

Verificación y propuesta de diseño en pavimento flexible y rígido para la nueva Av. Guayacanes

(Grupo 5: Av. Bosa entre la Av. Ciudad de Cali y Av. Tintal).

Luis Andrés Plata Gutiérrez



Universidad Militar Nueva Granada

Facultad de Ingeniería

Especialización en Ingeniería de Pavimentos

Bogotá D.C.

2020

TABLA DE CONTENIDIO

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	7
2. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN	7
3. OBJETIVOS	8
3.1. Objetivo general	8
3.2. Objetivos específicos	8
4. MARCO TEÓRICO	9
4.1. Pavimento	9
4.1.1. Pavimento flexible	9
4.1.2. Pavimento rígido	9
4.2. Subrasante	9
4.3. Subbase	9
4.4. Base	10
4.5. Asfalto	10
4.6. Concreto	10
4.7. Módulo de rotura (M_r)	10
5. MARCO METODOLÓGICO	12
5.1. Metodología AASTHO 93	13
5.2. Tránsito	14
5.2.1. Factor direccional y factor carril	15
5.2.2. Periodo de diseño	16
5.2.3. Clasificación del tránsito	16
5.2.4. Factor daño	17
5.3. Caracterización de la subrasante	18
5.3.1. CBR	18
5.3.2. Modulo resiliente (M_r):	19
6. DISEÑO DEL PAVIMENTO FLEXIBLE AASHTO	20
6.1. Tránsito de diseño	20

6.2.	<i>Determinación CBR de la subrasante</i>	20
6.3.	<i>CBR de diseño</i>	22
6.4.	<i>Cálculo de los Números Estructurales (SN)</i>	24
7.	<i>METODOLOGIA Y DISEÑO DEL PAVIMENTO RIGIDO AASHTO 93</i>	27
7.1.	<i>Tránsito de diseño</i>	27
7.2.	<i>Módulo de elasticidad del concreto</i>	27
7.3.	<i>Módulo efectivo de la reacción de la subrasante (k conjunto), (Mpa/m)</i>	28
7.4.	<i>Coefficiente de drenaje (Cd)</i>	30
7.5.	<i>Coefficiente de transmisión de carga (J)</i>	31
7.6.	<i>Perdida de la serviciabilidad (ΔPSI)</i>	31
7.7.	<i>Confiability (R) %</i>	31
7.8.	<i>Desviación estándar (So)</i>	31
8.	<i>COMPARACIÓN ECONÓMICA PAVIMENTO RIGIDO VS FLEXIBLE</i>	33
8.1.	<i>PROPUESTA ECONÓMICA PAVIMENTO RIGIDO</i>	34
8.2.	<i>PROPUESTA ECONÓMICA PAVIMENTO FLEXIBLE</i>	35
9.	<i>ANÁLISIS Y CONCLUSIONES</i>	36
	<i>BIBLIOGRAFÍA</i>	38

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1</i>	<i>Periodos de diseño en función del tipo de carretera</i>	<i>16</i>
<i>Tabla 2</i>	<i>Factor de daño (FD)</i>	<i>18</i>
<i>Tabla 3</i>	<i>Análisis de resultados de CBR inalterado sumergido</i>	<i>20</i>
<i>Tabla 4</i>	<i>Percentiles para la determinación del CBR de la subrasante</i>	<i>21</i>
<i>Tabla 5</i>	<i>Parámetros ecuación de IVANOV</i>	<i>23</i>
<i>Tabla 6</i>	<i>Resultados ecuación de IVANOV</i>	<i>23</i>
<i>Tabla 7</i>	<i>Coefficientes de drenaje y aporte estructura de pavimento.</i>	<i>24</i>
<i>Tabla 8</i>	<i>Cálculo espesores pavimento flexible</i>	<i>26</i>
<i>Tabla 9</i>	<i>Diseño propuesto vs diseño contractual</i>	<i>26</i>
<i>Tabla 10</i>	<i>Correlación entre la resistencia a la compresión y el módulo de elasticidad.</i>	<i>28</i>
<i>Tabla 11</i>	<i>Calidad del drenaje</i>	<i>30</i>
<i>Tabla 12</i>	<i>Valores de coeficiente de drenaje (Cd)</i>	<i>30</i>
<i>Tabla 13</i>	<i>Valores de coeficiente de transmisiones de carga (J)</i>	<i>31</i>
<i>Tabla 14</i>	<i>Niveles de confiabilidad en función del tipo de carretera</i>	<i>31</i>
<i>Tabla 15</i>	<i>Diseño final pavimento rígido Método AASHTO</i>	<i>32</i>
<i>Tabla 16</i>	<i>Precios actividades diseños</i>	<i>33</i>
<i>Tabla 17</i>	<i>Comparación estructuras de pavimento (rígido vs flexible)</i>	<i>33</i>
<i>Tabla 18</i>	<i>Valor construcción estructura de pavimento rígido</i>	<i>34</i>
<i>Tabla 19</i>	<i>Valor transporte y disposición de escombros estructura pavimento rígido</i>	<i>34</i>
<i>Tabla 20</i>	<i>Valor construcción estructura de pavimento flexible</i>	<i>35</i>
<i>Tabla 21</i>	<i>Valor transporte y disposición de escombros estructura pavimento flexible</i>	<i>35</i>

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

<i>Ilustración 1 Mapa conceptual metodología de diseño</i>	12
<i>Ilustración 2 Esquema de clasificación de vehículos</i>	17
<i>Ilustración 3 Determinación del CBR de la subrasante</i>	21
<i>Ilustración 4 CBR de la subrasante</i>	22
<i>Ilustración 5 Cálculo SN1 (Base granular)</i>	24
<i>Ilustración 6 Cálculo SN2 (Subbase granular)</i>	25
<i>Ilustración 7 Cálculo SN3 (Subrasante)</i>	25
<i>Ilustración 8 Correlación aproximada entre la clasificación de los suelos y los diferentes ensayos.</i>	29
<i>Ilustración 9 Efecto de la subbase granular sobre los valores de k</i>	29
<i>Ilustración 10 Desviación estándar</i>	32
<i>Ilustración 11 Diseño pavimento rígido (AASHTO 93)</i>	32

INTRODUCCIÓN

La infraestructura vial de la ciudad de Bogotá según el instituto de desarrollo urbano (IDU) se encuentran en una situación no tan alentadora ya que no solo la malla vial existente se encuentra bastante deteriorada, sino que también no se ha contemplado la construcción de nuevos trazados de vías que aporten a la movilidad de la ciudad; de esta problemática nace la idea de la construcción de la Av. Guayacanes, una vía con una extensión de 13 km que atraviesa la localidad de Kennedy y Bosa. La avenida Guayacanes es una vía paralela a la avenida Ciudad de Cali y Boyacá, la cual conectará el suroccidente con el centro de la ciudad y beneficiará a cerca de 130 barrios de la ciudad.

En este documento se presenta la optimización del diseño presentado por el Instituto de Desarrollo Urbano IDU para el contrato No. IDU-1533-2018 (Construcción de la avenida Bosa desde la avenida Ciudad de Cali hasta la avenida Tintal y obras complementarias, en Bogotá D.C. – Grupo 5), para lo cual se utilizará la metodología de diseño AASHTO 93, los parámetros de diseño serán los mismos utilizados por la entidad, donde se encuentran ensayos de laboratorio de suelos y de tránsito.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La malla vial de Bogotá actualmente es deficiente debido a un gran número de situaciones que se han presentado a lo largo de los años, uno de los principales problemas es el crecimiento espontáneo y descontrolado de la población que está en constante desarrollo hacia la periferia de la ciudad, sin contar con una planeación integral y estratégica que le permita adaptarse a los retos de una ciudad cambiante capaz de brindar calidad de vida a sus habitantes. (Oyuela Vargas & Machetá , 2015).

