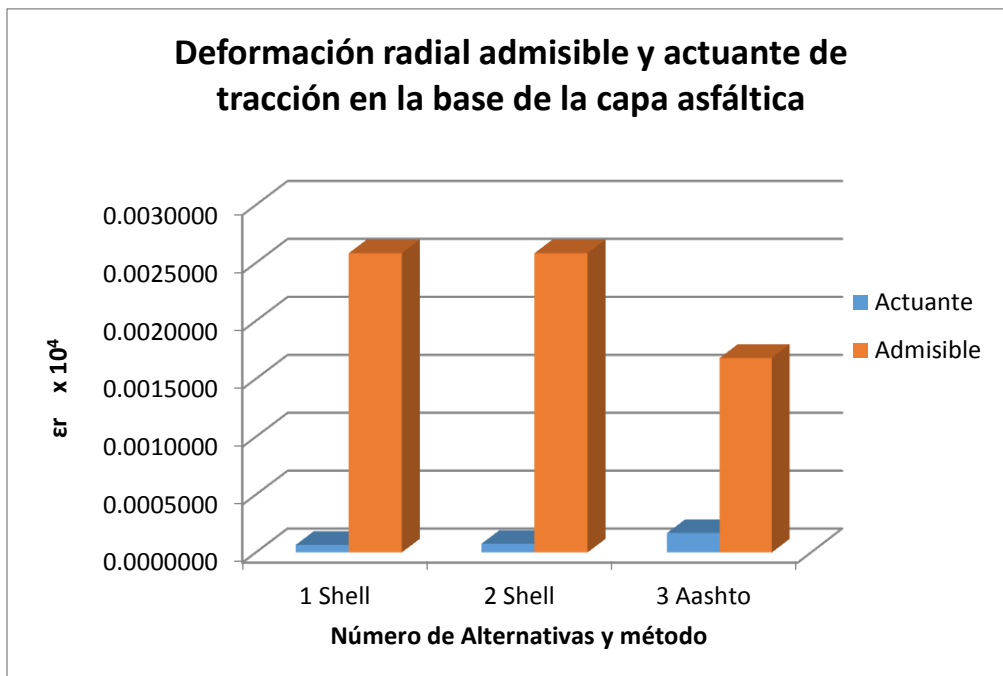
Tabla 41 Esfuerzos, deformación y deflexión admisibles para el diseño por el método SHELL Y AASTHO

CAPA		PARAMETRO	VALOR SERVICIO		VALOR ADMISIBLE	SOLICITACION %
Alternativa N°1	Capa Asfáltica	ϵ_r	$6,54 \times 10^{-4}$	<	$2,584 \times 10^{-4}$	40%
	Subrasante	ϵ_r	$1,040 \times 10^{-4}$	<	$3,046 \times 10^{-4}$	34%
		α	0,112	<	0,45	24%
		α	0,112	<	0,302	36%
	Estructura	Δz	0,753	<	0,664	113%
Alternativa N°2	Capa Asfáltica	ϵ_r	$7,45 \times 10^{-5}$	<	$2,584 \times 10^{-4}$	34%
	Subrasante	ϵ_r	$1,13 \times 10^{-4}$	<	$3,046 \times 10^{-4}$	37%
		α	0,127	<	0,45	28%
		α	0,127	<	0,302	42%
	Estructura	Δz	0,543	<	0,664	81%
Alternativa N°3	Capa Asfáltica	ϵ_r	$1,68 \times 10^{-4}$	<	$2,584 \times 10^{-4}$	65%
	Subrasante	ϵ_r	$2,42 \times 10^{-4}$	<	$3,046 \times 10^{-4}$	79%
		α	0,114	<	0,45	25%
		α	0,114	<	0,302	38%
	Estructura	Δz	0,396	<	0,664	60%

Fuente: Elaboración Propia.

De acuerdo con los valores contenidos en la Tabla 41, la estructura de referencia se encuentra dentro de los valores de solicitación cumpliendo con los criterios de diseños establecidos; por lo tanto, el dimensionamiento de la estructura de pavimento flexible es el adecuado, en la alternativa 1 del método Shell se presenta el índice más bajo de solicitación generando que no se presentes altas deflexiones de servicio, haciendo que no se fatiguen de manera temprana y generando debilidad estructural.

