

CARLOS ALBERTO BRYAN URIBE

SAÚL ISAÍAS DUARTE ROJAS

COMPARACIÓN DE LOS ESPESORES DE LOSA POR LOS MÉTODOS DE DISEÑO TCP
SYSTEM, PCA-84 Y RACIONAL PARA LAS CONDICIONES DE TRÁNSITO Y
SUBRASANTE EN SAN ANDRÉS ISLAS.

Tesis presentada a la Facultad de Ingeniería Civil
de la Universidad del Cauca para
la obtención del Título de

Magíster en:
Ingeniería de Pavimentos

Director:
Efraín de Jesús Solano Fajardo
Magister en Ingeniería de Vías Terrestres

Popayán
Septiembre de 2018

El comité a cargo de este trabajo de grado certifica que Carlos Alberto Bryan Uribe y Saúl Isaías Duarte Rojas, aprobaron los requisitos para optar al título de Máster en Ingeniería de Pavimentos.

Director

Fecha

Fecha

Fecha

Fecha

UNIVERSIDAD DEL CAUCA

SEPTIEMBRE 2018

Resumen estructurado

Por ser territorio insular la isla de San Andrés, los costos de materiales son elevados en la construcción de pavimentos, por tener que ser importados, debido a esto es importante que se implementen nuevas tecnologías de diseño que optimicen los recursos de inversión.

Con el presente trabajo se comparan los espesores del pavimento rígido, para diferentes categorías de Tránsito y subrasante de la Isla, mediante la utilización de tres métodos de diseño, PCA-84, TCP System (Losas Cortas) y racional del IDU.

Los resultados mostraron que la metodología de diseño en que se obtuvieron los menores espesores de pavimento fue la de TCP System.

Palabras Clave: Diseño de Pavimentos, PCA-84, Optipave, TCP System, Diseño Racional.

Structured abstract

Because it is an island territory the San Andrés Island, material costs are high in the construction of pavements, which means that they must be imported, due to this, it is essential that new design technologies be implemented to optimize investment resources.

With this work we compare the thickness of rigid pavement, for different categories of Transit and subgrade of the Island, by using three design methods, PCA-84, TCP System (Short Slabs) and rational IDU.

The results show that the design methodology in which the lowest pavement thicknesses was obtained by TCP System.

Keywords: Pavement Design, PCA-84, Optipave, TCP System, Rational Design.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN		10
1	Descripción del problema	11
2	Justificación	12
3	Objetivos	13
	3.1 <i>Objetivo General</i>	13
	3.2 <i>Objetivos específicos</i>	13
4	Marco Referencial	14
	4.1 <i>Marco Conceptual</i>	14
	4.2 <i>Marco Legal</i>	16
	4.3 <i>Marco teórico</i>	17
	4.3.1 Método de Portland Cement Association (PCA)	17
	4.3.2 Método racional para pavimento rígido	23
	4.3.3 Diseño de losas de concreto con geometría optimizada	29
5	Categorías de Subrasante	36
	5.1 <i>Geología Regional</i>	36
	5.2 <i>Geología Local</i>	37
	5.2.1 Sector Norte	37
	5.2.2 Sector Central	37
	5.2.3 Sector Sur	37

5.3	<i>Condiciones Climáticas</i>	38
5.3.1	Precipitación	38
5.3.2	Temperatura	38
5.3.3	Humedad Relativa	38
5.4	<i>Datos Obtenidos</i>	38
5.4.1	Análisis estadístico	40
5.5	<i>Categorías seleccionadas</i>	41
6	Tránsito	42
6.1	<i>Ubicación de las estaciones de conteo</i>	42
6.2	<i>Datos Obtenidos</i>	43
6.3	<i>Selección del tránsito</i>	44
6.4	<i>Tránsito para los diseños</i>	45
6.4.1	Tránsito Categoría NT3	45
6.4.2	Tránsito Categoría NT2	46
6.4.3	Tránsito Categoría NT1	46
7	Diseños de Pavimento Rígido	47
7.1	<i>Modelación por BS-PCA</i>	48
7.1.1	Variables utilizadas BS-PCA.....	48
7.1.2	Resultados de espesores BS-PCA.....	49
7.2	<i>Modelación por el método Racional IDU – Universidad de los Andes</i>	49
7.2.1	Variables utilizadas Racional	49
7.2.2	Resultados de espesores Racional	51
7.3	<i>Modelación por el método TCP System</i>	52
7.3.1	Variables utilizadas en TCP System.....	52
7.3.2	Resultados de espesores TCP System.....	53

8	Análisis de resultados.....	54
	8.1 <i>Análisis de resultados para el tránsito categoría 3.</i>	54
	8.2 <i>Análisis de resultados para el tránsito categoría 2.</i>	56
	8.3 <i>Análisis de resultados para el tránsito categoría 1.</i>	59
9	Recomendaciones	61
10	Conclusiones	61
11	Referencias.....	66

Listado de Tablas

Tabla 1. Pasos para estimar el tránsito	16
Tabla 2. Procedimiento de diseño PCA.	22
Tabla 3. Clasificación Tránsito	24
Tabla 4. Fractil u.	25
Tabla 5. Niveles de P_f recomendados.	26
Tabla 6. Valores de k_s	27
Tabla 7. Valores recomendados.	28
Tabla 8. Valores para k_d	28
Tabla 9. Geotecnia Vial.....	39
Tabla 10. Estadística Subrasante.....	40
Tabla 11. Categorías Subrasante	41
Tabla 12. Tránsito de la Isla.	44
Tabla 13. Tránsito para los diseños	45

Tabla 14. Modelaciones por método	47
Tabla 15. Variables utilizadas para el concreto (Hormigón)	48
Tabla 16. Valores para la plataforma de soporte $e=150$ mm en MPa/m	48
Tabla 17. Espesores de losa (cm), para las diferentes variables PCA-84	49
Tabla 18. Parámetros para hallar los esfuerzos y deformaciones admisibles	50
Tabla 19. Datos de entrada para el eje de referencia de 130 KN	50
Tabla 20. Parámetros para los materiales.....	51
Tabla 21. Espesores de losa, para las diferentes variables por el método Racional.....	51
Tabla 22. Parámetros para las modulaciones por TCP System.	52
Tabla 23. Espesores de losa, para las diferentes variables por el método TCP System.....	53
Tabla 24. Espesores de losa por los tres métodos para la categoría de tránsito NT3.....	54
Tabla 25. Espesores de losa por los tres métodos para la categoría de tránsito NT2.....	56
Tabla 26. Espesores de losa por los tres métodos para la categoría de tránsito NT1.....	59
Tabla 27. Diferencias de espesor metodologías PCA-84 y TCP System.....	65

Listado de Figuras

Figura 1. Pavimento de Concreto simple con dovelas.....	18
Figura 2. Pavimento de Concreto reforzado.	19
Figura 3. Pavimento de Concreto refuerzo continuo.	19
Figura 4. Posición de carga crítica fatiga.....	20
Figura 5. Posición de carga crítica erosión.	21
Figura 6. Software de diseño BS- PCA.	23
Figura 7. Software de multicapa elástico.....	25
Figura 8. Diagrama de Flujo Método Racional	29

Figura 9. Diagrama de flujo software optipave	34
Figura 10. Software de diseño OptiPave 2.....	35
Figura 11. Valores representativos de CBR	41
Figura 12. Estaciones de Conteo al norte de la isla	42
Figura 13. Estaciones de Conteo parte central de la isla.....	43
Figura 14. Estaciones de Conteo sur de la isla.....	43
Figura 15. Comparación resultados NT3, BG, SD	54
Figura 16. Comparación resultados NT3, BG, D.....	55
Figura 17. Comparación resultados NT3, BTC, SD	55
Figura 18. Comparación resultados NT3, BTC, D	56
Figura 19. Comparación resultados NT2, BG, SD	57
Figura 20. Comparación resultados NT2, BG, D.....	57
Figura 21. Comparación resultados NT2, BTC, SD	58
Figura 22. Comparación resultados NT2, BTC, D	58
Figura 23. Comparación resultados NT1, BG, SD	59
Figura 24. Comparación resultados NT1, BG, D.....	59
Figura 25. Comparación resultados NT1, BTC, SD	60
Figura 26. Comparación resultados NT1, BTC, D	60
Figura 27. Comparación espesores BTC -BG.....	61
Figura 28. Comparación espesores SD-D para bases tratadas con cemento.....	62
Figura 29. Comparación espesores SD-D para NT1.....	63
Figura 30. Precios TCP System (TCPavements, 2017)	64

INTRODUCCIÓN

Con el presente trabajo se busca optimizar los materiales de construcción utilizados en la elaboración de estructuras de pavimentos, mediante la escogencia del método de diseño que técnicamente, proporcione los menores espesores de pavimento para el periodo de servicio, teniendo en cuenta las condiciones particulares de clima, subrasante y tránsito de la Isla de San Andrés, Colombia, lo que generaría de manera positiva impactos ecológicos y económicos para la región en desarrollo de infraestructura vial.

A su vez sería un trabajo académico importante ya que se comparan los espesores de losas de estas tres metodologías 1. Diseño de losas cortas desarrollada en Chile, con participación de Estados Unidos, 2. Diseño racional de pavimentos desarrollada en Colombia por el IDU y la Universidad de los Andes, y 3. Diseño de pavimentos rígidos PCA-84, desarrollada por los Estados Unidos y la más utilizada por los profesionales en Colombia.

Se omite intencionalmente el método de diseño (AASHTO, 1993), debido a que existe suficiente documentación de investigación, donde se compara con la metodología PCA-84.

1 Descripción del problema

Por ser territorio insular, la isla de San Andrés posee características particulares y únicas para los diseños de pavimentos, que la diferencia de los demás departamentos del País. Estas características son; el tipo de materiales que se utilizan para la conformación de las capas granulares y en la elaboración del concreto hidráulico, el clima, el tránsito y la subrasante; de estas dos últimas no existe documentación de referencia para este departamento, por lo que se hace necesario un estudio, caracterización y clasificación de estas dos variables.

Para la caracterización de la variable tránsito, cuando no se tienen datos, se suele utilizar la cartilla de VOLÚMENES DE TRÁNSITO Y COSTOS DE OPERACIÓN 2010 - 2011 del INVIAS, pero esta cartilla solo es aplicable a 26 de los 32 departamentos que tiene Colombia y uno de esos no incluidos, es el Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina, lo cual fundamenta la necesidad de realizar una investigación para la caracterización de esta variable realizando conteos vehiculares en los puntos más estratégicos de la isla.

Los actuales métodos de diseño como son PCA-84 y Racional del IDU, utilizan las variables tránsito y subrasante, de tal forma que resulta en espesores de pavimentos robustos para los escasos materiales disponibles en la zona y su adquisición por importación desde Colombia, Panamá Estados Unidos, Nicaragua y Costa Rica, hace que se eleven considerablemente los precios de estas estructuras.

Actualmente los métodos de diseños de pavimentos rígidos más empleados en Colombia, son el Racional del IDU, utilizado en Bogotá y el PCA 84 en el resto del país. Es necesario que la comunidad académica y profesional del país conozca el método de diseño TCP System, el cual busca la reducción de los espesores de concreto hidráulico, mediante la correcta modulación de las dimensiones de sus losas.

2 Justificación

Debido a los altos costos de materiales para la construcción de pavimentos, por tener que ser importados, es importante que se implementen nuevas tecnologías de diseño que optimicen los recursos de inversión del departamento para lograr el cubrimiento de su malla vial, por esta razón como resultado de este trabajo se obtendrán beneficios de tipo económico y social para la región. Esta investigación es de gran aporte académico, debido a que existen escasas referencias de este tipo de estudios donde se comparan tecnologías modernas con tradicionales.

3 Objetivos

3.1 Objetivo General

Realizar la caracterización de las variables que se utilizan en el diseño de pavimentos rígidos con el fin de elaborar una comparación espesores de losa concreto por los métodos de diseño de pavimentos PCA, Racional y TCP System, para la isla de San Andrés.

3.2 Objetivos específicos

- Levantar datos de los diferentes tipos de subrasante, CBR o módulo de reacción que se presenten en la isla, con los cuales se pueda elaborar una clasificación.
- Ejecutar un estudio general del tránsito en las vías de San Andrés, de manera que permita categorizar el tránsito y ajustar las metodologías de proyecciones a un valor típico.
- Exponer mediante tablas comparativas y graficas con base en la sensibilización de las variables por las tres metodologías de diseño con el propósito de demostrar cual metodología de diseño proporciona los menores espesores de losa.

4 Marco Referencial

4.1 Marco Conceptual

En Colombia los métodos de diseños más utilizados para pavimentos rígidos son el PCA-84 y el Racional del IDU.

El método de la PCA-84, fue desarrollado por la Portland Cement Association de Estados Unidos en 1984, las variables que considera son la Subrasante, el tránsito, las propiedades mecánicas de la losa, el uso o no de pasadores y si la llanta del vehículo transitará por el borde de la losa o no. El método maneja un factor de seguridad tanto en la carga como en el tránsito. En el diseño se procura controlar que el consumo por fatiga y erosión no excedan el 100% mediante la utilización de ábacos. (PCA, 1984)

El método Racional utilizado en este trabajo, fue implementado por el Instituto de desarrollo Urbano (IDU) y la Universidad de los Andes en el año 2002. El método utiliza las variables subrasante, tránsito, propiedades mecánicas de los materiales, probabilidad de falla y asume las losas confinadas; en el diseño se controla que el esfuerzo en la fibra inferior de la losa, no supere al establecido por una ecuación de ley de fatiga. (Rondón & Reyes, 2015)

Como alternativa de diseño, este trabajo propone el método de diseño TCP System, el cual dimensiona las losas de forma que estas no sean cargadas por más de un set de ruedas, logrando disminuir considerablemente las tensiones en la losa, con el fin de reducir espesores de concreto. (Covarrubias, 2012)

La variable subrasante es común para los tres métodos de diseño arriba descritos, su capacidad de soporte se ha caracterizado de diferentes maneras de las cuales para el presente trabajo se utilizarán Módulo resiliente (M_r), Módulo de reacción (k) y California Bearing ratio (CBR), este último es el que se encuentra en la información disponible en la isla de San Andrés y mediante correlaciones se llevara a valores de los otros dos parámetros.

El ensayo de California Bearing Ratio (CBR) es una prueba de resistencia que compara la capacidad de un material con una piedra triturada bien clasificada (por lo tanto, un material de piedra triturada debería tener un CBR de 100%). Está principalmente destinado, pero no limitado, a la evaluación de la fuerza de la cohesión materiales que tienen tamaños de partícula máximos menores de 19 mm (3/4"). Fue desarrollado por la División de Autopistas de California alrededor de 1930 y fue adoptado posteriormente por numerosos Estados, Condados, Agencias Federales de los Estados Unidos e internacionalmente (WSDOT, 2006).

