

ESPECIALIZACIÓN EN INGENIERÍA DE PAVIMENTOS

DISEÑO DE LA ESTRUCTURA DE PAVIMENTO RÍGIDO POR MEDIO DEL MÉTODO PCA Y EL MÉTODO AASHTO DE LA VÍA UBICADA EN LA CALLE 5 ENTRE LA CARRERA 11 Y LA CARRERA 5, DEL BARRIO PESCAÍTO DE LA CIUDAD DE SANTA MARTA – MAGDALENA, PARA ANALISIS Y SELECCIÓN DEL DISEÑO ADECUADO.



PROYECTO DE APLICACIÓN INGENIERÍA DE PAVIMENTOS

Tutor trabajo de grado: Ing. Felipe Alfredo Riaño Pérez

Presentado por:

Ing. Mario Marco Saltaren Daniel

Título Profesional Obtenido

ESPECIALISTA EN INGENIERÍA DE PAVIMENTOS

UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA

FACULTAD DE INGENIERÍA

Bogotá D.C., noviembre de 2020

TABLA DE CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN	6
2	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	7
3	OBJETIVO GENERAL	9
3.1	Objetivos específicos.....	9
4	MARCO TEORICO	10
4.1	MÉTDO DE DISEÑO PCA	11
4.2	MÉTODO AASHTO 93.....	11
4.3	TRANSITO	11
5	DOCUMENTOS DE REFERENCIA	13
6	PROCEDIMIENTO MÉTODO PCA	14
6.1	Transito - Periodo de Diseño.....	14
6.2	Elección del Concreto	22
6.3	Tipo de Suelo	23
6.4	Factor K conjunto.....	24
6.5	Análisis de Fatiga y Erosión.....	26
6.6	Caso de valores de K para hallar el verdadero K conjunto.....	27
6.7	Caso del K conjunto	28
6.8	Datos relevantes para el Diseño	33
7	PROCEDIMIENTO MÉTODO AASTHO	38
7.1	Transito - Periodo de Diseño.....	38
7.2	Módulo de Elasticidad (Correlación)	48
7.3	Factor K conjunto.....	49
7.4	Valor del Coeficiente de Trasmisión de Cargas, J	50
7.5	Coeficiente de Drenaje	51
7.6	Confiabilidad R (%)	52
7.7	Desviación Estándar (So)	53
7.8	Pérdida de Serviciabilidad, Δ PSI	53
7.9	Procedimiento para hallar el espesor de la losa por medio del método gráfico de AASHTO.....	53
8	CONCLUSIONES	62

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación del Proyecto.....	8
Figura 2. Relación esfuerzo profundidad	10
Figura 3. Modelo lineal INVIAS.	14
Figura 4. Caracterización de suelos de Colombia INVIAS.....	23
Figura 5. Correlación aproximada entre la clasificación de los suelos y los diferentes ensayos.	24
Figura 6. Formula de interpolación	27
Figura 7. Esfuerzo equivalente pavimento con berma de concreto (eje sencillo y tándem).....	29
Figura 8. Esfuerzo equivalente pavimento sin berma o con berma de concreto, ejes trídem	30
Figura 9. Factor de erosión para ejes sencillos y tándem. Pavimentos de concreto con dovelas y con bermas de concreto.....	31
Figura 10. Factor de erosión para ejes trídem en pavimentos de concreto con dovelas, sin bermas y con bermas de concreto.	32
Figura 11. Análisis de fatiga. Repeticiones admisibles en función de la relación de esfuerzo en pavimentos con y sin berma de concreto	35
Figura 12. Análisis de erosión con berma de concreto. Repeticiones admisibles en función del factor de erosión en pavimentos con berma de concreto.....	36
Figura 13. Modelo lineal INVIAS.	38
Figura 14. Expresiones para el cálculo del factor de equivalencia.....	41
Figura 15. Correlación entre la resistencia a la compresión y el módulo de elasticidad	48
Figura 16. Correlación aproximada entre la clasificación de los suelos y los diferentes ensayos	49
Figura 17. Nomograma AASHTO (primera parte).....	56
Figura 18. Nomograma AASHTO (segunda parte)	57
Fotografía 19. Granulometrías admisibles para la construcción de bases y subbases granulares	58
Figura 20. Recomendación para las barras de anclaje.....	58
Figura 21. Recomendación para la sección de los pasadores de carga.	59
Figura 22. Representación de la Estructura de Pavimento.	61
Figura 23. Representación de la Estructura de Pavimento.	61

INDICE DE TABLAS

Tabla. 1 Resultados de Aforos.	14
Tabla. 2 Tasas de crecimiento.	15
Tabla. 3 Niveles de confiabilidad a adoptar en función del tipo de carretera	15
Tabla. 4 Valores de Z_r en función de la confiabilidad.	16
Tabla. 5 Datos generales del diseño.	16
Tabla. 6 Eje sencillo 10 toneladas.	17
Tabla. 7 Eje sencillo 8 toneladas.	18
Tabla. 8 Eje sencillo 5 toneladas.	18
Tabla. 9 Eje tándem 17 toneladas.	19
Tabla. 10 Eje tándem 16 toneladas.	20
Tabla. 11 Eje tándem 15 toneladas.	20
Tabla. 12 Eje trídem 27 toneladas.	21
Tabla. 13 Eje trídem 9.6 toneladas	22
Tabla. 14 Total de frecuencia en periodo de diseño (N. de ejes).....	22
Tabla. 15 Elección del concreto.	22
Tabla. 16 Relación de cargas por eje con la Frecuencia en periodo de diseño (N. de ejes).....	23
Tabla. 17 Efecto de la subbase granular sobre los valores de K.	25
Tabla. 18 Interpolación de la totalidad de ejes. K conjunto.	26
Tabla. 19 Factores de seguridad para cargas.....	33
Tabla. 20 Resultados de diseño PCA.	37
Tabla. 21 Análisis de Fatiga y Análisis de Erosión.....	37
Tabla. 22 Tasas de crecimiento.	39
Tabla. 23 Relación de Números totales de carriles en cada dirección y factor de distribución para el carril de diseño (Fca).....	39
Tabla. 24 Relación entre Ancho de la calzada con el Tránsito de diseño (Fd)	40
Tabla. 25 Datos relevantes del diseño.	40
Tabla. 26 FEC método de la cuarta potencia. Ejes sencillos.....	41
Tabla. 27 FEC método de la cuarta potencia. Ejes tándem	41
Tabla. 28 FEC método de la cuarta potencia. Ejes trídem.....	42
Tabla. 29 Eje sencillo 10 toneladas.	42
Tabla. 30 Eje sencillo 8 toneladas.	43
Tabla. 31 Eje sencillo 5 toneladas.	44
Tabla. 32 Eje tándem 17 toneladas.	44
Tabla. 33 Eje tándem 16 toneladas.	45
Tabla. 34 Eje tándem 15 toneladas.	46
Tabla. 35 Eje trídem 27 toneladas.	46

Tabla. 36	<i>Eje trídem 9,6 toneladas.</i>	47
Tabla. 37	<i>Total de frecuencia en periodo de diseño (N. de ejes equivalentes de 8,2 toneladas).</i>	47
Tabla. 38	<i>Efecto de la subbase granular sobre los valores de K.</i>	49
Tabla. 39	<i>Interpolación de la totalidad de ejes. K conjunto.</i>	50
Tabla. 40	<i>Valores del coeficiente de transmisión de cargas J.</i>	50
Tabla. 41	<i>Calidad del drenaje.</i>	51
Tabla. 42	<i>Valores del coeficiente de drenaje Cd.</i>	51
Tabla. 43	<i>Niveles de confiabilidad a adoptar en función del tipo de carretera.</i>	52
Tabla. 44	<i>Valores de Zr en función de la confiabilidad.</i>	52
Tabla. 45	<i>Confiabilidad y factores de seguridad recomendadas.</i>	53
Tabla. 46	<i>Índice de serviciabilidad del pavimento (PSI).</i>	53
Tabla. 47	<i>Datos seleccionados para hallar espesor de la losa por Método Gráfico de AASTHO</i>	55
Tabla. 48	<i>Resultados de diseño Modelo AASHTO</i>	60
Tabla. 49	<i>Resultados de diseño PCA</i>	60

1 INTRODUCCIÓN

Los Pavimentos Rígidos son la opción más común para implementar en la construcción de vías de zonas residenciales, el comportamiento de estos es el adecuado para su oportuno aprovechamiento al momento de implementarse en este sector de las vías del país, sin embargo, es primordial resaltar que las condiciones tanto de diseño como de construcción para los Pavimentos Rígidos es crucial a la hora de aprovechar al máximo las distintas ventajas que ofrecen, como su amplio periodo de vida útil, criterios técnicos y factores económicos, además que el proceso de construcción de la estructura de Pavimentos de Concreto es en una sola etapa, por lo que no genera dudas sobre su comportamiento a largo plazo omitiendo sobrecapas rutinarias porque no son necesarias para su correcto nivel de servicio.

El proceso de diseño de los Pavimentos Rígidos es basado generalmente en metodologías de carácter empírico como el proceso de diseño PCA y el proceso de diseño AASTHO que se enfocaron en determinar las distintas variables como: Clima, Condiciones Regionales, Tránsito y Propiedades de Materiales, que se verían involucradas en la ejecución de la estructura de pavimento para establecer los comportamientos que podrían variar con respecto a estos parámetros y cuantificar resultados como Fatiga y Erosión para determinar las características propias en el diseño. Al momento de la construcción de los Pavimentos Rígidos se favorece considerablemente para vías secundarias o terciarias, gracias que sus características aportan a que se puedan ejecutar con medios muy sencillos, herramientas de fácil alcance, equipos simples, requerimiento abundante de mano de obra de baja capacitación y rápida construcción, además que su costo en comparación con los Pavimentos Flexibles son considerablemente más bajos.

2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

A través de los años las vías han sido un determinante para el desarrollo de las comunidades ya que, por medio de estas se establecían relaciones entre diferentes sectores permitiéndoles así intercambios culturales, comercialización, la difusión de información entre otros.

Actualmente las vías no han perdido importancia, contrario a esto se han convertido en un reto que a menudo demanda más en cuanto a su diseño y construcción teniendo en cuenta que cada vez los recursos son más limitados y los costos más elevados por lo cual es importante establecer métodos que sean óptimos para el diseño de pavimentos con el fin de que sean económicamente viables y técnicamente eficientes, es así como nace esta investigación que busca establecer el método de diseño que genere mejores resultados sin comprometer la calidad ni los costos. Además de esto el contexto de la Vía que implica el Pavimento Rígido a diseñar influye directamente en la selección de del método de diseño adecuado.

El Pavimento Rígido de diseño se encuentra en la ciudad de Santa Marta (Colombia) en la Calle 5 entre la Carrera 11 y la Carrera 5 del barrio Pescaíto, esta calle queda adyacente a la Vía Alternativa al Puerto de Santa Marta, por lo cual a pesar de ser una zona urbana tiene un Transito considerable de todo tipo de Vehículos como se evidencia en los aforos realizados para el diseño en cuestión, en los alrededores de este tramo de carretera se encuentran:

- Tres instituciones Educativas Distritales.
- Un puesto de Salud.
- Un parque infantil.
- Un Hogar infantil.
- Una cancha de futbol común.

Por lo que la comunidad ha implementado la instalación de distintos reductores de velocidades con la intención de mitigar el tránsito en la zona en cuestión.

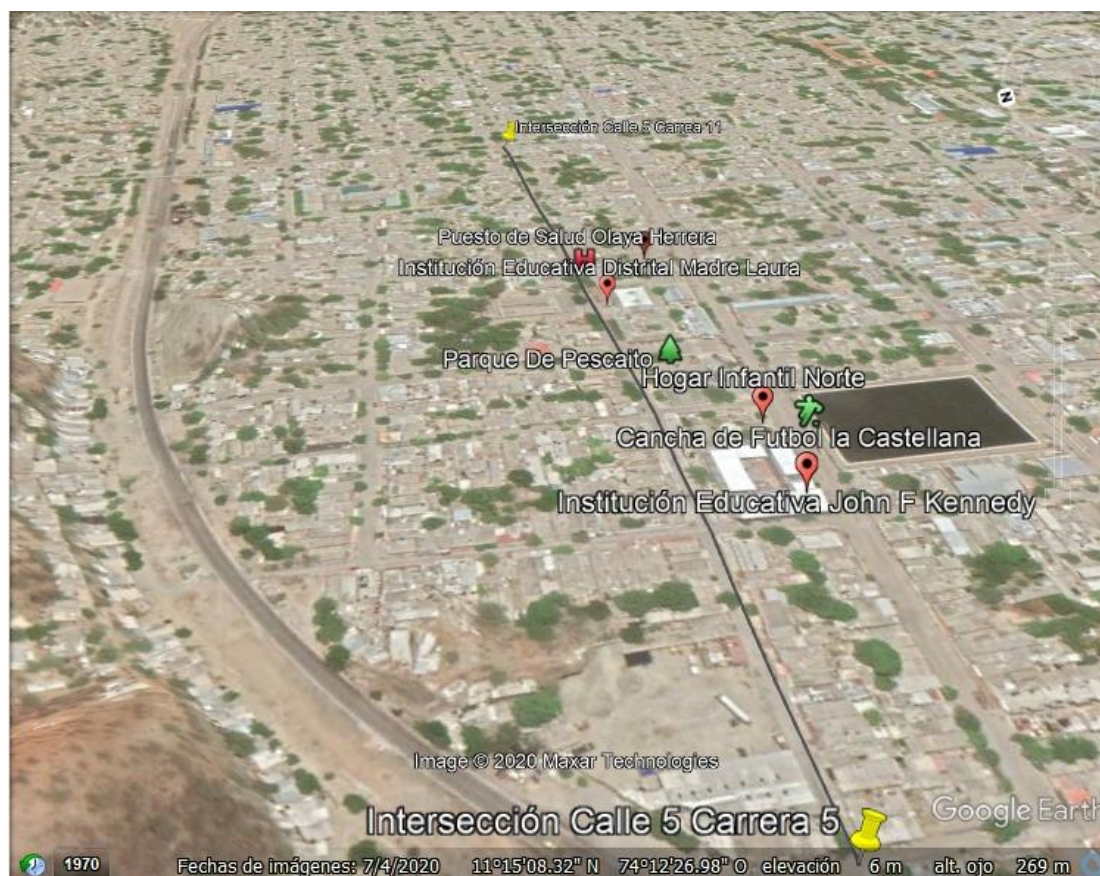


Figura 1. Ubicación del Proyecto.