Una de las obras contemplada en la ciudad para enfrentar esta problemática es la construcción de la avenida Guayacanes la cual mejorará la calidad de vida a cerca de 2 millones de habitantes de la ciudad específicamente de las localidades de Kennedy y Bosa, ésta nueva vía se convertirá en una nueva salida por el sur de Bogotá. De allí nace la necesidad de realizar un correcto diseño de la estructura de pavimento, ya que se convertirá en un eje central para el transporte de los habitantes del sur de la ciudad, por lo tanto, es necesario garantizar que el servicio de la vía a lo largo de su vida útil sea la proyectada inicialmente y respalde la inversión que ésta haciendo actualmente la ciudad para la construcción de este nuevo corredor vial.

2. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN

¿Es posible optimizar los diseños realizados por los contratistas IDU para los proyectos desarrollados en la ciudad de Bogotá?

3. OBJETIVOS

3.1.Objetivo general

Diseñar las estructuras de pavimento flexible y rígido por medio del método AASHTO 93 para la construcción de la nueva avenida Guayacanes grupo 5: Avenida Bosa entre la avenida Ciudad de Cali y Av. Tintal.

3.2.Objetivos específicos

- Realizar el análisis de la información pertinente para la verificación y desarrollo de las dos nuevas propuestas de diseño para la nueva construcción de la nueva avenida Guayacanes Grupo 5.
- Diseñar la estructura de pavimento flexible y rígido implementando el método de la AASHTO 93 para comparar con el diseño actualmente existente.
- Realizar una comparación económica de las dos estructuras de pavimento propuestas, la cual permita evaluar cual es la mejor opción para la ciudad de Bogotá.

4. MARCO TEÓRICO

4.1.Pavimento: Conjunto de capas superpuestas, relativamente horizontales, que se diseñan y construyen técnicamente con materiales apropiados y adecuadamente compactados. Estas estructuras estratificadas se apoyan sobre la Subrasante de una vía y deben resistir adecuadamente los esfuerzos que las cargas repetidas del tránsito le transmiten durante el período para el cual fue diseñada la estructura y el efecto degradante de los agentes climáticos. (INVIAS, 2018)

4.1.1. Pavimento flexible: Tipo de pavimento constituido por una capa de rodadura bituminosa apoyada generalmente sobre capas de material no ligado.

4.1.2. Pavimento rígido: Es aquel que fundamentalmente está constituido por una losa de concreto hidráulico, apoyada sobre la subrasante o sobre una capa de material seleccionado, la cual se denomina subbase del pavimento rígido.

4.2.Subrasante: Superficie especialmente acondicionada sobre la cual se apoya la estructura del pavimento. (INVIAS, 2018)

4.3.Subbase: Capa de material granular que forma parte de estructura del pavimento que contribuye a disipar esfuerzos. Generalmente está localizada entre la subrasante y la capa de base granular o la que sirva de soporte a los pavimentos de concreto hidráulico. (Instituto de Desarrollo Urbano, 2020)

4.4.Base: Capa de material granular que forma parte de estructura del pavimento que contribuye a disipar esfuerzos. Generalmente está localizada entre la subbase granular y la capa de rodadura. (Instituto de Desarrollo Urbano, 2020)

4.5.Asfalto: El asfalto es un material de naturaleza viscosa de color negro que, entre otros usos, se emplea para su mezcla con grava y arena en la pavimentación de carreteras y autopistas. (SOLUASFALT, 2017)

4.6.Concreto: El concreto es una mezcla de materiales como la arena, grava y gravilla (también llamados agregados), y cemento, que sirve como aglutinante. El concreto es un material que para endurecer sólo necesita agua durante el mezclado, es por eso que también puede ser utilizado bajo el agua. Puede tomar casi cualquier forma si se vierte en un molde o encofrado y se transforma en piezas prefabricadas para la construcción. Como un concreto especial mezclado con materiales de relleno y de alta dureza, ofrece un sólido fundamento para los edificios. En cambio, el hormigón armado y el hormigón precomprimido resisten grandes fuerzas de tensión en la construcción de techos amplios y en la edificación de viaductos. (BUDENHEIM, 2020)

4.7.Módulo de rotura (M_r): Es un concreto diseñado especialmente para resistir esfuerzos a flexión, impuestos por el paso de vehículos en las estructuras de pavimento. (CEMEX, 2020)

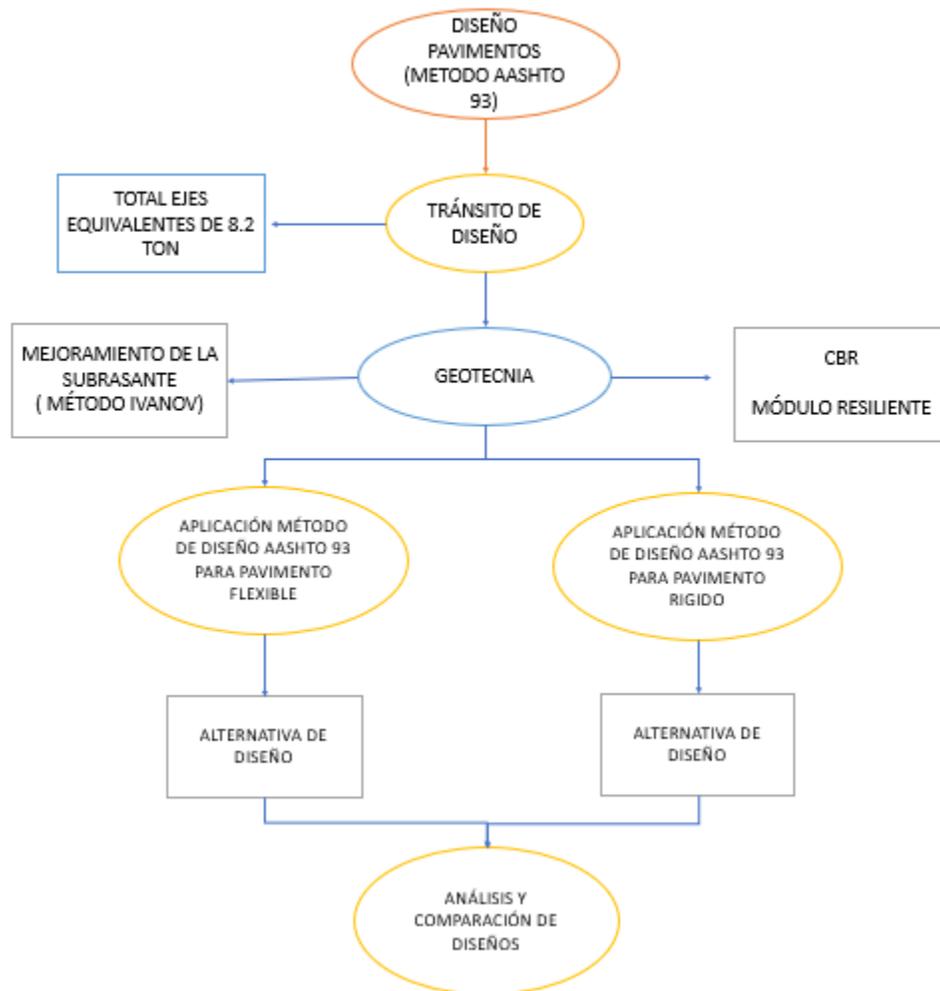
- **Beneficios:**

- Los pavimentos de concreto presentan menor deformidad en las zonas de arranque y frenado de vehículos pesados.
- El color del concreto es ideal para reducir la reflectancia, brindando más seguridad a los usuarios, especialmente en la noche o en condiciones de lluvia.
- Menores costos de mantenimiento con relación al pavimento asfáltico.
- Mayor resistencia a los derrames de gasolina y diesel.
- Permite aplicar diferentes técnicas para dar textura a la superficie e incrementar su seguridad.