La variable tránsito, se obtiene mediante operativos de pesaje o con la información de estudios previos. Con el fin de determinar el tránsito probable durante el periodo de diseño del pavimento, el primer valor que se requiere es el tránsito promedio diario anual (TPDA) durante el primer año esperado de servicio del pavimento, discriminado en los tres grupos vehiculares (Autos, Buses y Camiones) y subdividiendo los camiones en las categorías acostumbradas (2P, 2G, C3-C4, 3S2, 3S3) en los conteos anuales que realiza el Instituto Nacional de Vías. (Sánchez & Campagnoli, 2016)

Los pasos a seguir para estimar el tránsito para el diseño de un pavimento se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Pasos para estimar el tránsito

I. Elegir el periodo de diseño
II. Estimar el tránsito promedio diario inicial por tipo de vehículo en el carril de diseño
III. Estimar tasa de crecimiento anual del tránsito
IV. Determinar el número acumulado de vehículos de cada tipo en el carril de diseño durante el periodo de diseño
V. Estimar el factor de deterioro para cada tipo de vehículo
VI. Determinar el número acumulado de ejes estándar en el carril de diseño durante el periodo de diseño

Fuente: (Sánchez & Campagnoli, 2016) Pág. 78.

4.2 Marco Legal.

En Colombia no existen leyes que obliguen a los diseñadores a seleccionar un método de diseño específico. Aunque en algunos procesos licitatorios de consultoría dentro de sus cláusulas especifican el método de diseño que se debe emplear. Lo más común es que sea el Ingeniero quien lo escoge con base en la experiencia, avance tecnológico, teorías científicas y confiabilidad.

Existe un manual de diseño realizado por el Instituto Nacional de Vías (INVIAS), cuyo objetivo, es el de establecer un catálogo de diseño de estructuras, basado en los métodos PCA -84 y AASHTO 1993 (INVIAS, Manual de diseño de pavimentos de Concreto para vías con bajos, medios y altos volúmenes de tránsito., 2005).

En cuanto a la proyección del crecimiento del tránsito en la isla es muy bajo, debido a la prohibición del ingreso de vehículos, el Decreto 0197 del 05 mayo de 2016, expedido por la Gobernación del Departamento Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina, dicta (...Suspensión de ingreso al parque automotor en Departamento. A partir de la publicación del presente decreto).

4.3 Marco teórico

4.3.1 Método de Portland Cement Association (PCA).

Este método fue desarrollado en Estados Unidos por la Portland Cement Association (PCA), su enfoque está basado en principios mecanicistas (DURAVÍA, 2017), su primera publicación fue en 1966, y reestructurada por el Ingeniero Robert G. Packard en 1984. (PCA, 1984).

La metodología del diseño se basa primero en las teorías de pavimentos de Westergaard, Picket and Ray y de elementos finitos, segundo en la experiencia en el comportamiento: Arlington Test y varios proyectos de la PCA, y tercero en resultados de investigaciones: Bates Test Road, Pittsburg Test Highway, Maryland Road Test, AASHO Road Test (ICPC, 2008). El método se aplica a los siguientes tipos de pavimentos:

- Pavimentos de concreto simple, que se construyen sin acero de refuerzo y sin dovelas de transferencias de carga, debido a que la transferencia de carga se logra a través del esfuerzo de corte proporcionado por los agregados situados en las cargas agrietadas que se forman por el

corte de la junta entre losas contiguas; para que ésta transferencia sea efectiva es necesario que la longitud de las losas sea corta (Coronado, 2002).

- Los pavimentos de concreto simple con dovelas, se construyen sin acero de refuerzo, pero en las juntas de contracción se colocan varillas lisas que tienen la función de transmitir cargas a las otras losas; para este caso, es necesario que las losas también sean cortas con el objeto de tener mejor control sobre los agrietamientos (Coronado, 2002), ver figura 1.

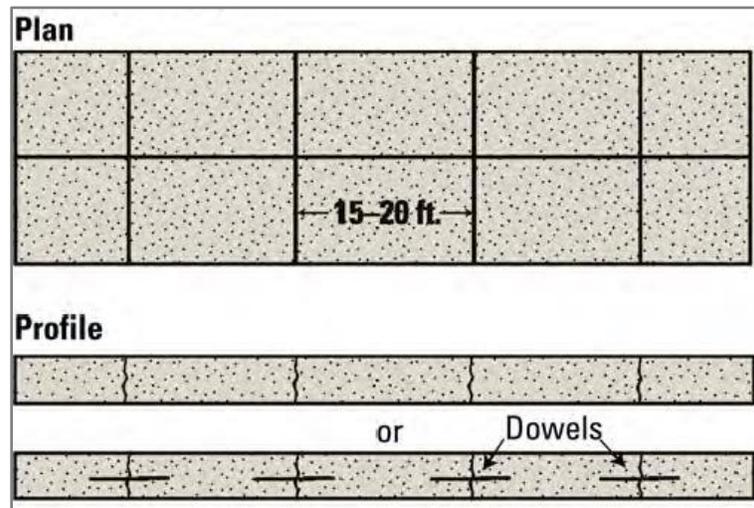


Figura 1. Pavimento de Concreto simple con dovelas
Fuente: (Taylor, Kosmatka, & Voigt, 2007)Pág. 9.

- Pavimentos de concreto reforzado, tienen acero dentro de la losa, así como dovelas en las juntas de contracción. Las separaciones en las juntas son mayores a las que se utilizan en pavimentos convencionales, por lo que es posible que se produzcan más fisuras transversales las cuales se mantienen prácticamente cerradas debido al refuerzo de acero lo que permite una mejor transferencia de cargas. (Coronado, 2002), ver figura 2.

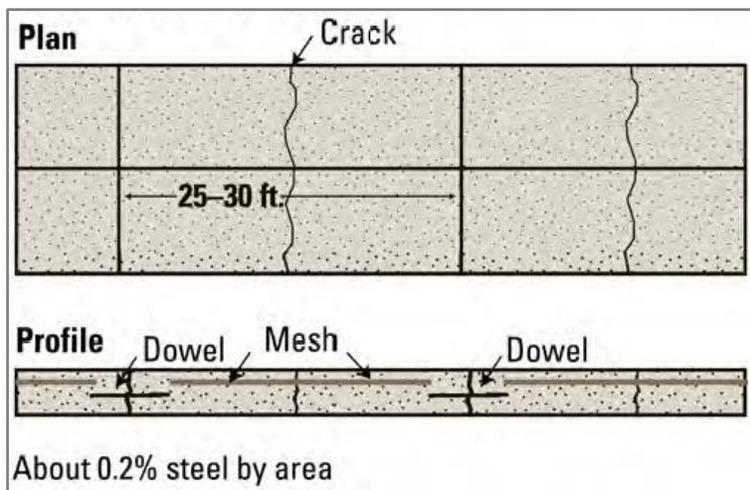


Figura 2. Pavimento de Concreto reforzado.

Fuente: (Taylor, Kosmatka, & Voigt, 2007)Pág. 9.

- Los pavimentos de refuerzo continuo, se construyen sin juntas de contracción; por tener una alta y continua cantidad de acero de refuerzo en dirección longitudinal, estos pavimentos desarrollan fisuras transversales en intervalos relativamente cortos, pero debido al acero de refuerzo producen un alto grado de transferencia de cargas en las caras de las fisuras. (Coronado, 2002), ver figura 3.

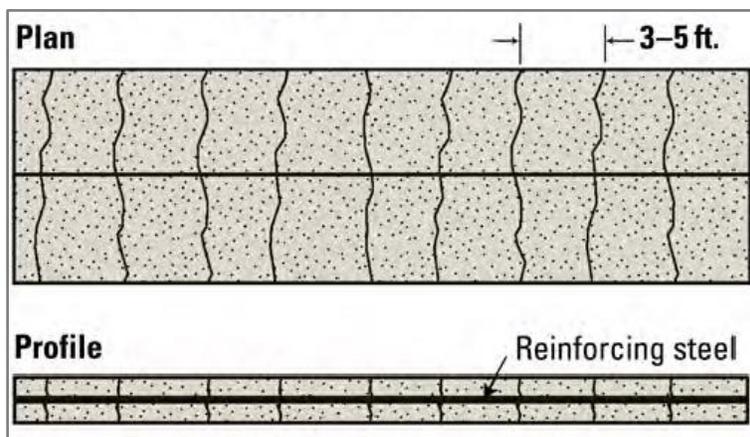


Figura 3. Pavimento de Concreto refuerzo continuo.

Fuente: (Taylor, Kosmatka, & Voigt, 2007)Pág. 9.

4.3.1.1 Condiciones del método.

El procedimiento desarrollado por la PCA, tiene las siguientes consideraciones:

- Grado de transferencia de carga en las juntas para los diferentes tipos de pavimentos (DURAVÍA, 2017).
- El efecto de confinamiento lateral proporcionado por las bermas/hombros, en la reducción de los esfuerzos de flexión y deflexiones causadas por las cargas de los vehículos en los bordes de las losas (Coronado, 2002).
- Uso de bases estabilizadas para proporcionar soportes de mejor calidad reduciendo los esfuerzos de flexión y deflexiones, además aporta mayor resistencia a la erodabilidad debido a la repetición de las deflexiones previniendo el fenómeno de bombeo (DURAVÍA, 2017).

4.3.1.2 Criterios de diseño.

- Análisis de Fatiga: Para mantener los esfuerzos sobre el pavimento debido a la repetición de las cargas de tránsito dentro de un límite de seguridad que prevenga el agrietamiento por fatiga. Este análisis está basado para la condición más crítica que es en la mitad de la losa y al borde de ésta (Yang, 2004), ver figura 4.

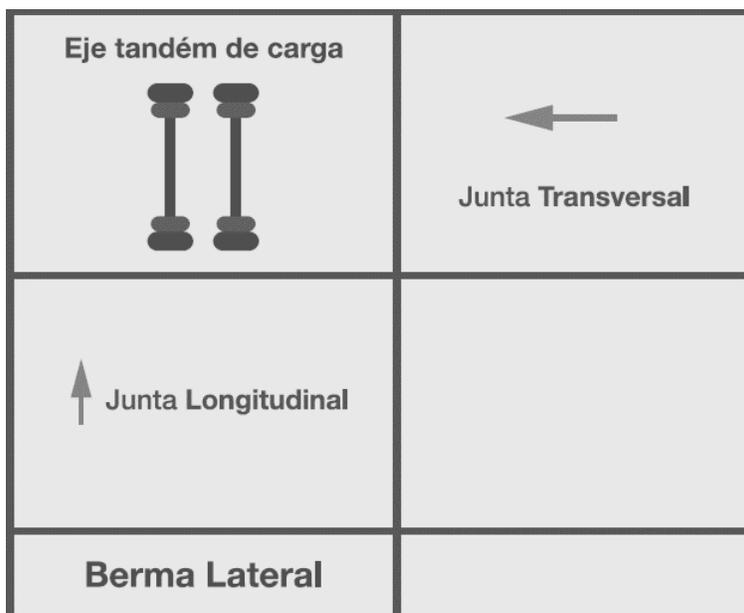


Figura 4. Posición de carga crítica fatiga.

Fuente: (DURAVÍA, 2017) Pág. 12.

- Análisis de Erosión: Limitar el poder que una cierta carga tiene de producir deformaciones verticales en los bordes losa, juntas y esquinas (ICPC, 2008), ver figura 5.

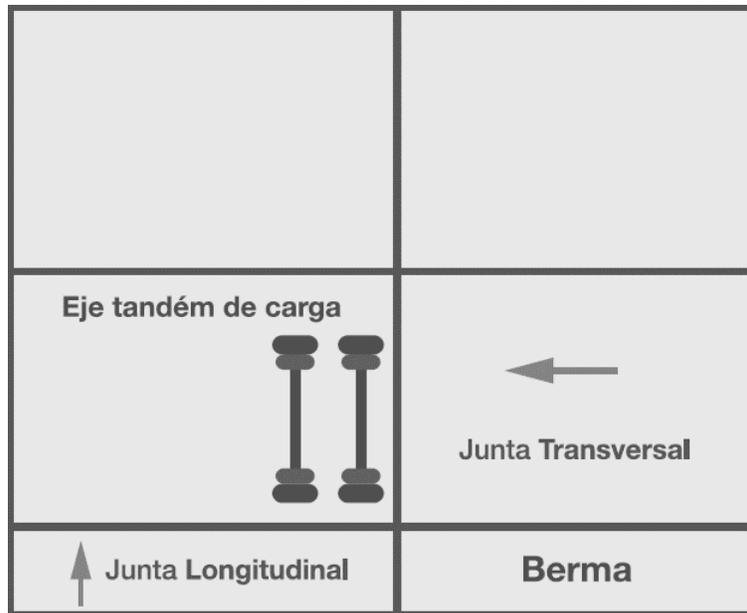


Figura 5. Posición de carga crítica erosión.

Fuente: (DURAVÍA, 2017) Pág. 12.

4.3.1.3 Factores de diseño.

- Resistencia a la Flexión del Concreto
- Soporte del conjunto Suelo – Subbase
- Período de Diseño
- Transferencia de Cargas
- Soporte Lateral
- Factor de Seguridad de Cargas
- Tránsito de Diseño

4.3.1.4 Pasos que intervienen en el diseño.

En la tabla 2 se muestra el procedimiento de diseño PCA-84.

Tabla 2. Procedimiento de diseño PCA.

Análisis del Tráfico
- Repeticiones Esperadas
Definición de Parámetros
- Transferencia de Carga
- Módulo de Reacción K
- Módulo de Ruptura MR
- Factor de Seguridad de Cargas
- Suponer un espesor (tanteos)
Análisis de Fatiga
- Cálculo de Esfuerzos Equivalentes
- Determinar la Relación de Esfuerzos
- Calcular Repeticiones Permisibles
- Determinar % Fatiga y Sumar
Análisis de Erosión
- Cálculo de Factores de Erosión
- Calcular Repeticiones Permisibles
- Determinar % de Daño y Sumar
Interpretación de Resultados
- Valores menores al 100%

Fuente: (ICPC, 2008)

4.3.1.5 Procedimiento de diseño.

El procedimiento se puede realizar de dos maneras:

- Utilizar cualquiera de los softwares disponibles en el mercado como son el BS-PCA desarrollado por la universidad del Cauca (Ver figura 6), o STREETPAVE 12 desarrollado por la ACPA (American Concrete Pave Association).

Figura 6. Software de diseño BS- PCA.

Fuente: www.topo3.com

- De forma manual, utilizando un formato recomendado, que se llena con datos obtenidos de tablas y ábacos suministradas por el mismo manual (PCA, 1984), sin embargo, su empleo se ha dejado de lado debido a softwares especializados.

4.3.2 Método racional para pavimento rígido.

Este método fue implementado en Colombia en el año 2002 por el Instituto de Desarrollo Urbano (IDU) y la Universidad de los andes, para la ciudad de Bogotá. Las variables que emplea el método son las siguientes:

4.3.2.1 Subrasante.

Se caracteriza a través del módulo resiliente, se suele utilizar la siguiente ecuación que correlaciona el CBR con el Módulo de resiliencia $M_r = 5\text{CBR}$ en MPa. (Rondón & Reyes, 2015).