3 OBJETIVO GENERAL

Comparar los resultados del diseño de un Pavimento Rígido para la Calle 5 entre la Carrera 11 y la Carrera 5 de la ciudad de Santa Marta, Magdalena (Colombia) por medio del Método AASHTO y el Método PCA

3.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar el diseño de la estructura de Pavimento por medio del Método AASHTO
- Realizar el diseño de la estructura de Pavimento por medio del Método PCA
- Determinar espesores mínimos resultantes por cada uno de los métodos para comparar el comportamiento esperado de cada uno de los mismos y seleccionar el diseño adecuado.

4 MARCO TEORICO

Los pavimentos Rígidos o Pavimentos de Concreto se componen generalmente de una losa de concreto armada o simple, la cual se apoya directamente sobre una base o subbase, que a su vez descansan sobre la subrasante, la losa de concreto posee características específicas como su Rigidez y alto contenido de Modulo de Elasticidad que la convierten en la idónea para desempeñar la función de absorber la mayor parte de los esfuerzos que se ejercen en la estructura de pavimento por medio del Tránsito compuesto por distintos tipos de vehículos, y la distribución de estas cargas dando como resultado tensiones extremadamente bajas en la subrasante.

Ocurre lo contrario con los pavimentos flexibles, su capa de rodadura posee menos rigidez lo que conlleva a que los esfuerzos transmitidos hacia las capas inferiores de la estructura sean ascendentes ocasionando mayor tensión en la subrasante. (Planeación, 2017)

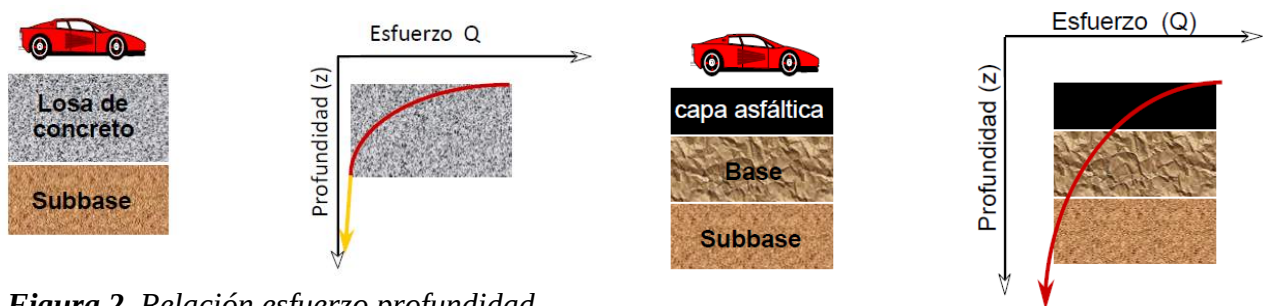


Figura 2. Relación esfuerzo profundidad

Los métodos de diseño para las distintas Estructuras de Pavimentos Rígidos más utilizados en Colombia son los propuestos por la AASHTO en 1993 y la PCA en 1984.

4.1 MÉTDO DE DISEÑO PCA

PCA (Portland Cement Association) primordialmente examina dos criterios fundamentales en el proceso de diseño, los cuales son el criterio de erosión de la subbase por debajo de las losas y la fatiga del pavimento de concreto:

- El criterio de erosión reconoce que el pavimento puede fallar por un exceso bombeo, erosión del terreno de soporte y diferencias de elevaciones en las juntas.
- El criterio del esfuerzo de fatiga reconoce que el pavimento pueda fallas, presentando agrietamiento derivarlo de excesivas repeticiones de carga. (Anguas, 2002)

4.2 MÉTODO AASHTO 93

El método de diseño AASHTO se desarrolló en los Estados Unidos en la década de los 60, teniendo como inicio de su investigación un ensayo a escala real realizado durante 2 años en el estado de Illinois con el fin de desarrollar tablas, gráficos y fórmulas que presenten las relaciones deterioro, incluyendo el concepto de serviciabilidad lo que otros Métodos no incluyen. (Anguas, 2002)

4.3 TRÁNSITO

Para el cálculo del diseño de Pavimento Rígido priorizas los vehículos de cargas más pesadas, discriminados por ejes de la siguiente forma:

- Eje simple
- Eje tándem
- Eje trídem

Los cuales se proyectarán para el Periodo de Diseño estipulado de 20 años utilizando el Modelo Lineal del INVIAS. De igual forma también se empleará la cuantificación de esta proyección para calcular el equivalente de numero de ejes de 8,2 toneladas para lo que se utilizaran los siguientes parámetros:

- Clasificación vehicular
- Tendencia de crecimiento del tránsito por el Modelo Lineal del INVIAS.
- Tránsito promedio diario (TPD)
- Configuración y cargas máximas legales
- Factores de equivalencia de carga por eje para cada tipo de vehículo

5 DOCUMENTOS DE REFERENCIA

Para la realización de los análisis reportados en el presente documento se siguieron los lineamientos y la información de los siguientes documentos: **El AMERICAN**

ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS.

AASHTO Guide for design of pavement structures. Washington: AASHTO, 1986. 1993.

1998. 2 vol. : Fue crucial en el proceso de Diseño por el Modelo de este, sus conceptos, formulas y tablas se utilizaron como guía para fundamentas para el diseño. De igual forma El

PORTLAND CEMENT ASSOCIATION. Design and construction of joints for concrete streets. Skokie: PCA, 1992. 12 p. Fue crucial en el proceso de Diseño por el Modelo de este, sus conceptos, formulas y tablas se utilizaron como guía para fundamentas para el diseño. El

MONTEJO FONSECA, Alfonso. Ingeniería de pavimentos para carreteras. Bogotá :

Universidad Católica de Colombia, 1998. 759 p. Junto a **RICO RODRIGUEZ, Alfonso.**

JUAREZ BADILLO, Eulalio. Mecánica de suelos : fundamentos de la mecánica de suelos, teoría y aplicaciones de la mecánica de suelos, flujo de agua en suelos. México : Limusa,

1980. 1981. 1982. 3 Vol. Y El **Manual de diseño de pavimentos de concreto para bajos,**

medios y altos volúmenes de tránsito. INVIAS, con sus conceptos, investigación y análisis que contribuyeron en el desarrollo y criterio para la conclusión de este documento.

6 PROCEDIMIENTO MÉTODO PCA

A continuación, se procede con el desarrollo del Diseño para el Pavimento Rígido en cuestión por medio del Modelo implementado por PCA, se inicia con el cálculo del Transito proyectado para un Periodo de diseño de 20 años.

6.1 TRÁNSITO - PERIODO DE DISEÑO

A continuación, se muestran los resultados obtenidos por el aforo realizado en la Calle 5 con Carrera 8 de la ciudad de Santa Marta (Colombia) Se ejecuto el conteo de Vehículos que transitaban por el sitio de interés cuantificando las cargas más pesadas por Eje (simple, tándem y trídem) para el Diseño de Pavimento Rígido de la Calle 5 entre Carrera 1 y Carrera 5 de la Ciudad de Santa Marta.

	Toneladas Carga por eje (tf)	KN Carga por eje (tf)	N° de Repeticiones por día (n1)
Ejes Sencillos	10	98,1	16
	8	78,48	2
	5	49,05	11
Ejes Tándem	17	166,77	9
	16	156,96	2
	15	147,15	1
Ejes Trídem	27	264,87	6
	9,6	94,176	5

Tabla. 1 Resultados de Aforos.

Se procede a realizar una proyección del tránsito de la siguiente manera:

Estimar las variables necesarias para efectuar el crecimiento por el Modelo lineal Propuesto por INVIAS.

$$N = \frac{n}{2} * [2 * N_0 + (n - 1) * d]$$

Figura 3. Modelo lineal INVIAS.

- Teniendo un periodo de diseño de 20 años, con una confiabilidad del 95% (que garantizará datos más exactos basados en el modelo escogido) para el cálculo de la proyección, se utiliza como año base el 2020 (medido a partir del 2021 hasta el 2040)
- Se utiliza el modelo lineal establecido por el INVIAS (utilizado a nivel Nacional), junto con una tasa de crecimiento del 3,8% promedio más elevada, se escoge el valor en porcentaje mencionado para la tasa de crecimiento por criterio Profesional, utilizando como fundamento la ubicación del proyecto, el cual se realizará en la capital del Magdalena y su índice de crecimiento anual de tránsito es bastante elevado debido a que se utiliza esta calle como atajo para llegar a la Vía Alterna al Puerto de Santa Marta.

TPDS	Tasas de crecimiento %				# Estaciones analizadas
	Total vehículos		Vehículos comerciales		
	Rango	Promedio	Rango	Promedio	
< 500	2,0 - 4,0 %	3,6%	2,0 - 4,0 %	2,9%	28
500 - 1000	3,0 - 6,0 %	3,4%	2,0 - 4,0 %	2,6%	49
1000 - 2500	3,0 - 6,0 %	4,3%	2,5 - 5,0 %	3,3%	134
2500 - 5000	3,0 - 6,0 %	4,3%	3,0 - 5,0 %	3,4%	144
5000 - 10000	3,0 - 6,0 %	4,5%	3,0 - 5,0 %	3,8%	146
> 10000	3,0 - 6,0 %	4,3%	3,0 - 6,0 %	3,8%	89

Tabla. 2 Tasas de crecimiento.

Fuente: PORTLAND CEMENT ASSOCIATION. Design and construction of joints for concrete streets. Skokie: PCA, 1992. 12 p.

Tipo de carretera	Niveles de confiabilidad	
	Urbana	Interurbana
Autopistas y carreteras importantes	85 - 99.9	80 - 99.9
Arterias principales	80 - 99	75 - 95
Colectores	80 - 95	75 - 95
Locales	50 - 80	50 - 80

Tabla. 3 Niveles de confiabilidad a adoptar en función del tipo de carretera

Fuente: PORTLAND CEMENT ASSOCIATION. Design and construction of joints for concrete streets. Skokie: PCA, 1992. 12 p.

Confiabilidad R, %	Desviación normal estándar
50	0,000
60	-0,253
70	-0,524
75	-0,674
80	-0,841
85	-0,1037
90	-0,1282
91	-1,340
92	-1,405
93	-1,476
94	-1,555
95	-1,645
96	-1,751
97	-1,1881
98	-1,2054
99	-2,327
99,9	-3,09
99,99	-3,75

Tabla. 4 Valores de Zr en función de la confiabilidad.

Fuente: PORTLAND CEMENT ASSOCIATION. Design and construction of joints for concrete streets. Skokie: PCA, 1992. 12 p.

Periodo de Diseño	20 años
Confiabilidad	0,95
Zr	1.645
Tasa de Crecimiento	3.8 %

Tabla. 5 Datos generales del diseño.

Modelo Lineal INVAS

EJE SENCILLO 10 TONELADAS		
Año	N diario	N'
2019		
2020	1569,60	1569,60
2021	3198,84	3865,83
2022	4887,73	5906,87
2023	6636,27	8019,99

2024	8444,45	10205,19
2025	10312,27	12462,48
2026	12239,74	14791,84
2027	14226,85	17193,29
2028	16273,61	19666,81
2029	18380,02	22212,42
2030	20546,06	24830,11
2031	22771,76	27519,88
2032	25057,09	30281,73
2033	27402,08	33115,66
2034	29806,70	36021,68
2035	32270,98	38999,77
2036	34794,89	42049,95
2037	37378,45	45172,21
2038	40021,66	48366,55
2039	42724,51	51632,97
2040	45487,01	54971,47
Se calcula el valor de N de diseño (KN):		20064587,50

Tabla. 6 Eje sencillo 10 toneladas.

EJE SENCILLO 8 TONELADAS		
Año	N diario	N'
2019		
2020	156,96	156,96
2021	319,88	386,58
2022	488,77	590,69
2023	663,63	802,00
2024	844,44	1020,52
2025	1031,23	1246,25
2026	1223,97	1479,18
2027	1422,69	1719,33
2028	1627,36	1966,68
2029	1838,00	2221,24
2030	2054,61	2483,01
2031	2277,18	2751,99
2032	2505,71	3028,17
2033	2740,21	3311,57
2034	2980,67	3602,17
2035	3227,10	3899,98
2036	3479,49	4205,00
2037	3737,85	4517,22
2038	4002,17	4836,65

2039	4272,45	5163,30
2040	4548,70	5497,15
Se calcula el valor de N de diseño (KN):		2006458,75

Tabla. 7 Eje sencillo 8 toneladas.

EJE SENCILLO 5 TONELADAS		
Año	N diario	N'
2019		
2020	539,55	539,55
2021	1099,60	1328,88
2022	1680,16	2030,49
2023	2281,22	2756,87
2024	2902,78	3508,04
2025	3544,84	4283,98
2026	4207,41	5084,70
2027	4890,48	5910,19
2028	5594,05	6760,47
2029	6318,13	7635,52
2030	7062,71	8535,35
2031	7827,79	9459,96
2032	8613,38	10409,35
2033	9419,46	11383,51
2034	10246,05	12382,45
2035	11093,15	13406,17
2036	11960,74	14454,67
2037	12848,84	15527,95
2038	13757,45	16626,00
2039	14686,55	17748,83
2040	15636,16	18896,44
Se calcula el valor de N de diseño (KN):		6897201,95

Tabla. 8 Eje sencillo 5 toneladas.

EJE TÁNDEM 17 TONELADAS		
Año	N diario	N'
2019		
2020	1500,93	1500,93
2021	3058,90	3696,70
2022	4673,90	5648,45
2023	6345,93	7669,12

2024	8075,00	9758,72
2025	9861,11	11917,24
2026	11704,25	14144,70
2027	13604,43	16441,08
2028	15561,64	18806,39
2029	17575,89	21240,63
2030	19647,17	23743,79
2031	21775,49	26315,89
2032	23960,85	28956,91
2033	26203,24	31666,85
2034	28502,66	34445,73
2035	30859,12	37293,53
2036	33272,62	40210,27
2037	35743,15	43195,93
2038	38270,71	46250,51
2039	40855,31	49374,03
2040	43496,95	52566,47
Se calcula el valor de N de diseño (KN):		19186761,79

Tabla. 9 Eje tándem 17 toneladas.

EJE TÁNDEM 16 TONELADAS		
Año	N diario	N'
2019		
2020	313,92	313,92
2021	639,77	773,17
2022	977,55	1181,37
2023	1327,25	1604,00
2024	1688,89	2041,04
2025	2062,45	2492,50
2026	2447,95	2958,37
2027	2845,37	3438,66
2028	3254,72	3933,36
2029	3676,00	4442,48
2030	4109,21	4966,02
2031	4554,35	5503,98
2032	5011,42	6056,35
2033	5480,42	6623,13
2034	5961,34	7204,34
2035	6454,20	7799,95
2036	6958,98	8409,99
2037	7475,69	9034,44
2038	8004,33	9673,31

2039	8544,90	10326,59
2040	9097,40	10994,29
Se calcula el valor de N de diseño (KN):		4012917,50

Tabla. 10 Eje tándem 16 toneladas.