5. MARCO METODOLÓGICO

En este diseño se propone realizar el diseño de la estructura de pavimento (flexible y rígido) para una de las nuevas vías proyectadas para la ciudad de Bogotá, a continuación, se presenta el mapa conceptual donde se muestra el paso a paso del diseño presentado:

Ilustración 1 Mapa conceptual metodología de diseño



5.1. Metodología AASTHO 93: Esta metodología es empleada para el diseño de pavimentos flexibles utilizando un modelo que da como resultado un Número Estructural conocido por sus siglas en inglés como SN, el cual es esencial para la determinación de los espesores de las capas que conforman la estructura del pavimento. Es importante mencionar que para la implementación de esta metodología es necesario conocer los siguientes parámetros para poder realizar el diseño:

- Tránsito de diseño, expresado en número de ejes equivalentes de 8.2Ton
- Módulo resiliente de la subrasante
- Módulo dinámico de las capas granulares y carpeta asfáltica
- Número estructural de la estructura de pavimento
- Calidad del drenaje
- Nivel de confiabilidad
- Nivel de serviciabilidad.

Para el diseño de pavimento primero se debe determinar el número estructural requerido para lo cual se utiliza la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned} \log W_{18} = & Z_r * S_0 + 9.36 \log(SN + 1) - 0.20 + \frac{\log\left(\frac{\Delta PSI}{4.2 - 1.5}\right)}{0.4 + \left(\frac{1094}{(SN + 1)^{5.19}}\right)} \\ & + 2.32 \log Mr - 8.07 \end{aligned}$$

Donde:

- **W18** = número de aplicaciones de ejes simples equivalentes de 18 kip (80 kN) hasta el tiempo t en el cual se alcanza ISP = pt

- **SN** = número estructural
- ΔPSI = diferencia entre los índices de servicio inicial y terminal
- **MR** = módulo resiliente de la subrasante (libras/pg²)
- **So** = desviación estándar total de la distribución normal de los errores asociados con las predicciones de tránsito y de comportamiento del pavimento (0.44-0.49)
- **ZR** = parámetro estadístico asociado con distribuciones normales de datos, que considera la probabilidad de que el índice de servicio del pavimento sea superior a p_t durante el periodo de diseño.

Al contar con el número estructural requerido se buscan los espesores de las capas necesarios para garantizar un número estructural mayor al requerido, teniendo en cuenta que cada uno de los espesores es afectado por un coeficiente estructural y de drenaje. El número estructural efectivo se determina por medio de la siguiente ecuación:

$$SN = u_1 * D_1 + u_2 * D_2 * m_2 + u_3 * D_3 * m_3$$

Donde:

- a_1, a_2, a_3 : Coeficientes estructurales de la capa asfáltica, base granular y subbase granular. (Pulg)
- D_1, D_2, D_3 : Espesores de la capa asfáltica, base granular y subbase granular. (Pulg)
- m_2, m_3 : Coeficientes de drenaje para base granular y subbase granular.

5.2.Tránsito: La clasificación y cuantificación del tránsito de diseño es de gran importancia para la obtención de los ejes equivalentes de 8.2Ton para el carril de diseño, existen

gran cantidad de parámetros que son necesarios conocer para poder realizar el diseño de la vía:

- Transito promedio diario (TPD).
- Clasificación vehicular (Para este caso se utilizará la clasificación recomendada por el INVIAS).
- Factores de equivalencia de carga por eje.
- Distribución direccional.
- Serie histórica de tránsito.
- Tendencia de crecimiento del tránsito.

Es necesario mencionar que existen tres tipos de transito que deben ser considerados para el diseño; transito normal, el cual corresponde al que generalmente circula por la vía sin ninguna intervención realizada; transito atraído, es el que se desviará de otras vías adyacentes principalmente debido a las condiciones del nuevo pavimento, y por último el transito generado, transito consecuencia del desarrollo económico y social de la nueva zona de influencia (desarrollo permitido, entre otras cosas, precisamente por la baja en los costos de transporte) debido al mejoramiento de la vía.

5.2.1. Factor direccional y factor carril: corresponde al número de vehículos pesados que circulan en una dirección o sentido de tráfico, normalmente corresponde a la mitad del total de tránsito, pero en algunos casos puede ser mayor en una dirección que en otra, el que se definirá según el conteo de tráfico. El factor de distribución carril expresado como una relación, que corresponde al carril que recibe el mayor número de EE, donde el tránsito por dirección mayormente se canaliza por ese carril.

5.2.2. Periodo de diseño: Se define como el tiempo elegido al iniciar el diseño, para el cual se determinan las características del pavimento, evaluando su comportamiento para distintas alternativas a largo plazo, con el fin de satisfacer las exigencias del servicio durante el periodo de diseño elegido, a un costo razonable.

Generalmente el periodo de diseño será mayor al de la vida útil del pavimento, porque incluye en el análisis al menos una rehabilitación, por lo tanto, éste será superior a 20 años. Los periodos de diseño recomendados por la AASHTO se muestran en la siguiente tabla:

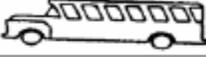
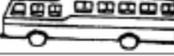
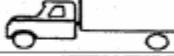
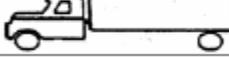
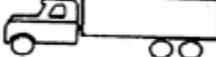
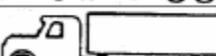
Tabla 1 Periodos de diseño en función del tipo de carretera

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	10 – 20

Fuente: AASTO, Guide for Design of Pavement Structures 1993

5.2.3. Clasificación del tránsito: El INVIAS nos presenta la siguiente clasificación de los vehículos que transitan por el territorio nacional:

Ilustración 2 Esquema de clasificación de vehículos

TIPO DE VEHICULO		ESQUEMA
AUTOS		
BUSES	BUSETA	
	BUS	
	BUS METROPOLITANO	
C2-P	CAMIÓN DE DOS EJES PEQUEÑOS	
C2-G	CAMIÓN DE DOS EJES GRANDES	
C3 Y C4	CAMIÓN C3	
	CAMIÓN C4	
	TRACTOR-CAMIÓN C2-S1	
	TRACTOR-CAMIÓN C2-S2	
	TRACTOR-CAMIÓN C3-S1	
C5	TRACTOR-CAMIÓN C3-S2	
> C5	TRACTOR-CAMIÓN C3-S3	

Fuente: INVIAS, Manual de diseño de pavimentos asfálticos para vías con bajos volúmenes de tránsito.

5.2.4. Factor daño: Factor implementado para el cálculo de los ejes equivalentes de 80kN. Los factores de daño (FD) indicados son el resultado del análisis de las cargas por eje de aproximadamente trescientos mil vehículos evaluados en los operativos de pesaje realizados por el INVIAS en las vías a su cargo durante 2000-2006.