4.3.2.2 Tránsito.

Se caracteriza a través del número de ejes equivalentes de 13 toneladas, el eje de referencias es un eje simple de rueda doble que distribuye la carga en sus cuatro llantas. La distancia entre ejes de llantas se supone igual a 37.5 cm. Cada llanta transmite al pavimento 3.25 toneladas, las cuales a su vez las distribuyen sobre la capa de rodadura suponiendo un área de contacto circular de 25 cm de diámetro, generando una presión de contacto aproximada de 662 kPa, ver tabla No.3 (Rondón & Reyes, 2015)

Tabla 3. Clasificación Tránsito

Tipo de tránsito	Número de vehículos pesados en el carril y período de diseño, NVP	Número de vehículos pesados por día, VP/d
T1	$NVP \leq 5X10^5$	$VP/d \leq 50$
T2	$5X10^5 < NVP \leq 1.5X10^6$	$50 < VP/d \leq 150$
T3	$1.5X10^6 < NVP \leq 4X10^6$	$150 < VP/d \leq 300$
T4	$4X10^6 < NVP \leq 1X10^7$	$300 < VP/d \leq 750$
T5	$1X10^7 < NVP \leq 2X10^7$	$750 < VP/d \leq 2000$

Fuente: (Rondón & Reyes, 2015) Pág.553.

Con la ecuación 1 (Rondón & Reyes, 2015) se halla el número de vehículos pesados en el periodo de diseño.

$$NVP = TPD \times \frac{k_1}{100} \times \frac{k_2}{100} \times 365 \times \frac{(1+r)^n - 1}{\ln(1+r)} \quad (1)$$

NVP: Número de vehículos pesados que circulan en el carril y periodo de diseño.

TPD: Tránsito promedio diario.

k_1 : Porcentaje de vehículos pesados.

k_2 : Factor Carril.

r: Tasa de crecimiento anual del tránsito.

4.3.2.3 Propiedades mecánicas de los materiales.

En este apartado el diseñador escoge una estructura y utiliza un programa analítico que calcula los esfuerzos y deformaciones en el rango elástico lineal del comportamiento de los

materiales, los parámetros mecánicos con los cuales se caracterizan los materiales son el módulo resiliente en MPa y la relación de Poisson (ν). (Rondón & Reyes, 2015).

Para el presente trabajo se utilizará el software de multicapa elástico Weslea, desarrollado por la Universidad de Auburn, ver figura 7.



Figura 7. Software de multicapa elástico.

Fuente: Auburn University.

4.3.2.4 Probabilidad de falla.

Tiene en cuenta el grado de incertidumbre que se presenta durante la estimación de las variables de diseño anteriormente mencionadas. Introduce para tal fin un factor de seguridad al diseño, para el diseño y dimensionamiento del espesor de las capas del pavimento, p_f es traducido a valores del fractil de la ley normal centrada u , ver tablas 4 y 5. (IDU & Universidad de los Andes, 2002).

Tabla 4. Fractil u .

p_f [%]	50	30	25	20	15	10	7	5	2	1
u	0	-0.52	-0.674	-0.841	-1.037	-1.282	-1.476	-1.645	-2.054	-2.327

Fuente: (Rondón & Reyes, 2015) Pág. 557

Tabla 5. Niveles de P_f recomendados.

Tránsito	Probabilidad de falla para rígido, p_f [%]
T1	50
T2	25
T3	15
T4	10
T5	2

Fuente: (Rondón & Reyes, 2015) Pág. 557

4.3.2.5 Valores de deformaciones admisibles.

Una vez calculados los esfuerzos y deformaciones con el software, estos se comparan con aquellos que admite el pavimento para la vida útil proyectada y, en un procedimiento de aproximaciones sucesivas, aumentando o disminuyendo por lo general los espesores de las capas que conforman la estructura del pavimento.

Para el caso de pavimentos rígidos, el mecanismo de daño que se controla es la fatiga en la fibra inferior de losa de concreto a través del esfuerzo a tracción σ_t en MPa, ver ecuación 2. (Rondón & Reyes, 2015).

$$\sigma_t = \sigma_6 \left(\frac{NE}{10^6} \right)^b k_c \times k_d \times k_r \times k_s \quad (2)$$

- σ_6 es el esfuerzo necesario para el material falle a 10^6 ciclos de carga respectivamente, y b es la pendiente de la ley de fatiga.

- k_c es un parámetro que tiene en cuenta que el comportamiento que experimenta el material en el laboratorio es diferente al de *in situ*. Para materiales estabilizados o ligados con cementantes hidráulicos k_c oscila entre 1.4 y 1.5.
- k_s tiene en cuenta la resistencia a fatiga de la capa ligada depende de la rigidez de la capa soporte (plataforma). Entre menos rígida sea la capa que soporte la capa ligada, esta última experimentará mayor deformación a tracción en la fibra inferior y lo cual tenderá a grietarse más fácilmente por fatiga debido a la carga, ver tabla 6.

Tabla 6. Valores de k_s .

Ks	Rigidez de la Plataforma (MPa)
1.0	> 120
1/1.1	50 - 120
1/1.2	<50

Fuente: (Rondón & Reyes, 2015) Pág. 558

- k_r introduce el factor de seguridad al diseño a través de las ecuaciones 3 y 4:

$$k_r = 10^{-ub\delta} \quad (3)$$

$$\delta = \sqrt{S_N^2 + S_H^2 \left(\frac{0.02}{b}\right)^2} \quad (4)$$

u , es el fractil que se encuentra en la figura 11, d , es la desviación estándar. S_N es la desviación estándar de la ley de fatiga del material, expresada en logaritmo decimal del número de ciclos, y S_H es la desviación estándar de los espesores colocados *in situ*. k_r

siempre se encontrará entre $0 < k_r < 1.$, los valores típicos para losas de concreto se observan en la tabla 7.

Tabla 7. Valores recomendados.

Parámetro	Valor recomendado para concreto E= 35.000 MPa
s₆	2.15
b	-1/16
S_N	1.0
S_H	1.0

Fuente: (Rondón & Reyes, 2015) Pág. 558

- k_d es un parámetro que tiene en cuenta que en materiales estabilizados o ligados con cementantes hidráulicos la concentración de esfuerzos se desarrolla en las micro fisuras, afectando la resistencia a la fatiga del material, ver tabla 8. (Rondón & Reyes, 2015).

Tabla 8. Valores para k_d .

Kd	Tipo
1/1.47	Losas con Pasadores
1/1.70	Losas Sin Pasadores

Fuente: (Rondón & Reyes, 2015) Pág. 559

4.3.2.6 Procedimiento de diseño

Mediante un proceso iterativo en el cual se compara los valores de las deformaciones admisibles con los resultados del análisis del software de multicapa. Se empieza escogiendo los espesores de las capas del pavimento y se modelan, los resultados del software deben ser menores a los admisibles, en caso contrario aumentar o disminuir los espesores y volver a correr el modelo y así sucesivamente hasta encontrar una solución racional muy cerca pero debajo del valor admisible. En la figura 8 se puede observar el algoritmo de diseño del método racional.

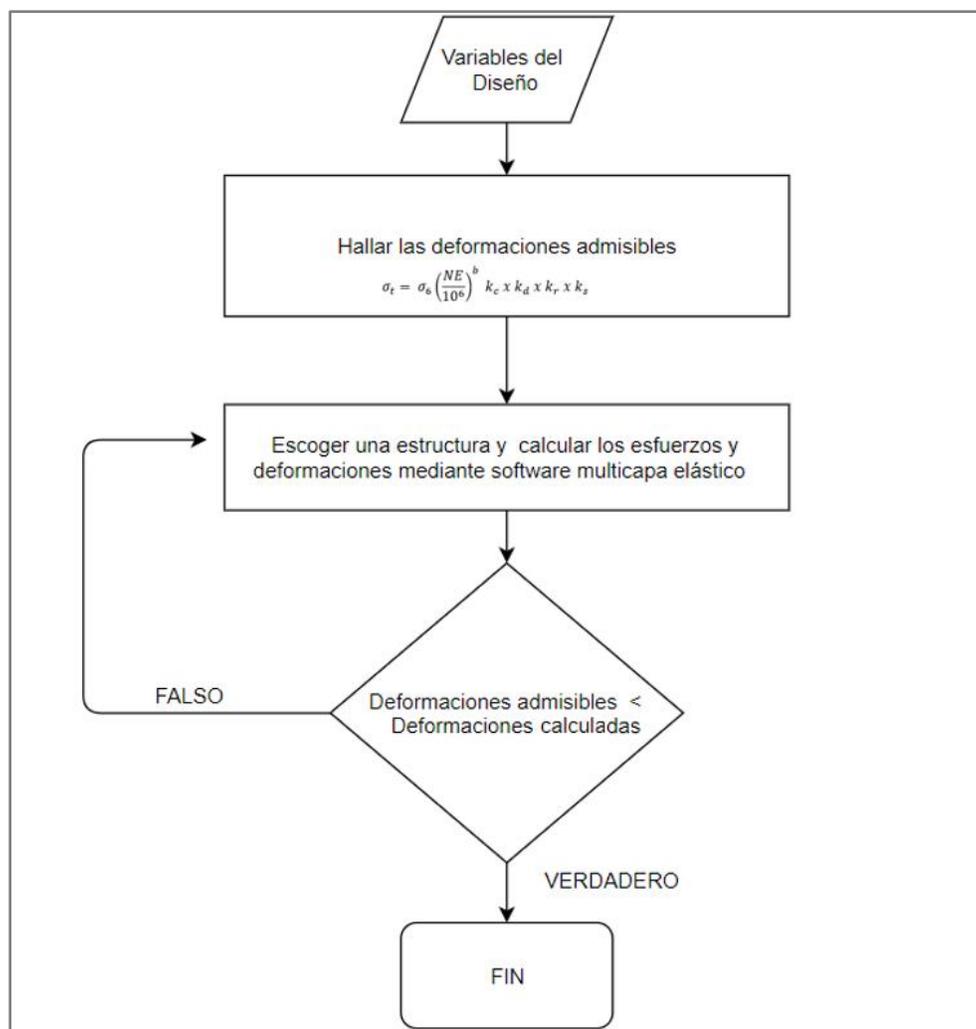


Figura 8. Diagrama de Flujo Método Racional

Fuente: Elaboración propia

4.3.3 Diseño de losas de concreto con geometría optimizada.

Durante la década pasada en Latinoamérica se comenzó a desarrollar una nueva metodología de diseño de pavimentos, la cual se basa en la disminución de los espesores de losa mediante la reducción de sus dimensiones en planta, con esto se busca que solo esté un set de ruedas apoyado sobre la losa.

El diseño plantea el apoyo sobre una base granular, tratada con cemento o asfáltica. Considera que no existe adherencia entre la base, o pavimento antiguo y la losa de hormigón. El principio fundamental del método de diseño consiste en diseñar el tamaño de la losa para que no más de un set de ruedas se encuentre en una determinada losa, minimizando así la tensión de tracción crítica en la superficie. (Covarrubias, 2012)

Se han realizado investigaciones de campo que demuestran la eficiencia de esta metodología obteniendo que para losas con espesores de 8 a 10 cm puedan soportar 50.000 ejes equivalentes (Chile, 2007)

El agrietamiento de las losas se calcula mediante los modelos de fatiga utilizados por la guía de diseño AASHTO 2007, probados en secciones en la universidad de Illinois (Cervantes & Roester, 2009), los resultados han arrojado una reducción en promedio de 7 cm en comparación con el diseño de pavimentos rígidos por la metodología AASHTO 1993.

4.3.3.1 Parámetros de la losa de concreto

- Vida de diseño
- Largo de losa
- Espesor de la losa de hormigón
- Tipo de Borde
- Sobre ancho de las losas
- Barras de Transferencia de Carga
- Interfaz Pavimento – Material de base

- IRI Inicial
- Porcentaje de losas Agrietados
- IRI final del diseño
- Escalonamiento Promedio Final de diseño
- Confiabilidad

4.3.3.2 *Tránsito*

- Tráfico por Ejes Equivalentes
- Espectro de Carga
- Tasa de Crecimiento
- Tipo de Tráfico
- Distribución lateral del Tráfico
- Efectos de soleras y sobrancho en la distribución lateral del tráfico.

4.3.3.3 *Propiedades del Hormigón.*

- Resistencia del Hormigón
- Desviación estándar de Diseño del Hormigón.
- Confiabilidad de la mezcla de Hormigón.
- Aumento de resistencia 28 – 90 días
- Módulo de elasticidad del hormigón
- Resistencia residual del hormigón con fibra
- Peso específico del hormigón
- Módulo de Poisson

- Coeficiente de expansión térmico
- Retracción del Hormigón a 365 días
- Contenido de aire
- Relación/agua cemento

4.3.3.4 Propiedades del Suelo.

- Número de Capas
- Método de ensayo de suelos
- Módulo resiliente de la capa
- Módulo de Poisson
- Espesor de la Capa
- Resistencia a la erosión
- Coeficiente de fricción Pavimento – Base
- Porcentaje de Material fino en la subrasante
- Procesamiento de los parámetros de soporte del suelo
- Método k-sem

4.3.3.5 Clima

- Gradiente de construcción
- Temperatura media de invierno
- Temperatura media de verano
- Temperatura de fraguado del hormigón
- Número de días al año con precipitaciones

- Índice de congelamiento de la base

4.3.3.6 Metodología.

El método creado por la empresa TCPavements es el resultado de años de estudios y pruebas, basado en las ecuaciones de daño por fatiga del proyecto NCHRP 1-37^a (ME-PDG, AASHTO, EEUU) y con simulaciones de tensiones realizadas en ISLAB2000 (programa de elementos finitos). Este método logra diseñar pavimentos de losas optimizadas, obteniendo resultados óptimos, para esta nueva condición geométrica. (TCPavements, 2015)

El procedimiento es un método mecanicista - empírico, ya que ha sido calibrado con tramos de pruebas instrumentados, determinando las constantes de calibración. El concepto básico del diseño es dimensionar las losas de tal manera que solo una rueda o set de ruedas se apoyen en una losa, a la vez, calcular el daño por fatiga producido en los puntos críticos de la losa, dado esto, determinar el espesor correspondiente considerando las condiciones de suelo, alabeo, tráfico, y otras condiciones relevantes (TCPavements, 2015)

El modelo calcula las tensiones críticas que se producen en las losas del pavimento producto de la combinación de las cargas, efectos de temperatura y distintas condiciones de borde. Además, el método incluye verificación para las condiciones del escalonamiento de las juntas transversales sin barras de traspaso de cargas y del agrietamiento de esquina. (TCPavements, 2015)

4.3.3.7 Mecanismos de Falla

- Agrietamiento transversal en el tercio central de la losa
- Agrietamiento Longitudinal
- Agrietamiento en la Esquina
- Escalonamiento
- Rugosidad (IRI)

4.3.3.8 Software de diseño

El software de diseño OptiPave desarrollado por TCP Pavements, es de tipo mecanicista - empírico, el cual considera el tamaño de las losas, el alabeo de construcción, la calidad de la superficie de rodado, el escalonamiento y el agrietamiento de las losas desde arriba y abajo, ver figuras 9 y 10.