EJE TÁNDEM 15 TONELADAS		
Año	N diario	N'
2019		
2020	147,15	147,15
2021	299,89	362,42
2022	458,23	553,77
2023	622,15	751,87
2024	791,67	956,74
2025	966,78	1168,36
2026	1147,48	1386,74
2027	1333,77	1611,87
2028	1525,65	1843,76
2029	1723,13	2082,41
2030	1926,19	2327,82
2031	2134,85	2579,99
2032	2349,10	2838,91
2033	2568,94	3104,59
2034	2794,38	3377,03
2035	3025,40	3656,23
2036	3262,02	3942,18
2037	3504,23	4234,89
2038	3752,03	4534,36
2039	4005,42	4840,59
2040	4264,41	5153,58
Se calcula el valor de N de diseño (KN):		1881055,08

Tabla. 11 Eje tándem 15 toneladas.

EJE TRÍDEM 27 TONELADAS		
Año	N diario	N'
2019		
2020	1589,22	1589,22
2021	3238,83	3914,16
2022	4948,83	5980,71
2023	6719,22	8120,24

2024	8550,00	10332,76
2025	10441,18	12618,26
2026	12392,74	14976,74
2027	14404,69	17408,20
2028	16477,03	19912,65
2029	18609,77	22490,08
2030	20802,89	25140,49
2031	23056,40	27863,88
2032	25370,31	30660,25
2033	27744,60	33529,61
2034	30179,29	36471,95
2035	32674,36	39487,27
2036	35229,83	42575,58
2037	37845,69	45736,86
2038	40521,93	48971,13
2039	43258,57	52278,38
2040	46055,60	55658,62
Se calcula el valor de N de diseño (KN):		20315394,84

Tabla. 12 Eje trídém 27 toneladas.

EJE TRÍDEM 9.6 TONELADAS		
Año	N diario	N'
2019		
2020	470,88	470,88
2021	959,65	1159,75
2022	1466,32	1772,06
2023	1990,88	2406,00
2024	2533,33	3061,56
2025	3093,68	3738,74
2026	3671,92	4437,55
2027	4268,06	5157,99
2028	4882,08	5900,04
2029	5514,00	6663,73
2030	6163,82	7449,03
2031	6831,53	8255,96
2032	7517,13	9084,52
2033	8220,62	9934,70
2034	8942,01	10806,50
2035	9681,29	11699,93
2036	10438,47	12614,99
2037	11213,54	13551,66
2038	12006,50	14509,96

2039	12817,35	15489,89
2040	13646,10	16491,44
Se calcula el valor de N de diseño (KN):		6019376,25

Tabla. 13 Eje trídem 9.6 toneladas

	Toneladas Carga por eje (tf)	KN Carga por eje (tf)	N° de Repeticiones por día (n1)	Carga en KN por día	Frecuencia en periodo de diseño (N° de ejes) Modelo Lineal
Ejes Sencillos	10	98,1	16	1569,6	204532
	8	78,48	2	156,96	25566
	5	49,05	11	539,55	140616
Ejes Tándem	17	166,77	9	1500,93	115049
	16	156,96	2	313,92	25566
	15	147,15	1	147,15	12783
Ejes Trídem	27	264,87	6	1589,22	76699
	9,6	94,176	5	470,88	63916
Total de Frecuencia en periodo de diseño (N° de ejes)					664729

Tabla. 14 Total de frecuencia en periodo de diseño (N. de ejes)

6.2 ELECCIÓN DEL CONCRETO

Definición del tipo de concreto a utilizar, en la siguiente tabla se muestran los valores del concreto que para el proyecto presentado se asume un concreto de 4000 PSI por su fácil obtención y dadas las características del tránsito esperado para el presente proyecto.

F'c Concreto		Mr Concreto	
Psi	Kg/cm2	Kg/cm3	Mpa
4000	281	34	3,3

Tabla. 15 Elección del concreto.

La siguiente tabla resume y asocia el valor de las diferentes cargas de los distintos ejes con la frecuencia de periodo de diseño específica para cada uno de los valores discriminados.

Carga por eje		Frecuencia en periodo de diseño (N de ejes)
Ton	Kn	

Sencillos	10	98	204532
	8	78	25566
	5	49	140616
Tandem	17	167	115049
	16	157	25566
	15	147	12783
Tridem	27	265	76699
	9,6	94	63916

Tabla. 16 Relación de cargas por eje con la Frecuencia en periodo de diseño (N. de ejes)

6.3 TIPO DE SUELO

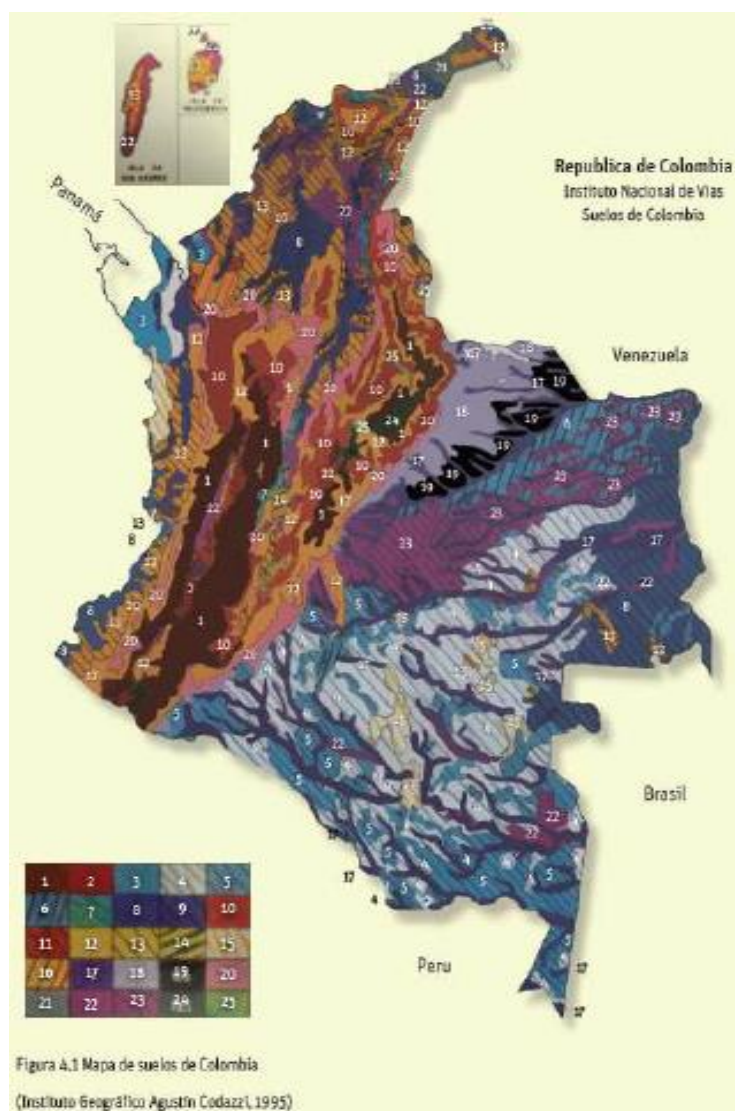


Figura 4. Caracterización de suelos de Colombia INVIAS. (INVIAS, s.f.)

Según la clasificación del INVIAS el tipo de suelo que corresponde para la ciudad de Santa Marta corresponde a "Cenizas volcánicas con altos contenido de arcillas, ubicadas en

pie demontaña" donde se estima según criterio profesional que el CBR se encuentra dentro de un rango de (3% - 5%). Contando con el rango establecido para el CBR para este proyecto en particular se escogió el valor promedio en el rango mencionado de 4%, después siguiendo la línea del porcentaje seleccionado se haya el módulo de reacción de la subrasante MPa/m.

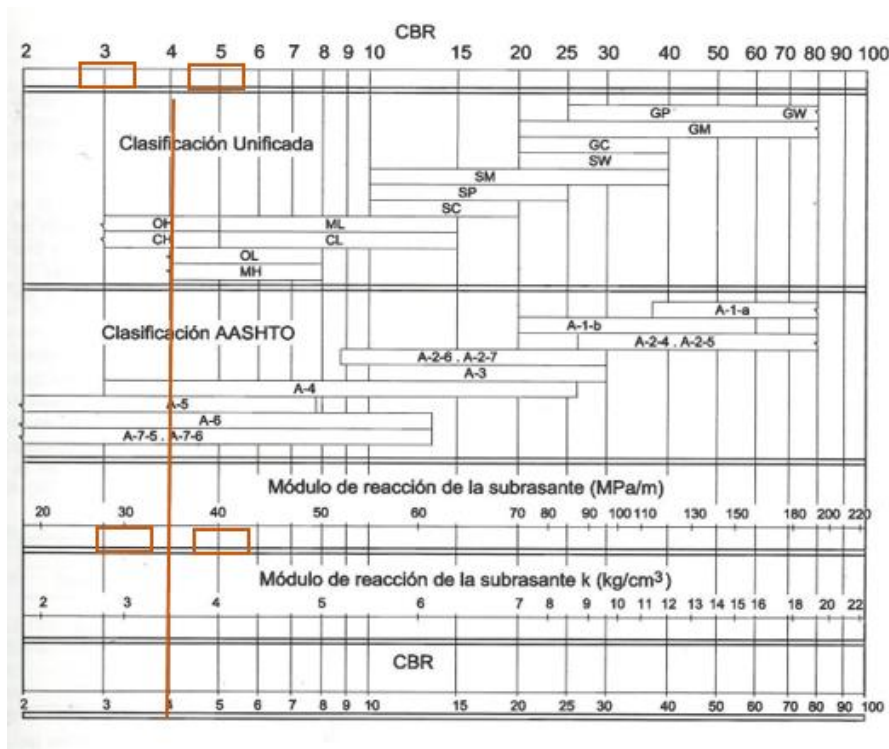


Figura 5. Correlación aproximada entre la clasificación de los suelos y los diferentes ensayos.

Fuente: PORTLAND CEMENT ASSOCIATION. Design and construction of joints for concrete streets. Skokie: PCA, 1992. 12 p.

6.4 FACTOR K CONJUNTO

Una vez establecido el valor, se procede a la figura 5 para determinar el valor K para subrasante con el dato de la anterior tabla, si el valor no se encuentra en la tabla el procedimiento indicado para encontrar el resultado es la interpolación entre los valores cercanos por encima y por debajo para así continuar con el siguiente paso, el cual requiere encontrar el valor de K para subbase con la misma tabla, luego de establecer un espesor en

milímetros (mm) para la Subbase; si el espesor no se encuentra, se procederá a interpolar junto con el valor hallado en el k de la subrasante para encontrar el k de la subbase.

Valor de K para la Subrasante		Valor de K para la subbase							
		100 mm		150 mm		225 mm		300 mm	
Mpa/m	Lb/pul3	Mpa/m	Lb/pul3	Mpa/m	Lb/pul3	Mpa/m	Lb/pul3	Mpa/m	Lb/pul3
20	73	23	85	26	96	32	117	38	140
40	147	45	165	49	180	57	210	66	245
60	220	64	232	66	245	76	280	90	330
80	295	87	320	90	330	100	370	117	430

Tabla. 17 Efecto de la subbase granular sobre los valores de K.

Fuente: PORTLAND CEMENT ASSOCIATION. Design and construction of joints for concrete streets. Skokie: PCA, 1992. 12 p.

Después de la interpolación correspondiente al proceso anterior, se estima un espesor para la Subbase de 230 milímetros.

Con el valor K de la subbase se procede a hallar factor de equivalencia que se definen cuando los valores de la subrasante y de la subbase se unen con el espesor de la losa designado anteriormente; este procedimiento se debe hacer para cada uno de los tipos de ejes (sencillo, tándem y trídem)

INTERPOLACIÓN POR TABLA				
Hallar valor de K	X0	300	Y0	38
	X	230	Y	32,4
	X1	225	Y1	32
	X0	300	Y0	66
	X	230	Y	57,6
	X1	225	Y1	57
K Conjunto	X0	20	Y0	32,4
	X	35	Y	51,3
	X1	40	Y1	57,6
K Eje	X0	40	Y0	1,21

	X	51,30	Y	1,1648
	X1	60	Y1	1,13

K Eje Tandem	X0	40	Y0	1,07
	X	51,30	Y	1,01915
	X1	60	Y1	0,98

K Eje Tridem	X0	40	Y0	0,81
	X	51,30	Y	0,78175
	X1	60	Y1	0,76

F. Erosión sencillo	X0	40	Y0	2,23
	X	51,30	Y	2,2187
	X1	60	Y1	2,21

F. Erosión	X0	40	Y0	2,39
	X	51,30	Y	2,35045
	X1	60	Y1	2,32

F. Erosión	X0	40	Y0	2,49
	X	51,30	Y	2,43915
	X1	60	Y1	2,4

Tabla. 18 Interpolación de la totalidad de ejes. K conjunto.

6.5 ANÁLISIS DE FATIGA Y EROSIÓN

Se requiere realizar una tabla que tiene como fin encontrar las sumatorias de porcentajes de factor de fatiga y erosión, con la condición de; si la suma de las dos variables es menor a 100%, el diseño es aceptable, pero si por alguna circunstancia la sumatoria no concuerda en alguna de las dos variables, se debe rediseñar e iterar espesores o resistencias de concreto.

En esta tabla se deben colocar valores específicos como:

- Si las vías tendrán bermas y dovelas.
- Factor de seguridad para el tipo de tránsito.
- Espesor de la losa de concreto.
- K conjunto.

- Módulo de rotura del concreto.
- Periodo de diseño.

El procedimiento para llenar la tabla es el siguiente:

- El primer paso es hallar el valor de K Conjunto por medio de la interpolación de valores encontrados que puede ser vista anteriormente y usando la siguiente fórmula

$$Y_x = Y_o + \frac{X - X_o}{X_1 - X_o} (Y_1 - Y_o)$$

Figura 6. Formula de interpolación

Donde:

X_o= Valor Límite superior de espesor.

X₁=Valor Límite inferior de espesor.

Y_o=Valor de K subbase de Límite superior de espesor para el valor inferior de K subrasante.

Y₁=Valor de K subbase de Límite inferior de espesor para el valor inferior de K subrasante.

Nota: Este proceso de interpolación se realiza dos veces hasta hallar los valores de K de subbase necesarios para hallar el K Conjunto mediante una interpolación, el método de la interpolación consiste en averiguar por medio de una fórmula, el valor que se encuentra en el rango de dos valores; es decir el número entre el límite superior y límite inferior.

Se toman valores de X y Y dependiendo los límites y la variable que se pueda utilizar, se tienen 5 valores (X₀, X, X₁, Y₀ y Y₁) y se debe hallar 1 valor (Y), en este caso se utiliza porque todos los datos tienen una relación del método PCA. Los límites superiores son los Y₀, Y₁ y los inferiores son X₀, X₁ y el valor restante (X) es el valor intermedio, por lo tanto, se debe hallar el dato correspondiente a (Y).