Tabla 2 Factor de daño (FD)

Tipo de vehículo	Factor de daño (FD)	
	Vacío	Cargado
Autos		0.0
Bus grande		1.0
C2p	0.01	1.01
C2g	0.08	2.72
C3-C4	0.24	3.72
C5	0.25	4.88
> C5	0.26	5.23

Fuente: INVIAS, 2007.

5.3. Caracterización de la subrasante: el estudio del suelo de la subrasante para el diseño de un pavimento consiste en seleccionar unidades homogéneas de diseño, con base en sus propiedades mecánicas, en la geología de la zona, en las características geotécnicas del lugar y en las condiciones de drenaje. Además, para asegurar que la estructura de este esté apoyada sobre una plataforma uniforme y constante se deben considerar durante el proceso del diseño del pavimento las variaciones horizontales y verticales en los distintos tipos del suelo, los contenidos de agua, las densidades y la profundidad del nivel freático (tabla del agua). (INSTITUTO NACIONAL DE VIAS, 2008)

5.3.1. CBR: Es un ensayo empleado para evaluar la capacidad portante de los suelos donde se va a ser apoyada la estructura de pavimento, mediante la medida indirecta de resistencia al esfuerzo cortante de un suelo bajo condiciones controladas de densidad y humedad.

5.3.2. Modulo resiliente (M_r): el cual está definido como el esfuerzo desviador repetido aplicado en compresión triaxial entre la deformación axial recuperable. Así pues, el concepto de módulo resiliente está ligado invariablemente a un proceso de carga repetida, por ello es implementado para la evaluación de la capacidad de soporte de la subrasante de las estructuras de pavimento, las cuales estarán sometidas a ciclos de carga por el tránsito.

Para el método de diseño empleado en el presente trabajo (AASHTO 93), se reemplaza el CBR como parámetro para la caracterización del comportamiento de la subrasante por el módulo resiliente, sin embargo, se utiliza la siguiente correlación propuesta por Powell et al. (1984) y NCHRP (2004) Transport and Road Research Laboratory (TRRL) y M-E Pavement Design Guide Level 2 (USA):

$$M_r (psi) = 2555 CBR^{0.64}$$

6. DISEÑO DEL PAVIMENTO FLEXIBLE AASHTO

6.1.Tránsito de diseño: Para el tránsito de diseño se adaptó al estipulado en el estudio de tránsito realizado por el consorcio SEDIC – ConCol 023. 2017, el cual corresponde a 26.253.117 ejes equivalentes de 8.2Ton.

6.2.Determinación CBR de la subrasante

Tomando los resultados de los ensayos de CBR inalterado sumergido que se encuentran en el anexo 1 (Ajustes de los estudios y diseños de pavimentos), se realiza el cálculo del CBR de la subrasante utilizamos la metodología AASHTO. La cual indica que para la determinación del CBR se deben organizar de menor a mayor valor y calcular el número en porcentaje de CBR mayores o iguales al intervalo de estudio, tal como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 3 Análisis de resultados de CBR inalterado sumergido

# Muestra	Abscisa	CBR (%)	# CBR >=	% CBR >=
3	K0+124	0,9	21	100%
12	K0+781	0,9	21	100%
6	K0+386	1	19	90%
7	K0+387	1,1	18	86%
9	K0+524	1,3	17	81%
2	K0+051	1,4	16	76%
18	K1+369	1,4	16	76%
1	K0+037	1,7	14	67%
5	K0+298	1,7	14	67%
14	K0+968	2,1	12	57%
19	K1+372	2,1	12	57%
4	K0+234	2,2	10	48%
13	K0+804	2,2	10	48%
10	K0+528	2,3	8	38%
21	K1+511	2,4	7	33%
20	K1+421	3	6	29%
15	K1+117	3,4	5	24%
8	K0+405	3,5	4	19%

# Muestra	Abscisa	CBR (%)	# CBR >=	% CBR >=
16	K1+160	3,5	4	19%
11	K0+699	4,6	2	10%
17	K1+239	5,7	1	5%

Fuente: Ajustes de los estudios y diseños de pavimentos (2020)

Luego de haber obtenido los porcentajes de CBR mayores o iguales por intervalo, se procede a graficar el CBR vs % valores mayores o iguales dando como resultado la siguiente gráfica