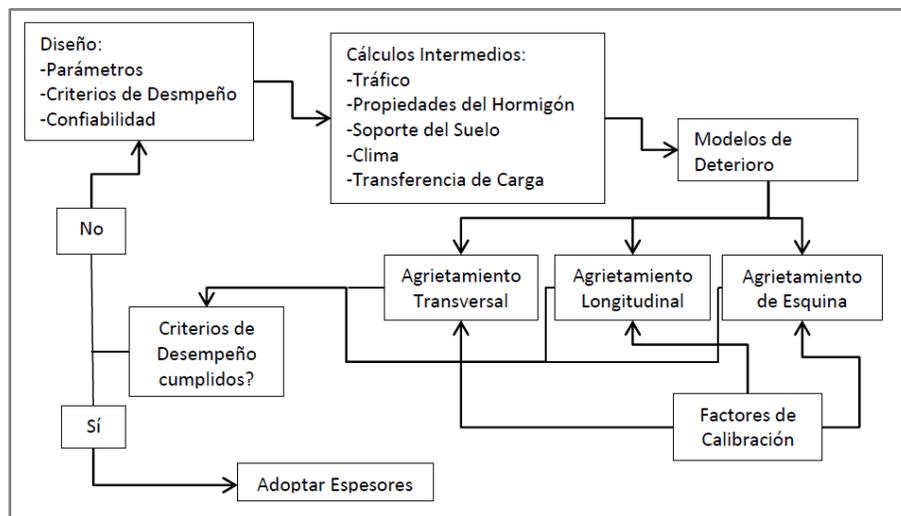


Figura 9. Diagrama de flujo software optipave

Fuente: (TCPavements, 2015)Pág. 21

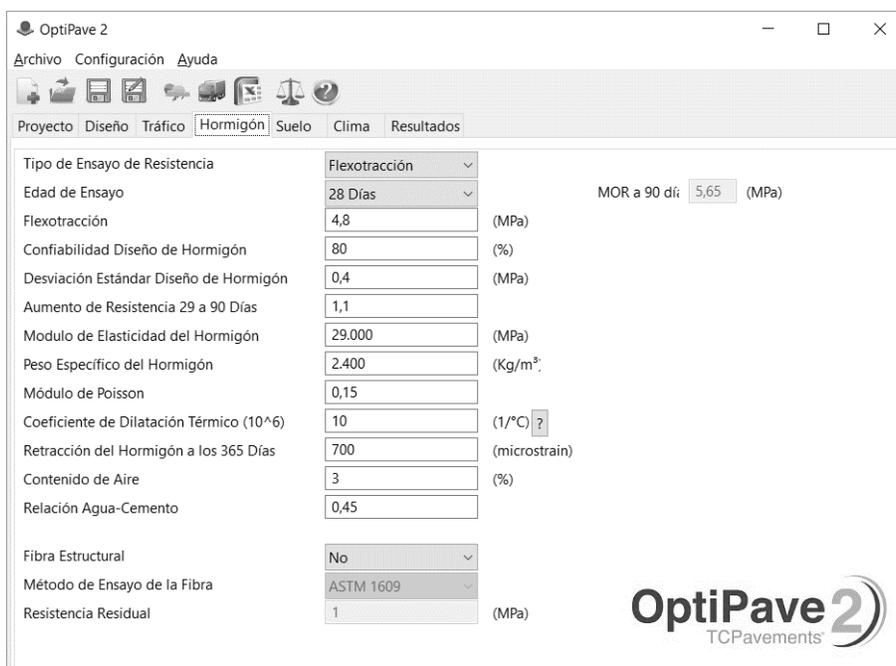


Figura 10. Software de diseño OptiPave 2

Fuente: Elaboración de diseño

4.3.3.9 Particularidades

A diferencia de los métodos de PCA-84 y racional del IDU & Universidad de los Andes, en este método se recomienda el uso del software, debido a que utiliza redes neuronales en el cálculo de las tensiones. Algunas particularidades de la metodología de TCP System son:

- El método de diseño de losas con geometría optimizada, se encuentra patentado y por lo tanto su uso se encuentra sujeto al pago de un royalty a la empresa TCP Pavements. Este royalty se calcula en función de los metros cuadrados construidos y la tarifa es dependiente del espesor del pavimento y si incluye fibra estructural o no.
- En caso de que exista construido un pavimento de hormigón con diseño tradicional y se quiera cortar las losas en paños TCP, igualmente deberá cancelar una tarifa. (TCPavements, 2017)

5 Categorías de Subrasante

Se recopiló información de los estudios de geotecnia vial, realizados en la isla en los últimos 10 años, tomando como principal insumo el CBR de campo u obtenido por correlaciones o en su defecto la capacidad de reacción del suelo, posteriormente se presenta un análisis estadístico para la selección de las categorías de subrasante, insumo principal en la elaboración de los diseños de pavimento en concreto rígido.

De acuerdo con los resultados de la investigación de los suelos de la isla, se obtuvo la siguiente información.

5.1 Geología Regional.

En la isla de San Andrés afloran cinco unidades estratigráficas:

- Depósitos arcilla calcárea arenosa: en lugares pantanosos y cerca de las playas.
- Arenas calcáreas: a lo largo de algunas orillas de la playa, son ricas en restos de corales, foraminíferos, esponjas, y otros.
- Caliza coralígena: en la parte más baja de la isla a todo su alrededor, éstas se formaron por la acumulación de estructuras orgánicas de corales, son consolidadas, no están estratificadas, masivas y forman masas resistentes a las olas.
- Caliza blanca: se encuentra en la parte central de la isla, está compuesta de calcita con moluscos recristalizados, es masiva y de color blanco.

- Caliche: es producto de la fragmentación y meteorización superficial de la caliza blanca, se encuentra en ambas faldas de la caliza blanca masiva, son depósitos superficialmente de caliza polvorienta con abundante contenido de foraminíferos y moldes de moluscos,

5.2 Geología Local.

5.2.1 Sector Norte

En la parte Norte de la isla, en todos afloran calizas coralígenas; presentando una topografía plana.

5.2.2 Sector Central

En la parte Central de la isla, aflora caliza blanca, masiva y caliza coralígena en todo su trayecto, con una topografía plana y moderadamente quebrada.

5.2.3 Sector Sur

En la parte Sur de la isla, se tiene caliza coralígena en sus extremos y caliza blanca masiva en la parte central, presentando una topografía plana.

En las zonas donde aflora la caliza coralígena tienen una topografía plana y están por debajo de 5 metros sobre el nivel del mar, no se detectan zonas que estén afectadas por procesos de meteorización, esto se debe a la compactación y resistencia de las rocas que afloran, que impiden la infiltración de las aguas lluvias en su estructura.

5.3 Condiciones Climáticas.

5.3.1 Precipitación

Los factores que más intervienen para el régimen de lluvias en el área de proyecto son: su ubicación en el mar caribe, la altura de las nubes y su bajo relieve, en general hay dos periodos lluviosos, uno en los meses de abril, mayo y junio y el segundo en los meses de octubre, noviembre y diciembre. La precipitación promedio anual en la isla es de 1.500 mm.

5.3.2 Temperatura

La región donde se encuentra el proyecto está comprendida en el piso térmico cálido. Las temperaturas medias anuales son de 28.5 °C.

5.3.3 Humedad Relativa

Por estar comprendida en el piso térmico cálido, la humedad relativa de la zona del proyecto es del 30 %.

5.4 Datos Obtenidos

La tabla 9 muestra el resumen de la información geotécnica para estudios de vías realizados anteriormente.

Tabla 9. Geotecnia Vial

No	Sector	Localización	Profundidad (m)	Descripción Suelo	CBR
1	NORTE	Cra 1A (Por total Control)	0.10	Caliche	16.0
2	NORTE	Cra 1A (Por total Control)	0.45	Arena Blanca	4.1
3	NORTE	Calle 2. Cra 1C, La Barracuda	0.10	Arena Blanca	1.8
4	NORTE	Calle 2. Cra 1C, La Barracuda	0.18	Caliche	24.0
5	NORTE	Calle 2. Cra 1C, La Barracuda	0.28	Arena Blanca	15.6
6	NORTE	Alfonso Lopez	0.50	Arena Blanca	5.2
7	NORTE	Alfonso Lopez	0.40	Arena Blanca	4.9
8	NORTE	Avenida Providencia	0.25	Caliche	8.6
9	NORTE	Avenida Newball	0.80	Arena limosa	3.5
10	NORTE	Avenida Newball	0.60	Arena limosa	4.5
11	NORTE	Avenida Newball	0.50	Arena limosa	6.6
12	NORTE	Avenida Newball	0.80	Arena limosa	3.5
13	NORTE	Avenida Newball	0.60	Arena limosa	8.7
14	NORTE	Avenida Newball	0.20	Caliche	22.8
15	NORTE	Carrera 9	0.50	Limo arenoso	13.1
16	NORTE	Carrera 9	0.50	Limo arenoso	16.2
17	CENTRAL	Cove K0+470	0.45	Grava limosa	38.1
18	CENTRAL	Cove K0+690	0.35	Grava limosa	28.6
19	CENTRAL	Cove K0+900	0.35	Grava limosa	17.2
20	CENTRAL	Cove K1+100	0.5	Limo Alta plasticidad	3.3
21	CENTRAL	Cove K1+310	0.1	Grava limosa	37.1
22	CENTRAL	Cove K1+570	0.2	Grava limosa	34.0
23	CENTRAL	Cove K1+000	0.4	Limo Alta plasticidad	2.3
24	CENTRAL	Cove K4+750	0.5	Limo Alta plasticidad	2.6
25	CENTRAL	Cove K4+250	0.5	Limo Alta plasticidad	2.8
26	CENTRAL	Cove K5+250	0.5	Limo Alta plasticidad	3.0
27	CENTRAL	Serranilla INT 0 - K0+070	0.5	Arenas mal gradadas	3.4
28	CENTRAL	Serranilla INT 2 - K0+230	0.5	Arenas mal gradadas	32.9
29	CENTRAL	Serranilla INT 7 - K0+005	0.5	Grava limosa	80
30	CENTRAL	Serranilla INT 1 - K0+170	0.5	Grava limosa	54.1

Fuente: Elaboración propia

Tabla 9. (Continuación)

31	CENTRAL	Serranilla INT 2 - K0+070	0.5	Arenas mal gradadas	12.1
32	CENTRAL	Serranilla INT 10 - K0+050	0.5	Grava limosa	80
33	CENTRAL	Serranilla INT 10 - K0+035	0.5	Arenas bien gradadas	31.7
34	NORTE	Vía Perimetral el Clifff	0.5	Grava limosa	45.0
35	NORTE	Vía Perimetral el Clifff	0.5	Grava limosa	65.0
36	NORTE	Vía Perimetral el Clifff	0.5	Arenas bien gradadas	13.0
37	NORTE	Vía Perimetral el Clifff	0.5	Arenas bien gradadas	8.0
38	NORTE	Av. Prov Pompeyano	0.5	Arenas bien gradadas	14.4
39	NORTE	Av. Prov Pompeyano	0.5	Arenas bien gradadas	19.7

Fuente: Elaboración propia

5.4.1 Análisis estadístico

Para el análisis de los datos se tuvo en cuenta que, en geotecnia vial los suelos que presentan un valor inferior al 5%, se debe realizar un mejoramiento con sustitución de material o con geo sintéticos para hacer llevar el CBR a un 5% (Rondón & Reyes, 2015), como medida todos los datos que eran inferiores a un 5% fueron cambiados a este valor, los resultados se presentan en la tabla 10.

Tabla 10. Estadística Subrasante

Características	Valor CBR
MEDIA	20.7
MEDIANA	13.1
MIN	5.0
CUARTIL Q1	5.0
CUARTIL Q2 (MEDIANA)	13.1
CUARTIL Q3	30.2
MAX	80.0
DESVIACIÓN ESTÁNDAR	20.5
COEF. VARIACIÓN	99.0

Fuente: Autoría propia

5.5 Categorías seleccionadas

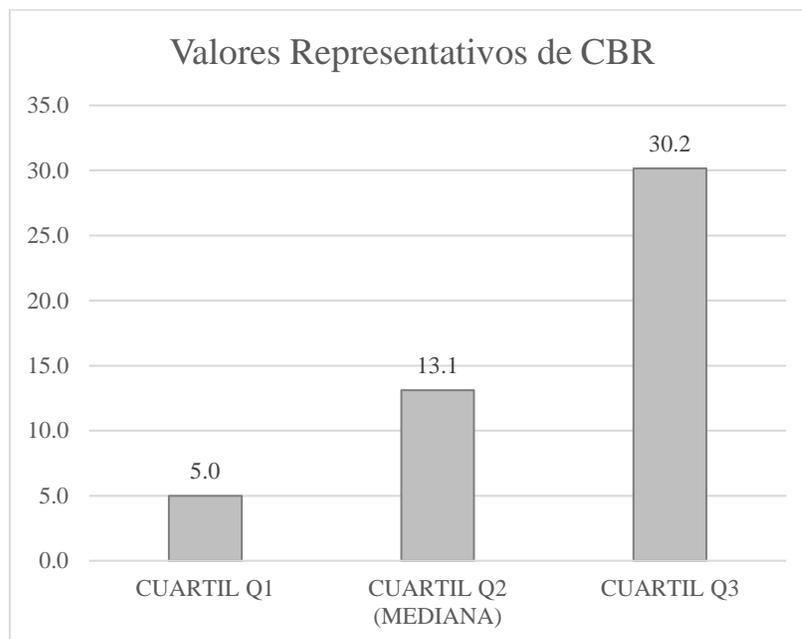


Figura 11. Valores representativos de CBR

Por lo tanto, los valores que se utilizarán en el diseño de pavimentos para la subrasante serán, CBR 5%, 13% y 30%, los cuales se encuentran acordes a la tabla 4.1 Principales suelos de Colombia del (INVIAS, Manual de Pavimentos asfálticos en vías con bajos volúmenes de tránsito, 2017), para el módulo resiliente se utilizan las fórmulas recomendadas en dicho manual así:

Tabla 11. Categorías Subrasante

CBR	Módulo Resiliente (MPa)
	$Mrsg = 17.6CBR^{0.64}$ (2-12%) $Mrsg = 22.1CBR^{0.55}$ (12-80%)
5	50
13	91
30	144

Fuente: Autoría propia

6 Tránsito

Se recopiló información de estaciones de aforo realizadas en toda la isla durante los años 2016 y 2017, en estos estudios se encuentra la información tomada de tres días de conteos vehiculares desde las 07:00 hasta 21:00 y en su composición vehicular, se destaca la casi ausencia de los vehículos categorías C4, C5 y >C5 los cuales tienen restricción de circulación en la isla, y están limitados al puerto y sectores cercanos.