6.6 CASO DEL K CONJUNTO

Donde:

X_o = Valor Límite inferior de K subrasante.

X_1 =Valor Límite superior de K subrasante.

Y_o =Valor de K subbase de Límite inferior de espesor.

Y_1 =Valor de K subbase de Límite superior de espesor.

1. Con el estudio de tránsito y la carga por tipo de eje (sencillos, tándem y trídem), llenar las 3 primeras columnas.
2. Las solicitaciones admisibles se hallan con la figura 14, ingresando en el gráfico la carga del tipo de eje y el factor de fatiga que se halla dividiendo el esfuerzo equivalente entre el módulo de rotura del concreto, se debe tener en cuenta que mientras más alto es el factor de fatiga, menores repeticiones de ejes va a resistir el pavimento.
3. La fatiga se halla dividiendo las repeticiones esperadas entre las solicitaciones admisibles.
4. El mismo proceso se hace para la erosión, lo que cambia son las solicitaciones admisibles que se hallan con la figura 15, donde se ingresan los valores de la carga del tipo de eje y el factor de erosión que se debe encontrar dependiendo del tipo de diseño de las bermas. El procedimiento de estas tablas es entrar con el espesor designado de la losa e interpolar los valores de K conjunto.
5. Al terminar de llenar la tabla se deben sumar los porcentajes de fatiga y de erosión, el diseño se cumple cuando la suma de estas dos variables no pasa del 100%, en caso tal de que una de las dos variables pase el límite, se debe rediseñar cambiando el espesor de la losa o el módulo de rotura del concreto

(Eje sencillo)						
Espesor de losa (mm)	k del conjunto Subrasante/Subbase (MPa/m)					
	20	40	60	80	140	180
100	4,18	3,65	3,37	3,19	2,85	2,72
110	3,68	3,23	2,99	2,83	2,55	2,43
120	3,28	2,88	2,67	2,54	2,29	2,19
130	2,95	2,60	2,41	2,29	2,07	1,99
140	2,68	2,36	2,19	2,08	1,89	1,81
150	2,44	2,15	2,00	1,90	1,73	1,66
160	2,24	1,97	1,84	1,75	1,59	1,53
170	2,06	1,82	1,70	1,62	1,48	1,42
180	1,91	1,69	1,57	1,50	1,37	1,32
190	1,77	1,57	1,46	1,40	1,28	1,23
200	1,65	1,46	1,37	1,30	1,19	1,15
210	1,55	1,37	1,28	1,22	1,12	1,08
220	1,45	1,29	1,20	1,15	1,05	1,01
230	1,37	1,21	1,13	1,08	0,99	0,96
240	1,29	1,15	1,07	1,02	0,94	0,90
250	1,22	1,08	1,01	0,97	0,89	0,86
260	1,16	1,03	0,96	0,92	0,84	0,81
270	1,10	0,98	0,91	0,87	0,80	0,77
280	1,05	0,93	0,87	0,83	0,76	0,74
290	1,00	0,89	0,83	0,79	0,73	0,70
300	0,95	0,85	0,79	0,76	0,70	0,67
310	0,91	0,81	0,76	0,72	0,67	0,64
320	0,87	0,78	0,73	0,69	0,64	0,62
330	0,84	0,74	0,70	0,67	0,61	0,59
340	0,80	0,71	0,67	0,64	0,59	0,57
350	0,77	0,69	0,64	0,61	0,57	0,55

(Eje tándem)						
Espesor de losa (mm)	k del conjunto Subrasante/Subbase (MPa/m)					
	20	40	60	80	140	180
100	3,48	3,10	2,94	2,85	2,74	2,72
110	3,07	2,71	2,56	2,47	2,35	2,32
120	2,75	2,41	2,26	2,17	2,05	2,02
130	2,49	2,17	2,02	1,94	1,82	1,78
140	2,27	1,97	1,83	1,75	1,63	1,59
150	2,08	1,80	1,67	1,59	1,48	1,44
160	1,93	1,66	1,53	1,46	1,35	1,31
170	1,79	1,54	1,42	1,35	1,24	1,20
180	1,67	1,43	1,32	1,25	1,15	1,11
190	1,57	1,34	1,23	1,17	1,07	1,03
200	1,48	1,26	1,16	1,10	1,00	0,96
210	1,40	1,19	1,09	1,03	0,93	0,90
220	1,32	1,12	1,03	0,97	0,88	0,85
230	1,26	1,07	0,98	0,92	0,83	0,80
240	1,20	1,01	0,93	0,87	0,79	0,76
250	1,14	0,97	0,88	0,83	0,75	0,72
260	1,09	0,92	0,84	0,79	0,71	0,68
270	1,04	0,88	0,81	0,76	0,68	0,65
280	1,00	0,85	0,77	0,73	0,65	0,62
290	0,96	0,81	0,74	0,70	0,62	0,60
300	0,93	0,78	0,71	0,67	0,60	0,57
310	0,89	0,75	0,69	0,64	0,58	0,55
320	0,86	0,73	0,66	0,62	0,55	0,53
330	0,83	0,70	0,64	0,60	0,53	0,51
340	0,80	0,68	0,62	0,58	0,52	0,49
350	0,78	0,66	0,60	0,56	0,50	0,47

Figura 7. Esfuerzo equivalente pavimento con berma de concreto (eje sencillo y tándem)
Fuente: PORTLAND CEMENT ASSOCIATION. Design and construction of joints for concrete streets. Skokie: PCA, 1992. 12 p.

Espesor de losa (mm)	(Eje Tridem)					
	k del conjunto Subrasante/Subbase					
	20	40	60	80	140	180
100	3,36	3,10	3,02	2,98	2,94	2,93
110	2,92	2,64	2,55	2,50	2,45	2,44
120	2,60	2,30	2,20	2,14	2,08	2,07
130	2,35	2,04	1,93	1,87	1,80	1,78
140	2,15	1,83	1,72	1,65	1,58	1,55
150	1,99	1,67	1,55	1,48	1,40	1,37
160	1,85	1,54	1,41	1,34	1,25	1,23
170	1,73	1,43	1,30	1,23	1,14	1,11
180	1,62	1,34	1,21	1,14	1,04	1,01
190	1,53	1,26	1,13	1,06	0,96	0,92
200	1,45	1,19	1,07	0,99	0,89	0,85
210	1,37	1,13	1,01	0,93	0,83	0,79
220	1,30	1,07	0,95	0,88	0,78	0,74
230	1,24	1,02	0,91	0,84	0,73	0,70
240	1,18	0,97	0,87	0,80	0,69	0,66
250	1,13	0,93	0,83	0,76	0,66	0,62
260	1,07	0,89	0,79	0,73	0,63	0,59
270	1,02	0,86	0,76	0,70	0,60	0,57
280	0,98	0,82	0,73	0,67	0,58	0,54
290	0,93	0,79	0,71	0,65	0,55	0,52
300	0,89	0,76	0,68	0,63	0,53	0,50
310	0,85	0,73	0,66	0,60	0,51	0,48
320	0,81	0,70	0,63	0,58	0,50	0,46
330	0,77	0,68	0,61	0,56	0,48	0,45
340	0,73	0,65	0,59	0,55	0,46	0,43
350	0,70	0,63	0,57	0,53	0,43	0,42

Sin berma de concreto

Espesor de losa (mm)	(Eje tridem)					
	k del conjunto Subrasante/Subbase					
	20	40	60	80	140	180
100	2,87	2,67	2,60	2,57	2,56	2,57
110	2,50	2,29	2,22	2,18	2,16	2,16
120	2,20	2,00	1,93	1,89	1,85	1,85
130	1,97	1,78	1,70	1,66	1,61	1,61
140	1,78	1,59	1,52	1,48	1,43	1,42
150	1,62	1,44	1,37	1,33	1,27	1,26
160	1,49	1,32	1,24	1,2	1,15	1,13
170	1,38	1,21	1,14	1,1	1,04	1,03
180	1,28	1,12	1,05	1,01	0,96	0,94
190	1,19	1,04	0,98	0,94	0,88	0,86
200	1,12	0,98	0,91	0,87	0,82	0,80
210	1,05	0,92	0,85	0,81	0,76	0,74
220	0,99	0,86	0,80	0,76	0,71	0,69
230	0,93	0,81	0,76	0,72	0,67	0,65
240	0,88	0,77	0,71	0,68	0,63	0,61
250	0,84	0,73	0,68	0,64	0,59	0,57
260	0,79	0,70	0,64	0,61	0,56	0,54
270	0,75	0,66	0,61	0,58	0,53	0,52
280	0,72	0,63	0,59	0,56	0,51	0,49
290	0,68	0,60	0,56	0,53	0,49	0,47
300	0,65	0,58	0,54	0,51	0,46	0,45
310	0,62	0,55	0,51	0,49	0,44	0,43
320	0,59	0,53	0,49	0,47	0,43	0,41
330	0,57	0,51	0,47	0,45	0,41	0,39
340	0,54	0,49	0,46	0,43	0,39	0,38
350	0,52	0,47	0,44	0,42	0,38	0,36

Figura 8. Esfuerzo equivalente pavimento sin berma o con berma de concreto, ejes tridem
Fuente: PORTLAND CEMENT ASSOCIATION. Design and construction of joints for concrete streets. Skokie: PCA, 1992. 12 p.

(Eje sencillo)						
Espesor de losa (mm)	k del conjunto Subrasante/Subbase (MPa/m)					
	20	40	60	80	140	180
100	3,27	3,24	3,22	3,21	3,17	3,15
110	3,16	3,12	3,10	3,09	3,05	3,03
120	3,05	3,01	2,99	2,98	2,94	2,92
130	2,96	2,92	2,89	2,88	2,84	2,82
140	2,87	2,82	2,80	2,78	2,75	2,73
150	2,79	2,74	2,72	2,70	2,67	2,65
160	2,71	2,66	2,64	2,62	2,59	2,57
170	2,64	2,59	2,57	2,55	2,51	2,49
180	2,57	2,52	2,50	2,48	2,44	2,42
190	2,51	2,46	2,43	2,41	2,38	2,36
200	2,45	2,40	2,37	2,35	2,31	2,30
210	2,39	2,34	2,31	2,29	2,26	2,24
220	2,34	2,29	2,26	2,24	2,20	2,18
230	2,29	2,23	2,21	2,19	2,15	2,13
240	2,24	2,18	2,16	2,13	2,10	2,08
250	2,19	2,14	2,11	2,09	2,05	2,03
260	2,15	2,09	2,06	2,04	2,00	1,98
270	2,10	2,05	2,02	2,00	1,96	1,94
280	2,06	2,01	1,98	1,95	1,91	1,89
290	2,02	1,97	1,93	1,91	1,87	1,85
300	1,98	1,93	1,90	1,87	1,83	1,81
310	1,95	1,89	1,86	1,84	1,79	1,77
320	1,91	1,85	1,82	1,80	1,76	1,74
330	1,87	1,82	1,78	1,76	1,72	1,70
340	1,84	1,78	1,75	1,73	1,69	1,67
350	1,81	1,75	1,72	1,69	1,65	1,63

(Eje tándem)						
Espesor de losa (mm)	k del conjunto Subrasante/Subbase (MPa/m)					
	20	40	60	80	140	180
100	3,25	3,17	3,14	3,12	3,11	3,11
110	3,16	3,07	3,03	3,00	2,98	2,97
120	3,08	2,98	2,93	2,90	2,86	2,84
130	3,01	2,90	2,85	2,81	2,76	2,74
140	2,94	2,83	2,77	2,74	2,67	2,65
150	2,88	2,77	2,71	2,67	2,60	2,57
160	2,82	2,71	2,65	2,60	2,53	2,50
170	2,77	2,65	2,59	2,55	2,46	2,43
180	2,72	2,60	2,54	2,49	2,41	2,37
190	2,67	2,56	2,49	2,44	2,35	2,32
200	2,63	2,51	2,44	2,40	2,31	2,27
210	2,58	2,47	2,40	2,35	2,26	2,22
220	2,54	2,43	2,36	2,31	2,22	2,18
230	2,50	2,39	2,32	2,27	2,18	2,13
240	2,46	2,35	2,28	2,23	2,14	2,10
250	2,43	2,31	2,24	2,20	2,10	2,06
260	2,39	2,28	2,21	2,16	2,07	2,02
270	2,36	2,24	2,18	2,13	2,03	1,99
280	2,32	2,21	2,14	2,10	2,00	1,96
290	2,29	2,18	2,11	2,06	1,97	1,93
300	2,26	2,15	2,08	2,03	1,94	1,90
310	2,23	2,12	2,05	2,01	1,91	1,87
320	2,20	2,09	2,03	1,98	1,88	1,84
330	2,17	2,06	2,00	1,95	1,86	1,81
340	2,15	2,04	1,97	1,92	1,83	1,79
350	2,12	2,01	1,95	1,90	1,80	1,76

Figura 9. Factor de erosión para ejes sencillos y tándem. Pavimentos de concreto con dovelas y con bermas de concreto

Fuente: PORTLAND CEMENT ASSOCIATION. Design and construction of joints for concrete streets. Skokie: PCA, 1992. 12 p.