Ilustración 3 Determinación del CBR de la subrasante

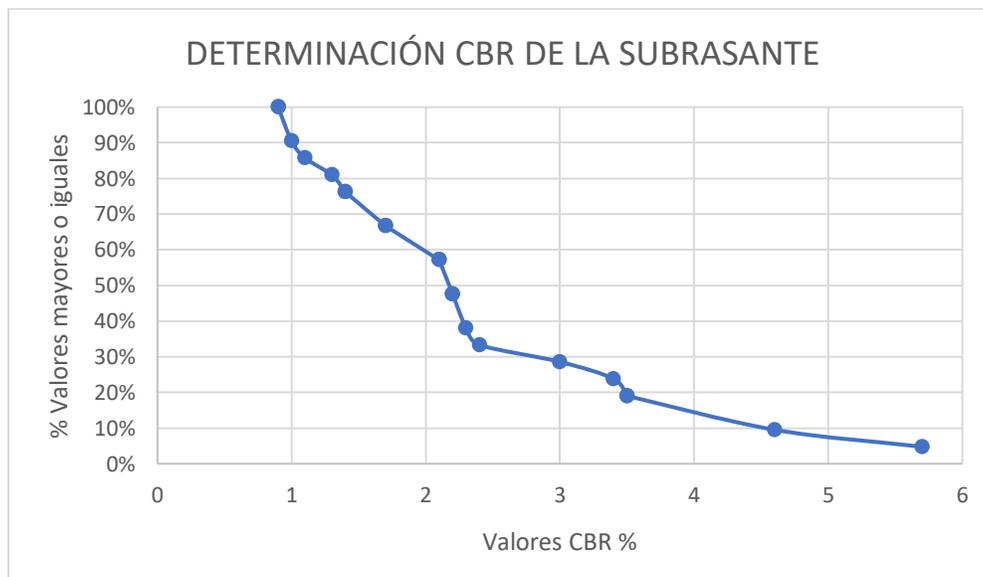


Tabla 4 Percentiles para la determinación del CBR de la subrasante

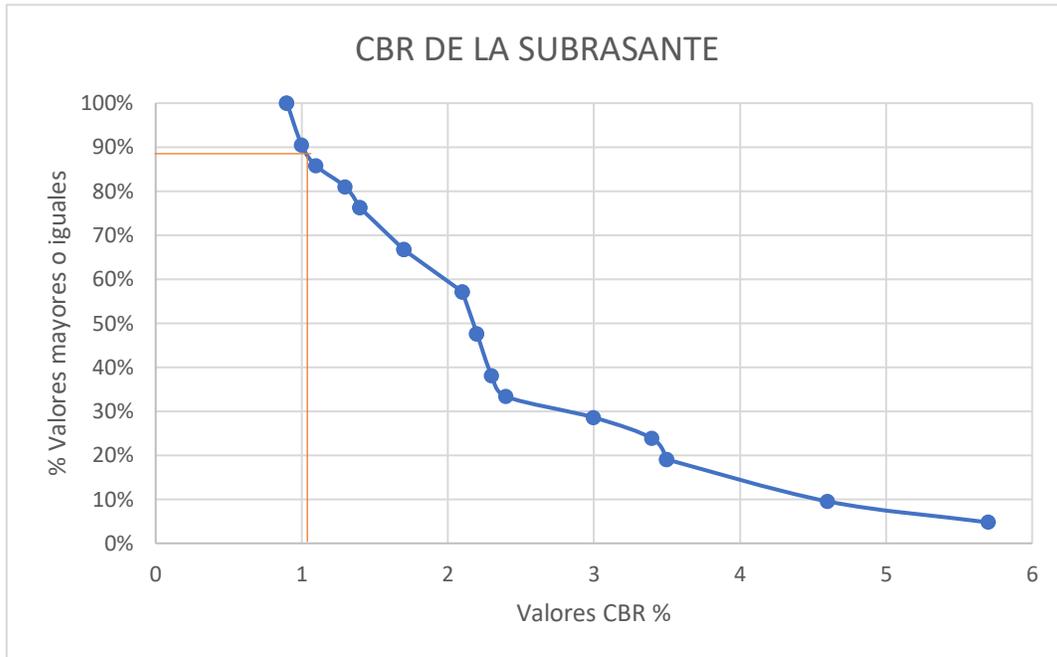
Clase de Tránsito	Nivel de tránsito (N)	Valor de diseño %
Liviano	10^4 o menos	60 %
Mediano	$10^4 - 10^6$	75 %
Pesado	mayor de 10^6	87,5 %

Fuente: Instituto del Asfalto. Thickness design – Asphalt pavements for highways and streets Manual Series No 1.

Novena edición (Revisión). Lexington, 2006. P. 26.

Debido a que nuestro tránsito de diseño es mayor de 1'000.000 de ejes equivalentes tomamos el valor de diseño igual al 87.5%.

Ilustración 4 CBR de la subrasante



Para lo cual obtenemos un CBR de la subrasante igual al 1%.

6.3.CBR de diseño: Debido a que el CBR de la subrasante obtenido es del 1%, es necesario realizar un mejoramiento de esta, para lo cual se implementa la metodología de IVANOV, en el cual es necesario conocer: CBR de la subrasante, CBR del material de mejoramiento y el CBR de diseño al cual se quiere llegar, que para este caso al ser una comparación con el diseño propuesto se toma el mismo (4%).

El material para utilizar como mejoramiento será un rajón con CBR igual al 10%; realizando las iteraciones necesarias mediante la herramienta de Excel. Se calcula el espesor de material granular necesario para alcanzar un CBR de diseño del 4%.

$$E_{eq} = \frac{E_{SBR}}{1 - \frac{2}{\pi} \left(1 - \frac{1}{n^{3,5}}\right) \tan^{-1} \left(n \frac{h_{MEJ}}{2a}\right)}$$

Dónde:

E_{eq} : módulo elástico equivalente del sistema

E_{SBR} : módulo elástico de la subrasante

E_{MEJ} : módulo elástico del material de mejoramiento

h_{MEJ} : espesor del mejoramiento, cm

a : radio del área de carga, cm

n : parámetro adimensional determinado con la expresión

$$n = \sqrt[2,5]{E_{MEJ}/E_{SBR}}$$

Tabla 5 Parámetros ecuación de IVANOV

E1-2 (kgf/cm2)	436,2
E1 (kgf/cm2)	784,1
E2 (kgf/cm2)	179,6
n	1,8
h1 (cm)	30
2a (cm)	30,44
CBR (%)	4

Para lo cual se obtuvo los siguientes resultados:

Tabla 6 Resultados ecuación de IVANOV

CBR (%)		h1 (cm)	CBR DISEÑO (%)	MR equivalente (kg/cm2)	MR equivalente (psi)
SUBRASANTE	MAT. GRANULAR MEJORA				
1	10	30	4	436,22	6205

El espesor necesario de mejoramiento para la subrasante es de 30cm de rajón y se implementará el uso de un geotextil de separación para evitar la contaminación del material, según el diseño propuesto el mejoramiento de 60cm; aquí ya encontramos una diferencia en cuanto al diseño implementado para la construcción de la vía.

6.4.Cálculo de los Números Estructurales (SN): Para el cálculo de los números estructurales se utilizó el software de la AASHTO y se implementaron los siguientes coeficientes de aporte y de drenaje recomendados por el instituto:

Tabla 7 Coeficientes de drenaje y aporte estructura de pavimento.

Capa	Coeficientes de aporte		Coeficientes de drenaje		módulos E , (psi)
	a1	a2	m1	m2	
Carpeta asfáltica	0,44		1		290.000
Base granular		0,14	0,9		30.300
Subbase granular		0,11	0,9		18.800

A continuación, se calcula los números estructurales para cada una de las capas de la estructura de pavimento.

- **Cálculo SN1 (Base granular)**

Ilustración 5 Cálculo SN1 (Base granular)

The screenshot shows the 'Ecuación AASHTO 93' software window. It is configured for a flexible pavement ('Pavimento flexible'). The reliability is set to 90% (Zr = -1.282) and the standard deviation (So) is 0.45. The initial serviceability (PSI) is 4.2 and the final serviceability is 2.2. The resilient modulus of the subgrade (Mr) is 30300 psi. The analysis type is set to 'Calcular SN', resulting in a structural number (SN) of 3.39 and a W18 value of 26253117. Buttons for 'Calcular' and 'Salir' are visible at the bottom.

- **Cálculo SN2 (Subbase granular)**

Ilustración 6 Cálculo SN2 (Subbase granular)

Ecuación AASHTO 93

Tipo de Pavimento: Pavimento flexible Pavimento rígido

Confiabilidad (R) y Desviación estándar (So): 90 % $Z_r = -1.282$ So 0.45

Serviciabilidad inicial y final: PSI inicial 4.2 PSI final 2.2

Módulo resiliente de la subrasante: Mr 18800 psi

Información adicional para pavimentos rígidos:

Módulo de elasticidad del concreto - E_c (psi) Coeficiente de transmisión de carga - (J)

Módulo de rotura del concreto - S_c (psi) Coeficiente de drenaje - (Cd)

Tipo de Análisis: Calcular SN Calcular W18

W18 = 26253117

Número Estructural: SN = 4.01

Calcular Salir

- **Cálculo SN3 (Subrasante)**

Ilustración 7 Cálculo SN3 (Subrasante)

Ecuación AASHTO 93

Tipo de Pavimento: Pavimento flexible Pavimento rígido

Confiabilidad (R) y Desviación estándar (So): 90 % $Z_r = -1.282$ So 0.45

Serviciabilidad inicial y final: PSI inicial 4.2 PSI final 2.2

Módulo resiliente de la subrasante: Mr 6205 psi

Información adicional para pavimentos rígidos:

Módulo de elasticidad del concreto - E_c (psi) Coeficiente de transmisión de carga - (J)

Módulo de rotura del concreto - S_c (psi) Coeficiente de drenaje - (Cd)

Tipo de Análisis: Calcular SN Calcular W18

W18 = 26253117

Número Estructural: SN = 5.74

Calcular Salir

Teniendo el SN requerido calculamos los espesores para obtener un Numero Estructural mayor al requerido para lo cual obtuvimos la siguiente tabla:

Tabla 8 Cálculo espesores pavimento flexible

$N_{8,2T}$	26.253.117	= w18 (soft)	CA	a1	0,44	PROPUESTA DE DISEÑO				
CBR	4			m1	1	SN1	SN1	SN2	SN3	SN3
Mr_3 (psi)	6205		BG	a2	0,14		3,39			
Confiabil (%)	90	$Z_r = -1,282$		m2	0,9	D1	D2	D3		
So	0,45		SBG	a3	0,11	19,57	12,50	44,39		
PSI_i	4,2			m3	0,9	Ajuste	Ajuste	Ajuste		
PSI_f	2,2		SRS	Mr3 (psi)	6205	20	25	30		

De acuerdo con la anterior tabla tenemos la siguiente estructura de pavimento:

- Carpeta asfáltica: 20 cm
- Base granular: 25 cm
- Subbase granular: 30cm

Con estos espesores obtenemos un **SNe = 5.87**, el cual es mayor al SN requerido (5.74) por lo tanto este cumpliría el diseño final de la estructura de pavimento flexible.