De acuerdo con los resultados de la investigación de los estudios de tránsito, se obtuvo la siguiente información.

6.1 Ubicación de las estaciones de conteo.

En la siguiente imagen se relacionan los puntos en que se realizaron los aforos, los cuales abarcan representativamente incluyéndose el norte, el centro y el sur de la isla.



Figura 12. Estaciones de Conteo al norte de la isla

Fuente: Google Earth.

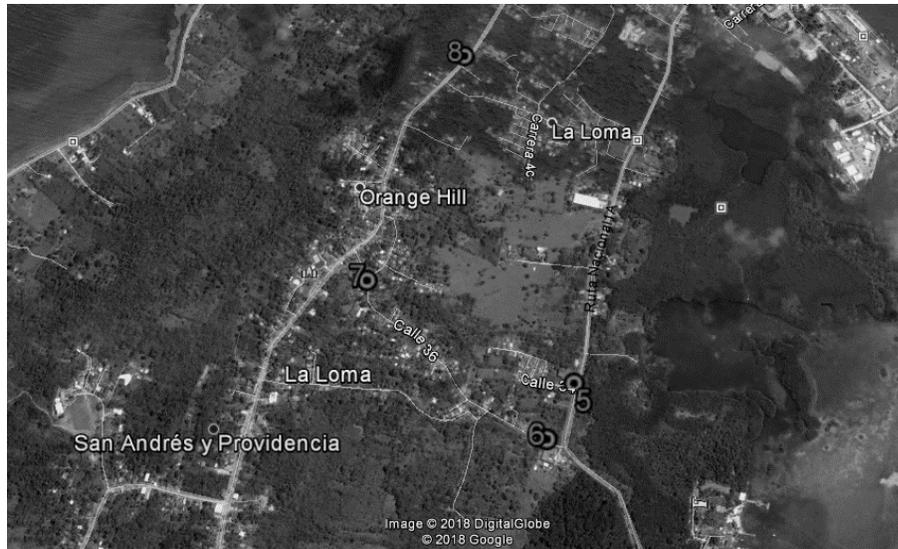


Figura 13. Estaciones de Conteo parte central de la isla

Fuente: Google Earth.



Figura 14. Estaciones de Conteo sur de la isla

Fuente: Google Earth.

6.2 Datos Obtenidos

La tabla 12 muestra el resumen de la información obtenida para estudios de vías realizados anteriormente.

Tabla 12. Tránsito de la Isla.

Estacion de conteo	Composición vehicular							TPD	Ubicación	Ejes Equivalentes	Categoria		
	Puntos	A	B	C2P	C2G	C3-C4	C5					>C5	Totales
P1	47.32%	-	36.33%	13.27%	1.74%	1.34%	-	-	746	393	PROVEEDORAS	6,310,000	NT3
P2	72.55%	9.65%	13.44%	3.90%	0.46%	-	-	-	1949	535	POLICIA	5,680,000	
P21	88.08%	6.60%	3.96%	0.71%	0.62%	0.02%	-	-	4346	518	CALLE 2	4,445,000	
P12	86.59%	5.71%	4.94%	2.28%	0.44%	0.04%	-	-	2715	364	PARQUE ECOLOGICO	4,050,000	NT2
P4	56.62%	6.53%	21.31%	14.40%	1.15%	-	-	-	521	226	AV. CUNDINAMARCA	3,571,000	
P22	75.47%	12.58%	4.73%	5.48%	1.74%	-	-	-	803	197	CIRCUVALAR	2,720,000	
P8 B	67.54%	14.53%	11.59%	6.34%	-	-	-	-	647	210	FLOWERS HILL 2	2,500,000	
P11	49.58%	5.04%	23.53%	19.33%	2.52%	-	-	-	119	60	CANTERAS 1	1,180,000	
P8 A	85.26%	6.93%	4.26%	3.37%	0.18%	-	-	-	563	83	FLOWERS HILL 1	1,060,000	
P6	81.39%	5.11%	4.74%	8.76%	-	-	-	-	274	51	CENTRO DE EVENTOS	970,000	
P10	61.11%	2.38%	21.43%	11.90%	2.38%	0.79%	-	-	126	49	CANTERAS 2	940,000	
P9	80.52%	7.27%	8.57%	3.64%	-	-	-	-	385	75	SCHOOL HOUSE	910,000	
P3	51.53%	15.34%	25.77%	6.75%	0.61%	-	-	-	163	79	WANGARO	850,000	
P5	55.24%	9.52%	21.90%	13.33%	-	-	-	-	105	47	LOS CORALES	741,000	
P20	89.56%	0.24%	8.25%	1.94%	-	-	-	-	412	43	SARIE BAY	630,000	
P15	83.54%	1.69%	13.56%	1.21%	-	-	-	-	413	68	NATANIA	590,000	
P7	84.10%	5.44%	5.44%	4.18%	0.42%	0.42%	-	-	239	38	CENTRO DE NIÑOS	590,000	
P18	76.79%	10.89%	6.02%	6.02%	0.29%	-	-	-	349	81	PEPPER HILL	540,000	
P17	78.26%	2.90%	11.59%	7.25%	-	-	-	-	69	15	ELSIE BAR	260,000	
P13	80.52%	3.90%	15.58%	-	-	-	-	-	77	15	VISTA HERMOSA 1	140,000	NT1
P19	83.87%	3.23%	-	12.90%	-	-	-	-	31	5	FOUR CURNER	134,000	
P16	57.14%	-	28.57%	14.29%	-	-	-	-	7	3	DUPPY GULLY	54,100	
P14	91.67%	-	8.33%	-	-	-	-	-	48	4	VISTA HERMOSA 2	40,000	

Fuente: Autoría propia

6.3 Selección del tránsito

En la selección del tránsito del presente estudio, se tuvo en cuenta las categorías estipuladas por el INVIAS para el diseño de pavimentos, encontrándose que en la isla predomina la categoría media NT2. Con el fin de no afectar los porcentajes de la composición vehicular con análisis estadísticos, se decidió escoger el TPD y su composición vehicular de un estudio de tránsito que represente a cada categoría estipulada por el INVIAS, esta decisión fue tomada debido a que cada método de diseño utiliza una variable de tránsito diferente, PCA 84 utiliza la cantidad y peso por tipo eje, TCP System numero de ejes equivalentes de 8.2 Ton y espectros de carga, y el Racional del IDU utiliza el número de ejes equivalentes de 13 Ton.

En la tabla 13 se puede observar el TPD, su composición vehicular y la categoría a que pertenece, los cuales fueron escogidos para realizar los diseños de pavimentos por los tres métodos.

6.4 Tránsito para los diseños

Tabla 13. Tránsito para los diseños

Categoría	Composición vehicular							TPD	Veh Pesados	Ubicación	Ejes Equivalentes
	INVIAS (2016)	A	B	C2P	C2G	C3-C4	C5				
NT3	47.32%	-	36.33%	13.27%	1.74%	1.34%	-	746	393	PROVEEDORAS	6,310,000
NT2	67.54%	14.53%	11.59%	6.34%	-	-	-	647	210	FLOWERS HILL 2	2,500,000
NT1	78.26%	2.90%	11.59%	7.25%	-	-	-	69	15	ELSIE BAR	260,000

El periodo de diseño es de 20 años, la tasa de crecimiento es de 2.5%. con lo cual obtenemos las siguientes tablas.

6.4.1 Tránsito Categoría NT3

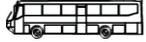
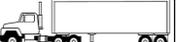
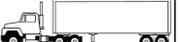
TIPO DE VEHICULO			%	FD	FD x %	TIPO DE VEHICULO			%	Coefficiente de Agresividad	CA x %		
Automoviles	A		47.32%	0	0.000	Automoviles	A		47.32%	0	0.000		
Bus/Buseta	B		-	0.40	0.000	Bus/Buseta	B		-	0.13	0.000		
Camión 2 ejes pequeños	C2-P		36.33%	1.14	0.414	Camión 2 ejes pequeños	C2-P		36.33%	0.13	0.047		
Camión 2 ejes grandes	C2-G		13.27%	3.44	0.457	Camión 2 ejes grandes	C2-G		13.27%	0.13	0.017		
Camión C3 -C4	C2-S2		1.74%	3.76	0.066	Camión C3 -C4	C2-S2		1.74%	3.36	0.059		
Camión C5	C3-S2		1.34%	4.40	0.059	Camión C5	C3-S2		1.34%	6.47	0.087		
Camión C6	C3-S3		-	5.31	0.000	Camión C6	C3-S3		-	4.23	0.000		
					TOTAL	0.995						TOTAL	0.210
					%(B+C)	52.68%						%(B+C)	52.68%
					Cálculo FC	1.89						Cálculo CAM	0.4

TPD	746
Factor Carril	90%
f=	2.5%
n=	20
N _{8.2 TON}	6,310,000

TPD	746
Factor Carril	90%
f=	2.5%
n=	20
N _{13.0 TON}	1,335,600

CARGA (T)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	CARGA (Kn)	F.S.C	CARGA (Kn) (Mayorada)	BUS	C2-P	C2-G	C3 - C4	C5	ΣEjes	N (Ejes)	N (Mayorada)
Eje Simple									(4)+(5)+(6)+(7)		
5.0	50.0	1.1	55.0	0	271	0	0	0	271	2,314,611	2,546,072
6.0	60.0	1.1	66.0	0	0	99	13	10	122	1,042,002	1,146,202
11.0	110.0	1.1	121.0	0	271	99	0	0	370	3,160,170	3,476,187
Eje Tandem											
22.0	220.0	1.1	242.0	0	0	0	13	20	33.0	281,853	310,038
Ejes Tridem											
24.0	240.0	1.1	264.0	0	0	0	0	0	0.0	0	0

6.4.2 Tránsito Categoría NT2

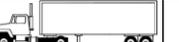
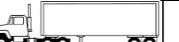
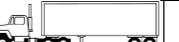
TIPO DE VEHICULO			%	FD	FD x %	TIPO DE VEHICULO			%	Coefficiente de Agresividad	CA x %		
Automoviles	A		67.54%	0	0.000	Automoviles	A		67.54%	0	0.000		
Bus/Buseta	B		14.53%	0.40	0.058	Bus/Buseta	B		14.53%	0.13	0.019		
Camión 2 ejes pequeños	C2-P		11.59%	1.14	0.132	Camión 2 ejes pequeños	C2-P		11.59%	0.13	0.015		
Camión 2 ejes grandes	C2-G		6.34%	3.44	0.218	Camión 2 ejes grandes	C2-G		6.34%	0.13	0.008		
Camión C3 - C4	C2-S2		-	3.76	0.000	Camión C3 - C4	C2-S2		-	3.36	0.000		
Camión C5	C3-S2		-	4.40	0.000	Camión C5	C3-S2		-	6.47	0.000		
Camión C6	C3-S3		-	5.31	0.000	Camión C6	C3-S3		-	4.23	0.000		
					TOTAL	0.408						TOTAL	0.042
					%(B+C)	32.46%						%(B+C)	32.46%
					Cálculo FC	1.26						Cálculo CAM	0.13

TPD	647
Factor Carril	100%
r=	2.5%
n=	20
N _{8.2 TON}	2,500,000

TPD	647
Factor Carril	100%
r=	2.5%
n=	20
N _{13.0 TON}	258,000

CARGA (T)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	CARGA (Kn)	F.S.C	CARGA (Kn) (Mayorada)	BUS	C2-P	C2-G	C3 - C4	C5	ΣEjes (4)+(5)+(6)+(7)	N (Ejes)	N (Mayorada)
Eje Simple											
5.0	50.0	1.1	55.0	0	75	0	0	0	75	711,750	782,925
6.0	60.0	1.1	66.0	94	0	41	0	0	135	1,281,150	1,409,265
11.0	110.0	1.1	121.0	94	75	41	0	0	210	1,992,900	2,192,190
Eje Tandem											
22.0	220.0	1.1	242.0	0	0	0	0	0	0.0	0	0
Ejes Tridem											
24.0	240.0	1.1	264.0	0	0	0	0	0	0.0	0	0

6.4.3 Tránsito Categoría NT1

TIPO DE VEHICULO			%	FD	FD x %	TIPO DE VEHICULO			%	Coefficiente de Agresividad	CA x %		
Automoviles	A		78.26%	0	0.000	Automoviles	A		78.26%	0	0.000		
Bus/Buseta	B		2.90%	0.40	0.012	Bus/Buseta	B		2.90%	0.13	0.004		
Camión 2 ejes pequeños	C2-P		11.59%	1.14	0.132	Camión 2 ejes pequeños	C2-P		11.59%	0.13	0.015		
Camión 2 ejes grandes	C2-G		7.25%	3.44	0.249	Camión 2 ejes grandes	C2-G		7.25%	0.13	0.009		
Camión C3 - C4	C2-S2		-	3.76	0.000	Camión C3 - C4	C2-S2		-	3.36	0.000		
Camión C5	C3-S2		-	4.40	0.000	Camión C5	C3-S2		-	6.47	0.000		
Camión C6	C3-S3		-	5.31	0.000	Camión C6	C3-S3		-	4.23	0.000		
					TOTAL	0.393						TOTAL	0.028
					%(B+C)	21.74%						%(B+C)	21.74%
					Cálculo FC	1.81						Cálculo CAM	0.13

TPD	69
Factor Carril	100%
r=	2.5%
n=	20
N _{8.2 TON}	260,000

TPD	69
Factor Carril	100%
r=	2.5%
n=	20
N _{13.0 TON}	18,000

CARGA (T)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	CARGA (Kn)	F.S.C	CARGA (Kn) (Mayorada)	BUS 	C2-P 	C2-G 	C3 - C4 	C5 	ΣEjes (4)+(5)+(6)+(7)	N (Ejes)	N (Mayorada)
Eje Simple											
5.0	50.0	1.1	55.0	0	8	0	0	0	8	75,920	83,512
6.0	60.0	1.1	66.0	2	0	5	0	0	7	66,430	73,073
11.0	110.0	1.1	121.0	2	8	5	0	0	15	142,350	156,585
Eje Tandem											
22.0	220.0	1.1	242.0	0	0	0	0	0	0.0	0	0
Ejes Tridem											
24.0	240.0	1.1	264.0	0	0	0	0	0	0.0	0	0

7 Diseños de Pavimento Rígido

Establecida previamente las 3 variables de subrasante (Capítulo 3) y las 3 variables de Tránsito (Capítulo 4) se estipulan 36 diseños por cada método, para un total de 108 modelaciones tal como se demuestra en la tabla 14.