(Eje tridem)						
Espesor de losa (mm)	k del conjunto Subrasante/Subbase					
	20	40	60	80	140	180
100	3,86	3,80	3,75	3,71	3,62	3,56
110	3,76	3,69	3,65	3,62	3,53	3,48
120	3,68	3,60	3,56	3,52	3,45	3,40
130	3,60	3,51	3,47	3,44	3,37	3,33
140	3,53	3,43	3,39	3,36	3,29	3,26
150	3,47	3,36	3,31	3,28	3,22	3,19
160	3,41	3,30	3,25	3,21	3,15	3,12
170	3,35	3,24	3,19	3,15	3,08	3,05
180	3,30	3,19	3,13	3,09	3,02	2,99
190	3,25	3,14	3,08	3,04	2,96	2,93
200	3,21	3,09	3,03	2,99	2,91	2,88
210	3,16	3,05	2,99	2,94	2,86	2,83
220	3,12	3,01	2,94	2,90	2,82	2,78
230	3,08	2,97	2,90	2,86	2,77	2,74
240	3,05	2,93	2,86	2,82	2,73	2,69
250	3,01	2,89	2,83	2,78	2,69	2,65
260	2,98	2,86	2,79	2,74	2,66	2,62
270	2,94	2,82	2,76	2,71	2,62	2,58
280	2,91	2,79	2,72	2,68	2,59	2,55
290	2,88	2,76	2,69	2,65	2,55	2,51
300	2,85	2,73	2,66	2,62	2,52	2,48
310	2,82	2,70	2,63	2,59	2,49	2,45
320	2,80	2,68	2,61	2,56	2,46	2,42
330	2,77	2,65	2,58	2,53	2,44	2,40
340	2,74	2,62	2,55	2,50	2,41	2,37
350	2,72	2,60	2,53	2,48	2,38	2,34

(Eje tridem)						
Espesor de losa (mm)	k del conjunto Subrasante/Subbase					
	20	40	60	80	140	180
100	3,27	3,17	3,13	3,12	3,07	3,03
110	3,19	3,07	3,02	3,00	2,95	2,92
120	3,12	2,99	2,93	2,90	2,85	2,82
130	3,06	2,92	2,85	2,81	2,76	2,73
140	3,00	2,86	2,78	2,74	2,67	2,64
150	2,95	2,80	2,73	2,67	2,59	2,56
160	2,91	2,76	2,67	2,62	2,52	2,49
170	2,86	2,71	2,62	2,57	2,47	2,43
180	2,82	2,67	2,58	2,52	2,41	2,37
190	2,79	2,63	2,54	2,48	2,37	2,32
200	2,75	2,59	2,50	2,44	2,32	2,28
210	2,72	2,56	2,47	2,40	2,28	2,23
220	2,68	2,53	2,43	2,37	2,25	2,20
230	2,65	2,49	2,40	2,34	2,21	2,16
240	2,62	2,46	2,37	2,31	2,18	2,13
250	2,59	2,44	2,34	2,28	2,15	2,10
260	2,57	2,41	2,32	2,25	2,12	2,07
270	2,54	2,38	2,29	2,22	2,10	2,04
280	2,51	2,36	2,26	2,20	2,07	2,01
290	2,49	2,33	2,24	2,17	2,04	1,99
300	2,47	2,31	2,22	2,15	2,02	1,96
310	2,44	2,29	2,19	2,13	2,00	1,94
320	2,42	2,26	2,17	2,10	1,97	1,92
330	2,40	2,24	2,15	2,08	1,95	1,89
340	2,38	2,22	2,13	2,06	1,93	1,87
350	2,36	2,20	2,11	2,04	1,91	1,85

Figura 10. Factor de erosión para ejes tridem en pavimentos de concreto con dovelas, sin bermas y con bermas de concreto.

Fuente: PORTLAND CEMENT ASSOCIATION. Design and construction of joints for concrete streets. Skokie: PCA, 1992. 12 p.

6.7 DATOS RELEVANTES PARA EL DISEÑO

Además de la fácil obtención del concreto de $F'c = 4000$ se considera que tiene las características adecuadas para soportar las cargas transmitidas por el tránsito vehicular calculado que se proyecta a pasar por la vía construida.

El factor de Seguridad de Carga escogido es de 1,2 lo que representa un tránsito pesado a lo largo de la vida útil, se tiene en cuenta que su ubicación adyacente a la Vía Alternativa del Puerto de Santa Marta y presentará un flujo constante de todo tipo de ejes con la proyección realizada a 20 años.

FACTORES DE SEGURIDAD PARA CARGAS	
Livianas	1
Medias	1,1
Pesadas	1,2
Condiciones especiales	1,3

Tabla. 19 Factores de seguridad para cargas.

Fuente: PORTLAND CEMENT ASSOCIATION. Design and construction of joints for concrete streets. Skokie: PCA, 1992. 12 p.

Se implementa el uso de Dovelas para transmitir las cargas impuestas en una losa hacia la losa subsecuente, además que garantiza el movimiento entre ellas; las dovelas deben ser resistentes y a la hora de la instalación, tener un buen manejo de ellas, las varillas deben estar situadas en el centro del espesor de la losa para que la transmisión de cargas sea efectiva y que esta acción no provoque algún tipo de grieta (además debe ser lisa). La posición de este elemento debe ser paralelo a la losa y en el punto medio para que la longitud en cada una de las secciones sea equilibrada entre ambas losas.

Se decide instalar bermas para garantizar un ancho de vía, el cual cumplirá dos funciones, dar tranquilidad a los conductores al transitar y garantizar que las cargas transmitidas serán distribuidas de una mejor manera en la losa (se debe evitar transmitir cargas en los bordes de

las losas ya que son los puntos más críticos de soporte). Adicionalmente, se evita que al transitar no se tenga la necesidad de pasar por las juntas de inicio y fin, sin ocasionar roturas en el pavimento, también se pueden aprovechar para darle dirección al agua de escorrentía en caso de lluvia.

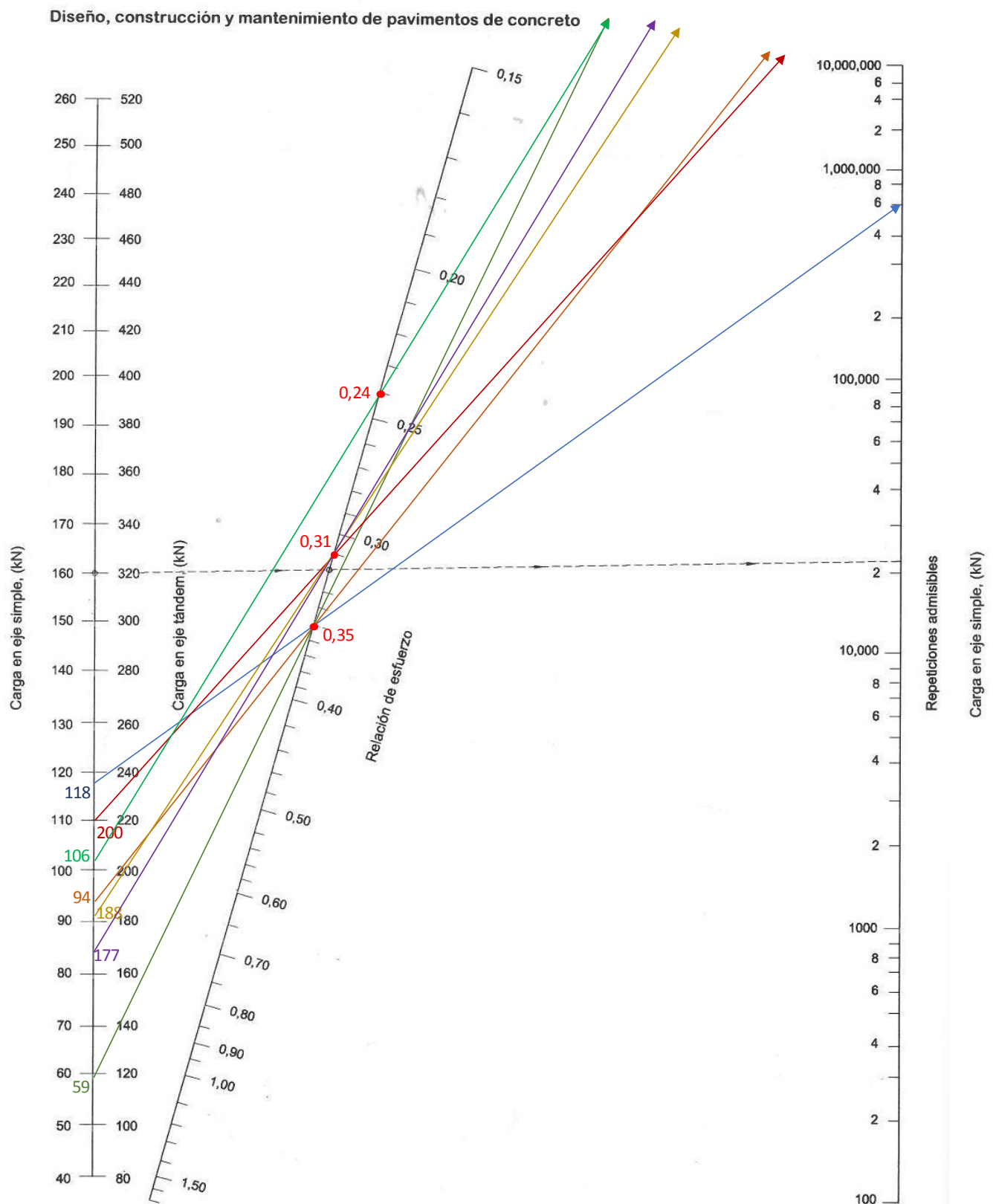


Figura 11. Análisis de fatiga. Repeticiones admisibles en función de la relación de esfuerzo en pavimentos con y sin berma de concreto

Fuente: PORTLAND CEMENT ASSOCIATION. Design and construction of joints for concrete streets. Skokie: PCA, 1992. 12 p.

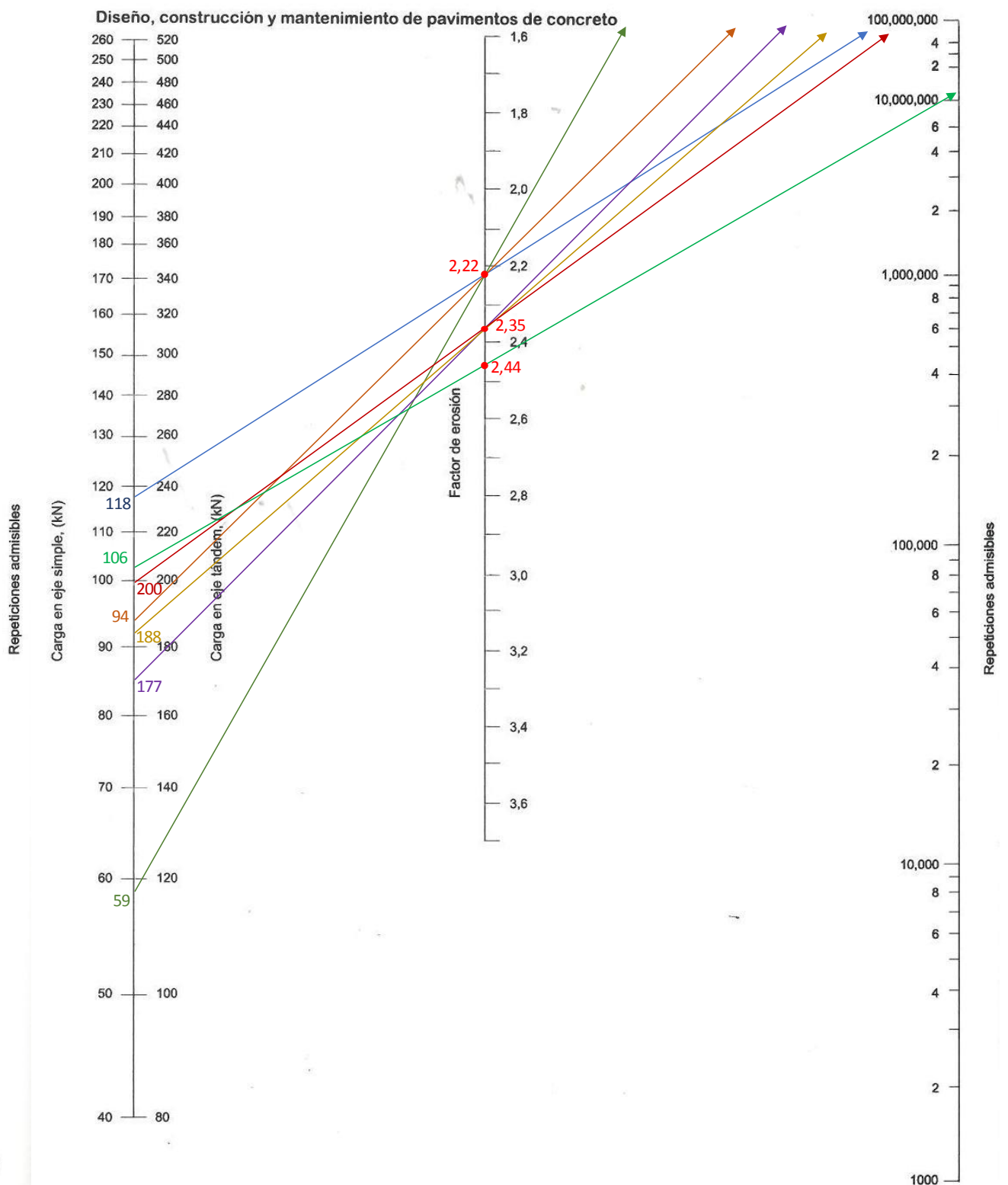


Figura 12. Análisis de erosión con berma de concreto. Repeticiones admisibles en función del factor de erosión en pavimentos con berma de concreto

Fuente: PORTLAND CEMENT ASSOCIATION. Design and construction of joints for concrete streets. Skokie: PCA, 1992. 12 p.

Espesor de la Losa de Concreto	23 cm
Espesor de la Subbase	23 cm
Ksis	51,30
Fctm,k	3,3
Fs.	1,2

Dovelas	Si
Bermas	Si
Periodo de Diseño	20 años

Tabla. 20 Resultados de diseño PCA.

			Análisis de fatiga		Análisis de Erosión	
Carga por eje	Carga x Fs.	Repeticiones esperadas	Solicitaciones admisibles	Fatiga	Solicitaciones admisibles	Erosión
Ejes Sencillos			Esfuerzo Equivalente: 1,16 Factor de fatiga 0,35		Factor de erosión 2,22	
98	118	204532	600000	34,089	Ilimitado	0
78	94	25566	Ilimitado	0	Ilimitado	0
49	59	140616	Ilimitado	0	Ilimitado	0
Ejes Tandem			Esfuerzo Equivalente: 1,02 Factor de fatiga 0,31		Factor de erosión 2,35	
167	200	115049	Ilimitado	0	Ilimitado	0
157	188	25566	Ilimitado	0	Ilimitado	0
147	177	12783	Ilimitado	0	Ilimitado	0
Ejes Tridem			Esfuerzo Equivalente: 0,78 Factor de fatiga 0,24		Factor de erosión 2,44	
265	106	76699	Ilimitado	0	13000000	0,590
94	38	63916	Ilimitado	0	Ilimitado	0
Total				34,089	Total	0,590

Tabla. 21 Análisis de Fatiga y Análisis de Erosión

Fuente: PORTLAND CEMENT ASSOCIATION. Design and construction of joints for concrete streets. Skokie: PCA, 1992. 12 p.

7 PROCEDIMIENTO MÉTODO AASHTO

A continuación, se procede con el desarrollo del Diseño para el Pavimento Rígido en cuestión por medio del Modelo implementado por AASHTO, se inicia con el cálculo del Transito proyectado para un Periodo de diseño de 20 años y el cálculo de la Frecuencia en periodo de diseño con equivalencia de N° de ejes de 8,2 Ton

7.1 TRANSITO - PERIODO DE DISEÑO

A continuación, se muestran los resultados obtenidos por el aforo realizado en la Calle 5 con Carrera 8 de la ciudad de Santa Marta (Colombia) Se ejecuto el conteo de Vehículos que transitaban por el sitio de interés cuantificando las cargas más pesadas por Eje (simple, tándem y trídem) para el Diseño de Pavimento Rígido de la Calle 5 entre Carrera 1 y Carrera 5 de la Ciudad de Santa Marta.