Tabla 9 Diseño propuesto vs diseño contractual

DISEÑO PROPUESTO	
0.20m	CA
0.25m	BG
0.30m	SBG
0.30m	SRS

DISEÑO CONTRATO	
0.24m	CA
0.20m	BG
0.33m	SBG
0.60m	SRS

En ambos casos se propuso el mejoramiento de la subrasante con rajón, entre el cual debe considerarse 10 cm de sello en un material granular seleccionado.

7. METODOLOGIA Y DISEÑO DEL PAVIMENTO RIGIDO AASHTO 93

7.1.Tránsito de diseño: Para el diseño en pavimento rígido por AASHTO 93 se utiliza el mismo tránsito de diseño que para pavimento flexible, el cual corresponde a 26.253.117 ejes equivalentes de 8.2Ton.

7.2. Módulo de elasticidad del concreto 10^4 (MPA): Los parámetros del concreto necesarios para calcular el Módulo de Elasticidad (E_c) son: Resistencia a la Compresión (F'_c) y el Módulo de Rotura del concreto (Mr) como se describe a continuación:

- **Mr:** Se toma en módulo de rotura comercial de 4,5Mpa (652,67 PSI).
- **F' c :** Para calcular la resistencia a la compresión del concreto a utilizar en el diseño se utiliza la siguiente correlación:

$$Mr = 2,2 \sqrt{f'_c} \quad (f'_c \text{ en } kg/cm^2)$$

Despejando f'_c se obtiene

$$f'_c = \left(\frac{Mr}{2,2} \right)^2$$

$$f'_c = \left(\frac{45,88}{2,2} \right)^2$$

$$f'_c = \left(\frac{45,88}{2,2} \right)^2 = 435 \frac{kg}{cm^2}$$

Obtenemos un $f'c$ de 435 kg/cm² igual a 42.65 Mpa y 6187 psi (dato necesario para calcular el módulo de elasticidad del concreto.)

- **Ec:** Debido a que no se cuenta con la información del tipo de agregado, se utiliza la correlación presentada en la tabla 10, dando como resultado 25.469 Mpa, equivalente a 3'693.966 psi.

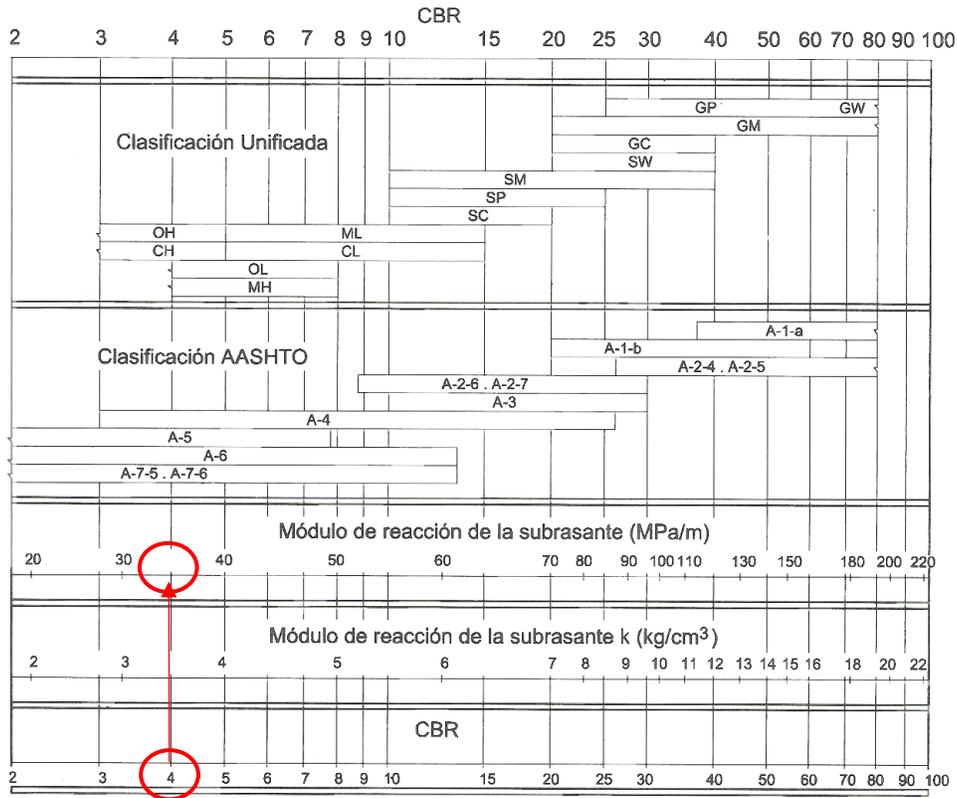
Tabla 10 Correlación entre la resistencia a la compresión y el módulo de elasticidad.

Tipo de agregado y origen	Módulo de elasticidad E_c (MPa – kg/cm ²)
Grueso – Igneo	$E_c = 5.500 \sqrt{f'c} - 17.500 \sqrt{f'c}$
Grueso – Metamórfico	$E_c = 4.700 \sqrt{f'c} - 15.000 \sqrt{f'c}$
Grueso – Sedimentario	$E_c = 3.600 \sqrt{f'c} - 11.500 \sqrt{f'c}$
Sin información	$E_c = 3900 \sqrt{f'c} - 12.500 \sqrt{f'c}$

7.3. Módulo efectivo de reacción de la subrasante (k_{sbr} .) y (k conjunto), (Mpa/m):

Para hallar el módulo el módulo de reacción conjunto (k), es necesario encontrar el módulo de reacción de la subrasante (k_{sbr}), el k_{sbr} se determina mediante la siguiente ilustración teniendo el CBR de este.

Ilustración 8 Correlación aproximada entre la clasificación de los suelos y los diferentes ensayos.



Como se muestra en la anterior ilustración para un CBR del 4%, el k_{sbr} es aproximadamente 35 Mpa/m; teniendo el k_{sbr} se procede a encontrar el k conjunto con la siguiente tabla:

Ilustración 9 Efecto de la subbase granular sobre los valores de k

Valor de k para subrasante		Valor de k para subbase							
		100 mm		150 mm		225 mm		300 mm	
MPa/m	Lb/pulg ³	MPa/m	Lb/pulg ³	MPa/m	Lb/pulg ³	MPa/m	Lb/pulg ³	MPa/m	Lb/pulg ³
20	73	23	85	26	96	32	117	38	140
40	147	45	165	49	180	57	210	66	245
60	220	64	235	66	245	76	280	90	330
80	295	87	320	90	330	100	370	117	430

1 MPa/m = 0,1 kgf/cm³.

Debido a que para un k_{sbr} de 35 Mpa/m no existe k conjunto exacto, es necesario realizar una interpolación, para este diseño se escoge una subbase de espesor de 0.15m y para estos parámetros el k conjunto seria de 43.25 Mpa/m (159 pci).