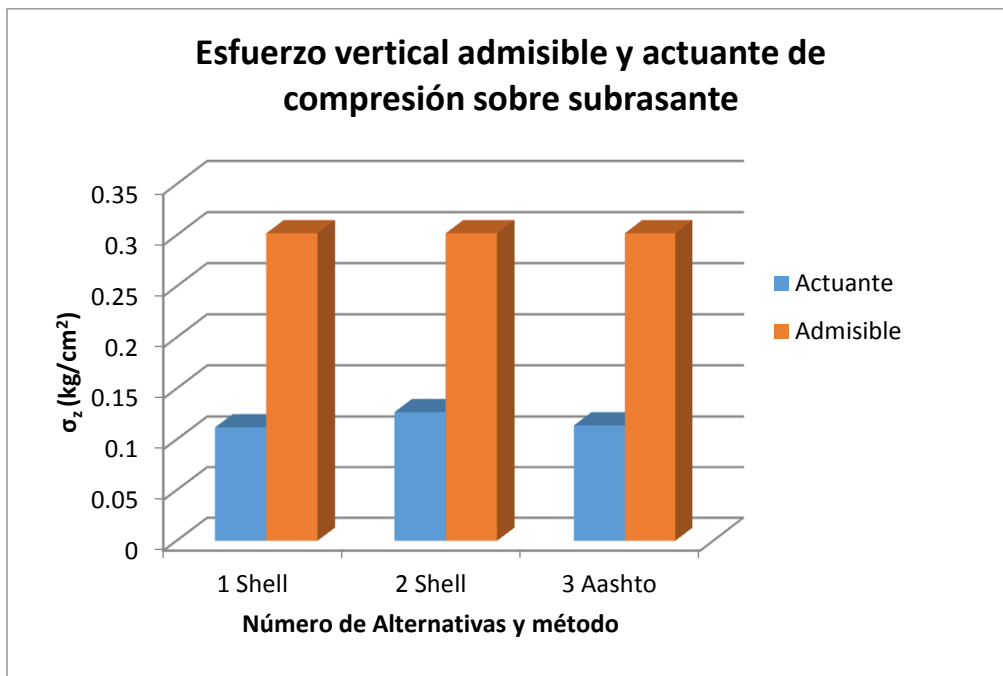
Gráfica 3. Deformación radial admisible de tracción en la base de la capa asfáltica



Fuente: Elaboración Propia.

Los valores de mayor deformación radial se presentan sobre la capa asfáltica del método AASTHO, observando que el índice más bajo de solicitud está para la alternativa 1 del método SHELL lo cual genera que la estructura no presente mayores deformaciones de servicio.

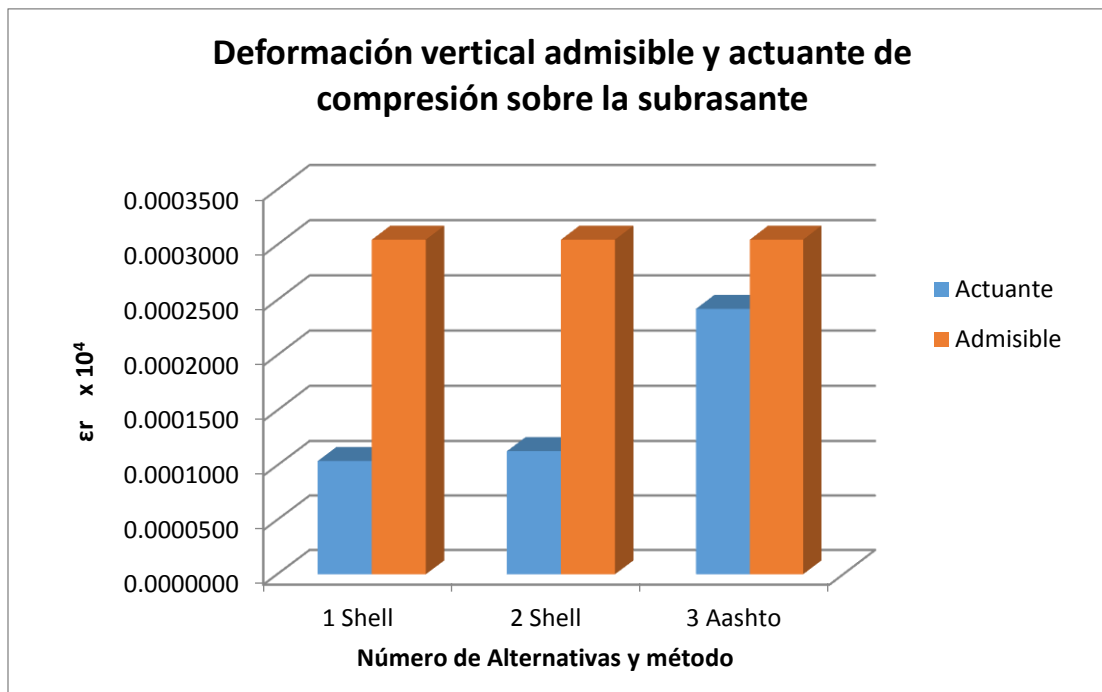
Gráfica 4. Deformación vertical admisible de compresión sobre la subrasante



Fuente: Elaboración Propia.