	Toneladas Carga por eje (tf)	KN Carga por eje (tf)	N° de Repeticiones por día (n1)
Ejes Sencillos	10	98,1	16
	8	78,48	2
	5	49,05	11
Ejes Tándem	17	166,77	9
	16	156,96	2
	15	147,15	1
Ejes Trídem	27	264,87	6
	9,6	94,176	5

Se procede a realizar una proyección del tránsito de la siguiente manera:

- Estimar las variables necesarias para efectuar el crecimiento por el Modelo lineal Propuesto por INVIAS.

$$N = \frac{n}{2} * [2 * N_0 + (n - 1) * d]$$

Figura 13. Modelo lineal INVIAS.

- Teniendo un periodo de diseño de 20 años, con una confiabilidad del 95% (que garantizará datos más exactos basados en el modelo escogido) para el cálculo de la

proyección, se utiliza como año base el 2020 (medido a partir del 2021 hasta el 2040)

- Se utiliza el modelo lineal establecido por el INVIAS (utilizado a nivel Nacional), junto con una tasa de crecimiento del 3,8% promedio más elevada, se escoge el valor en porcentaje mencionado para la tasa de crecimiento por criterio Profesional, utilizando como fundamento la ubicación del proyecto, el cual se realizará en la capital del Magdalena y su índice de crecimiento anual de tránsito es bastante elevado debido a que se utiliza esta calle como atajo para llegar a la Vía Alternativa al Puerto de Santa Marta.

TPDS	Tasas de crecimiento %				# Estaciones analizadas
	Total vehículos		Vehículos comerciales		
	Rango	Promedio	Rango	Promedio	
< 500	2,0 - 4,0 %	3,6%	2,0 - 4,0 %	2,9%	28
500 - 1000	3,0 - 6,0 %	3,4%	2,0 - 4,0 %	2,6%	49
1000 - 2500	3,0 - 6,0 %	4,3%	2,5 - 5,0 %	3,3%	134
2500 - 5000	3,0 - 6,0 %	4,3%	3,0 - 5,0 %	3,4%	144
5000 - 10000	3,0 - 6,0 %	4,5%	3,0 - 5,0 %	3,8%	146
> 10000	3,0 - 6,0 %	4,3%	3,0 - 6,0 %	3,8%	89

Tabla. 22 Tasas de crecimiento.

Número total de carriles en cada dirección	factor de distribución para el carril de diseño (Fca)
1	1,00
2	0,90
3	0,60
4 o más	0,45

Tabla. 23 Relación de Números totales de carriles en cada dirección y factor de distribución para el carril de diseño (Fca)

Fuente: El AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. AASHTO Guide for design of pavement structures. Washington: AASHTO, 1986. 1993. 1998. 2 vol.

Ancho de la calzada	Tránsito de diseño	Fd
Menos de 5m	Total en los dos sentidos	100
Igual o mayor de 5m y menor de 6m	3/4 del total en los dos sentidos	0,75
Igual o mayor de 6m	1/2 del total en los dos sentidos	0,5

Tabla. 24 *Relación entre Ancho de la calzada con el Tránsito de diseño (Fd)*

Fuente: El AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. AASHTO Guide for design of pavement structures. Washington: AASHTO, 1986. 1993. 1998. 2 vol

Adicionalmente se utiliza un factor de equivalencia de la cuarta potencia, para poder determinar la cantidad de ejes equivalentes de 8,2 Toneladas que transitan a lo largo del periodo de diseño; se discrimina en eje simple rueda simple, eje simple rueda doble, tándem y trídem. Se toma como parámetros fundamentales en la fórmula de los ejes equivalentes el factor carril y direccional de 0,9 y 0,5 respectivamente basándonos en una calzada de dos carriles en cada dirección.

Periodo de Diseño	20
Confiabilidad	95
Zr	1,645
Tasa de Crecimiento	0,038

Calzada de dos Carriles en cada Dirección	
Fca	0,9
Fd	0,5

Tabla. 25 *Datos relevantes del diseño.*

Fuente: El AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. AASHTO Guide for design of pavement structures. Washington: AASHTO, 1986. 1993. 1998. 2 vol

Tipo de eje	Detalle del eje	Expresiones para el cálculo del factor de equivalencia
Simple de rueda simple		$FEC = \left[\frac{\text{Carga por eje en T}}{6.6 T} \right]^4$
Simple de rueda doble		$FEC = \left[\frac{\text{Carga por eje en T}}{8.2 T} \right]^4$
Tándem		$FEC = \left[\frac{\text{Carga por eje en T}}{15.0 T} \right]^4$
Tridem		$FEC = \left[\frac{\text{Carga por eje en T}}{23.0 T} \right]^4$

Figura 14. Expresiones para el cálculo del factor de equivalencia

Fuente: EL AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. AASHTO Guide for design of pavement structures. Washington: AASHTO, 1986. 1993. 1998. 2 vol

Ejes Sencillos		
Toneladas	Cargas Máximas Legales	FEC Método de la cuarta Potencia
10	8,2	2,442517389
8		2,376606232
5		0,286693145

Tabla. 26 FEC método de la cuarta potencia. Ejes sencillos

Fuente: EL AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. AASHTO Guide for design of pavement structures. Washington: AASHTO, 1986. 1993. 1998. 2 vol

Ejes Tándem		
Toneladas	Cargas Máximas Legales	FEC Método de la cuarta Potencia
17	15	1,756343592
16		1,336993378
15		1

Tabla. 27 FEC método de la cuarta potencia. Ejes tándem

Fuente: EL AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. AASHTO Guide for design of pavement structures. Washington: AASHTO, 1986. 1993. 1998. 2 vol

Ejes Tridem		
Toneladas	Cargas Máximas Legales	FEC Método de la cuarta Potencia
27	23	2,057603437
9,6		0,019608541

Tabla. 28 FEC método de la cuarta potencia. Ejes trídém

Fuente: El AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. AASHTO Guide for design of pavement structures. Washington: AASHTO, 1986. 1993. 1998. 2 vol

Modelo Lineal INVAS

EJE SENCILLO 10 TONELADAS		
Año	N diario	N'
2019		
2020	17,59	17,59
2021	35,84	43,31
2022	54,76	66,18
2023	74,35	89,86
2024	94,61	114,34
2025	115,54	139,63
2026	137,14	165,73
2027	159,40	192,64
2028	182,33	220,35
2029	205,93	248,87
2030	230,20	278,20
2031	255,14	308,34
2032	280,74	339,28
2033	307,02	371,03
2034	333,96	403,59
2035	361,57	436,96
2036	389,85	471,14
2037	418,80	506,12
2038	448,41	541,91
2039	478,69	578,51
2040	509,65	615,91
Se calcula el valor de N de diseño (KN):		224807,82

Tabla. 29 Eje sencillo 10 toneladas.

EJE SENCILLO 8 TONELADAS		
Año	N diario	N'
2019		
2020	2,14	2,14
2021	4,36	5,27
2022	6,66	8,05
2023	9,04	10,93
2024	11,51	13,91
2025	14,05	16,98
2026	16,68	20,16
2027	19,39	23,43
2028	22,18	26,80
2029	25,05	30,27
2030	28,00	33,84
2031	31,03	37,50
2032	34,15	41,27
2033	37,34	45,13
2034	40,62	49,09
2035	43,98	53,15
2036	47,42	57,30
2037	50,94	61,56
2038	54,54	65,91
2039	58,22	70,36
2040	61,99	74,91
Se calcula el valor de N de diseño (KN):		27342,67

Tabla. 30 Eje sencillo 8 toneladas.

EJE SENCILLO 5 TONELADAS		
Año	N diario	N'
2019		
2020	1,42	1,42
2021	2,89	3,50
2022	4,42	5,34
2023	6,00	7,25
2024	7,63	9,23
2025	9,32	11,27
2026	11,07	13,37
2027	12,86	15,55
2028	14,71	17,78
2029	16,62	20,08
2030	18,58	22,45

2031	20,59	24,88
2032	22,66	27,38
2033	24,78	29,94
2034	26,95	32,57
2035	29,18	35,26
2036	31,46	38,02
2037	33,80	40,84
2038	36,19	43,73
2039	38,63	46,68
2040	41,13	49,70
Se calcula el valor de N de diseño (KN):		18141,11

Tabla. 31 Eje sencillo 5 toneladas.

EJE TÁNDEM 17 TONELADAS		
Año	N diario	N'
2019		
2020	7,11	7,11
2021	14,50	17,52
2022	22,15	26,77
2023	30,07	36,35
2024	38,27	46,25
2025	46,73	56,48
2026	55,47	67,03
2027	64,47	77,92
2028	73,75	89,13
2029	83,30	100,66
2030	93,11	112,53
2031	103,20	124,72
2032	113,55	137,23
2033	124,18	150,08
2034	135,08	163,24
2035	146,25	176,74
2036	157,69	190,56
2037	169,39	204,71
2038	181,37	219,19
2039	193,62	233,99
2040	206,14	249,12
Se calcula el valor de N de diseño (KN):		90929,70

Tabla. 32 Eje tandem 17 toneladas.

EJE TÁNDEM 16 TONELADAS		
Año	N diario	N'
2019		
2020	1,20	1,20
2021	2,45	2,96
2022	3,75	4,53
2023	5,09	6,15
2024	6,47	7,82
2025	7,91	9,55
2026	9,38	11,34
2027	10,91	13,18
2028	12,48	15,08
2029	14,09	17,03
2030	15,75	19,04
2031	17,46	21,10
2032	19,21	23,21
2033	21,01	25,39
2034	22,85	27,62
2035	24,74	29,90
2036	26,67	32,24
2037	28,66	34,63
2038	30,68	37,08
2039	32,75	39,58
2040	34,87	42,14
Se calcula el valor de N de diseño (KN):		15382,01

Tabla. 33 Eje tándem 16 toneladas.

EJE TÁNDEM 15 TONELADAS		
Año	N diario	N'
2019		
2020	0,45	0,45
2021	0,92	1,11
2022	1,40	1,69
2023	1,90	2,30
2024	2,42	2,93
2025	2,96	3,57
2026	3,51	4,24
2027	4,08	4,93
2028	4,67	5,64
2029	5,27	6,37
2030	5,89	7,12

2031	6,53	7,89
2032	7,18	8,68
2033	7,86	9,49
2034	8,55	10,33
2035	9,25	11,18
2036	9,98	12,06
2037	10,72	12,95
2038	11,47	13,87
2039	12,25	14,80
2040	13,04	15,76
Se calcula el valor de N de diseño (KN):		5752,46

Tabla. 34 Eje tándem 15 toneladas.

EJE TRÍDEM 27 TONELADAS		
Año	N diario	N'
2019		
2020	5,56	5,56
2021	11,32	13,68
2022	17,30	20,91
2023	23,49	28,39
2024	29,89	36,12
2025	36,50	44,11
2026	43,32	52,36
2027	50,36	60,85
2028	57,60	69,61
2029	65,06	78,62
2030	72,72	87,89
2031	80,60	97,41
2032	88,69	107,18
2033	96,99	117,21
2034	105,50	127,50
2035	114,22	138,04
2036	123,15	148,83
2037	132,30	159,89
2038	141,65	171,19
2039	151,22	182,75
2040	161,00	194,57
Se calcula el valor de N de diseño (KN):		71017,71

Tabla. 35 Eje trídém 27 toneladas.

Eje Trídem 9.6 Toneladas		
Año	N diario	N'
2019		
2020	0,04	0,04
2021	0,09	0,11
2022	0,14	0,17
2023	0,19	0,23
2024	0,24	0,29
2025	0,29	0,35
2026	0,34	0,42
2027	0,40	0,48
2028	0,46	0,55
2029	0,52	0,62
2030	0,58	0,70
2031	0,64	0,77
2032	0,70	0,85
2033	0,77	0,93
2034	0,84	1,01
2035	0,91	1,10
2036	0,98	1,18
2037	1,05	1,27
2038	1,12	1,36
2039	1,20	1,45
2040	1,28	1,55
Se calcula el valor de N de diseño (KN):		563,99

Tabla. 36 Eje trídem 9,6 toneladas.

	Toneladas Carga por eje (tf)	KN Carga por eje (tf)	N° de Repeticiones por día (n1)	% Ejes	Número de ejes de 8,2 ton	Frecuencia en periodo de diseño (N° de ejes de 8,2 Ton)
Ejes Sencillos	10	98,1	16	31	17,59	224807,82
	8	78,48	2	4	2,14	27342,67
	5	49,05	11	21	1,42	18141,11
Ejes Tándem	17	166,77	9	17	7,11	90929,70
	16	156,96	2	4	1,20	15382,01
	15	147,15	1	2	0,45	5752,46
Ejes Trídem	27	264,87	6	12	5,56	71017,71
	9,6	94,176	5	10	0,04	563,99

52

100

453937,46

KN	4.453.126,519
-----------	----------------------

Tabla. 37 Total de frecuencia en periodo de diseño (N. de ejes equivalentes de 8,2 toneladas)

7.2 MÓDULO DE ELASTICIDAD (CORRELACIÓN)

Al no tener información ni origen acerca del agregado a implementar en el proyecto, se selecciona la correlación entre la resistencia a la compresión y el módulo de elasticidad ($E_c = 12500\sqrt{f'_c}$).

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	$E_c = 3900 \sqrt{f'_c} - 12.500 \sqrt{f'_c}$

Figura 15. Correlación entre la resistencia a la compresión y el módulo de elasticidad

Fuente: EL AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. AASHTO Guide for design of pavement structures. Washington: AASHTO, 1986. 1993. 1998. 2 vol

7.3 FACTOR K CONJUNTO

Para el valor del K conjunto, el cual se necesita para encontrar el espesor por el método gráfico mediante el nomograma AASHTO, se tomó el valor de K hallado por el método PCA escogido por la figura 2 inicialmente.

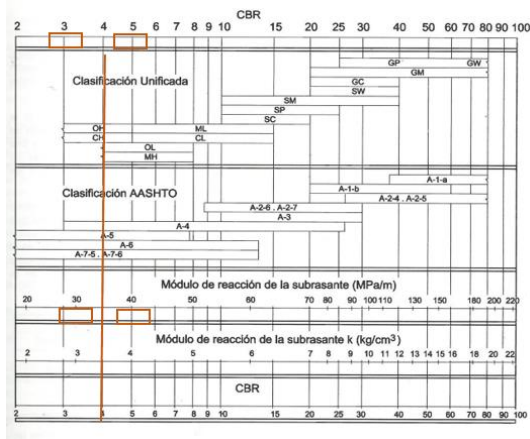


Figura 16. Correlación aproximada entre la clasificación de los suelos y los diferentes ensayos

Fuente: El AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. AASHTO Guide for design of pavement structures. Washington: AASHTO, 1986. 1993. 1998. 2 vol

Valor de K para la Subrasante		Valor de K para la subbase							
		100 mm		150 mm		225 mm		300 mm	
Mpa/m	Lb/pul3	Mpa/m	Lb/pul3	Mpa/m	Lb/pul3	Mpa/m	Lb/pul3	Mpa/m	Lb/pul3
20	73	23	85	26	96	32	117	38	140
40	147	45	165	49	180	57	210	66	245
60	220	64	232	66	245	76	280	90	330
80	295	87	320	90	330	100	370	117	430

Tabla. 38 Efecto de la subbase granular sobre los valores de K.