Tabla 14. Modelaciones por método

NT3	5	D	BTC
			BG
		SD	BTC
			BG
	13	D	BTC
			BG
		SD	BTC
			BG
	30	D	BTC
			BG
		SD	BTC
			BG
NT2	5	D	BTC
			BG
		SD	BTC
			BG
	13	D	BTC
			BG
		SD	BTC
			BG
	30	D	BTC
			BG
		SD	BTC
			BG
NT1	5	D	BTC
			BG
		SD	BTC
			BG
	13	D	BTC
			BG
		SD	BTC
			BG
	30	D	BTC
			BG
		SD	BTC
			BG

Tipos de tránsito: NT3, NT2, NT1; Tipos de CBR: 5%, 13%, 30%; Transferencia de Carga: D=Dovelas, SD=Sin Dovelas; Tipo de base: BG=Base Granular, BTC=Base tratada con cemento.

Fuente: Autoría propia

En la primera columna se encuentra el tipo de tránsito, en la segunda el tipo de subrasante (CBR), en la tercera columna sí la transferencia de carga entre losas se hace con dovelas o sin ellas y, por último, el tipo de base que soportará la losa de concreto teniendo base granular y base estabilizada con cemento, con un espesor de 15 cm para ambos.

7.1 Modelación por BS-PCA

Las variables tránsito y subrasante fueron explicadas y seleccionadas en los capítulos 3 y 4 (ver resumen en tabla No. 14), se describen a continuación las demás variables utilizadas por este método de diseño y los resultados obtenidos.

7.1.1 Variables utilizadas BS-PCA

En la tabla 15 se describe todas las propiedades físicas del concreto, se escogió el valor del módulo de rotura (MR) de acuerdo a las recomendaciones del (INVIAS, Manual de diseño de pavimentos de Concreto para vías con bajos, medios y altos volúmenes de tránsito., 2005) y de la disponibilidad de elaboración en la isla de San Andrés.

Tabla 15. Variables utilizadas para el concreto (Hormigón)

Variables	Valor
E_{concreto}	28.000 MPa
ρ_{concreto}	2.4 Tn/m ³
μ_{concreto}	0.15
MR_{concreto}	4.2 MPa

Fuente: Autoría propia

En la tabla 16 se observa el valor del módulo de reacción (K) para la subrasante y la plataforma de soporte para los dos tipos: Base Granular y Base granular tratada con cemento, siendo K_{sg} (Valor de la subrasante), K_{mej} para la plataforma de soporte en MPa/m.

Tabla 16. Valores para la plataforma de soporte e=150 mm en MPa/m

CBR %	K_{sg}	K_{mej} (BG)	K_{mej} (BTC)
5	39	46	124
13	61	66	189
30	81/61	90	189

Fuente: Autoría propia

Para estos diseños no se tuvo en cuenta el confinamiento de las losas en los bordes.

7.1.2 Resultados de espesores BS-PCA

Para los diseños se utilizó el software de diseño BS-PCA desarrollado por los Ingenieros Efraín Solano y Carlos Benavides de la Universidad del Cauca (versión 2017), el procedimiento fue explicado en el capítulo marco teórico numeral 2.3.1, en la tabla 17 se muestran los espesores de la losa en concreto aproximada al centímetro.

Tabla 17. Espesores de losa (cm), para las diferentes variables PCA-84

CBR	NT3				NT2				NT1			
	BG		BTC		BG		BTC		BG		BTC	
	SD	D										
5	28	25	26	22	24	24	23	21	22	22	20	20
13	27	24	25	22	23	23	22	20	21	21	19	19
30	26	23	25	22	23	22	22	20	21	21	19	19

Fuente: Autoría propia

7.2 Modelación por el método Racional IDU – Universidad de los Andes

A parte de las variables tránsito y subrasante explicadas y seleccionadas en capítulos anteriores (ver resumen en tabla No. 14), se describen a continuación las demás variables utilizadas por este método de diseño y los resultados obtenidos.

7.2.1 Variables utilizadas Racional

En este método de diseño se utiliza como criterio de falla del concreto, la resistencia a la compresión diametral, para escoger este valor, que sea parecido al $MR=4.2$ MPa utilizado por el método de la PCA-84 y TCP System, se recurrió a la fórmula de correlación recomendada por el Ing. Gerardo Rivera en su libro Concreto Simple (Rivera, 2016) de la siguiente manera:

$$RT = \frac{MR-12.25}{1.03} \text{ (kg/cm}^2\text{)} \quad (5)$$

Por lo tanto, fue escogido un valor a la compresión diametral de 3.0 MPa, con este valor se escogió el valor de los esfuerzos admisibles al millón de repeticiones (σ_6) y la pendiente de la ley de fatiga (b), como se demuestra a continuación:

Tabla 18. Parámetros para hallar los esfuerzos y deformaciones admisibles

Variable	Valor	Descripción
σ_6	1.95	Para losas de concreto RT= 3.0 MPa
	0.75	Para bases tratadas
b	-1/15	Para losas de concreto RT= 3.0 MPa
	-1/15	Para bases tratadas
k_c	1.5	Para losas de concreto RT= 3.0 MPa
	1.4	Para bases tratadas
k_d	1/1.47	Pasadores (Dovelas)
	1/1.7	Sin pasadores (Dovelas)
	1	Base Tratada con Cemento
	1	> 120 MPa
k_s	1/1.1	120 Mpa > Eplat > 50 MPa
	1/1.2	Eplat < 50 MPa
	0.81	losas, T4 (NT3), $P_f=10\%$, SN=1, SH=1
k_r	0.85	losas, T3 (NT2), $P_f=15\%$, SN=1, SH=1
	0.90	losas, T1 (NT1), $P_f=25\%$, SN=1, SH=1
	1	BTC, $P_f=50\%$, SN=1, SH=3

Tabla 19. Datos de entrada para el eje de referencia de 130 KN

Distancia entre ejes de llantas (m)	Peso x llanta (Ton/KN)	Presión Contacto (kPa)	Radio de carga (m)
0.375	3.31/32.5	662	0.125

Para determinar las características de los materiales granulares no tratados se usó el criterio de establecer el módulo de una capa en función del módulo de la capa de soporte, utilizando la ecuación 6 propuesta por Dormon & Metcalf, adoptada por SHELL en su método de diseño (SHELL INTERNATIONAL PETROLEUM COMPANY LIMITED, 1985).

$$E_2 = 0.206 h_2^{0.45} E_1 \text{ (Kg/cm}^2\text{)} \quad (6)$$

Para los materiales tratados hidráulicamente se seleccionó los valores recomendados por el Ingeniero Fredy Reyes (Reyes, 2012), resumiéndolos en la tabla 20.

Tabla 20. Parámetros para los materiales

CBR (%)	Subrasante		Base Granular		Base Tratada con Cemento	
	Módulo (MPa)	μ	Módulo (MPa)	μ	Módulo (MPa)	μ
5	50	0.50	100	0.40	23000	0.25
13	90	0.40	180	0.40	23000	0.25
30	140	0.40	300	0.40	23000	0.25

Fuente: Autoría propia

7.2.2 Resultados de espesores Racional

Para el cálculo de los esfuerzos y deformaciones se utilizó principalmente el software CEDEM y en algunas ocasiones el WESLEA para comprobaciones. El criterio para la escogencia de los espesores consiste en que los esfuerzos σ_t en la capa inferior de la losa de concreto, en la capa inferior de la base tratada con cemento σ_t , y la deformación ε_z en la subrasante, se acerquen lo más posible a los admisibles. En la tabla 21 se muestran los espesores de la losa en concreto aproximada al centímetro.

Tabla 21. Espesores de losa, para las diferentes variables por el método Racional

CBR	TRÁNSITO 3				TRÁNSITO 2				TRÁNSITO 1			
	BG		BTC		BG		BTC		BG		BTC	
	SD	D	SD	D	SD	D	SD	D	SD	D	SD	D
5	26	23	22	22	23	21	21	21	20	18	18	18
13	22	20	19	19	20	18	18	18	17	15	16	16
30	21	19	17	17	18	17	16	16	15	14	13	13

Fuente: Autoría propia

7.3 Modelación por el método TCP System.

Para este método de diseño en el tránsito se utiliza ejes equivalentes y su distribución; para la subrasante se utiliza modulo resiliente; a continuación, se muestran las demás variables utilizadas por este método de diseño y los resultados obtenidos.

7.3.1 Variables utilizadas en TCP System

En este método de diseño es el que más entradas tiene, al estar basado en las últimas investigaciones de MEPDG, como se explicó en el marco teórico, en la tabla 22, se muestra las variables utilizadas.

Tabla 22. Parámetros para las modulaciones por TCP System.

Características Geométricas			
Variable	Valor	Unidad	
Largo de la losa	2.2	m	
IRI inicias	2	m/km	
Ancho de la losa	< 1.8	m	
Umbral Máximo de diseños			
Variable	Valor	Confiabilidad	
Porcentajes de losas agrietadas	30%	80%	
IRI	4 (m/km)	80%	
Escalonamiento Promedio	5 (mm)	80%	
Distribución lateral del tránsito			
Variable	Valor	Unidad	
Distancia de la huella a la línea de demarcación	450	mm	
Desv. Est. Distribución lateral del tránsito	250	mm	
Características del Concreto (Hormigón)			
Variable	Valor	Unidad	
Módulo de Rotura 28 días	4.2	MPa	
Confiabilidad del diseño del concreto	80	%	
Desv. Est. Diseño del concreto	0.4	MPa	
Aumento de resistencia de 29 a los 90 días	1.1		
Módulo de elasticidad	28	MPa	
Coefficiente de dilatación térmico 10 ⁶	10	1/°C	
Retracción del hormigón a los 365 días	700	microstrain	
Contenido de aire	3	%	
Relación agua cemento	0.45		

Tabla 22. (Continuación)

Datos climáticos		
Variable	Valor	Unidad
Gradiente equivalente de construcción	-20	°C
Temperatura media de invierno	24	°C
Temperatura media de verano	30	°C
Temperatura de fraguado del Hormigón	45	°C
Número de días al año con precipitación	180	
Índice de congelamiento de la base	0	%
Características para los materiales granulares		
Variable	Valor	Unidad
Módulo Base tratada con Cemento	5000	MPa
Coeficiente fricción Pavimento - Base	0.65	BG
	0.80	BTC
Resistencia a la erosión de la capa soporte	4	BG
	3	BTC
Material fino Malla No. 200 de la capa soporte	>8	%

Fuente: Autoría propia

Los módulos para la subrasante y capas granulares no tratadas se utilizaron los mismos que en el método racional, ver tabla 20.

7.3.2 Resultados de espesores TCP System

Para el cálculo de los espesores de losa se utilizó el software de diseño de TCP System, llamado Optipave 2.0, obteniendo los resultados mostrados en la tabla 23.

Tabla 23. Espesores de losa, para las diferentes variables por el método TCP System

CBR	TRÁNSITO 3				TRÁNSITO 2				TRÁNSITO 1			
	BG		BTC		BG		BTC		BG		BTC	
	SD	D	SD	D	SD	D	SD	D	SD	D	SD	D
5	18	17	16	15	17	15	15	13	14	12	13	12
13	16	15	17	16	15	13	15	13	13	12	13	12
30	16	15	17	16	14	13	15	14	13	12	13	12

Fuente: Autoría propia

8 Análisis de resultados

En este capítulo se reúnen los resultados de los espesores hallados por los tres métodos y se realizan análisis de estos.

8.1 Análisis de resultados para el tránsito categoría 3.

En la tabla 14 y en las figuras 15 -18, se muestra los espesores de losa encontrados por los tres métodos de diseño.

Tabla 24. Espesores de losa por los tres métodos para la categoría de tránsito NT3

TRÁNSITO 3												
Suelo	BASE GRANULAR						BASE ESTABILIZADA CON CEMENTO					
	SIN DOVELAS			CON DOVELAS			SIN DOVELAS			CON DOVELAS		
	PCA-84	Racional	TCP-System	PCA-84	Racional	TCP-System	PCA-84	Racional	TCP-System	PCA-84	Racional	TCP-System
CBR (5%)	28	26	18	25	23	17	26	22	16	22	22	15
CBR (13%)	27	22	16	24	20	15	25	19	17	22	19	16
CBR (30%)	26	21	16	23	19	15	25	17	17	22	17	16