La grafica nos permite observar que los valores calculados representados por el modelo SHELL indican un nivel de confiabilidad del 85% al 95%, sin embargo el porcentaje de solicitud para la deformación vertical admisible de la alternativa 1 es del 34% comprobando así que es la más idónea.

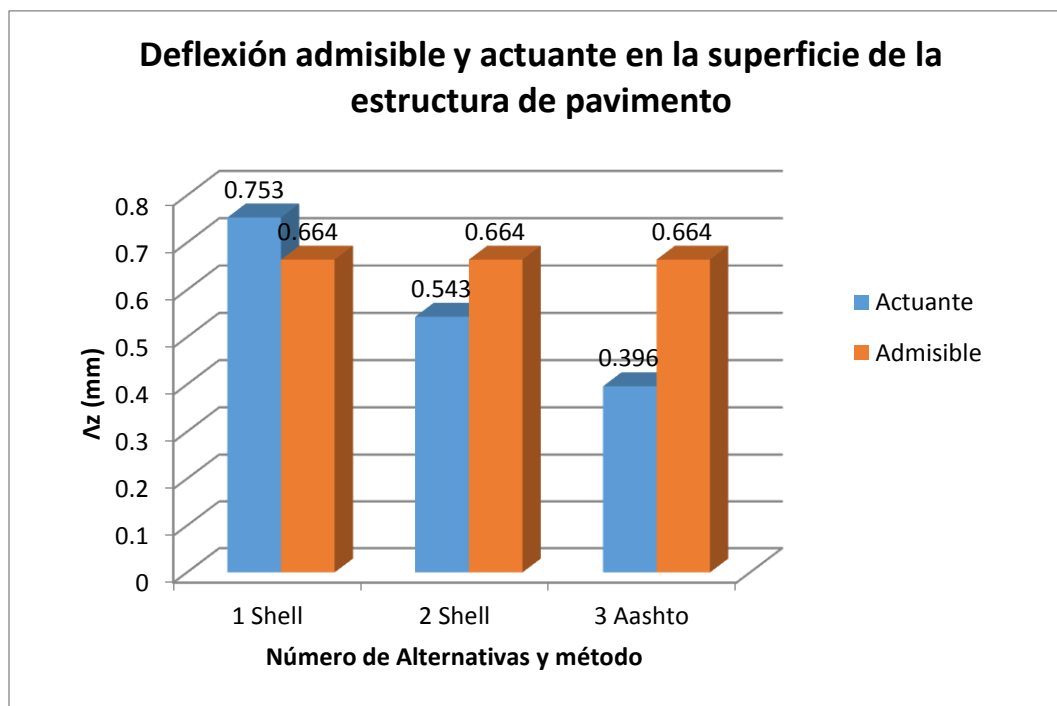
Gráfica 5. Esfuerzo vertical admisible de compresión sobre la subrasante



Fuente: Elaboración Propia.

En la Gráfica 5 se evidencia comportamiento de los esfuerzos verticales en las diferentes capas de la estructura del pavimento y en función de la profundidad determinando que la tendencia del esfuerzo vertical es decreciente con el espesor de la capa asfáltica del modelo estructural.

Gráfica 6. Deflexión admisible en la superficie de la estructura de pavimento



Fuente: Elaboración Propia.

En general, las capas que componen el modelo estructural tienen una deflexión máxima de 0.753 (mm), de ahí se aprecia la importancia de la resistencia de la subrasante para el diseño de una estructura de pavimento. Mientras la subrasante sea más resistente, su deformación será menor, esto se evidencia comprobando que el método 2 por SHELL es el más óptimo para la zona de estudio ya que la deflexión presentada es baja y no sobrepasa el valor admisible.

Se puede llegar a concluir que la alternativa 2 es la más óptima debido a que ningún valor sobrepasa los valores admisibles propuestos.



7.7 PRESUPUESTO

A continuación se hace una comparación de los presupuestos de cada una de las alternativas planteadas, teniendo como base los precios del IDU (Instituto de Desarrollo Urbano) con precios del primer trimestre del 2016.

ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE UNA ESTRUCTURA DE PAVIMENTO FLEXIBLE EN UNA VÍA DE TRAFICO PESADO, CASO PARTICULAR VÍA URBANA EN LA CIUDAD DE BOGOTÁ BARRIO SANTA CATALINA					
Diseño método Shell Alternativa 1					
ÍTEM	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	VALOR UNITARIO	VALOR TOTAL
1	CAPITULO I. PRELIMINARES				\$ 17,617,979.78
1.1	Campamento 18 m ²	un	1	\$1,129,935.48	\$ 1,129,935.48
1.2	Localización y replanteo	m ²	3500	\$ 2,507.35	\$ 8,775,723.60
1.3	Polisombra verde para cerramiento. Suministro e instalación	m ²	3500	\$ 2,203.52	\$ 7,712,320.70
2	EXCAVACIONES				\$ 206,839,052.14
2.1	Excavación a mecanica en material común (incluye cargue)	m ³	4900	\$ 4,339.41	\$ 21,263,111.94
2.2	Nivelación y compactación de subrasante	m ²	3500	\$ 960.95	\$ 3,363,320.80
2.3	Estabilización de subrasante con rajon (suministro, extendido, nivelación y compactación)	m ³	700	\$ 52,438.00	\$ 36,706,600.00
2.4	Geotextil NT 7000 para separacion subrasante/capas granulares (incluye suministro e instalación)	m ²	7000	\$ 20,786.57	\$ 145,506,019.40
3	SUBBASE Y BASE				\$ 196,893,816.35
3.1	Base granular clase c (BG_C) (suministro, extendido, nivelación, humedecimiento y compactación con vibrocompactador)	m ³	1750	\$ 112,510.75	\$ 196,893,816.35
4	PAVIMENTOS ASFALTICOS				\$ 285,410,625.85
4.1	Imprimacion con emulsion asfaltica crl-0 (suministro, barrido superficie y riego)	m ²	3500	\$ 1,830.04	\$ 6,405,147.70
4.2	Mezcla Asfaltica en caliente tipo denso MD10 asfalto convencional (suministro, extendido, nivelación y compactación)	m ³	525	\$ 531,439.01	\$ 279,005,478.15
5	SEÑALIZACION Y CONTROL DE TRANSITO				\$ 1,421,166,056.10
5.1	Demarcacion linea continua a=0.12m (e=2.3mm,termoplástica. inc. suministro y aplicación con equipo. incl. microesferas)	m	500	\$ 4,130.46	\$ 2,065,232.40
5.2	Demarcacion linea discontinua a=0.12m (e=2.3mm,termoplástica. inc. suministro y aplicación con equipo. incl. microesfera)	m	500	\$ 4,130.46	\$ 2,065,232.40
5.3	Demarcacion paso peatonal-cebra (e=2.3mm,termoplástica. inc. suministro y aplicación con equipo. inc microesferas)	m ²	500	\$ 34,424.58	\$ 17,212,288.80
5.4	Señal doble de 75cm, reflectivo alta densidad tipo iv, en lámina galvanizada, pedestal en ángulo sp/sr/si. suministro e instalación.	un	3500	\$ 399,949.52	\$ 1,399,823,302.50
6	ACABADOS DE URBANISMO				\$ 42,079,867.20
6.1	Bordillo prefabricado A80 (suministro e instalación. incluye 3cm mortero de nivelación 2000 psi)	m	1000	\$ 42,079.87	\$ 42,079,867.20
COSTOS DIRECTOS					\$ 2,170,007,397.42
COSTOS INDIRECTOS					\$ 607,602,071.28
ADMINISTRACIÓN				20%	\$ 434,001,479.48
IMPREVISTOS				3%	\$ 65,100,221.92
UTILIDADES				5%	\$ 108,500,369.87
VALOR TOTAL					\$ 2,777,609,468.70

ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE UNA ESTRUCTURA DE PAVIMENTO FLEXIBLE EN UNA VÍA DE TRAFICO PESADO, CASO PARTICULAR VÍA URBANA EN LA CIUDAD DE BOGOTÁ BARRIO SANTA CATALINA					
Diseño método Shell Alternativa 2					
ÍTEM	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	VALOR UNITARIO	VALOR TOTAL
1	CAPITULO I. PRELIMINARES				\$ 17,617,979.78
1.1	Campamento 18 m ²	un	1	\$1,129,935.48	\$ 1,129,935.48
1.2	Localización y replanteo	m ²	3500	\$ 2,507.35	\$ 8,775,723.60
1.3	Polisombra verde para cerramiento. Suministro e instalación	m ²	3500	\$ 2,203.52	\$ 7,712,320.70
2	EXCAVACIONES				\$ 279,592,061.84
2.1	Excavación a mecanica en material común (incluye cargue)	m ³	4900	\$ 4,339.41	\$ 21,263,111.94
2.2	Nivelación y compactación de subrasante	m ²	3500	\$ 960.95	\$ 3,363,320.80
2.3	Estabilización de subrasante con rajon (suministro, extendido, nivelación y compactación)	m ³	700	\$ 52,438.00	\$ 36,706,600.00
2.4	Geotextil NT 7000 para separacion subrasante/capas granulares (incluye suministro e instalación)	m ²	10500	\$ 20,786.57	\$ 218,259,029.10
3	SUBBASE Y BASE				\$ 194,371,325.75
3.1	Subbase granular clase c (SBG_C) (suministro, extendido, nivelación, humedecimiento y compactación con vibrocompactador)	m ³	840	\$ 109,507.79	\$ 91,986,541.25
3.2	Base granular clase c (BG_C) (suministro, extendido, nivelación, humedecimiento y compactación con vibrocompactador)	m ³	910	\$ 112,510.75	\$ 102,384,784.50
4	PAVIMENTOS ASFALTICOS				\$ 285,410,625.85
4.1	Imprimacion con emulsion asfaltica crl-0 (suministro, barrido superficie y riego)	m ²	3500	\$ 1,830.04	\$ 6,405,147.70
4.2	Mezcla Asfaltica en caliente tipo denso MD10 asfalto convencional (suministro, extendido, nivelación y compactación)	m ³	525	\$ 531,439.01	\$ 279,005,478.15
5	SEÑALIZACION Y CONTROL DE TRANSITO				\$1,421,166,056.10
5.1	Demarcacion linea continua a=0.12m (e=2.3mm,termoplástica. inc. suministro y aplicación con equipo. incl. microesferas)	m	500	\$ 4,130.46	\$ 2,065,232.40
5.2	Demarcacion linea discontinua a=0.12m (e=2.3mm,termoplástica. inc. suministro y aplicación con equipo. incl. microesfera)	m	500	\$ 4,130.46	\$ 2,065,232.40
5.3	Demarcacion paso peatonal-cebra (e=2.3mm,termoplástica. inc. suministro y aplicación con equipo. inc microesferas)	m ²	500	\$ 34,424.58	\$ 17,212,288.80
5.4	Señal doble de 75cm, reflectivo alta densidad tipo iv, en lámina galvanizada, pedestal en ángulo sp/sr/si. suministro e instalación.	un	3500	\$ 399,949.52	\$1,399,823,302.50
6	ACABADOS DE URBANISMO				\$ 42,079,867.20
6.1	Bordillo prefabricado A80 (suministro e instalación. incluye 3cm mortero de nivelación 2000 psi)	m	1000	\$ 42,079.87	\$ 42,079,867.20
COSTOS DIRECTOS					\$2,240,237,916.52
COSTOS INDIRECTOS					\$ 627,266,616.63
ADMINISTRACIÓN				20%	\$ 448,047,583.30
IMPREVISTOS				3%	\$ 67,207,137.50
UTILIDADES				5%	\$ 112,011,895.83
VALOR TOTAL					\$2,867,504,533.15

ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE UNA ESTRUCTURA DE PAVIMENTO FLEXIBLE EN UNA VÍA DE TRAFICO PESADO, CASO PARTICULAR VÍA URBANA EN LA CIUDAD DE BOGOTÁ BARRIO SANTA CATALINA					
Diseño método AASHTO Alternativa 1					
ÍTEM	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	VALOR UNITARIO	VALOR TOTAL
1	CAPITULO I. PRELIMINARES				\$ 17,617,979.78
1.1	Campamento 18 m ²	un	1	\$1,129,935.48	\$ 1,129,935.48
1.2	Localización y replanteo	m ²	3500	\$ 2,507.35	\$ 8,775,723.60
1.3	Polisombra verde para cerramiento. Suministro e instalación	m ²	3500	\$ 2,203.52	\$ 7,712,320.70
2	EXCAVACIONES				\$ 279,592,061.84
2.1	Excavación a mecanica en material común (incluye cargue)	m ³	4900	\$ 4,339.41	\$ 21,263,111.94
2.2	Nivelación y compactación de subrasante	m ²	3500	\$ 960.95	\$ 3,363,320.80
2.3	Estabilización de subrasante con rajon (suministro, extendido, nivelación y compactación)	m ³	700	\$ 52,438.00	\$ 36,706,600.00
2.4	Geotextil NT 7000 para separacion subrasante/capas granulares (incluye suministro e instalación)	m ²	10500	\$ 20,786.57	\$ 218,259,029.10
3	SUBBASE Y BASE				\$ 300,405,136.68
3.1	Subbase granular clase c (SBG_C) (suministro, extendido, nivelación, humedecimiento y compactación con vibrocompactador)	m ³	700	\$ 109,507.79	\$ 76,655,451.04
3.2	Base granular clase c (BG_C) (suministro, extendido, nivelación, humedecimiento y compactación con vibrocompactador)	m ³	1225	\$ 112,510.75	\$ 137,825,671.45
3.3	Base granular clase a (BG_A) estabilizada al 4% con emulsión asfáltica crl-1 (incluye suministro transporte, colocacion y compactacion).	m ³	350	\$ 245,497.18	\$ 85,924,014.19
4	PAVIMENTOS ASFALTICOS				\$ 192,408,799.80
4.1	Imprimacion con emulsion asfaltica crl-0 (suministro, barrido superficie y riego)	m ²	3500	\$ 1,830.04	\$ 6,405,147.70
4.2	Mezcla Asfáltica en caliente tipo denso MD10 asfalto convencional (suministro, extendido, nivelación y compactación)	m ³	350	\$ 531,439.01	\$ 186,003,652.10
5	SEÑALIZACION Y CONTROL DE TRANSITO				\$ 1,421,166,056.10
5.1	Demarcacion linea continua a=0.12m (e=2.3mm,termoplástica. inc. suministro y aplicación con equipo. incl. microesferas)	m	500	\$ 4,130.46	\$ 2,065,232.40
5.2	Demarcacion linea discontinua a=0.12m (e=2.3mm,termoplástica. inc. suministro y aplicación con equipo. incl. microesfera)	m	500	\$ 4,130.46	\$ 2,065,232.40
5.3	Demarcacion paso peatonal-cebra (e=2.3mm,termoplástica. inc. suministro y aplicación con equipo. inc microesferas)	m ²	500	\$ 34,424.58	\$ 17,212,288.80
5.4	Señal doble de 75cm, reflectivo alta densidad tipo iv, en lámina galvanizada, pedestal en ángulo sp/sr/si. suministro e instalación.	un	3500	\$ 399,949.52	\$ 1,399,823,302.50
6	ACABADOS DE URBANISMO				\$ 42,079,867.20
6.1	Bordillo prefabricado A80 (suministro e instalación. incluye 3cm mortero de nivelación 2000 psi)	m	1000	\$ 42,079.87	\$ 42,079,867.20
COSTOS DIRECTOS					\$ 2,253,269,901.40
COSTOS INDIRECTOS					\$ 630,915,572.39
ADMINISTRACIÓN				20%	\$ 450,653,980.28
IMPREVISTOS				3%	\$ 67,598,097.04
UTILIDADES				5%	\$ 112,663,495.07
VALOR TOTAL					\$ 2,884,185,473.79

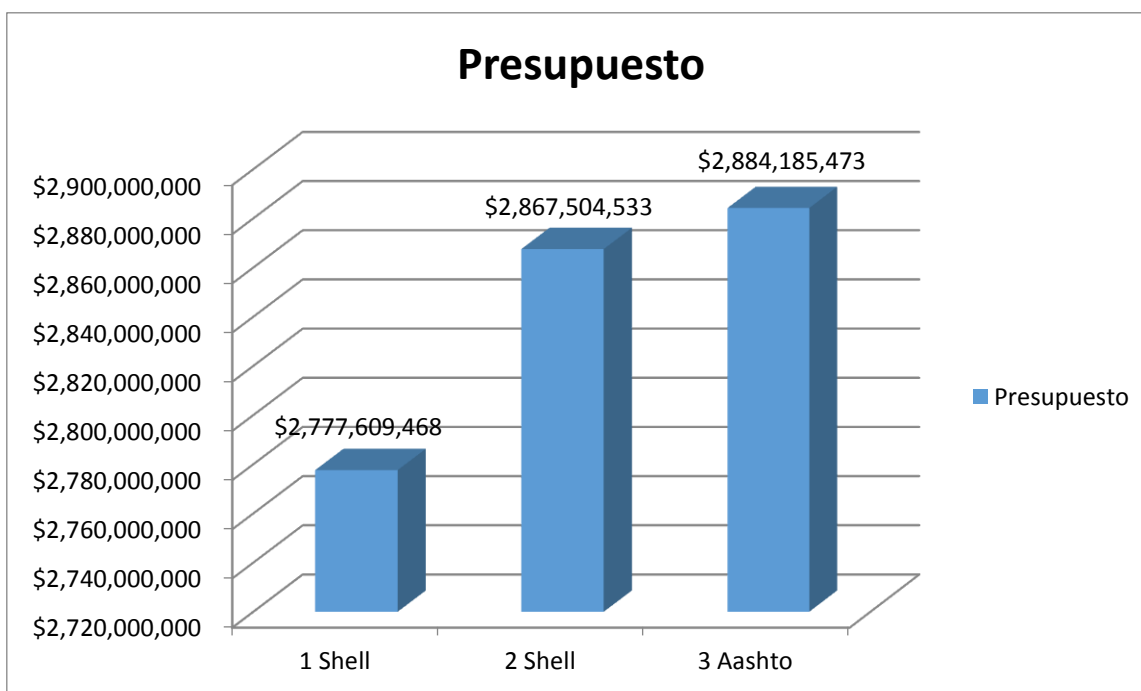
Dentro de los ítems seleccionados y como alternativas presupuestales, se muestra en la Tabla 42 el costo por alternativa evidenciando que la alternativa 1 del método SHELL es la presenta una menor inversión