Fuente: El AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. AASHTO Guide for design of pavement structures. Washington: AASHTO, 1986. 1993. 1998. 2 vol

INTERPOLACIÓN POR TABLA				
Hallar valor de K	X0	300	Y0	38
	X	230	Y	32,4
	X1	225	Y1	32
	X0	300	Y0	66
	X	230	Y	57,6
	X1	225	Y1	57
K Conjunto	X0	20	Y0	32,4
	X	35	Y	51,3
	X1	40	Y1	57,6

Tabla. 39 Interpolación de la totalidad de ejes. K conjunto.

Después de la interpolación correspondiente al proceso anterior, se estima un espesor para la Subbase de 230 milímetros.

7.4 VALOR DEL COEFICIENTE DE TRASMISIÓN DE CARGAS, J

Por medio (valores de coeficiente de transmisión de cargas “J”), se seleccionó la berma de concreto con tipo de pavimento no reforzado o reforzado con juntas, un valor medio de 2.8 en un rango que estaba entre 2.5 y 3.1.

Berma	De asfalto		De concreto	
	Si	No	Si	No
Dispositivos de transmisión				
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	--

Tabla. 40 Valores del coeficiente de transmisión de cargas J.

Fuente: EL AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. AASHTO Guide for design of pavement structures. Washington: AASHTO, 1986. 1993. 1998. 2 vol

7.5 COEFICIENTE DE DRENAJE

Teniendo en cuenta que se construirá una vía nueva, por medio de la tabla 26 se escogió una calidad de drenaje buena, ya que es necesario hacer un sistema de evacuación muy preciso para que el agua no deteriore el pavimento y siga su flujo sin generar sobrecostos a futuro por una posible deficiencia en el diseño. La pluviosidad en la ciudad de Santa Marta ha aumentado considerablemente, por lo tanto se dictaminó que el porcentaje de tiempo en que la estructura de pavimento estará expuesta a niveles de humedad próximos a saturación. Un rango de valores entre 5% y 25%, en la columna “bueno” un rango de valores de 1.10 a 1, siendo el 1.05 el dato tomado para este diseño.

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 evacua

Tabla. 41 Calidad del drenaje.

Fuente: EL AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. AASHTO Guide for design of pavement structures. Washington: AASHTO, 1986. 1993. 1998. 2 vol

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 - 0.9	0.90 - 0.80	0.80 - 0.70	0.70

Tabla. 42 Valores del coeficiente de drenaje Cd.

Fuente: EL AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. AASHTO Guide for design of pavement structures. Washington: AASHTO, 1986. 1993. 1998. 2 vol

7.6 CONFIABILIDAD R (%)

La confiabilidad con la que se trabajó fue la del 95% donde se escoge a criterio, teniendo en cuenta el tipo de carretera que se piensa construir y en qué tipo de zona se trabajará.

Tipo de carretera	Niveles de confiabilidad	
	Urbana	Interurbana
Autopistas y carreteras importantes	85 - 99.9	80 - 99.9
Arterias principales	80 - 99	75 - 95
Colectores	80 - 95	75 - 95
Locales	50 - 80	50 - 80

Tabla. 43 Niveles de confiabilidad a adoptar en función del tipo de carretera.

Fuente: EL AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. AASHTO Guide for design of pavement structures. Washington: AASHTO, 1986. 1993. 1998. 2 vol

Confiabilidad R, %	Desviación normal estándar
50	0,000
60	-0,253
70	-0,524
75	-0,674
80	-0,841
85	-0,1037
90	-0,1282
91	-1,340
92	-1,405
93	-1,476
94	-1,555
95	-1,645
96	-1,751
97	-1,1881
98	-1,2054
99	-2,327
99,9	-3,09
99,99	-3,75

Tabla. 44 Valores de Zr en función de la confiabilidad.

Fuente: EL AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. AASHTO Guide for design of pavement structures. Washington: AASHTO, 1986. 1993. 1998. 2 vol

7.7 DESVIACIÓN ESTÁNDAR (SO)

Se identificó la desviación estándar (So), dependiendo del número del tránsito esperado para el diseño se escogió un factor de 0.28

Tránsito esperado en el carril de diseño (millones de ejes equivalentes)	Nivel de confiabilidad, R%	Factor Zr	Factor S.	F.S.
< 5	50	0	0,35	1
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 70	70 - 75	0,524 - 0,674	0,34	1,51 - 1,70
50 a 70	75 - 80	0,674 - 0,841	0,32	1,64 - 186
70 a 90	80 - 85	0,841 - 1,037	0,3	1,79 - 2,05

Tabla. 45 Confiabilidad y factores de seguridad recomendadas.

Fuente: EL AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. AASHTO Guide for design of pavement structures. Washington: AASHTO, 1986. 1993. 1998. 2 vol

7.8 PÉRDIDA DE SERVICIABILIDAD, Δ PSI

Es un valor que depende del tipo de vía, por lo que para la ciudad de Santa Marta se tomó como una vía principal, con pavimento rígido y un valor de 2.0

Tipo de vía	Índice de serviciabilidad del pavimento (PSI)			
	Pavimento flexible		Pavimento rígido	
	PSI inicial	PSI final	PSI inicial	PSI final
Vías principales	4,2	2,5	4,5	2,5
Vías secundarias		2		2
Condición de falla		1,5		1,5

Tabla. 46 Índice de serviciabilidad del pavimento (PSI)

Fuente: EL AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. AASHTO Guide for design of pavement structures. Washington: AASHTO, 1986. 1993. 1998. 2 vol

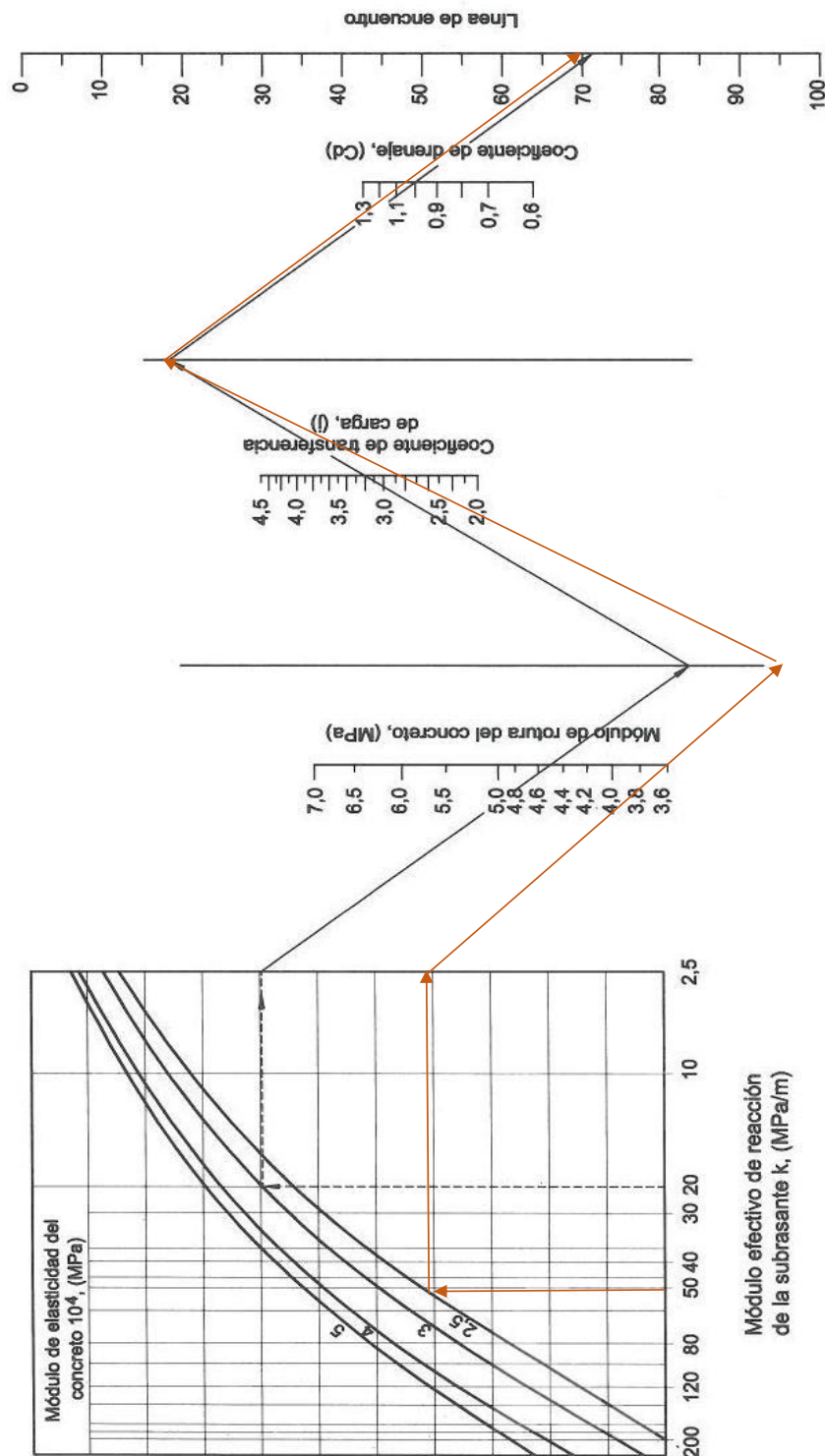
7.9 PROCEDIMIENTO PARA HALLAR EL ESPESOR DE LA LOSA POR MEDIO DEL MÉTODO GRÁFICO DE AASHTO

1. Se halla la correlación del módulo de elasticidad para ingresarlo a la primera parte de la figura 7 y el módulo de reacción K de la subrasante de la figura 2, donde se determinó que con una arcilla de alta plasticidad (CH) y por medio de la clasificación AASTHO un tipo de suelo A6, en este caso se toman los valores de k conjunto del diseño de PCA con el fin de determinar si los valores de los espesores en ambos métodos generan un resultado similar.
2. Con los k conjuntos y se traza una línea hasta llegar a la parte del módulo de rotura del concreto escogido dependiendo de la resistencia del concreto (hallado mediante la correlación entre la resistencia a la compresión y el módulo de elasticidad).
3. A partir del módulo de rotura se traza una línea hasta interceptar una recta de encuentro con el fin de parar el trazado y darle dirección al siguiente trayecto, y se procede a trazar el coeficiente de transferencia de carga “J” que se halló.
4. Luego de hallar J se traza hasta llegar a la recta de encuentro de la gráfica y se procede a ingresar el coeficiente de drenaje que se determinó y en la cual se proyecta la línea hasta la “línea de encuentro” para pasar a la segunda parte de la figura 7.
5. Estando situados en la “línea de encuentro” se traza la línea juntando el valor de índice de serviciabilidad hasta el nomograma donde se sitúa el espesor de la losa y se halla un punto a graficar.
6. Por la otra sección de la tabla, se traza la confiabilidad y seguido la desviación estándar hallada, luego se proyecta la línea hasta llegar a recta de encuentro de la gráfica.
7. Después se dibuja la línea hasta llegar al trazado de los números de ejes equivalentes y se traza en dirección al nomograma, en el cual se interceptará con

el punto hallado en el procedimiento 5, generando un espesor para los parámetros utilizados en la formulación del método.

K conjunto	
51.25 Mpa/m	
Valor del Coeficiente de Trasmisión de Cargas, J	
2,5 - 3,1 - Promedio (2,8)	
Coeficiente de Drenaje	
Calidad de Drenaje	Bueno
1.10 - 1.00 - Promedio (1.05)	
Confiabilidad R (%)	
95%	
Desviación Estándar (So)	
0,28	
Ejes Equivalentes a 82 KN	
4453126,519	
Pérdida de Serviciabilidad, Δ PSI	
2	

Tabla. 47 Datos seleccionados para hallar espesor de la losa por Método Gráfico de AASTHO



Ejemplo:

$k = 20 \text{ MPa/m}$
 $E_c = 35000 \text{ MPa}$
 $M_r = 4.5 \text{ MPa}$
 $J = 3.2$
 $C_d = 1$

$S_o = 0.29$
 $R = 95\% (Z_r = 1.645)$
 $\Delta \text{ PSI} = 4.2-2.5 = 1.7$
 $w_{82} = 5.1 \times 10^6$
 Solución $D = 250 \text{ mm}$

Figura 17. Nomograma AASHTO (primera parte)

Fuente: EL AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. AASHTO Guide for design of pavement structures. Washington: AASHTO, 1986. 1993. 1998. 2 vol

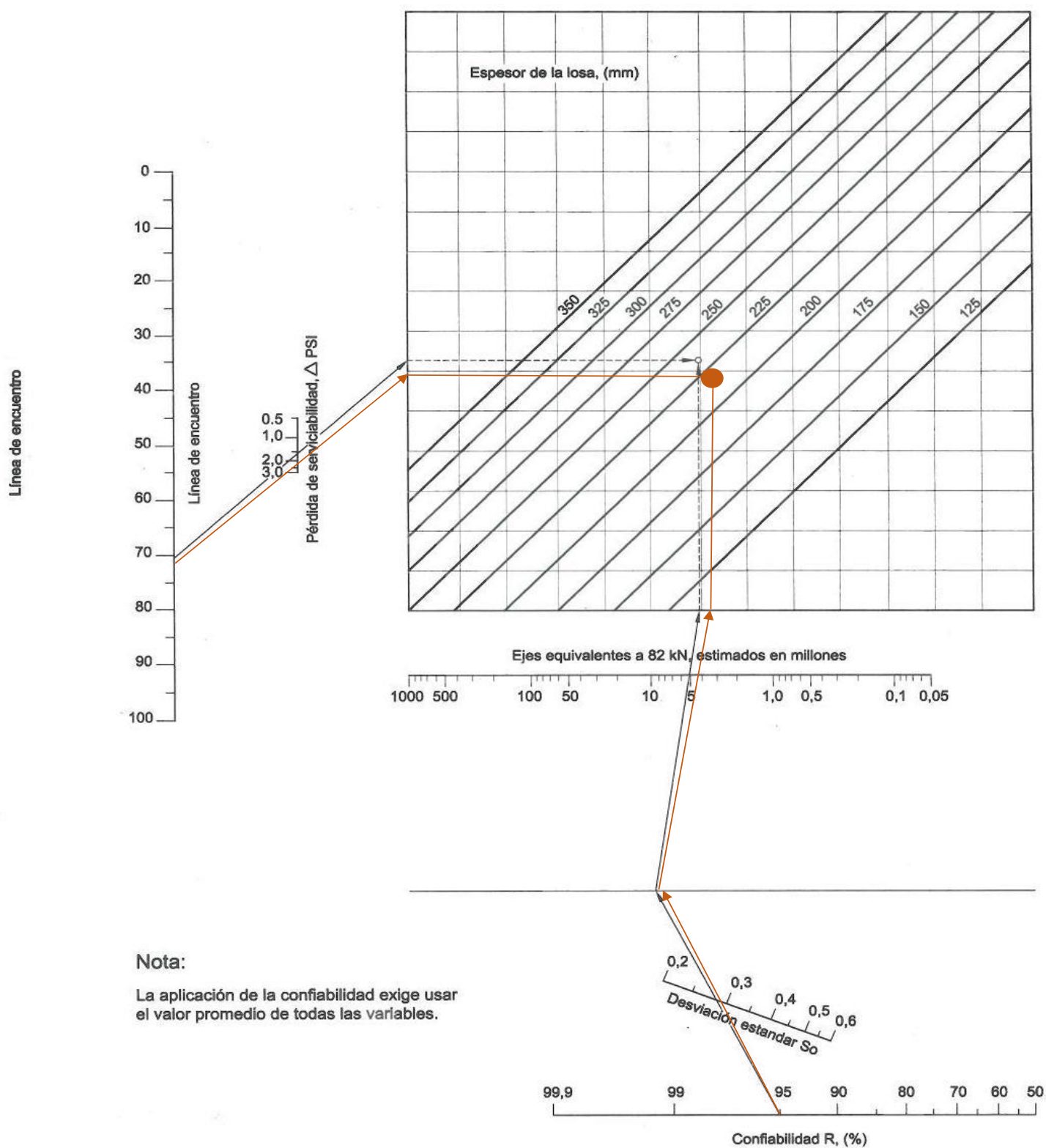


Figura 18. Nomograma AASHTO (segunda parte)