Fuente: Autoría propia

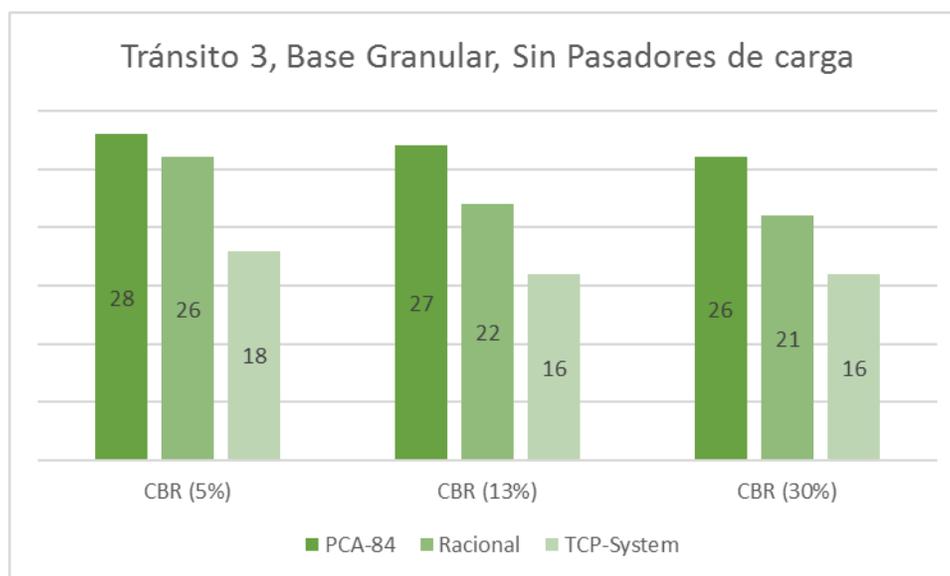


Figura 15. Comparación resultados NT3, BG, SD

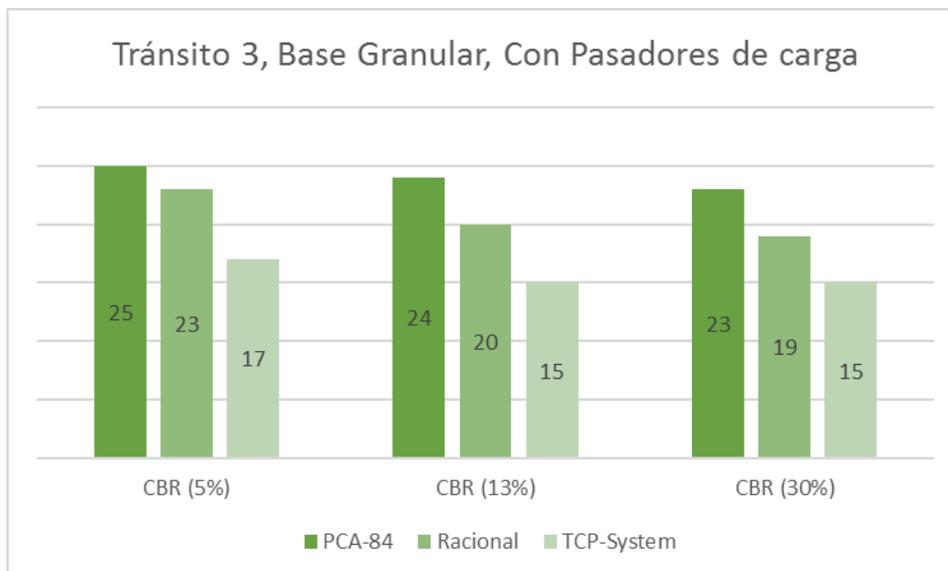


Figura 16. Comparación resultados NT3, BG, D

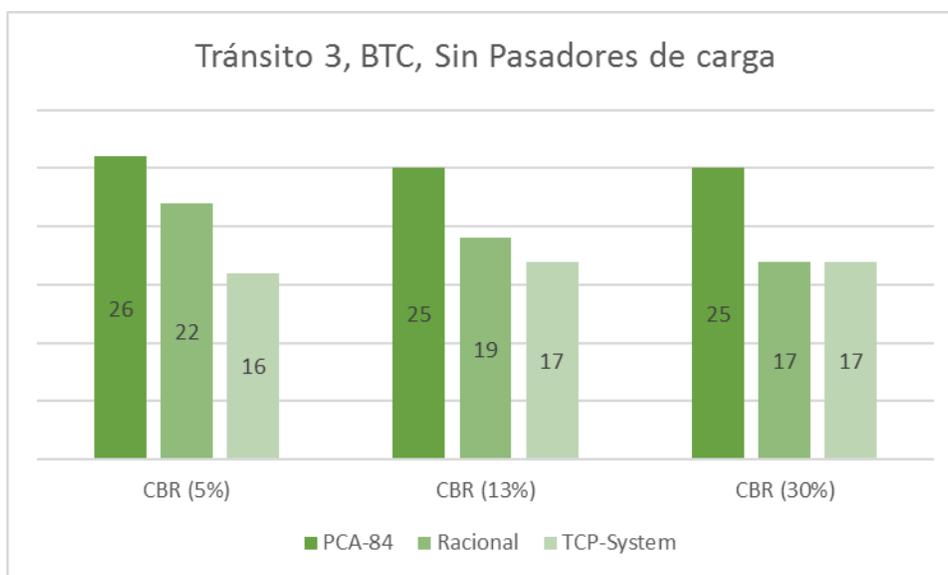


Figura 17. Comparación resultados NT3, BTC, SD

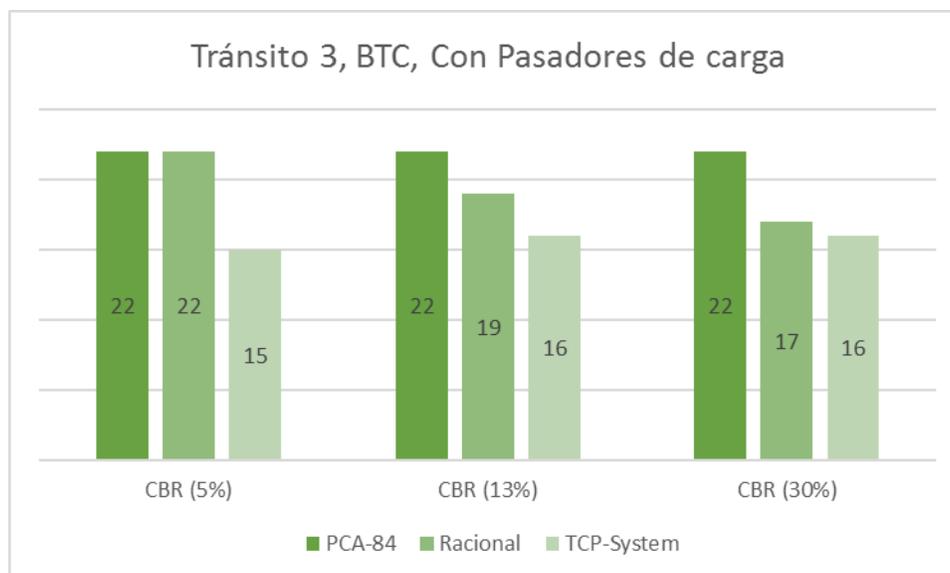


Figura 18. Comparación resultados NT3, BTC, D

En todos los resultados se puede observar de manera general que el método de diseño con menores espesores de losa fue el de TCP System seguido del Racional y por último el de PCA-84, aunque en la figura No. 17 vemos que para una condición de suelo con CBR 30% los resultados fueron iguales entre TCP System y Racional.

8.2 Análisis de resultados para el tránsito categoría 2.

A continuación, se muestra la tabla comparativa de los tres métodos de diseños y junto con sus graficas (tabla 25).

Tabla 25. Espesores de losa por los tres métodos para la categoría de tránsito NT2

TRÁNSITO 2												
Suelo	BASE GRANULAR						BASE ESTABILIZADA CON CEMENTO					
	SIN DOVELAS			CON DOVELAS			SIN DOVELAS			CON DOVELAS		
	PCA-84	Racional	TCP-System	PCA-84	Racional	TCP-System	PCA-84	Racional	TCP-System	PCA-84	Racional	TCP-System
CBR (5%)	24	23	17	24	21	15	23	21	15	21	21	13
CBR (13%)	23	20	15	23	18	13	22	18	15	20	18	13
CBR (30%)	23	18	14	22	17	13	22	16	15	20	16	14

Fuente: Autoría propia

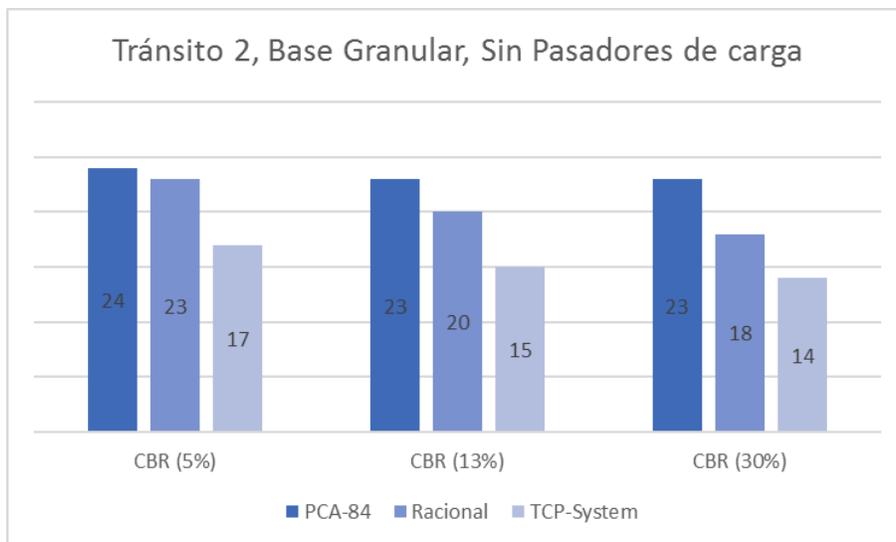


Figura 19. Comparación resultados NT2, BG, SD

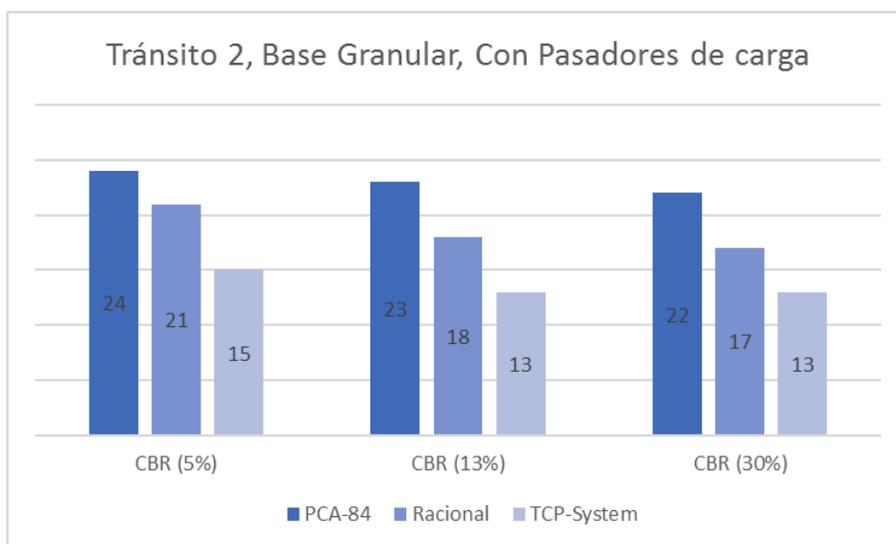


Figura 20. Comparación resultados NT2, BG, D

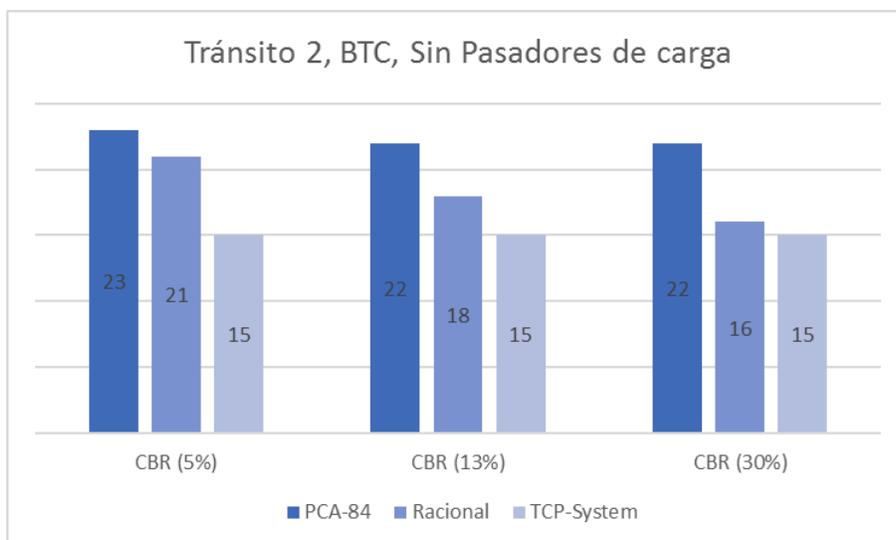


Figura 21. Comparación resultados NT2, BTC, SD

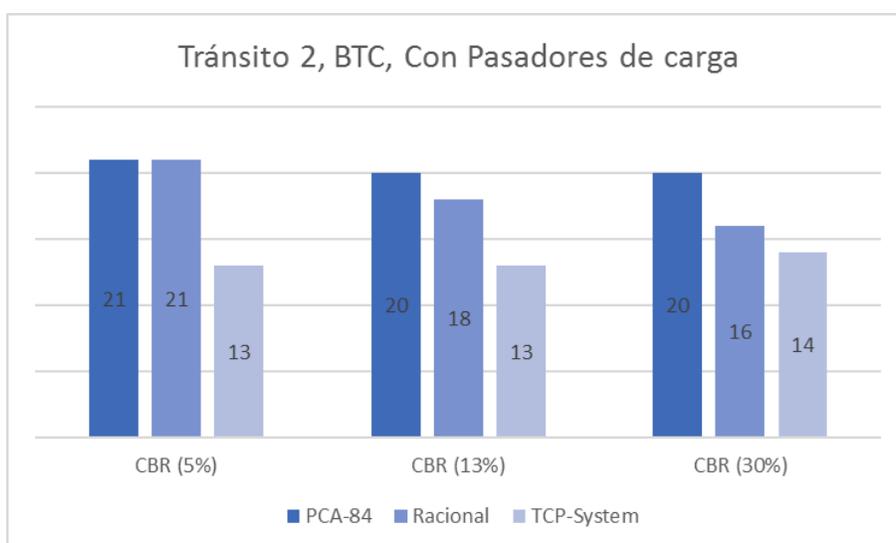


Figura 22. Comparación resultados NT2, BTC, D

En todos los resultados se puede observar de manera general que el método de diseño con menos espesores de losa fue el de TCP System seguido del Racional y por último el de PCA-84, aunque en la figura No. 22 vemos que para una condición de suelo con CBR 5% los resultados fueron iguales entre PCA-84 y Racional.

8.3 Análisis de resultados para el tránsito categoría 1.

A continuación, se muestra la tabla comparativa de los tres métodos de diseños y junto con sus graficas (tabla 26).

Tabla 26. Espesores de losa por los tres métodos para la categoría de tránsito NTI

TRÁNSITO 1												
Suelo	BASE GRANULAR						BASE ESTABILIZADA CON CEMENTO					
	SIN DOVELAS			CON DOVELAS			SIN DOVELAS			CON DOVELAS		
	PCA-84	Racional	TCP-System	PCA-84	Racional	TCP-System	PCA-84	Racional	TCP-System	PCA-84	Racional	TCP-System
CBR (5%)	22	20	14	22	18	12	20	18	13	20	18	12
CBR (13%)	21	17	13	21	15	12	19	16	13	19	16	12
CBR (30%)	21	15	13	21	14	12	19	13	13	19	13	12