7.4.Coeficiente de drenaje (Cd):

Para encontrar este coeficiente es necesario conocer la calidad del drenaje según la tabla 8, donde para este diseño se toma una calidad buena teniendo en cuenta que, al ser un proyecto nuevo, se realizarán obras de drenaje diseñadas para evacuar el agua de los máximos eventos de precipitación ocurridos durante el periodo de diseño, durante un plazo máximo de un día.

Tabla 11 Calidad del drenaje

Calidad del drenaje	Tiempo que tarda el agua en ser evacuada
Excelente	2 horas
Bueno	1 día
Mediano	1 semana
Malo	1 mes
Muy malo	el agua no se evacúa

Teniendo la calidad de drenaje, se asume un valor del porcentaje de tiempo en el que la estructura del pavimento estará expuesta a niveles de humedad próximos a saturación del 5 al 25%, dando un valor de Cd igual a 1,05.

Tabla 12 Valores de coeficiente de drenaje (Cd)

Calidad del drenaje	Porcentaje de tiempo en el que la estructura del pavimento está expuesta a niveles de humedad próximos a la saturación			
	Menos del 1%	1% - 5%	5% - 25%	Más del 25%
Excelente	1,25 - 1,20	1,20 - 1,15	1,15 - 1,10	1,10
Bueno	1,20 - 1,15	1,15 - 1,10	1,10 - 1,00	1,00
Mediano	1,15 - 1,10	1,10 - 1,00	1,00 - 0,90	0,90
Malo	1,10 - 1,00	1,00 - 0,90	0,90 - 0,80	0,80
Muy malo	1,00 - 0,90	0,90 - 0,80	0,80 - 0,70	0,70

7.5. Coeficiente de transmisión de carga (J):

Este coeficiente se encuentra relacionada en la siguiente tabla, teniendo en cuenta que se usarán bermas en concreto, dispositivos de transmisión de cargas y el tipo de pavimento sería reforzado con juntas, se toma un valor promedio de 2,8.

Tabla 13 Valores de coeficiente de transmisiones de carga (J)

Bermas	De asfalto		De concreto	
	Si	No	Si	No
Dispositivos de transmisión de cargas				
Tipo de pavimento				
1. No reforzado o reforzado con juntas	3,2	3,8 - 4,4	2,5 - 3,1	3,6 - 4,2
2. Reforzado continuo	2,9 - 3,2	--	2,3 - 2,9	

7.6. Pérdida de la serviciabilidad (ΔPSI): Para una vía principal el valor recomendado por la AASHTO es de 2,5.

7.7. Confiabilidad (R) %: Teniendo en cuenta que se trata de una vía principal de la ciudad de Bogotá, según la tabla recomendada por el método para arterias principales urbanas, existe un rango entre 80 y 99%, se tomara el promedio de este rango el cual corresponde a una confiabilidad de 90%.

Tabla 14 Niveles de confiabilidad en función del tipo de carretera

Tipo de carretera	Niveles de confiabilidad	
	Urbana	Interurbana
Autopistas y carreteras importantes	85 - 99,9	80 - 99,9
Arterias principales	80 - 99	75 - 95
Colectoras	80 - 95	75 - 95
Locales	50 - 80	50 - 80

7.8. Desviación estándar (S_o): Según la tabla de diseño de la AASHTO, la desviación estándar depende del número de ejes equivalentes de diseño para este caso son 26 millones de ejes equivalentes, por lo cual obtenemos una desviación estándar de 0,35.

Ilustración 10 Desviación estándar

Tránsito esperado en el carril de diseño (millones de ejes equivalentes)	Nivel de confiabilidad, R%	Factor Z_r	Factor S_o	F.S.
<5	50	0,000	0,35	1,00
5 a 15	50 - 60	0,000 - 0,253	0,35	1,00 - 1,23
15 a 30	60 - 70	0,253 - 0,524	0,35	1,23 - 1,83
30 a 50	70 - 75	0,524 - 0,674	0,34	1,51 - 1,70
50 a 70	75 - 80	0,674 - 0,841	0,32	1,84 - 1,86
70 a 90	80 - 85	0,841 - 1,037	0,30	1,79 - 2,05

Luego de obtener todos los parámetros requeridos, se procede a realizar el diseño para lo cual utilizamos el programa de la AASHTO para el diseño de pavimentos rígidos y se encontró el espesor como muestra la siguiente ilustración.

Ilustración 11 Diseño pavimento rígido (AASHTO 93)

Luego de realizar el diseño utilizando el método AASHTO para pavimentos rígidos se obtuvo el espesor de la losa la cual corresponde a 10,5 pulgadas (27cm), de acuerdo con lo anterior se tiene la siguiente estructura de pavimento:

Tabla 15 Diseño final pavimento rígido Método AASHTO

DISEÑO PAVIMENTO RIGIDO	
0.27m	LOSA DE CONCRETO
0.15m	SBG
0.3m	MEJORAMIENTO SUBRASANTE CON RAJÓN

8. COMPARACIÓN ECONÓMICA PAVIMENTO RIGIDO VS FLEXIBLE

Para realizar la comparación económica se tomaron valores comerciales de materiales y mano de obra para el año 2020, dicha comparación se realizará para 1 km de vía. Los precios fueron obtenidos de los precios contractuales del proyecto.; a continuación, se presenta el listado de actividad junto con su correspondiente precio:

Tabla 16 Precios actividades diseños

Actividad	Und	Precio
Excavación mecánica	m3	\$ 4.500
Transporte y disposición de escombros	m3	\$ 34.400
Subbase granular A	m3	\$ 128.000
Sello (Material granular seleccionado SBGB)	m3	\$ 105.000
Losa de concreto MR 45 (Incluye suministro, formateado, Colocación, Curado, Juntas y acabado. Incluye acero de refuerzo)	m3	\$ 646.000
Estabilización de subrasante con rajón	m3	\$ 99.000
Base granular A	m3	\$ 147.000
Mezcla asfáltica en caliente MD12	m3	\$ 609.000

A continuación, se muestran las dos estructuras de pavimento propuestas:

Tabla 17 Comparación estructuras de pavimento (rígido vs flexible)

DISEÑO PAVIMENTO RIGIDO	
0.27m	LOSA DE CONCRETO
0.15m	SUBBASE GRANULAR
0.10m	SELLO
0.3m	MEJORAMIENTO SUBRASANTE CON RAJÓN

DISEÑO PAVIMENTO FLEXIBLE	
0.20m	CARPETA ASFÁLTICA
0.25m	BASE GRANULAR
0.30m	SUBBASE GRANULAR
0.10m	SELLO
0.30m	MEJORAMIENTO SUBRASANTE CON RAJÓN

Teniendo en cuenta las estructuras de pavimento propuestos se procede a realizar el valor total de cada una de las propuestas:

8.1.PROPUUESTA ECONÓMICA PAVIMENTO RIGIDO

Tabla 18 Valor construcción estructura de pavimento rígido

DISEÑO PAVIMENTO RIGIDO	Espesor (m)	Vr. Unit (\$)	Ancho calzada (m)	Longitud (m)	Precio total (\$)
LOSA DE CONCRETO	0,27	\$ 646.000	9,5	1000	\$ 1.656.990.000
SUBBASE GRANULAR	0,15	\$ 128.000			\$ 182.400.000
SELLO	0,1	\$ 105.000			\$ 99.750.000
MEJORAMIENTO SUBRASANTE CON RAJÓN	0,3	\$ 99.000			\$ 282.150.000
TOTAL PAVIMENTO RIGIDO					\$ 2.221.290.000