Fuente: EL AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. AASHTO Guide for design of pavement structures. Washington: AASHTO, 1986. 1993. 1998. 2 vol

Ensayo		Norma de Ensayo	Clase de Subbase Granular			
			SBG_PEA	SBG_C	SBG_B	SBG_A
Dureza						
Desgaste Los Angeles	- En seco, 500 revoluciones, % máximo	INV E-218-07	50	45	40	40
Micro Deval, % máximo	- Agregado Grueso	INV E-238-07	NA	35	35	30
10% de finos	- Valor en seco, kN mínimo - Relación húmedo/seco, % mínimo	INV E-224-07	NA	40 65	50 70	60 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 (1)		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 Mecánicamente, % mínimo	- 1 cara - 2 caras	INV E-227-07	NA NA	NA NA	NA NA	50 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 95 % 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	20	30	40	60

Fotografía 19. Granulometrías admisibles para la construcción de bases y subbases granulares

Fuente: Especificaciones IDU – ET – 2005

Espesor de losa (mm)	Barras de ϕ 9,5 mm (3/8")			Barras de ϕ 12,7 mm (1/2")			Barras de ϕ 15,9 mm (5/8")					
	Longitud (m)	Separación entre barras según el ancho del carril (m)			Longitud (m)	Separación entre barras según el ancho del carril (m)			Longitud (m)	Separación entre barras según el ancho del carril (m)		
		3,05 (m)	3,35 (m)	3,65 (m)		3,05 (m)	3,35 (m)	3,65 (m)		3,05 (m)	3,35 (m)	3,65 (m)
Acero de $f_y= 187,5$ MPa (40.000 psi)												
150	0,45	0,80	0,75	0,65	0,60	1,20	1,20	1,20	0,70	1,20	1,20	1,20
175		0,70	0,60	0,55		1,20	1,10	1,00		1,20	1,20	1,20
200		0,60	0,55	0,50		1,05	1,00	0,90		1,20	1,20	1,20
225		0,55	0,50	0,45		0,85	0,85	0,80		1,20	1,20	1,20
250		0,45	0,45	0,40		0,65	0,60	0,70		1,20	1,20	1,10
Acero de $f_y= 280$ MPa (60.000 psi)												
150	0,65	1,20	1,10	1,00	0,85	1,20	1,20	1,20	1,00	1,20	1,20	1,20
175		1,05	0,95	0,85		1,20	1,20	1,20		1,20	1,20	1,20
200		0,90	0,80	0,75		1,20	1,20	1,20		1,20	1,20	1,20
225		0,80	0,75	0,65		1,20	1,20	1,20		1,20	1,20	1,20
250		0,70	0,65	0,60		1,20	1,15	1,10		1,20	1,20	1,20

Figura 20. Recomendación para las barras de anclaje.

Fuente: Manual de diseño de pavimentos de concreto para bajos, medios y altos volúmenes de tránsito. INVIAS

Espesor del pavimento	Diámetro del pasador		Longitud	Separación entre centros
	mm	Pulgada		
0 - 100	13	1/2	250	300
110 - 130	16	5/8	300	300
140 - 150	19	3/4	350	300
160 - 180	22	7/8	350	300
190 - 200	25	1	350	300
210 - 230	29	1 1/8	400	300
240 - 250	32	1 1/4	450	300
260 - 280	35	1 3/8	450	300
290 - 300	38	1 1/2	500	300

Figura 21. Recomendación para la sección de los pasadores de carga.

Fuente: Manual de diseño de pavimentos de concreto para bajos, medios y altos volúmenes de tránsito. INVIAS

8 RESULTADOS DE DISEÑOS

A continuación, se evidencian los resultados obtenidos de los dos Diseños de Pavimento Rígido que se implementaron para la Calle 5 entre Carrera 11 y Carrera 5 de la ciudad de Santa Marta, Colombia.

8.1 MODELO ESTABLECIDO POR AASHTO Y MODELO ESTABLECIDO POR PCA

Mr Concreto	
Kg/cm ³	Mpa
33,54	3,3
Espesor de la Losa de concreto	
21 cm	
Espesor de la Subbase	
23 cm	
Fy Acero	
Psi	Mpa
60000	28,00
Barras de anclaje	
Diámetro de Barra	1/2 in
Longitud de la barra	0,85 m
Espaciamiento de las barras	1,2 m
Pasadores de carga	
Diámetro de Barra	1 1/8 in
Longitud de la barra	0,4 m
Espaciamiento de las barras	0,3 m

Tabla. 48 Resultados de diseño Modelo AASHTO

Mr Concreto	
Kg/cm ³	Mpa
33,54	3,3
Espesor de la Losa de concreto	
23 cm	
Espesor de la Subbase	
23 cm	
Fy Acero	
Psi	Mpa
60000	28,00
Barras de anclaje	
Diámetro de Barra	1/2 in
Longitud de la barra	0,85 m
Espaciamiento de las barras	1,2 m
Pasadores de carga	
Diámetro de Barra	1 1/8 in
Longitud de la barra	0,4 m
Espaciamiento de las barras	0,3 m

Tabla. 49 Resultados de diseño PCA

A continuación de evidencia la representación del diseño de la Estructura de Pavimento por el Metodo PCA escogido para la Calle 5 entre Carrera 11 y Carrera 5 de la ciudad de Santa Marta, Colombia.

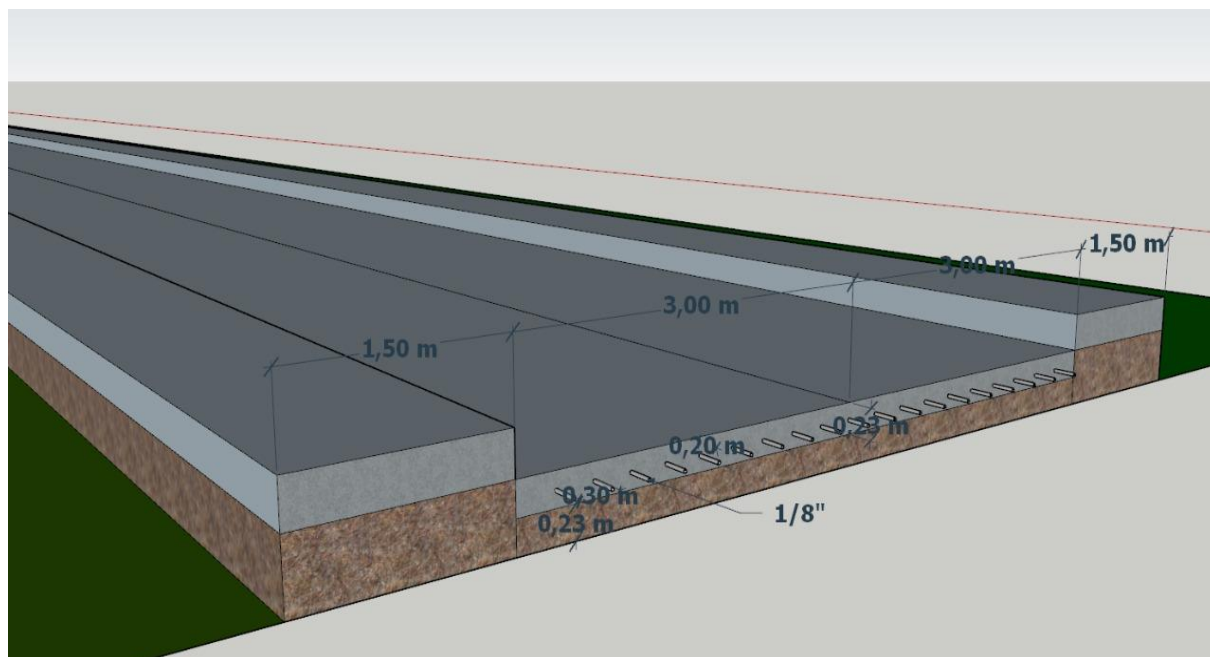


Figura 22. Representación de la Estructura de Pavimento.

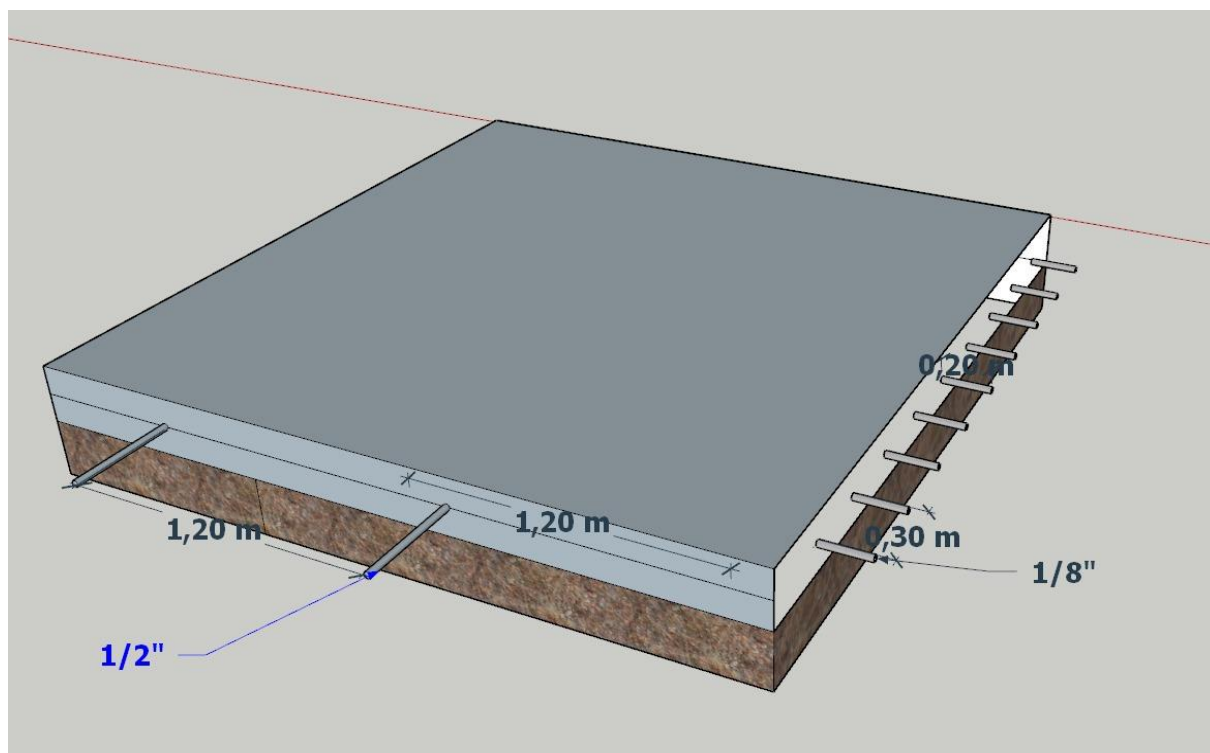


Figura 23. Representación de la Estructura de Pavimento.

9 CONCLUSIONES

- Mediante la metodología AASHTO se obtienen espesores de losa menores que con la metodología PCA, sin embargo, con bajos volúmenes de tránsito, o períodos de diseño cortos, con la metodología de AASHTO se corta siempre el rango de valores límite de cada nomograma, lo cual también afecta la precisión del valor observado porque se cortarían algunas líneas con ángulos muy agudos, aunque esto no afecta mayormente el resultado obtenido en cuanto a espesor del pavimento. En este caso o para pavimentos con muy bajos volúmenes, es claro que se debe preferir la metodología PCA.
- Comparativamente hablando, mientras que por PCA, con el diseño de 23 cm para la losa de concreto y (M_r 3,3MPa) al alcanzar el número de repeticiones de carga proyectados se prevé un desgaste por fatiga del material del 34%, en AASHTO un diseño similar de 21cm para la losa de concreto y (M_r 3,3MPa) donde el resultado final indica que podrá resistir 4,4 millones de ejes de 8,2Ton
- Teniendo en cuenta la finalización de ambos ejercicios, PCA y AASHTO, el siguiente análisis para decisión de la alternativa a escoger deberá basarse en un criterio social. En ambos casos las metodologías permiten entender que tanto el diseño por PCA (23cm de espesor de losa con M_r 3,3MPa) como por AASHTO (21cm de espesor de losa con M_r 3,3MPa) son competentes y cumplen los criterios de calidad del ejercicio, el contexto de la vía es el factor determinante a la hora de escoger uno u otro diseño, ya que por estar adyacente a la Vía Alternativa al Puerto de Santa Marta, el tráfico considerado pesado toma esta ruta con frecuencia, por lo que la comunidad ha decidido instalar reductores de velocidad en repetidas ocasiones porque el entorno de la Vía compete a zona residencial, lo cual conlleva a que los vehículos bajen su velocidad con mayor frecuencia de lo normal aplicando por más tiempo las cargas que transmiten a la

estructura de pavimento, razón por la que se concluye que el diseño adecuado para esta ocasión es diseño por PCA (23cm de espesor de losa con M_r 3,3Mpa.