Tabla 42 Comparación de valores de presupuestos

Diseño	Alternativa	valor
SHELL	1	\$ 2,777,609,468.70
	2	\$ 2,867,504,533.15
AASHTO	1	\$ 2,884,185,473.79

Fuente: Elaboración Propia

Gráfica 7 Comparación de alternativas según el valor del presupuesto



Fuente: Elaboración Propia.

Según los valores de presupuesto realizado es importante destacar que la alternativa 1 de Shell es la más baja a nivel presupuestal debido a que los materiales utilizados cumplen de manera óptima con la Serviciabilidad y dichos materiales son de bajo costo.

8 CONCLUSIONES

- La caracterización de la subrasante de acuerdo con los ensayos de laboratorio de CBR, en el análisis de la subrasante nos indican que estos son inferiores al 2% por lo anterior se debe realizar un mejoramiento de 20 cm sobre la capa de subrasante, para garantizar que se cumpla con los parámetros de la estructura.
- Se determinó que la vía presenta una alta densidad de tránsito de carga pesada con un tránsito atraído del 12.4 para los 10 años que se está realizando el estudio, adicional a esto se realiza el cálculo del número de ejes que pasarán por esta vía el cual arroja un resultado de 3.58×10^6 número de ejes de 8.2 Ton, y según la clasificación del IDU este es un tránsito tipo T3.
- Se evidencia que el método de SHELL y AASHTO utilizado para este proyecto de grado, muestra diferencias en cuanto a sus parámetros de diseño, toda vez que el método AASHTO considera parámetros más rigurosos y el método de SHELL combina conceptos básicos como la resistencia a la fatiga y la rigidez de las mezclas asfálticas, acompañadas del análisis de las capas granulares y de la fundación de la estructura de pavimento.
- Para el diseño de métodos de Ingeniería de Pavimentos, como son los métodos de Shell y AASTHO en donde se realizaron chequeos de las deflexiones, mediante el programa Depav y parámetros de control de fatiga. Lo que permitió cumplir con las deformaciones admisibles vs las deformaciones de servicio calculadas, los valores admisibles deben ser mayores tanto en su capa asfáltica como en su estructura, cumpliendo así con el criterio de control de fatiga y ahuellamiento, es decir los valores calculados de servicio son menores a los valores de fatiga (admisibles).
- De acuerdo al análisis comparativo de los esfuerzos actuantes y admisibles, se determina que la alternativa dos tiene un porcentaje de fatiga es de 34% y sus deflexión de la estructura es de 0.543 mm, lo anterior nos indica que cumple con los valores admisibles y será la más opcional para construcción.
- Obtenida las cartas de diseño se procedió a evaluar los costos en cada una de las alternativas, los cuales indicaron para la alternativa 2 y 3 \$

2,867,504,533.15 \$ 2,884,185,473.79 respectivamente, lo anterior permite sugerir la alternativa 1 del método Shell la cual tiene un costo a precios de 2016 por \$ 2,777,609,468.70 es viable económicamente pero no es óptima en diseño por lo cual se recomienda tener en cuenta la alternativa 2.

- Se logra realizar una chequeo entre los esfuerzos y deformaciones, las deflexiones de servicio con respecto a las admisibles y porcentaje de sollicitación definido como la relación porcentual entre los valores calculados y chequeados bajo el programa De Pav. Determinando que la estructura cumple con los criterios de fatiga y ahuellamiento es decir los valores calculados de servicio, por lo tanto la estructura de pavimento es adecuada para los rangos de resistencia de la subrasante y transito considerados.