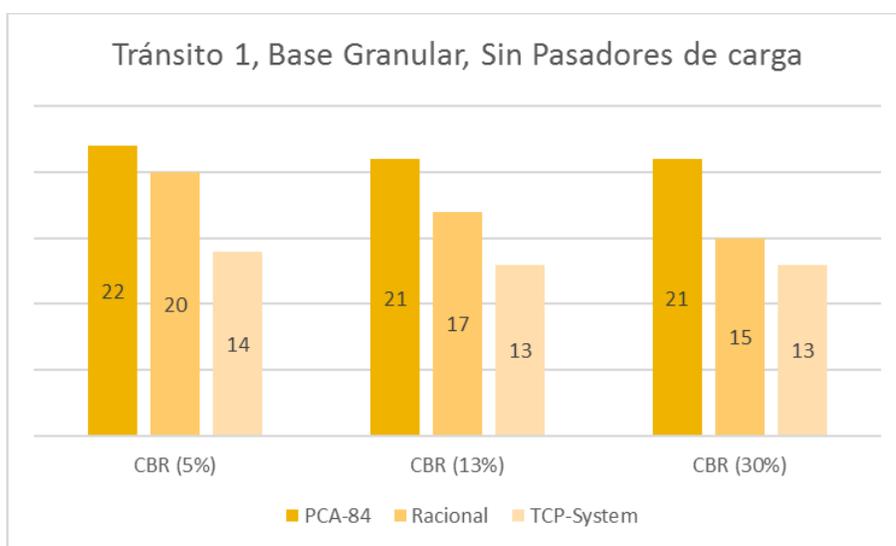


Figura 23. Comparación resultados NTI, BG, SD

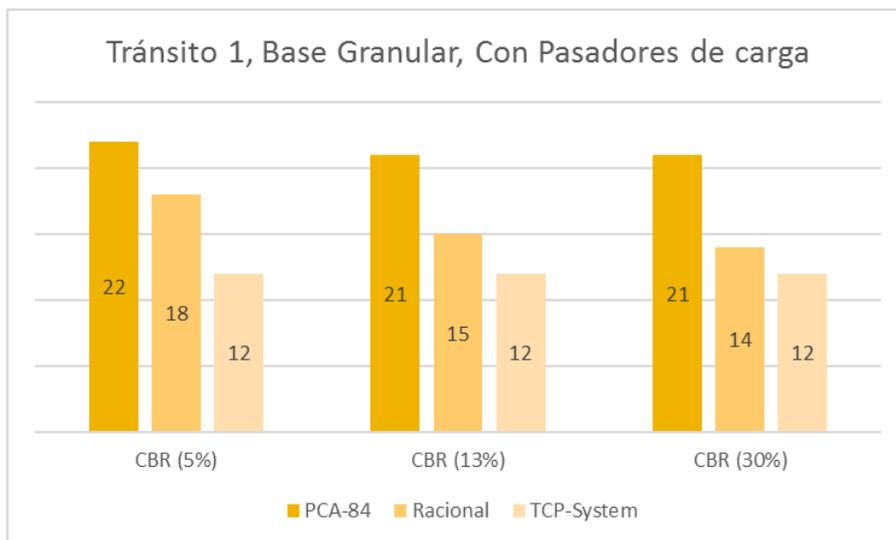


Figura 24. Comparación resultados NTI, BG, D

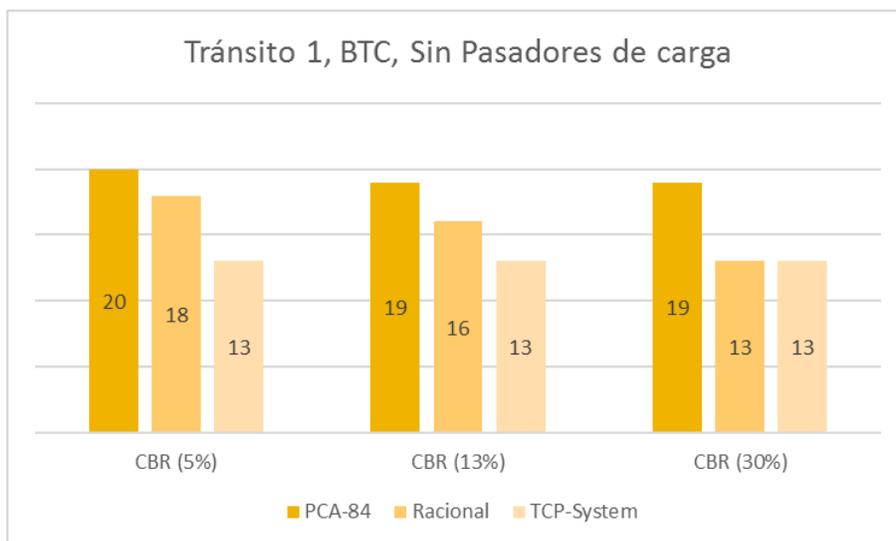


Figura 25. Comparación resultados NTI, BTC, SD

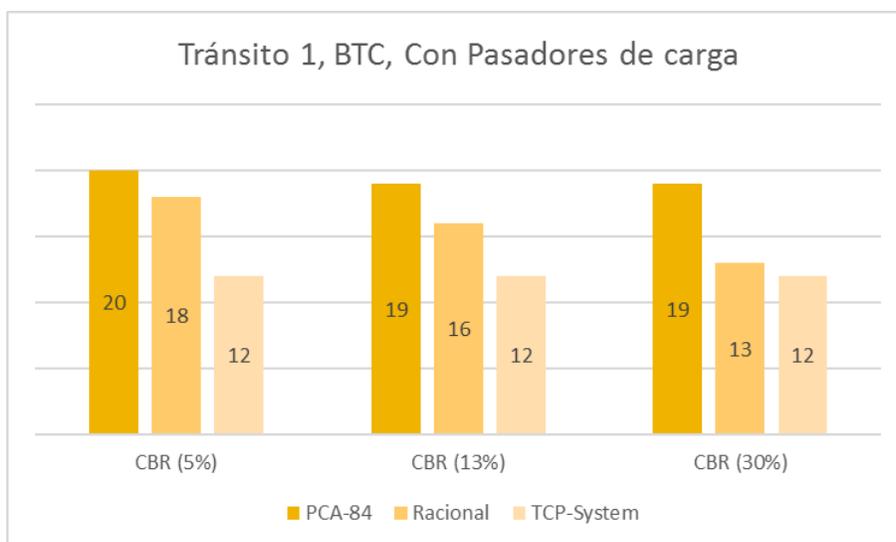


Figura 26. Comparación resultados NTI, BTC, D

Como en las categorías anteriores en los resultados se puede observar de manera general que el método de diseño con menos espesores de losa fue el de TCP System seguido del Racional y por último el de PCA-84, aunque en la figura No. 25 se puede ver que para una condición de suelo con CBR 30% los resultados fueron iguales entre TCP System y Racional.

9 Recomendaciones

Para tener una mejor precisión en los resultados, se habría necesitado realizar los conteos vehiculares con estaciones de pesaje, importantes para saber los pesos exactos de los vehículos por ejes, además con esto calibrar para la isla el Factor Daño (FD) por vehículo, y el coeficiente de agresividad media (CAM).

Debido al alto costo de una estación de pesaje, se recomienda al gobierno Departamental de la Isla, al INVIAS, o a la academia, realizar un estudio de tránsito con estación de pesaje, ya que no se cuenta con ninguno hasta el momento.

10 Conclusiones

Por el método de diseño de TCP System se encontró en los diseños en que la subrasante es de CBR 13% y 30%, que el mejorar la base de soporte con cemento (BTC), no conseguía una disminución en los espesores de la losa de concreto sí no por el contrario los aumentaba o los dejaba del mismo espesor, ver figura 27.

CBR	TCP SYSTEM											
	TRÁNSITO 3				TRÁNSITO 2				TRÁNSITO 1			
	BG		BTC		BG		BTC		BG		BTC	
	SD	D	SD	D	SD	D	SD	D	SD	D	SD	D
5	18	17	16	15	17	15	15	13	14	12	13	12
13	16	15	17	16	15	13	15	13	13	12	13	12
30	16	15	17	16	14	13	15	14	13	12	13	12

Figura 27. Comparación espesores BTC -BG

La razón es que las losas del pavimento se encuentran alabeadas en todo momento, con sus esquinas hacia arriba, aunque el alabeo sea mínimo, la diferencia de deflexión de la losa puede ser muy perjudicial para estas cuando hay una base muy rígida debajo. La escogencia de Bases tratadas con cemento aumenta el precio del proyecto y solo se debe considerar para evitar la erodabilidad de los materiales.

En el método de diseño de Racional IDU – Universidad de los andes, se encontró en los diseños en que se utiliza base tratada con cemento (BTC), el escoger pasadores de transferencia, no conseguía una disminución en los espesores de la losa de concreto, los dejaba del mismo, como sí no se colocaran los pasadores, ver figura 28.

RACIONAL IDU - Universidad de los Andes												
CBR	TRÁNSITO 3				TRÁNSITO 2				TRÁNSITO 1			
	BG		BTC		BG		BTC		BG		BTC	
	SD	D	SD	D	SD	D	SD	D	SD	D	SD	D
5	26	23	22	22	23	21	21	21	20	18	18	18
13	22	20	19	19	20	18	18	18	17	15	16	16
30	21	19	17	17	18	17	16	16	15	14	13	13

Figura 28. Comparación espesores SD-D para bases tratadas con cemento.

La razón de obtener el mismo espesor es debido al criterio de diseño, consiste en controlar que los esfuerzos tanto en la fibra inferior de la losa de concreto y de la BTC sean inferiores a los admisibles, se deben cumplir ambas condiciones, siendo más crítico en este tipo de estructura que se controlen los esfuerzos en la fibra inferior de la BTC, y los pasadores de carga no influyen en estos.

Por el método de diseño PCA-84 se encontró en los diseños donde el tránsito es bajo categoría NT1, que no se hace necesario la utilización de pasadores de carga, debido a que da los mismos espesores como si no se colocaran los pasadores como se ve en la figura 29.

PCA - 84													
CBR	TRÁNSITO 3				TRÁNSITO 2				TRÁNSITO 1				
	BG		BTC		BG		BTC		BG		BTC		
	SD	D	SD	D	SD	D	SD	D	SD	D	SD	D	
5	28	25	26	22	24	24	23	21	22	22	20	20	
13	27	24	25	22	23	23	22	20	21	→ 21	19	→ 19	
30	26	23	25	22	23	22	22	20	21	21	19	19	

Figura 29. Comparación espesores SD-D para NT1.

Esto se debe a que, en los bajos volúmenes de tránsito, el criterio de falla que predomina es el porcentaje de consumo por esfuerzo, no utilizar el pasador hace que el porcentaje de consumo de erosión aumente, pero manteniéndose por debajo del admisible que es 100%, lo que hace que no influya en la disminución del espesor de la losa de concreto.

En general, los resultados por la metodología PCA-84, son los de mayor espesor y esto se debe en parte, a que en la distribución del peso por eje se tomaron los mayores permitidos en Colombia; el mejorar la información sobre estaciones de pesaje, tal como se mencionó en las recomendaciones, conllevaría a disminuir los espesores en este método y por consiguiente en los otros dos, porque se calibraría el factor camión y el coeficiente de agresividad media.

El método racional IDU- Universidad de los andes, en sus resultados de espesores demostraron estar en medio de los tres métodos, acercándose mucho al TCP System en los tránsitos con bajos volúmenes tránsito (NT1), esta metodología de diseño ha sido ampliamente utilizada en la ciudad de Bogotá.

Los resultados mostrados en el capítulo 8 demuestran que la metodología de diseño en que se obtienen los espesores menores es la de TCP System, en todo caso, debido a que esta metodología esta patentada, en el momento de implementarla en territorio colombiano, el constructor o la entidad ejecutora deberá cancelar una tarifa por m² de acuerdo a la figura 30.

Espesor de diseño TCP	Sin fibra	8 cm	9 - 12 cm	13 - 15 cm	16 - 18 cm	> 18 cm
	Con fibra	7 - 8 cm	9 - 11 cm	12 - 14 cm	15 - 17 cm	> 17 cm
Tarifa en Chile (m2)		0,015 UF	0,025 UF	0,031 UF	0,035 UF	0,04 UF
Tarifa internacional (m2)		US\$ 0,7	US\$ 1,1	US\$ 1,4	US\$ 1,6	US\$ 1,8

Figura 30. Precios TCP System (TCPavements, 2017)

Sin embargo, disminuir el espesor del diseño en tan solo un centímetro, traería ahorros significativos en la isla debido a que el precio del concreto es muy elevado por las condiciones de importación de los materiales, el precio oficial (2017) en el Departamento del Archipiélago de San Andrés del m³ concreto MR 42 Kg/cm² es de \$1.733.850 A.I.U incluido, lo que sería unos US\$ 606 (TRM \$2.860).

Realizando la comparación entre los espesores de concretos entre las metodologías tal como se muestra en la tabla 27, tenemos una diferencia en espesores de mínimo de 6 cm, máximo 11 cm, con una media de 8 cm, esos 8 cm representarían un ahorro de US\$ 48.5, menos el valor de US\$1.4 correspondiente a patente para una losa de 15 cm de espesor, sería un ahorro total por m² de US\$ 47, siendo un ahorro del casi 8%.

Tabla 27. Diferencias de espesor metodologías PCA-84 y TCP System

Diferencia espesor PCA 84 - TCP (cm)					
Trá.	CBR	BG		BG	
		SD	D	SD	D
NT3	5	10	8	10	7
	13	11	9	8	6
	30	10	8	8	6
NT2	5	7	9	8	8
	13	8	10	7	7
	30	9	9	7	6
NT1	5	8	10	7	8
	13	8	9	6	7
	30	8	9	6	7

Fuente: Autoría propia

Además, esta tecnología de diseño TCP System, nunca ha sido implementada en la isla, por lo que no se conocen resultados de su eficiencia, lo que generaría cierta dificultad en materializarse.

11 Referencias

- AASHTO. (1993). *Guide for design of pavement structures*. Washington, U.S.A: American Association of State Highway and Transportation Officials.
- Cervantes, V., & Roester, J. (2009). *Performance of Concrete Pavements With Optimized Slab Geometry*. Illinois: University of Illinois.
- Chile, I. d. (2007). *Tramos de Prueba de Pavimento Delgado de Hormigon*. Santiago de Chile.
- Coronado, J. (2002). *Manual Centroamericano para diseño de Pavimentos*. Ciudad de Guatemala, Guatemala: SIECA.
- Covarrubias, J. P. (2012). Diseño de losas de hormigón con geometría optimizada. *Revista Ingeniería de Construcción*, 181-197.
- DURAVÍA. (15 de Junio de 2017). *Pavimentos Duravía*. Obtenido de <http://www.duravia.com.pe/blog/metodologia-de-diseno-pca-84/>
- ICPC. (2008). *Métodos de diseño*. Medellín: Instituto colombiano de productores de cemento.
- IDU & Universidad de los Andes. (2002). *Manual de diseño de Pavimentos para Bogotá*. Bogotá.
- INVIAS. (2005). *Manual de diseño de pavimentos de Concreto para vías con bajos, medios y altos volúmenes de tránsito*. Colombia.
- INVIAS. (2013). *Especificaciones Generales de construcción de Carreteras* .
- INVIAS. (2017). *Manual de Pavimentos asfálticos en vías con bajos volúmenes de tránsito*.
- PCA. (1984). *Thickness design for concrete highway and street pavements*. Illinois, U.S.A: Portland Cement Association.
- Reyes, F. A. (2012). *Diseño Racional de Pavimentos*. Bogotá: CEJA.

- Rivera, G. (2016). *Concreto Simple*. Popayan: Unicauca.
- Rondón, H. A., & Reyes, F. A. (2015). *Pavimentos materiales, construcción y diseño*. Bogotá, Colombia: ECOE Ediciones.
- Sánchez, F., & Campagnoli, S. X. (2016). *Pavimentos asfálticos de carreteras*. Bogotá, Colombia: Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.
- SHELL INTERNATIONAL PETROLEUM COMPANY LIMITED. (1985). *Addendum to the shell pavement design manual*. London: SHELL.
- Taylor, P., Kosmatka, S., & Voigt, G. (2007). *Integrated materials and construction practices for concrete pavement*. Washington, U.S.A: FHWA.
- TCPavements. (2015). *Documentación y guía de diseño optipave 2.0.2*. Santiago de Chile, Chile.
- TCPavements. (16 de Junio de 2017). *OptiPave 2*. Obtenido de <http://www.tcpavements.cl/esp/tarifas>
- WSDOT. (2006). *Pavement guide interactive*. Washington: Washington State Department of Transportation.
- Yang, H. (2004). *Pavement analysis and design*. NJ, U.S.A: Pearson Prentice Hall.