Tabla 19 Valor transporte y disposición de escombros estructura pavimento rígido

TRANSPORTE Y DISPOSICIÓN DE ESCOMBROS						
Actividades	Vr. Unit (\$)	Longitud (m)	Ancho (m)	Estructura de pavimento (m)	Volumen (m3)	Vr. Total
Excavación mecánica	\$ 4.500	1000	9,5	0,82	7790	\$ 35.055.000
Transporte y disposición de escombros	\$ 34.400	1000	9,5	0,82	7790	\$ 267.976.000
TOTAL PAVIMENTO RIGIDO						\$ 303.031.000

8.2.PROPUESTA ECONÓMICA PAVIMENTO FLEXIBLE

Tabla 20 Valor construcción estructura de pavimento flexible

DISEÑO PAVIMENTO FLEXIBLE	Espesor (m)	Vr. Unit (\$)	Ancho calzada (m)	Longitud (m)	Precio total (\$)
CARPETA ASFÁLTICA	0,2	\$ 609.000	9,5	1000	\$ 1.157.100.000
BASE GRANULAR	0,25	\$ 147.000			\$ 349.125.000
SUBBASE GRANULAR	0,3	\$ 128.000			\$ 364.800.000
SELLO	0,1	\$ 105.000			\$ 99.750.000
MEJORAMIENTO SUBRASANTE CON RAJÓN	0,3	\$ 99.000			\$ 282.150.000
TOTAL PAVIMENTO FLEXIBLE					\$ 2.252.925.000

Tabla 21 Valor transporte y disposición de escombros estructura pavimento flexible

TRANSPORTE Y DISPOSICIÓN DE ESCOMBROS						
Actividades	Vr. Unit (\$)	Longitud (m)	Ancho (m)	Estructura de pavimento (m)	Volumen (m3)	Vr. Total
Excavación mecánica	\$ 4.500	1000	9,5	1,15	10925	\$ 49.162.500
Transporte y disposición de escombros	\$ 34.400	1000	9,5	1,15	10925	\$ 375.820.000
TOTAL PAVIMENTO FLEXIBLE						\$ 424.982.500

9. ANÁLISIS Y CONCLUSIONES

- Los estudios de suelo a lo largo de los tramos homogéneos del proyecto demostraron que es necesario realizar un mejoramiento de la subrasante debido a que el valor del CBR es inferior al 3%, el cual es el valor mínimo recomendado por parte del Instituto de Desarrollo Urbano (IDU) para el material de apoyo de la estructura de pavimento, por lo cual se realizó un mejoramiento de la subrasante con material tipo rajón implementando la metodología de IVANOV, la cual arrojó un espesor de mejoramiento de 30cm, el cual difiere con el espesor de mejoramiento del contrato que es de 60cm, se hace necesario revisar que metodología utilizaron para calcular el mejoramiento y que condiciones especiales se consideraron para llegar a dicho espesor.
- Para realizar un comparación más real entre las propuesta de pavimento flexible y rígido, se utilizaron en ambos casos la misma cantidad de ejes equivalentes de 8.2Ton (26.253.117) y el mismo periodo de diseño (10 años), como se puede observar en ambos casos es necesario realizar mejoramiento de la subrasante para alcanzar un valor de CBR apto para el diseño de la estructura (4%); es posible evidenciar como la estructura de pavimento flexible necesita mayores espesores de construcción, mientras en el pavimento rígido la estructura de pavimento es de 0.82m, el del pavimento flexible alcanza los 1.15m, lo cual se transfiere en costos de excavación y transporte de material, en consecuencia no solo se tiene una afectación económica del proyecto sino un afectación ambiental debido a la mayor explotación de material para la construcción de la vía.

- Al realizar la evaluación económica de las dos propuestas de diseño (rígido y flexible) se concluye que para la ciudad de Bogotá es más factible económicamente la construcción de la propuesta en pavimento rígido ya que presenta menores costos de construcción debido principalmente a que la estructura de pavimento es de menor dimensión y por lo tanto la necesidad de materiales es de menor cantidad; sin embargo, se debe considerar que el concreto es un material más costoso y con ciertos requerimientos especiales. La construcción del pavimento rígido genera un ahorro de \$153.596.500 de ahorro frente a la estructura de pavimento flexible, por lo tanto, se recomienda implementar esta estructura para la construcción de la nueva Av. Guayacanes, dentro de esta propuesta de pavimento rígido también se debe evaluar una de las grandes ventajas a futuro frente al pavimento flexible donde se encuentra menores costos de mantenimiento a lo largo del tiempo.
- Los pavimentos rígidos tienen generalmente mayores costos iniciales en los proyectos debido principalmente a que para estos tipos de pavimentos los periodos de diseño son generalmente mínimo de 20 años, en este estudio se puede observar como para periodos de diseño iguales, los pavimentos rígidos presentan costes iniciales de construcción menores frente a los pavimentos flexibles.
- Se debe considerar que los procesos de construcción de ambos tipos de pavimento difieren en su totalidad, los rendimientos para la habilitación de la vía son mucho mayores para los pavimentos flexibles, siendo una de las grandes desventajas de este pavimento y debido a que estos proyectos cuentan con límites de tiempo muy ajustados, el pavimento flexible es la opción más viable.

BIBLIOGRAFÍA

- BUDENHEIM. (2020). Obtenido de <https://www.budenheim.com/es/soluciones/construccion/concreto/>
- CEMEX. (2020). *CEMEX COLOMBIA*. Obtenido de <https://www.cemexcolombia.com/concretos/pavimentos-modulo-rotura>
- huang, Y. (1998). *Pavement Analysis And Desing*.
- Instituto de Desarrollo Urbano. (08 de Octubre de 2020). *Idu.gov.co*. Obtenido de <https://www.idu.gov.co/page/transparencia/informacion-de-interes/glosario>
- INSTITUTO NACIONAL DE VIAS. (2008). *Manual de diseño de pavimentos en concreto para vías con bajos, medios y altos volúmenes de tránsito*. Medellín: Instituto colombiano de productores de cemento.
- INVIAS. (2018). *Manual de diseño geométrico de carreteras*.
- Oyuela Vargas, M., & Machetá, J. (2015). *Malla vial en Bogotá: política pública o ciclo de administración*.
- Packard, R. (1984). *Thickness design for concrete highway and street pavements*.
- Papagiannakis, A., & Masad, E. (2008). *Pavement design and materials*. Hoboken, United States of America: John Wiley y Sons.
- SOLUASFALT. (13 de SEPTIEMBRE de 2017). *ASFALTO MADRID*. Obtenido de <https://asfaltomadrid.com/obtencion-asfalto-petroleo/>
- UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA FACULTAD DE INGENIERIA. (2008). *CONTRATO INTERADMINISTRATIVO No. 020 de 2008 CONCEPTO No. 10 - ESPECTROS DE CARGA INSTITUTO DE DESARROLLO URBANO - IDU. BOGOTÁ*.
- URIBE, C. A. (2015). *ANALISIS DE LOS CRITERIOS DE DISEÑO DE PAVIMENTO RIGIDO BAJO LA OPTICA DE LAS CONDICIONES ESPECIALES DE LA ISLA DE SAN ANDRES Y ESPECIFICACIONES TECNICAS DE LA SECRETARIA DE INFRAESTRUCTURA DE LA GOBERNACION DEPARTAMENTAL*. Bogotá, Colombia: Universidad Católica de Colombia.