9 RECOMENDACIONES

- Si se desea tomar este proyecto de grado como guía del diseño de pavimentos para la vía de estudio, es necesario generar un análisis de mayor detalle en referencia a los parámetros de suelo encontrado, características en cuanto a consideración de temas Hidráulicos y Estructurales para así determinar de manera óptima el diseño.
- Se debe tener en cuenta que las características de los agregados a usar en caso de que se construya, deben garantizar las exigencias mínimas de norma IDU - 2005, y además los requisitos de deformación y resistencia estipulados en este informe.
- Si se desea tomar este trabajo de grado como continuación de investigación se debe realizar estudios adicionales de especialidades como hidráulica y topografía, debido a que esto generara que el diseño de la estructura se complemente con las demás especialidades y su durabilidad sea mayor.



BIBLIOGRAFÍA

ALCALDÍA LOCAL DE KENNEDY .Economía Regional y Social. Actualización del diagnóstico social de la localidad de Kennedy. Bogotá. 2001.

CORDOBA MAQUILON, Jorge Eliecer. Metodología métodos de tránsito, Volúmenes de tránsito.[citado 06 Mar., 2016] Disponible en: <http://es.slideshare.net/marco11390/volumen-de-tránsito>

CORREDOR, Gustavo. Obtención y manejo de la información de tránsito. [Separata]. Managua, Agosto 2010. Pág. 2-29.

Dirección de Evaluación - Secretaría de Educación del Distrito - SED -. (s.f.). Recuperado el 6 de diciembre de 2012, de sitio Web Secretaría de Educación del Distrito: <http://www.sedbogota.edu.co/evaluacion>.

Facultad de Ingeniería Universidad Antioquia. Evaluación de factores camión de los vehículos comerciales de carga que circulan por la red vial principal colombiana. 2013. p.p. 57 - 69.

HIGUERA SANDOVAL, Carlos Hernando. Nociones sobre los métodos de diseño de estructuras de pavimentos para carreteras – volumen 2. Universidad pedagógica y tecnológica de Colombia. Facultad de Ingeniería. Escuela de transportes y vías. Tunja, 2010.

INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Guía Metodológica para el diseño de obras de Rehabilitación de Pavimentos Asfálticos de Carretera. Bogotá, 2008.

INVIAS. Norma de ensayos de materiales para carreteras. INV E – 148- 13. 2014. Instituto nacional de vías.

LEDERMAN, Pablo. Método de diseño de la Shell Pavimentos Flexibles.

MACEA, Luis F; FUENTES, Luis G y ALVAREZ, Alex E. Evaluación de factores camión. de los vehículos comerciales de carga que circulan por la red vial principal colombiana. Marzo, 2013. En: Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquia N.º 66 pp. 57-69.

MINISTERIO DE LA REPUBLICA. Parque Automotor de transporte de carga en Colombia. Informe de la subdirección operativa de transporte automotor. Bogotá, 2000.



MONTEJO FONSECA, Alfonso. Ingeniería de pavimentos para carreteras Tomo I. Universidad Católica de Colombia, Bogotá 2002. pp. 268.

MURGUEITIO A., BENAVIDES C., SOLANO E. Estudio de los Factores dado de los Vehículos que circulan por las Carreteras Colombianas. En: XI Simposio Colombiano sobre Ingeniería de Pavimentos. Cartagena D. T. y C. pp. 332-342. 1997.

NOTAS DE PAVIMENTOS. Estudio de tránsito definiciones generales. [en línea]. Marzo [cita 07 de marzo de 2016]. En: <http://notasdepavimentos.blogspot.com.co/2011/04/estudio-del-tránsito-definiciones.html>.

SANCHEZ GALINDO, Fatima. Las carreteras y su influencia en el desarrollo económico y en el bienestar social de un país. Aula abierta, 1996.

VASQUEZ VARELA, Luis Ricardo. Cargas del tránsito sobre los pavimentos de calles y carreteras. Manizales: Universidad Nacional de Colombia, 2014.

YANG, HUANG. Pavements analysis and design. 2003.



ANEXO 1 RESULTADOS DE ENSAYOS DE CBR



ANEXO 2 AFOROS, FACTOR CAMIÓN Y TPD



ANEXO 3 NUMERO DE EJES EQUIVALENTES



ANEXO 4 FORMULA DE IVANOV



ANEXO 5 DISEÑO DE AASHTO